



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Programa de Posgrado

Tesis

**UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO HEC-HMS
PARA SIMULAR EL PROCESO LLUVIA-ESCURRIMIENTO ANTE CAMBIOS
DE COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO,
CONSIDERANDO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO
EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS**

**que para obtener el grado de
Doctorado en Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta

Isaías Tranquillino López Hernández

**Tutor: Dr. René Lobato Sánchez
Cotutor: Dr. Martín Dagoberto Mundo Molina**



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Programa de Posgrado

Tesis

**UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO HEC-HMS
PARA SIMULAR EL PROCESO LLUVIA-ESCURRIMIENTO ANTE CAMBIOS
DE COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO,
CONSIDERANDO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO
EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS**

**que para obtener el grado de
Doctorado en Ciencias y Tecnología del Agua**

**presenta
Isaías Tranquilino López Hernández**

**Tutor: Dr. René Lobato Sánchez
Cotutor: Dr. Martín Dagoberto Mundo Molina**

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada "UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO HEC-HMS PARA SIMULAR EL PROCESO LLUVIA-ESCURRIMIENTO ANTE CAMBIOS DE COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO, CONSIDERANDO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

ISAÍAS TRANQUILINO LÓPEZ HERNÁNDEZ

Jiutepec, Morelos ; a 26 de junio de 2012

Lugar y fecha

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'I' followed by a series of loops and a horizontal line extending to the right.

Firma



DEDICATORIA

Con mucho cariño a mi esposa Carmelita, pues con su invaluable apoyo fue posible llevar a cabo este proyecto.

Especialmente a mis hijos: Oscar Leví, Isaías Edwin y Alan Jesser.

A mis padres: Narciso y Margarita

A mis hermanos: Virgilio, Catalina, Laura, Saturnino, Federico y Jaime



AGRADECIMIENTOS

A mi honorable jurado de examen de grado:

Dr. René Lobato Sánchez
Dr. Martín Dagoberto Mundo Molina
Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco
Dr. Martín José Montero Martínez
Dr. Carlos Patiño Gómez

Gracias por su guía en esta difícil pero muy interesante aventura, por sus consejos y motivación en los momentos difíciles. Gracias por su amistad.

"Si he logrado ver más lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes"

Isaac Newton

A los funcionarios de la CONAGUA que apoyaron este proyecto, especialmente al Dr. Felipe Arreguín Cortés y al Ing. Raúl Saavedra Horita.

Al equipo del Programa de Postgrado del IMTA: Dr. Alejandro Sainz, Ing. Jesús Figueroa, Alejandrina de Los Santos y Olivia.

A mis amigos y compañeros de la Comisión Nacional del Agua que de una u otra forma apoyaron la integración de esta tesis, especialmente a David, Corazón, Dolores, Víctor, Sonia, Yrma, María de los Angeles, José Luis, Lourdes, Manuel de Jesús, Eduardo, Ivet y Daniel.

A Pedro, Cecilia y Sofía. Gracias por su confianza.

"El agradecimiento es la parte principal de un hombre de bien"
Francisco de Quevedo



CONTENIDO

	Página
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABLAS	xix
ANEXOS	xxi
RESUMEN	xxv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Objetivo general.....	7
1.3. Objetivos específicos.....	7
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. Modelos hidrológicos.....	9
2.1.1. Modelos hidrológicos agregados.....	10
2.1.2. Modelos hidrológicos distribuidos y semidistribuidos.....	11
2.1.3. El modelo HEC-HMS.....	16
2.1.3.1. El hidrograma unitario.....	18
2.1.3.2. El método del número de curva.....	22
2.2. El cambio climático global.....	30
2.2.1. Los modelos de circulación general.....	32
2.2.2. Escenarios de cambio climático del IPCC.....	33
2.2.3. Escenarios regionales de cambio climático.....	36
2.2.4. Estudios de cambio climático en México.....	36
2.2.5. Regionalización de escenarios climáticos para México.....	40
2.3. Modelación hidrológica ante escenarios de cambio climático.....	42
3. ZONA DE ESTUDIO	45
3.1. Ubicación de la zona de estudio.....	45
3.2. Geología y topografía.....	48



	Página
3.3. Características hidrológicas.....	49
3.4. Clima.....	50
3.5. Tipos de suelo.....	51
3.6. Vegetación y uso del suelo.....	52
3.7. Actividades agropecuarias.....	53
4. METODOLOGÍA.....	55
4.1. Obtención y procesamiento de datos.....	56
4.1.1. Datos de precipitación.....	56
4.1.2. Datos de caudales.....	57
4.1.3. Datos de NDVI.....	57
4.2. Análisis de la información.....	58
4.2.1. Análisis de la precipitación.....	58
4.2.1.1. Deducción de datos faltantes.....	59
4.2.1.2. Bases de datos de precipitación.....	59
4.2.2. Análisis del NDVI.....	61
4.2.2.1. Análisis de Imágenes de Satélite.....	61
4.2.2.2. Deducción de datos faltantes.....	63
4.3. Asociación del NDVI con la Precipitación.....	64
4.3.1. Delimitación de la cuenca del río Huixtla y definición de subcuencas.....	64
4.3.2. Delimitación de la cuenca del río Huixtla en tres zonas hidrológicas.....	65
4.3.3. Análisis de la precipitación para los meses antecedentes al NDVI.....	66
4.3.4. Análisis del NDVI por zonas hidrológicas.....	71
4.3.5. Correlación Precipitación-NDVI en las tres zonas hidrológicas.....	73
4.4. Asociación del NDVI con el número de curva.....	75
4.4.1. Subcuencas de las tres zonas de la cuenca del río Huixtla.....	76
4.4.2. Análisis del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo.....	77
4.4.3. Estimación de los números de curva.....	81
4.4.4. Análisis de números de curva para el periodo 1970-2009.....	84
4.5. Implementación del modelo semidistribuido HEC-HMS a la cuenca del río Huixtla.....	87
4.5.1. El modelo HEC-HMS.....	87
4.5.1.1 Componentes del modelo HEC-HMS.....	88



	Página
4.5.2. Construcción del modelo.....	91
4.5.2.1. Modelo de cuenca del río Huixtla.....	92
4.5.2.2. Modelo meteorológico de la cuenca del río Huixtla.....	93
4.5.3. Calibración del modelo.....	95
4.5.3.1. El método de Muskingum.....	96
4.5.3.2. Metodología de calibración.....	99
4.6. Simulación del proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo, considerando escenarios de cambio climático.....	107
4.6.1. Información utilizada en el modelo.....	108
4.6.1.1. Escenarios de precipitación.....	108
4.6.1.2. Escenarios de número de curva	111
4.6.2. Simulaciones del modelo para diversos escenarios.....	111
4.6.2.1. Escenario 2012.....	112
4.6.2.2. Escenario 2020.....	113
4.6.2.3. Escenario 2030.....	114
4.6.2.4. Escenario 2040.....	115
4.6.2.5. Escenario 2050.....	116
4.6.2.6. Resumen de los escenarios.....	117
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	119
5.1. Variación del gasto pico.....	119
5.2. Variación del volumen de escurrimiento.....	121
5.3. Análisis de resultados.....	123
6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	127
6.1. Proceso metodológico.....	128
6.2. Análisis de resultados.....	130
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	135
7.1. Conclusiones.....	135



	Página
7.2. Recomendaciones.....	137
BIBLIOGRAFÍA.....	141
ANEXOS.....	165

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Desarrollo de un diagrama unitario (Levi, 1996).....	19
2. Hidrograma unitario sintético de forma triangular (Mockus, 1957).....	20
3. a) Hidrograma adimensional del SCS; b) Hidrograma unitario triangular (Chow et al., 1994).....	21
4. Esquema del modelo conceptual del número de curva (Dal-Ré, 2003).....	23
5. Escenarios de emisiones GEI y de temperatura y nivel del mar (IPCC, 2001).....	35
6. Localización de la región Frontera Sur (CNA, 2012).....	45
7. Regiones hidrológicas de la región Frontera Sur (CNA, 2012).....	46
8. Ubicación de la cuenca del río Huixtla (CNA, 2004).....	47
9. Río Huixtla con sus principales afluentes.....	50
10. Climas predominantes en la cuenca del río Huixtla (INEGI, 1980).....	51
11. Tipos de suelo en la cuenca del río Huixtla (INEGI, 2000).....	52
12. Vegetación y uso de suelo en la cuenca del río Huixtla (INEGI, 2002).....	53
13. Diagrama general de la metodología del estudio.....	55
14. Ubicación de las estaciones climatológicas de la región Costa de Chiapas.....	56
15. Hietograma de la precipitación media anual 1970-2005 para la Costa de Chiapas.	60
16. Hietograma de la precipitación media mensual 1970-2005 para la Costa de Chiapas.....	60
17. Imagen Landsat TM.....	62
18. Imagen con los valores de NDVI.....	62
19. Serie de NDVI para el periodo 1970-2009 de la cuenca del río Huixtla.....	63
20. Delimitación de la cuenca y definición de subcuencas para la cuenca del río Huixtla.....	64
21. Delimitación de la cuenca del río Huixtla en tres zonas hidrológicas.....	65
22. Mapa de isoyetas de precipitación de la cuenca del río Huixtla para los seis meses antecedentes al NDVI del año 2000.....	67
23. Mapas de isoyetas de precipitación de la cuenca alta, media y baja del río Huixtla para los seis meses antecedentes al NDVI del año 2000.....	68



Figura	Página
24. Precipitación media para los cuatro, cinco y seis meses antecedentes al NDVI correspondiente al año 2000, en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla.....	69
25. Precipitación media anual de los seis meses antecedentes al NDVI, en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla (Septiembre-Febrero).....	70
26. Precipitación media anual de los cinco meses antecedentes al NDVI, en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla (Octubre-Febrero).....	70
27. Precipitación media anual de los cuatro meses antecedentes al NDVI, en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla (Noviembre-Febrero).....	71
28. Valores del NDVI para el periodo 1970-2005 en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla.....	72
29. Valores del NDVI para el año de 1975 en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla.....	72
30. Correlación P-NDVI en la cuenca alta, media y baja para seis meses antecedentes al NDVI.....	73
31. Correlación P-NDVI en la cuenca alta, media y baja para cinco meses antecedentes al NDVI.....	74
32. Correlación P-NDVI en la cuenca alta, media y baja para cuatro meses antecedentes al NDVI.....	75
33. Delimitación en subcuencas de la zona alta, media y baja de la cuenca del río Huixtla.....	76
34. Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca alta del río Huixtla.....	77
35. Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca media del río Huixtla...	78
36. Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca baja del río Huixtla.....	79
37. Cambio anual de uso del suelo y cobertura vegetal en la cuenca alta del río Huixtla en el periodo 1970-2009 (en %)......	80



Figura	Página
38. Cambio anual de uso del suelo y cobertura vegetal en la cuenca media del río Huixtla en el periodo 1970-2009 (en %).	80
39. Cambio anual de uso del suelo y cobertura vegetal en la cuenca baja del río Huixtla en el periodo 1970-2009 (en %).	81
40. Mapa de la distribución del grupo hidrológico de suelo de la cuenca del río Huixtla (INEGI, 2000).	83
41. Mapa de pendientes de la cuenca del río Huixtla, extraído del MDE escala: 1:50,000 (INEGI, 2003).	83
42. Comportamiento del NC para las seis subcuencas de la cuenca alta del río Huixtla.	85
43. Comportamiento del NC para las cuatro subcuencas de la cuenca media del río Huixtla.	86
44. Comportamiento del NC para la cuenca baja del río Huixtla.	86
45. Esquema de las diversas fases del programa HEC-HMS (Sánchez, 2008).	88
46. Componentes básicos de un proyecto en el modelo HEC-HMS.	89
47. Representación de los elementos hidrológicos (USACE, 2010b).	90
48. Modelo de cuenca del río Huixtla.	93
49. Ubicación de las estaciones meteorológicas.	94
50. Almacenamientos por prisma y por cuña en un tramo de cauce.	97
51. Esquema de calibración de un modelo en el HEC-HMS (USACE, 2000).	100
52. Comparación del hidrograma calculado por el modelo y el observado en la estación hidrométrica para la tormenta ocurrida del 13 al 14 de septiembre de 1980. ...	102
53. Comparación del hidrograma calculado por el modelo y el observado en la estación hidrométrica para la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981. ...	104
54. Comparación del hidrograma calculado por el modelo y el observado en la estación hidrométrica para la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981. ...	105
55. Comparación del hidrograma calculado por el modelo y el observado en la estación hidrométrica para la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987.	106



Figura	Página
56. Anomalías de precipitación del mes de septiembre para el periodo 2010-2050..... correspondiente al escenario A1b (mm/día) (Montero, et al, 2008a).....	108
57. Selección de anomalías de precipitación para la cuenca del río Huixtla derivadas del estudio de regionalización de proyecciones climáticas en México.....	109
58. Precipitaciones diarias del mes de septiembre para el escenario A1b del año 2050 en las estaciones Finca Argovia y Belisario Domínguez.....	110
59. Precipitaciones diarias del mes de septiembre para el escenario A1b del año 2050 en las estaciones Finca Germania y Huixtla.....	110
60. Precipitaciones diarias del mes de septiembre para el escenario A1b del año 2050 en las estaciones Finca San Cristóbal y Finca La Victoria.....	110
61. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2012, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	112
62. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2020, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	113
63. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2030, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	114
64. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2040, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	115
65. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2050, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	116
66. Comportamiento del gasto pico en la cuenca alta para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	120
67. Comportamiento del gasto pico en la cuenca media para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	120
68. Comportamiento del gasto pico en la cuenca baja para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	121



Figura	Página
69. Comportamiento del volumen acumulado en la cuenca alta para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	121
70. Comportamiento del volumen acumulado en la cuenca media para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	122
71. Comportamiento del volumen acumulado en la cuenca baja para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	122
72. Resultados (en %) del análisis de sensibilidad con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ del NC y de la precipitación (HP) para el gasto pico y el volumen de la cuenca alta de los años 2009 y 2020.....	130
73. Resultados (en %) del análisis de sensibilidad con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ del NC y de la precipitación (HP) para el gasto pico y el volumen de la cuenca media de los años 2009 y 2020.....	131
74. Resultados (en %) del análisis de sensibilidad con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ del NC y de la precipitación (HP) para el gasto pico y el volumen de la cuenca baja de los años 2009 y 2020.....	132



LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Tabla de Mockus, selección del número de curva para condiciones medias de humedad (Aparicio, 1996).....	28
2. Ajuste del NC por las condiciones de AMC (Aparicio, 1996).....	28
3. Observaciones importantes en la estimación de los NC.....	29
4. Relación de CGCM utilizados en el estudio de regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México (Montero et al, 2008).....	41
5. Estudios sobre modelación hidrológica ante escenarios de cambio climático.....	42
6. Población en la región de estudio en habitantes (INEGI, 2010b).....	48
7. Clasificación de suelos según su grupo hidrológico (Aparicio, 1996).....	79
8. Distribución de los grupos hidrológicos de suelo en la cuenca del río Huixtla.....	82
9. Descripción de los elementos hidrológicos (USACE, 2010a).....	90
10. Descripción de los Métodos incluidos en el modelo meteorológico (USACE, 2010a).....	91
11. Características de las subcuencas del modelo de la cuenca del río Huixtla.....	92
12. Localización geográfica de las estaciones meteorológicas.....	94
13. Distribución de lluvias en intervalos de tres horas (CNA, 1987).....	95
14. Criterios de selección del método de tránsito de avenidas.....	97
15. Tormentas utilizadas para la calibración del modelo (CNA, 2008a).....	101
16. Lluvias de la tormenta ocurrida del 13 al 14 de septiembre de 1980 (mm).....	101
17. Gastos de la tormenta ocurrida del 13 al 14 de septiembre de 1980 (CNA, 2008a).....	101
18. Resumen del K de Muskingum para la tormenta ocurrida 13 al 14 de septiembre de 1980 (hr.).....	102
19. Resultados de la calibración del modelo para la tormenta ocurrida del 13 al 14 de septiembre de 1980.....	102
20. Lluvias de la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981 (mm).....	103



Tabla	Página
21. Gastos de la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981 (CNA, 2008a).....	103
22. Resumen del K de Muskingum para la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981 (hr).....	103
23. Resultados de la calibración del modelo para la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981.....	104
24. Lluvias de la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981 (mm).....	104
25. Gastos de la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981 (CNA, 2008a).....	105
26. Resumen del K de Muskingum para la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981 (hr.).....	105
27. Resultados de la calibración del modelo para la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981.....	105
28. Lluvias de la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987 (mm).....	106
29. Gastos de la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987 (CNA, 2008a).....	106
30. Resumen del K de Muskingum para la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987 (hr.).....	106
31. Resultados de la calibración del modelo para la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987.....	107
32. Resumen del K de Muskingum calibrado para las tormentas analizadas (hr).....	107
33. Simulaciones del proceso lluvia-escurrimiento en la cuenca del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.....	117
34. Valores de numero de curva con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ para el año 2009..	128
35. Valores de precipitación con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ para el año 2009.....	129
36. Valores de numero de curva con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ para el año 2020..	129
37. Valores de precipitación con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ para el año 2020.....	129



ANEXOS

Anexo	Página
A. Hietogramas de precipitación media anual en las estaciones del proyecto.....	165
A1. Hietograma de precipitación media anual en la estación Argovia para el periodo 1970-2005.....	165
A2. Hietograma de precipitación media anual en la estación Belisario Domínguez para el periodo 1970-2005.	165
A3. Hietograma de precipitación media anual en la estación Huixtla para el periodo 1970-2005.....	166
A4. Hietograma de precipitación media anual en la estación Finca La Victoria para el periodo 1970-2005.	166
A4. Hietograma de precipitación media anual en la estación Finca La Victoria para el periodo 1970-2005.	167
A5. Hietograma de precipitación media anual en la estación Finca Germania para el periodo 1970-2005.	167
A6. Hietograma de precipitación media anual en la estación Finca San Cristóbal para el periodo 1970-2005.	167
B. Hietogramas de precipitación media mensual en las estaciones del proyecto.....	168
B1. Hietograma de precipitación media mensual en la estación Argovia para el periodo 1970-2005.	168
B2. Hietograma de precipitación media mensual en la estación Belisario Domínguez para el periodo 1970-2005.	168
B3. Hietograma de precipitación media mensual en la estación Huixtla para el periodo 1970-2005.	169
B4. Hietograma de precipitación media mensual en la estación Finca La Victoria para el periodo 1970-2005	169
B5. Hietograma de precipitación media mensual en la estación Finca Germania para el periodo 1970-2005.	170



Anexo	Página
B6. Hietograma de precipitación media mensual en la estación Finca san Cristóbal para el periodo 1970-2005.	170
C. Hietogramas de precipitación media diaria para el mes de septiembre en las estaciones del proyecto.....	171
C1. Hietograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Argovia para el periodo 1970-2005.	171
C2. Hietograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Belisario Domínguez para el periodo 1970-2005.	171
C3. Hietograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Huixtla para el periodo 1970-2005.	172
C4. Hietograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Finca La Victoria para el periodo 1970-2005.	172
C5. Hietograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Finca Germania para el periodo 1970-2005.	173
C6. Hietograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Finca San Cristóbal para el periodo 1970-2005.	173
ANEXO D. Mapas de valores anuales del NDVI para la cuenca del río Huixtla para los años 1970, 1980, 1990, 2000, 2005 y 2009.	174
Anexo D1. Mapa del NDVI para el año 1970.....	174
Anexo D2. Mapa del NDVI para el año 1980.....	174
Anexo D3. Mapa del NDVI para el año 1990.....	175
Anexo D4. Mapa del NDVI para el año 2000.....	175
Anexo D5. Mapa del NDVI para el año 2005.....	176
Anexo D6. Mapa del NDVI para el año 2009.....	176
ANEXO E. Mapas de Isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI para los años 1970, 1980, 1990, 2000 y 2005.....	177
Anexo E1. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 1970.....	177
Anexo E2. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 1980.	178



Anexo	Página
Anexo E3. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 1990.	180
Anexo E4. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 2000.	181
Anexo E5. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 2005.	183



RESUMEN

En esta tesis doctoral se presenta una metodología para implementar un modelo hidrológico semidistribuido que incorpora anomalías de precipitación producto de la aplicación de técnicas de reducción de escala para simular escenarios de cambio climático ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca del río Huixtla, en el estado de Chiapas. La cuenca de estudio está ubicada en la costa del estado de Chiapas, es una zona caracterizada por altas precipitaciones, mayores de 3,300 mm anuales, distribuidas de manera irregular tanto espacial como temporalmente, con presencia frecuente de eventos hidrometeorológicos extremos y que históricamente ha estado sujeta a un intenso cambio de uso del suelo y pérdida de la cobertura vegetal.

La información histórica de la precipitación fue obtenida del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC III) y de los datos existentes en la Comisión Nacional del Agua (CNA). Se hizo necesario rellenar datos faltantes de las series en las estaciones con información de lluvia no registrada y se elaboraron las bases de precipitación anual, mensual y diaria para todas las estaciones.

Se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS para estimar y transitar los hidrogramas de escurrimiento en la cuenca, para lo cual se usaron los datos históricos y las anomalías de precipitación y se calibró el modelo con los gastos observados en la estación hidrométrica ubicada a la salida de la cuenca del río Huixtla. La caracterización hidrológica de la cuenca se realizó mediante el procesamiento del Modelo Digital de Elevación (MDE) de INEGI.

Para determinar los Números de Curva (NC) que requiere el modelo se utilizó el método del Soil Conservation Service (SCS). Este Método convierte en lluvia de escurrimiento superficial utilizando el número de la curva que se deriva de las características de las cuencas hidrográficas y de la lluvia antecedente. Para aplicar este método fue necesario realizar el álgebra de mapas, a partir de cartas de edafología, de cobertura vegetal y uso de suelo y del mapa de pendientes extraído del MDE. El análisis de cobertura vegetal y uso del suelo para los demás años del periodo se complementó con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), cuyos valores se determinaron a partir de imágenes de satélite.

Se construyó el modelo de la cuenca en el programa HEC-HMS con once subcuencas, considerando principalmente las características fisiográficas y el funcionamiento hidráulico de la cuenca, así como los valores de los NC. El sistema interactúa por medio de tres elementos principales: Modelo de cuenca, Modelo meteorológico y Especificaciones de control. Con base a la información requerida para alimentar al modelo HEC-HMS, para calcular la distribución espacial de la lluvia sobre la cuenca se utilizó el método de los Polígonos de Thiessen, con datos de seis estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca de estudio y en cuencas vecinas.

La calibración del modelo se hizo con el optimizador del HEC-HMS para el parámetro K de Muskingum, realizando corridas para cuatro tormentas con lluvias de veinticuatro horas o más. Las lluvias fueron suministradas en el modelo para intervalos de distribución de tres horas, se calculó el tránsito del hidrograma generado en las subcuencas a través de la longitud del cauce principal hasta llegar a la salida de la cuenca. Finalmente se hizo la comparación de los hidrogramas simulados con los hidrogramas observados según los datos de gastos del Banco de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), considerando un error de $\pm 10\%$.

Para alimentar el modelo se relacionaron datos de variables climatológicas y de cambio de cobertura y uso del suelo con un horizonte de planeación al año 2050 para las once subcuencas modeladas. Las anomalías de precipitación se tomaron del estudio *“Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México”* (Montero et al., 2008). Con el modelo calibrado se simuló escenarios del proceso lluvia-escorrentía para el mes de septiembre considerando que históricamente ha sido el mes más lluvioso de la cuenca. Las simulaciones se realizaron para los escenarios A1B del IPCC, para los años 2012, 2020, 2030, 2040 y 2050 en la zona alta, media y baja de la cuenca. Para estimar la incertidumbre de las salidas del modelo asociado con el cambio climático, se realizó el análisis de sensibilidad de algunos parámetros como el NC y la precipitación y se estimó su grado de incertidumbre respecto al gasto pico y el volumen acumulado.

De acuerdo a los resultados de los escenarios, se observa que la cuenca alta y media serán las más afectadas por los impactos de las variables simuladas, ya que presentarán los mayores rangos de variación: la cuenca alta presentará 7.5% en el gasto pico y 13.1% en el volumen; y la cuenca media presentará una variación en el gasto pico de -6% a 1% y en el volumen de -8%



a 2%. De las dos variables simuladas, el volumen es el que producirá el mayor impacto en la cuenca.

Del análisis de sensibilidad del modelo, se concluye que el gasto pico y el volumen son sensibles ante variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ de la precipitación y del NC. Para variaciones de los parámetros analizados, se debe poner especial atención en la estimación de la precipitación, ya que el gasto pico y el volumen varían proporcionalmente a la variación indicada en la precipitación para NC mayores de 90, sin embargo, para valores de NC menores de 90, el gasto pico y el volumen comienzan a crecer entre 1% y 2% en proporción a la variación indicada en la precipitación. Por lo que se concluye que la cuenca del río Huixtla es más sensible ante cambios en la precipitación que ante cambios en el NC.

Con esta tesis doctoral se concluye que, si es posible aplicar la metodología propuesta consistente en asociar principalmente variables como la precipitación, el NC y el NDVI, para implementar el modelo semidistribuido HEC-HMS con el fin de simular el proceso lluvia-escorrimento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo considerando escenarios de cambio climático, y aportar elementos importantes para el desarrollo de nuevas líneas de investigación y de la estrategia de adaptación en una cuenca pequeña como es la del río Huixtla.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se ha vuelto de interés público, un tema que hasta hace algunos años era solo de relevancia para los científicos: el calentamiento global del planeta. Una de las principales hipótesis sobre los efectos antropogénicos y su relación con el cambio climático global es que a partir de la revolución industrial, se ha incrementado la emisión a la atmósfera de gases que producen el efecto de invernadero a consecuencia del uso y la transformación de la energía y el uso de combustibles fósiles, principalmente. Esto ha provocado [según la hipótesis más relevante del IPCC] incremento en la temperatura media global de la Tierra, dada la correlación entre una mayor presencia de gases de invernadero y el incremento de la temperatura media global, que obedece a una ley sencilla: a mayor cantidad de gases de invernadero mayor atrapamiento de energía, que a su vez origina mayor calentamiento (Mundo et al, 1993).

Debido a la importancia del problema del cambio climático mundial, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon en 1988 el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). El IPCC es un órgano científico-técnico intergubernamental que tiene la función de analizar en forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo. En su último informe el IPCC destaca que *“el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar”* (IPCC, 2007a).

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) desarrolló un proyecto de cambio climático que abordó el efecto de este en la agricultura, en la calidad del agua y en el ciclo hidrológico. En materia del ciclo hidrológico se trabajó por un lado en la regionalización de los Modelos de Circulación General Acoplados (CGCM) para precipitación y temperatura que participaron en el cuarto reporte del IPCC, y análisis de variables meteorológicas de huracanes; y por otro lado en la identificación de las cuencas de aplicación y los modelos hidrológicos distribuidos a utilizar para la transformación lluvia-escorrentía. En tanto que en la presente tesis se aborda de manera conjunta diferentes componentes del ciclo hidrológico, es decir: efecto de cambio en los

patrones de lluvia, su relación con el escurrimiento y este a su vez con los procesos de cambio de cobertura vegetal y uso del suelo, ante escenarios de cambio climático.

El cambio de la cobertura vegetal asociado con la expansión de la agricultura, la urbanización y la deforestación tienen una importante influencia en los procesos hidrológicos, que es necesario investigar tanto en cuencas pequeñas como a nivel regional (Sahagian, 2000). Una forma de evaluar la influencia de los cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo en el comportamiento hidrológico de una cuenca son los modelos hidrológicos distribuidos y semidistribuidos. De acuerdo a Neilson (1995) y Najjar (1999) los modelos hidrológicos distribuidos se han utilizado para evaluar la escorrentía, la infiltración, la recarga de acuíferos, la relación lluvia-escurrimiento ante escenarios de cambio climático, o los efectos de cambio de uso del suelo en el comportamiento hidrológico de una cuenca, en amplias regiones climáticas. Sin embargo estos modelos no han sido utilizados para simular el proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo con escenarios de cambio climático en cuencas mexicanas. Lo anterior motiva la necesidad de desarrollar una metodología que permita simular el proceso lluvia-escurrimiento con cambios en la cobertura vegetal y uso de suelo ante escenarios de cambio climático en cuencas pequeñas de México, utilizando datos producto de la aplicación de técnicas de downscaling.

De aquí, el objetivo de este trabajo fue conocer y analizar el comportamiento del proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso de suelo considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huixtla, Chiapas.

Para facilitar al lector la comprensión del presente trabajo, la tesis se estructuró con siete capítulos. En el capítulo 1 se realizó una breve introducción al tema abordando los antecedentes, el objetivo general y los objetivos específicos. En el capítulo 2 se llevó a cabo la revisión bibliográfica de los modelos hidrológicos, su clasificación en modelos hidrológicos agregados y modelos hidrológicos distribuidos y semidistribuidos, las características del modelo hidrológico HEC-HMS, el hidrograma unitario, el método del NC y sus limitaciones, el cambio climático global, los modelos de circulación general, los escenarios regionales de cambio climático, la regionalización de escenarios climáticos para México, los estudios de cambio climático en México y la utilización de la modelación hidrológica en el cambio climático.



En el capítulo 3 se hizo una descripción de las características generales, ubicación, geomorfología y topografía, clima, tipo de suelo, actividades agropecuarias, vegetación y uso de suelo, hidrología y la descripción política y demográfica de la zona de estudio.

De acuerdo a los objetivos del estudio, en el capítulo 4 se presentó los pasos de la metodología utilizada: la obtención y procesamiento de datos, el análisis de la información, la correlación del NDVI con la precipitación, la asociación del NDVI con el número de curva, la implementación del modelo semidistribuido HEC-HMS, las simulaciones del proceso lluvia escurrimiento ante cambio de cobertura vegetal y uso del suelo, considerando escenarios de cambio climático. En este capítulo se obtuvieron y procesaron datos de precipitación, NDVI, cobertura vegetal y uso del suelo, principalmente. El procesamiento de la información se estructuró en un sistema de información geográfica. Para la precipitación fue necesario estimar datos faltantes, con lo que se obtuvo una base de datos de precipitación anual, mensual y diaria. La información del NDVI se obtuvo analizando imágenes de satélite para diversos años y los datos faltantes se complementaron con el método de medias móviles.

Se realizó un análisis de la correlación entre la precipitación y el NDVI, considerando escenarios de la precipitación para cuatro, cinco y seis meses antecedentes al NDVI. Para calcular el NC se analizó las cartas de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal de INEGI. A partir de los polígonos de vegetación por cada grupo hidrológico de suelo, por medio de un proceso de superposición en las imágenes de satélite con los valores de NDVI, se calculó el NC para los años faltantes y así se obtuvo la serie completa de NC. Con la serie completa se desarrollaron escenarios al año 2012, 2020, 2030, 2040 y 2050, a nivel de zona hidrológica y de subcuenca. En este capítulo también se procedió a la construcción, calibración y a la implementación del modelo semidistribuido HEC-HMS para simular el proceso lluvia escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo bajo escenarios de cambio climático.

En el capítulo 5 se realizó un análisis y se discutieron los resultados de las simulaciones del proceso lluvia escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo, considerando escenarios de cambio climático, obtenidas con el modelo HEC-HMS para los años 2012, 2020, 2030, 2040 y 2050.

Para estimar la incertidumbre de las salidas del modelo asociado con el cambio climático, en el capítulo 6 se realizó el análisis de sensibilidad de algunos parámetros como el NC y la



precipitación y se estimó su grado de incertidumbre respecto al gasto pico y el volumen acumulado.

Finalmente, en el capítulo 7 se emitieron las conclusiones derivadas del estudio y las recomendaciones pertinentes para futuras investigaciones y proyectos relacionados con el tema en el área de estudio.

1.1. Antecedentes

De acuerdo al consenso alcanzado por el IPCC en su Cuarto Informe de Evaluación, el futuro del planeta está en riesgo a menos que se actúe de forma conjunta, lo que significa trabajar también en forma regional y local. Desde su establecimiento el IPCC ha producido una serie de informes de evaluación (1990, 1995, 2001 y 2007), Informes Especiales, Documentos Técnicos y Guías Metodológicas. Entre los más recientes cabe señalar dos informes especiales: *“La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono”* y *“La protección de la capa de ozono y el sistema climático mundial”*. Asimismo, ha publicado las *“Directrices sobre inventarios nacionales de gases de efecto de invernadero”* (IPCC, 2007a).

A partir de 1994, en que se elaboró el Estudio de País, México ha venido desarrollando un esfuerzo continuo en la formulación de programas nacionales o regionales para mitigar el cambio climático y facilitar la adaptación ante sus efectos adversos en México. En el año 2000 se produjo un primer documento de estrategia en la materia, en el 2006 se publicó el documento: *Hacia una Estrategia Nacional de Acción Climática* (HENAC) y en el año 2007 se presentó públicamente la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENACC). Con base en la ENACC se elaboró el Programa Especial de Cambio Climático (PECC) 2008-2012, en el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2007- 2012 (SEMARNAT, 2008).

México ha presentado cuatro Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). A través de estas Comunicaciones, cada Parte informa a las demás sus avances y logros en la implementación de sus compromisos. La Primera Comunicación Nacional se presentó en 1997, este informe incluyó los avances y resultados de estudios, talleres, cursos, conferencias y publicaciones sobre vulnerabilidad e inventarios de emisiones de GEI, siendo lo más importante de este informe el

Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) de 1990 y los resultados de los primeros estudios sobre la vulnerabilidad del país al cambio climático. La Segunda Comunicación Nacional se presentó en 2001, la cual incluyó la actualización del INEGEI para el periodo 1994-1998; las cifras de uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUSS) para el año de 1996; además se incluyeron escenarios de emisiones futuras (INE, 2006). La Tercera Comunicación Nacional se presentó a la Conferencia de las Partes (COP) en el 2006 (SEMARNAT, 2008). En este documento se presentó la actualización del inventario de emisiones al 2002 y se calculó de nuevo las cifras para los años 1990, 1992, 1994, 1996, 1998 y 2000. La Cuarta Comunicación de México ante la CMNUCC, reportó los avances del país en materia de cambio climático. En 2009 se dieron a conocer también los resultados de importantes investigaciones que evaluaron el potencial de mitigación a mediano y largo plazos, y se concluyó el estudio de *La Economía del Cambio Climático para México* (SEMARNAT, 2009).

En el año 2007, se publicó el libro *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México* (Martínez, 2007), en el que se expusieron las condiciones climatológicas que prevalecen hoy en el planeta y particularmente en México, su relación con el recurso agua y la manera en que el cambio climático impactará nuestro entorno, de acuerdo a los diferentes escenarios de cambio climático del IPCC. Se abordó el tema del cambio climático desde la perspectiva de las cuencas hidrográficas, se señaló la necesidad de llevar a cabo estudios más detallados, centrados en zonas de particular vulnerabilidad al cambio climático y se planteó la necesidad de realizar estudios regionales que permitan reducir la incertidumbre en los pronósticos, localizar los efectos, definir las medidas de adaptación y priorizar su aplicación. Un año más tarde, Martínez et al. (2008) presentaron el libro *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, Volumen II*, en el cual se planteó el análisis de las condiciones climáticas, mediante herramientas cada vez más precisas y una mejoría en la operación de los sistemas hidráulicos, es determinante para identificar y establecer medidas de adaptación que permitan mitigar los efectos del cambio climático y, a la vez, alcanzar niveles razonables de sustentabilidad en el uso del agua. Se enfatizó el hecho de que una certera evaluación de los impactos del comportamiento de los elementos atmosféricos pasa, necesariamente, por la adecuada identificación de los diversos escenarios aceptados por la comunidad científica internacional, entre otros los propuestos por el IPCC y, en el caso mexicano específicamente, por los escenarios climáticos regionales desarrollados por el grupo de hidrometeorología del IMTA, mismos que permiten analizar y valorar los efectos correspondientes producto de las

variaciones de la lluvia y la temperatura para los diversos periodos estacionales. En este libro también se destacó la importancia que tiene como herramienta la simulación del ciclo hidrológico, misma que se vale de un modelo de lluvia-escorrimento para evaluar los efectos del propio ciclo y elaborar medidas de adaptación enfocadas a la gestión del agua. En el año 2010, Martínez et al. (2010) publicaron el tercer volumen *Efectos del Cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*, cuyo objetivo fue poner a disposición de la sociedad y de las instituciones, información accesible que permita conocer los escenarios actuales y futuros en las diversas regiones de México e identificar las acciones que posibiliten una mejor adaptación a las nuevas condiciones asociadas al cambio climático con respecto a la gestión del agua. Este libro es el resultado de un programa de investigación interdisciplinario en la materia, se conformó de seis capítulos: Índice de vulnerabilidad social; Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI en materia de precipitación y temperaturas máximas y mínimas; Impacto del cambio climático en la temporada de lluvias y ciclones tropicales en México; Vulnerabilidad hídrica global: aguas superficiales; Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático; y Calidad del agua.

A partir del año 2007, el IMTA comenzó a desarrollar el trabajo *“Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México”*. El objetivo de este trabajo fue la regionalización para México de las simulaciones de los Modelos de Circulación General Acoplados (CGCM) que participaron en el 4º Reporte de Evaluación del IPCC utilizando el REA para precipitación y temperatura en superficie. Utilizando los datos de 16 de los 23 CGCM, se obtuvieron como primer producto el cálculo de las anomalías promedio mensuales de precipitación (mm/día) y temperatura en superficie (°C) para los escenarios SRES-AIB y SRES-A2 con respecto al período 1960-1989 alrededor de México (Montero et al., 2008).

Con relación a los trabajos vinculados con algunos aspectos del tema de investigación en la zona de estudio, la CNA ha desarrollado cuatro estudios principales, el primero denominado *“Identificación y delimitación de áreas con riesgo de inundación, propuesta y simulación de alternativas para minimizar el impacto de las inundaciones en la cuenca del río Huixtla”*, cuyos objetivos fueron obtener la caracterización hidrológica y simulación hidráulica de caudales para diferentes períodos de retorno, la estimación de daños para cada caudal simulado y el análisis de diversas alternativas de solución para minimizar el impacto de las inundaciones (CNA, 2004).

El segundo estudio fue la “Evaluación de los efectos del cambio de cobertura y de uso del suelo en la erosión hídrica y las relaciones precipitación-escorrentía en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, del estado de Chiapas”, para modelar el evento de la tormenta tropical Stan (CNA, 2006b). El tercer estudio fue la “Delimitación de las zonas de alto riesgo de inundación con uso de modelos de simulación hidráulicos para la generación de una propuesta de acciones de protección en los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, ubicados en el estado de Chiapas”, cuyo objetivo principal fue aplicar el modelo hidráulico HEC-RAS en la parte baja de las cuencas mencionadas, para delimitar las zonas de alto riesgo de inundación durante eventos de precipitación extrema y proponer algunas acciones estructurales y no estructurales tendientes a disminuir los impactos de eventos lluviosos extremos (CNA, 2006a). El estudio más reciente en la zona fue “Monitoreo de procesos hidrológicos en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, Chiapas” realizando mediciones en 12 microcuencas, principalmente de escorrentía, infiltración, humedad del suelo, flujo base y sedimentos en suspensión (CNA, 2010).

1.2. Objetivo general

Conocer y analizar el comportamiento del proceso lluvia-escorrentía en la cuenca del río Huixtla ante cambios de cobertura vegetal y uso de suelo considerando escenarios de cambio climático.

1.3. Objetivos específicos

1. Generar la base de datos de precipitación anual, mensual y diaria de la zona de estudio
2. Generar la base de datos del NDVI
3. Incorporar el NDVI en la metodología de análisis de cobertura vegetal y uso del suelo.
4. Identificar y cuantificar la variación espacial de cobertura y uso del suelo en los periodos de análisis.
5. Generar escenarios de precipitación, NDVI y Números de Curva al año 2012, 2020, 2030, 2040 y 2050.



6. Crear un modelo de cuenca en el HEC-HMS con las características fisiográficas, de uso del suelo y con las características de precipitación y escurrimiento de la zona de estudio.
7. Una vez calibrado el modelo de cuenca en el HEC-HMS, simular el comportamiento de lluvia escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo considerando escenarios de cambio climático
8. Realizar el análisis de sensibilidad del modelo



2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se incluye la búsqueda de software y metodologías apropiadas para desarrollar la investigación, con el fin de obtener los objetivos generales y específicos establecidos, por ejemplo, el análisis del modelo hidrológico como el HEC-HMS, el método del NC, los escenarios de cambio climático, el NDVI y la relación del cambio de cobertura y uso del suelo con el cambio climático. Esta fase del proyecto de investigación fue fundamental, porque permitió ubicar, plantear y desarrollar el problema en el marco teórico adecuado.

2.1. Modelos hidrológicos

La modelación hidrológica de una región o de cuencas pequeñas es ampliamente utilizada y ha demostrado su utilidad en la evaluación del impacto sobre el ciclo hidrológico y en el cambio de uso del suelo (Henderson et al., 1993; Harbor, 1994; Bhaduri et al., 1997; Sharma et al., 2000). Los modelos hidrológicos son utilizados para comprender la dinámica del ciclo hidrológico con respecto a los componentes climatológicos y la superficie terrestre (Singh et al., 2002), y se emplean como herramientas para la evaluación, desarrollo y gestión de los recursos hídricos en una cuenca. Un modelo hidrológico se define como una simplificación de un sistema natural, tal como el proceso lluvia-escurrimiento y sus componentes sobre una cuenca. Entre los métodos para la transformación-lluvia escurrimiento se encuentran los modelos simples como el hidrograma unitario y el de cascada de Nash; los modelos conceptuales como el de Stanford Watershed Model (Crawford et al., 1966) y el de Sacramento (Burnash, 1973) y los modelos con base física.

Una clasificación relevante de modelos hidrológicos es la que depende del tratamiento que se da a las diferentes unidades en que se divide la zona en estudio y de las características de dichas unidades (Olaya, 2004). Dependiendo del esquema de discretización espacial utilizado para describir las características de las cuencas, los modelos hidrológicos de simulación se pueden dividir en dos grandes grupos: modelos agregados y modelos distribuidos (Singh, 1995; Carpenter et al., 2006). Los agregados describen las características de la cuenca de forma agrupada a través de promedios, es decir como un todo; mientras que los distribuidos dividen la cuenca en pequeñas sub-áreas, considerando la variabilidad espacial de los datos y de los parámetros del modelo. El enfoque de aplicar un modelo agregado en divisiones hidrográficas

naturales o subcuencas, se presta menos a la mecanización del conjunto del territorio a estudiar que las celdas regulares, esto da lugar a los denominados modelos semidistribuidos (Méndez, 2005; Oñate, 2009).

2.1.1. Modelos hidrológicos agregados

En un modelo hidrológico tradicional se considera que el escurrimiento se produce por la precipitación excedente. A este componente del gasto se le denomina escurrimiento directo, y a la porción del volumen de precipitación que la produce se le llama precipitación en exceso o efectiva. Mediante una función de transferencia, tal volumen se convierte en escurrimiento directo y al sumarle el gasto base, se obtiene el hidrograma de escurrimiento total. Un esquema como el anterior corresponde a los modelos hidrológicos de parámetros concentrados, los cuales utilizan promedios espaciales tanto de las características fisiográficas como de la precipitación en la cuenca (Maidment, 1993). Estos modelos se emplean generalmente en la descripción y análisis del proceso lluvia-escurrimiento (Chow et al, 1994).

En el caso de los modelos agregados, el modelo lineal o hidrograma unitario supone que es posible aproximar las características de la cuenca mediante la forma de una tormenta uniforme de una pulgada de precipitación. Una vez que se haya obtenido esta forma se puede generar el escurrimiento directo de cualquier tormenta por la adición de hidrogramas unitarios. Puesto que los registros de precipitación son comúnmente más largos y más completos que los registros de flujo de los ríos, en muchos lugares, este procedimiento es más aplicable que el análisis directo del flujo de los ríos (Helweg, 1992).

Debido a la escasez de información espacial de los parámetros hidrológicos, en México tradicionalmente se han utilizado los modelos agregados (Méndez, 2005). Estos modelos suponen una respuesta lineal de la cuenca y promedian los parámetros hidrológicos más importantes como la precipitación y el escurrimiento.

2.1.2. Modelos hidrológicos distribuidos y semidistribuidos

La modelación hidrológica distribuida, considera la variabilidad espacial de las características físicas de las cuencas y de la precipitación, al dividir las en microcuencas o celdas. Sin embargo, los modelos hidrológicos distribuidos han sido escasamente estudiados y poco aplicados, en cuencas con pocas estaciones de medición.

Para aplicar los modelos hidrológicos distribuidos se requiere del empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el procesamiento georreferenciado de la información espacial y MDE para estudiar el proceso de tránsito del escurrimiento. Sin embargo, la cantidad de parámetros en un modelo distribuido puede ser hasta de cientos, lo que hace muy difícil evaluar la sensibilidad de la respuesta de la cuenca a las diferentes combinaciones de los parámetros (Pisani, 2008).

En algunos países, se han desarrollado diversos modelos distribuidos. A continuación se enuncian algunos de ellos.

MIKE SHE es un modelo hidrológico distribuido y de base física (Refsgaard et al., 1995). Modeliza los procesos más importantes del ciclo hidrológico incluyendo la intercepción de la precipitación, la evapotranspiración, el escurrimiento superficial (flujo en ladera y cauce), el flujo subsuperficial en la zona no saturada y el flujo saturado en el acuífero. Consta de un módulo hidrológico y varios referentes a la calidad del agua (D.H.I., 1985). El código original fue desarrollado en 1982 por el Instituto Hidráulico Danés, el Instituto Británico de Hidrología y la empresa Francesa Sogreah, con el nombre de *Système Hydrologique Européen (SHE)* (Abbot et al., 1986). Se desarrolló para servir como herramienta para evaluar los recursos hídricos y los procesos de cambio de uso de suelo, cuando estos ocurren en tiempos relativamente cortos (Yan et al., 1999)

El modelo *SAC-SMA* (Sacramento Soil Moisture Accounting) fue desarrollado por el National Weather Service de los Estados Unidos (Burnash, 1995; Ajami et al., 2004). El modelo se fundamenta en un algoritmo de cálculo del escurrimiento generado a partir de una división del suelo en dos capas, una superior y otra inferior. Cada capa incluye almacenamientos que interactúan para generar estados de humedad del suelo y cinco formas de generación del escurrimiento.



Modelo *ANSWERS* desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency, USA), para simular el comportamiento de cuencas pequeñas (menores de 10,000 hectáreas), ante escurrimientos en situaciones de crecidas, fenómenos de erosión, de sedimentación y de transporte de contaminantes asociados con los sedimentos. Este modelo no considera la evapotranspiración ni la recarga del acuífero (Beasley et al., 1980).

El modelo *DBSIM* (Distributed Basin Simulator) realiza una parametrización de los procesos de generación de escurrimiento (Garrote et al., 1995). El modelo está formado por dos componentes principales: módulo de generación de escurrimiento y módulo de transporte del flujo superficial.

Modelo *GISPLU* apoyado por un SIG, implementado en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), con el fin de calcular las precipitaciones máximas diarias de España (Ferrer, 1994).

Modelo *WRAT*, desarrollado por la Universidad del Estado de Nuevo México (USA), para analizar el terreno, definir direcciones de flujo y las áreas aportadoras, para simular escurrimientos y avenidas máximas. No considera la evapotranspiración ni la aportación subterránea y se recomienda para cuencas menores de 250 km² (Brodeur, 1992).

Modelo *WATER.FEA*, diseñado como un comando del SIG GRASS, desarrollado en la Universidad de Oklahoma (USA), simula interactivamente etapas de una tormenta usando técnicas de elementos finitos apoyadas en las fórmulas de Green y Ampt.

El modelo *SIMPA* (Sistema Integrado de Modelización Precipitación-Aportación) fue diseñado para simular mensual y anual del proceso precipitación-escurrimiento y es recomendable para grandes cuencas (Ruiz, 1999). Se ha aplicado en numerosos estudios hidrológicos de España como, por ejemplo, a) estimar escurrimientos en España para la elaboración del Libro Blanco del Agua, b) modelización de aportaciones en la cuenca del Guadiana, c) mejora en la red foronómica y estimación de recursos en el alto Guadiana.

El modelo *CEQUEAU* fue desarrollado en el Instituto Nacional de Investigación Científica de la Universidad de Québec en Canadá y reproduce el sistema hidrológico de una cuenca (Morin et al., 1995).

La llegada de los SIG y los MDE, así como el incremento en la capacidad de almacenamiento y la velocidad de cálculo de las computadoras, han ayudado a desarrollar modelos que toman en cuenta la variación espacial de las características de la cuenca. Sin embargo, estos modelos deben considerarse solamente como semidistribuidos porque están alimentados con mediciones de redes de pluviógrafos que no captan con suficiente resolución la variabilidad espacial de la lluvia.

Por otra parte es necesario destacar que si el modelo es distribuido debe subdividir la cuenca en elementos computacionales más pequeños, en los que consideran parámetros más homogéneos, esto frecuentemente da lugar a modelos agregados a nivel de subcuencas, los cuales representan las condiciones y variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos de la cuenca. A estos modelos se les llama semiagregados o semidistribuidos (Pisani, 2008). De esta manera, cualquier modelo agregado puede convertirse en un modelo semidistribuido (Vieux, 2001).

Los modelos semidistribuidos parecen representar una buena opción para la modelación de cuencas, en tanto no se puedan evaluar objetivamente la capacidad de los modelos distribuidos para predecir estados hidrológicos que requieren más datos, como por ejemplo medidas espaciadas de humedad del suelo, niveles piezométricos y caudales en puntos interiores, que puedan confirmar el valor de los modelos distribuidos (Refsgaard, 1996; Pisani, 2008). De la evaluación de modelos hidrológicos disponibles en el mercado realizada por Dresser & McKee Inc. (CDM, 2001), concluyó que de los modelos semidistribuidos, solo en el HEC-HMS la interacción entre aguas superficiales y subterráneas forma parte de un mismo modelo conceptual integral. Asimismo, Reed et al (2004) realizaron una inter-comparación de modelos distribuidos concluyendo que los modelos distribuidos no siempre mejoran los resultados de los modelos agregados en la simulación de aportaciones a la salida de la cuenca.

Entre los modelos semidistribuidos más populares en la literatura, encontramos los siguientes:

El modelo *URBS* (Unified River Basin Simulator), es decir, Simulador de Cuencas Fluviales Unificadas, es un modelo semidistribuido de lluvia-escorrimento y tránsito de avenidas cuyo uso se ha difundido principalmente en Australia, donde se ha utilizado para las cuencas de los ríos Fitzroy (150 mil km²), Burdekin (130 mil km²) y Cooper (200 mil km²) (Serban et al., 2003). El

modelo URBS se puede utilizar para eventos particulares, o bien se puede ejecutar en modo continuo.

El modelo *HBV*, del Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (SMHI), es otro modelo continuo de uso difundido que se puede ejecutar como modelo agrupado o semidistribuido (Bergström, 1976; Bergström 1992). Este modelo fue aplicado en 95 subcuencas del río Rhine en Alemania, con el propósito de modelar los efectos del cambio de uso del suelo en el escurrimiento (Hundecha et al., 2004).

GIS-BALAN es un modelo hidrológico semidistribuido desarrollado en lenguaje Visual Basic, ha sido utilizado como herramienta para la evaluación de los recursos hídricos, que se ha acoplado a un SIG facilitando la introducción y el proceso de datos. *GIS-BALAN* resuelve el balance hídrico diario del agua en tres zonas: a) El suelo edáfico, en el que se produce la infiltración del agua de lluvia, riego o nieve y donde ocurren los procesos de evaporación y transpiración (el flujo en esta zona es fundamentalmente vertical), b) La zona no saturada, en la que pueden existir tanto flujos laterales como flujos verticales de percolación y c) El acuífero, formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua. (Samper et al., 1999; Samper et al., 2005; Samper et al., 2007b).

El modelo *SWAT* (Soil Water Assessment Tool), es un modelo de simulación basado en la ecuación de balance hídrico en el perfil del suelo, se puede ejecutar como modelo distribuido, agrupado o semidistribuido (Arnold et al, 1998). Este modelo permite realizar una predicción del comportamiento de cuencas hidrográficas a largo plazo. Es un modelo de base física usado para pronosticar el impacto que las prácticas de manejo del suelo tienen en el agua, sedimentos y nutrientes en largos períodos de tiempo (Di Luzio et al., 2004), y que está implementado en un entorno SIG (ArcView).

Otro modelo que basa su funcionamiento en los SIG es el modelo *TOPMODEL* (Beven et al., 1979) cuya formulación está muy relacionada con el conocimiento del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca y con el modelo de balance hídrico denominado *RHINEFLOW*. Ambos modelos transforman la precipitación en escurrimiento y permiten calcular el déficit de humedad en la cuenca. El *TOPMODEL* simula el flujo mediante variaciones de los parámetros de la pendiente determinados en la cuenca, sin considerar el arreglo espacial, sino sólo la distribución estadística de sus valores, para desarrollar la respuesta de la cuenca. El

TOPMODEL es un modelo semidistribuido ya que la estadística de los parámetros variables espacialmente se considera sin tomar en cuenta su localización (Vieux, 2001).

El modelo *HEC-HMS* (acrónimo de Hydrologic Engineering Center y Hydrologic Modeling System), es un modelo de uso difundido que se puede ejecutar como modelo distribuido, semidistribuido o agregado.

En el HEC-HMS se han ejecutado muchos estudios alrededor del mundo. A continuación se mencionan algunos de los estudios encontrados en la bibliografía:

PNUD (1998) realizó el “*Estudio para el tratamiento integral del río Piura, Perú*”. El objetivo del estudio fue la determinación de las avenidas características que pueden ocurrir en el río Piura a su paso por la ciudad del mismo nombre como consecuencia de las lluvias que se producen aguas arriba de la zona urbana.

Olivarez (2004) realizó la “*Modelización hidrológica pseudo-distribuida de la cuenca del Barranc del Carraixet: aplicación al episodio de octubre de 2000*”. Desarrolló un modelo hidrológico por subcuencas, operativo en tiempo real para la cuenca del Barranc del Carraixet, en la provincia de Castellón, España.

Orozco (2005), desarrolló una metodología que permite simular el proceso lluvia-escorrentamiento, mediante la implementación de modelos hidrológicos distribuidos basados en el método de ModClark del HEC-HMS, el cual tiene como parámetro principal el NC. Fue adaptado a las condiciones de la cuenca del río Candelaria en Campeche, México.

Méndez (2005), desarrolló una metodología para la aplicación del HEC-HMS utilizando datos de precipitación estimados con radar para la cuenca del río Mixcoac en el Valle de México.

La CNA (2006b), aplicó los modelos HEC-HMS y SWAT, para valorar el impacto de los cambios de la cobertura y de uso del suelo en el comportamiento hidrológico de las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, Chiapas, derivados del huracán STAN de 2005.



Miranda et al (2009), simularon el proceso lluvia-escurrimiento en la cuenca del Río Grande, Guerrero, México. Utilizaron el método de los NC para obtener dos escenarios de cambio de uso de suelo correspondiente a los años 1973 y 2006.

Moran (2009) desarrolló el estudio *"Inundabilidad de cauces de alta pendiente teniendo en cuenta el transporte de sedimentos"* en la cuenca de la Riera de la Alforja, ubicada en la comarca del Baix Camp en la provincia de Tarragona, España, utilizando el modelo hidrológico HEC-HMS y el modelo hidráulico HEC-RAS.

Rodríguez et al (2010), desarrollaron el *"Modelo hidrológico conceptual semidistribuido de la cuenca del río Reno"*, localizado en la región Emilia Romagna, Italia.

2.1.3. El modelo HEC-HMS

Debido a la importancia que este modelo tiene para la realización de la tesis, a continuación se detallan sus principales características:

El programa HEC-HMS fue desarrollado a mediados de los años 60's bajo la versión para computadora framework, y más tarde fue adaptado para trabajar en computadoras personales bajo el sistema operativo MS DOS con el nombre de HEC-1. A finales de los años 90's fue adaptado para el sistema Windows con el nombre actual. Más tarde, en el 2002, El Cuerpo de Ingenieros de EEUU y ESRI desarrollaron una aplicación o interfaz, llamada HEC-GeoHMS que permite la introducción de datos de un GIS en el modelo. Por lo tanto actualmente, primero trabaja el Geo-HMS en plataforma Arc View y prepara los GRID de parteaguas, subcuencas, usos del suelo y número de curva, y después los resultados intermedios son enviados al HEC-HMS.

El HEC-HMS incluye varios modelos hidrológicos para estimar la relación lluvia-escurrimiento y el tránsito del escurrimiento mediante tres componentes principales, que sirven como entradas para simular el proceso lluvia-escurrimiento: Basin Model, Meteorologic Model y Control Specifications (USACE, 2010b).



El Basin Model representa la cuenca y la red de corrientes por medio de la cual se conectan los elementos hidrológicos como las subcuencas, almacenamientos, tramos, uniones o confluencias, fuentes y sumideros. El Basin Model se compone a su vez de cuatro grupos de métodos para el análisis: métodos de pérdidas, métodos de transferencia, métodos para el flujo base y métodos de tránsito de avenidas. El Meteorologic Model sirve para analizar los datos meteorológicos, el cual incluye métodos de precipitación (Hietograma, polígonos de Thiessen, método de la inversa de la distancia) y evapotranspiración. El Meteorologic Model almacena los datos de la precipitación y evaporación requeridos en el proceso. En la componente de Control Specifications se especifica principalmente la fecha y hora de inicio de la modelación, así como la fecha y hora en que finaliza.

No obstante que el programa HEC-HMS contiene diversos métodos, por su facilidad de uso y el nivel de información, la separación de lo que escurre de lo que no escurre generalmente se realiza por el método del NC. La metodología que comúnmente se emplea en el HEC-HMS para convertir la lluvia en escurrimiento es la del hidrograma unitario sintético del Soil Conservation Service (SCS) [actualmente Natural Resources Conservation Service (NRCS)]. El HEC-HMS también simula el tránsito de avenidas en cauces y presas. Entre los datos principales que pide el modelo en su parte metodológica adaptada a la información disponible en México son: el MDE a partir del cual define el parteaguas de la cuenca principal y delimita un determinado número de subcuencas; los datos del pluviograma de una tormenta; el NC asociado a los distintos tipos de cobertura del suelo; el tiempo de retraso y flujo base para cada subcuenca y los parámetros requeridos por el método de Muskingum para el tránsito de avenidas en cauce y la curva almacenamiento-elevación para el tránsito de avenidas en presas. Como resultado envía los hidrogramas en cualquier punto a la salida de la cuenca, subcuencas y en cada punto del cauce principal.

En resumen, el HEC-HMS es un programa complejo que calcula el hidrograma producido por una cuenca si se le proporciona los datos físicos de la misma y datos de precipitación (Sánchez, 2008).

2.1.3.1. El hidrograma unitario

El hidrograma unitario, propuesto por primera vez por Sherman en 1932, es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de lluvia en exceso. Se define como la respuesta a una unidad de precipitación efectiva distribuida uniformemente sobre la cuenca, aplicado a una tasa constante para una duración dada. Está basado en las siguientes hipótesis: tiempo base constante, linealidad o proporcionalidad y superposición de causas y efectos (Aparicio, 1996). Este método es sin duda el más empleado para representar el tránsito del escurrimiento.

La ecuación del hidrograma unitario para un sistema lineal es (USACE, 2000):

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n < M} P_m U_{n-m+1} \quad (1)$$

Q_n	Gasto directo	$[m^3 s^{-1}]$
P_m	Lluvia en exceso	$[m]$
U_{n-m+1}	Hidrograma unitario	$[m^3 m^{-1} s^{-1}]$

Chow et al., (1994), mencionan que el hidrograma unitario de una cuenca, se define como el hidrograma de escurrimiento directo (DRH, por sus siglas en inglés) resultante de una pulgada (usualmente tomado como un cm en unidades del SI) de exceso de lluvia generado uniformemente sobre el área de drenaje, a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva.

El mejor diagrama unitario es aquel que se obtiene a partir de una tormenta de intensidad razonablemente uniforme, de una duración deseada y de un volumen de escurrimiento cercano o mayor a un cm (figura 1). El primer paso consiste en separar el flujo base del escurrimiento directo; inmediatamente se procede a determinar el volumen de escurrimiento directo y las ordenadas del escurrimiento directo se dividen por la profundidad de escurrimiento observado; las ordenadas ajustadas forman el hidrograma unitario (Levi, 1996). Estos mismos autores, refieren que el diagrama unitario obtenido de una sola tormenta puede tener errores y es deseable promediar los hidrogramas unitarios de algunas tormentas de la misma duración; el cual no debe ser el promedio aritmético de las ordenadas concurrentes puesto que si los picos

no suceden al mismo tiempo, el pico promedio será más bajo que los picos individuales. (CNA, 2006b).

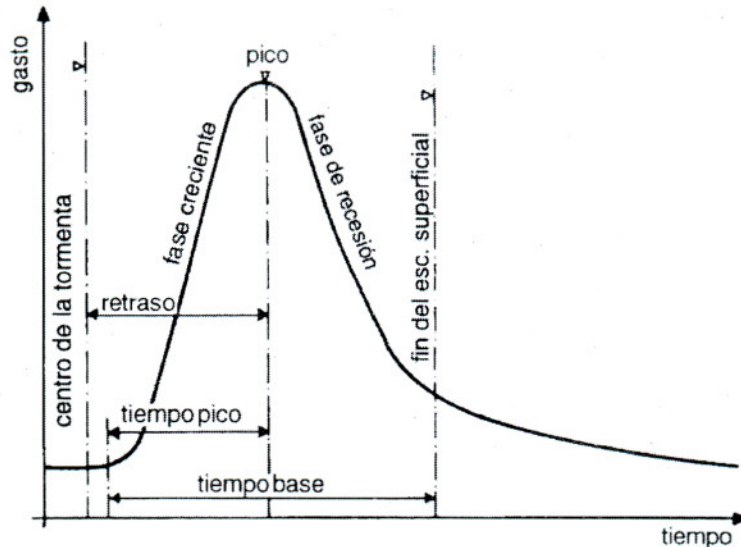


Figura. 1. Desarrollo de un diagrama unitario (Levi, 1996).

Hidrograma unitario sintético. Para usar el método del hidrograma unitario, es necesario contar con al menos un hidrograma medido a la salida de la cuenca, además de los resultados de precipitación. Sin embargo, muchas de las veces no se dispone de aforos de escurrimientos en una cuenca y como consecuencia no se puede obtener el hidrograma unitario instantáneo; es allí cuando se debe recurrir a los hidrogramas unitarios sintéticos, los cuales pueden obtenerse, usando únicamente las características fisiográficas de la cuenca.

Los hidrogramas unitarios sintéticos se utilizan para calcular hidrogramas unitarios en otros puntos del cauce dentro de la misma cuenca, o bien, en cuencas adyacentes de carácter similar. Debido a su importancia, se ha desarrollado una gran cantidad de hidrogramas unitarios sintéticos como el método de Chow, hidrograma unitario triangular (figura 2) y los hidrogramas unitarios adimensionales.

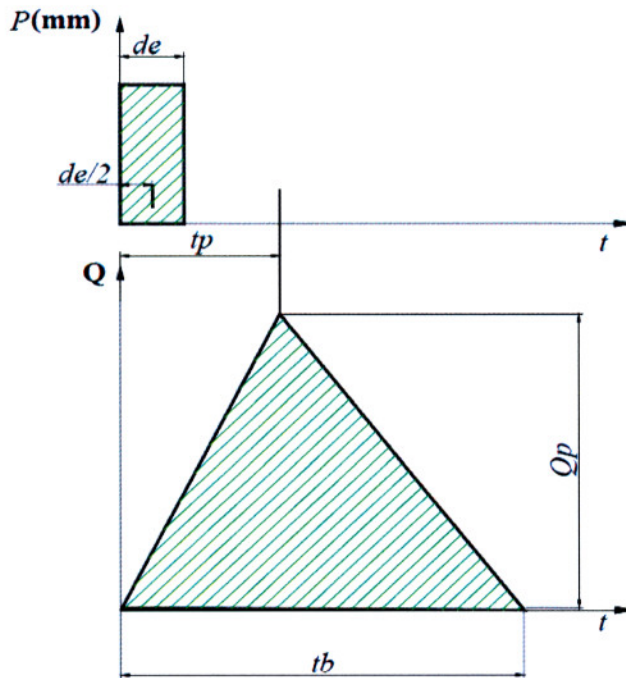


Figura 2. Hidrograma unitario sintético de forma triangular (Mockus, 1957).

Hidrograma unitario del SCS. El hidrograma adimensional del SCS, es uno de los más aceptados dentro del medio profesional hidrológico (CNA, 2006b). Es un hidrograma unitario sintético en el cual se expresan los caudales en función del caudal pico, q_p y los tiempos en función del tiempo al pico, T_p (figura 3a). Los valores de q_p y T_p se estiman basándose en el hidrograma unitario triangular del SCS (figura 3b).

$$q_p = \frac{2.08A}{T_p} \quad (2)$$

Donde q_p es el caudal pico [$m^3/s \cdot cm$], A es el área de drenaje [km^2] y T_p es el tiempo al pico [horas].

El tiempo pico T_p se expresa con la ecuación 3 (USACE, 2000):

$$T_p = 5.5 t_r \quad (3)$$

Dónde t_r es el tiempo de retraso en horas.

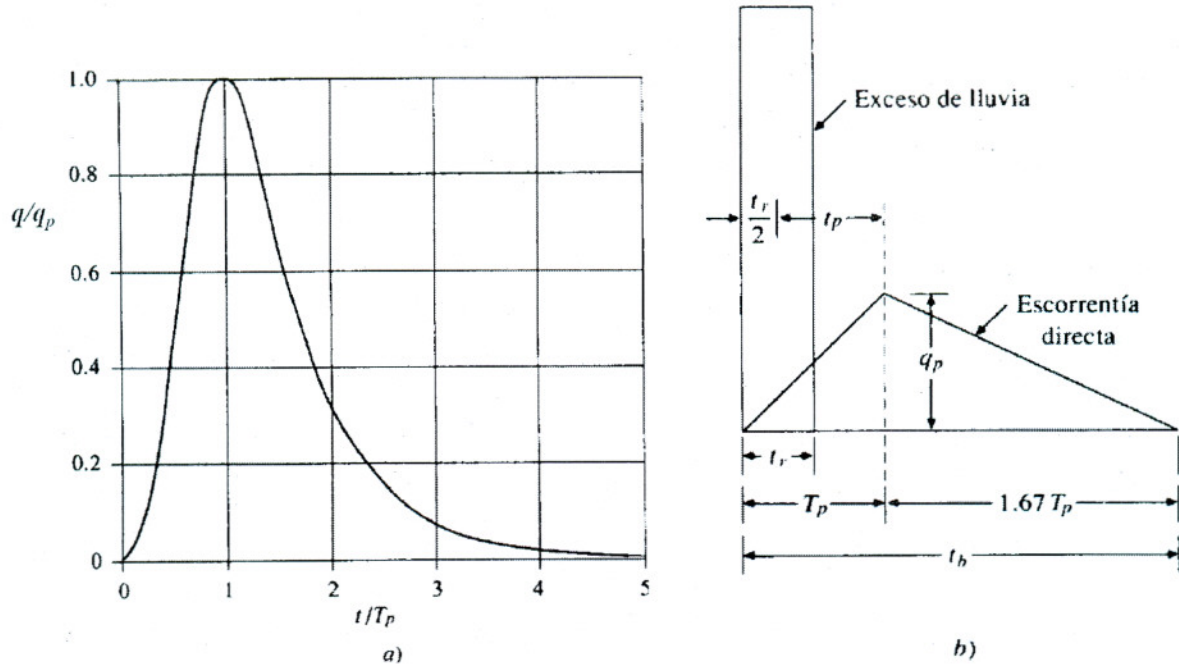


Figura 3: a) Hidrograma adimensional del SCS b) Hidrograma unitario triangular (Chow et al., 1994).

De acuerdo con esta definición, el tiempo de respuesta o tiempo de retraso (t_r) también llamado t_{lag} , (Viessman et al., 2003), generalmente se estima como el 0.60 t_c (Aparicio, 1996), en donde t_c es el tiempo de concentración de la cuenca, y se define como el tiempo requerido por una gota de agua para fluir desde el punto más remoto en la cuenca hasta el punto de interés y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Chow, et al., 1994). Para estimar el t_c , lo mas sencillo es la utilizacion de fórmulas que proporcionan una aproximación, en México es de uso común utilizar la fórmula de Kirpich (Aparicio, 1996):

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \tag{4}$$

Donde:

- t_c Tiempo de concentración [horas]
- L Longitud del cauce principal en [m]
- S Pendiente del cauce principal



2.1.3.2. El método del número de curva

El método del número de curva fue desarrollado en 1954 por el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos de América, actualmente Natural Resources Conservation Service (NRCS), del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) (NRCS, 1997). El método es un producto final de investigaciones de campo exhaustivas llevadas a cabo a finales de 1930 y principio de 1940 (Singh et al., 2002). Por su complejidad, se le han hecho varias revisiones (1956, 1964, 1965, 1971, 1972, 1979, 1985, 1989, 1991, 1995, 1996 y 2005), entre ellas se encuentran las de Hawkins (1979, 1985, 1993), Bosznay (1989), Hjeimfeit (1991), Steenhuis et al. (1995), Ponce (1996) y Rojas (2005).

Desde su origen el método tuvo gran apoyo por parte de las agencias gubernamentales norteamericanas, por lo que se extendió rápidamente a otros países. En realidad este método no se trata de un modelo de infiltración sino de un modelo global de pérdidas de precipitación, con el que se trata de reflejar la interceptación, evapotranspiración y pérdidas por almacenamiento en depresiones del terreno (Gómez, 2007).

El punto de partida del método es un balance en el que la precipitación total del evento P se reparte en tres componentes (figura 4): la lluvia efectiva o escurrimiento directo (P_e), la retención inicial o umbral de escurrimiento que satura la capa más superficial del suelo (I_a) y la infiltración que se produce a partir del umbral de escurrimiento (F_a).

La retención inicial o umbral de escurrimiento la representa la parte de la lluvia que se emplea para elevar la humedad de la capa superficial del suelo hasta saturación, en mojar la cubierta vegetal y en formar los charcos, antes de que se inicie el escurrimiento (Dal-Ré, 2003). Posteriormente el termina evapotranspirándose o llegando al escurrimiento subterráneo; Como es agua perdida para el escurrimiento directo se le denomina como "abstracciones". Las abstracciones hidrológicas son los procesos físicos que actúan para reducir la precipitación total a precipitación efectiva. Eventualmente, la precipitación efectiva va a constituir el escurrimiento de superficie. Hay varios procesos por los cuales la precipitación es abstraída por la cuenca, entre ellos, aquellos que interesan a la ingeniería hidrológica y son los siguientes: (a) interceptación, (b) Infiltración, (c) Almacenaje de superficie, (d) Evaporación y (e) Evapotranspiración (Ponce, 1989).

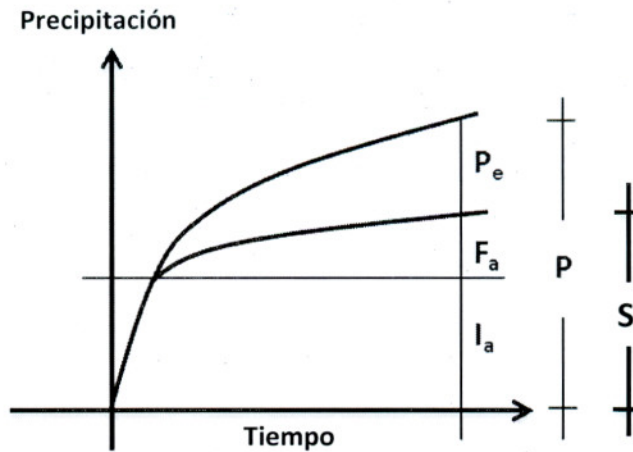


Figura 4. Esquema del modelo conceptual del número de curva (Dal-Ré, 2003)

Por lo tanto, el balance de la precipitación total se representa de la siguiente forma:

$$P = P_e + F_a + I_a \quad (5)$$

Tomando como referencia lo anterior, el método del NC propone la existencia de una relación de proporcionalidad empírica, resultado de más de 20 años de estudios por parte del NRCS sobre la relación entre la precipitación y el escurrimiento en eventos aislados a partir de datos recogidos en numerosas cuencas pequeñas de Norteamérica.

Según Ogrosky et al., (1964) el proceso es regido por la siguiente relación:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (6)$$

Donde **S** representa la capacidad máxima de retención de agua por el suelo de la cuenca (los demás términos ya han sido definidos). Combinando las expresiones anteriores podemos obtener:

$$\frac{(P - I_a)P_e}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (7)$$

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (8)$$

Esta relación no proviene de aplicar la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, o de conservación de energía, etc. Se trata de una propuesta totalmente empírica pero contrastada con datos de campo. Las otras abstracciones están agrupadas en un parámetro inicial de abstracción, definida como una fracción de la retención potencial máxima $I_a = \lambda * S$ (Ponce, 1989), donde λ es el coeficiente de retención inicial. El NRCS recomienda un valor de $\lambda = 0.2$, aunque admite que existe una desviación típica elevada en su determinación. Sin embargo, valores en el rango $0.0 < \lambda \leq 0.3$ han sido documentados en numerosos estudios realizados principalmente en Norteamérica (Springer et al, 1980; Cazier et al., 1984; Ramasastrri et al., 1985; Bosznay, 1989). Bajo este contexto, la ecuación principal del NC se puede expresar de la siguiente forma:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P - 0.8S} \quad (9)$$

Restricción $P \geq 0.2 * S$.

Esta ecuación es mucho más fácil de aplicar, pues solo incluye una variable que se relaciona con las características de la cuenca y del evento. El valor de S es estimado como:

$$S = 25.4 * \left(\frac{1000}{NC} - 10 \right) \quad (10)$$

Para limitar la variabilidad del parámetro S entre 0 y 100, se desarrolló el concepto de NC, que no es más que el resultado de hacer el siguiente cambio de variable:

$$NC = \frac{25400}{S + 254} \quad (11)$$

El NC es un índice de la potencialidad de producir escurrimiento de una cuenca y es inversamente proporcional a la capacidad de retención de la misma. Un $NC = 100$ es un terreno impermeable y un $NC = 0$ es un terreno permeable e insaturable.

Finalmente, para determinar la precipitación efectiva P_e , se sustituye la expresión 10 en la ecuación 9:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{NC} + 50.8\right)^2}{P - \frac{20320}{NC} + 203.2} \quad (12)$$

(Donde P y P_e están en mm)

En la aplicación del método del NC esta variabilidad es muy evidente, de modo que una misma cuenca puede responder a distintas tormentas con NC diferentes. Ponce (1996) cita los siguientes posibles orígenes de esta variabilidad: *el efecto de la variabilidad espacial de la tormenta y de las características de la cuenca, el efecto de la variabilidad temporal de la intensidad de la precipitación, la calidad de los datos medidos, tanto de precipitación como de escurrimiento, y los efectos de la precipitación antecedente asociada con la humedad del suelo.*

El último de estos factores fue reconocido desde las primeras aplicaciones del método, por lo que para su tratamiento el NRCS creó el concepto de Condición de Humedad Antecedente (AMC por sus siglas en inglés), definiendo tres condiciones de AMC: I. Seco, que corresponde a Punto de Marchitamiento Permanente (PMP); II. Humedad media; y III. Húmedo, que corresponde a la Capacidad de Campo (CC). El NC, tiene los valores más bajos para el primer grupo. Para los tres casos, el NC se calcula con las siguientes ecuaciones (CNA, 2006b):

$$NC_1 = NC_2 - \frac{20(100 - NC_2)}{100 - NC_2 + \exp[2.533 - 0.0636(100 - NC_2)]} \quad (13)$$

$$NC_3 = NC_2 - \exp[0.00673(100 - NC_2)] \quad (14)$$

Donde:

NC_1 Número de curva para la condición de humedad I

NC_2 Número de curva para la condición de humedad II (condición media de humedad)

NC_2 Número de curva para la condición de humedad III

El parámetro de retención S referido en la ecuación (10) varía con el contenido de humedad en el perfil del suelo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S = S_{\max} \left(1 - \frac{SW}{SW + \exp(w_1 - w_2 SW)} \right) \quad (15)$$

Donde S es el parámetro de retención para un contenido dado de humedad (en mm), S_{\max} es el máximo valor que el parámetro de retención puede alcanzar en un día dado (en mm), SW es el contenido de humedad del suelo en todo el perfil excluyendo la cantidad el agua correspondiente a PMP y w_1 y w_2 son coeficientes de forma.

El S_{\max} se calcula resolviendo la ecuación (10) para NC_1 y los coeficientes de forma w_1 y w_2 se determinan resolviendo la ecuación (15), empleando las expresiones (16) y (17) asumiendo que:

(a) El parámetro de retención para el NC a la condición de humedad I corresponde al contenido de humedad a PMP.

(b) El parámetro de retención para el NC a la condición de humedad III corresponde al contenido de humedad a CC.

3. El suelo tiene un $NC = 99$ ($S = 2.54$) cuando está completamente saturado.

$$w_1 = \ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 \times S_{\max}^{-1}} - FC \right] + W_2 FC \quad (16)$$

$$w_2 = \frac{\ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 \times S_{\max}^{-1}} - FC \right] - \ln \left[\frac{FC}{1 - 2.54 \times S_{\max}^{-1}} - SAT \right]}{SAT - FC} \quad (17)$$

En las expresiones (16) y (17) FC es la cantidad de agua en el perfil del suelo a CC (en mm), S_3 , es el parámetro de retención para el NC para la condición de humedad III, SAT es la

cantidad de agua en el perfil del suelo cuando está completamente saturado (en mm) y el coeficiente 2.54 es el valor del parámetro de retención para NC = 99.

El NC se calcula con la expresión (10) insertando el parámetro de retención para la condición dada en el día en cuestión.

Las tablas de NC se mencionan en numerosos documentos, por lo que aquí sólo se incluyen las que van a ser utilizadas en el estudio, las cuales son una adaptación hecha por Victor Mockus en 1957 y de uso común en México (tabla 1) (Aparicio, 1996).

Las condiciones de humedad antecedente son consideradas por Aparicio (1996), en función de la precipitación en los cinco días precedentes al evento estudiado y al estado de la vegetación (periodo de crecimiento o periodo de reposo) de la siguiente manera:

- AMC₁ Si $II_5 < 25$ mm, hacer corrección A (condiciones secas).
- AMC₂ Si $25 < II_5 < 50$ mm, no hacer corrección (condiciones medias)
- AMC₃ Si $II_5 > 50$ mm, hacer la corrección B (condiciones húmedas).

Donde II_5 es la lluvia antecedente cinco días antes del evento en cuestión, las correcciones A y B mencionadas se muestran en la tabla 2.

El método del número de curva es ampliamente utilizado en Hidrología ya que cuenta con varias ventajas como su facilidad de uso, la poca información requerida, considera influencia de la cobertura, prácticas conservacionistas, simula los cambios de cobertura vegetal y uso de suelo y las bases de datos se pueden actualizar fácilmente. Sin embargo también tiene varias desventajas, entre otras se pueden enunciar las siguientes: no considera cambios de humedad del suelo, no simula la infiltración instantánea, no considera la estratificación del suelo y agrupa los suelos en solo cuatro clases. En la tabla 3 se presentan algunas observaciones importantes con respecto a la estimación de los NC y a las variables que intervienen en el proceso del mismo.

Tabla 1. Tabla de Mockus, selección del Número de curva para condiciones medias de humedad (Aparicio,1996).

Uso de la tierra y cobertura vegetal	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	-----	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	< 1	67	78	85	89
	Contorneo	>1	70	79	84	88
	Contorneo	< 1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	< 1	62	71	78	81
Cereales	Surcos rectos	>1	65	76	84	88
	Surcos rectos	< 1	63	75	83	87
	Contorneo	>1	63	74	82	85
	Contorneo	< 1	61	73	81	84
	Terrazas	>1	61	72	79	82
	Terrazas	< 1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
	Surcos rectos	< 1	58	72	81	85
	Contorneo	>1	64	75	83	85
	Contorneo	< 1	55	69	78	83
	Terrazas	>1	63	73	80	83
	Terrazas	< 1	51	67	76	80
Pastizales	-----	>1	68	79	86	89
	-----	< 1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	< 1	6	35	70	79
Pradera permanente	-----	< 1	30	58	71	78
Bosques naturales	-----	-----	56	75	86	91
	-----	-----	46	68	78	84
	-----	-----	36	60	70	77
	-----	-----	26	52	62	69
	-----	-----	15	44	54	61
Caminos	-----	-----	72	82	87	89
	-----	-----	74	84	90	92

Tabla 2. Ajuste del NC por las condiciones de AMC (Aparicio, 1996)

N	N con corrección A	N con corrección B
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	63	91
90	78	96
100	100	100

Tabla 3. Observaciones importantes en la estimación de los NC

Observaciones en la estimación de los NC	Referencia
El valor del NC depende mucho de la precisión con que se estime las Condiciones Antecedentes de Humedad (AMC).	Hope et al., (1981)
El NC es el parámetro que más sensibilidad muestra en un modelo de simulación de escurrimiento.	Borah (1989)
Cuanto mayor es la precipitación del evento, menor es la importancia relativa del error en la estimación del NC	Hawkins (1975)
Los NC recogidos en las tablas difieren con mucha frecuencia de los obtenidos mediante infiltrómetros experimentales o datos reales de cuencas aforadas.	Smith et al., (1978), Hawkins (1979), Springer et al. (1980) y Pomeroy (1987)
En el método del NC, la humedad del suelo actúa como un sustituto o camuflador de la variabilidad procedente de otros factores como la intensidad de la lluvia o la variabilidad espacial de las características de la cuenca	Hawkins et al. (1985)
Si se estima mal el NC, por ejemplo un 10% (el cual puede conseguirse con únicamente variar el AMC) este error de cálculo puede producir hasta un 50% de variación en el escurrimiento estimado.	Hawkins (1975)
Una mala estimación del NC tienen consecuencias importantes y una errónea selección de las Condiciones de Humedad Antecedente (AMC) o un cambio drástico en las mismas producido por otras condiciones meteorológicas distintas a las supuestas, pueden resultar en errores muy serios en la evaluación del NC y del volumen total de escurrimiento.	Chen (1981)
No existe una relación predeterminada entre la y S. La verdadera magnitud de la depende de un elevado número de propiedades de la cuenca que varían de un evento a otro.	Bosznay (1989)
Un coeficiente de abstracción inicial igual (λ) igual a 0.2 ofrece buenos resultados para grandes cantidades de lluvia, pero normalmente produce estimaciones por defecto para cantidades bajas o medias. Por lo tanto, se sugieren que el valor del coeficiente debe reducirse a 0.1 o incluso menos.	Smith (1975), Hawkins (1976), Aron et al. (1977),
La relación $\lambda = 0.2$, de las abstracciones iniciales, funciona mejor en cuencas con climas húmedos, y según nos aproximamos a zonas áridas se presenta una progresiva sobrestimación.	Springer et al. (1980), Hjiemfeit (1980)
Para mejorar los resultados en la aplicación del método del NC para regiones áridas y semiáridas, se recomienda una modificación de la clasificación de los grupos hidrológicos del suelo.	Wood et al., (1984)

Continuación de la tabla 3.

Observaciones en la estimación de los NC	Referencia
Es recomendable disponer de datos locales de NC para conseguir precisiones aceptables. Sin embargo, obtener información significativa de una zona, particularmente cuando esta es grande, resulta muy laborioso, caro y largo en el tiempo.	Ponce (1989), Chong et al., (1986)
La determinación de los NC debe hacerse mediante la instalación de parcelas experimentales con un aforador de escurrimiento.	Descheemaeker et al., (2008), Huang et al., (2006)
La precisión del NC puede mejorarse si se incluyen más parámetros en función de las características del suelo (como la conductividad hidráulica y la porosidad del suelo) que reflejen los efectos sobre el escurrimiento de los cambios en los usos del suelo y las labores de cultivo.	Rallison (1980), Rallison et al., (1981)
Es preciso que el método del NC pase de ser un modelo uniparamétrico a ser un modelo biparamétrico, donde sea necesaria la determinación del NC e la.	Chen (1982), Chen (1981)

2.2. El cambio climático global

El cambio climático global es una de las principales preocupaciones para la sostenibilidad futura de nuestro desarrollo dado su impacto en numerosos sectores socioeconómicos de la actividad humana (UC, 2007). En las últimas décadas se ha llevado a cabo un enorme esfuerzo de investigación para explicar las posibles causas de este fenómeno y para tratar de predecir su tendencia futura. Este conocimiento es de vital importancia para tomar medidas preventivas de mitigación y también medidas de adaptación a través de la adecuada planificación de las actividades socio-económicas futuras que puedan ser afectadas.

Actualmente se considera que el sistema climático está formado por varios subsistemas que interaccionan entre ellos intercambiando masa, energía y cantidad de movimiento. Estos subsistemas son la atmósfera que es la capa gaseosa que cubre el planeta, la hidrósfera formada por toda el agua en forma líquida, la criósfera que corresponde al agua en estado sólido, la litósfera que incluye a los continentes y la biósfera formada por la fauna y flora de continentes y océanos (Casas et al., 1999). La Tierra recibe grandes cantidades de calor, luz y rayos ultravioletas procedentes del Sol y a su vez emite gran cantidad de la energía recibida.

Del 100% de la radiación que llega a la tierra el 40% es reflejada y el 60% restante es absorbida por la superficie de la tierra y por la atmósfera (Ayllon, 1996). El suelo y los océanos remiten la energía absorbida en forma de radiación electromagnética.

El cuarto informe sobre el cambio climático del IPCC establece con claridad que, *“...El calentamiento del sistema climático es ahora inequívoco, como resulta de las observaciones de incrementos en las temperaturas promedio global del aire y de los océanos, derretimiento de hielo y nieve e incremento del nivel promedio del mar”* (IPCC, 2007b). Tan solo la temperatura superficial de la Tierra se ha incrementado entre 1860 y el año 2000 alrededor de 0.7 °C, y solo durante el siglo XX se registró a nivel global un incremento de 0.6 °C. Por ello, la década de los noventa ha sido catalogada como la más cálida del milenio y caracterizada por la ocurrencia marcada de extremos climáticos, por ejemplo, el año de mayor temperatura (1998) desde 1860 (PNUD, 2008). La hipótesis más aceptada conforme a la evidencia física es que el incremento de los GEI ha originado el sobrecalentamiento de la Tierra (Mundo et al., 1993; Mundo et al., 1994), muy probablemente, por el aumento observado de las concentraciones de GEI antropógenas.

A continuación se enuncian los principales impactos del cambio climático futuros en los principales sistemas y sectores (IPCC, 2007a):

Ecosistemas. De acuerdo al cuarto informe del IPCC (IPCC, 2007a), la resiliencia de numerosos ecosistemas se verá probablemente superada por la combinación de inundaciones, sequías, incendios forestales, insectos y acidificación de los océanos, con otros factores de cambio global como cambios en el uso del suelo, contaminación, fragmentación de los sistemas naturales y sobreexplotación de recursos. Aproximadamente entre 20% y 30% de las especies vegetales y animales estarán expuestas a un mayor riesgo de extinción si la temperatura aumenta entre 1.5 °C y 2.5 °C. Para aumentos de la temperatura media global superiores a 1.5-2.5°C y para las correspondientes concentraciones de CO₂ en la atmósfera, las proyecciones indican cambios en la estructura y función de los ecosistemas, en las interacciones ecológicas y desplazamientos de ámbito geográfico de las especies, con consecuencias negativas para la biodiversidad y para los bienes y servicios derivados de los ecosistemas, por ejemplo, en el suministro de agua y alimentos.

Costas. Las proyecciones indican que las costas, los humedales costeros, incluyendo salinas y manglares estarían expuestos a las inundaciones y a la erosión, por efecto del cambio climático y del aumento de nivel del mar. Este efecto podría ser mayor en áreas densamente pobladas, sobre todo en países en desarrollo.

Industria, asentamiento y sociedad. Las industrias, asentamientos y sociedad más vulnerables serían, en términos generales, las situadas en llanuras costeras y planicies propensas a las crecidas de los ríos, así como aquellas cuya economía está estrechamente vinculada a recursos sensibles al clima y otras ubicadas en áreas propensas a fenómenos meteorológicos extremos, especialmente donde los procesos de urbanización son rápidos. Sin embargo, el cambio climático también generaría beneficios en áreas templadas pues disminuirían las defunciones por menor exposición al frío.

Agua. Es probable que el cambio climático intensifique la presión sobre los recursos hídricos, debido al crecimiento de la población, al cambio de los usos del suelo y a la urbanización. Los cambios en la precipitación y en la temperatura inducirán cambios en el escurrimiento y en la disponibilidad del agua. Es probable que el escurrimiento aumente en latitudes altas entre un 10% y 40% de aquí a mediados de siglo, disminuya entre un 10% y 30% en ciertas regiones secas de latitud media, tenga un cambio porcentual incierto en regiones desérticas y cambios menos fiables en latitudes más bajas, por ejemplo las regiones monzónicas.

2.2.1. Los modelos de circulación general

Actualmente, los Modelos de Circulación General Acoplados (CGCM por sus siglas en inglés) son las mejores herramientas, en la ciencia climática moderna, para realizar proyecciones de cambio climático en las décadas por venir (Montero et al., 2008). Para estimar los potenciales impactos del cambio climático y definir acciones de prevención es necesario conocer la magnitud, ubicación y plazo al cual se puede presentar una condición anómala del clima.

Son varios los elementos que se deben tomar en cuenta para generar escenarios de cambio climático. Uno de mayor importancia es trabajar con diversos CGCMs varios experimentos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes, para llegar a lo que se conoce como un ensamble multimodelo que permita conocer el rango más probable de

condiciones futuras del clima a partir del análisis de dónde se encuentre la mayor parte de las soluciones. El objetivo de proyectar el clima por ensamble es proporcionar un cuadro más detallado de la gama de estados futuros posibles del clima que sea consistente con nuestro conocimiento del sistema, permitiendo estimar en combinación con proyecciones de la vulnerabilidad, qué puede suceder y cuáles son las varias alternativas que el usuario tiene para la gestión del riesgo (Magaña, 2010).

La fuente principal de información para los informes del IPCC son las predicciones de tendencias futuras de variables climáticas como la temperatura o la precipitación, obtenidas a partir de las simulaciones de distintos CGCM llevadas a cabo por distintos centros de investigación de referencia, como el Centro Hadley, que utiliza un modelo denominado HadCM (Hadley Community Model), o el Max Planck Institute (MPI), que utiliza un modelo denominado ECHAM (UC, 2007).

Algunos de los CGCM más utilizados son HadAM3H (Modelo Atmosférico del Centro Hadley del Reino Unido, versión 3); ECHAM4-OPYC (modelo acoplado atmósfera-océano del Institute Max Planck de Meteorología de Alemania, versión 4); CGCM2 (Modelo Acoplado Atmósfera-Océano del Centro Canadiense del Clima, versión 2); HadCM3 (Modelo Acoplado Atmósfera-Océano del Centro Hadley del Reino Unido, versión 3), y HadCM2SUL (Modelo Acoplado Atmósfera-Océano del Centro Hadley del Reino Unido, versión 2), entre otros (INM, 2007).

2.2.2. Escenarios de cambio climático del IPCC

Un escenario climático es una representación del clima futuro que es internamente consistente, que ha sido construido empleando métodos basados en principios científicos y que puede ser utilizada para comprender las respuestas de los sistemas medio ambientales y sociales ante cambios futuros (Vinner et al., 1992). Como no es factible determinar con precisión cual será la modificación de los volúmenes de GEI en el futuro, debido a que depende de variables sociales y económicas imposibles de prever con exactitud, se suelen construir escenarios que tomen en cuenta las condiciones probables para entonces. Cada escenario es, desde este punto de vista, una visión de un mañana asequible, sobre la base de modelos conocidos y de las combinaciones más probables e emisiones de GEI en el porvenir (Martínez, 2007).

En 1996, el IPCC inició el desarrollo de nuevos escenarios de emisiones para actualizar los preparados en 1992, conocidos como Escenarios IS92. Se construyeron cuatro familias de escenarios, cada uno de ellos fundamentados en una descripción de las condiciones en las que posiblemente se encuentre el mundo en un futuro. Estos nuevos escenarios son conocidos en términos genéricos como Escenarios IE-EE.

La familia A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, una población mundial que alcanza su máximo a mediados del presente siglo, empieza a declinar a partir de entonces y adopta tecnologías más eficientes. Esta familia de escenarios se subdivide conforme a las tecnologías a usar: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), con fuentes alternas de energía (A1T), y con un balance entre diferentes fuentes de energía (A1B). Este último escenario es uno de los más utilizados en las simulaciones, pues se le considera entre los más probables. La familia A2 de escenarios describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento fuerte de población, desarrollo económico y cambio tecnológico lento. Los escenarios A2 son pesimistas en cuanto a que se mantiene un elevado aumento de las emisiones de GEI, en particular de bióxido de carbono (IPCC, 2007a).

La familia B1 describe un mañana en el que la población, como en los escenarios A1, alcanza su máximo a mediados del siglo XXI, con un crecimiento económico acelerado, pero orientado a los servicios y las tecnologías de la información, con un uso menor de materias primas y con un aprovechamiento sustentable de los recursos, pero aún sin tomar medidas específicas respecto del clima. Finalmente la familia B2 se percibe muy optimista que describe un porvenir en el que se asumieron previsiones locales y regionales, para la protección del medio ambiente, con un crecimiento de la población menor que en los escenarios A1 y B1.

En la figura 5 se presenta las emisiones previsibles de los principales GEI y de los cambios de temperatura y nivel del mar, conforme a estos escenarios de cambio climático.

The global climate of the 21st century

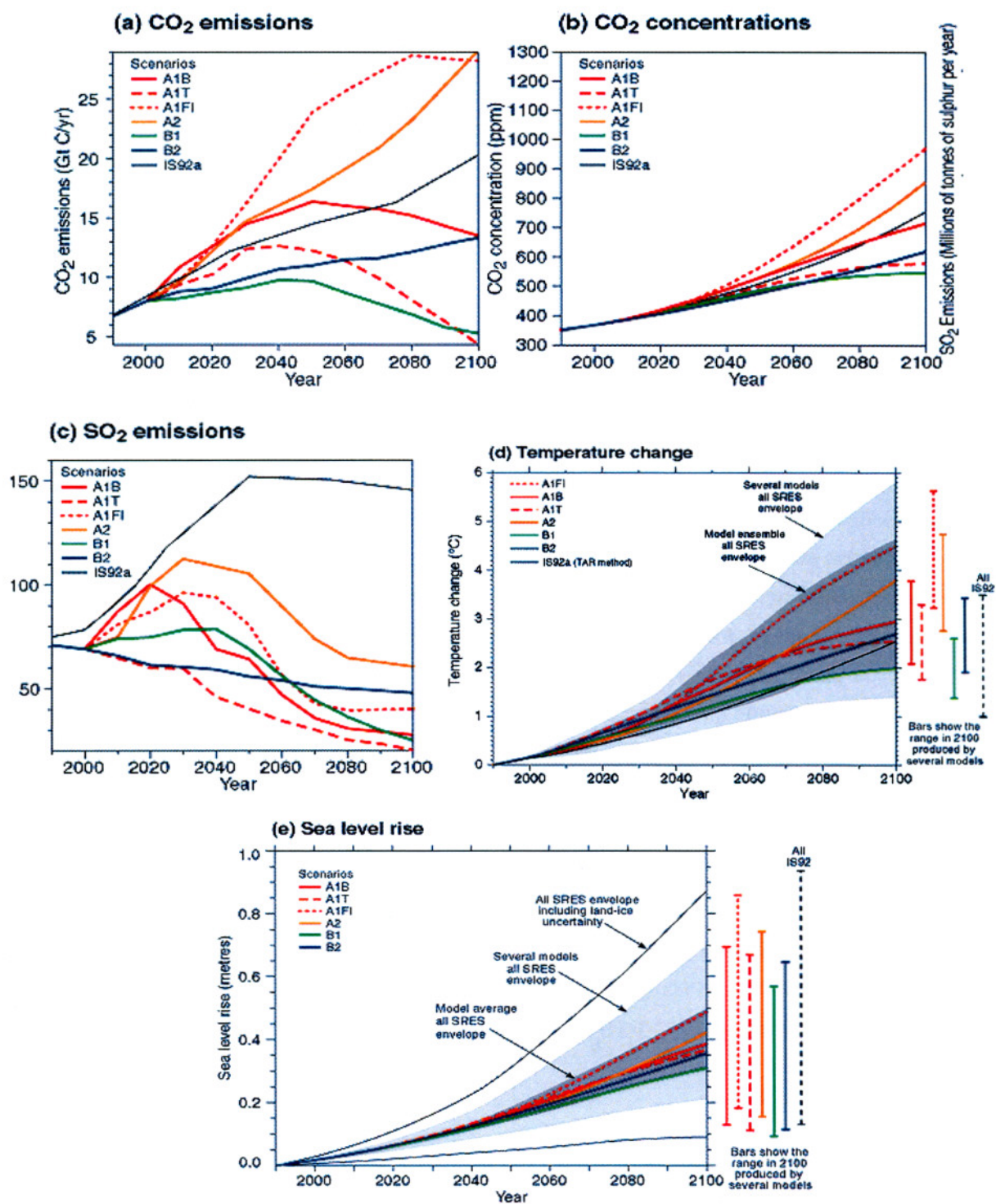


Figura 5. Escenarios de emisiones GEI y de los cambios de temperatura y nivel del mar (IPCC, 2001)

2.2.3. Escenarios regionales de cambio climático

En la actualidad, la generación de escenarios regionales de cambio climático es un objetivo prioritario de investigación y ocupa gran parte de la actividad en los distintos proyectos internacionales sobre cambio climático que se llevan a cabo (Leung, et al 2003). El problema principal para la generación de escenarios regionales de cambio climático es que los CGCM poseen una resolución espacial limitada debido a factores físicos (reproducen la dinámica de la atmósfera). Por tanto, las predicciones globales de las condiciones futuras del clima se obtienen en rejillas que oscilan entre los 250 km y 350 km. De aquí, los modelos globales no tienen en cuenta las heterogeneidades de una misma región, con distintas características geomorfológicas y distintas climatologías (UC, 2007).

A partir del informe 2001 del IPCC, se han llevado a cabo distintos estudios relativos a la regionalización de estas predicciones, incluyendo los proyectos Europeos PRUDENCE Y STARDEX, los cuales forman parte del último informe del IPCC. En el primero de los proyectos se han acoplado distintos modelos de área limitada sobre Europa a las predicciones globales del IPCC (downscaling dinámico). Por otra parte, el proyecto STARDEX ha analizado el uso de técnicas estadísticas de downscaling para proyección regional de cambio climático, haciendo énfasis en los extremos (olas de calor, sequías). Estos proyectos indican que ninguna de las dos técnicas es superior una de otra, sino que es necesario combinar ambas para obtener resultados óptimos y cuantificar la incertidumbre de las proyecciones regionales de forma apropiada (UC, 2007).

Hoy en día, los Modelos de Circulación General Acoplados (CGCM, por sus siglas en inglés) son las mejores herramientas para poder estimar los posibles cambios en el clima global en las décadas por venir. Debido a ello, es común ver estudios sobre impacto de cambio climático que consideran el promedio de un conjunto de modelos de este tipo como una primera aproximación para conocer que se espera a futuro para una cierta región (Montero et al., 2008).

2.2.4. Estudios de cambio climático en México

De acuerdo a Martínez (2007), México es especialmente vulnerable al calentamiento global, ya en algunas regiones son cada vez mas recurrentes las sequías y en otros a fuertes

precipitaciones estacionales (ocasionadas por huracanes y tormentas tropicales, en otras). En México, los avances en la investigación sobre cambio climático han sido principalmente en tecnologías de mitigación de emisiones de GEI, evaluación de la vulnerabilidad y opciones de adaptación. La investigación formal de cambio climático está concentrada en un 90% en instituciones académicas (públicas y paraestatales) (Tejeda et al., 2007).

Las principales investigaciones que ha financiado el INE son: *“México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México”*. El estudio describe la construcción de escenarios climáticos futuros que son la base para los estudios de vulnerabilidad sobre aspectos físicos, sociales y económicos, como la sequía, recursos hídricos, ecosistemas forestales y zonas costeras (Gay, 2000). Dada la importancia del tema, el INE como parte de su misión de difundir información científica y técnica sobre problemas ambientales prioritarios, solicitó a un grupo de especialistas de diversas disciplinas que contribuyeran al libro *“Cambio climático: una visión desde México”* (Martínez et al., 2004), aportando, compartiendo sus conocimientos y experiencias sobre los aspectos científicos, sociales, económicos e institucionales del cambio climático. Otro estudio realizado es *“El control conjunto de la contaminación atmosférica urbana y de las emisiones de GEI en la zona metropolitana del Valle de México; Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos”*. Asimismo, el INE en coordinación con la Fundación Nacional para la Ciencia de los Estados Unidos (NSF por sus siglas en inglés), realizaron los siguientes estudios *“La variabilidad climática y sus impactos en México, Centroamérica y la región del Caribe”*, en este estudio se monitorearon las variables oceanográficas y atmosféricas que influyen sobre las precipitaciones en Brasil, Colombia, México, Costa Rica, los Estados Unidos, Cuba y Jamaica. Al mismo tiempo, se analizaron los impactos de la variabilidad climática en diversos sectores socioeconómicos de algunos países: agricultura (México); generación de energía hidroeléctrica (Costa Rica) y recursos hídricos (México y los Estados Unidos de América) (Fernández et al., 2003).

A través de la Cooperación internacional México-Estados Unidos de América, se realizó el estudio *“Impactos y opciones de adaptación del recurso agua en Sonora”*. A partir de los análisis de tendencia de lluvia, se encontró que la región norte del país registró en los últimos cuarenta años, un aumento en la precipitación. En 2003, la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID por sus siglas en inglés) financió el estudio *“Proyectos forestales y de uso de suelo que mitigan las emisiones de gases de efecto invernadero: Línea*

base y adicionalidad". Los modelos utilizados fueron: el modelo de cambio de área forestal (FAC, por sus siglas en inglés); el modelo de uso de la tierra y secuestro de carbono (LUCS, por sus siglas en inglés) y el modelaje geográfico (GEOMOD, por sus siglas en inglés) (Brown et al., 2003).

En el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se han realizado los siguientes proyectos: *Evaluación integrada de la vulnerabilidad social y la adaptación a la variabilidad climática y al cambio climático entre agricultores de México y Argentina*; *Variabilidad climática y sus impactos en las regiones de México, Centroamérica y el Caribe* y *la Variabilidad climática regional en México* (Fernández et al., 2003).

En el trabajo "*Efectos climáticos y antropogénicos sobre las lagunas saladas de la mesa central potosina: análisis satelital multiespectral y multitemporal*" realizado en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, se analizó el impacto de la actividad humana y del calentamiento global sobre la región semidesértica de la Meseta Central Potosina (MCP). El estudio se enfoca en el cambio de uso de suelo y la variación de humedad de una serie de lagunas someras ubicadas entre los estados de San Luis Potosí y Zacatecas. Se realizó un análisis multitemporal de imágenes satelitales con la finalidad de encontrar cambios de uso de suelo, humedad y temperatura. La metodología utilizada incluye análisis de NDVI, NDWI (Normalized Difference Water Index), clasificación supervisada y obtención de temperaturas a partir de la banda termal de las imágenes Landsat y ASTER (Gay et al., 2008).

En el año 2010, se desarrolló la "*Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones*", el cual explica cómo se pueden utilizar algunas herramientas estadísticas para obtener estimaciones de los rangos de cambio en precipitación y temperatura y se presentan tres ejemplos de cómo se usan los escenarios regionales de cambio climático para estimar potenciales impactos en sectores y regiones (Magaña, 2010).

Con la finalidad de buscar un acercamiento entre el análisis de un problema ambiental a partir de la visión sistémica y el conocimiento del clima, Landa et al (2008), desarrollaron el estudio "*Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*". Asimismo, en el trabajo de investigación "*Análisis climatológico, socioeconómico y de políticas públicas para la adaptación*

al cambio climático del café en Chiapas”, se realizó un análisis climatológico, socioeconómico y de políticas públicas para la identificación de riesgo y vulnerabilidad para el cultivo del café en la zona altos y selva del estado de Chiapas, se documentó el proceso completo de análisis de vulnerabilidad climatológica y consulta a los actores involucrados para la implementación de mecanismos de adaptación. A nivel de planeación local, en el año 2010, la Unión Internacional para el Cuidado de la Naturaleza (UICN) elaboró el trabajo *“Cambio Climático y Gobernanza del Agua, promoviendo la adaptación basada en ecosistemas en Mesoamérica”*, que incluye las cuencas de los ríos Coatán y Cahoacán, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de grupos sociales sensibles aspira fortalecer la capacidad de gobernanza del agua, permitiendo a los Estados una mejor adaptación a los impactos del cambio climático a través de un enfoque basado en ecosistemas (UICN, 2010). De la misma forma, en el estudio *“Estrategia del sector cafetalero para la adaptación, mitigación y reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático en la Sierra Madre de Chiapas”*, de definieron áreas temáticas claves para orientar las distintas acciones de implementación de las medidas de disminución de la vulnerabilidad, fortalecimiento de la capacidad de adaptación y mitigación del sector cafetalero frente al cambio climático (CI, 2011b). En el año 2012 se realizó el estudio *“Vulnerabilidad socioambiental frente al cambio climático en la cuenca del río Huehuetán Chiapas”*, con el objetivo de diagnosticar los factores que determinan la construcción de la vulnerabilidad socioambiental ante el cambio climático, a fin de contar con elementos que permitan reducir la acción de factores detonadores de desastres naturales (Soares et al., 2012).

En el año 2011, se desarrolló el *“Programa de Acción Ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas”*, coordinado por Conservación Internacional A. C. y asesorados por expertos del Centro de Ciencias de la Atmósfera. Para los escenarios climáticos se utilizó el modelo Japonés TL959, que es un prototipo del modelo atmosférico global de nueva generación de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) y el Instituto de Investigaciones Meteorológicas (MRI, por sus siglas en inglés). El modelo japonés construye sus ensambles con base en las emisiones antropogénicas desarrolladas por el Reporte Especial de Escenarios Climáticos del IPCC (SRES por sus siglas en inglés), usando el escenario A1B con una resolución de 20 x 20 km (CI, 2011a).

2.2.5. Regionalización de escenarios climáticos para México

En el Centro de Ciencias de la Atmósfera se desarrolló el proyecto *“Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector”*. Se generaron proyecciones de cambio climático regionalizadas para México con una resolución mensual y espacial de 50 km x 50 km para el periodo 2000-2099 de los escenarios A1B, A2, B1 y para el escenario de reducción de emisiones (COMMITTED), a partir de la reducción de escala de los MCG utilizados en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC. En dicha regionalización se aplicó el método estadístico *Climate Predictability Tool* (Magaña et al., 2007).

En el mismo Centro de Ciencias de la Atmósfera se llevó a cabo la *“Actualización de las regiones de Douglas, análisis de tendencias de temperatura y precipitación y escenarios de cambio climático para México”*, usando la regionalización hecha por Arthur Douglas, quien construyó 18 regiones, para caracterizar la climatología de México. Con la regionalización de Douglas, también se obtuvieron los escenarios de cambio climático mensuales, con horizontes 2020, 2050 y 2080. Se eligieron los modelos MPIECH-5, UKHADGEM y GFDLCM20, con los escenarios de emisión A2, A1B y B1 (Gay, et al 2008). También en el mismo Centro, se está desarrollando el proyecto: *“Escenarios de cambio climático en el atlas climático digital de México”*, en el cual se generarán mapas con información de distintas variables climáticas, así como escenarios de cambio climático a escala regional. Dichos escenarios se están integrando de acuerdo a los modelos del IPCC para el siglo XXI con un "downscaling" realizado con modelos de alta resolución que considera los efectos topográficos de pequeña escala.

En el 2008, el IMTA en coordinación con la CNA, desarrollaron la *“Regionalización dinámica de escenarios de cambio climático en México, utilizando los modelos de mesoescala (MM5) y Weather Research and Forecasting (WRF)”*, que presenta los resultados de las simulaciones particulares de los siglos XX y XXI utilizando los modelos de mesoescala MM5 y WRF con datos de entrada y de frontera del modelo CCSM3 (CNA, 2008c).

El IMTA está desarrollando el trabajo *“Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México”*. El objetivo de este trabajo es la regionalización para México de las simulaciones de los CGCM que participaron en el 4º

Reporte de Evaluación del IPCC utilizando el REA para precipitación y temperatura en superficie (tabla 4). El método REA toma en cuenta dos criterios de credibilidad: el desempeño del modelo en reproducir el clima actual (criterio de desempeño) y la convergencia de los cambios simulados entre modelos (criterio de convergencia). Utilizando los datos de 16 de los 23 CGCM, a la fecha se ha obtenido como primer producto el cálculo de las anomalías promedio mensuales de precipitación (mm/día) y temperatura en superficie (°C) para los escenarios SRES-A1B y SRES-A2 con respecto al período 1960-1969 alrededor de México (Montero et al., 2008).

Tabla 4. Relación de CGCM utilizados en el estudio de regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México (Montero et al., 2008).

No.	Nombre del Modelo	Siglas	País de Origen
1	Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen Climate Model Version 2	BCCR-BCM2.0	NORUEGA
2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3	CCCMA-CGCM3	CANADA
3	Centre National de Recherches Meteorologiques, Coupled Model 3	CNRM-CM3	FRANCIA
4	CSIRO Atmospheric Research, Mk3.5	CSIRO-MK3.5	AUSTRALIA
5	CSIRO Atmospheric Research, Mk3	CSIRO-MK3	AUSTRALIA
6	Max Planck Institute for Meteorology ECHAM5	MPI ECHAM5	ALEMANIA
7	Meteorological Institute of the University of Bonn, ECHO-G	MIUB ECHO G	ALEMANIA-KOREA
8	National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.0	GFDL-CM2.0	USA
9	National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.1	GFDL-CM2.1	USA
10	National Institute of Geophysics and Volcanology, ECHAM 4.6	INGV -ECHAM-SXG	ITALIA
11	Institute for Numerical Mathematics, CM3	INMCM3.0	RUSIA
12	Institute Pierre-Simon Laplace	IPSL- CM4	FRANCIA
13	Model for Interdisciplinary Research on Climate Medium Resolution	MIROC3 MEDRES	JAPON
14	Meteorological Research Institute, Coupled Global Climate Model 3	MRI CGCM2 3 2 ^a	JAPON
15	National Center for Atmospheric Research Community Climate System Model	NCAR_CCSM3 _0	USA
16	National Center for Atmospheric Research, Parallel Climate Model	NCAR-PCMI	USA
17	Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office	UKMO HADCM3	REINO UNIDO
18	Hadley Centre Global Environmental Model Met Office	UKMO HADGEMI	REINO UNIDO
19	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3 T63	CCCMA-CGCM3	CANADA
20	Laboratory Atmospheric Sciences and Geophysical Institute of Atmospheric Physics, FGOALS1.0_g	IAP-FGOALS	CHINA,

Continuación de la tabla 4

No.	Nombre del Modelo	Siglas	País de Origen
21	National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, Atmosphere-Ocean Model	GISS-AOM	USA
22	National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, ModelE20/HYCOM	GISS-EH	USA
23	Model for Interdisciplinary Research on Climate High Resolution	MIROC3-2-HIRES	JAPON

2.3. Modelación hidrológica ante escenarios de cambio climático

En los últimos años, la incertidumbre climática sobre los recursos hídricos, ha dado lugar en muchos países a considerar escenarios de cambio climático en la aplicación de modelos de simulación hidrológica, esto con la finalidad de calibrar la vulnerabilidad de los sistemas existentes. Entre algunos de los estudios realizados sobre este tema, se encuentran los siguientes (tabla 5):

Tabla 5. Estudios sobre modelación hidrológica ante escenarios de cambio climático

Modelo	Objetivo del estudio	Referencia
Modelo hidrológico distribuido SHETRAN	Se simularon escenarios de cambio climático en una pequeña cuenca mediterránea del sur de Francia en los ríos Real Collobrier y Rimbaud.	Ewen et al., (1996)
Modelo hidrológico conceptual	Se evaluó la capacidad necesaria de embalses debido a los impactos de cambio climático en cuencas de la España peninsular.	Garrote et al., (1999)
Modelo hidrológico HYDRA	Se aplicó el modelo HYDRA utilizando salidas de los MCG. Los resultados de este estudio muestran que el HYDRA puede ser una herramienta útil para simular los procesos hidrológicos y su relación con el cambio climático.	Coe (2000)
Modelo hidrológico distribuido SIMPA	Se desarrolló una metodología para evaluar el impacto sobre los recursos en España con el modelo hidrológico distribuido SIMPA, utilizando información del modelo regional de cambio climático PROMES.	Fernández (2002)



Continuación de la tabla 5

Modelo hidrológico HEC-HMS	Se analizaron los impacto del cambio climático y la magnitud de los fenómenos hidrológicos extremos en la cuenca urbana del suroeste de Ontario, Canadá. De acuerdo con los escenarios, el cambio climático puede tener efectos favorables sobre la distribución de los fenómenos hidrológicos extremos en el área de estudio.	Cunderlik et al., (2005)
Modelo hidrológico conceptual	Evaluar los efectos en los recursos hídricos considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del Ebro, España. Se simularon los efectos del cambio climático para los escenarios A1B, A2, B1 y Commit del IPCC, utilizando los resultados de las proyecciones del modelo de circulación general CGCM3.	Samper et al., (2007a)
Modelo hidrológico distribuido SWAT	Se evaluaron los efectos en los recursos hídricos considerando escenarios de cambio climático en dos subcuencas del río Biobío de la Zona Centro-Sur de Chile. Los resultados indicaron una reducción de los gastos medios anuales y mensuales.	Stehr et al., (2010)
Modelo RORA	Analizar las tendencias en los gastos de 12 estaciones hidrométricas del estado de Michoacán, México. El resultado principal fue un indicador del impacto de los factores climáticos y antropogénicos que están afectando el escurrimiento.	Hernández et al., (2010)

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1. Ubicación de la zona de estudio

Con base en la regionalización hidrológico-administrativa de la Comisión Nacional del Agua, la Región Frontera Sur comprende los estados de Chiapas y Tabasco y una pequeña parte del estado de Oaxaca (figura 6). Cuenta con el mayor potencial hidrológico del país, aproximadamente el 30% del escurrimiento a nivel nacional, con una disponibilidad aproximada del recurso hídrico de 135.5 km³, 90% superficial y 10% subterránea, y una precipitación promedio anual de 1,869 mm, mayor que la nacional de 777 mm (CNA, 2012).



Figura 6. Localización de la región Frontera Sur (CNA, 2012).

La Región Frontera Sur contempla cuatro Regiones Hidrológicas (RH): RH 30 Grijalva-Usumacinta (82.26%), RH 23 Costa de Chiapas (11.66%), RH 29 Coatzacoalcos (6.06%), y la RH 22 Tehuantepec (0.02%) (figura 7). La cuenca del río Huixtla forma parte de la RH No. 23 Costa de Chiapas. El río Huixtla tiene su origen en la Sierra Madre de Chiapas y escurre hacia

la zona costera en dirección suroeste, para desembocar en una zona lagunar denominada “El Hueyate”, que se intercomunica con el Océano Pacífico (figura 8). Geográficamente, la cuenca del río Huixtla se localiza entre los 14°48' y 15° 13' de latitud norte y 92°20' y 92°50' de longitud oeste. Desde su inicio hasta su desembocadura, es decir, en las inmediaciones de los pantanos, se estima que la cuenca del río Huixtla tiene una área aproximada de 603 km² (CNA, 2004).



Figura. 7. Regiones Hidrológicas de la región Frontera Sur (CNA, 2012)



Figura 8. Ubicación de la cuenca del río Huixtla (CNA, 2004)

La región en que se ubica la cuenca del río Huixtla, en virtud de sus características demográficas y económicas, presenta en su territorio marcadas diferencias, enmarcadas en tres regiones económicas: Soconusco, Sierra e Istmo Costa. En la tabla 6 se puede apreciar la distribución de la población en la región de acuerdo al Censo de población y vivienda 2010 de INEGI.

El municipio de Huixtla limita al norte con Escuintla y Motozintla, al este con Tuzantán y Huehuetán, al sur con Mazatán y el Océano Pacífico y al oeste con Villa Comaltitlán. Tiene una extensión territorial de 385 km² que equivale aproximadamente al 7% de la superficie de la región del Soconusco y al 0.5% de la superficie total del estado de Chiapas. Cuenta con una localidad urbana (la cabecera municipal del mismo nombre) y 206 localidades rurales. La cabecera municipal se ubica en las coordenadas geográficas 15° 09' latitud norte y 92° 28' longitud oeste, a una altura promedio de 50 msnm.

Tabla 6. Población en la región de estudio en habitantes (INEGI, 2010b)

Región Socioeconómica	Municipios	Total	Urbana	Rural
Soconusco	Acacoyagua	16,814	7,515	9,299
	Acapetahua	27,580	8,696	18,884
	Cacahoatán	43,811	19,127	24,684
	Escuintla	30,068	12,289	17,779
	Frontera Hidalgo	12,665	3,519	9,146
	Huehuetán	33,444	14,069	19,375
	Huixtla	51,359	32,033	19,326
	Mapastepec	43,913	17,931	25,982
	Mazatán	26,573	11,098	15,475
	Metapa	5,033	2,610	2,423
	Suchiate	35,056	19,106	15,950
	Tapachula	320,451	233,185	87,266
	Tuxtla Chico	37,737	13,888	23,849
	Tuzantán	28,137	5,426	22,711
	Unión Juárez	14,089	6,431	7,658
	Villa Comaltitlán	27,899	7,201	20,698
		Subtotal Soconusco	754,629	414,124
Sierra	Motozintla	69,119	23,755	45,364
	El Porvenir	13,201	0	13,201
		Subtotal Sierra	82,320	23,755
Istmo Costa	Arriaga	40,042	27,800	12,242
	Pijijiapan	50,079	16,917	33,162
	Tonalá	84,594	49,264	35,330
		Subtotal Istmo Costa	174,715	93,981
	Total Costa Chiapas	1,011,664	531,860	479,804

3.2. Geología y topografía

La geología de la zona en estudio corresponde a la época Paleozoica. La actividad tectónica de la misma ha provocado una orografía accidentada, de montañas con laderas escarpadas en proceso de levantamiento y hundimiento de la llanura costera. Muchos de los torrentes están formados por material fácil de escavar y fácilmente erosionable. Dentro de las cuencas se forman cárcavas, especialmente en las zonas de mayor pendiente, debido a los deslaves o derrumbes de material dendrítico. Las partes bajas de las cuencas están generalmente formadas por material granular sedimentario, aluviones y aglomerados que han sido generados

por acarreos fluviales, formando en muchos casos conos de deyección o abanicos aluviales, que inducen a la formación de mantos acumulativos de aluviones, tanto en los cauces como en la llanura de inundación de los valles fluviales. Éste material granular de la parte baja de las cuencas es fácilmente movable y transportable ante flujos de cierta magnitud, que facilitan los procesos erosivos de tipo pluvial y fluvial (CNA, 2004).

La topografía de la parte alta y media de la cuenca es escarpada, que acusan los efectos antropogénicos por diversas actividades, entre las más importantes la agricultura y la ganadería, que han provocado la deforestación de amplias zonas de la cuenca. En un ancho promedio no mayor de 30 km, en su parte más ancha y de 10 km, en su parte más angosta, la topografía cambia de manera abrupta, la zona escarpada con zonas de mínima transición cambia su pendiente para dar paso a la franja costera plana, con pendiente de 1/30 en promedio, en donde desembocan los cauces turbulentos de los flujos de montaña para dar paso a los flujos de planicie.

3.3. Características hidrológicas

La cuenca del río Huixtla forma parte de la región hidrológica No. 23, que constituye una unidad homogénea denominada "Costa de Chiapas". La región hidrológica No. 23 se encuentra sobre la vertiente del Océano Pacífico y tiene la forma de una faja alargada de anchura variable. Abarca desde los 14°30' a los 16°33' de latitud norte y desde los 92°04' a los 94°19' de longitud oeste. Hidrográficamente está limitada hacia el noroeste por la región hidrológica No. 22, concretamente por la cuenca del río Ostuta; hacia el noreste con varios afluentes de río Grijalva, todos ellos pertenecientes a la región hidrológica No. 30; hacia el sureste con corrientes pertenecientes a Guatemala, colindantes con el río Suchiate y hacia el suroeste con el Océano Pacífico.

Las corrientes de la región hidrológica No. 23 se rigen por el esquema típico que siguen los ríos de la vertiente del Océano Pacífico: con nacimiento en el parteaguas de la Sierra Madre de Chiapas y recorrido más o menos directo hacia el Pacífico. El río Huixtla es típico de las corrientes de recorrido largo, la elevación de su origen es cercana a los 3,000 m y tiene un recorrido aproximado de 75 km hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. En la figura 9 se puede apreciar el río Huixtla con sus principales afluentes.

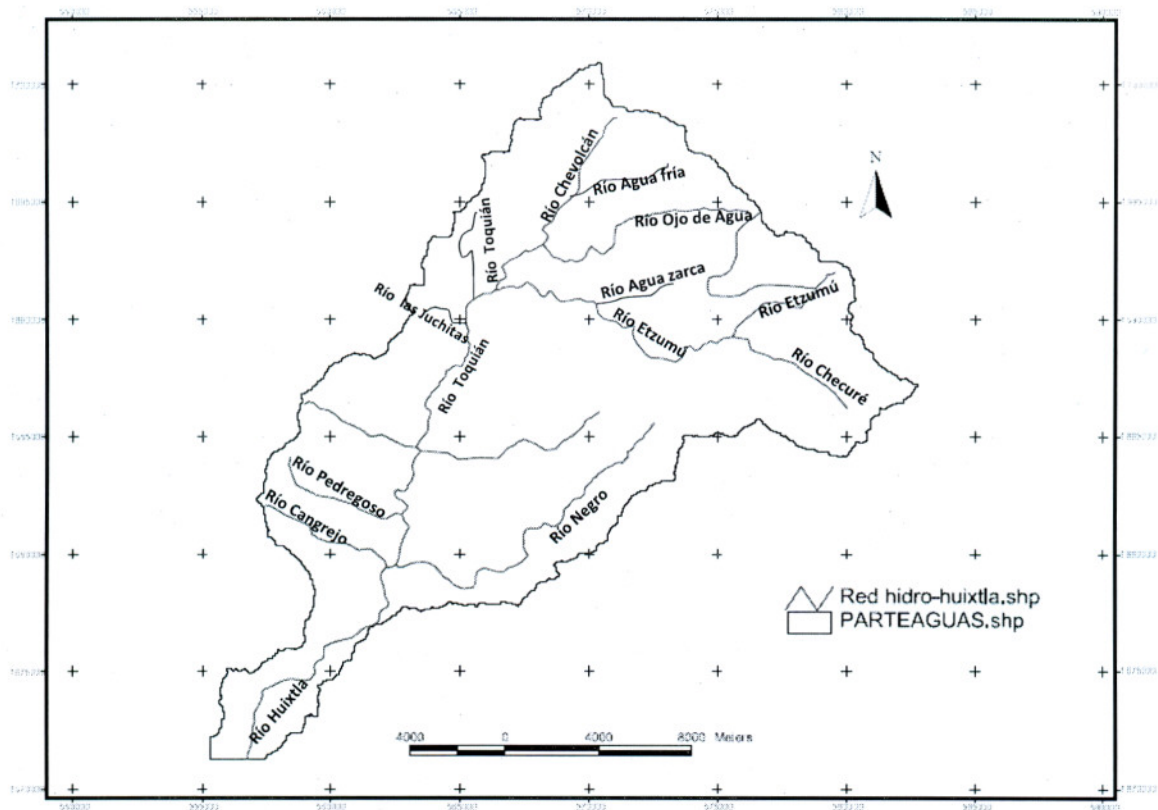


Figura 9. Río Huixtla con sus principales afluentes

La precipitación promedio en la cuenca es de 3,307 mm anuales. Cuando se presentan lluvias intensas, combinadas con la deforestación y la topografía accidentada, se generan tasas de erosión hídrica que llegan hasta las 300 ton/ha/ año (Baumann, 2003).

3.4. Clima

De acuerdo a la carta de climas de INEGI de 1980, los climas predominantes en la cuenca de estudio son: Am (w) cálido húmedo con abundantes lluvias en verano con aproximadamente el 43% de la superficie de la cuenca; A(C) m (w) semicálido húmedo con lluvias en verano con el 35% y el 22% de C (m) (w) templado húmedo con lluvias en verano (figura 10).

En la ciudad de Huixtla el clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, con una temperatura media anual de 27° C y una precipitación anual por arriba de los 2,500 mm

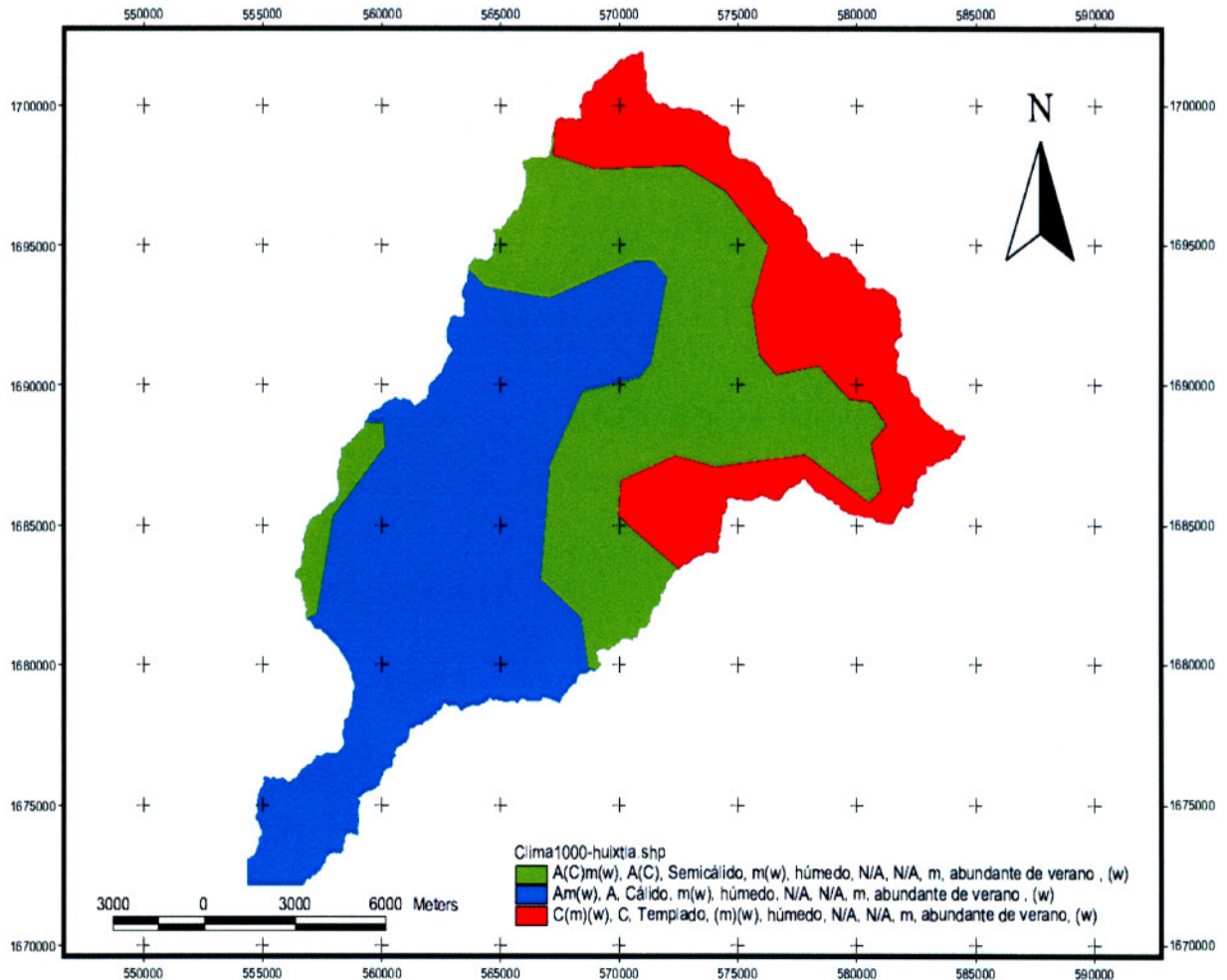


Figura 10. Climas predominantes en la cuenca del río Huixtla (INEGI, 1980)

3.5. Tipo de suelo

De acuerdo a la carta de edafología de INEGI del año 2000, los tipos de suelos existentes en la cuenca del río Huixtla son: Acrisol que abarca aproximadamente el 73 % del área de la cuenca, Regosol con el 23%, Cambisol con el 2%, Fluvisol con el 1% y Feozem con el 1% (figura 11).

Los acrisoles se desarrollan principalmente sobre productos de alteración de rocas ácidas con elevados niveles de arcillas muy alteradas, las cuales pueden sufrir posteriores degradaciones. Predominan superficies con una topografía ondulada, con un clima tropical húmedo, monzónico,

subtropical o muy cálidos. La pobreza en nutrientes, la toxicidad por aluminio, la fuerte adsorción de fosfatos y la alta susceptibilidad a la erosión, son las principales restricciones a su uso. Grandes áreas de acrisoles se utilizan para cultivos de subsistencia, con una rotación de cultivos parcial (FAO, 2006).

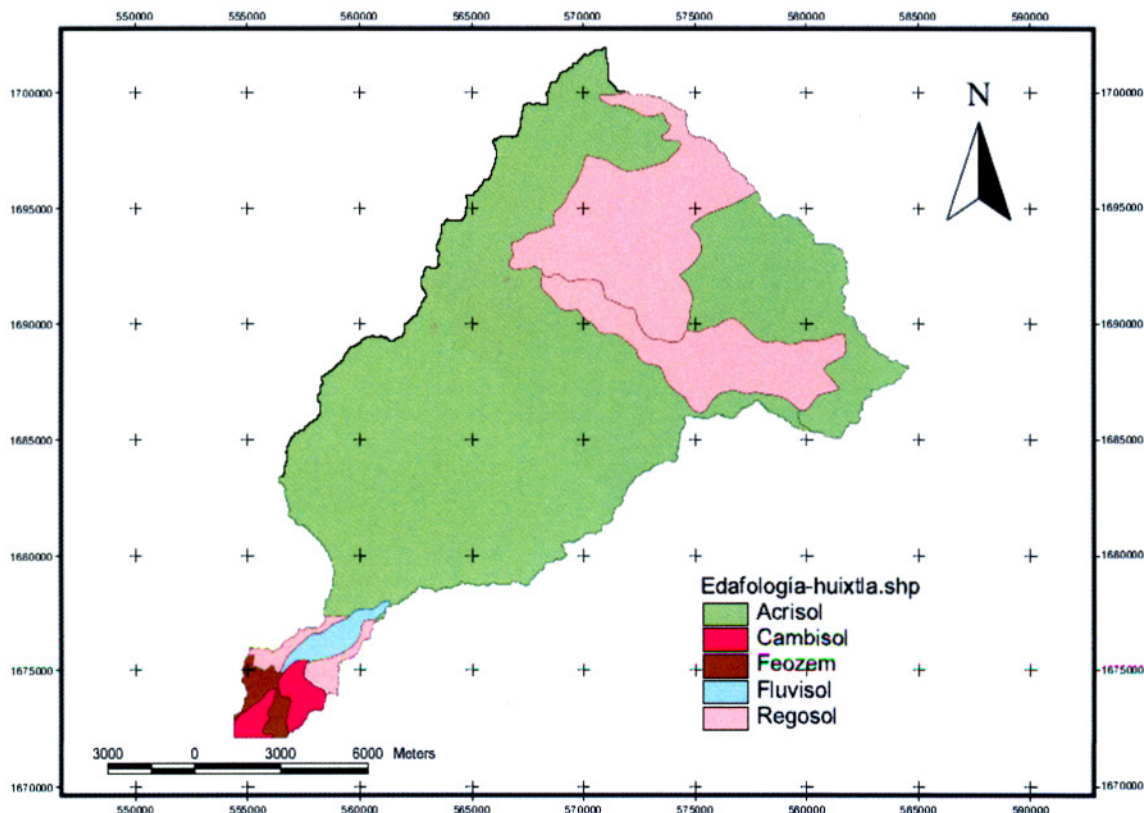


Figura 11. Tipos de suelo en la cuenca del río Huixtla (INEGI, 2000)

3.6. Vegetación y uso de suelo

La vegetación es de selva mediana, la cual está compuesta por una gran variedad de especies, de las cuales sobresalen las siguientes: coyol, cucunuch, guanacaste, guapinol, morro, palo mulato, quebracho, botoncillo, mangle blanco y mangle colorado. Según la carta de uso actual del suelo y vegetación serie III elaborada por el INEGI para el año 2002, la vegetación y el uso de suelo en la cuenca del río Huixtla es la siguiente (figura 12): Agricultura de temporal (maíz, frijol, soya, ajonjolí y café) con aproximadamente el 56% de la superficie de la cuenca, bosques

de coníferas (bosques de pino y pino-encino) el 25%, pastizales y herbazales (pastizal inducido) 10%, bosques deciduos (bosques de encino y encino - pino) el 3%, bosque mesófilo de montaña el 3%, vegetación secundaria el 2 % y zona urbana con el 1% (INEGI, 2005).

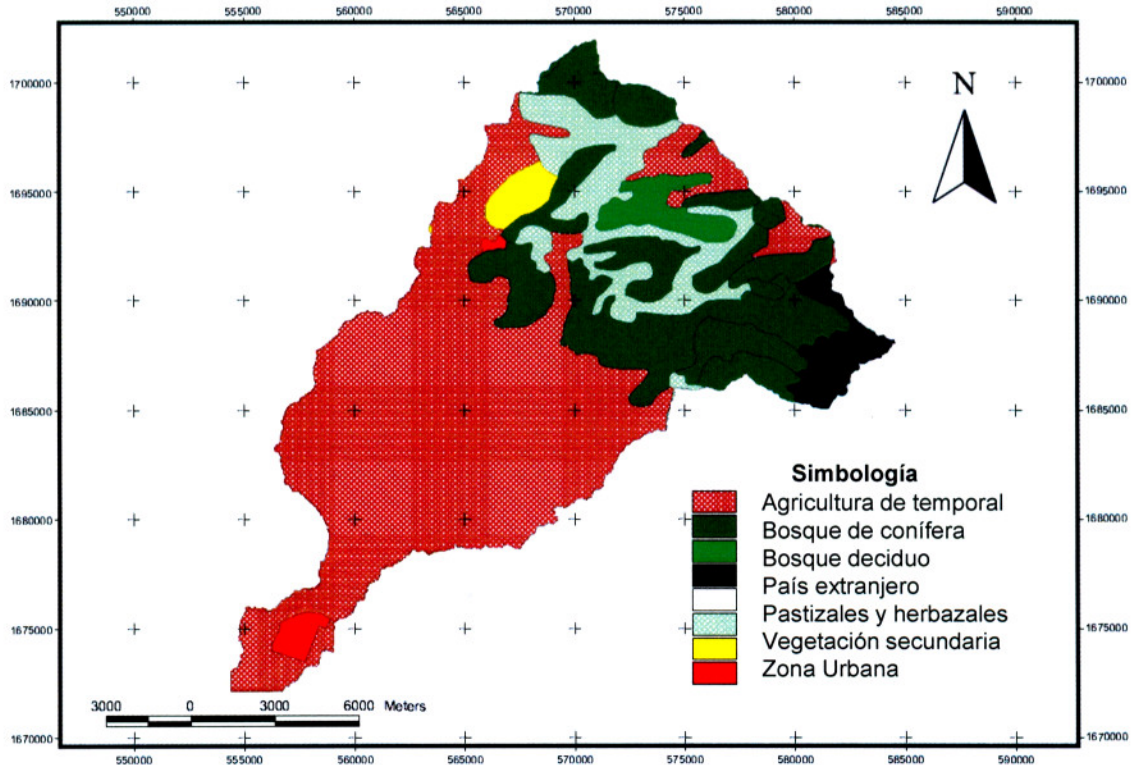


Figura 12. Vegetación y uso de suelo en la cuenca del río Huixtla (INEGI, 2005)

3.7. Actividades agropecuarias

La actividad predominante en la región es agropecuaria, los principales cultivos son maíz, caña de azúcar, ajonjolí, soya, mango, plátano, cacao, cítricos, palma africana, marañón, coco, papaya y sorgo (CNA, 2008b), no obstante existe una marcada diferencia de las actividades productivas según la zona: desde Acapetahua hacia el norte es principalmente ganadera, la zona del Soconusco además de la ganadería cuenta con una diversidad de actividades agrícolas dedicadas al cultivo de básicos, oleaginosas, frutales y perennes de uso industrial. Por su parte en la Sierra predominan los cultivos de maíz, frijol y café. El cultivo del café y plátano



en la región son eje de la economía debido a su uso intensivo de mano de obra. Los productores de café son aproximadamente 5,000 y la superficie de cultivo es cercana a las 70,000 hectáreas (CNA, 2001).

4. METODOLOGÍA

Para este estudio se desarrolló una metodología basada en la obtención de datos y análisis de la precipitación; análisis del cambio de cobertura vegetal, uso del suelo y NDVI; la asociación del NDVI con la precipitación; el análisis del número de curva; la construcción e implementación del modelo semidistribuido HEC-HMS; las simulaciones del modelo para el escenario A1b del IPCC y el análisis de sensibilidad (figura 13).

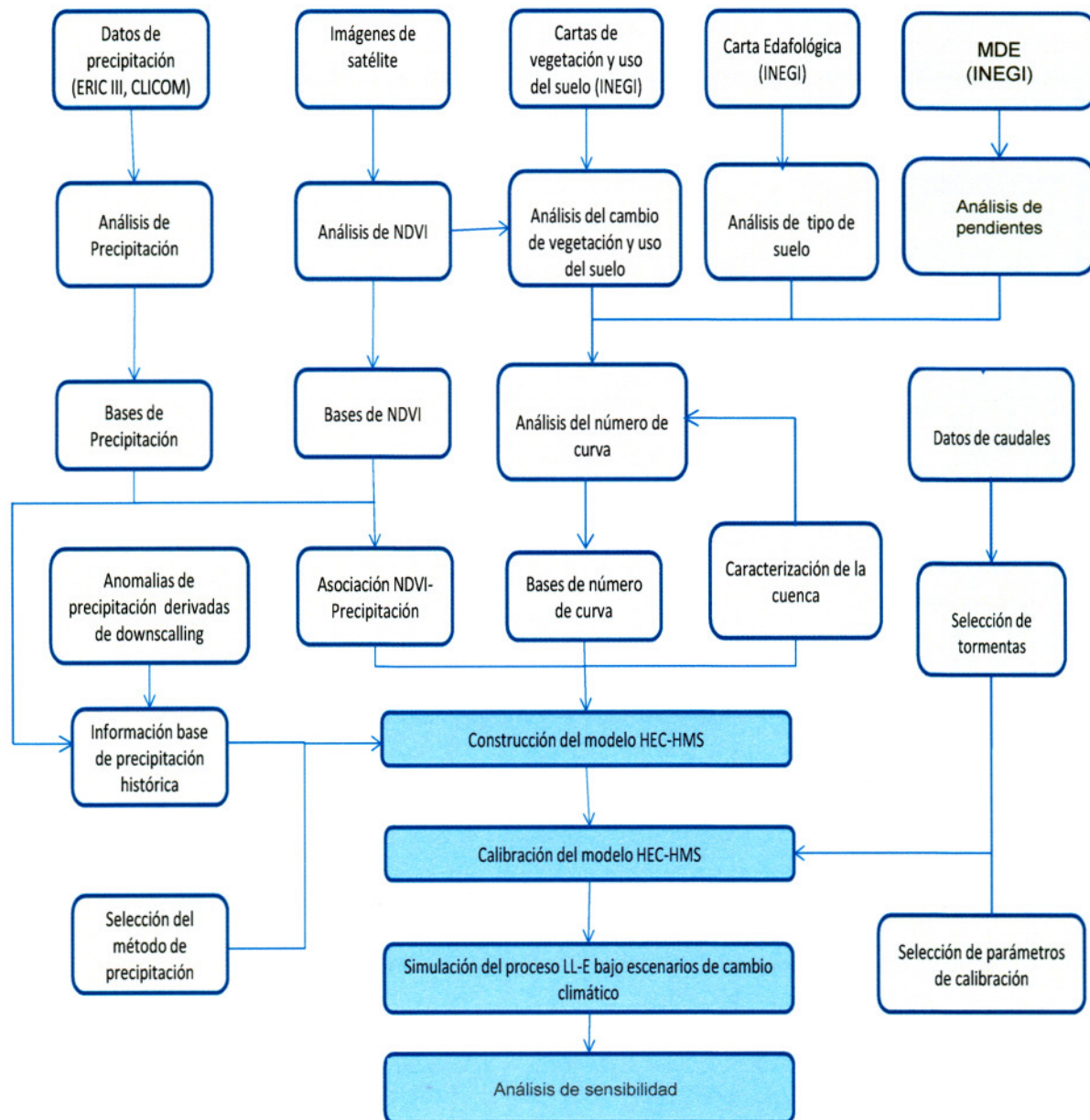


Figura13. Diagrama general de la metodología del estudio

4.1. Obtención y procesamiento de datos

4.1.1. Datos de precipitación

La información estadística de la precipitación fue obtenida del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III), (IMTA, 2006) y de los datos existentes en el sistema CLICOM (2006). Se analizaron 44 estaciones climatológicas localizadas en la región Costa de Chiapas (Figura 14).

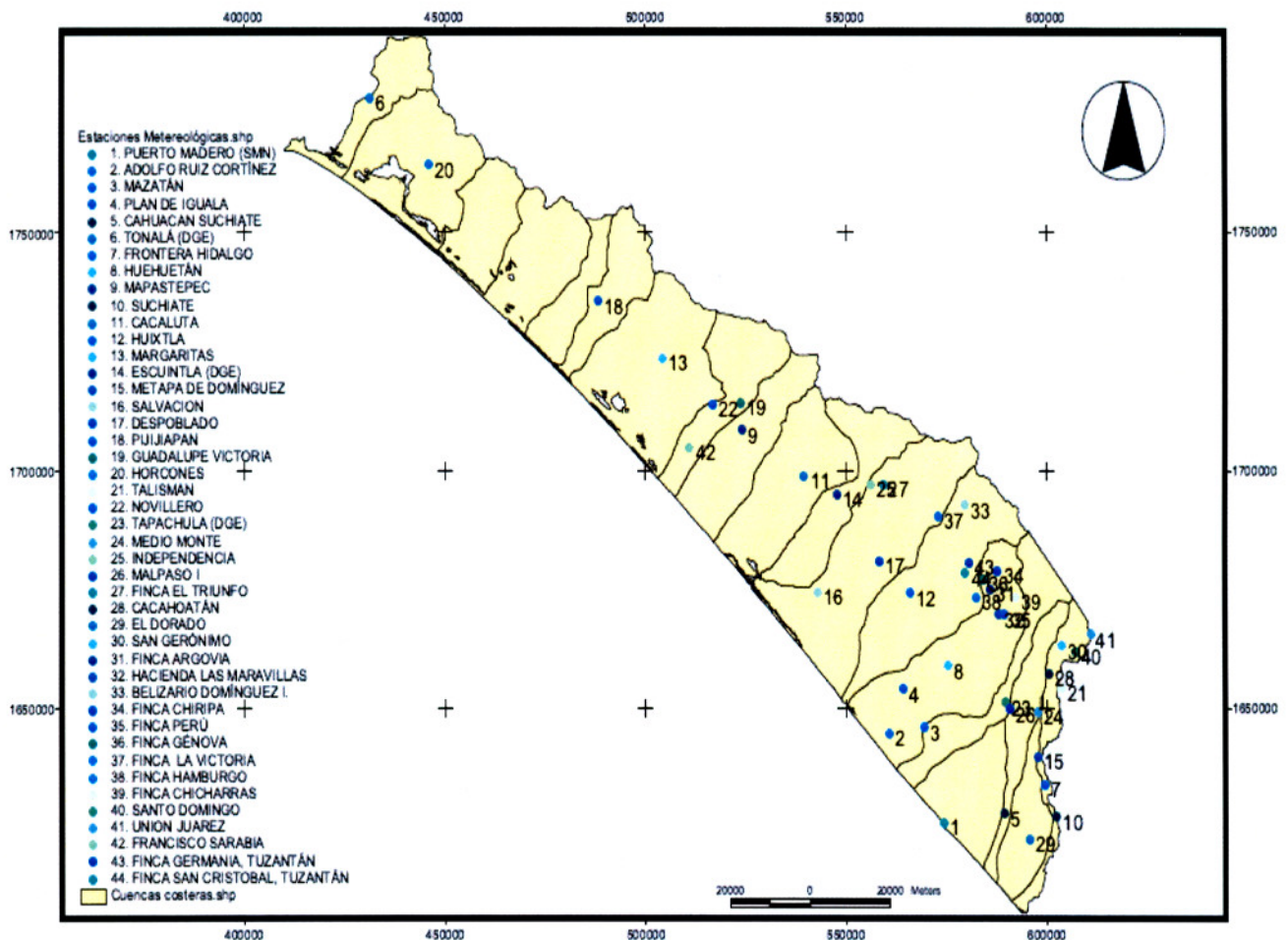


Figura 14. Ubicación de las estaciones climatológicas de la región Costa de Chiapas

4.1.2. Datos de caudales

Los gastos utilizados para la calibración del modelo, se obtuvieron de la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), (CNA, 2008a). Básicamente se realizó la extracción de los gastos medios diarios de la estación hidrométrica “Huixtla” que se encuentra ubicada a la salida de la cuenca.

4.1.3. Datos de NDVI

A partir de 1960, la NASA desarrolló la Tecnología de Satélites de Recursos Terrestres (por sus siglas en inglés ERTS), que se convirtió en el precursor del programa Landsat. Estos sensores tuvieron una resolución espectral mínima, pero con una tendencia a incluir bandas en el rojo e infrarrojo cercano, que son útiles para distinguir la vegetación y las nubes.

Con el lanzamiento del primer satélite ERTS, que pronto cambió al nombre de Landsat 1, en julio de 1972, la NASA financió una serie de investigaciones para determinar sus capacidades en la adquisición de información sobre algunos objetos o fenómeno a pequeña o gran escala. Uno de los primeros estudios se dirigió hacia el análisis de la vegetación en las grandes llanuras de los EE.UU. Los investigadores de dicho estudio desarrollaron la relación entre la diferencia de las reflectancias roja e infrarroja sobre su suma como un medio para ajustar o “normalizar” los efectos del ángulo cenital solar, que con el tiempo comenzaron a identificar como la relación del índice de vegetación normalizado. Los primeros resultados del uso del NDVI se encuentran en Rouse et al (1973a) y Rouse et al (1973b). Poco después de la puesta en marcha de ERTS-1 (Landsat 1), Tucker, publicó una serie de artículos que describen los usos del NDVI (Tucker, 1979).

El conocimiento de la estructura y funcionamiento de la vegetación es un requisito para entender y predecir las consecuencias de los cambios globales asociados a aumentos en la concentración de gases de efecto invernadero, alteraciones climáticas y cambios en el uso del suelo (Hooper et al., 1997).

A nivel regional un aumento de superficie de vegetación puede llevar a enfriar la superficie, originar mayor cobertura de nubes y aumento de lluvias. A nivel global un mayor crecimiento de

las plantas puede reducir el porcentaje de dióxido de carbono en la atmósfera, o sea, reducir su temperatura y el efecto invernadero (Farías, et al, 2005). Sin embargo, las respuestas ante la variabilidad interanual son grandes y se solapan con respuestas al clima que muestran tendencias a largo plazo, haciendo complicada la asignación de relaciones causales a los cambios de la vegetación (García, 2004).

De acuerdo a Farías et al (2005), el índice de vegetación se obtiene combinando datos espectrales de reflectancia multibanda con el objetivo de minimizar la variabilidad debido a efectos externos como nubes, atmosféricos, diferencias en iluminación solar, y otros. Comúnmente los índices de vegetación usan datos de reflectancia espectral contenidos en la porción del infrarrojo cercano reflejado.

Entre las utilidades encontradas a este índice se tiene la obtención de la cobertura de la vegetación, estado de la vegetación, producción de biomasa y la detección de incendios, entre otras (Baeza et al, 2006). El NDVI se calcula con bandas de imágenes de satélite aprovechando las características únicas del reflejo de la vegetación verde. El NDVI, obtenido a partir de imágenes de satélite está muy relacionado con la cobertura vegetal (Speranza et al., 2001).

Para obtener los datos de NDVI utilizados en esta tesis, se analizaron imágenes de satélite de tres tipos de sensores: Landsat, Spot y Modis. Se utilizaron imágenes de satélite disponibles en internet y proporcionadas por el IMTA, Colegio de Posgraduados de Chapingo, Universidad de Chapingo, El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional de la Biodiversidad (CONABIO) y CNA.

4. 2. Análisis de la información

4.2.1. Análisis de la precipitación

Para realizar el análisis de la precipitación se consideró información de 44 estaciones climatológicas de la Costa de Chiapas. Se realizaron análisis anuales, mensuales y diarios.

4.2.1.1. Deducción de datos faltantes

Es frecuente que en un registro de precipitación falten datos de un cierto periodo, debido principalmente a la ausencia del operador o fallas del pluviómetro. En estos casos se pueden estimar los datos faltantes si se tienen registros simultáneos de algunas estaciones situadas cerca de la estación en cuestión y uniformemente repartidas. Con el fin de no perder información valiosa, es conveniente tener las técnicas para estimar las cantidades diarias de precipitación para proceder a calcular los totales mensuales y anuales (Chow, 1964).

En esta tesis se estimaron datos faltantes de precipitación, con el fin de disponer de un registro de datos continuos en las estaciones. Para tal fin, se utilizó el método de los cocientes normales para zonas orográficas basado en la precipitación media anual, el cual considera que si la precipitación media anual de cualquiera de las estaciones circundantes difiere en más del 10%, los datos faltantes se obtienen dándole diferente pesos a cada estación (Aparicio, 1996).

Para este método se utiliza la siguiente fórmula (Aparicio, 1996):

$$hp_x = \frac{1}{n} \left[\frac{p_x}{p_1} hp_1 + \frac{p_x}{p_2} hp_2 + \dots + \frac{p_x}{p_n} hp_n \right] \quad (18)$$

Donde:

hp_i	Altura de precipitación registrada el día en cuestión en la estación auxiliar i (mm)
hp_x	Altura de precipitación faltante en la estación en estudio (mm)
p_i	Precipitación media anual en la estación auxiliar i (mm)
p_x	Precipitación media anual en la estación en estudio (mm)
n	Número de estaciones auxiliares

4.2.1.2. Bases de datos de precipitación

Como producto del análisis se construyeron bases de precipitación anual, mensual y diaria de las 44 estaciones climatológicas, para el periodo 1970-2005. En las figuras 15 y 16, se presentan los hietogramas de la precipitación media anual y media mensual para la región costa

de Chiapas. En la primera se observa un incremento en la precipitación y en la segunda se puede ver que la temporada fuerte de lluvias en la región comprende los meses de mayo a octubre.

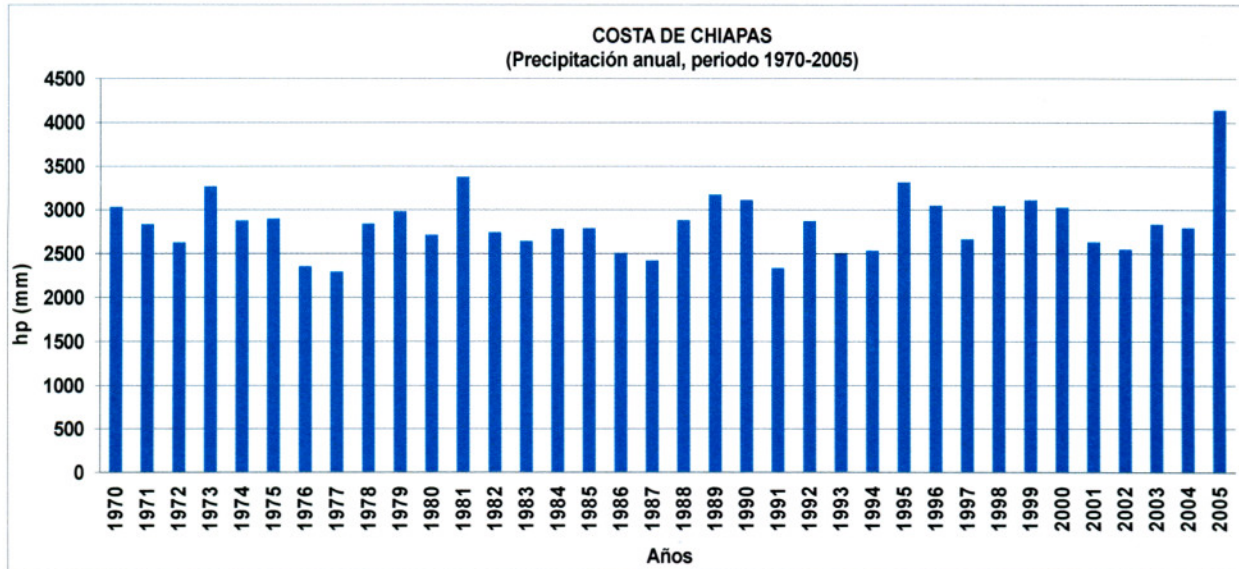


Figura 15. Hietograma de la precipitación media anual 1970-2005 para la costa de Chiapas

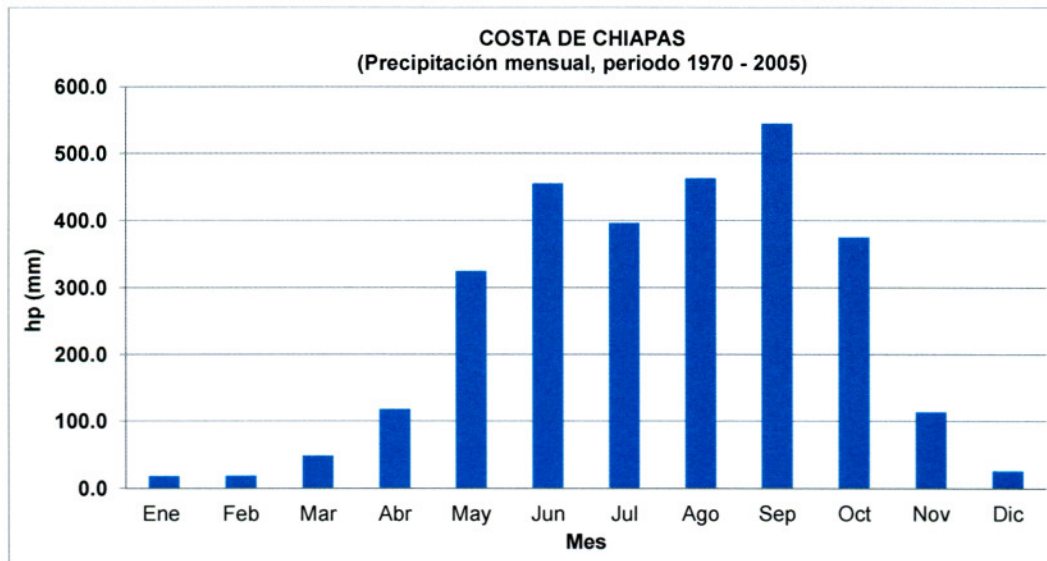


Figura 16. Hietograma de la precipitación media mensual 1970-2005 para la costa de Chiapas

4.2.2. Análisis del NDVI

Se encontraron los valores anuales de NDVI para un periodo representativo en la cuenca del río Huixtla, en este caso 1970-2009. Se procesaron diferentes tipos de imágenes satelitales Landsat, Spot y Modis para calcular el NDVI como un indicador complementario para la determinación de los números de curva.

4.2.2.1. Análisis de imágenes de satélite

Según Hori (1998) para lograr discriminar la reflectancia entre el efecto del suelo y la vegetación, se han desarrollado metodologías en donde el objetivo es crear bandas artificiales, a partir de las originales, mediante un cálculo de valores entre dos o más bandas de una imagen de satélite. Una banda artificial de uso frecuente es el NDVI, que refleja la respuesta espectral característica de la vegetación sana, con alto contenido de humedad. Se utiliza una combinación de la banda roja y la del infrarrojo cercano. Mientras mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor será el vigor vegetal que se refleja; si el contraste es menor entre estas bandas se interpreta como una vegetación enferma, senescente o sin hojas. Este índice sugerido por Rouse et al (1974) permite realzar el contraste entre la vegetación y el suelo/roca.

A diferencia de otros índices, el NDVI cuenta con una larga historia de uso en la teledetección, la ecología y la geografía para estudiar las características de la vegetación como la biomasa, tipo y condición de la masa vegetal (Tucker et al., 1986; Griffith et al., 2002). El NDVI se define como (Tarpley et al, 1984):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (19)$$

Donde:

NIR Infrarrojo cercano (adimensional)

R Rojo (adimensional)

Cuanto mayor sea el resultado, mayor vigor vegetal presenta la zona observada, en un rango que va de -1 a +1. De estos valores, sólo los positivos corresponden a zonas de vegetación.

Los valores negativos, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas, ya que sus patrones espectrales son generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo. El valor del NDVI puede variar en función del uso de suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona (Tun Dzul, 2007).

Para calcular los datos del NDVI se procesaron las imágenes de satélite Landsat MSS y Landsat TM (figura 17), así como imágenes del sensor Spot y Modis. El resultado es una imagen de una sola banda correspondiente a los valores de NDVI, cuyos diferentes tonos de gris corresponden a valores entre -1 y 1.

Los valores positivos (color gris claro) corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos (color gris oscuro), pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas; ya que la vegetación vigorosa presenta baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano (Hori, 1998; Sobrino et al, 1998). Finalmente, tomando como referencia los colores convencionalmente asignados al NDVI, los cuales van de tono verde fuerte (valores cercanos al +1) y de rojo fuerte (valores cercanos a -1), se obtiene una imagen con los colores que representan los valores del NDVI (figura 18).



Figura 17. Imagen Landsat TM

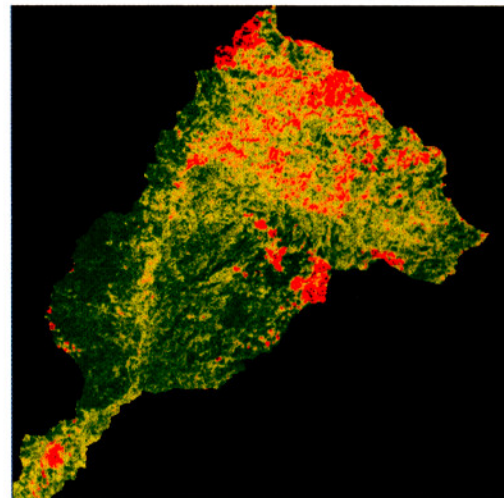


Figura 18. Imagen con los valores de NDVI

4.2.2.2. Dedución de datos faltantes

Para rellenar los datos faltantes de la serie de NDVI se utilizó la técnica de medias móviles. Las Medias Móviles es una técnica que utiliza información estadística pasada. Consiste en construir una nueva serie a partir de la media de un número determinado de datos, en la que se va añadiendo sucesivamente un dato nuevo y quitando, al mismo tiempo, el más antiguo de los datos incluidos en la media anterior. No existen criterios sobre el orden adecuado de la media móvil (UAM, 2004).

La expresión general de una media móvil de orden s consiste en calcular una serie que para cada momento t toma el siguiente valor (UAM, 2004):

$$M_t = \frac{y_t + y_{t-1} + \dots + y_{t-s+1}}{s} \tag{20}$$

Se realizaron cálculos con varios órdenes de medias móviles, resultando los de 4, 5 y 6 con índices estadísticos aceptables (error cuadrático medio, sesgo y eficiencia del modelo), por lo que se utilizó la media móvil de seis términos considerando que; el mayor espacio de datos continuos faltantes fue de ese orden, tiene el mayor número de términos, hace que la serie presente un comportamiento más estable moderando sus variaciones y mejora la predicción.

Con la ayuda de la técnica de medias móviles, se complementó la serie de datos de NDVI para el periodo 1970-2009 (figura 19).

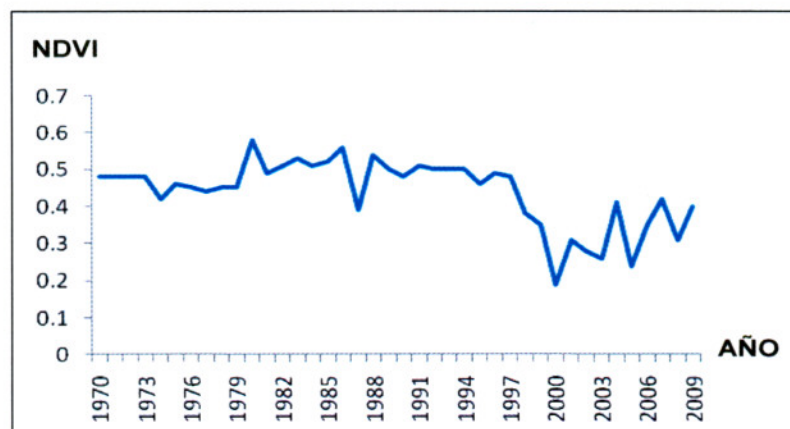


Figura 19. Serie de NDVI para el periodo 1970-2009 de la cuenca del río Huixtla

4.3. Asociación del NDVI con la Precipitación

Partiendo de la hipótesis que el efecto antropógeno derivado del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo tiene relación con la precipitación originando posibles impactos de cambio climático, se realizó un análisis de la asociación entre el NDVI con la precipitación. Para facilitar el análisis, la cuenca del río Huixtla se dividió en tres zonas hidrológicas de acuerdo con su altura sobre el nivel del mar, pendientes y criterio de delimitación por cuenca. Así, se calcularon los valores de NDVI y de la precipitación para los meses antecedentes al NDVI, para cada una de las tres zonas hidrológicas.

4.3.1. Delimitación de la cuenca del río Huixtla y definición de subcuencas

La delimitación de la cuenca y la definición de subcuencas se realizaron mediante el procesamiento del MDE de INEGI escala 1: 50,000.

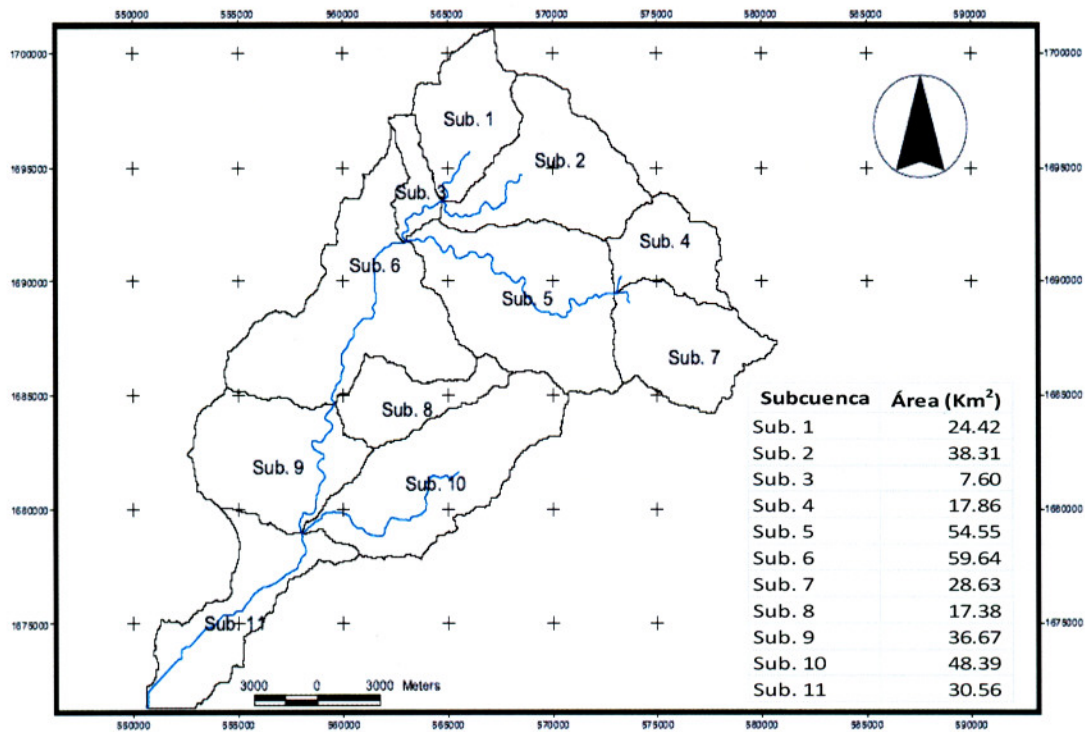


Figura 20. Delimitación de la cuenca y definición de subcuencas para la cuenca del río Huixtla

Sin embargo, debido a que la resolución vertical del MDE es de 30 m, y que la parte baja de la cuenca es una planicie, el modelo no fue capaz de reconocer las pendientes y curvas de nivel en esta zona, por lo que se definió como punto de salida de la cuenca la parte donde terminan las pendientes medias, a unos metros de la estación hidrométrica Huixtla. De este modo, el modelo delimitó la Cuenca y generó subcuencas para cada corriente tributaria del cauce, cuyas denominaciones y áreas se exponen en la figura 20. Con base a esta delimitación el área aproximada de la cuenca de estudio es de 364 Km², y el número de subcuencas consideradas para el modelo fue de once.

4.3.2. Delimitación de la cuenca del río Huixtla en tres zonas hidrológicas

Para considerar en el análisis las características físicas que tienen relación con los fenómenos climatológicos, la cuenca del río Huixtla se dividió en tres zonas de acuerdo a su altura sobre el nivel del mar, pendientes y criterio de delimitación por cuenca (figura 21).

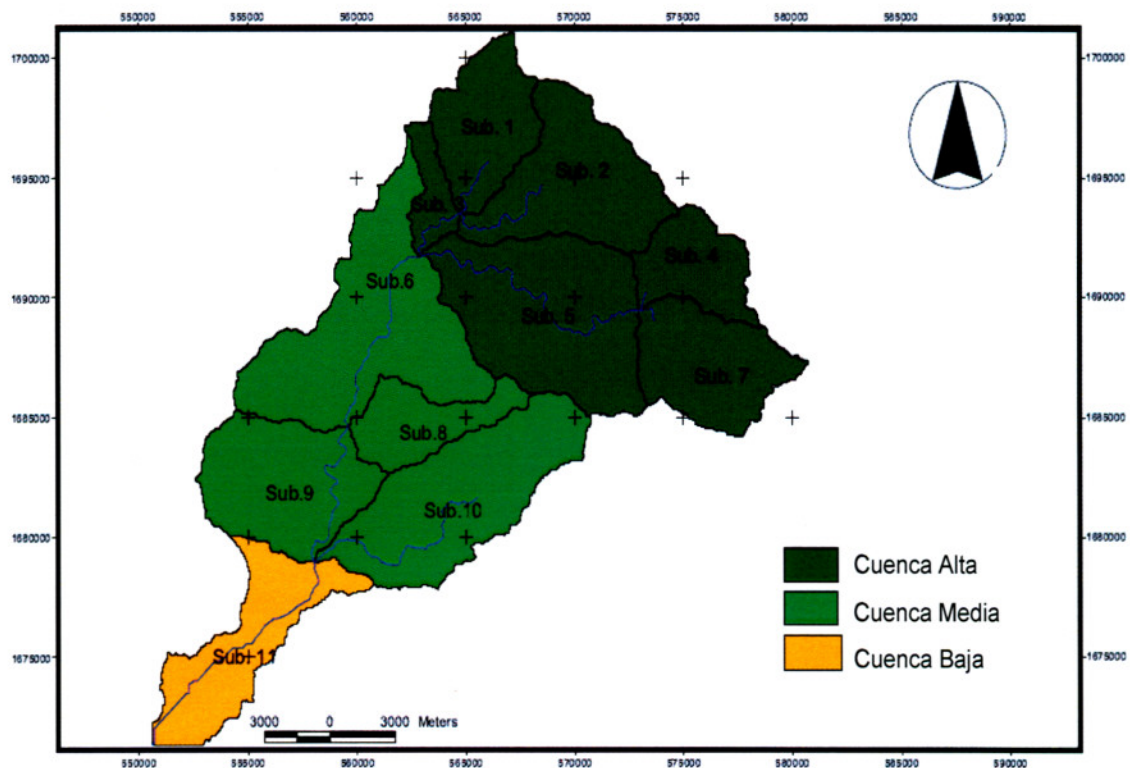


Figura 21. Delimitación de la cuenca del río Huixtla en tres zonas hidrológicas

4.3.3. Análisis de la precipitación para los meses antecedentes al NDVI

Se realizó un análisis de la precipitación en las tres zonas hidrológicas para los escenarios de cuatro, cinco y seis meses antecedentes al NDVI. Primero se determinó la precipitación media en cada zona, considerando la información de las estaciones climatológicas de la Costa de Chiapas con más influencia en la cuenca del río Huixtla. El método geoestadístico de interpolación utilizado en el cálculo de la precipitación media fue “el método de la distancia inversa”, que es también llamada la Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), cuya importancia radica en la fácil aplicación en un SIG. EL IDW es una técnica general para la interpolación (Ware et al., 1991), que ha sido ampliamente utilizada (Modallaldoust, 2010), y es considerado como uno de los dos mejores métodos de interpolación de superficies (Anderson, 2004), cuya ecuación básica es:

$$K_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N k_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (21)$$

Donde, k_i es el valor de control del punto de muestreo; w_i representa un peso para determinar la importancia relativa de cada k_i ; K_{xy} es el punto que se estima y N es el número de puntos de muestreo (Bartier et al., 1996). El cálculo básico de la interpolación IDW para la estimación de la precipitación se expresa en la ecuación 16 (Chang et al., 2003):

$$P_p = \sum_{i=1}^N (W_i P_i) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i d_{pi}^{-m}}{\sum_{i=1}^N d_{pi}^{-m}} \quad (22)$$

Donde P_p es la precipitación interpolada en el área de p ; P_i es la precipitación del pluviómetro i ; W_i es el factor de ponderación que representa la influencia relativa de la estación de aforo y d_{pi} es la distancia entre la zona p y la lluvia en el pluviómetro i . El proceso de interpolación se realizó bajo el entorno del ArcView y se obtuvo los mapas de isoyetas de precipitación para el área deseada. En la figura 22 se presenta el mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para

los seis meses antecedentes al NDVI del año 2000 y en la figura 23 los mapas correspondientes a las zonas alta, media y baja.

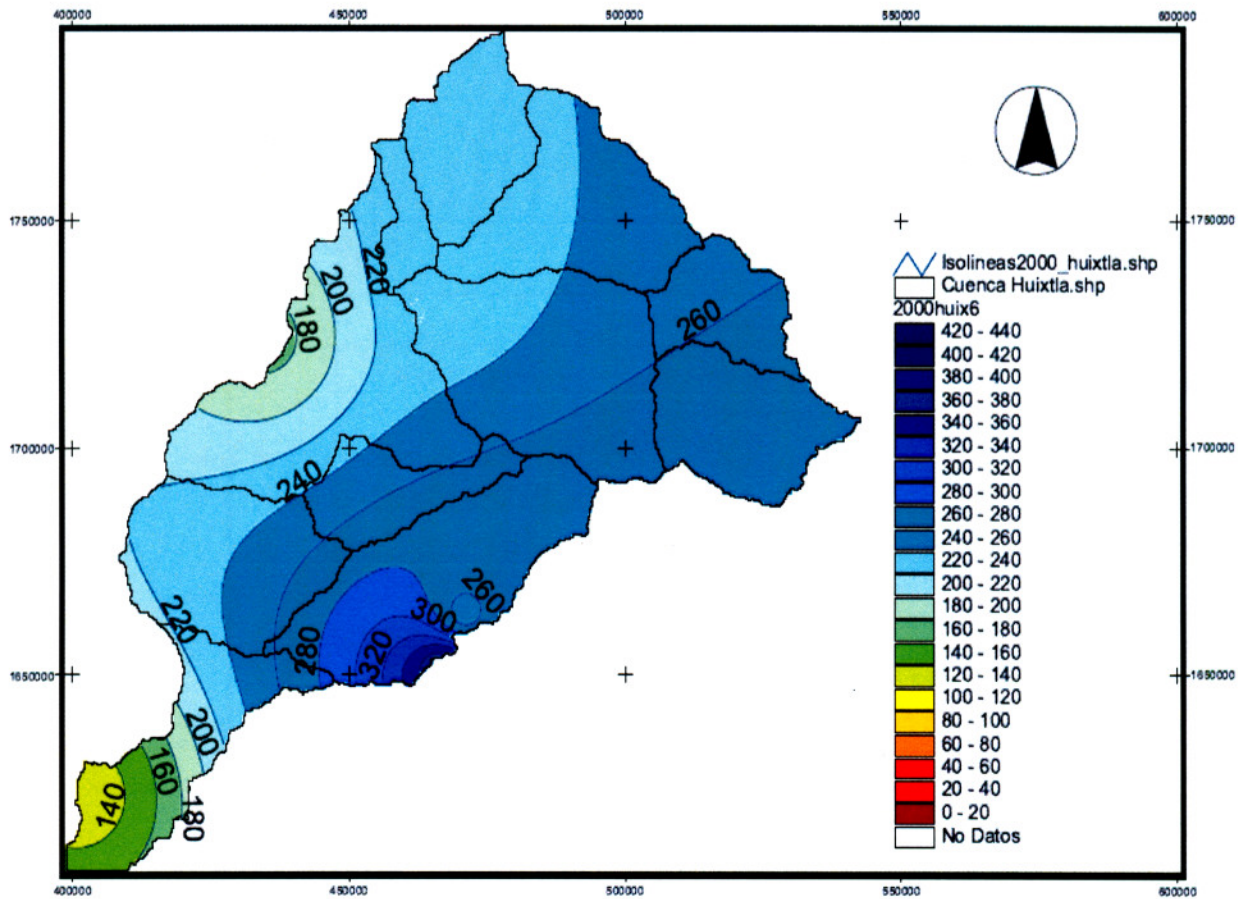


Figura 22. Mapa de isoyetas de precipitación de la cuenca del río Huixtla para los seis meses antecedentes al NDVI del año 2000.

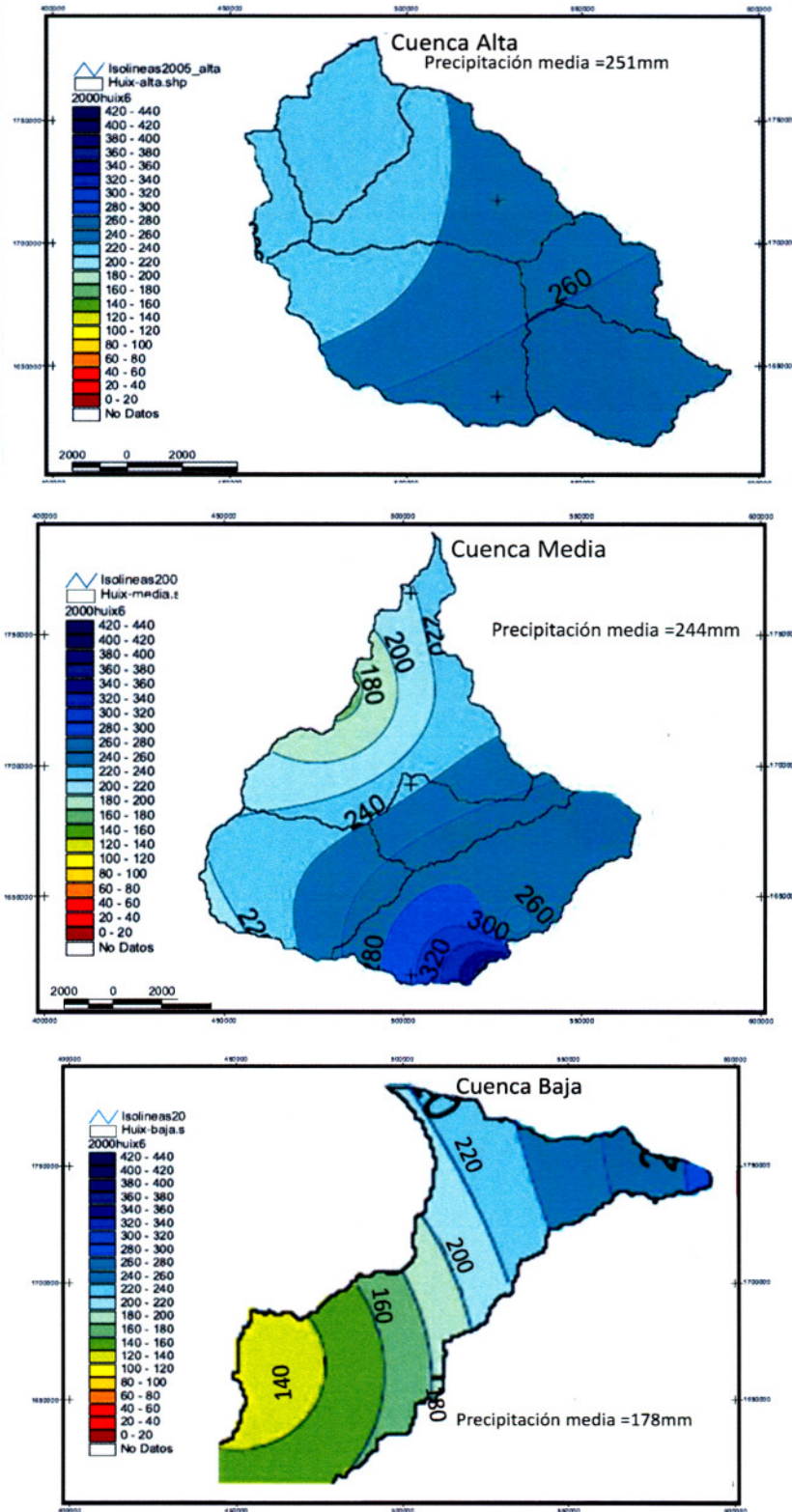


Figura 23. Mapas de isoyetas de precipitación de la cuenca alta, media y baja del río Huixtla para los seis meses antecedentes al NDVI del año 2000.

El análisis de la precipitación para las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla fue realizado para los siguientes escenarios:

- a). Seis meses antecedentes al NDVI (septiembre-febrero)
- b). Cinco meses antecedentes al NDVI (octubre-febrero)
- c). Cuatro meses antecedentes al NDVI (noviembre-febrero)

En la figura 24, se presenta a modo de ejemplo el resultado del análisis de la precipitación media anual para los seis, cinco y cuatro meses antecedentes al NDVI correspondiente al año 2000, en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla.

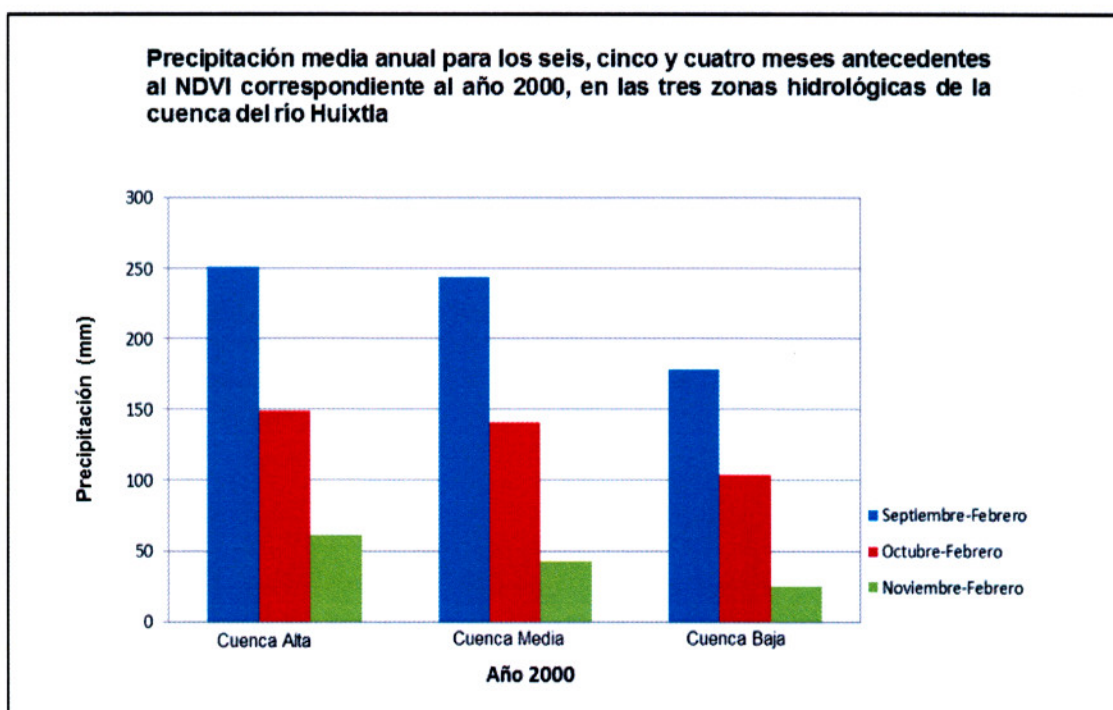


Figura 24. Precipitación media para los cuatro, cinco y seis meses antecedentes al NDVI correspondiente al año 2000, en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla.

En las figuras 25 a la 27, se presenta los resultados del análisis de la precipitación media anual (periodo 1970- 2005) de los meses antecedentes al NDVI, para las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla.

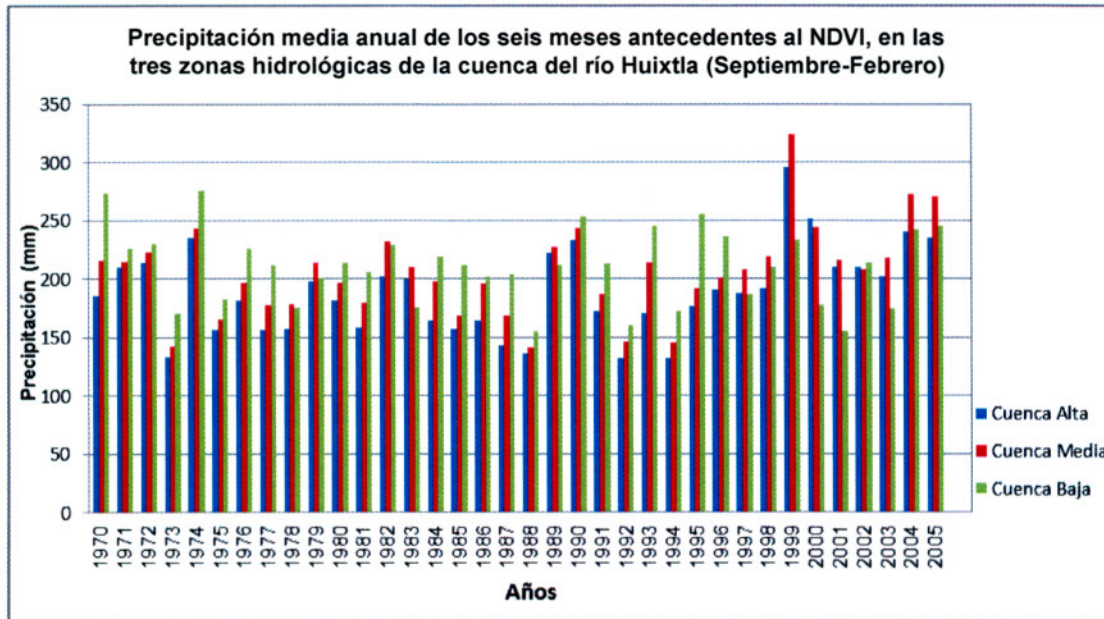


Figura 25. Precipitación media anual de los seis meses antecedentes al NDVI, en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla (Septiembre-Febrero)

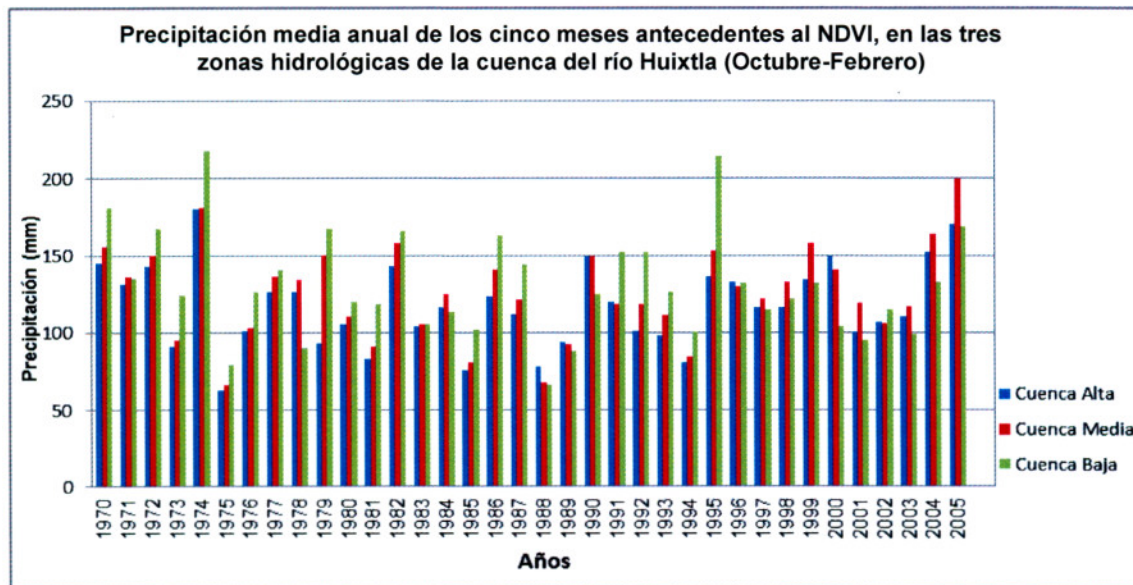


Figura 26. Precipitación media anual de los cinco meses antecedentes al NDVI, en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla (Octubre-Febrero)

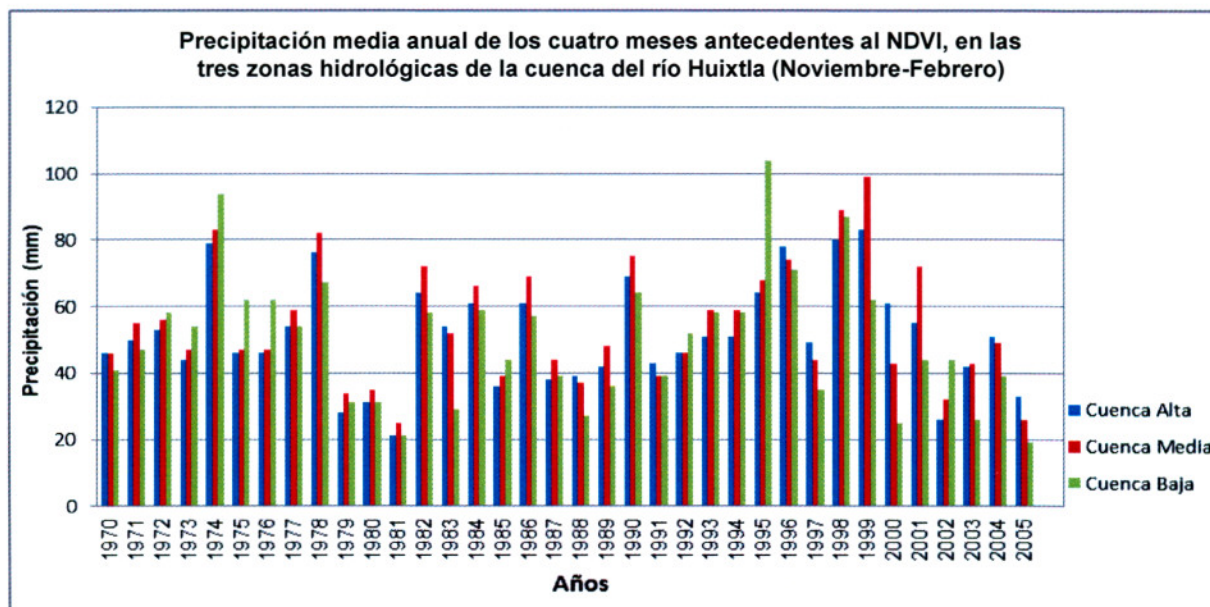


Figura 27. Precipitación media anual de los cuatro meses antecedentes al NDVI, en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla (Noviembre-Febrero)

4.3.4. Análisis del NDVI por zonas hidrológicas

El análisis del NDVI se centró en la época seca del año (febrero) ya que se contaba con una mayor disponibilidad de imágenes de satélite históricas para esa época en particular, además, las escenas para ese mes, presentaron una menor cobertura de nubes, permitiendo hacer comparables los escenarios de cambios anuales de la vegetación (CONAFOR, 2012). Por otra parte, también se contó con una mejor distribución de las lluvias, eso debido a que una gran parte de la zona del estudio son ecosistemas naturales de bosques y selvas que durante esos meses no pierden su follaje.

El análisis del NDVI se realizó para los años comprendidos en el periodo 1970-2005 y al igual que la precipitación fue necesario determinar de forma cuantitativa, valores medios de NDVI para cada una de las zonas hidrológicas (figura 28). La metodología utilizada para el análisis por zona hidrológica fue la explicada en el apartado 4.2.2. En la figura 29 se presenta como ejemplo los resultados correspondientes al año 1975, considerando que la información en ese año es más apropiada a la realidad ya que se cuenta con una carta de uso de suelo y vegetación y una imagen de satélite.

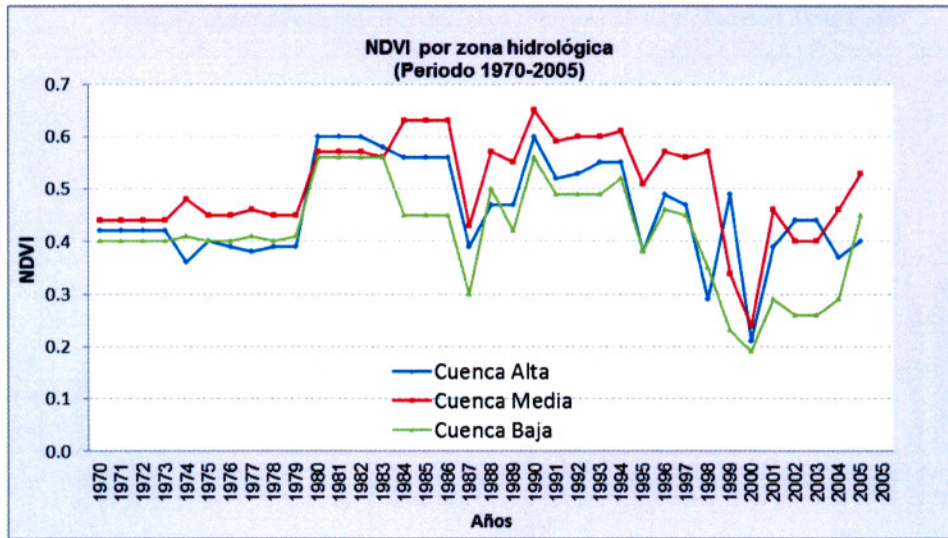


Figura 28. Valores del NDVI para el periodo 1970-2005 en la cuenca del río Huixtla

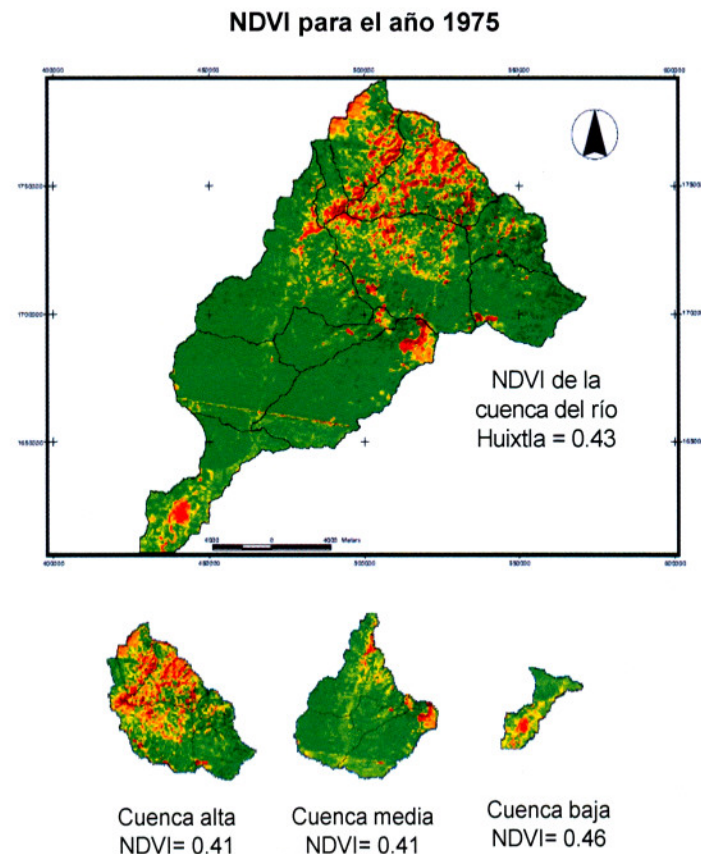


Figura 29. Valores del NDVI para el año 1975 en las tres zonas hidrológicas de la cuenca del río Huixtla

4.3.5. Correlación precipitación-NDVI en las tres zonas hidrológicas

Se efectuó un análisis de la relación existente entre la precipitación y el NDVI con datos del periodo 1970-2005, para ello se generaron gráficas de correlación.

Los resultados indican una buena correlación P-NDVI, con una tendencia positiva, para los escenarios de cuatro, cinco y seis meses antecedentes al NDVI (figuras 30 a la 32), pero es en el caso de los cuatro meses antecedentes al NDVI donde se presenta la mejor correlación, tanto en la cuenca alta como en la media que son las zonas de mayor vegetación.

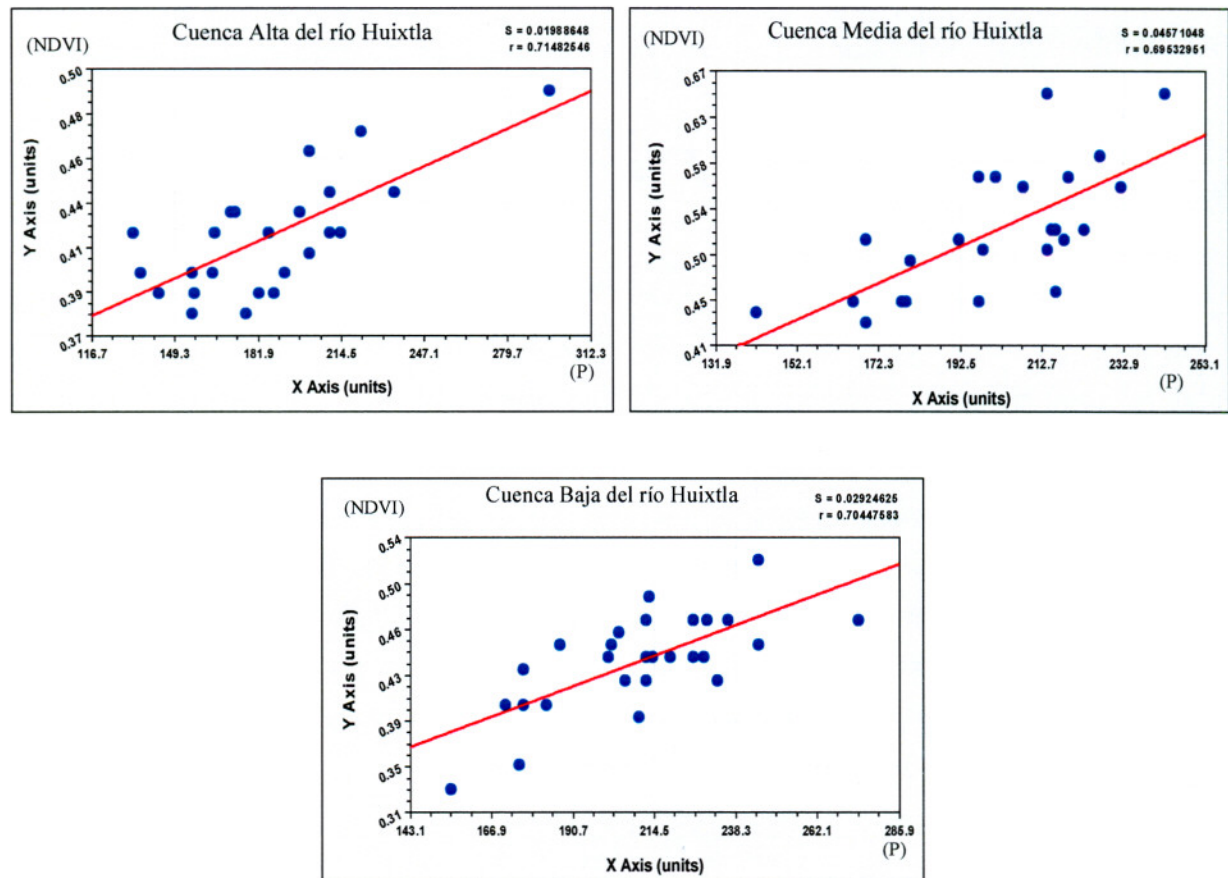


Fig. 30. Correlación P-NDVI en la cuenca alta, media y baja para seis meses antecedentes al NDVI

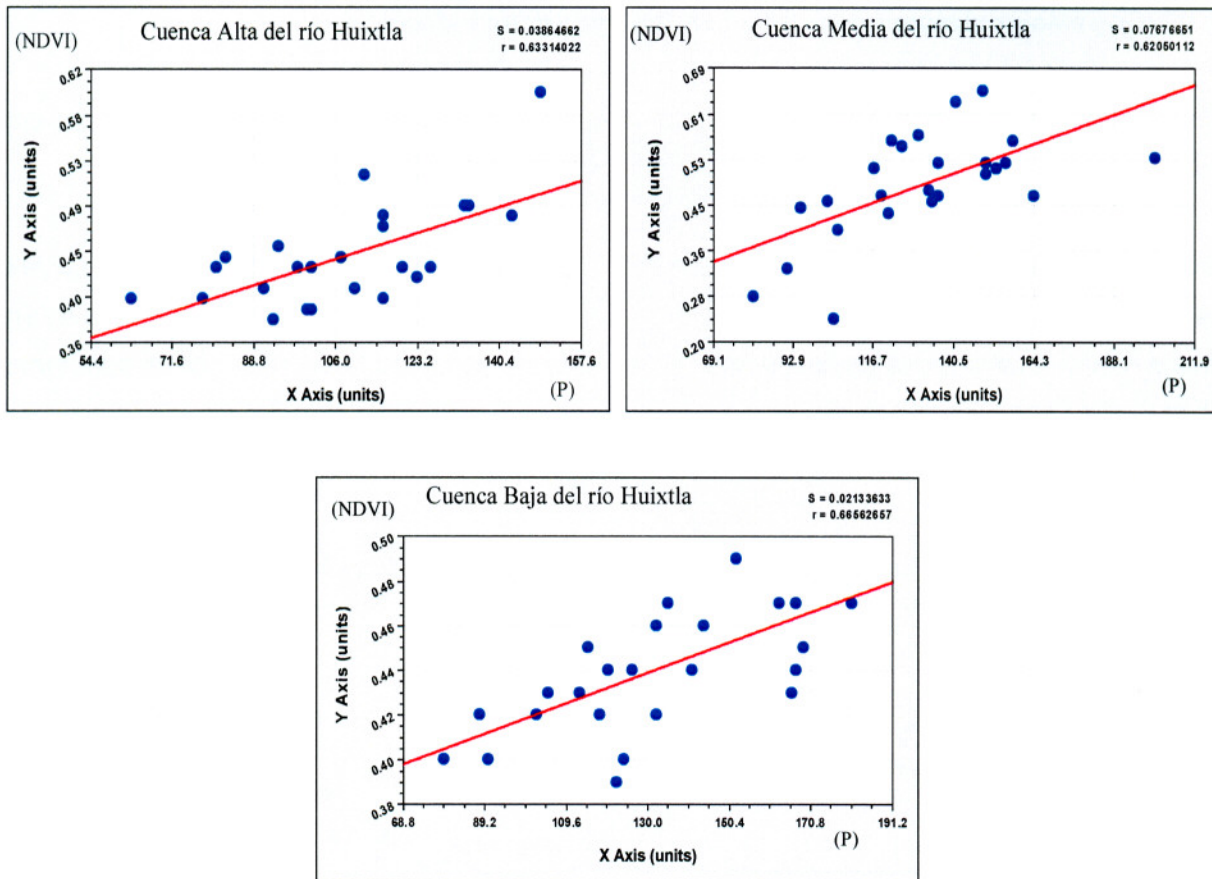


Fig. 31. Correlación P-NDVI en la cuenca alta, media y baja para cinco meses antecedentes al NDVI

Es posible que los resultados obtenidos para los cuatro meses antecedentes al NDVI sean más coincidentes debido a que abarca casi en su totalidad la estación de invierno (es decir, las lluvias invernales que son más homogéneas en su distribución); y permite hacer comparables los escenarios de cambio de cobertura vegetal y uso del suelo por contar con una mayor disponibilidad de escenas con menor cobertura de nubes en las imágenes de satélite y por lo tanto una respuesta más uniforme del NDVI.

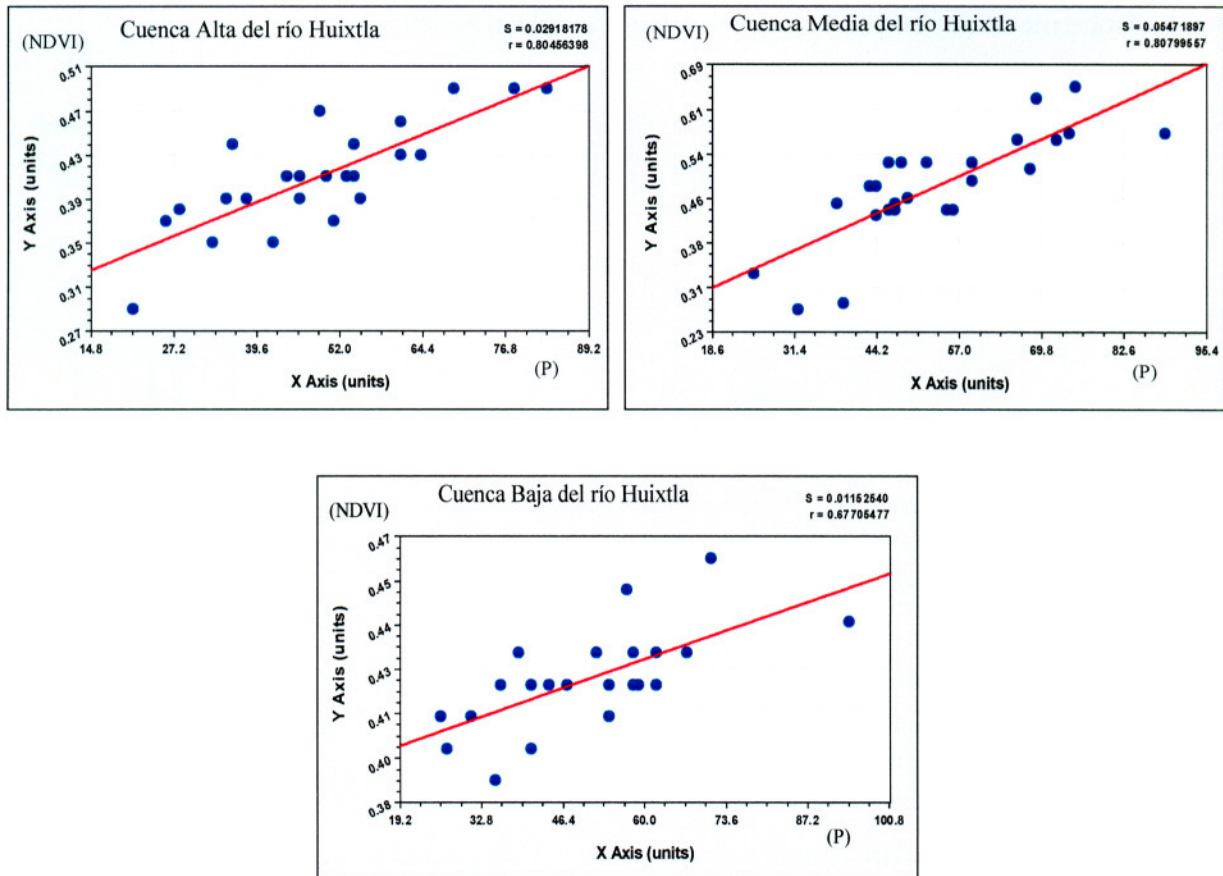


Fig. 32. Correlación P-NDVI en la cuenca alta, media y baja para cuatro meses antecedentes al NDVI

4.4. Asociación del NDVI con el número de curva

El Número de Curva se asoció con los valores anuales de NDVI mediante el siguiente proceso: análisis de cartas de uso de suelo y vegetación del INEGI para los años 1975, 1993, 2000 y 2002; extracción de polígonos de vegetación por grupo hidrológico de suelo; superposición entre imágenes de satélite y valores de NDVI para calcular la distribución de cobertura vegetal y uso de suelo para los años faltantes; obtención de la serie completa de NC con la metodología del Soil Conservation Service (SCS) para el periodo 1970-2009 y generación de escenarios de los valores anuales a nivel de cuenca y subcuenca, hasta un estimaciones de planeación al año 2050.

4.4.1. Subcuencas de las tres zonas de la cuenca del río Huixtla

En base a la delimitación de la cuenca, la zona alta está integrada por seis subcuencas con una extensión territorial de 171 km², la cuenca media con cuatro subcuencas y una área de 162 km² y la cuenca baja con una área de 30.5 km² (figura 33).

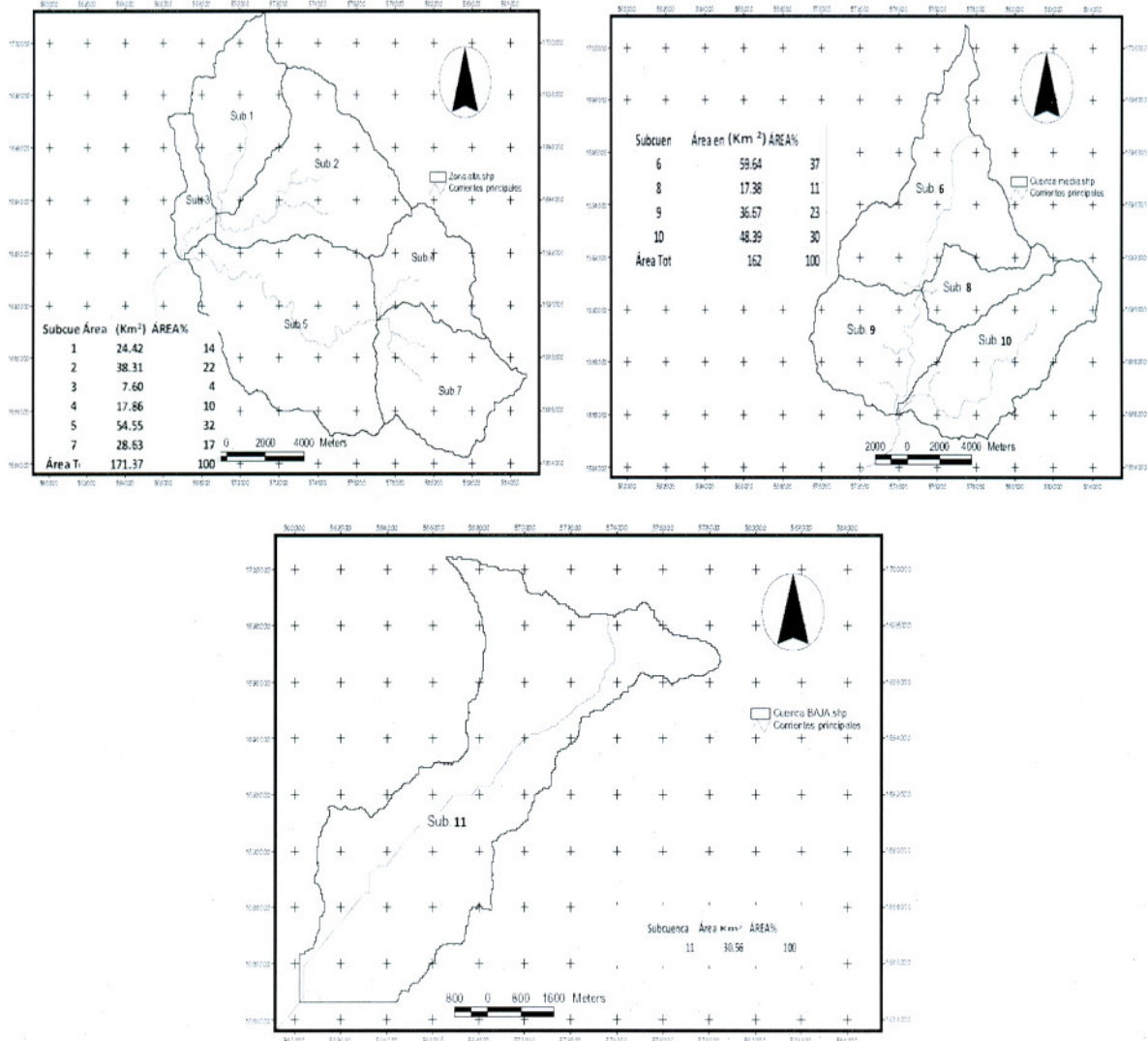


Figura 33. Delimitación en subcuencas de la zona alta, media y baja de la cuenca del río Huixtla

4.4.2. Análisis del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo

Fue necesario homogenizar la agrupación de coberturas vegetales de las cartas utilizadas quedando de la siguiente forma: agricultura de temporal, bosque de coníferas, bosque mesófilo, bosque de encinos, pastizales y selvas. Con base a esta agrupación homogénea se realizó el análisis para la cuenca alta, media y baja del río Huixtla (figuras 34 a la 36).

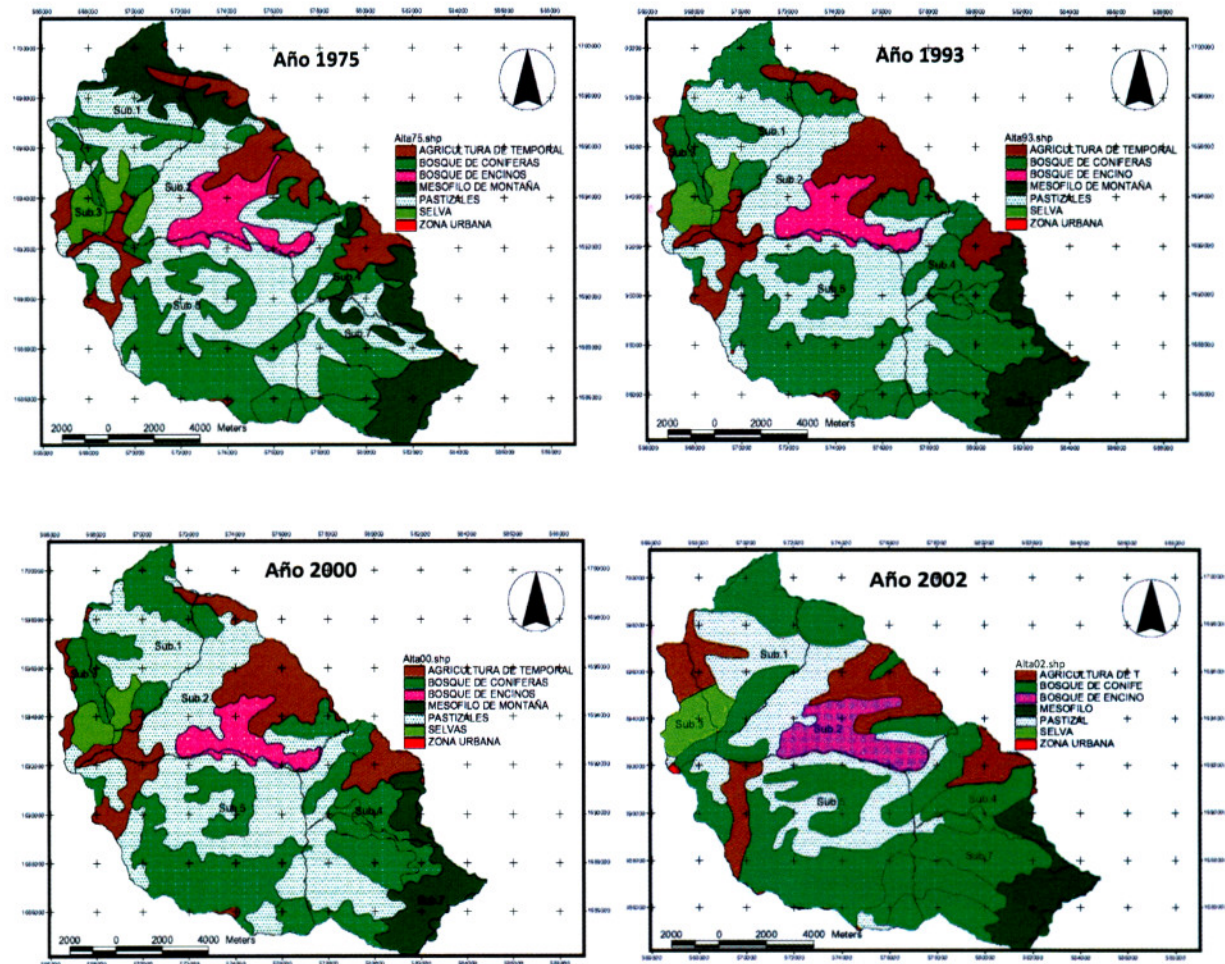


Figura 34. Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca alta del río Huixtla

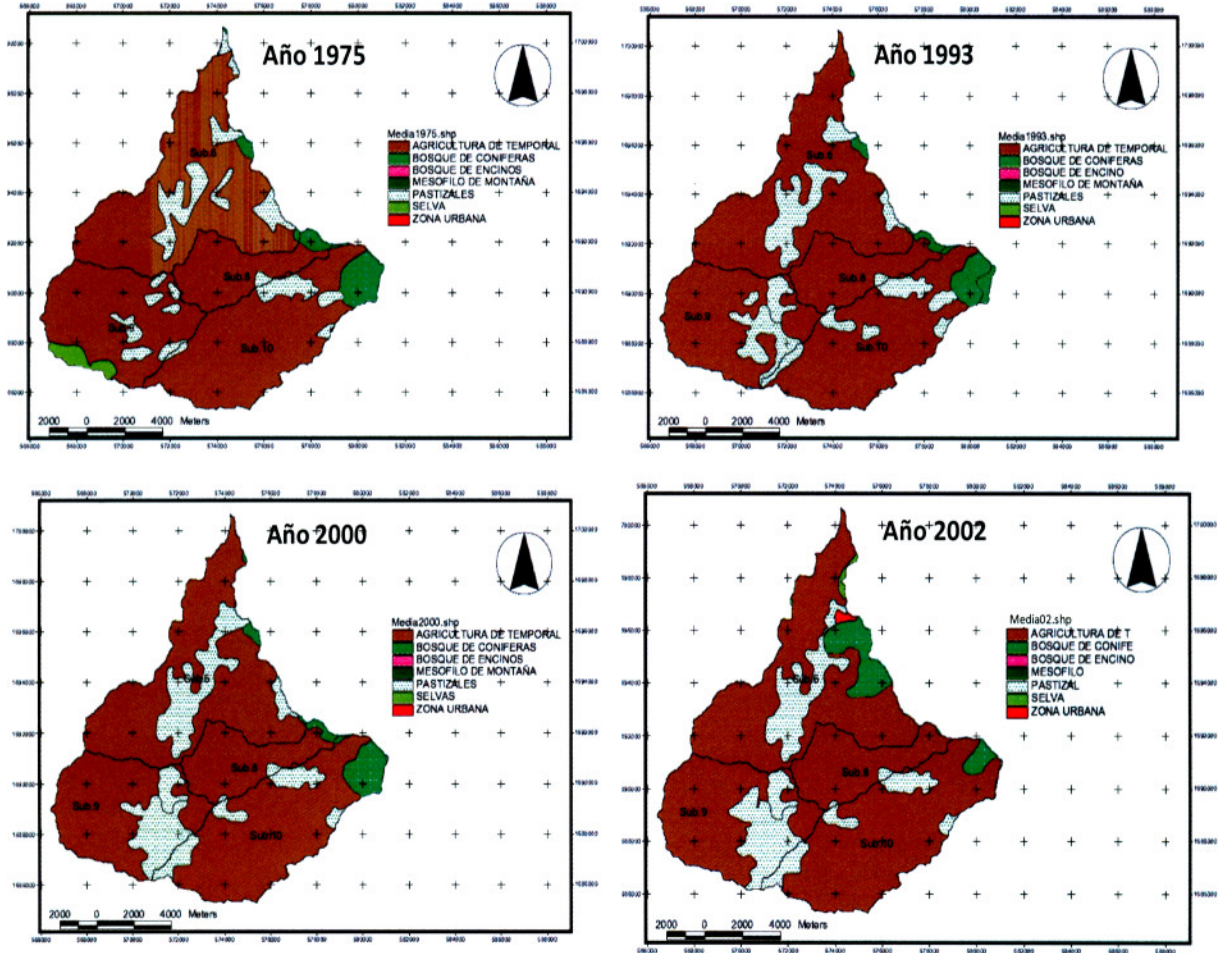


Figura 35. Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca media del río Hixtla

En las cartas de vegetación y uso del suelo es difícil observar los suelos desnudos (áreas sin vegetación), por lo que fue necesario corregir los datos para poder obtener las superficies netas de cobertura vegetal. Al respecto, se superpusieron los cortes de cobertura vegetal de las cartas en las imágenes de satélite, tomando como criterio de suelo desnudo las superficies con NDVI menor de 0.20 (Sobrino et al, 2000). Luego se extrajeron los polígonos de vegetación de acuerdo a su grupo hidrológico (tabla 7). Es importante mencionar, que en esta zona en particular se tomen con reservas los datos y estimaciones efectuadas aquí, ya que debido a que esta es un zona agrícola y ganadera, con actos vegetativos temporales, por lo tanto, suelen ser predominantes el suelo desnudo inferido por el NDVI.

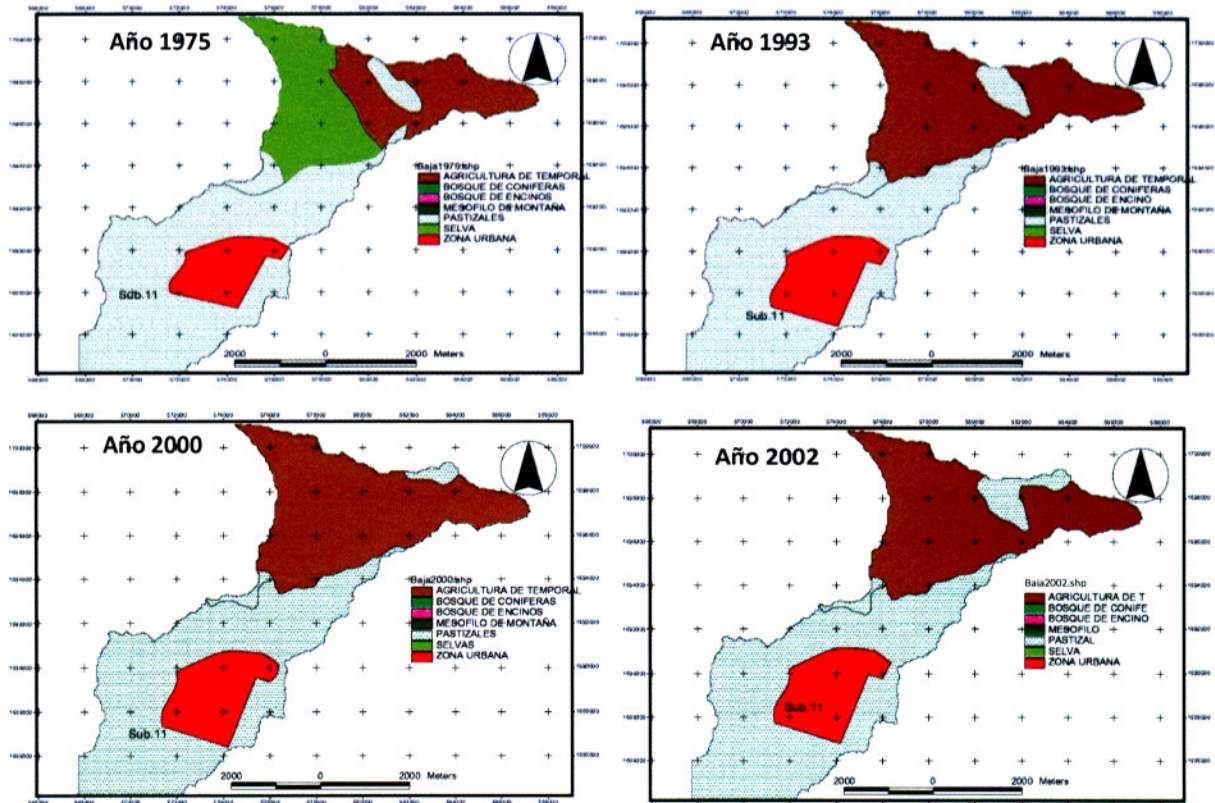


Figura 36. Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca baja del río Huixtla

Tabla 7. Clasificación de suelos según su grupo hidrológico (Aparicio, 1996)

Grupo hidrológico del suelo	Textura del suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla; Suelos muy permeables.
B	Arenas finas y limos.
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla.
D	Arcillas con grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables.

Con los polígonos de vegetación clasificados por grupo hidrológico del suelo, se extrajeron los valores de NDVI para cada polígono, se determinó la superficie de suelo desnudo y las superficies netas de cobertura vegetal. Finalmente se calculó la distribución de la vegetación y el uso de suelo, complementado con el análisis del NDVI, para cada uno de los años del periodo analizado. En las figuras 37 a la 39, se presentan el comportamiento del cambio de cobertura vegetal de la cuenca alta, media y baja del río Huixtla en el periodo 1970-2009.



Figura 37. Cambio anual de uso del suelo y cobertura vegetal en la cuenca alta del río Hixtla en el periodo 1970-2009 (en %).

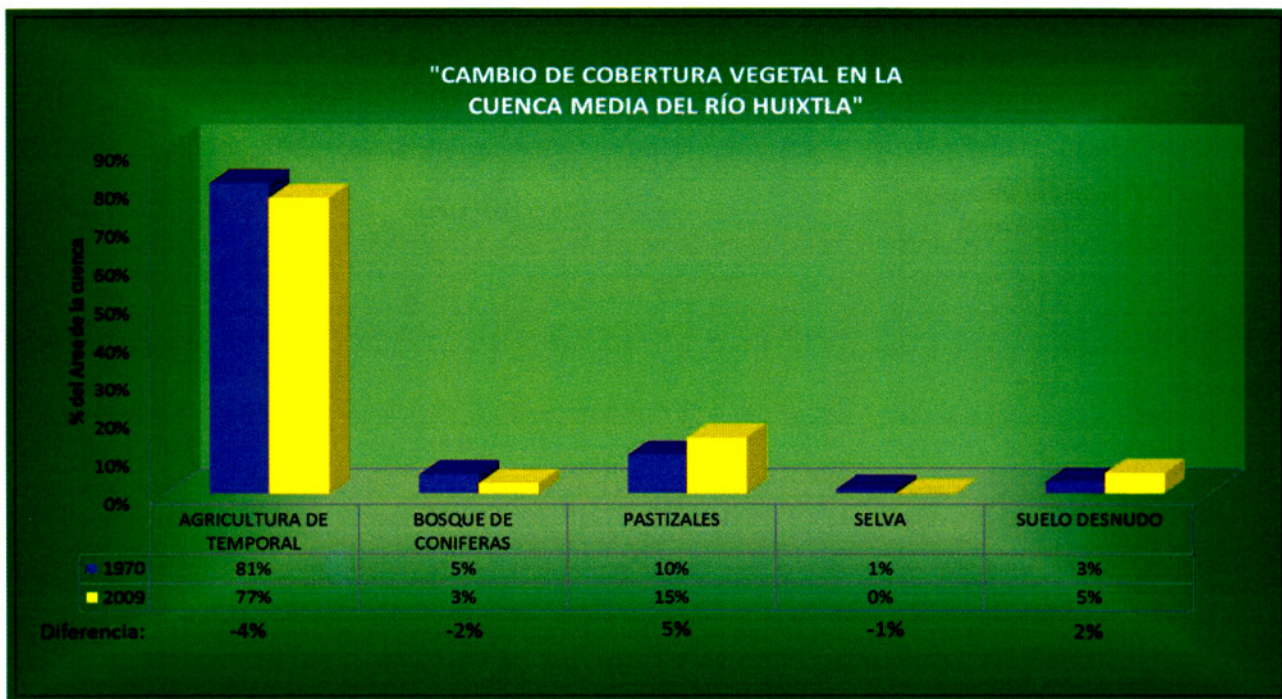


Figura 38. Cambio anual de uso del suelo y cobertura vegetal en la cuenca media del río Hixtla en el periodo 1970-2009 (en %).

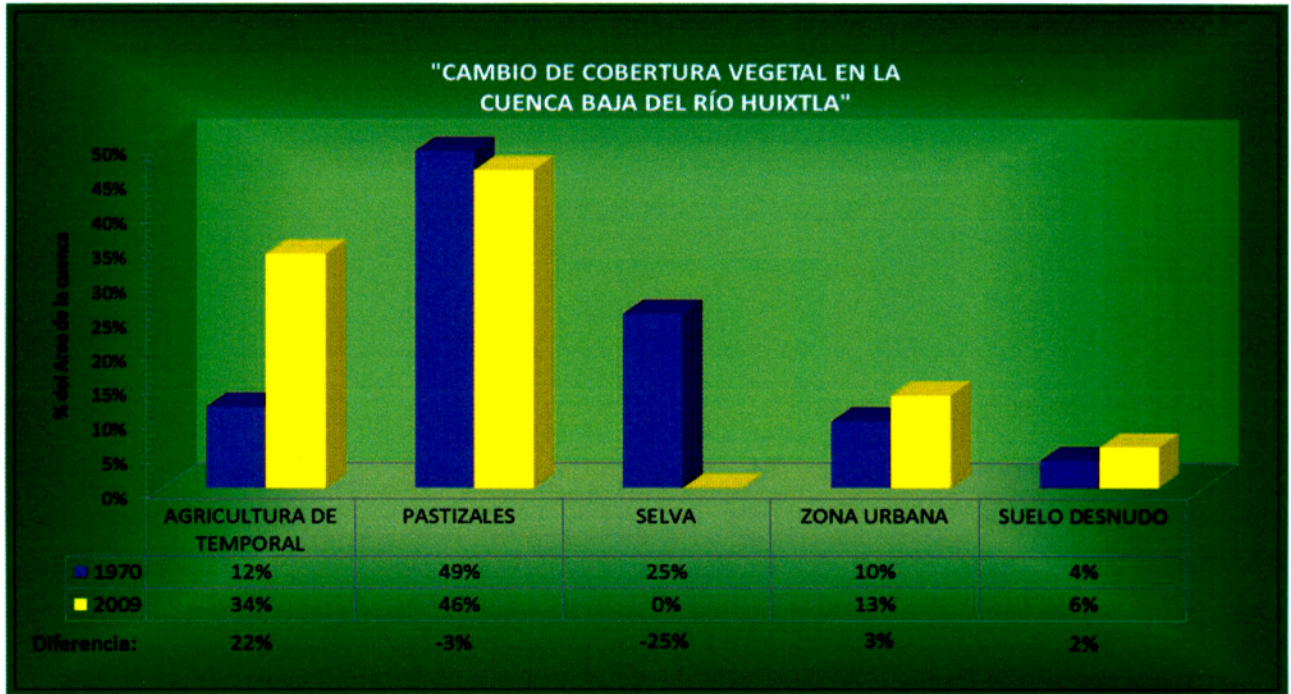


Figura 39. Cambio anual de uso del suelo y cobertura vegetal en la cuenca baja del río Huixtla en el periodo 1970-2009 (en %).

4.4.3. Estimación de los números de curva

Una vez calculada la distribución de la vegetación y el uso de suelo, se determinó los números de curva con la metodología del SCS (SCS, 1971). Este método convierte parte de la precipitación, en lluvia de escurrimiento superficial (o exceso de lluvia) y utiliza el NC, el cual se deriva de las características de las cuencas hidrográficas y de cinco días de lluvia antecedente (Aparicio, 1996; Mishra, et al, 2004). Para ello fue necesario realizar un álgebra de mapas, que es un modelo de datos que utiliza una representación uniforme del espacio como redes discretas, que se organizan en capas (Pullar, 2001). El proceso se llevó a cabo a partir de la unión de las siguientes capas:

Tipo hidrológico de suelo. Esta capa se obtuvo clasificando los tipos de suelo de la carta edafológica del INEGI, de acuerdo al grupo hidrológico de suelo al que pertenecen, esta clasificación se efectuó con base a los criterios de la tabla 6 (Aparicio, 1996). El resultado de esta capa se presenta en la figura 40 y la tabla 8.

Tabla 8. Distribución de los grupos hidrológicos de suelo en la cuenca del río Huixtla.

Subcuenca	Zona hidrológica	Área (km ²)	Área (%)	Clave	Tipos de suelos	Grupo hidrológico de suelo
Sub.1	Cuenca Alta	20.57	6%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.1		3.85	1%	Re+Hh+l/2/L	Regosol	B
Sub.2		4.27	1%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.2		6.28	2%	Ah+To+Bd/3	Acrisol	D
Sub.2		27.76	8%	Re+Hh+l/2/L	Regosol	B
Sub.3		6.60	2%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.3		1.00	0%	Re+Hh+l/2/L	Regosol	B
Sub.4		17.86	5%	Ah+To+Bd/3	Acrisol	D
Sub.5		14.91	4%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.5		5.45	1%	Ah+To+Bd/3	Acrisol	D
Sub.5		17.50	5%	Re+Hh+l/2/L	Regosol	B
Sub.5		16.70	5%	Re+l/2/L	Regosol	B
Sub.7		1.96	1%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.7		14.73	4%	Ah+To+Bd/3	Acrisol	D
Sub.7		0.00	0%	Ah+To+Bd/3	Acrisol	D
Sub.7		11.94	3%	Re+l/2/L	Regosol	B
Sub.6	Cuenca Media	59.56	16%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.6		0.08	0%	Re+Hh+l/2/L	Regosol	B
Sub.8		17.38	5%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.9		36.67	10%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.10		48.39	13%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.11	Cuenca Baja	11.37	3%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.11		0.08	0%	Ah+To+Rd/2/L	Acrisol	D
Sub.11		0.01	0%	Hh+Re/2	Feozem	C
Sub.11		3.88	1%	Hh+Re/2	Feozem	C
Sub.11		4.44	1%	Je+Hh/2	Fluvisol	A
Sub.11		2.40	1%	Re+Bc/2	Regosol	B
Sub.11		0.00	0%	Re+Bc/2	Regosol	B
Sub.11		2.74	1%	Re+Bc+Lc/2/L	Regosol	B
Sub.11		3.51	1%	Be+Hh+Re/2	Cambisol	D
Sub.11		2.12	1%	Be+Hh+Re/2	Cambisol	D
Total =		364.01	100%			

Mapa de pendientes. El mapa de pendientes se extrajo del MDE del INEGI (Fig. 41). Este mapa sirvió para obtener la clasificación de pendientes que es una información necesaria para seleccionar los NC.

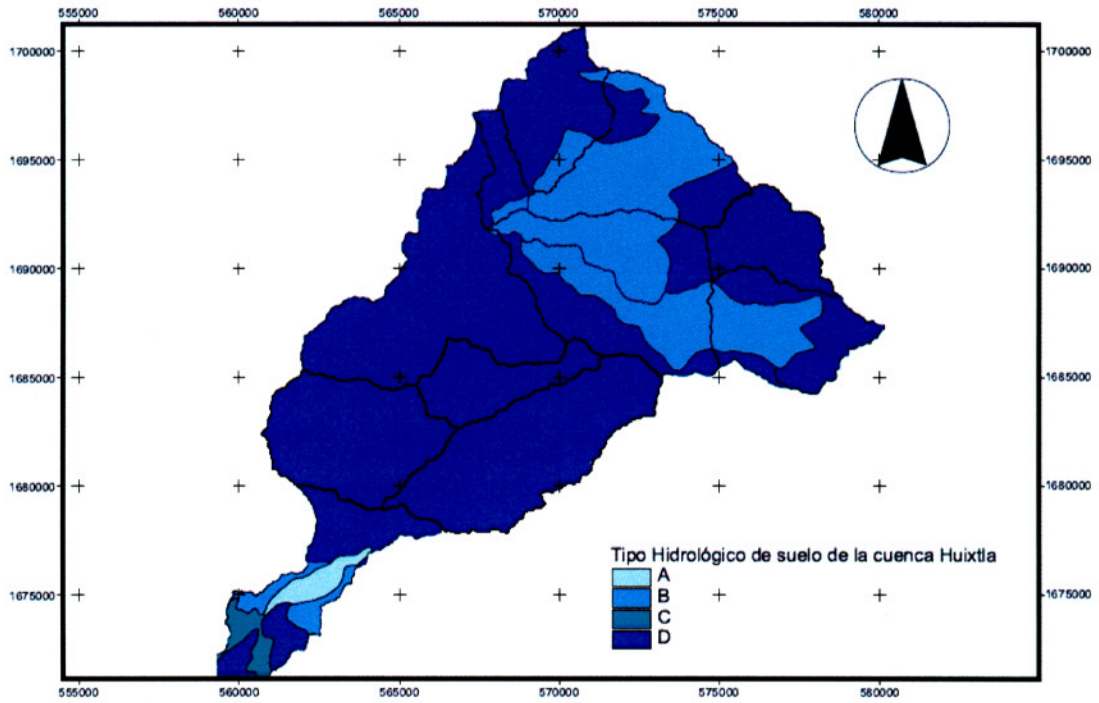


Figura 40. Mapa de la distribución del grupo hidrológico de suelo de la cuenca del río Huixtla (INEGI, 2000).

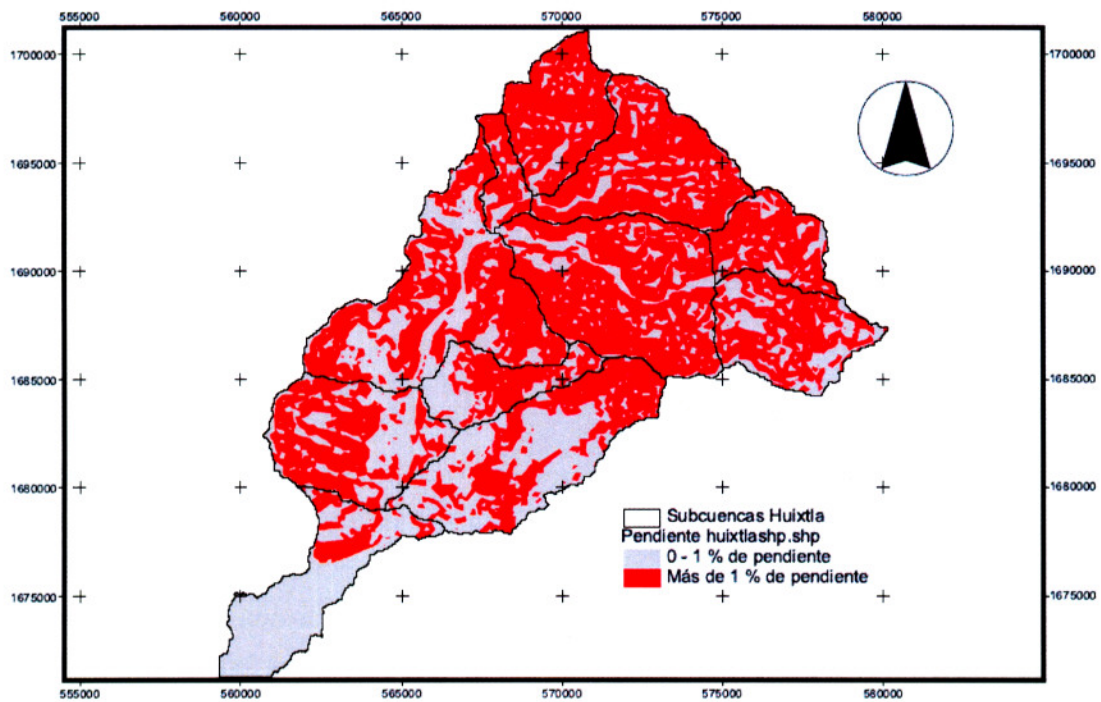


Figura 41. Mapa de pendientes de la cuenca del río Huixtla, extraído del MDE escala: 1:50,000 (INEGI, 2003).

Cobertura vegetal y uso del suelo. Estas capas se determinaron a partir de la información de los mapas de cambio de uso de suelo y vegetación de las cartas del INEGI y los mapas de NDVI.

Una vez generado el álgebra de mapas para cada uno de los escenarios de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo comprendidos en el periodo 1970-2009, se asignaron los valores de NC a nivel de subcuenca, con base a los criterios de la tabla 8. Para tomar en cuenta las condiciones iniciales de humedad del suelo, se efectuó una corrección con los NC de cada escenario, según la altura de precipitación acumulada cinco días antes de la fecha en cuestión (II_5), si se considera que las simulaciones del proceso lluvia-escorrentía efectuadas en esta tesis se realizaron para el mes de septiembre, las correcciones por humedad antecedente se hicieron con los últimos cinco días del mes de agosto. Los criterios para realizar la corrección se presentan en el apartado 2.1.3.2.

4.4.4. Análisis de números de curva para el periodo 1970-2009

Debido a que los modelos para análisis de series temporales son diseñados para recoger información de procesos que tienen una cierta homogeneidad, los outliers (datos espurios) influyen en la bondad del ajuste y en la eficiencia de los estimadores de dichos modelos (Cabrer et al., 2007). Generalmente, los outliers suelen estar asociados con eventos extraordinarios que producen una distorsión en las series. De aquí, el análisis de series temporales requiere de una corrección previa de las mismas, pues de otro modo, se podrían producir distorsiones en los resultados (Gómez et al., 2001). En el análisis, fue necesario corregir algunos datos espurios de la serie de NC.

Después de obtener los valores de NC para el periodo 1970-2009, se procedió a realizar un análisis de la tendencia de este parámetro, resultando una tendencia lineal positiva en las seis subcuencas que componen la cuenca alta (figura 42), en las cuatro subcuencas de la cuenca media (figura 43) y en la cuenca baja (figura 44). No obstante que la bondad del ajuste lineal es aceptable en todas las subcuencas, en algunas de ellas se observa una ligera tendencia decreciente, lo que en un momento dado pudiera sobrestimar los NC para el futuro.

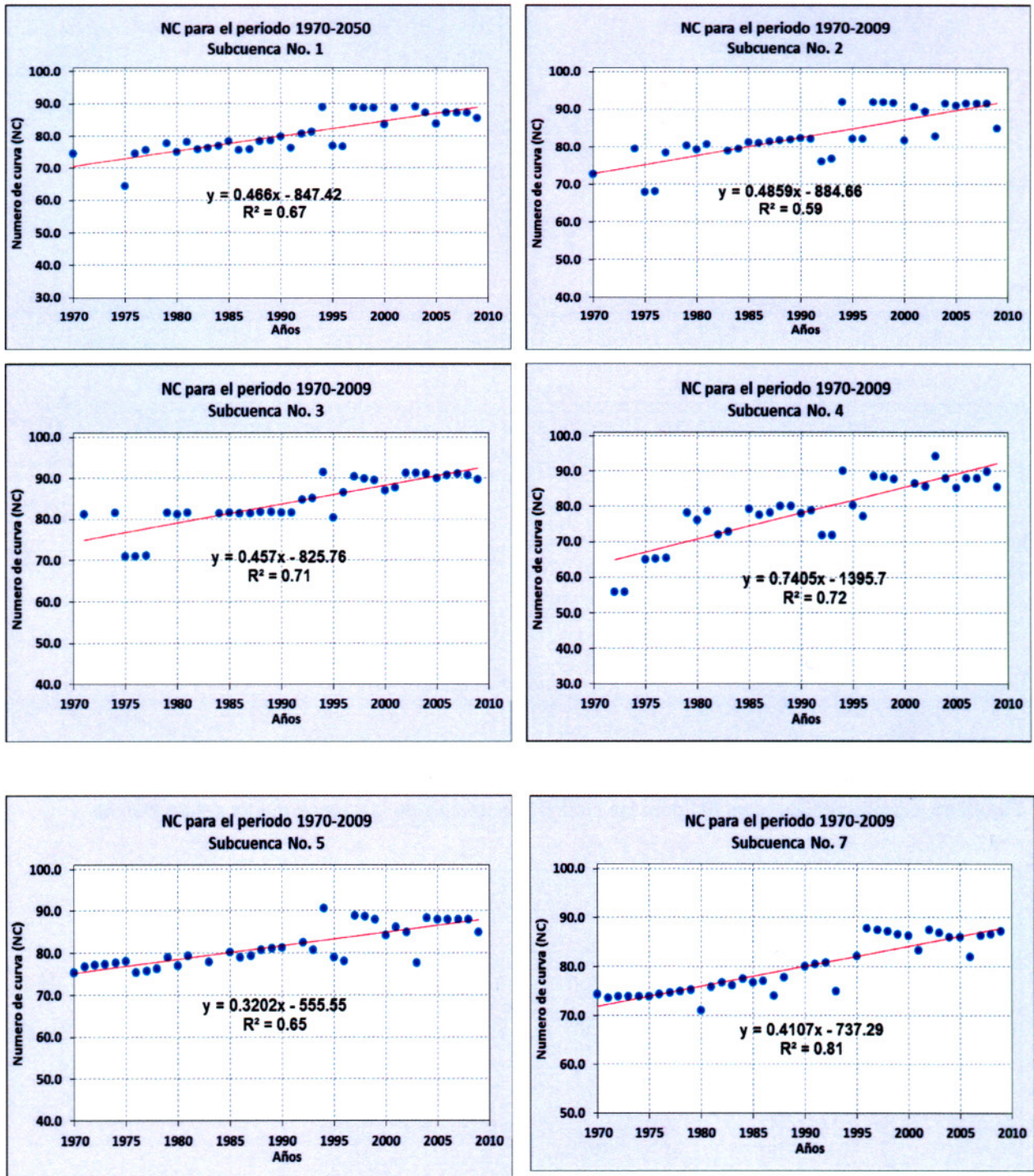


Figura 42. Comportamiento del NC para las seis subcuencas de la cuenca alta del río Huixtla

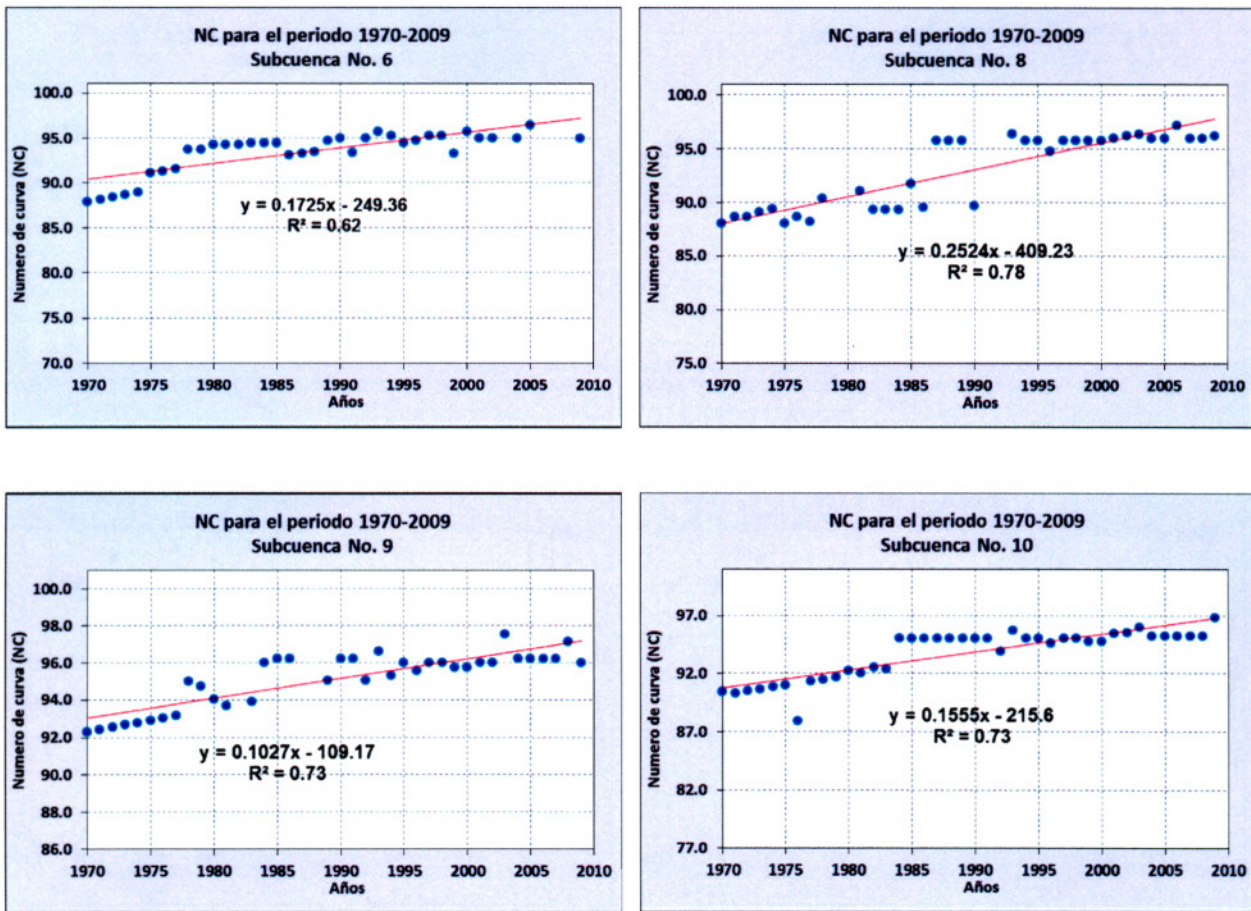


Figura 43. Comportamiento del NC para las cuatro subcuencas de la cuenca media del río Huixtla

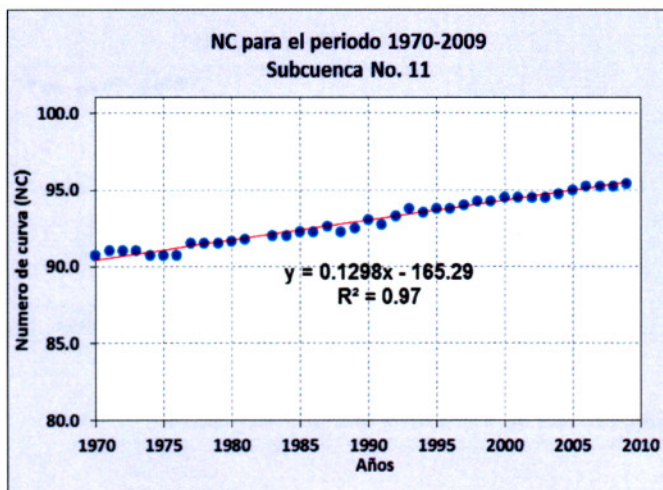


Figura 44. Comportamiento del NC para la cuenca baja del río Huixtla



Para el año 2009, se observa que las subcuencas de la cuenca media y baja tienen los mayores valores de NC. En tanto que la cuenca alta sigue siendo la más conservada con menores NC, sin embargo, ha sido la que ha sufrido las mayores afectaciones por el cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el periodo 1970-2009 con un incremento promedio de un 14% en el NC, contra un 6% en la cuenca media y un 5% en la baja.

4.5. Implementación del modelo semidistribuido HEC-HMS a la cuenca del río Huixtla

Una vez obtenida y analizada la información necesaria, se implementó el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS en la cuenca del río Huixtla por medio de dos procesos principales: la construcción y la calibración del modelo.

4.5.1. El Modelo HEC-HMS

El HEC-HMS es un programa complejo que calcula el hidrograma producido por una cuenca si se cuenta con los datos físicos de la misma y con datos de precipitaciones (USACE, 2010a). El programa permite establecer varias subcuencas en el modelo y realiza los cálculos de las tres primeras fases para cada subcuenca. **A)** Calcula la precipitación neta (la parte de la precipitación que genera escorrentía directa). **B)** Calcula la escorrentía directa (producida por esa precipitación neta). **C)** Calcula la evolución de la escorrentía básica a lo largo del tiempo (Sumando a la escorrentía directa la escorrentía básica). **D)** Calcula como evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce, depósito o embalse (figura 45). Al final suma todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido y proporciona el hidrograma a la salida de la cuenca.

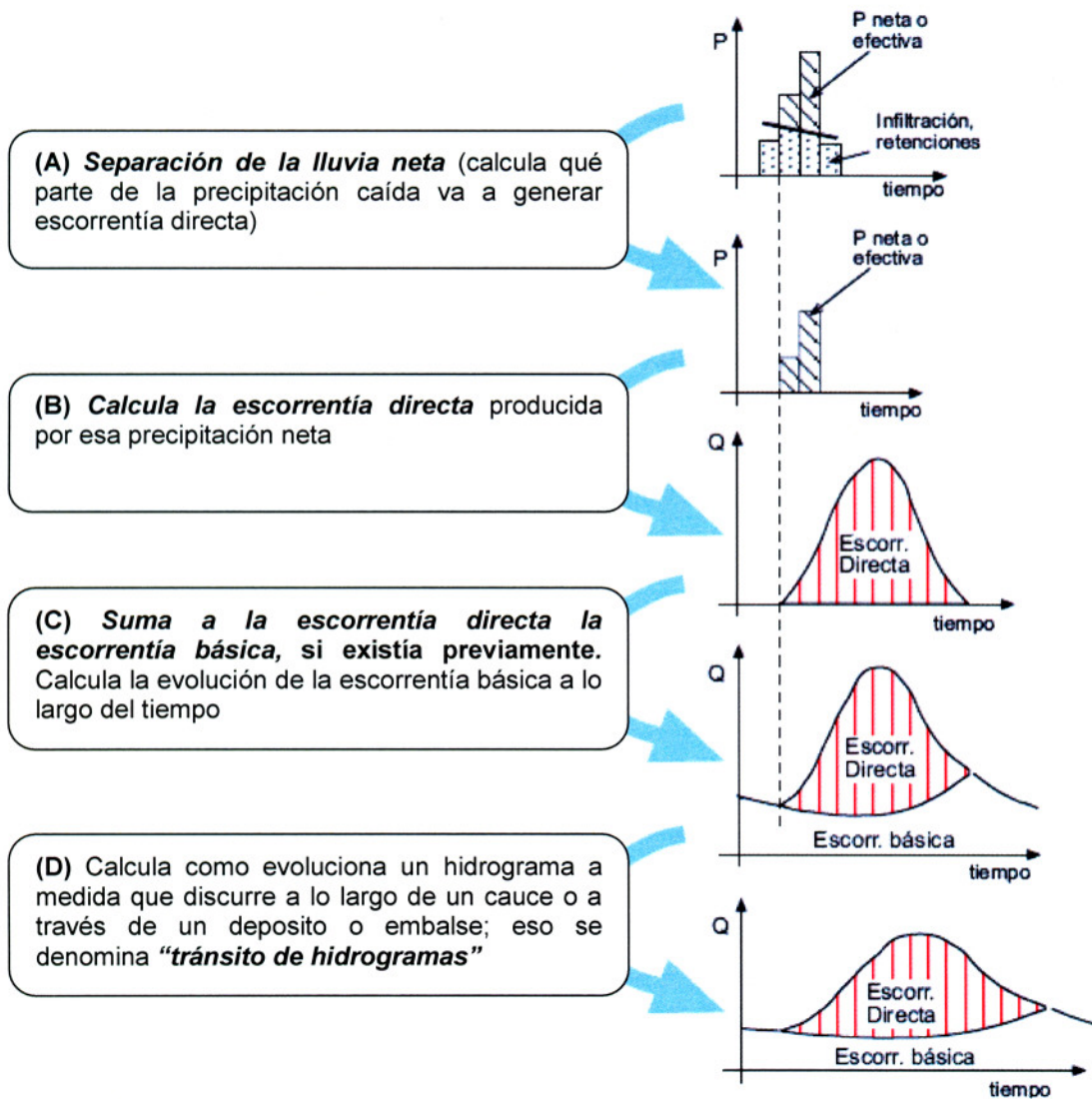


Figura 45. Esquema de las diversas fases del programa HEC-HMS (Sánchez, 2008)

4.5.1.1 Componentes del modelo HEC-HMS

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca el HEC-HMS utiliza los siguientes componentes: modelo de la cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control y datos de entrada. Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal dada la entrada del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar, los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos por celdas, son requeridos como

parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el meteorológico. A continuación se describe los componentes creados en el modelo HEC-HMS.

Modelo de Cuenca. El modelo de la cuenca representa la cuenca física. El usuario desarrolla el elemento de la cuenca incluyendo y conectando elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos, para describir los procesos físicos que se producen en la cuenca. La tabla 8 describe tales elementos hidrológicos que son representados en la figura 46.

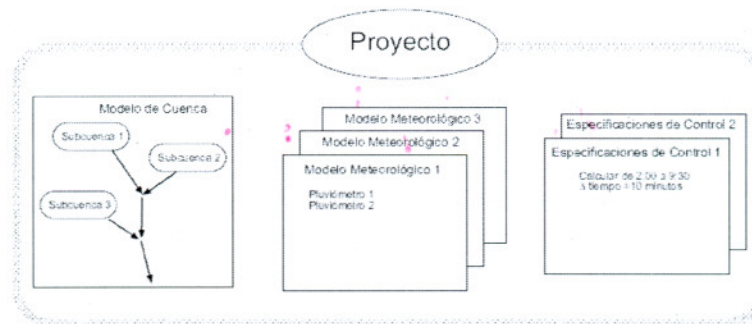


Figura 46. Componentes básicos de un proyecto en el modelo HEC-HMS

Modelo Meteorológico. Una precipitación elevada es la causa más común de un evento hidrológico. Para que se produzca un fenómeno de este tipo, ha de producirse una situación meteorológica inicial favorable y un suministro de aire húmedo que alimente el proceso. Estas condiciones meteorológicas son muy variables tanto espacialmente como temporalmente, siendo el resultado una precipitación con distribución irregular. Para simular este fenómeno en el HEC-HMS requiere crear la componente llamada “modelo meteorológico”. Dentro de este modelo se especifica qué estaciones o pluviómetros intervienen en cada subcuenca y se establece la variación espacial y temporal de la precipitación en cuestión. Una breve descripción de los métodos disponibles para calcular la precipitación media se puede ver en la tabla 9.

Tabla. 9. Descripción de los elementos hidrológicos (USACE, 2010a)

Elemento Hidrológico	Descripción
Subcuenca (Subbasin)	Se usa para representar la cuenca física. Dada la precipitación, la salida de agua de la subcuenca se calcula restando las pérdidas a la precipitación y transformando el exceso de precipitación en caudal en el punto de salida de la subcuenca, sumando finalmente el caudal base.
Tramo (Reach)	Se usa para transportar el agua generada en algún punto de la cuenca hacia aguas abajo hasta otro punto de la cuenca, definidos ambos en el modelo de la cuenca. La respuesta de este transporte es un retardo y una atenuación del hidrograma de entrada.
Unión (Junction)	Se usa para sumar flujos de agua que provienen de elementos hidrológicos situados aguas arriba de la unión. La respuesta es simplemente la suma de los hidrogramas de todos los elementos conectados a la unión.
Fuente (Source)	Se usa para introducir agua dentro del modelo de la cuenca. Este elemento no tiene entrada y la salida está definida por el usuario.
Sumidero (Sink)	Se usa para representar el punto de salida de la cuenca. La entrada puede provenir de uno o más elementos situados aguas arriba del sumidero. Este elemento no tiene salida.
Depósito (Reservoir)	Se usa para modelar la retención y atenuación de un hidrograma causado por un embalse o depósito de retención. La entrada puede provenir de uno o varios elementos hidrológicos situados aguas arriba del depósito. La salida puede calcularse de 2 maneras: el usuario define una relación almacenamiento-salida, cota-almacenamiento - salida o cota - área- salida o bien el usuario define una relación cota-almacenamiento o cota-área y una o más estructuras de salida.
Derivación (Diversion)	Se usa para modelar un flujo de agua que abandona un tramo de cauce. La entrada proviene de uno o varios elementos de aguas arriba. La salida de este elemento consiste en un flujo derivado y otro no derivado (que sigue por el cauce). El flujo derivado se define por el usuario. Tanto los flujos derivado como no derivado se pueden conectar aguas abajo con otros elementos.



Figura 47. Representación de los elementos hidrológicos (USACE, 2010b)

Tabla. 10. Descripción de los Métodos incluidos en el modelo meteorológico (USACE, 2010a).

Métodos de Precipitación	Descripción
Tormenta asociada a frecuencia	Se usa para desarrollar un evento de precipitación donde los volúmenes correspondientes a distintas duraciones tienen una probabilidad de excedencia consistente.
Pluviómetros con pesos	Este método aplica pesos definidos por el usuario a los pluviómetros que el usuario desee.
Precipitación por celdas	Este método permite usar productos con precipitación por celdas, como por ejemplo los datos de Radar.
Inversa de la distancia	Se usa para calcular la precipitación media en una subcuenca aplicando una ponderación basada en la inversa de la distancia al cuadrado.
Tormenta del SCS	Este método aplica una distribución temporal tipo SCS a un volumen total de lluvia en 24 horas.
Hietograma especificado	Este método aplica un hietograma definido por el usuario a un elemento de subcuenca.
Tormenta de proyecto estándar	Este método aplica una distribución temporal a un volumen índice de precipitación (este índice se extrae de un Manual del Corps of Engineers y es válido sólo para Estados Unidos. Está actualmente en desuso).

Especificaciones de control. Se trata simplemente de indicarle al programa cuando empezar y terminar de computar y el incremento de tiempo. El incremento de tiempo es para indicar cada cuanto tiempo debe realizar el cálculo: si hacemos Time Interval = 5 minutos, HEC-HMS calculará el hidrograma resultante para puntos separados de 5 en 5 minutos (USACE, 2010b).

4.5.2. Construcción del modelo

En este apartado se construyó el modelo hidrológico HEC-HMS que se usará para simular el proceso lluvia-escorrentía ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo, considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huixtla.

Para comenzar a utilizar el programa HEC-HMS fue necesario generar un "nuevo proyecto". Dentro del proyecto se suministran todo tipo de datos de la cuenca y subcuencas, precipitaciones, gastos, números de curva, tiempos de retraso, y otras variables, con sus respectivas especificaciones, organizados en torno a tres componentes principales: Modelo de cuenca, Modelo meteorológico y Especificaciones de control.

4.5.2.1. Modelo de cuenca del río Huixtla

Aquí se representa físicamente a la cuenca, añadiendo y conectando elementos hidrológicos como: subcuenca, tramo, unión, sumidero, almacenamiento, etc. (USACE, 2010b). En el panel del *Modelo de cuenca* del HEC-HMS se esquematizó la cuenca del río Huixtla, en este caso se dividió en once subcuencas (figura 48 y tabla 11).

Las estimaciones que se realizan en el modelo de cuenca son:

Calculo de la precipitación neta. Para este proceso se pueden elegir entre varios métodos de cálculo, en el caso del modelo de la cuenca del río Huixtla, se utilizó el método del número de curva del SCS.

Transformación de lluvia en caudal. Se utilizó el método del hidrograma unitario del SCS. Entre algunas de las consideraciones efectuadas, se estimó que el “tiempo de retardo” (lag time) de la cuenca, es aproximadamente el 60% del tiempo de concentración (USACE, 2010b).

Tránsito del hidrograma en la zona de estudio. Se utilizó el método de Muskingum.

Tabla. 11. Características de las subcuencas del modelo de la cuenca del río Huixtla.

Subcuenca	Área (km2)	Longitud del cauce (Km)	S	Tc	lag
sub-1	24.42	9.87	0.17	45.4	27.23
sub-2	38.31	13.44	0.12	67.5	40.49
sub-3	7.60	8.41	0.15	42.7	25.61
sub-4	17.86	8.82	0.13	46.8	28.09
sub-5	54.55	17.78	0.08	96.7	58.05
sub-6	59.64	15.08	0.10	78.8	47.26
sub-7	28.63	9.75	0.13	50.0	29.99
sub-8	17.38	10.50	0.18	47.0	28.19
sub-9	36.67	13.32	0.11	68.7	41.20
sub-10	48.39	18.90	0.13	84.2	50.52
sub-11	30.56	15.93	0.07	93.6	56.19

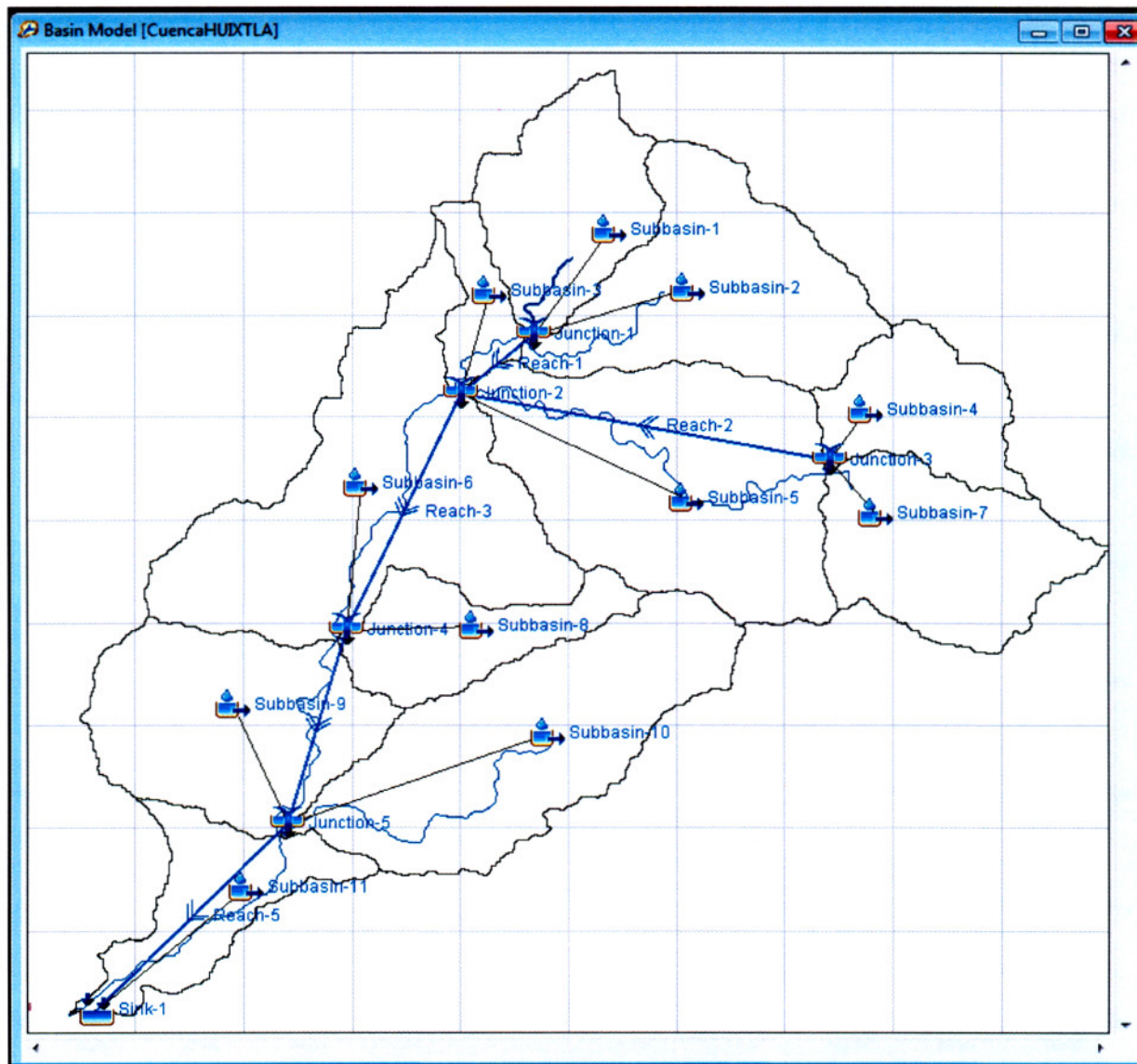


Figura 48. Modelo de cuenca del río Huixtla

4.5.2.2. Modelo meteorológico de la cuenca del río Huixtla

Dentro del modelo meteorológico se suministran los datos de uno o más pluviómetros. El modelo hidrológico HEC-HMS permite elegir entre varios de cálculo para determinar la precipitación media en la zona de estudio. Para el estudio, considerando que varias estaciones están situadas en el interior de la cuenca y en cuencas vecinas (Fig. 49 y Tabla 12), se recurrió al método de pesos de estaciones o polígonos de Thiessen. Este método asigna a cada celda

el valor de precipitación de la estación pluviométrica más cercana, considerando los pesos de influencia espacial y temporal que ejercen las estaciones en cada una de las subcuencas, por lo que se puede hablar de un método parcialmente distribuido. Para la aplicación de este método (por considerarse un evento continuo), fue se requirió en cada una de las estaciones la precipitación total para el mes de septiembre del mes.

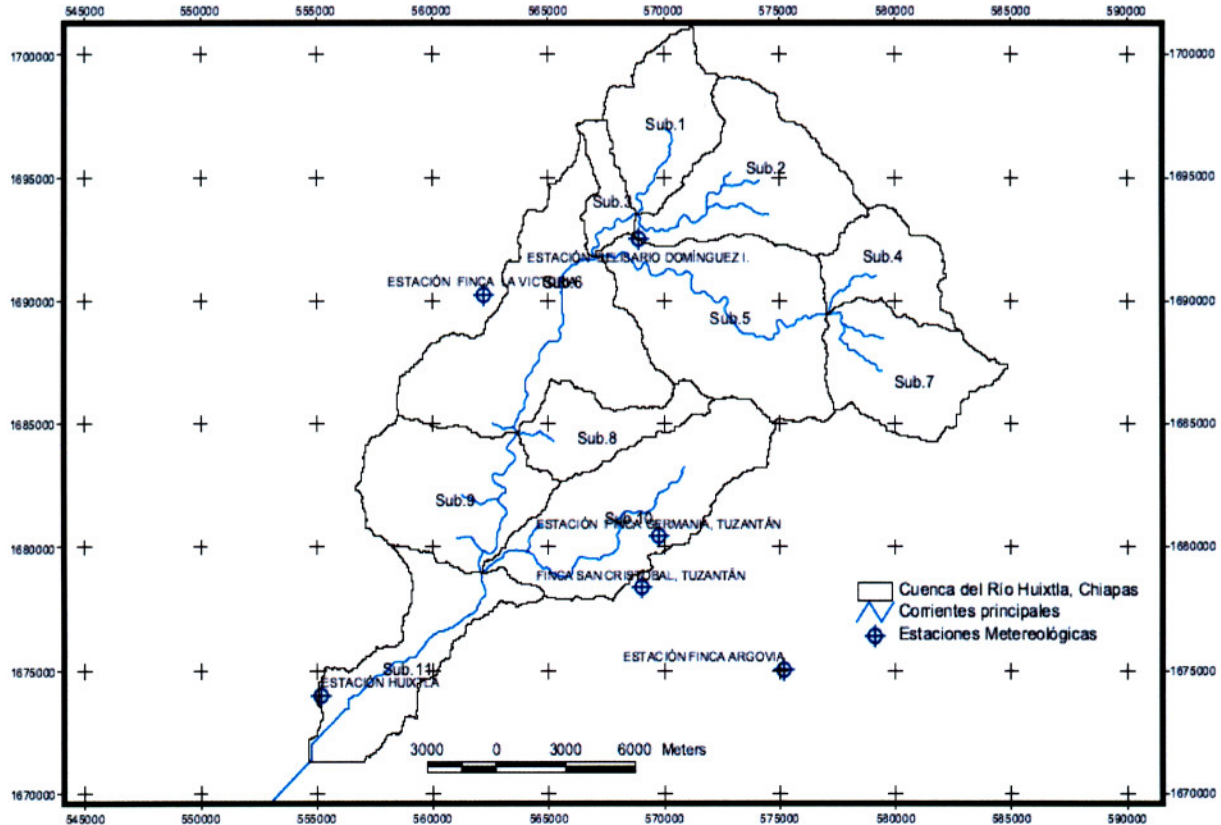


Figura 49. Ubicación de las estaciones meteorológicas

Tabla. 12. Localización geográfica de las estaciones meteorológicas

Estación	Localización		Periodo de registro
	Latitud	Longitud	
Argovia	- 92.30	15.15	1970-2005
Belisario Domínguez	- 92.36	15.31	1970-2005
Germania	- 92.35	15.20	1970-2005
Huixtla	- 92.49	15.14	1970-2005
San Cristóbal	- 92.36	15.18	1970-2005
La Victoria	- 92.42	15.29	1970-2005

Los datos de lluvia de las tormentas simuladas, se definen previamente y se introduce su información en el administrador de datos de Series de Tiempo del modelo. Generalmente, la información proporcionada por un pluviógrafo sobre un evento determinado es muy escasa. Ni siquiera una red convencional de pluviógrafos, con densidades en torno a un pluviógrafo por cada 200 km², es suficiente para proporcionar la información deseada sobre el fenómeno (Martínez, 1999). Además, por tratarse de un modelo para el estudio de eventos, el HEC-HMS requiere información de precipitación sobre la cuenca a intervalos de tiempo regulares. Estos intervalos deben ser de la menor duración posible, función del tamaño de la cuenca y de la duración del evento. No es recomendable adoptar duraciones que proporcionen un número superior a los cuarenta intervalos para definir el evento, ya que el tiempo de cálculo aumenta proporcionalmente al número de intervalos definidos (Martínez, 1999). Ante la falta de información parcial de las tormentas calibradas, se consideró la distribución de lluvias con base a la CNA (1987), que recomienda dividir el hietograma de una tormenta en ocho intervalos de distribución (tabla 13).

Tabla 13. Distribución de lluvias en intervalos de tres horas (CNA, 1987).

Intervalo	Hora	Distribución
1	00:00	4.5%
2	03:00	4.0%
3	06:00	4.8%
4	09:00	8.8%
5	12:00	22.2%
6	15:00	37.8%
7	18:00	12.2%
8	21:00	5.7%

4.5.3. Calibración del modelo

La calibración del modelo es el proceso por el cual los valores de los parámetros del modelo son identificados para su uso en una aplicación particular. Consiste en el uso de datos de lluvia escurrimiento y un procedimiento para identificar los parámetros del modelo que provean la mejor concordancia entre los flujos simulados y los registrados. La identificación de los parámetros puede ser llevada a cabo manualmente o automáticamente utilizando técnicas de optimización matemática, la cual se realiza ajustando inicialmente los parámetros de manera

preliminar a prueba y error, y posteriormente se lleva a cabo el ajuste fino mediante la calibración automática (Boyle, et al., 2000).

La calibración del modelo se realizó con el método de Muskingum, que por su simplicidad, es el más ampliamente usado entre los diversos modelos existentes para estudiar la propagación de avenidas en canales naturales y ríos (Ayuso, 1990). La precisión del modelo depende de los parámetros K y X, que relacionan el volumen de almacenamiento en el tramo del río a los caudales de entrada y de salida.

Considerando que para determinar el valor del parámetro X no se necesita gran precisión, debido a que los resultados del método son relativamente poco sensibles a la variación de este parámetro (Ayuso, 1990), la calibración del modelo se efectuó para el parámetro K de Muskingum, para lo cual se realizaron corridas para diversas tormentas con lluvias de veinticuatro horas o más.

4.5.3.1. El método de Muskingum

Un criterio utilizado en la elección del método de tránsito del hidrograma, se encuentra en las características mismas del cauce (tabla 14). Principalmente bajo este primer criterio y por el nivel de información del cauce, para la cuenca del río Huixtla se seleccionó el método de Muskingum, debido a que los cauces del río que conforman la cuenca tienen pendientes que superan los 0.03 m/s ($S_o > 0.002$).

El método de Muskingum tiene la ventaja de no requerir el conocimiento de la geometría del lecho del río, según Gallati et al., (1977), el fenómeno se puede reproducir bastante bien sobre la base de la calibración realizada a partir de datos experimentales en relación con las secciones extremas de largo alcance, además tiene dos parámetros que pueden estar estrechamente ligados a la velocidad y el hundimiento de la cresta de la ola y por lo tanto, proporciona estimaciones que en buena parte permiten obtener estas dos importantes características de propagación.

Tabla 14. Criterios de selección del método de tránsito de avenidas

CRITERIO	USAR	NO USAR
Cauce no medido	Muskingum-Cunge, Onda cinemática	Muskingum, Almacenamiento
Efecto de remanso importante	Método basado en almacenamiento	Muskingum-Cunge, onda cinemática, Muskingum
Flujo con desborde	Muskingum-Cunge, Almacenamiento	Muskingum
$S_o > 0.002$ $T_{duración} S_o V_{prom} / Y_{prom} > 117$	Muskingum-Cunge, onda cinemática, Muskingum, Almacenamiento	
$0.0004 < S_o < 0.002$ $T_{duración} S_o V_{prom} / Y_{prom} > 117$	Muskingum-Cunge, Muskingum, Almacenamiento	Onda cinemática
$S_o < 0.0004$ $T_{duración} S_o V_{prom} / Y_{prom} > 15$	Muskingum-Cunge	Onda cinemática, Muskingum, Almacenamiento
$S_o < 0.0004$ $T_{duración} S_o V_{prom} / Y_{prom} < 15$	Modelo dinámico con ecuaciones completas	Cualquiera de los modelos simplificados

El método de Muskingum modela el almacenamiento en un cauce mediante la combinación de dos tipos de almacenamientos, almacenamiento por prisma y almacenamiento por cuña (figura 50).

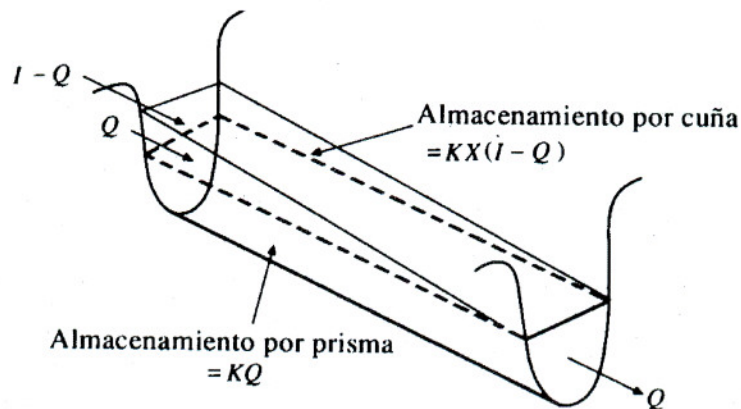


Figura 50. Almacenamientos por prisma y por cuña en un tramo de cauce (Ayuso, 1990)

El volumen de almacenamiento prismático es proporcional al caudal de salida, ya que se supone que el caudal de salida es proporcional al área de la sección del cauce:

$$S_p = KQ \tag{23}$$



El valor de K se considera igual al tiempo de tránsito de la onda de avenida a través del tramo. El volumen de almacenamiento por cuña es proporcional a la diferencia entre las entradas y las salidas:

$$S_c = KX (I - Q) \quad (24)$$

Donde X es un factor de ponderación tal que puede tomar valores entre 0 y 0.5, en función de la forma de almacenamiento en cuña. Cuando X = 0, no existe cuña, no hay curva de remanso y el almacenamiento en el cauce será tipo embalse: S = KQ. En este caso se produciría la máxima atenuación posible. Cuando X = 0.5; se dice que la cuña está completamente desarrollada y no existiría atenuación alguna del pico. En cauces naturales muy caudalosos y de baja pendiente, X suele ser próximo a 0 y será más cercano a 0.5 cuanto más pendiente y menos caudal tenga el cauce.

El almacenamiento total en el tramo de cauce considerado sería entonces:

$$S = KQ + KX (I - Q) \quad (25)$$

Resultando una función lineal ponderada del aporte I y del caudal de salida Q. Expresión que fue desarrollada en 1939 por McCarthy, del cuerpo de Ingenieros de EE.UU, y conocida como ecuación de Muskingun, que puede reordenarse como:

$$S = K [XI + (1 - X) Q] \quad (26)$$

El valor de X (factor de ponderación) depende de la forma del almacenamiento en cuña, y varia, como se ha dicho, entre cero, para almacenamiento tipo embalse y 0.5 para una cuña completa (USACE, 2000). Con X = 0 no existe cuña, no teniendo lugar los efectos de aguas arriba (caso del supuesto de horizontalidad de la superficie libre de embalses), resultando un modelo de embalse lineal S=KQ.

En canales naturales, X varía entre 0 y 0.3, con un valor medio en torno a 0.2. No se necesita gran precisión a la hora de determinar el valor de X, debido a que los resultados del método son relativamente poco sensibles a la variación de este parámetro (Ayuso, 1990).

El parámetro K es una constante llamada parámetro de almacenamiento, es un factor de peso que expresa la influencia relativa de las entradas y salidas del almacenamiento en el tramo. El parámetro K representa el tiempo de recorrido de un hidrograma o de una onda de crecida a lo largo del tramo de estudio. El valor de K se puede determinar conociendo las pendientes de las tangentes a los hidrogramas de entrada y salida en el punto de intercepción de ambas.

Para la aplicación del modelo hay que conocer los valores de los parámetros K y X, los cuales se suponen constantes a lo largo del intervalo de valores de flujo.

4.5.3.2. Metodología de calibración

El proceso de calibración permite reproducir lo más fielmente posible el funcionamiento del sistema observado dentro de un modelo hidrológico. El proceso de calibración empieza con la recolección y validación de datos necesarios para el modelo (variables explicativas). El siguiente paso es seleccionar los parámetros iniciales estimados, de acuerdo a los datos recolectados y al tipo de información requerida, al proporcionar los parámetros iniciales el modelo realiza un cómputo con la lluvia para obtener el resultado simulado, de esta manera el simulador puede realizar una comparación entre el resultado observado (medido) y el generado por el modelo. Si el resultado no es satisfactorio se deben ajustar nuevamente los parámetros y hacer una revisión de todo. En la figura 51, se representa de forma esquemática, el proceso de calibración realizado en el HEC-HMS.

La calibración del modelo de la cuenca Huixtla, se efectuó seleccionando de una función objetivo de tipo numérica, la cual puede expresarse en forma de ecuaciones matemáticas que representen el grado de ajuste del modelo, y que puedan ser tratadas mediante técnicas de optimización, que consisten en algoritmos de búsqueda que parten de un conjunto inicial de parámetros, y mediante un proceso interactivo, tratan de encontrar el conjunto de parámetros que mejor ajusten el modelo.

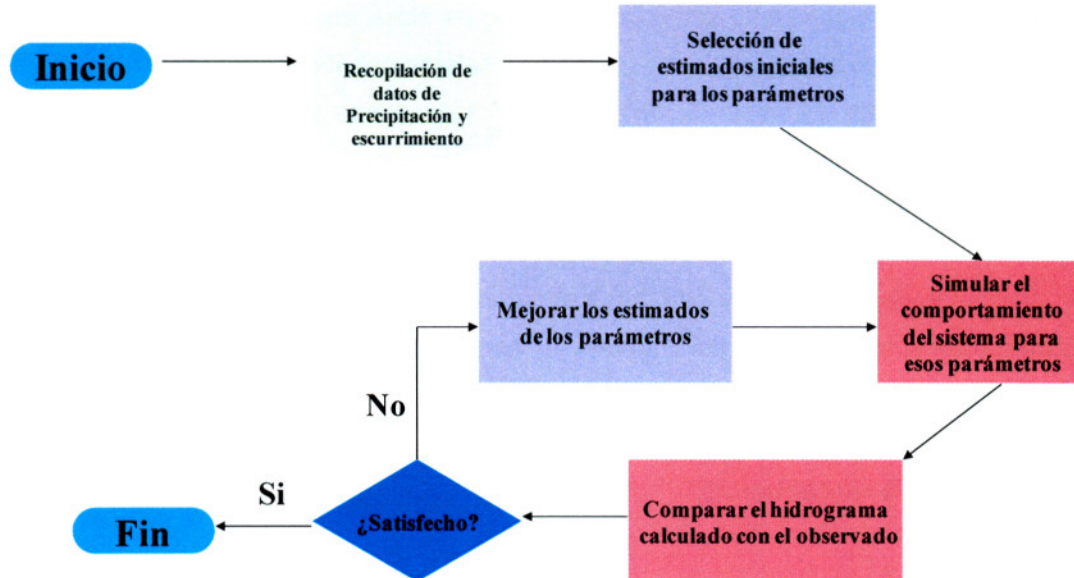


Figura 51. Esquema de calibración de un modelo en el HEC-HMS (USACE, 2000)

Para tal fin, se utilizó el optimizador del HEC-HMS para determinar el parámetro K de Muskingum. El indicador de ajuste (función objetivo) que se utilizó, fue el Peak-weighted RMS (Root Mean Square), este es un indicador que toma en cuenta para cada ajuste, los valores de gasto pico y volumen a la vez, su ecuación matemática es la siguiente (USACE, 2000):

$$Z = \left\{ \frac{1}{NQ} \left[\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(i) - q_s(i))^2 \left(\frac{q_o(i) + q_o(\text{mean})}{2q_o(\text{mean})} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (27)$$

Dónde:

- Z Función Objetivo
- q_o Flujo observado en el día i, (m³/s)
- q_s Flujo calculado en el día i, (m³/s)
- $q_o(\text{mean})$ Flujo medio observado, en (m³/s)
- NQ número de hidrograma calculado

En el proceso se efectuaron corridas para cuatro tormentas con lluvias de 24 horas o más (tabla 15).



Finalmente, se compararon los hidrogramas calculados con los hidrogramas observados según los datos de gastos del BANDAS, los resultados del proceso se presentan a continuación.

Tabla 15. Tormentas utilizadas para la calibración del modelo (CNA, 2008a)

No.	Año	Duración	Gasto pico observado (m ³ /s)
1	1980	13sep-14sep	286
2	1981	03sep-04sep	140
3	1981	14sep-15sep	132
4	1987	26sep-27sep	84

A. Calibración con la tormenta ocurrida del 13 al 14 de septiembre de 1980

Tabla 16. Lluvias de la tormenta ocurrida del 13 al 14 de septiembre de 1980 (mm)

Hora	Huixtla	Belisario	Finca Victoria	Germania	Finca San Cristóbal	Argovia
03:00	1.88	1.36	1.11	2.46	0.24	1.40
06:00	2.26	1.63	1.33	2.96	0.29	1.68
09:00	4.14	2.99	2.44	5.42	0.53	3.08
12:00	10.43	7.55	6.16	13.68	1.33	7.77
15:00	17.77	12.85	10.48	23.28	2.27	13.23
18:00	5.73	4.15	3.38	7.52	0.73	4.27
21:00	2.68	1.94	1.58	3.51	0.34	2.00
00:00	2.12	1.53	1.25	2.77	0.27	1.58
03:00	0.96	0.32	0.59	1.02	2.80	1.20
06:00	1.15	0.38	0.70	1.22	3.36	1.44
09:00	2.11	0.70	1.29	2.24	6.16	2.64
12:00	5.33	1.78	3.25	5.66	15.54	6.66
15:00	9.07	3.02	5.53	9.64	26.46	11.34

Tabla 17. Gastos de la tormenta ocurrida del 13 al 14 de septiembre de 1980 (CNA, 2008a)

Hora	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00	00:00	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00
Gasto (m ³ /s)	31.6	30.6	30.6	30.6	29.8	286.8	131.9	72.3	60.5	60.5	47.0	43.7	42.0	31.6	30.6	30.6	30.6	29.8

Tabla 18. Resumen del K de Muskingum para la tormenta ocurrida 13 al 14 de septiembre de 1980 (hr.)

Año	Duración	K1	K2	K3	K4	K5
1980	13sep-14sep	0.6	0.9	1.1	0.8	1.3

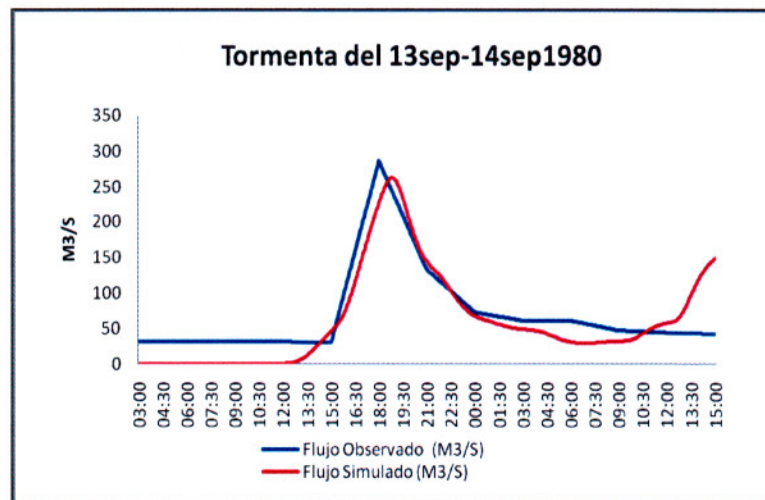


Figura 52. Comparación del hidrograma calculado por el modelo y el observado en la estación hidrométrica para la tormenta ocurrida del 13 al 14 de septiembre de 1980.

Tabla 19. Resultados de la calibración del modelo para la tormenta ocurrida del 13 al 14 de septiembre de 1980.

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	24.64	25.57	-0.92	-3.61
Peak Flow (M3/S)	262.9	286.8	-23.9	-8.3
Time of Peak	13sep1980, 18:50	13sep1980, 18:00		



B. Calibración con la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981

Tabla 20. Lluvias de la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981 (mm)

Hora	Argovia	Belisario	Germania	Huixtla	Finca La Victoria	Finca San Cristóbal
09:00	5.72	0.22	4.75	0.00	2.20	0.97
12:00	14.43	0.56	11.98	0.00	5.55	2.44
15:00	24.57	0.95	20.39	0.00	9.45	4.16
18:00	7.93	0.31	6.58	0.00	3.05	1.34
21:00	3.71	0.14	3.07	0.00	1.43	0.63
00:00	2.93	0.11	2.43	0.00	1.13	0.50
03:00	1.36	0.66	1.11	0.74	1.36	1.68
06:00	1.63	0.79	1.33	0.89	1.63	2.02
09:00	2.99	1.45	2.43	1.63	2.99	3.70

Tabla 21. Gastos de la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981 (CNA, 2008a)

Hora	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00	00:00	03:00	06:00	09:00
Gasto (m ³ /s)	45.4	45.4	45.4	140.5	73.8	57.15	52.16	49.57	48.18

Tabla 22. Resumen del K de Muskingum para la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981 (hr).

Año	Duración	K1	K2	K3	K4	K5
1981	03sep-04sep	0.8	0.9	1.0	0.7	1.1

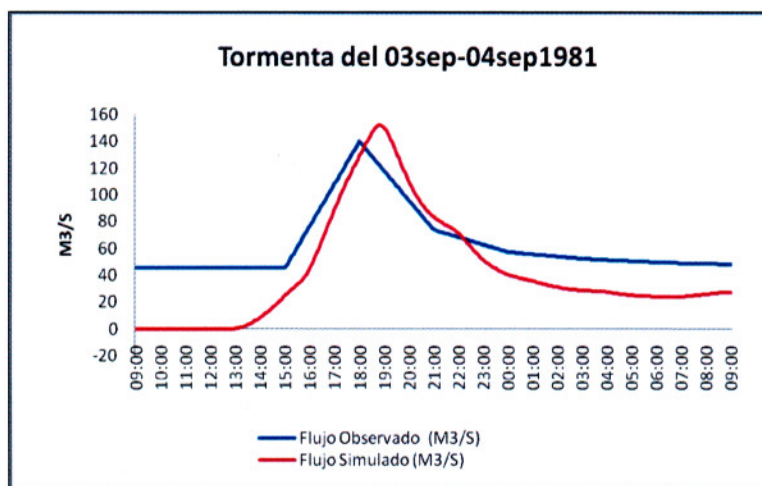


Fig. 53. Comparación del hidrograma calculado por el modelo y el observado en la estación hidrométrica para la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981.

Tabla 23. Resultados de la calibración del modelo para la tormenta ocurrida del 03 al 04 de septiembre de 1981.

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (IN)	13.76	15.17	-1.41	-9.30
Peak Flow (CFS)	151.7	140.5	11.2	8.0
Time of Peak	03sep1981, 18:50	03sep1981, 18:00		

C. Calibración con la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981

Tabla 24. Lluvias de la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981 (mm)

Hora	Argovia	Belisario	Germania	Huixtla	Finca La Victoria	Finca San Cristóbal
15:00	15.12	0.00	8.10	43.81	8.69	10.96
18:00	4.88	0.00	2.61	14.14	2.81	3.54
21:00	2.28	0.00	1.22	6.61	1.31	1.65
00:00	1.80	0.00	0.96	5.22	1.04	1.31
03:00	0.16	0.00	0.12	0.41	0.20	0.84
06:00	0.19	0.00	0.14	0.49	0.24	1.01
09:00	0.35	0.00	0.26	0.90	0.44	1.85
12:00	0.89	0.00	0.65	2.26	1.11	4.66
15:00	1.51	0.00	1.10	3.86	1.89	7.94

Tabla 25. Gastos de la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981 (CNA, 2008a)

Hora	15:00	18:00	21:00	00:00	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00
Gasto (m ³ /s)	50.5	100	132.33	68.8	62.2	56.2	54.49	52.78	51.07

Tabla 26. Resumen del K de Muskingum para la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981 (hr.).

Año	Duración	K1	K2	K3	K4	K5
1981	14sep-15sep	0.8	0.9	1.1	0.7	1.3

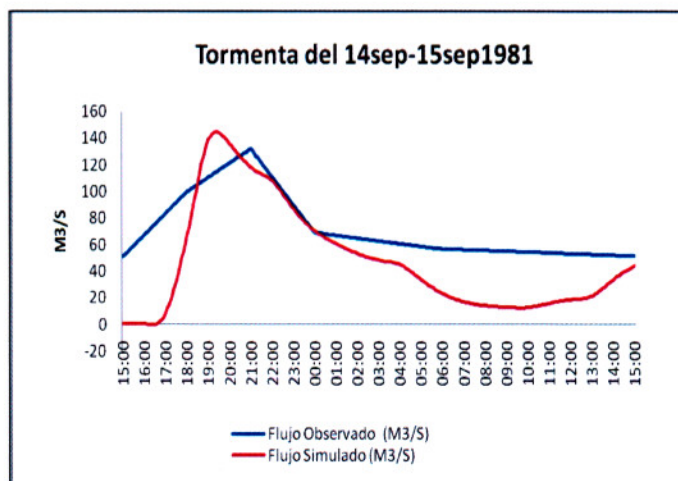


Fig. 54. Comparación del hidrograma calculado por el modelo y el observado en la estación hidrométrica para la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981.

Tabla 27. Resultados de la calibración del modelo para la tormenta ocurrida del 14 al 15 de septiembre de 1981.

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	16.11	17.16	-1.05	-6.12
Peak Flow (M3/S)	144.5	132.3	12.2	9.2
Time of Peak	14sep1981, 19:20	14sep1981, 21:00		

D. Calibración con la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987

Tabla 28. Lluvias de la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987 (mm)

Hora	Argovia	Belisario	Germania	Huixtla	Finca Victoria	Finca San Cristóbal
12:00	12.43	13.45	6.44	10.15	14.65	7.33
15:00	21.17	22.91	10.96	17.27	24.95	12.47
18:00	6.83	7.39	3.54	5.58	8.05	4.03
21:00	3.19	3.45	1.65	2.60	3.76	1.88
00:00	2.52	2.73	1.31	2.06	2.97	1.49
03:00	2.64	0.25	0.34	1.76	0.00	1.08
06:00	3.17	0.30	0.41	2.11	0.00	1.30
09:00	5.81	0.55	0.75	3.87	0.00	2.38
12:00	14.65	1.38	1.89	9.77	0.00	5.99

Tabla 29. Gastos de la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987 (CNA, 2008a)

Hora	12:00	15:00	18:00	21:00	00:00	03:00	06:00	09:00	12:00
Gasto (m ³ /s)	20.444	19.895	19.346	19.346	84.2	78.871	48.461	41.438	34.088

Tabla 30. Resumen del K de Muskingum para la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987 (hr.).

Año	Duración	K1	K2	K3	K4	K5
1981	14sep-15sep	0.8	1.0	1.3	0.6	1.0

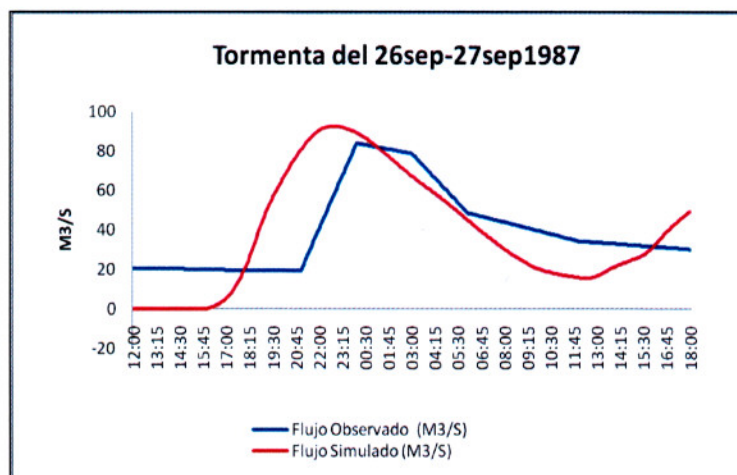


Fig. 55. Comparación del hidrograma calculado por el modelo y el observado en la estación hidrométrica para la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987.

Tabla 31. Resultados de la calibración del modelo para la tormenta ocurrida del 26 al 27 de septiembre de 1987.

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	11.64	11.96	-0.32	-2.65
Peak Flow (M3/S)	92.5	84.2	8.3	9.9
Time of Peak	26sep1987, 22:45	27sep1987, 00:00		

Resumen de las calibraciones del modelo para el K de Muskingum

Una vez realizada la calibración de las cuatro tormentas seleccionadas, se obtuvo un promedio de las K de Muskingum (tabla 32), cuyos valores se consideraron como entrada al modelo generado en el HEC-HMS.

Tabla 32 Resumen del K de Muskingum calibrado para las tormentas analizadas (hr)

AÑO	FECHA	HORAS	K1	K2	K3	K4	K5
1980	13sep-14sep	03:00-15:00	0.6	0.6	1.0	0.8	1.1
1981	03sep-04sep	09:00-09:00	0.8	0.9	1.0	0.7	1.1
1981	14sep-15sep	15:00-15:00	0.8	0.9	1.1	0.7	1.3
1987	26sep-27sep	12:00-12:00	0.8	1.0	1.3	0.6	1.0
	PROMEDIO		0.8	0.9	1.1	0.7	1.1

Con el modelo calibrado se procedió a simular el proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo, considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huixtla.

4.6. Simulación del proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo, considerando escenarios de cambio climático.

Se presenta la metodología utilizada y los resultados de las simulaciones del proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo, considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huixtla.

4.6.1. Información utilizada en el modelo

4.6.1.1. Escenarios de precipitaciones

A partir de la base histórica de precipitaciones diarias, se logró obtener una serie histórica de precipitaciones diarias representativas para el mes de septiembre en cada una de las estaciones con mayor influencia en la cuenca del río Huixtla. Una vez obtenida la información histórica de precipitaciones diarias para el mes de septiembre, se aplicaron las anomalías de precipitación diarias para el escenario A1b del IPCC, calculadas a partir de las anomalías mensuales derivadas del estudio del IMTA, por medio del siguiente procedimiento:

a) La selección de los datos de anomalías de precipitación fue de acuerdo a la ubicación geográfica de cada estación meteorológica (figura 57), correspondiendo a la cuenca del estudio dos valores de anomalías (anomalía 1 y anomalía 2), (figura 56).

b) Las anomalías de precipitación fueron aplicadas a la serie histórica de precipitaciones diarias, con la finalidad de obtener las precipitaciones en el horizonte de planeación 2010-2050 para cada una de las estaciones de estudio.

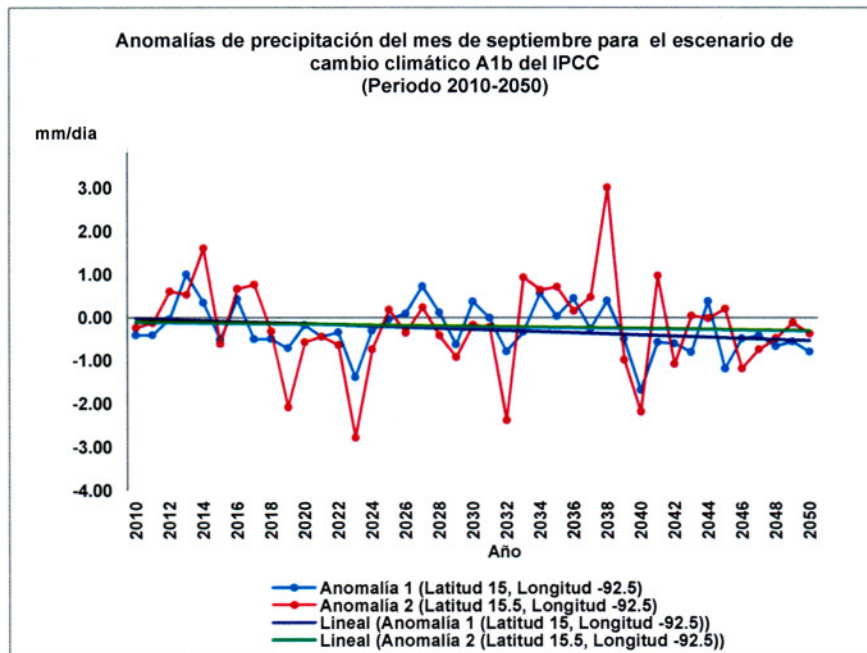


Fig. 56. Anomalías de precipitación del mes de septiembre para el periodo 2010-2050 correspondiente al escenario A1b (mm/día) (Montero, et al, 2008a).

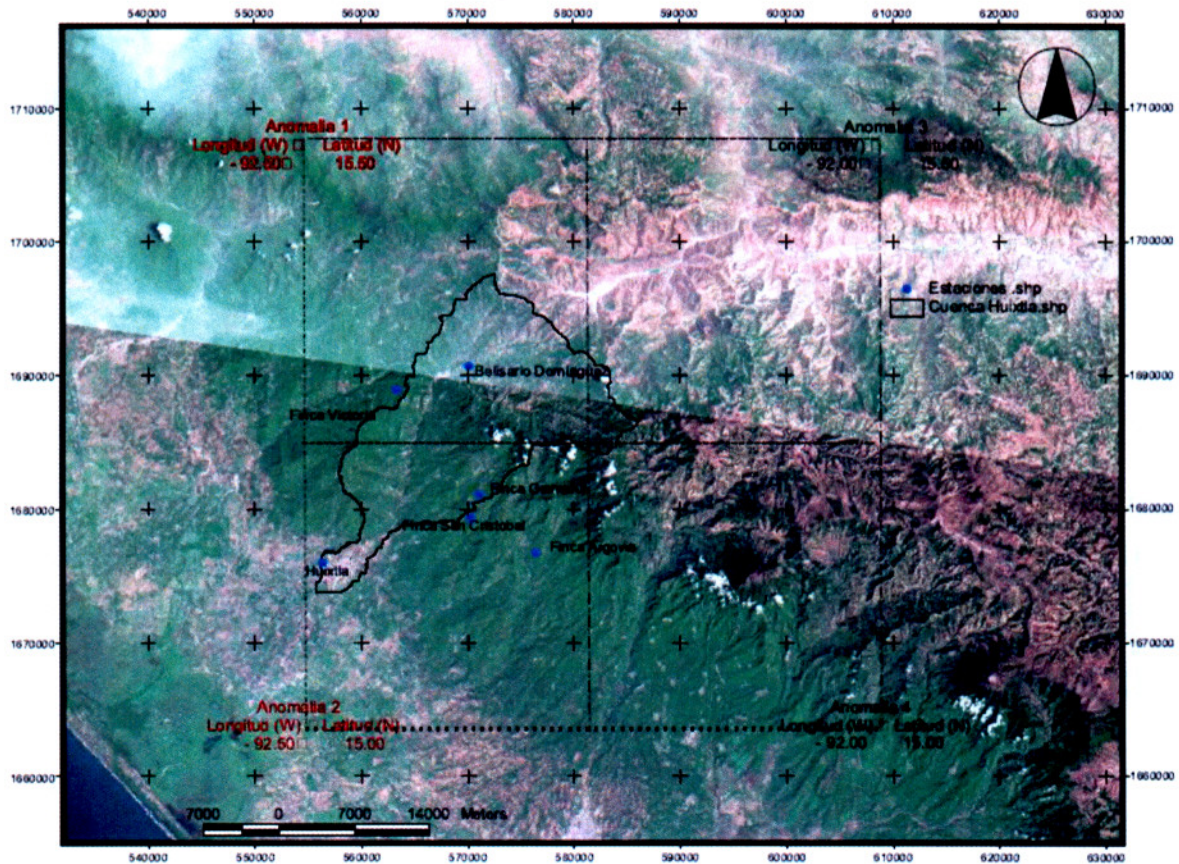


Fig.57. Selección de anomalías de precipitación para la cuenca del río Huixtla derivadas del estudio de regionalización de proyecciones climáticas en México.

En las figuras 58 a la 60 se presenta los datos diarios de precipitación (incluidas las anomalías del escenario A1b) en las estaciones: Argovia, Belisario, Germania, Huixtla, Finca la victoria y Finca san Cristóbal para el escenario 2050.

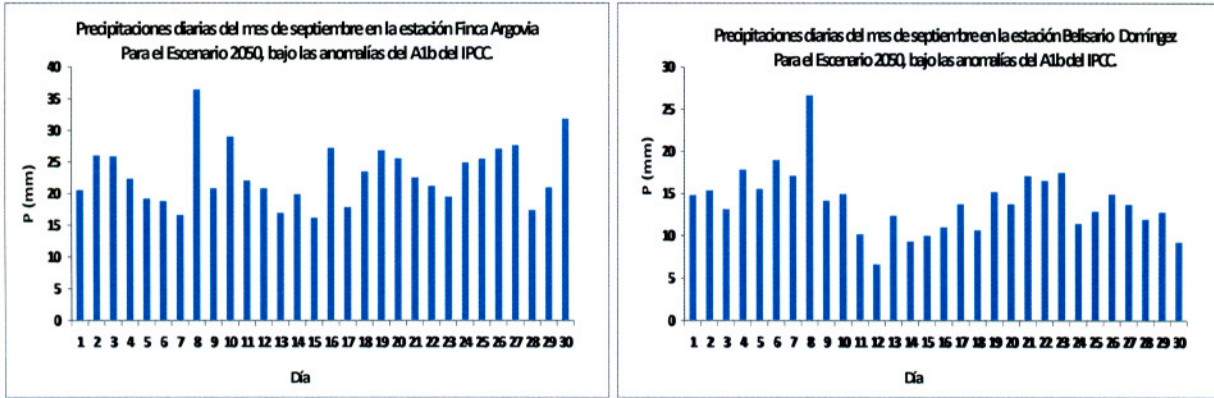


Fig. 58. Precipitaciones diarias del mes de septiembre para el Escenario A1b del año 2050 en las estaciones Finca Argovia y Belisario Domínguez.

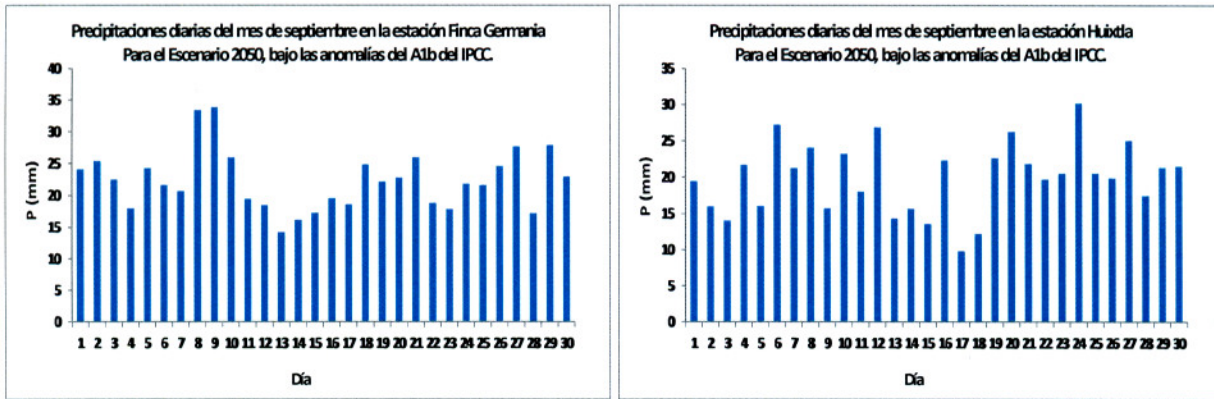


Fig. 59. Precipitaciones diarias del mes de septiembre para el Escenario A1b del año 2050 en las estaciones Finca Germania y Huixtla.

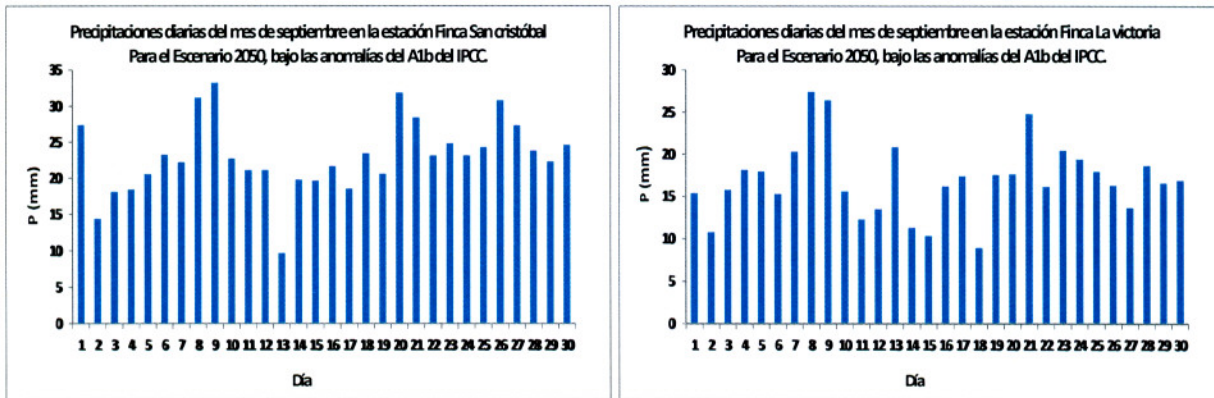


Fig. 60. Precipitaciones diarias del mes de septiembre para el Escenario A1b del año 2050 en las estaciones Finca San Cristóbal y Finca La Victoria.

4.6.1.2. Escenarios de número de curva

Con la finalidad de generar escenarios de NC en las cuencas alta, media, baja y de sus respectivas subcuencas con horizonte de planeación al 2050, se aplicaron modelos de regresión lineal. El análisis de regresión es una técnica estadística para la investigación de la relación entre dos o más variables, puede emplearse para construir un modelo que permita predecir el comportamiento de una variable "y" (dependiente, respuesta) en función de una o más variables (independientes, predictivas) "x" (Urrutia et al, 2010).

El comportamiento del NC en el periodo 2009-2050 fue parecido al que tuvo entre 1970 y 2009 en la cuenca alta y baja, con tasas de crecimiento del 14% y 5%, respectivamente, sin embargo en la cuenca media pasó de un 6% a un 4%. En la cuenca alta, se debe principalmente a que en el 2009 era la más conservada y por lo mismo tenía menores NC, pero debido al intenso cambio de cobertura vegetal y uso de suelo combinado con la ocurrencia de las mayores precipitaciones de la cuenca, sus NC incrementaron a valores críticos. Las cuencas media y baja tuvieron las menores tasas de crecimiento en el periodo, debido a que desde el año base presentaron NC altos por lo que tuvieron menor margen de incremento para llegar a valores críticos de NC. Los NC de la cuenca media incrementaron 1% menos que la cuenca baja, por encontrarse en el año base con un NC mayor en 1% a la cuenca baja.

4.6.2. Simulaciones del modelo para diversos escenarios

Las simulaciones del proceso lluvia escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo con el modelo HEC-HMS, considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huixtla, se hicieron para los siguientes años: 2012, 2020, 2030, 2040 y 2050, considerando como año base el 2005.

No obstante que las simulaciones se realizan a nivel de subcuenca, al agrupar las mismas el modelo permite generar los resultados para la parte alta, media y baja de la cuenca.

Se presentan los hidrogramas resultantes para el mes de septiembre, en la parte alta, media y baja de la cuenca del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

4.6.2.1. Escenario 2012

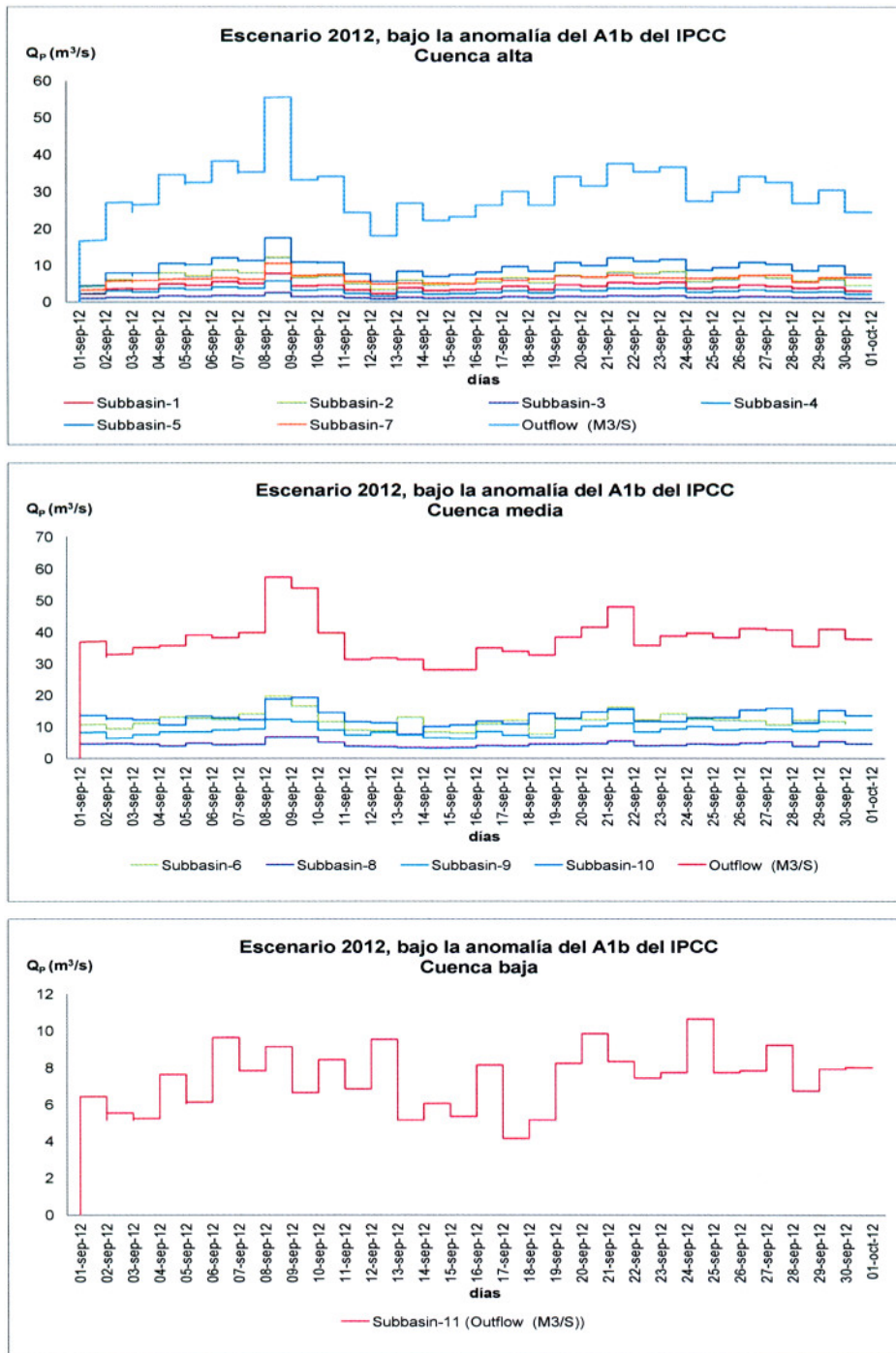


Fig 61. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2012, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

4.6.2.2. Escenario 2020

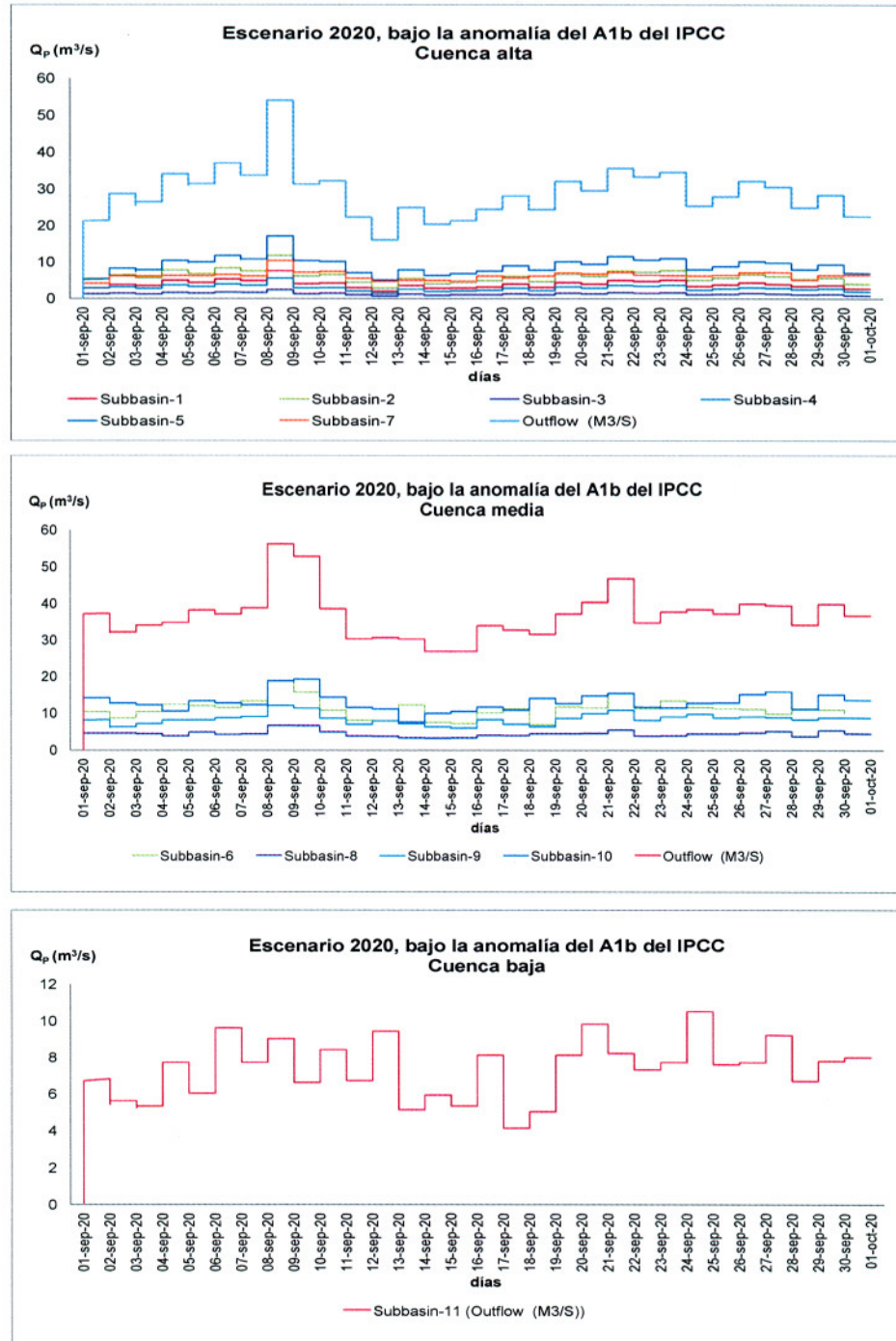


Fig. 62. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2020, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

4.6.2.3. Escenario 2030

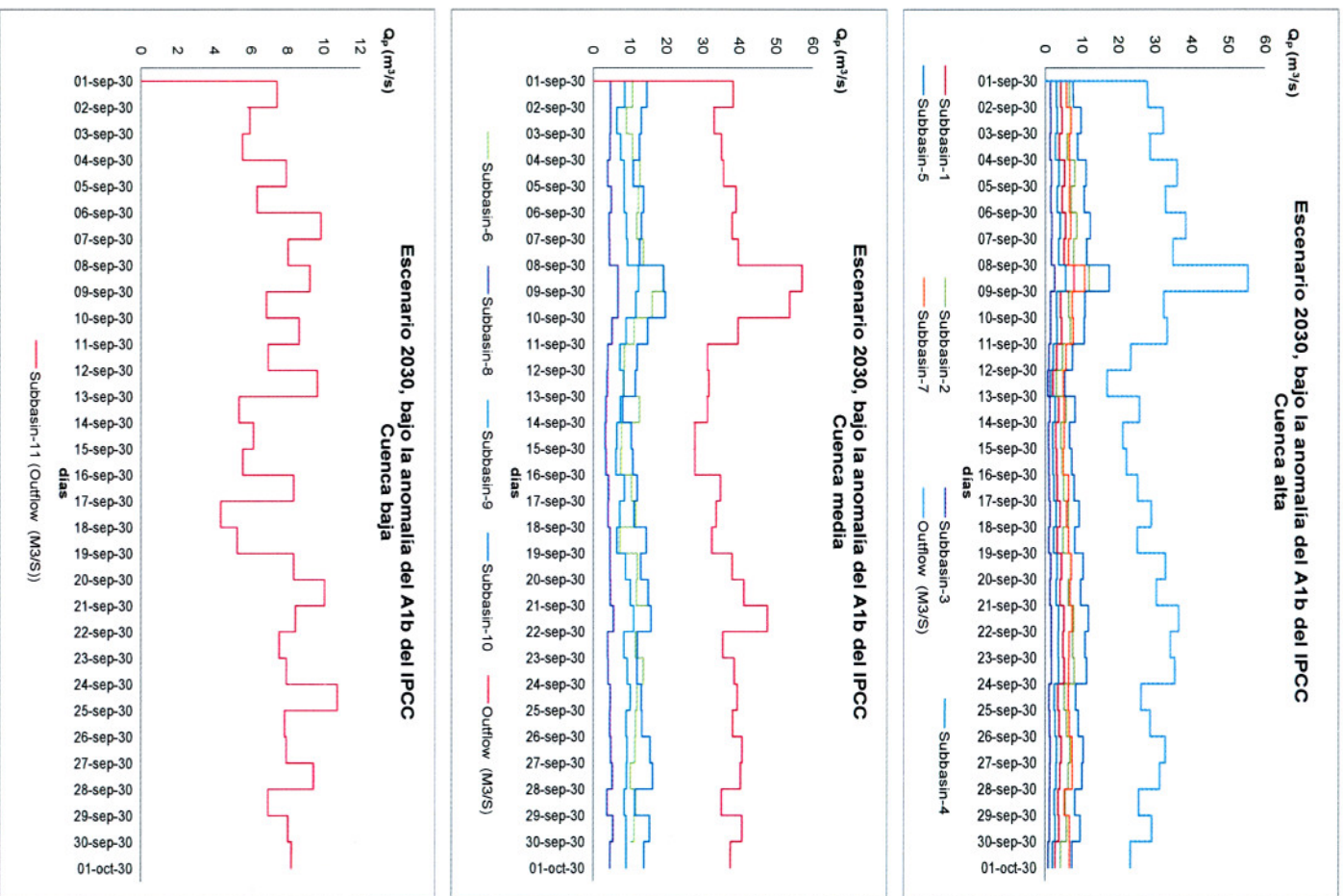


Fig. 63. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2030, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

4.6.2.4. Escenario 2040

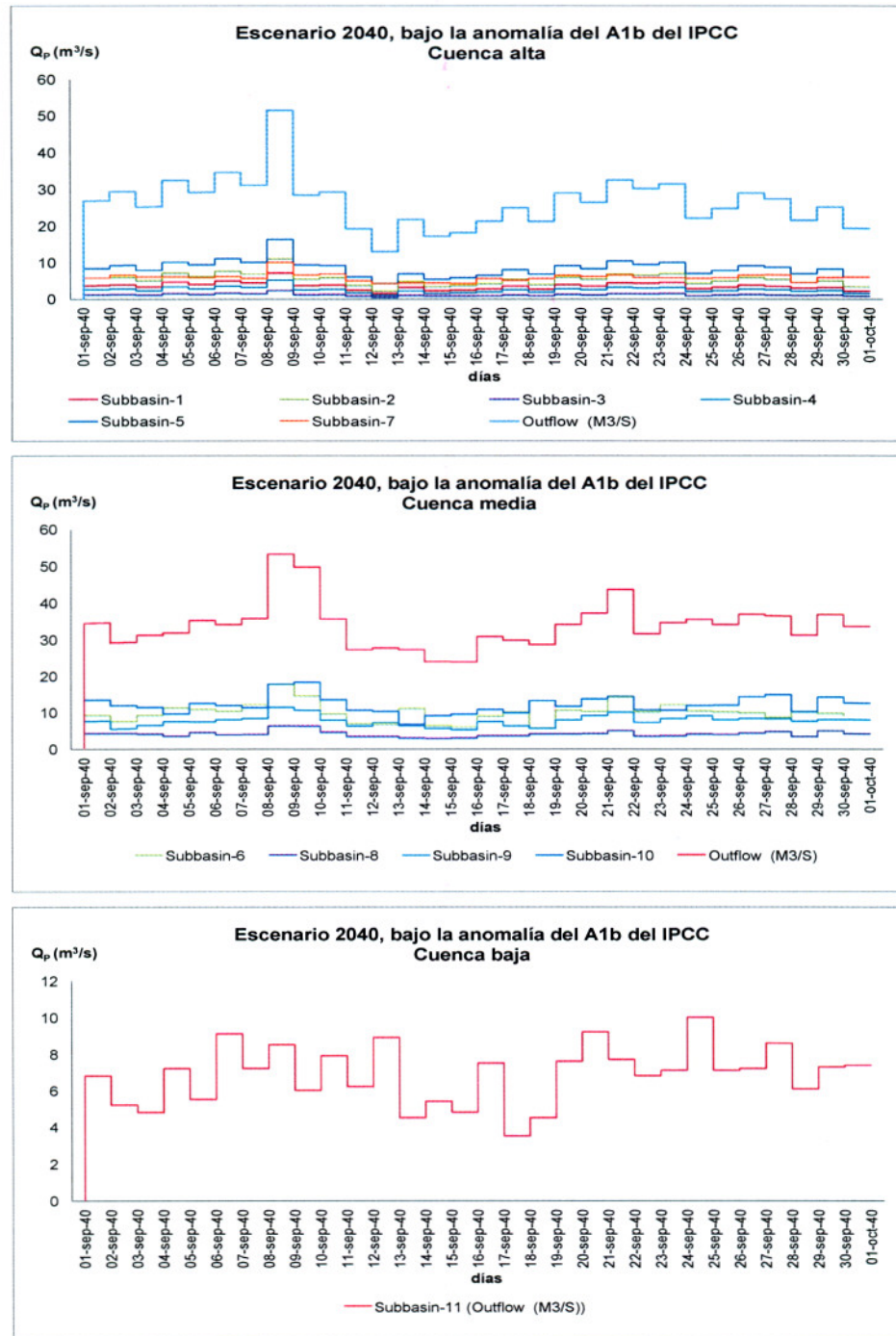


Fig. 64. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2040, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

4.6.2.5. Escenario 2050

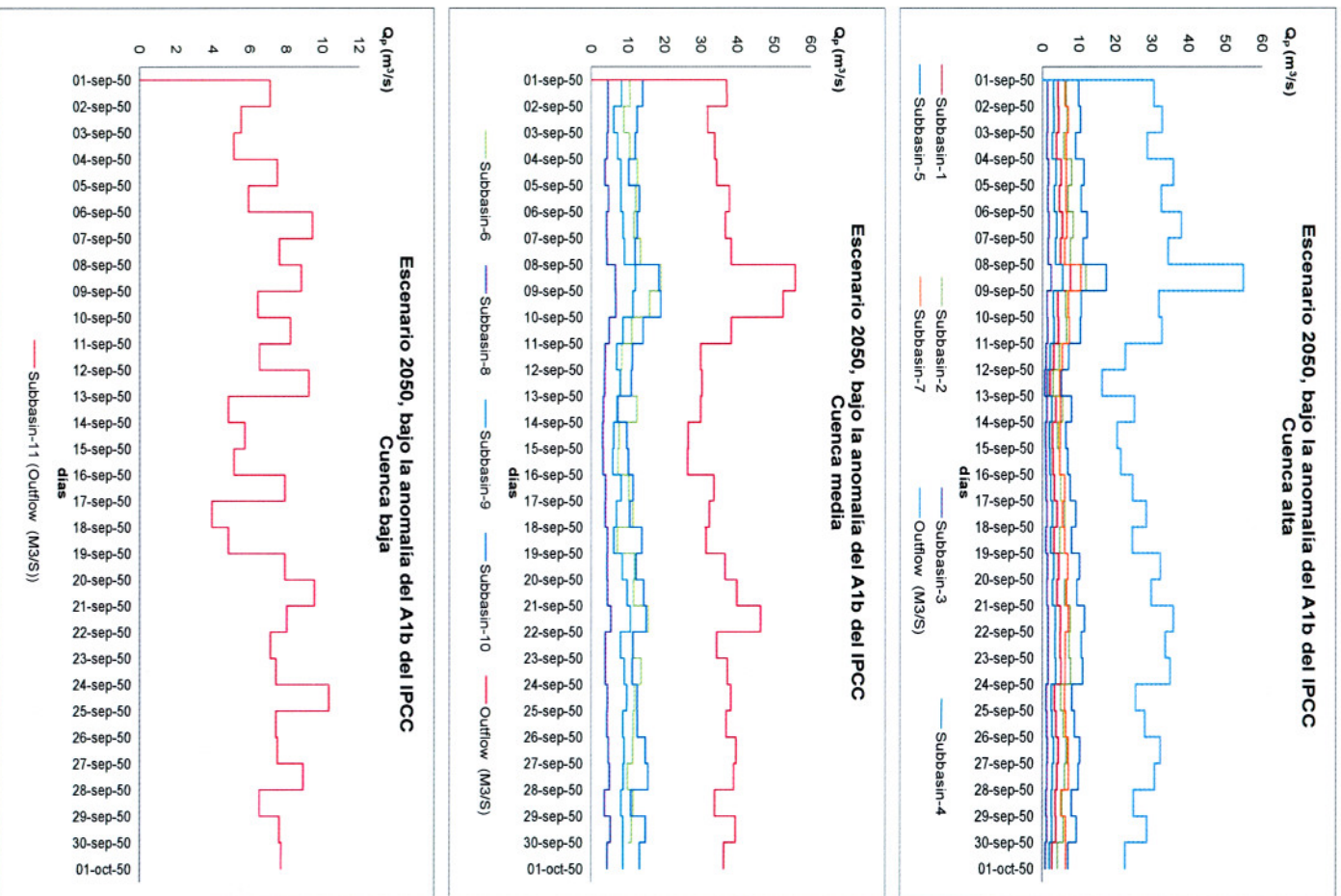


Fig. 65. Hidrogramas resultantes en el mes de septiembre para el escenario 2050, en la cuenca alta, media y baja del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.



4.6.2.6. Resumen de los escenarios

Los resultados de las simulaciones se presentan para el gasto pico y para los volúmenes de escurrimiento a la salida de cada zona de la cuenca Huixtla (tabla 33).

Tabla 33. Simulaciones del proceso lluvia-escurrimiento en la cuenca del río Huixtla bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

	Cuenca alta		Cuenca media		Cuenca baja		Salida de la cuenca	
	Volumen (1000m ³)	Gasto pico (m ³ /s)	Volumen (1000m ³)	Gasto pico (m ³ /s)	Volumen (1000m ³)	Gasto pico (m ³ /s)	Volumen (1000m ³)	Gasto pico (m ³ /s)
Escenario base 2005	72,604.00	53.30	94,332.90	54.90	18,850.00	10.60	185,786.90	118.80
Escenario 2012	77,246.90	55.50	96,536.50	55.50	18,887.30	10.60	192,670.70	121.60
Escenario 2020	73,811.40	54.00	93,887.40	54.60	18,863.10	10.50	186,561.90	119.10
Escenario 2030	77,563.10	55.30	96,335.50	55.50	19,491.50	10.70	193,390.10	121.50
Escenario 2040	68,020.50	51.50	86,517.50	51.60	17,682.30	10.00	172,220.30	113.10
Escenario 2050	76,811.30	54.80	92,938.40	54.20	18,496.80	10.30	188,246.50	119.30

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron las simulaciones en el modelo hidrológico HEC-HMS del proceso lluvia-escorrentía para el mes de septiembre para los escenarios A1B del IPCC de los años 2012, 2020, 2030, 2040 y 2050 en la zona alta, media y baja de la cuenca del río Huixtla, considerando como variables de salida el gasto pico y el volumen acumulado.

No obstante que se cumplió con el objetivo general y los objetivos específicos planteados en la tesis y se obtuvieron resultados interesantes, es importante mencionar que se tuvieron algunas limitaciones en cuanto a la metodología y a la calidad y cantidad de información utilizada para el modelo, entre las que podemos enunciar las siguientes:

A. Las anomalías derivadas del estudio de reducción de escala del estudio "*Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie usando el método REA para México*", tienen limitaciones espaciales, ya que la escala del enmallado solo permitió obtener geográficamente dos datos de anomalías en toda la cuenca.

B. Las estimaciones del número de curva estuvieron limitadas respecto a la información histórica de la precipitación y de cobertura vegetal, por lo que se recurrieron a métodos de rellenos de datos faltantes. Así como por limitaciones del mismo método del número de curva.

C. Inconsistencias de la información oficial e imágenes de satélite utilizada para el análisis de la cobertura vegetal y uso del uso del suelo y la falta de una clasificación supervisada.

D. El cálculo del NDVI estuvo limitado ya que no se contó con imágenes de satélite homogéneas (de un mismo sensor) para toda la serie de años.

5.1. Variación del gasto pico

Se describen las variaciones en porcentaje de los gastos picos de los hidrogramas resultantes del mes de septiembre, para los diversos escenarios simulados respecto al gasto pico histórico promedio del periodo 1970-2005, en la parte alta, media y baja de la cuenca del río Huixtla (Figuras de la 66 a la 68).

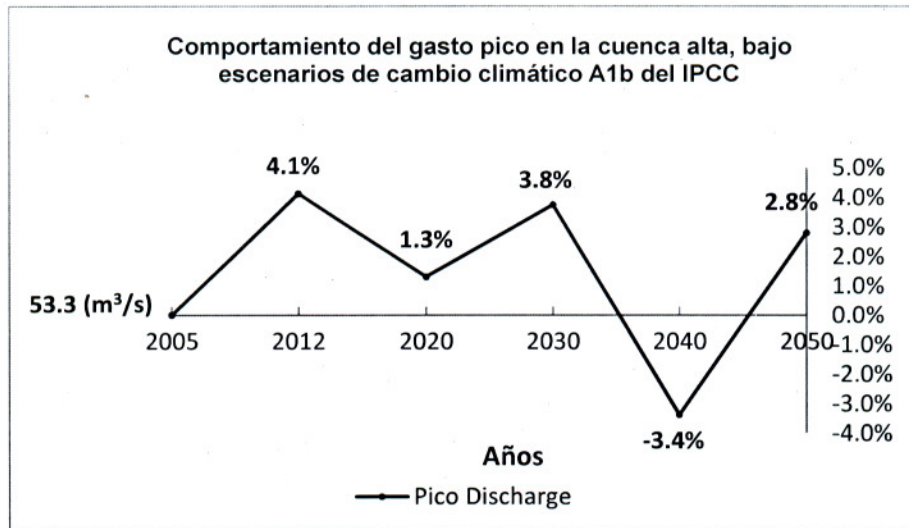


Figura 66. Comportamiento del gasto pico en la cuenca alta para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

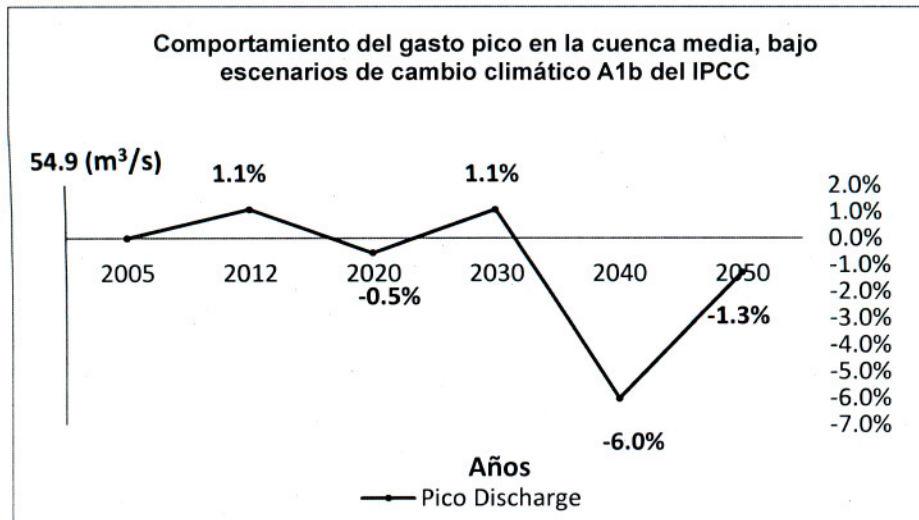


Figura 67. Comportamiento del gasto pico en la cuenca media para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

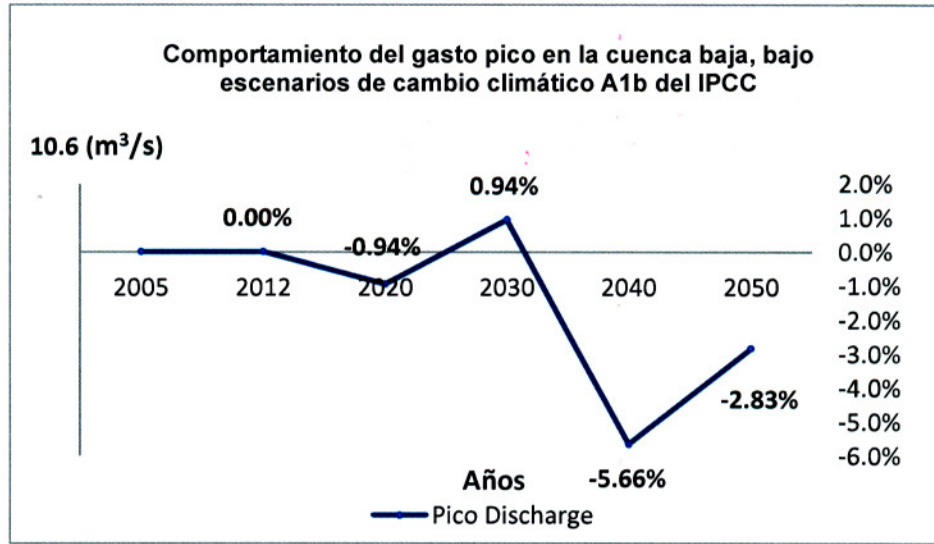


Figura 68. Comportamiento del gasto pico en la cuenca baja para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

5.2. Variación del volumen de escurrimiento

Se describen las variaciones en porcentaje de los volúmenes de los hidrogramas resultantes del mes de septiembre para los diversos escenarios simulados respecto al volumen histórico promedio del periodo 1970-2005, en la parte alta, media y baja de la cuenca del río Huixtla (Figuras de la 69 a la 71).

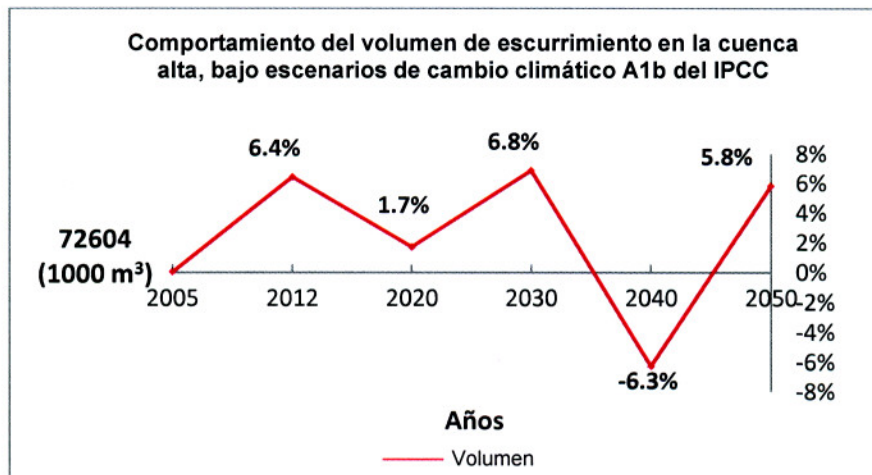


Figura 69. Comportamiento del volumen acumulado en la cuenca alta para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

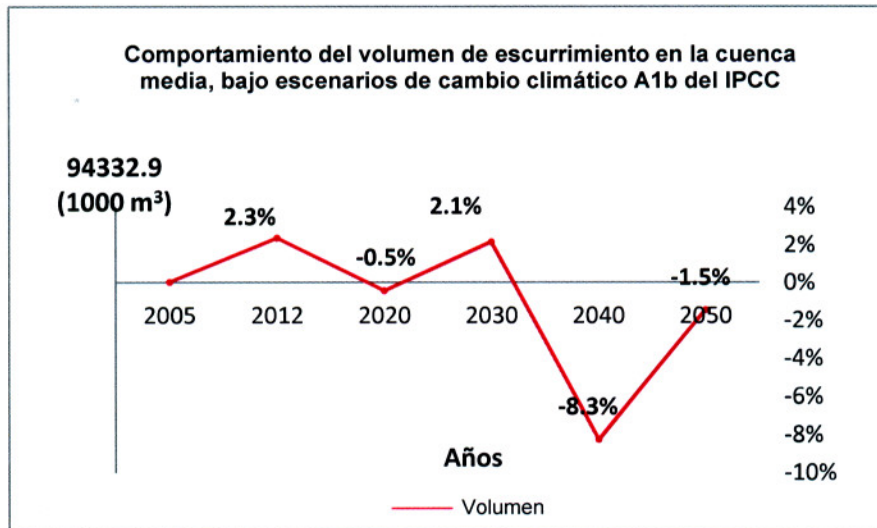


Figura 70. Comportamiento del volumen acumulado en la cuenca media para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

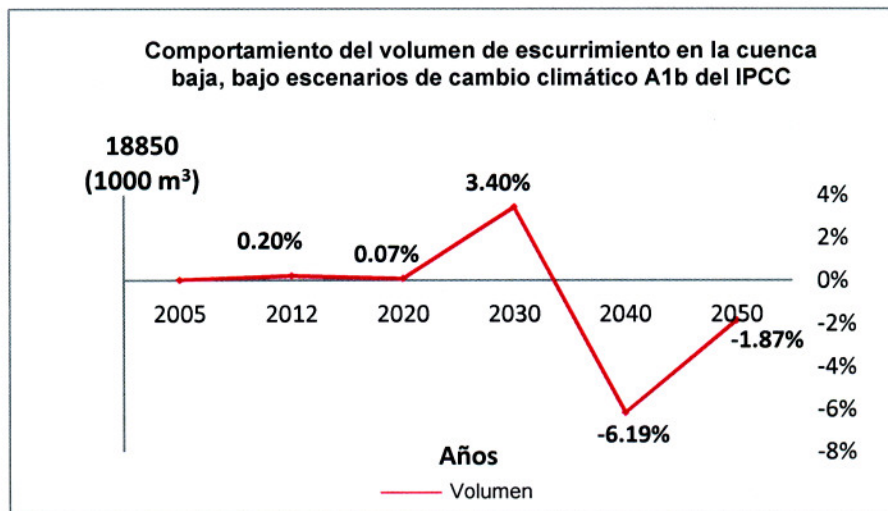


Figura 71. Comportamiento del volumen acumulado en la cuenca baja para los diferentes años simulados bajo el escenario de cambio climático A1b del IPCC.

5.3. Análisis de resultados

a) De acuerdo con el estudio *“Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie usando el método Reliability Ensemble Averaging (REA) para el siglo XXI”*, se espera que las anomalías de precipitación en la cuenca del río Huixtla, para el mes de septiembre en el periodo 2010-2050, varíen de -2.80 a 3.0 mm/día, para el escenario A1b del IPCC.

b) De las tres zonas de la cuenca, la zona alta estará sujeta a mayores impactos de las variables simuladas con el modelo, ya que presenta los mayores rangos de variación, 7.5% en el gasto pico y 13.1% en el volumen.

c) Los resultados de las simulaciones en la cuenca alta, indican que en el periodo 2012 al 2050 habrá una variación promedio en el gasto pico de -3.38 a 4.13% con un rango de 0.4% más que la cuenca media y 0.9% más que la cuenca baja. Con respecto al volumen de escurrimiento, se esperan variaciones desde -6.31% a 6.83%, respecto al año base 2005, con un rango de variación de 2.5% más que la cuenca media y 3.5% más que la cuenca baja. Esta condiciones se deben principalmente a que es la zona con mayor variación en las anomalías, las cuales van desde los -2.09 a los 0.46 mm/día, y en comparación a las otras dos zonas, es la que presenta los NC menores.

d) En la cuenca alta, hasta el año 2012, se presentará un incremento en el gasto pico de 4% por la influencia de la anomalía positiva de 0.46 mm/día, sin embargo decrece al 2020 hasta un 1.3% por la anomalía de -0.5. Al año 2030 el gasto pico vuelve a incrementar hasta 3.8% pero ahora por influencia de los NC con valor crítico de 97 ya que la anomalía se mantiene prácticamente en cero. En el 2040 el gasto pico decrecerá hasta -3.4%, esto debido a la anomalía negativa de - 2.09 mm/día, y al año 2050 nuevamente se incrementará el gasto pico hasta un 2.8% debido principalmente a un efecto combinado del NC que presenta valores críticos y una anomalía de -0.48 mm/día.

e) En la cuenca alta, hasta el año 2012, el incremento del volumen será del orden de 6.4% ya que la anomalía es positiva, 0.46 mm/día. Sin embargo, el volumen decrece al 2020 hasta un 1.7% por efecto de la anomalía de -0.5. Al año 2030 el gasto pico vuelve a incrementar hasta 6.8% pero ahora por influencia de los NC con valor crítico de 97 ya que la anomalía se

mantiene prácticamente en cero. Para el año 2040 se espera una variación hasta -6.3% debido principalmente a la anomalía de - 2.09 mm/día. En el año 2050 el volumen incrementará en un 5.8%, debido principalmente a un efecto combinado del NC que presenta valores de 99 y una anomalía de -0.48 mm/día.

f) Las simulaciones del gasto pico en la cuenca media, indican un menor impacto con respecto a la cuenca alta, con una variación de -6% a 1% con 0.5% de variación mas que la cuenca baja. Esta ligera variación se debe principalmente a que presenta NC con valores críticos y que es una zona con menor precipitación media que la cuenca alta.

g) En la cuenca media, hasta el año 2012, se presentará un incremento en el gasto pico de 1.1%, principalmente por la influencia de la anomalía positiva de 0.27 mm/día, sin embargo decrece al 2020 hasta un -0.5% por la anomalía de -0.38. Para el año 2030 el gasto pico vuelve a incrementar de nuevo hasta 1.1% pero ahora por influencia de los NC crítico de 98.7 ya que la anomalía se mantiene prácticamente en cero. En el 2040 el gasto pico decrecerá hasta un -6%, esto debido al efecto combinado de la anomalía de -1.94 mm/día y del NC de 99. Al año 2050 nuevamente variará el gasto pico hasta un -1.3%, debido principalmente a que la anomalía varía a -0.61 mm/día.

h) En la cuenca media, hasta el año 2012, se presentará un incremento en el volumen de 2.3%, principalmente por la influencia de la anomalía de 0.27 mm/día, sin embargo decrece al 2020 hasta un -0.5% por la anomalía de -0.38. Para el año 2030 el volumen vuelve a incrementar de nuevo hasta 2.1% pero ahora por influencia del NC crítico de 99 ya que la anomalía se mantiene prácticamente en cero. En el 2040 el volumen decrecerá hasta un -8.3%, esto debido al efecto combinado de la anomalía de -1.94 mm/día y del NC de 99. Al año 2050 variará el volumen hasta -1.5%, debido principalmente a que la anomalía varía a -0.61 mm/día.

i) En la cuenca baja, hasta el año 2012, no hay variación del gasto pico, debido a que la anomalía es prácticamente cero. Al año 2020 el gasto pico varía hasta un -1% por la anomalía de -0.19. Para el año 2030 el gasto pico varía hasta 1% pero ahora por influencia de los NC crítico de 98 y por la anomalía de 0.36. En el 2040 el gasto pico decrecerá hasta un -5.7%, esto debido al efecto combinado de la anomalía de -1.7 mm/día y del NC de 99. Al año 2050 nuevamente variará el gasto pico hasta un -2.8%, debido principalmente a que la anomalía varía a -0.81 mm/día.



- j) En la cuenca baja, hasta el año 2012, el volumen varía 0.20%, debido a que el NC incrementa 1% y la anomalía es prácticamente cero. Al año 2020 el volumen varía ligeramente en un 0.07% por la anomalía de -0.19 y el crecimiento del NC en 1%. Para el año 2030 el volumen crece hasta 3.4% pero ahora por influencia del incremento de la anomalía a 0.36 mm/día y al NC de 98. En el 2040 el volumen varía hasta -6.2%, debido al efecto combinado de la anomalía de -1.7 mm/día y del NC de 99. Al año 2050 variará el volumen hasta un -1.9%, debido principalmente a que la anomalía varía a -0.81 mm/día.
- k) De las tres zonas de la cuenca, la zona baja estará sujeta a menores impactos de las variables simuladas con el modelo, ya que presenta los menores rangos de variación en las variables, 6.6% en el gasto pico y 9.6% en el volumen.
- l) De las dos variables simuladas, el volumen es el que producirá mayor impacto en la cuenca.
- m) De los resultados de las simulaciones se deduce que el gasto pico es una variable menos indicativa para eventos largos como el del presente trabajo, al contrario de lo que significa para eventos aislados.
- n) Los resultados de variación del gasto pico y del volumen generan cierta incertidumbre, pues se produce unas medidas dispersas que están distribuidas alrededor de un valor central, cuya dispersión posiblemente estaría causada no solamente por la variabilidad natural de las precipitaciones y NC en los escenarios, sino también por el error del mismo modelo.

6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es un proceso por el cual un modelo es probado para establecer una medida del cambio relativo en sus resultados, causado por un cambio correspondiente en los parámetros del modelo. Es una forma más objetiva de visualizar la variabilidad y la sensibilidad de las bondades y puntos débiles de un proyecto, para el que no es muy difícil estimar los riesgos (Bolívar, 2001). Este tipo de análisis es un complemento necesario para el ejercicio del modelado, especialmente porque provee información sobre el nivel de certeza para asegurar los resultados del modelado. La importancia de la sensibilidad de los parámetros para el desarrollo, evaluación y uso de los modelos hidrológicos ha sido ampliamente reconocida por numerosos modeladores (Estrella, 1988). Los resultados del análisis de sensibilidad para las variaciones de parámetro es particularmente importante en el caso de modelos determinísticos que tienen algunos componentes conceptuales. Debido a los componentes conceptuales, las calibraciones son estrictamente válidas solo dentro de rangos estrechos de las variables, de allí que, los errores en la estimación de los parámetros necesitan ser determinados de manera cualitativa (Ponce, 1989).

En nuestro caso, debido a que no existe un modelo determinístico para cumplir con el objetivo de la tesis, se recurre a modelos que cuando mucho realizan un análisis de sensibilidad de la problemática planteada.

Por otra parte, para obtener una idea de cómo los impactos del cambio climático pueden afectar a distintos procesos debido al grado de incertidumbre, los análisis de sensibilidad son una buena forma de explorar cómo los impactos pueden responder al cambio climático. Estos análisis usan cambios, por ejemplo, la aplicación de un aumento de 1, 2 y luego 3°C en la temperatura, o un aumento/reducción de 5%, 10%, 15% en la precipitación, etc. Pueden construirse como series de datos cuantitativos para utilizarse como insumos para modelos de impacto cuantitativo, por ejemplo modelos de cultivos e hidrológicos (Risbey, 1998; Mehrotra, 1999).

Se presentan los resultados del análisis de sensibilidad realizado a los parámetros de NC y de la precipitación con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ en las tres zonas de la cuenca del río Huixtla.

6.1. Proceso metodológico

El análisis de sensibilidad se realizó con el objetivo de estimar las incertidumbres en las salidas del modelo hidrológico, para contar con elementos de juicio en la estimación y manejo de los parámetros y de esta forma incrementar la confianza en los resultados de la modelación.

En este trabajo, se utilizó los hidrogramas resultantes como variables del análisis de sensibilidad (volumen y gasto pico), ya que sobre ellos es donde mejor se pueden observar las consecuencias de la variación de cada parámetro (Martínez, 1999).

Se definió realizar una variación de los parámetros en $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$, pues son variaciones que se pueden presentar en la realidad. Al respecto, Martínez (1999) menciona que los errores entre 1% y 5% en la determinación del NC suelen deberse a la incorrecta asignación de las condiciones de laboreo o de las condiciones hidrológicas para la infiltración del complejo suelo-cubierta, y que los errores superiores al 10% en la determinación del NC suelen corresponder a incorrecciones en la asignación de los grupos hidrológicos del suelo o en las condiciones de humedad antecedente.

Con el análisis de sensibilidad se realizaron simulaciones en la cuenca del río Huixtla para los años 2009 y 2020 con variaciones en $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ del NC y de la precipitación (Tablas de la 34 a la 37).

Tabla 34. Valores de numero de curva con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ para el año 2009

Corrida	1	2	Base	3	4
Subcuenca	NC (-20%)	NC (-10%)	NC (2009)	NC (+10%)	NC (+20%)
Subbasin-1	83.4	84.4	85.4	86.4	87.4
Subbasin-2	83.0	84.0	85.0	86.0	87.0
Subbasin-3	87.7	88.7	89.7	90.7	99.0
Subbasin-4	83.4	84.4	85.4	99.0	99.0
Subbasin-5	83.0	84.0	85.0	86.0	87.0
Subbasin-6	93.0	94.0	95.0	99.0	99.0
Subbasin-7	85.1	86.1	87.1	88.1	89.1
Subbasin-8	94.2	95.2	96.2	99.0	99.0
Subbasin-9	94.0	95.0	96.0	99.0	99.0
Subbasin-10	94.8	95.8	96.8	99.0	99.0
Subbasin-11	93.4	94.4	95.4	96.4	97.4

Tabla 35. Valores de precipitación con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ para el año 2009.

Corrida Estación	1	2		3	4
	hp_-20%	hp_-10%	hp_2009	hp_+10%	hp_+20%
ARGOVIA	571.4	642.8	714.2	785.6	857.1
BELISARIO	344.1	387.2	430.2	473.2	516.2
GERMANIA	554.1	623.4	692.7	761.9	831.2
HUIXTLA	497.4	559.5	621.7	683.9	746.0
SAN CRISTOBAL	571.9	643.3	714.8	786.3	857.8
VICTORIA	416.3	468.4	520.4	572.4	624.5

Tabla 36. Valores de numero de curva con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ para el año 2020.

Corrida Subcuenca	1	2	Base	3	4
	NC (-20%)	NC (-10%)	NC (2020)	NC (+10%)	NC (+20%)
Subbasin-1	92.5	93.5	94.5	95.5	96.5
Subbasin-2	94.9	95.9	96.9	97.9	98.9
Subbasin-3	95.7	96.7	97.7	98.7	99.0
Subbasin-4	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0
Subbasin-5	89.7	90.7	91.7	92.7	93.7
Subbasin-6	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0
Subbasin-7	90.3	91.3	92.3	93.3	94.3
Subbasin-8	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0
Subbasin-9	96.4	97.4	98.4	99.0	99.0
Subbasin-10	96.4	97.4	98.4	99.0	99.0
Subbasin-11	94.9	95.9	96.9	97.9	98.9

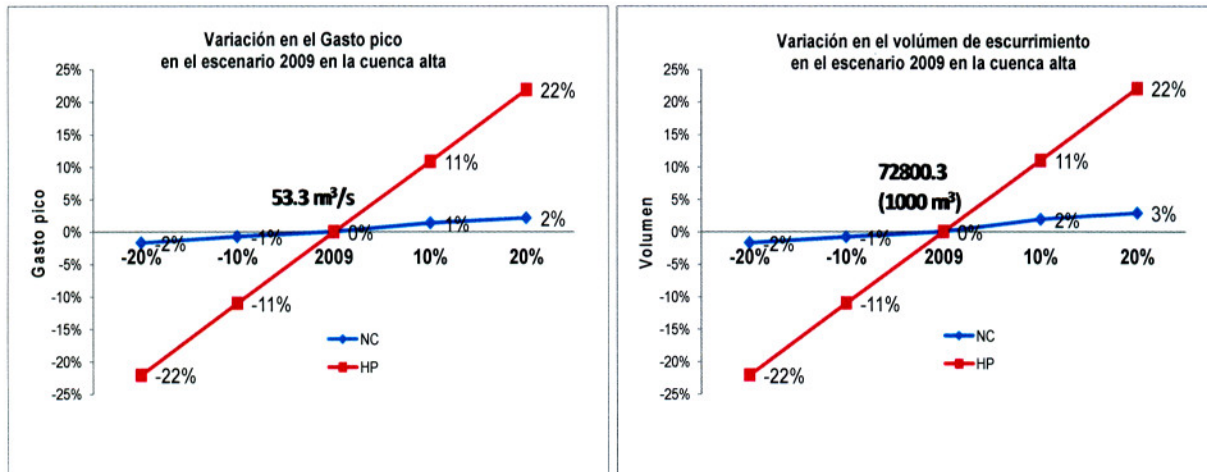
Tabla 37. Valores de precipitación con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ para el año 2020.

Corrida Estación	1	2		3	4
	hp_-20%	hp_-10%	hp_2020	hp_+10%	hp_+20%
ARGOVIA	566.8	637.7	708.5	779.4	850.2
BELISARIO	330.0	371.2	412.5	453.7	495.0
GERMANIA	549.6	618.3	687.0	755.6	824.3
HUIXTLA	492.8	554.4	616.0	677.6	739.2
SAN CRISTOBAL	402.2	452.4	509.1	553.0	603.2
VICTORIA	567.3	638.2	702.7	780.0	850.9

6.2. Análisis de resultados

En las figuras 72 a 74, se presentan los resultados del análisis de sensibilidad del modelo para el gasto pico y el volumen en cada una de las zonas de la cuenca del río Huixtla, con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ para el NC y la precipitación (HP) de los años 2009 y 2020.

Año 2009



Año 2020

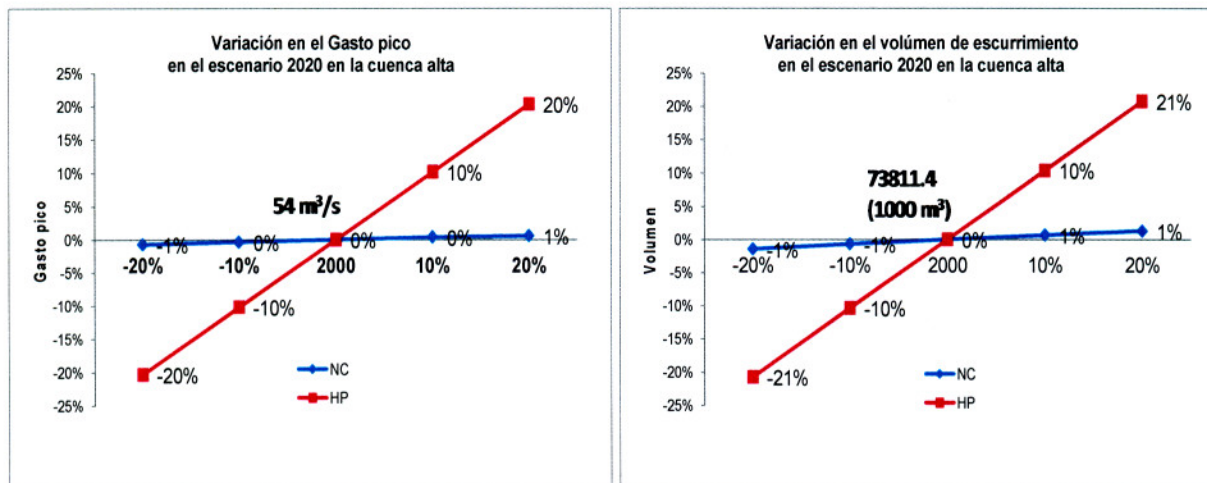
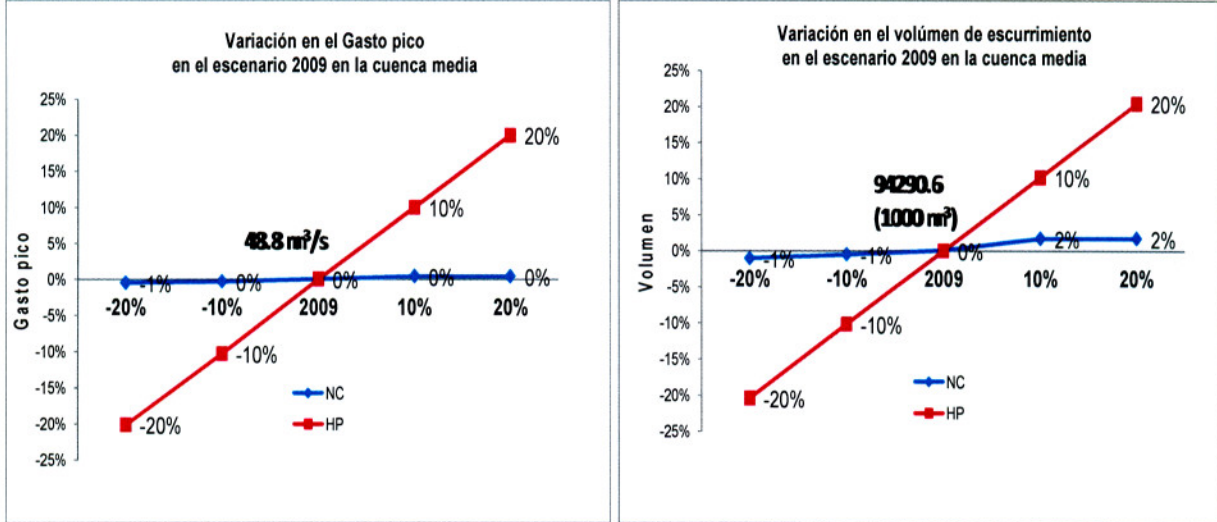


Figura 72. Resultados (en %) del análisis de sensibilidad con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ del NC y de la precipitación (HP) para el gasto pico y el volumen de la cuenca alta de los años 2009 y 2020

Año 2009



Año 2020

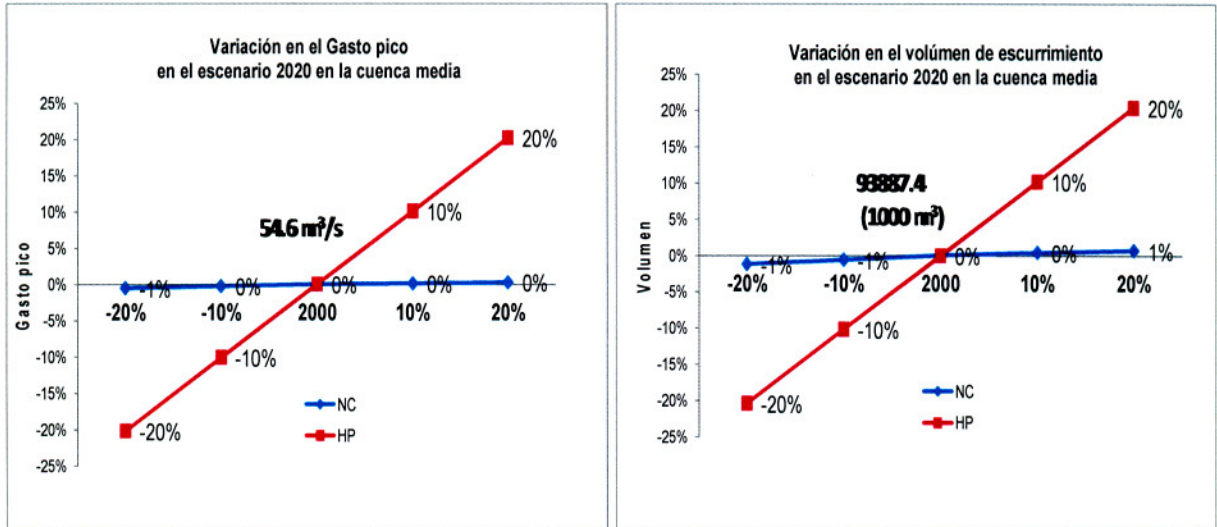
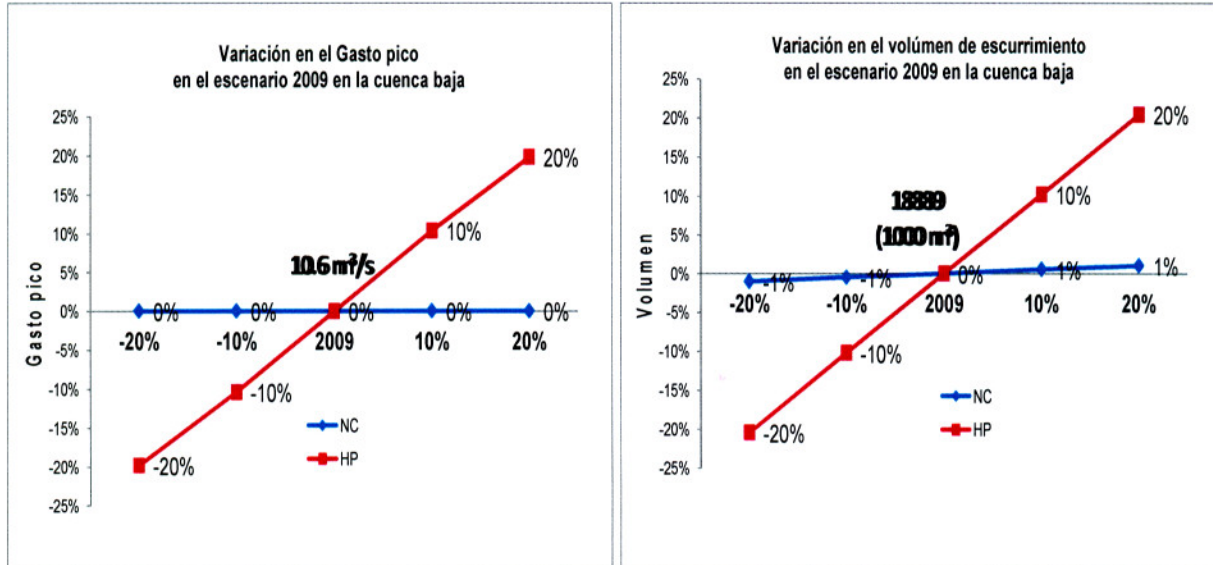


Figura 73. Resultados (en %) del análisis de sensibilidad con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ del NC y de la precipitación (HP) para el gasto pico y el volumen de la cuenca media de los años 2009 y 2020.

Año 2009



Año 2020

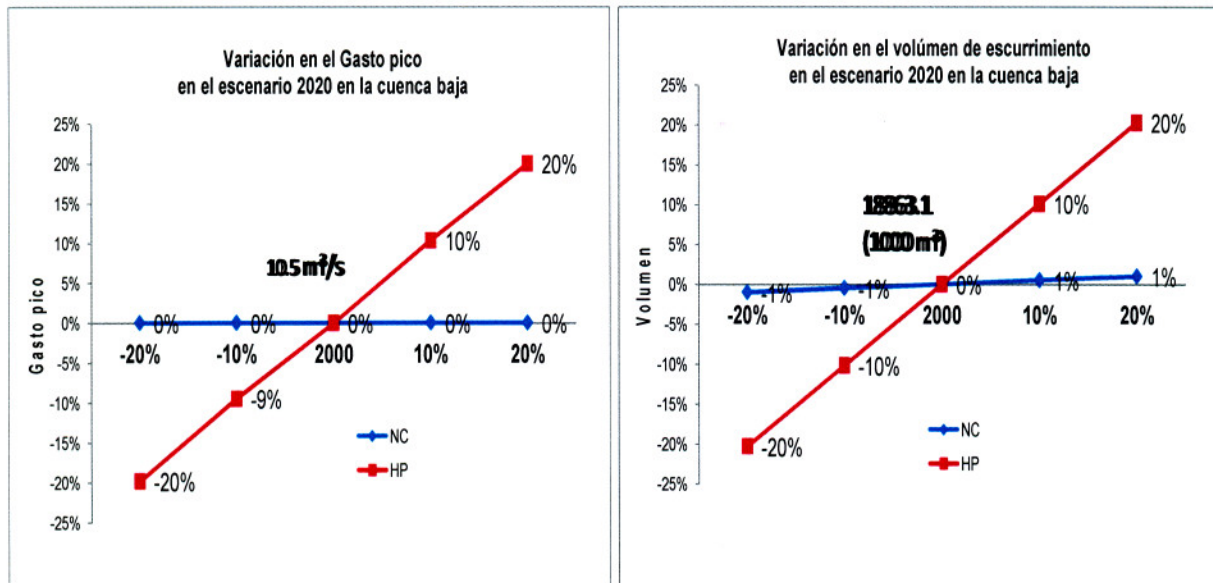


Figura 74. Resultados (en %) del análisis de sensibilidad con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ del NC y de la precipitación (HP) para el gasto pico y el volumen de la cuenca baja de los años 2009 y 2020.

De acuerdo con los resultados del análisis de sensibilidad se emiten las siguientes conclusiones:

1. El gasto pico y el volumen son sensibles ante variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ del NC y de la precipitación. Pero son más sensibles con la precipitación y en un mínimo porcentaje al NC.
2. El gasto pico y el volumen varían proporcionalmente al de la variación indicada en la precipitación para NC mayores de 90, es decir cuando el NC se acerca a valores críticos, como se observa en el análisis de la cuenca media y baja.
3. Cuando los valores de NC son menores de 90, el gasto pico y el volumen comienzan a crecer entre 1% y 2% en proporción a la variación indicada en la precipitación, como se presenta en la cuenca alta para el año 2009.
4. En la mayoría de los casos, el volumen resultó ser más sensible a las variaciones del NC.
5. De acuerdo con el análisis, se observa que en la cuenca de estudio existe asociación entre la precipitación y el NC. Esto corrobora la correlación entre el NDVI y la precipitación que fue demostrada en el desarrollo del trabajo.
6. Se debe poner especial atención en la estimación de la precipitación ya que es la variable que produce las mayores variaciones de gastos picos y volúmenes.
7. En base al análisis, se concluye que la cuenca del río Huixtla es más sensible ante cambios en la precipitación que ante cambios en el NC.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Se cumplió con el objetivo general de la investigación que fue conocer y analizar el comportamiento del proceso lluvia-escurrimiento en la cuenca del río Huixtla ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo considerando escenarios de cambio climático. Las conclusiones derivadas de la tesis doctoral se enuncian a continuación:

1. Se desarrolló una metodología que integra elementos importantes del proceso lluvia-escurrimiento y los relaciona con la generación de escenarios de cambio climático.
2. Se construyó un modelo de simulación del proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso del suelo con escenarios de cambio climático para una cuenca pequeña costera, primera en su tipo en México que incorpora los resultados de anomalías de precipitación producto de la aplicación de técnicas de reducción de escala.
3. Se generó una base de datos de precipitación anual, mensual y diaria para la región costa de Chiapas y para la cuenca en estudio.
4. Se generó una base de datos del NDVI para la cuenca en estudio.
5. Se realizó un análisis de cobertura vegetal y uso del suelo a partir de cartas de INEGI complementado con imágenes de satélite, incluyendo en la metodología el NDVI como un indicador complementario para la determinación del número de curva y su relación con la precipitación normalizada en la cuenca.
6. Los resultados del análisis de cobertura vegetal y uso del suelo permiten concluir que la cuenca alta está sujeta a una considerable disminución del bosque mesófilo de montaña y en menor proporción los pastizales y el bosque de encino, sin embargo, las inconsistencias de las cartas de INEGI generan incertidumbre en el incremento del bosque de coníferas; la cuenca media plantea un escenario caracterizado por un incremento en los pastizales y suelo desnudo y una reducción de la agricultura de temporal; mientras que en la cuenca baja se plantea un



escenario contrario a la cuenca media, con un considerable aumento de la agricultura de temporal y el suelo desnudo, y una reducción de selva y pastizales.

7. Para el año 2009, se concluye que las subcuencas de la cuenca media y baja tienen los mayores valores de NC, en tanto que la cuenca alta sigue siendo la más conservada con menores NC, sin embargo, ha sido la que ha sufrido las mayores afectaciones, principalmente por el cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el periodo 1970-2009 con un incremento promedio de un 14% en el NC, contra un 6% en la cuenca media y un 5% en la baja.

8. Se generaron escenarios de precipitación al año 2050 tomando como base la serie normalizada de precipitaciones diarias del mes de septiembre en cada estación climatológica usada en el modelo, y aplicando las anomalías de precipitación para el escenario A1b derivadas del estudio *“Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México”*.

9. Se construyó un nuevo proyecto en el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS, al cual se le suministraron los datos de la cuenca y subcuencas, precipitaciones, gastos, números de curva, tiempos de retraso, etc., con sus respectivas especificaciones. Dicho proyecto interactuó por medio de tres componentes principales: Modelo de cuenca, Modelo meteorológico y Especificaciones de control. Se calibró el modelo utilizando el optimizador del HEC-HMS para el parámetro K de Muskingum.

10. Una vez calibrado el modelo de cuenca, se modelaron escenarios del proceso lluvia-escorrentía para el mes de septiembre considerando que históricamente ha sido el mes más lluvioso de la cuenca, bajo el escenario A1b del IPCC.

11. Los resultados de la simulación para el escenario A1b indican que la cuenca alta y la cuenca media serán las más afectadas por los impactos de las variables de cambio climático, ya que presentan los mayores rangos de variación en las variables analizadas; la cuenca alta presenta 7.5% en el gasto pico (0.4% más que la cuenca media y 0.9% más que la cuenca baja) y 13.1% en el volumen (2.5% más que la cuenca media y 3.5% más que la cuenca baja). En cuanto a la cuenca media, esta presenta una variación en el gasto pico de -6% a 1% (0.5% más que la cuenca baja) y en el volumen de -8% a 2% (1% más que la cuenca baja).

12. De las dos variables hidrológicas simuladas, el volumen es el que produce el mayor impacto en la cuenca.

13. Del análisis de sensibilidad del modelo, se concluye que el gasto pico y el volumen son sensibles ante variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ de la precipitación y del NC. Para variaciones de los parámetros analizados, se debe poner especial atención en la estimación de la precipitación, ya que el gasto pico y el volumen varían proporcionalmente al de la variación indicada en la precipitación para NC mayores de 90, sin embargo, para valores de NC menores de 90, el gasto pico y el volumen comienzan a crecer entre 1% y 2% en proporción a la variación indicada en la precipitación. Por lo que se concluye que la cuenca del río Huixtla es más sensible ante cambios en la precipitación que ante cambios en el NC.

15. El presente estudio genera la posibilidad de simular eventos largos en el sistema HEC-HMS, sin embargo los resultados se deben tomar con ciertas precauciones.

16. Debido principalmente a la dinámica del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca, las limitaciones de la información y del modelo utilizado y la complejidad de la interrelación entre las diversas variables y parámetros incluidos en el modelo, se reconoce que aún existe incertidumbre para concluir si las variaciones en el gasto pico y el volumen de escurrimiento obedecen a efectos antropogénicos o al cambio climático en la región.

7.2. Recomendaciones

a. Adecuar espacial y temporalmente el estudio "*Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México*", para obtener anomalías diarias de precipitación con una malla más fina.

c. Mejorar el análisis del NDVI con imágenes de satélite homogéneas de mayor resolución y realizar una clasificación supervisada de la cobertura vegetal.

d. Mejorar el modelo hidrológico con la inclusión de métodos de interpolación para analizar precipitación con el método de isoyetas.

e. Simular el modelo de la cuenca para la temporada de estiaje con la finalidad de conocer y evaluar los posibles efectos del proceso lluvia-escorrimento, bajo condiciones de escasez de agua, ante escenarios de cambio climático.

f. Elaborar las estrategias y medidas de adaptación de la cuenca del río Huixtla, alineadas a las políticas públicas internacionales y nacionales relacionadas con el tema. Considerando que la participación social, económica y ambiental es importante para el desarrollo y la implantación del programa de adaptación, se recomienda que dicha participación se de en el Comité de Cuenca del río Huixtla, cuya función principal es coordinar y concertar acciones con los tres órdenes de gobierno, los usuarios de la cuenca, las instituciones académicas y con la sociedad en general, apoyado por los grupos operativos consolidados en los ejidos, y por las principales organizaciones ambientales internacionales que operan en la zona.

En cuanto al desarrollo de nuevas líneas de investigación derivadas de la tesis doctoral, se proponen las siguientes:

1. *Modelación del método del número de curva para eventos largos de lluvia.* Ante la falta de modelos apropiados con suficiente calibración para la modelación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos, se genera la oportunidad de modelar el método del número de curva para eventos largos de lluvia en diversas cuencas pequeñas, principalmente para calibrar el coeficiente de retención inicial, con el mismo enfoque de propuesta totalmente empírica del método contrastada con datos de campo.

2. *Modelación hidrológica distribuida con una componente de priorización de los métodos de infiltración.* Es pertinente debido a que los modelos hidrológicos de parámetros distribuidos no han sido estudiados y aplicados a gran escala en México, con la consecuencia de que se conoce poco del comportamiento hidrológico a escala regional, sobre todo en zonas pobremente instrumentadas. Asimismo, se propone priorizar los métodos para el cálculo de la infiltración, a fin de disminuir las incertidumbres en el cálculo de la precipitación efectiva.

3. *Desarrollo de una metodología de evaluación de la cobertura vegetal y uso del suelo con índices priorizados de vegetación.* La metodología se puede desarrollar bajo los siguientes procesos principales: analizar los diferentes índices de vegetación con imágenes satelitales homogéneas de alta resolución; priorizar los índices de vegetación con base a sus resultados, a

las condiciones climáticas del sitio, sus ecuaciones y a su verificación en campo; realizar una clasificación supervisada de la cobertura vegetal y uso del suelo; definir el valor típico del índice de vegetación priorizado por cobertura vegetal; y evaluar la cobertura vegetal y uso del suelo con índices priorizados por vegetación específica para diferentes escenarios.

4. *Modelación y evaluación de los impactos de cambio climático del proceso lluvia-escurrimiento.* Desarrollar un modelo integral para simular y evaluar los principales impactos de cambio climático relacionados con el proceso lluvia-escurrimiento viables de modelar, tales como inundaciones, disminución en el escurrimiento, disminución en la recarga de acuíferos, disminución en la producción hidroeléctrica, impactos en sistemas de riego y de temporal tecnificado y, falta de infraestructura de agua potable y saneamiento, entre otros.

5. *Desarrollar modelos de evaluación de la vulnerabilidad actual y los riesgos futuros de la cuenca asociados al cambio climático.* Ante los posibles efectos del cambio climático y la necesidad de dimensionar las políticas y medidas de adaptación, se hace necesario desarrollar modelos para evaluar la vulnerabilidad a las condiciones socioeconómicas y climáticas; en función del incremento de la vulnerabilidad, caracterizar y evaluar los riesgos climáticos futuros como inundaciones, erosión, deslizamientos de laderas, sequías, incendios forestales, etc., considerando las tendencias y los factores que influyen en la capacidad de adaptación, es decir, las barreras y oportunidades.

6. *Desarrollar una metodología de evaluación de infraestructura gris versus infraestructura verde.* Se hace necesario ante la imposibilidad de evaluar, con la metodología actual, la rentabilidad de la infraestructura verde en comparación a las obras de infraestructura gris. Además, la infraestructura verde es necesaria como parte de muchas de las acciones de adaptación al cambio climático en la zona, como son la reconversión productiva, reforestación, manejo de agua y conservación de suelos y agua, conservación de la biodiversidad y servicios ecosistémicos, entre otros.

7. Para llegar a mejores resultados y conclusiones, se propone estudiar, analizar y determinar a mayor profundidad, si los cambios que se están dando y se darán en el futuro en la zona de estudio, obedecen a efectos antropogénicos o al cambio climático.



BIBLIOGRAFÍA

- Abbot, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., Rasmussen, J., 1986. An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of physically-based, distributed modeling System. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- Ajami, N., Gupta, H., Wagener, T., Sorooshian, S., 2004. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*. 298. 112-135.
- Anderson, S. 2004. An evaluation of spatial interpolation methods on air temperatures in Phoenix, AZ. <http://www.cobblestoneconcepts.com/ucgis2summer/anderson/anderson.htm>. [Accessed on 19 March 2004].
- Aparicio, F. J., 1996. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Editorial Limusa S. A. de C. V., México, D. F.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. y Williams, J. R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development, *Journal of American Water Resources Association*. 34(1), 73-89.
- Aron, G., Millar, A. C. y Lakatos, D. F., 1977. Infiltration formula based on SCS curve number. *Journal of irrigation and drainage Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 103, N. IR4, 419-427.
- Ayllón, Teresa, 1996. *Elementos de meteorología y climatología*. Editorial Trillas. 1era Edición. México. 197 p.
- Ayuso, J. L. 1990. *Circulación de Flujos. Métodos de cálculo usuales en el diseño de canales y embalse en cuencas pequeñas*. Monografía No. 179. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba, España.

- Baeza, S., Paruelo, J. M. y Altesor, A., 2006. Caracterización funcional de la vegetación del Uruguay mediante el uso de sensores remotos. *Interciencia* 0378-1844.
- Bales, J. y Betson, R. P., 1981. The Curve numbers as hydrologic index. rainfall-runoff Relationship, Water Resources Publications. Littleton, Colorado, Estados Unidos, 371-386.
- Bartier, P. M. y Keller, C. P., 1996. Multivariate Interpolation to Incorporate Thematic Surface Data Using Inverse Distance Weighting (IDW). *Compu. Geosci.*, 22(7): 795-799.
- Baumann, J., 2003. Conservación de suelos y agua. Logros del programa de expertos integrados CIM-CNA 1997-2003. México, D. F.
- Beasley, D. B. y Huggins, L. F., 1980. ANSWERS: a model for watershed planning. *Transaction of the ASAE*, 23 (4): 938-944.
- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Ph.D. Thesis. SMHI Reports RHO No. 7, Norrköping.
- Bergström, S., 1992. The HBV model - its structure and applications. SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping.
- Beven, K. J. y Kirkby, M. J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basing hydrology. *Hydrology Science Bulletin*. 24(1), 43- 69.
- Bhaduri, B., Grove, M., Lowry, C. y Harbor, J., 1997. Assessment of long-term, hydrologic effects of land use change. The curve number technique for calculating runoff is modified to estimate lost groundwater recharge. *Journal of American Water Works Association*, 89 (11), 94-106.
- Bolívar, H., 2001. Elementos para la evaluación de proyectos de inversión. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.



- Borah, D. K., 1989. Runoff simulation model for small watersheds. Transactions of American Society of Agricultural Engineers. Vol. 32, N.3, 881-886.
- Bosznay, M., 1989. Generalization of SCS curve number method. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, Vol. 115, N°1, 139-144.
- Boyle, D. P., Gupta, H. V. y Sorooshian, S., 2000. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods, Water Resources Research, vol. 36, No. 12, 363- 3674 pp.
- Brodeur, B. R., 1992. Water Resource Assesment tool (WRAT). En GRAS Reference Manual.
- Brown, S., de Jong, B., Guerrero, G., Hall, M., Masera, O., Marzoli, W., Ruiz, F. y Shoch, D., 2003. Finalización de Líneas Base para Proyectos de Deforestación Evitada. Modelación de la Deforestación en México y sus Implicaciones para los Proyectos de Captura de Carbono. Reporte elaborado para la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Contrato No. 523- C-00-02-00032-00. Winrock International. Arlington, VA. USA. <http://www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/deforest.html>.
- Burnash, J. C. R., Ferrai, R. L. y McGuire, R. A., 1973. A generalized streamflow simulation system. NWS and California Dept. of Water Res., Sacramento, California, USA.
- Burnash, R., 1995. The NWS river forecast system—catchment modeling. En: V.P. Singh (Editor), Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Littleton, Colorado. 311–366.
- Cabrer, B. e Iranzo, D., 2007. “Detección de Outliers: Un Ejercicio de Monte Carlo”. Departamento de Análisis Económico Edificio Departamental Oriental Universidad de Valencia, España. Enero 2007.
- Carpenter, T. M. y Georgakakos, K. P. 2006. Discretization scale dependencies of the ensemble flow range versus catchment área relationship in distributed hydrologic modelling, J. Hydrol., 328, 242–257.



- Casas, Carmen. y Alarcón, Martha, 1999. Meteorología y Clima. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Cazier, D. J. y Hawkins, R. H., 1984. Regional application of the curve number method. Proceedings of ASCE Irrigation and Drainage Symposium on Watershed Management, ASCE, New York, Estados Unidos.
- CDM (Camp Dresser & McKee Inc.), 2001. Evaluation of integrated surface water and groundwater modeling tools, Report. 35 pp. <http://www.Dhigroup.com/upload/dhissoftwarearchive/papersanddocs/watereesources/MSHE Code Evaluations/CDM ISGW Report.pdf>.
- Chang, C.L., Lo, S.L., Yu, S.L., y Hu, C.Y., 2003. Combining Variable Order Inverse Distance Method and Genetic Algorithm to Precipitation Interpolation in Feitsui Reservoir Watershed. Asian Waterqual 2003 Conference. Thailand.
- Chen, C. L., 1981. An evaluation of the mathematics and physical significance of the Soil Conservation Service curve number procedure for estimating runoff volume. Runoff-Rainfall relationship. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, Estados Unidos, 387-418.
- Chen, C. L., 1982. Infiltration formulas by curve number procedure. Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Vol. 108, N. HY7, 823-831.
- CI, (coordinador) 2011a. Programa de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas. Conservation International México, A. C. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- CI, (coordinador) 2011b. Estrategia del Sector Cafetalero para la adaptación, mitigación y reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático en la Sierra madre de Chiapas. Conservation International México, A. C. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.



- Chong, S. K. y Teng, T. M., 1986. Relationship between the runoff curve numbers and hydrologic soil properties. *Journal of Hydrology*. Vol. 84, 1-7.
- Chow, V., Maidment, D. R. y Mays, L. W., 1994. *Hidrología aplicada*. Mc Graw – Hill. México.
- Chow, V. T. 1964. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, 1964.
- CLICOM, (2006). *Climating Computing Program, Base de Datos Meteorológicos*, Servicio Meteorológico Nacional, México.
- CONAFOR, 2012. Especificaciones técnicas para el monitoreo de la cobertura de la vegetación basado en imágenes de satélite MODIS. Disponible en http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option.=com_content&task=view&id=2&Itemid=3#8.
- CNA, 1987. *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal*. México, D. F.
- CNA, 2001. *Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2025 de la región XI Frontera Sur*. Comisión Nacional del Agua CNA, México, D.F.
- CNA, 2004. *Identificación y delimitación de áreas de riesgo de erosión hídrica en las cuencas de Coatán, Huehuetán, Huixtla y Despoblado*. Comisión Nacional del Agua. México, D. F.
- CNA, 2006a. *Delimitación de las zonas de alto riesgo de inundación con uso de modelos de simulación hidráulicos para la generación de una propuesta de acciones de protección en los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, ubicados en el estado de Chiapas*. Convenio de colaboración específico CONAGUA-Universidad Autónoma de Chapingo. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.
- CNA, 2006b. *Evaluación de los efectos del cambio de cobertura y de uso del suelo en la erosión Hídrica y las relaciones precipitación-Escorrimento en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, del estado de Chiapas*. Comisión Nacional del Agua. México, DF.



- CNA, 2008a. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Sistema de Información de Aguas Superficiales (SIAS v 2). Comisión Nacional del Agua. México, D. F.
- CNA, 2008b. Contaminación del agua y proyecto ejecutivo del drenaje agrícola en el área de influencia de las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán. Comisión Nacional del Agua. México, D. F.
- CNA, 2008c. Regionalización dinámica de escenarios de cambio climático en México, utilizando los modelos de mesoescala (MM5) y Weather Research and Forecasting (WFR). Comisión Nacional del Agua/Servicio Meteorológico Nacional. México, D. F.
- CNA, 2010. Monitoreo de procesos hidrológicos en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán, Coatán, Chiapas. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.
- CNA, 2012. Programa Hídrico Regional Visión 2030 Región Hidrológico-Administrativa XI Frontera Sur. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.
- Coe, M. T., 2000. Modeling Terrestrial Hydrological Systems at the Continental Scale: Testing the Accuracy of an Atmospheric GCM. *J. Climate*, 13, 686–704.
- Crawford, N. H. y Linsley, R. K., 1966. Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report No. 39, Stanford University, Palo Alto California.
- Cunderlik, J.M. y Simonovic, S. P., 2005. Hydrological extremes in a southwestern Ontario river basin under future climate conditions/Extrêmes hydrologiques dans un bassin versant du sud-ouest de l'Ontario sous conditions climatiques futures, *Hydrological Sciences Journal*, 50:4, -654. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.2005.50.4.631>.
- Dal-Ré, R., 2003. Pequeños embalses de uso agrícola. Ediciones Mundi-presas, Madrid España (ISBN 84-8476-144-4).
- Descheemaeker, K., Poesen, J., Borselli, L., Nyssen, J., Raes, D., Haile, M., Muys, B. y Deckers, J. 2008. Runoff curve numbers for steep hillslopes with natural vegetation in semi-arid tropical highlands, northern Ethiopia. *Hydrol. Process*, 22, 4097-4105.



- D.H.I. (Danish Hydraulic Institute), 1985. Introduction to the SHE. European Hydrologyc System.
- Di Luzio, M. y Arnold, J. G., 2004. Formulation of a hybrid calibration approach for a physically based distributed model with NEXRAD data input. *Journal of Hydrology*. 298, 136-154.
- Ewen, J. y Parkin, G., 1996. Validation of catchment models for predicting land use and climate change impacts. *Journal of Hydrology*. 175.
- Estrela, T., 1992. Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos, Centro de Estudios Hidrográficos, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España, 55 Págs.
- Ewen, J., Parkin, G., O'Connell, P. E. 2000. SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering*, July, pp. 250-258.
- Farías, P., Dessi, A., Maselli, F., Crotti, Chiara, 2005. Integración de series de datos satelitales y climáticos para la definición de áreas climáticamente homogéneas en el centro-nordeste de Argentina.
- Fernández, A., Martínez de Azagra, J. y Osnaya, P., 2003. Avances de México en materia de cambio climático 2001-2002. México, D.F.
- Fernández, C. P., 2002. Estudio del Impacto del Cambio Climático Sobre los Recursos Hídricos. Aplicación en diecinueve cuencas en España. Tesis Doctoral. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ferrer, J., 1994. Uso de un SIG en la modelación de precipitaciones máximas: el modelo GISPLU. Curso sobre la utilización de los sistemas de información geográfica en la hidrología. Centro de estudios Hidrográficos del CEDEX, MOPTMA.
- Gallati, M., y Maione, U., 1977. Perspective on mathematical models of flood routing, Proc. of the workshop held at the IBM Scientific Centre, Pisa, Italy, John Wiley & Sons, London, pp. 169-179.



- García, M., 2004. Respuesta de la vegetación a variaciones climáticas en praderas y sistemas adehesados mediterráneos. Metodología de análisis utilizando datos hiperespectrales y multiespectrales. Ecosistemas, mayo-agosto, año/vol. XIII, número 002, Asociación Española de Ecología Terrestre, Alicante, España.
- Garrote, L. y Bras, R. L., 1995. An integrated software environment for real-time use of a distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 167, 307-326.
- Garrote L., Rodríguez I. C. y Estrada F., 1999. Una evaluación de la capacidad de regulación de las cuencas de la España peninsular. VI Jornadas Españolas de Presas. Vol.2, Málaga. pp. 645-656.
- Gay, C., (Compilador) 2000. México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p. ISBN 968-36-7562-X.
- Gay, C. y Conde, C., 2008. Sesión Especial: Simposio sobre cambio climático. *Geos*, Vol. 28, No. 2 Octubre, 2008.
- Gill, M. A., 1978. Flood routing by the Muskingum method. *Journal of Hydrology*, 36, (3-4): 353-363.
- Gómez, V. M., 2007. Curso: Pérdidas de precipitación y transformación lluvia-caudal en SWMM 5.0. Grup de Recerca FLUMEN, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. UPC. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Jordi Girona 1-3. D-1. 08034 Barcelona.
- Gómez, V. y Maravall, A., 2001. "Seasonal Adjustment and Signal Extraction in Economic Time Series"; Papel de Trabajo 9809, Departamento de Investigación, Banco de España. Para aparecer en Cap. 8 en Peña D., Tiao G. C. y Tsay, R. S. (eds) *A Course in Advanced Time Series Analysis*, New York: J. Wiley and Sons.



- Griffith, J. A., Martinko E. A., Whistler J. L. y Price K. P., 2002, Interrelationships among landscapes, NDVI, and stream water quality in the U.S. Central Plains, *Ecological Applications*, t. 12, nr 6, 1702-1718.
- Haan, C. T. y Wilson, B. N., 1987. Another look at the joint probability of rainfall and runoff. *Hydrologic Frequency Modelling*, D. Reidel Publishing Company, 555-569.
- Harbor, J., 1994. A practical method for estimating the impact of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology. *Journal of the American Planning Association*. 60 (1), pp. 95-108.
- Hawkins, R. H., 1975. The importance of accurate curve numbers in the estimation of storm runoff. *Water Resources Bulletin*. Vol. 11, N. 5, 887-891.
- Hawkins, R. H., 1976. Runoff Curve Numbers for Northern Arizona Watersheds. PRC N. 171-4-75. Utah State University, Logan, Utah, Estados Unidos.
- Hawkins, R. H., 1979. Runoff curve numbers from partial area watersheds. *Journal of Irrigation and Drainage Division*. ASCE, Vol. 105, 375-389.
- Hawkins, R. H., 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal Of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, Vol. 119, N°4, 334-345.
- Hawkins, R. H., Hjeimfeit, A.T. y Zevenberger, A.W., 1985. Runoff probability, storm depth, and curve numbers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, Vol. 111, N.4, 330-340.
- Helweg, O., 1992. Recursos hidráulicos: planeación y administración. Editorial Limusa. México.
- Henderson, S. A., Dickinson, R. E., Durbidge, T. B., Kennedy, P. J., McGuffie, K. y Pitman, A. J., 1993. Tropical deforestation: modelling local-to regional-scale climate change, *Journal of Geophysical Research*. 98 (D4), 7289-7351.



- Hernández, R. H. y Návar, C. J. J., 2010. Tendencias de los caudales en ríos de Michoacán, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 1: 139-145.
- Hjelmfelt, A.T., 1980. Curve-number procedure as infiltration method. *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol.106, N. Hye, 1107-1111.
- Hjelmfelt, A.T., 1991. Investigation of curve number procedure. *Journal of Hydrologic Engineering. ASCE*. Vol. 117, N.6, 725-737.
- Hjelmfelt, A. T., Kraner, K. A. y Burwell, L. E. 1982. Curve numbers as random variables. *Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modelling, Water Resources Publications. Littleton, Colorado, Estados Unidos*, 365-373.
- Hooper, D. U. y Vitousek, P. M., 1997. The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes. *Science* 277:1302-1305.
- Hope, A. S. y Schulze, R. E., 1981. Improved estimates of stormflow volume using the SCS curve number methods. *Rainfall-Runoff Relationship. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, Estados Unidos*, 419-428.
- Hori, M., 1998. Variabilidad de las Respuestas Espectrales de Acuerdo a los Cambios Fenológicos de la Vegetación del Anticlinorio de Arteaga, Coahuila y Nuevo León, México. Tesis de maestría, ITES campus Monterrey, Nuevo León, Mex. 138 pp.
- Huang, M., Gallichand, J., Wang, Z. y Goulet, M. 2006. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrol. Process.*, 20, 579-589.
- Hundecha, Y. y Bárdossy, A., 2004. Modeling of effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of Watershed model, *Journal of Hydrology*, 292, pp. 281-295.



- Hyams, D., 2005, Curve Expert Version 1.37. A comprehensive curve fitting package for Windows. Copyright.
- IMTA, 2006. Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III). Versión 1.1. Datos actualizados al año 2006.
- INE, 2006. Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1980. Carta de Climas del estado de Chiapas, escala 1: 1' 000, 000. Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2000. Cartas edafológicas del estado de Chiapas. Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática. México., D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2003. Modelo Digital de Elevación esc. 1:50,000. Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación (continuo nacional), serie III, 1:250,000 Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Gobierno del Estado de Chiapas. México., D. F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2010a. Anuario Estadístico de Chiapas 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Gobierno del Estado de Chiapas. México., D. F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2010b. Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática. México, D.F.
- INM, 2007. Primera fase del proyecto de generación de escenarios regionalizados de cambio climático. Instituto Nacional de Meteorología. España.

- IPCC, 1995. Informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Cambio climático 1995: IPCC – Segundo informe de evaluación.
- IPCC, 2001. Cambio climático 2001. Informe de síntesis. Resúmenes de los grupos de trabajo. Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- IPCC, 2007a. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Landa, Rosalva, Magaña, V., Neri, Carolina, 2008. Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- Leung, L. R., Mearns, L. O., Giorgi, F., y Wilby, R.L., 2003. Regional Climate Reseach: Needs and Opportunities. Bulletin of the American Meteorological Society, pp. 84, 89-95.
- Levi, Enzo. 1996. Tratado elemental de Hidráulica. IMTA. Segunda edición. Jiutepec, Morelos. 303 pp.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A. y Paulhus, J. L.H., 1977. Hidrología para Ingenieros. Segunda edición en español. McGraw-Hill. México, D.F.
- Magaña, V. O. y Caetano, E., 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. Diciembre de 2007.
- Magaña, V. O., 2010. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. Enero de 2010.



- Mc Carthy, G. T., 1938. "The Unit Hydrograph and Flood Routing", manuscrito no publicado, presentado en una conferencia de la División Noratlántica. U. S. Army Corps of Engineers, 24 de junio de 1938.
- Madramootoo, C. A. y Enright, P., 1988. Applicability of the Soil Conservation Service equations for runoff prediction in the Ottawa-St. Lawrence lowlands. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 15, N.5, 759- 765.
- Maidment, D. R., 1993. GIS and Hydrologic Modeling. Environmental Modeling with GIS. Oxford University, Press New York. 146-166.
- Martínez, J. y Fernández, A., 2004. Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Noviembre de 2004.
- Martínez de Azagra, A., 1996. Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Martínez, P., 2007. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, D.F.
- Martínez, P. y Aguilar, A., 2008. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. Volumen II. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, D.F.
- Martínez, P. y Patiño, C., 2010. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. México, D.F.
- Martínez, P. y Patiño, C., 2012. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. III. Núm. 1, enero-marzo 2012, pp. 5-20. México, D.F.
- Martínez, V., 1999. Simulación y comprobación experimental de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas no aforadas mediante modelos distribuidos implementados sobre SIG. Tesis Doctoral, Dpto. de Construcción y Vías Rurales, Universidad Politécnica de Madrid.



- McCuen, R. H., 1989. Hydrologic Analysis and Design. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. New Jersey, Estados Unidos.
- Mehrotra, R., 1999. Sensitivity of Runoff, Soil Moisture and Reservoir Design to Climate Change in Central Indian River Basins. *Climatic Change*, 42, 725–757.
- Méndez, B., 2005. Aplicación hidrológica de los radares meteorológicos. Tesis de doctorado inédita, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Miranda A. L., Ibáñez C. L. A., Valdez L. J. R. y Hernández de la Rosa P., 2009. Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. *Agrociencia* 43: 333-344. 2009.
- Mishra, S. K. y Singh, V. P., 2003. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, ISBN 1-4020-1132-6.
- Modallalsoust S., 2010. Evaluating optimized digital elevation precipitation model using IDW method (Case study: Jam & Riz Watershed of Assaloyeh, Iran). *DESERT Online* at <http://jdesert.ut.ac.ir>, *DESERT* 15 (2010) 5-14.
- Montero, M. y Pérez J. L., 2008. Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México, en Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, Volumen II. Eds. P.F. Martínez Austria y A. Aguilar Chávez, 118 pp., IMTA, México, pp. 11-21, 2008.
- Moran, A., 2009. Inundabilidad de cauces de alta pendiente teniendo en cuenta el transporte de sedimentos. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Morin, G. y Paquet, P., 1995. Le Modèle de Simulation de Quantité et de Qualité CEQUEAU, Guide de l'utilisateur. Vers. 2.0 pour Windows. INRS EAU, rapport de recherche No. 435, 54 pp.



- Mockus, V., 1957. Use of Storm and Watershed Characteristics in Synthetic Hydrograph Analysis and Application. US Soil Conservation Service [Citado por Linsley et al 1977.].
- Mundo, M., y Martínez, P., 1993. Cambio climático: posibles consecuencias y algunas sugerencias para disminuir su efecto en México. (Vol. VIII) Ingeniería Hidráulica en México. 1, 14-28.
- Mundo, M., y Martínez, P., 1994. El cambio climático y sus efectos potenciales en los recursos hídricos y la agricultura del valle del Yaqui, Sonora. (Vol. IX) Ingeniería Hidráulica en México. 1, 13-33.
- Naijar, R. G., 1999. The water balance of the Susquehanna Riber Basin and its response to climate change. Journal of Hidrology. 219, 7-19.
- Neilson, R. P., 1995. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. Ecological Application. 5(2), 362-385.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS), 1997. National Engineering Handbook, part 630, Hydrology, U.S. Dep. of Agric., Washington, D. C.
- Ogrosky, H. O. y Mockus V., 1964. Hidrology of agricultural lands. Handbook of applied hydrology. Ven Te Chow (ed.). McGrawHill. NY, USA.
- Olaya, F. V. 2004. Hidrología Computacional y Modelos Digitales de Terreno: Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico. (<http://heart.sf.net/textos>).
- Olivarez, A., 2004. Modelización hidrológica pseudo-distribuida del Barranc del Carraixet: aplicación al episodio de octubre de 2000. Cuad. de Geogr. 76, pp 155 – 182. València, España, 2004.
- Orozco, I., 2005. Modelación hidrológica distribuida en la cuenca del río Candelaria. Tesis de maestría inédita, Universidad Nacional Autónoma de México.



- Oñate V. F. R., 2009. Modelamiento semidistribuido, con información escasa, de una cuenca hidrográfica para su planificación territorial. Tesis Doctoral inédita. Universidad de Alcalá, Madrid España. Departamento de Geografía.
- Pisani, V. B., 2008. Acoplamiento de modelos hidrológicos semidistribuidos y sistemas de información geográfica. Tesis doctoral inédita. Universidad de la Coruña, España. Departamento de Tecnología de la Construcción.
- PNUD, 1998. Estudio para el tratamiento integral del río Piura, Perú. Proyecto PNUD – Gobierno PER 98/018. CTAR Piura.
- PNUD, 2008. Regional synthesis Capacity building for stage II adaptation to climate change in Central America Mexico an Cuba.
- Pomeroy, S. T., 1987. Runoff predictions at ungagged sites from rainfall statistics using a geographic Information system. PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, Calgary University, Alberta, Canada.
- Ponce, V. M., 1989. Chapter No. 13 in the book "Engineering Hydrology. Editorial Prentice Hall.
- Ponce, V.M., 1996. Runoff Curve Number: has It reached Maturity?. Journal of Hydrologic Engineering. ASCE, Vol.1, N°1, 11-19.
- Pullar, D., 2001. MapScript: A Map Algebra Programming Language Incorporating Neighborhood Analysis. Geoinformatica, Volume 5, 145-163 pp.
- Rallison, R. E., 1980. Origin and evolution of the SCS runoff equation. Proceedings of the ASCE Irrigation and Drainage Division Symposium on Watershed Management. ASCE, New York, Estados Unidos, Vol. 2, 912-924.
- Rallison, R. E. y Miller, N., 1981. Past, present, and future SCS runoff procedure. Rainfall-Runoff Relationship. Water Resources Publications, Littieton, Colorado, Estados Unidos, 353-364.



- Ramasastri, K. S. y Seth, S.M., 1985. Rainfall-runoff relationships. National Institute of Hydrology, Roorkee, Uttar Pradesh, India.
- Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F. y Seo, D., 2004. Overall distributed intercomparison project results. *Journal of hydrology* (298) pp. 27-60.
- Refsgaard, J.C. and Storm, B., 1995. MIKE SHE, in *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh, V.P., Ed., Water Resources Publications, Colorado, USA, 1995, p809-846.
- Refsgaard, J. C., 1996. Parameterization, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of hydrology*. 198, pp. 69-97.
- Risbey, J. S., 1998. Sensitivities of water supply planning decisions to streamflow and climate scenario uncertainties. *Water Policy*, 1, 321–340.
- Rodríguez, Y., Marrero, N. y Gil, L., 2010. Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Reno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 19, No. 2, 2010.
- Rojas, R., 2005. Evaluación preliminar del modelo HEC-HMS. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Octubre de 2005.
- Rouse, JW, Jr., RH Haas, JA Schell y DW Deering, 1973a. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC 1978-1*, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93p. (NTIS No. E73-106393.
- Rouse, JW, RH Haas, JA Schell y DW Deering, 1973b. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS', *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.
- Rouse, J; Haas, R; Schell, J; Deering, D; Harlan, J., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. *Greenbelt*. Maryland, US. NASA/GSFC. 87 p.



- Ruiz, J. M., 1999. Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos (modelo SIMPA). Tesis Doctoral. Serie de monografías del CEDEX, Ministerio de Fomento. Madrid.
- Sahagian, D., 2000. Global physical effects of anthropogenic hydrological cycle in assessment of climate change. *Nature*. 358, 119-121.
- Samper, J. Alvarez D., Pisani B., García M.A., 2007a, Evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del Ebro con GIS-BALAN. En: Estudios de la Zona no Saturada del Suelo Vol. VIII. Córdoba, J.V. Giráldez y F.J. Jiménez Ed., 347-353.
- Samper, J., García, V. M. A., Pisani, B., Alvarez, D., Espinha, M. J., Varela, A. y Losada, J.A., 2005. Hydrologic models and Geographic Information Systems for water resources evaluation: Application of GIS-BALAN to Atlantic basins in Spain and Portugal. En: The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources. Guimaraes, Portugal. IAHS. 12.
- Samper, J., Huguet, Li., Ares, J. y García V., M.A., 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN V.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Technical Publication ENRESA. 5/99, Madrid.
- Samper, J., Pisani, B., Alvarez, D., Espinha, M. J., García, V. M.A. y Losada, J.A., 2007b. Distributed and semi-distributed hydrological models for groundwater recharge evaluation: Application of GISBALAN to three different basins in Spain and Portugal. En: XXXV Congreso de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos: Groundwater and Ecosystems. Lisboa, 17-21.
- Sánchez, F. J., 2003. Apuntes de Clase: Métodos de transformación lluvia-escorrentía y de propagación de caudales. Universidad de Salamanca, 12 pp. Disponible en: <http://web.usal.es/javisan/hidro>.
- Sánchez, F. J., 2008. HEC-HMS. Manual Elemental. Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca, España. Disponible en: <http://web.usal.es/javisan/hidro>.



- Serban, P., Crookshank, N. L., Willis, D.H., 2003. Intercomparison of Forecast Models for Streamflow Routing in Large Rivers, Report WMO, Geneva.
- SEMARNAT, 2008. Reporte sobre las acciones de México de mitigación y adaptación ante el cambio climático global. Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental, México, Versión X – abril 2008.
- SEMARNAT, 2009. Cuarta Comunicación Nacional presentada ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México.
- Sharma, K. V. P., Vorosmarty C. J. y Moore III, B., 2000. Sensitivity of the Himalayan hydrology to land use and climatic changes. *Climatic Change*. AI, pp. 117-139.
- Sherman, L. K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Eng. News Record* 108: 501-505.
- Singh, V. P., 1995. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Colorado, U.S.A.
- Singh, V. P. y Frevert, D., 2002. *Mathematical modeling of Watershed Hydrology*. Mathematical models of large Watershed Hydrology. Edited by Vijay P. Singh and Donald K. Frevert, Water Resources Publications.
- Singh, V. P. y Woolhiser, D. A., 2002. *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*. *Journal of Hydrologic Engineering*. July/August, pp. 270-292.
- Smith, R. E., 1975. Approximations for vertical infiltration rate pattern. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 19, 505-509.
- Smith, R. E., 1978. A proposed infiltration model for use in simulation of field-scale watershed hydrology. *ARS Nonpoint Pollution Modelling Papers*. Estados Unidos.



- Smith, R. E. y Eggert, K. G., 1978. Discussion to Infiltration formula based on SCS curve number. Journal of Irrigation and Drainage Division. ASCE, Vol. 104. 462-463.
- Soares, Denise, Romero, R., López, R. y Arellano, J. L., 2012. Vulnerabilidad socioambiental frente al cambio climático en la cuenca del río Huehuetán, Chiapas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Primera edición 2012.
- Sobrino, J. A., Olrmeda, M. A., y Raissouni, N., 1998. Aplicación de la técnica de composición del máximo NDVI al seguimiento de la cobertura terrestre en la Península Ibérica. Teledetección No. 10-diciembre 1998.
- Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliosio, A., López-García, M. J., Belaid, A., El Kharraz, M. H., Cuenca, J. y Dempere, L., 2000. Teledetección. Sobrino, J. A. (Ed.), Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia (ISBN 84-370-4220-8), Valencia, España.
- Soil Conservation Service, 1971. Hydrology. SCS National Engineering Handbook, sec 4. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Speranza, F. C. y Zerda, H. R., 2001. Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas vegetales.
- Springer, E. P., McGurk, B. J., Hawkins, R.H. y Coltharp, G.B., 1980. Curve numbers from watershed data. Proceedings of ASCE Irrigation and Drainage Symposium on Watershed Management, ASCE, New York, Estados Unidos. Vol. 2, pp 938-950.
- Steenhuis, T. S., Winchell, M., Rossing, M., Zollweg, J. y Walter, M.F., 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, Vol. 121, N°3, 234-238.
- Stehr, A., Debels, P., Arumi, J.L., Alcayaga, H. y Romero F., 2010. Modelación de la Respuesta Hidrológica al Cambio Climático: Experiencia de Dos Cuencas de la Zona Centro-Sur de Chile. Tecnología y Ciencias del Agua. 1(4), 37-58.



- Steenhuis, T. S., Winchell, M., Rossing, M., Zollweg, J. y Walter, M. F., 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 121, n°3, pp 234-238.
- Stern, N., 2007. *The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 692
- Stromberg, J. C., Lite, S. J y Dixon M. D., 2010. Effects of stream flow patterns on riparian vegetation of a semi-arid river: implications for a changing climate. *River Research and Applications*. 26: 712–729.
- Tarpley, J., Schneider, S., y Money, R., 1984. Global vegetation indices from NOAA-7 Meteorological satellite. *Journal Clim. Appl. Meteorol.* 23:491-494.
- Tejeda, A., y Rodríguez, L., 2007. Estado de la investigación de los aspectos físicos del cambio climático en México. *Investigaciones Geográficas, boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm. 62, 31-43.
- Tucker, C. J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* , 8(2) ,127-150.
- Tucker C. J. y Sellers C., 1986. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1395-1416 pp.
- Tun Dzul, 2007. *La Estacionalidad de la Selva Baja Inundable: Su Análisis Mediante Percepción Remota*. Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campus Chetumal, Q. Roo, México. 19-20 pp.
- UAM, 2004. *Curso de Predicción Económica y Empresarial*. Curso promovido con el apoyo del Fondo de Investigación e Innovación Richard Stone del Instituto L.R. Klein-Centro Stone. Disponible en: http://www.uam.es/docencia/predysim/predysim/2_3_ficha.htm.
- UC, 2007. *Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria*. Universidad de Cantabria. Cantabria, España.



- UICN, 2010. Cambio Climático y Gobernanza del Agua, promoviendo la adaptación basada en ecosistemas en Mesoamérica. Centro de Derecho Ambiental de la Unión Internacional para el Cuidado de la Naturaleza y la Oficina Regional para Mesoamérica e Iniciativa Caribe (ORMA). San José de Costa Rica.
- Urrutia, A., J., Palomino, R. y Salazar, H. D., 2010. Metodología para la imputación de datos faltantes en meteorología. *Scientia et Technica* Año XVII, No 46, Diciembre 2010. Universidad Tecnológica de Pereira.
- USACE, 2000. HEC-HMS Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- USACE, 2010a. Hydrology Modeling System HEC-HMS, Quick Start Guide, version 3.5. Hydrologic Engineering Center. Davis, CA.
- USACE, 2010b. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, V. 3.5. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- USDA SCS (United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service), 1985. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, United States Government Printing Office, Washington D.C., Estados Unidos.
- Viessman, W. y Lewis G. L., 2003. Introduction to Hidrology. Pearson Education Inc., 5ª ed, 288 pp.
- Vieux, E. B., 2001. Distributed Hydrologic Model Using GIS, Kluwer Academic Publisher (Vol. 38), Water Science and Technology Library.
- Vinner, D. y Hulme, M., 1992. Climate change scenarios for Impact studies in the U. K. Climatic Research Unit, UEA, UK.
- Waibel, L., 1946. La Sierra Madre de Chiapas. México, D. F.

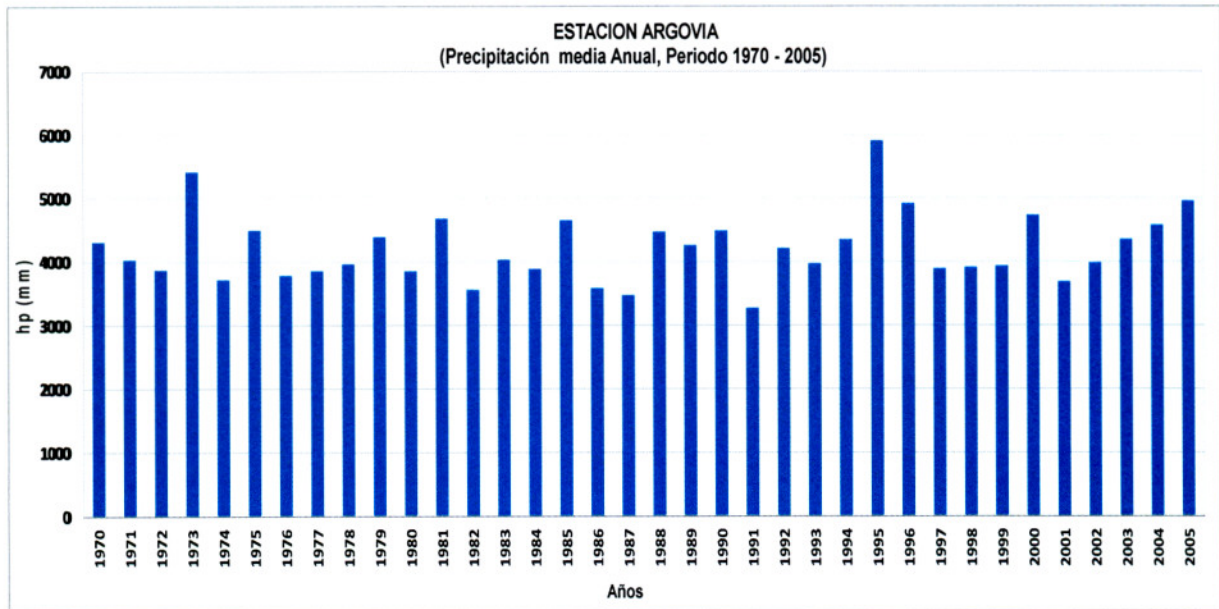


- Walpole, Myers, y Ye., 2007. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Octava edición. Pearson. p. 389-402.
- Ware, C., Knight W. y Wells D., 1991. Memory Intensive Algorithms for Multibeam Bathymetric Data. *Comput. Geosci*, 17(7): 985-993.
- Wood, M. K. y Blackburn, W. H., 1984. An evaluation of the hydrologic soil groups as used in the SCS runoff method on rangelands. *Water Resources Bulletin*, Vol. 20, N°3, pp 379-389.
- Yan, J. y Zhang, J., 1999. Evaluation of the MIKE SHE Modeling System. ASCE, Environmental and Water Resources Institute (EWRI), Water Quality and Drainage Committee, USDA-CSREES Southern Region, Florida.

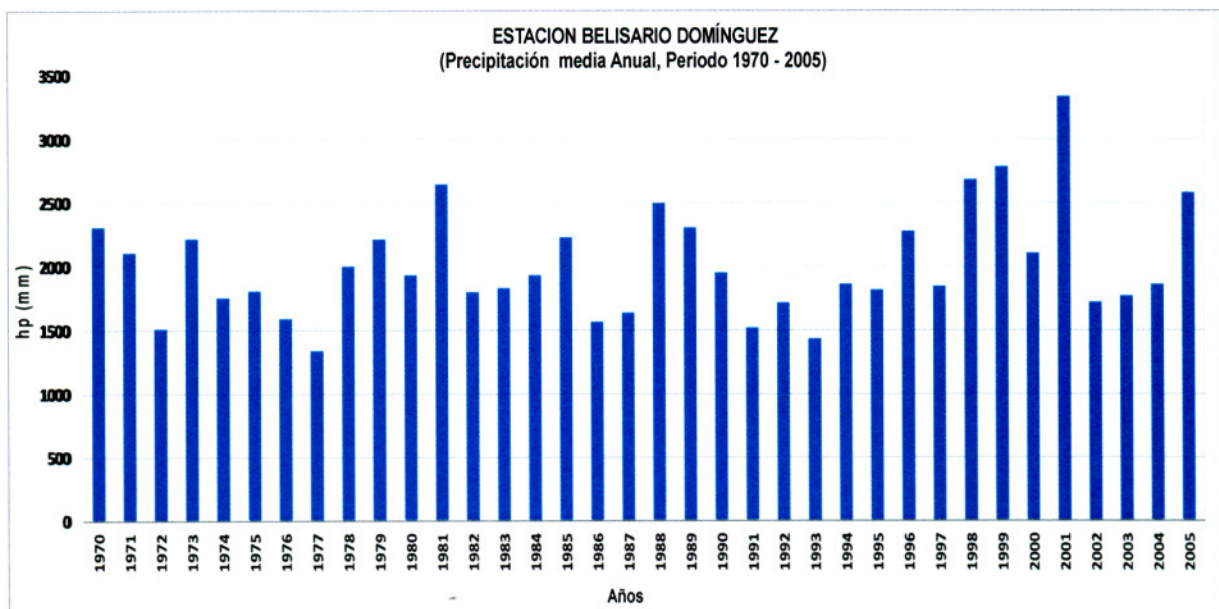
ANEXOS

ANEXO A. Histogramas de precipitación media anual en las estaciones del proyecto

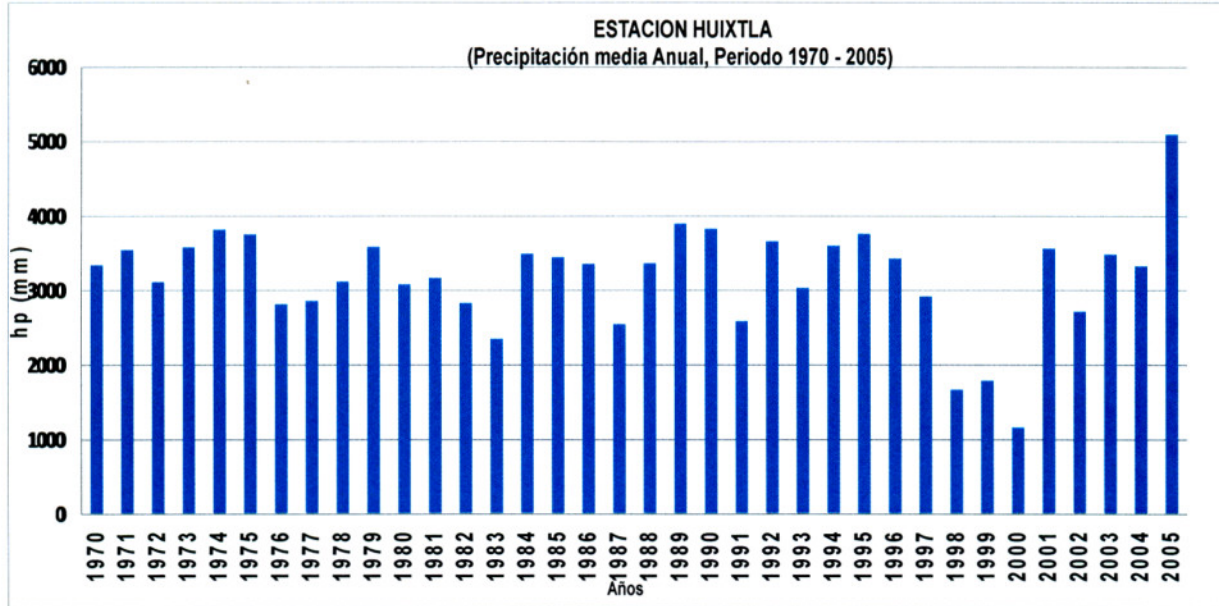
Anexo A1. Histograma de precipitación media anual en la estación Argovia para el periodo 1970-2005.



Anexo A2. Histograma de precipitación media anual en la estación Belisario Domínguez para el periodo 1970-2005.



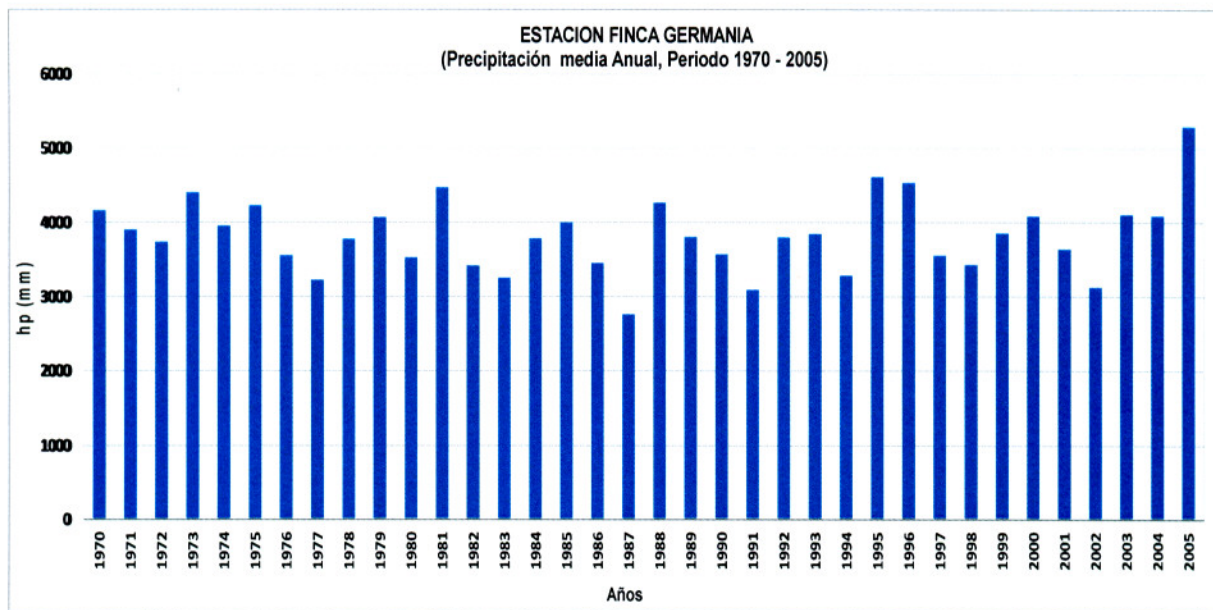
Anexo A3. Histograma de precipitación media anual en la estación Huixtla para el periodo 1970-2005.



Anexo A4. Histograma de precipitación media anual en la estación Finca La Victoria para el periodo 1970-2005.



Anexo A5. Histograma de precipitación media anual en la estación Finca Germania para el periodo 1970-2005.

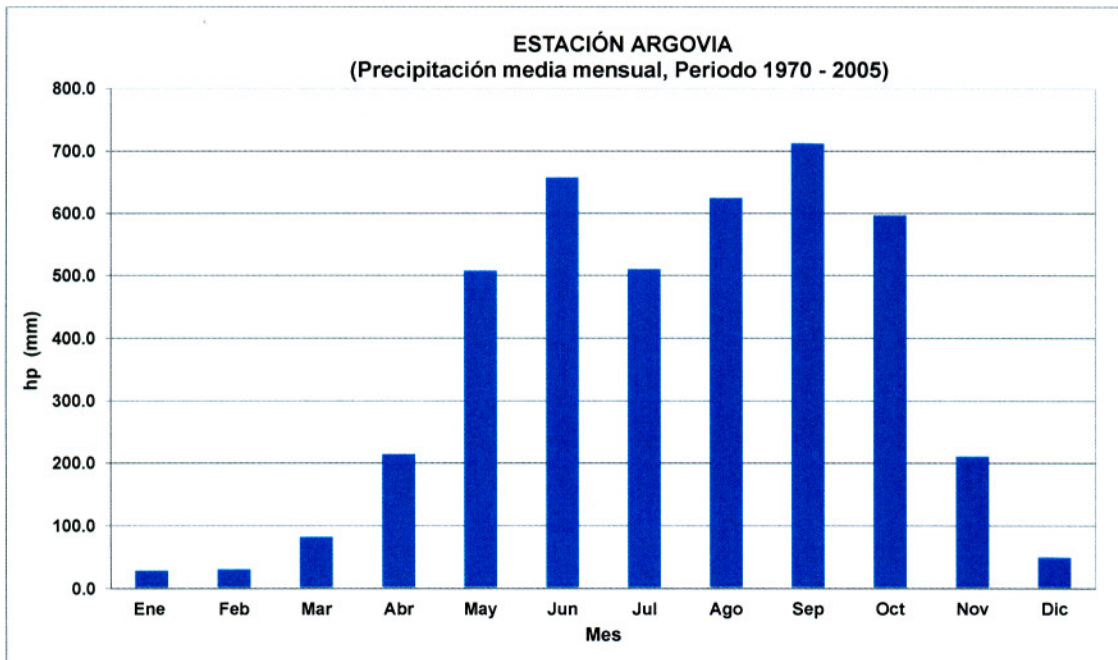


Anexo A6. Histograma de precipitación media anual en la estación Finca San Cristóbal para el periodo 1970-2005.

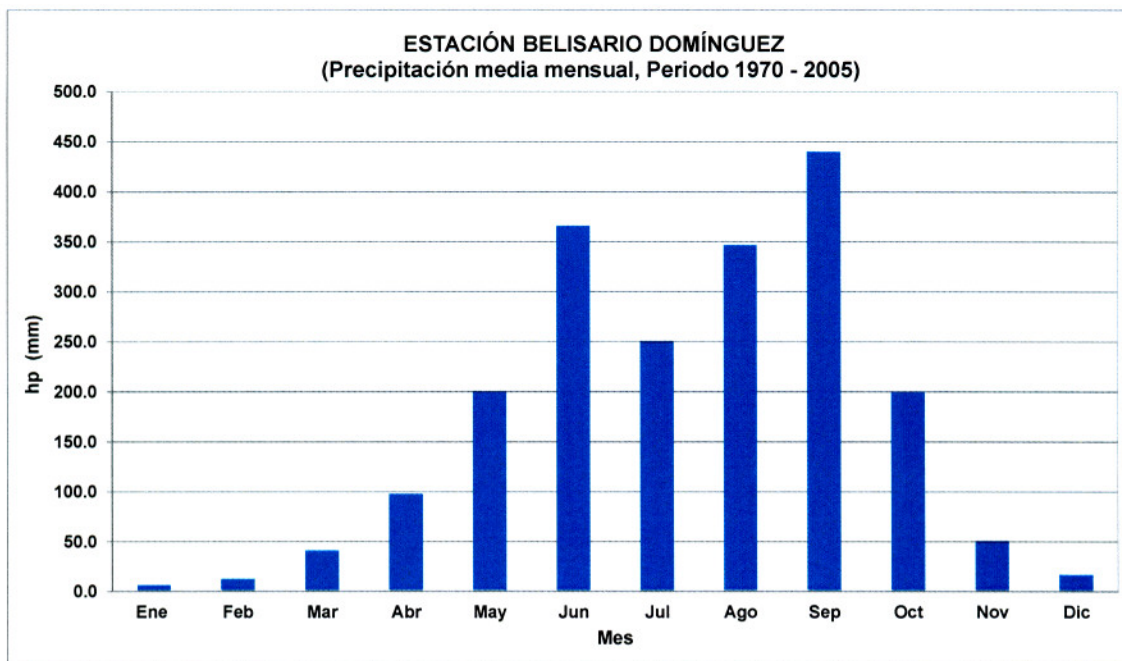


ANEXO B. Histogramas de precipitación media mensual en las estaciones del proyecto

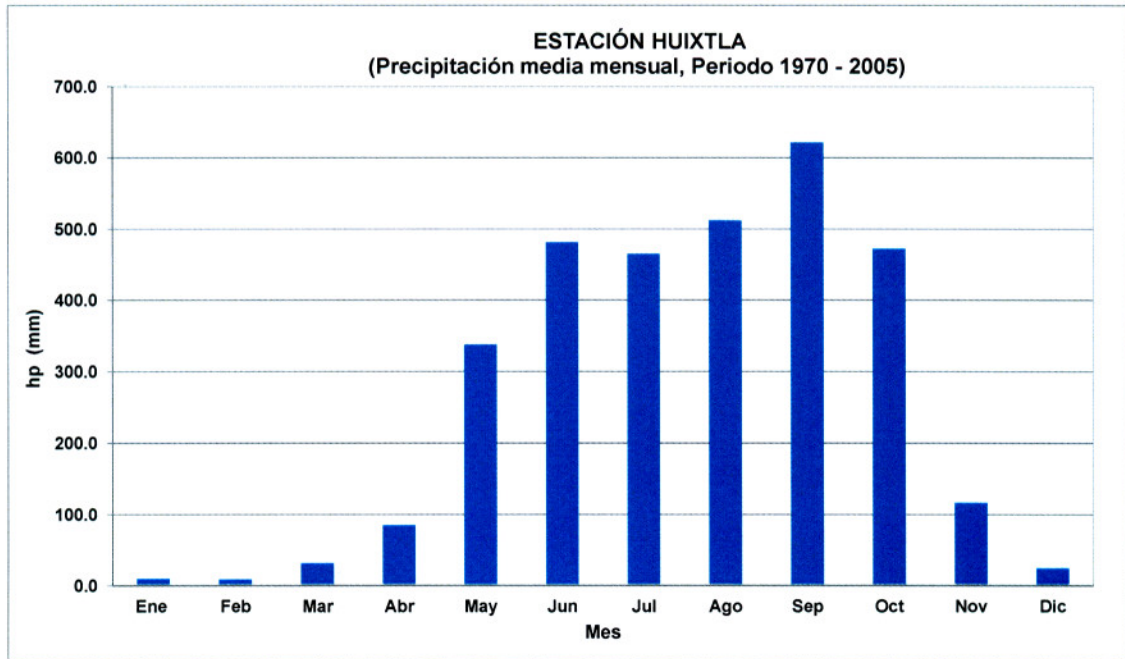
Anexo B1. Histograma de precipitación media mensual en la estación Argovia para el periodo 1970-2005.



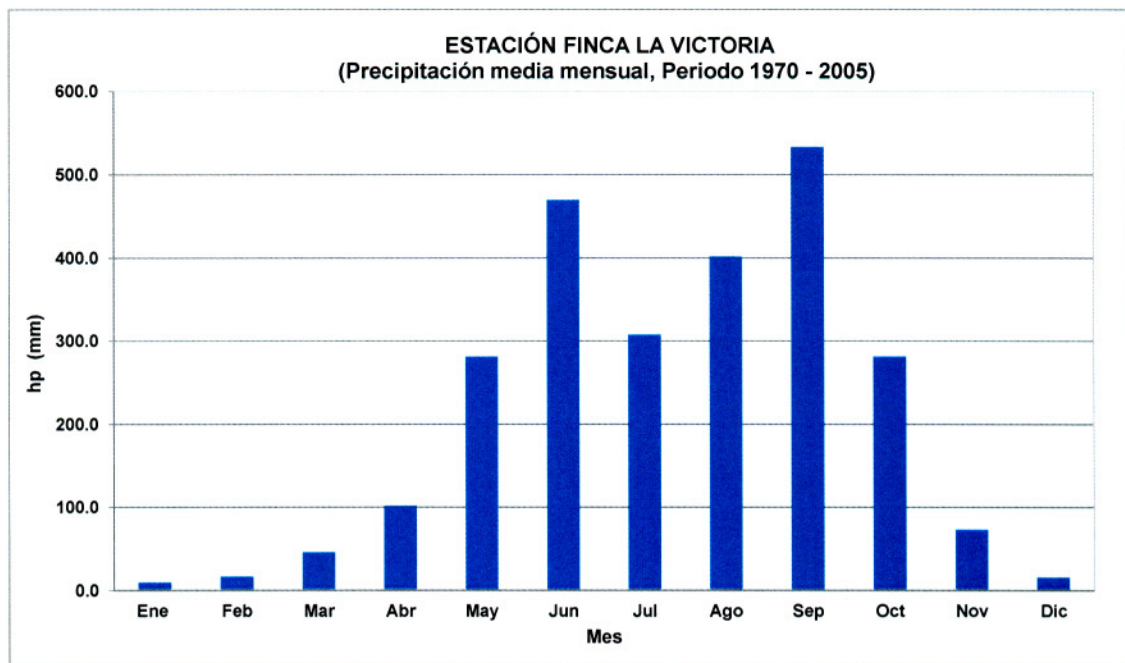
Anexo B2. Histograma de precipitación media mensual en la estación Belisario Domínguez para el periodo 1970-2005.



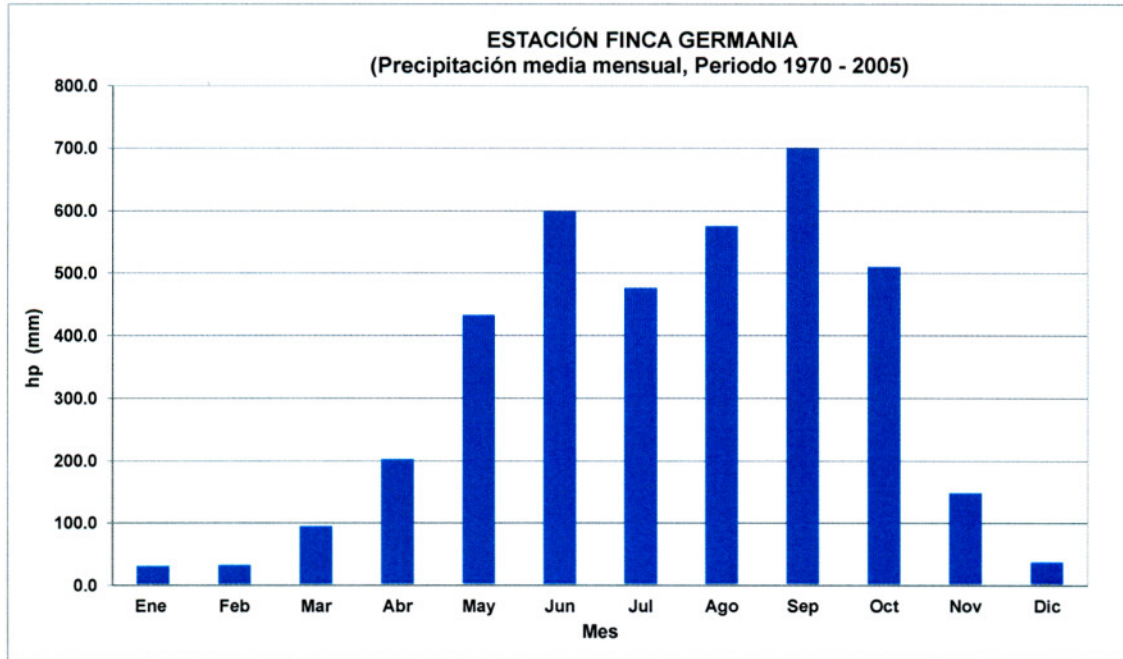
Anexo B3. Histograma de precipitación media mensual en la estación Huixtla para el periodo 1970-2005.



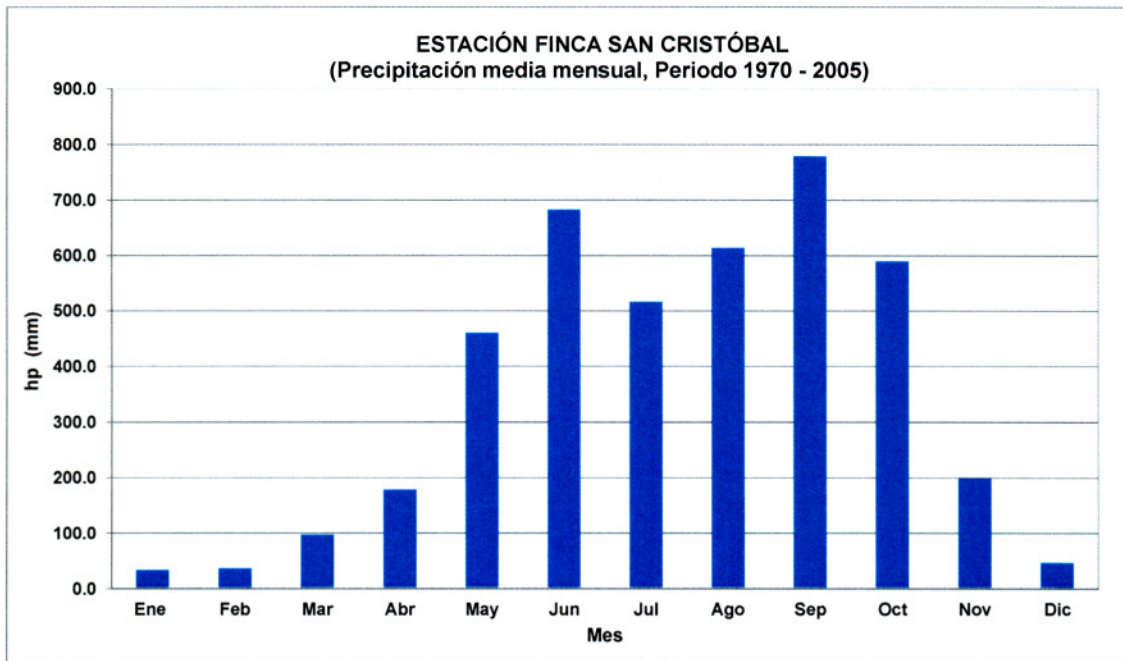
Anexo B4. Histograma de precipitación media mensual en la estación Finca La Victoria para el periodo 1970-2005.



Anexo B5. Histograma de precipitación media mensual en la estación Finca Germania para el periodo 1970-2005.

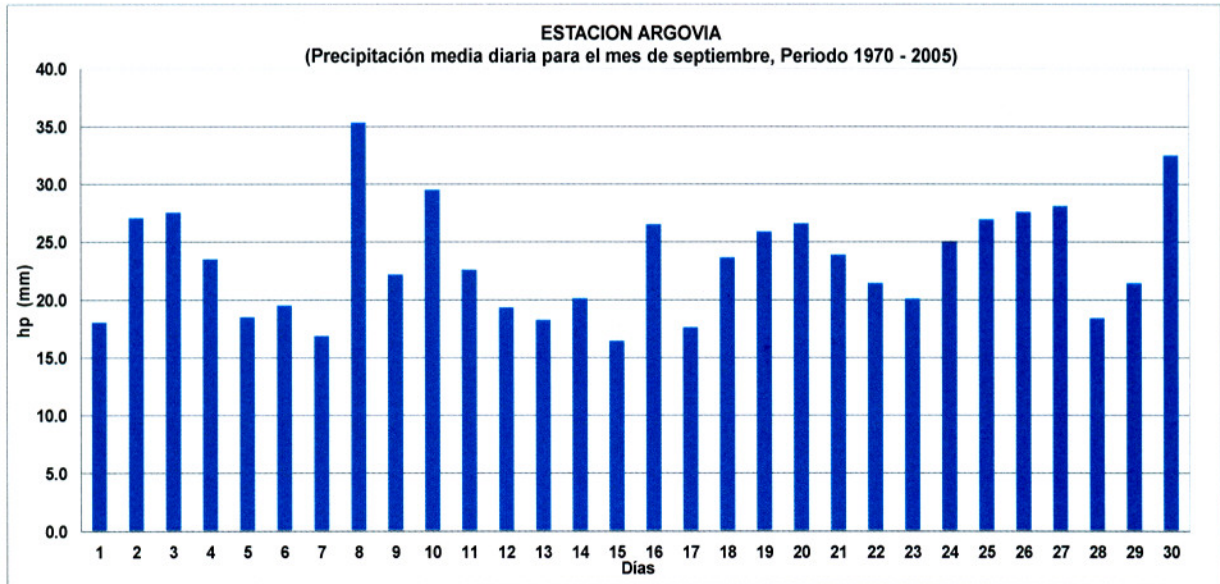


Anexo B6. Histograma de precipitación media mensual en la estación Finca san Cristóbal para el periodo 1970-2005.

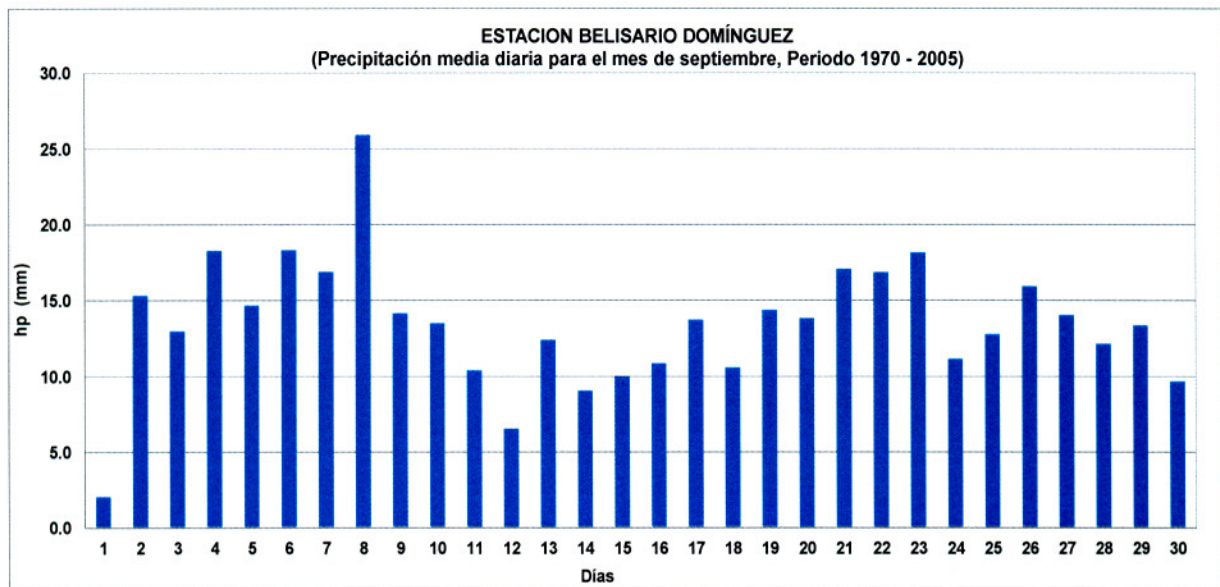


ANEXO C. Histogramas de precipitación media diaria para el mes de septiembre en las estaciones del proyecto.

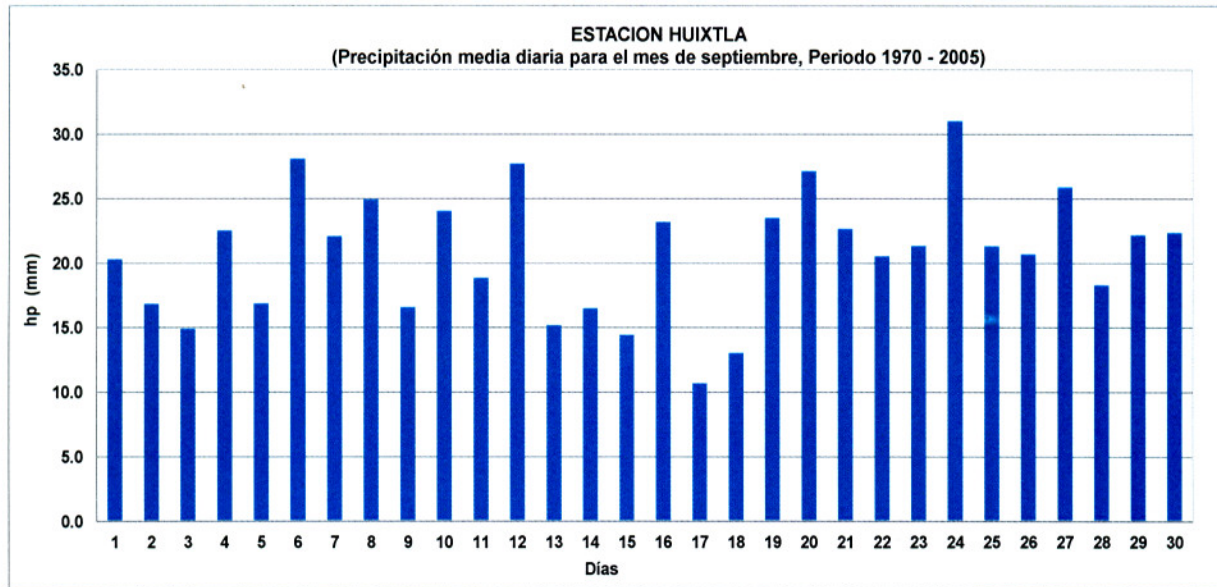
Anexo C1. Histograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Argovia para el periodo 1970-2005.



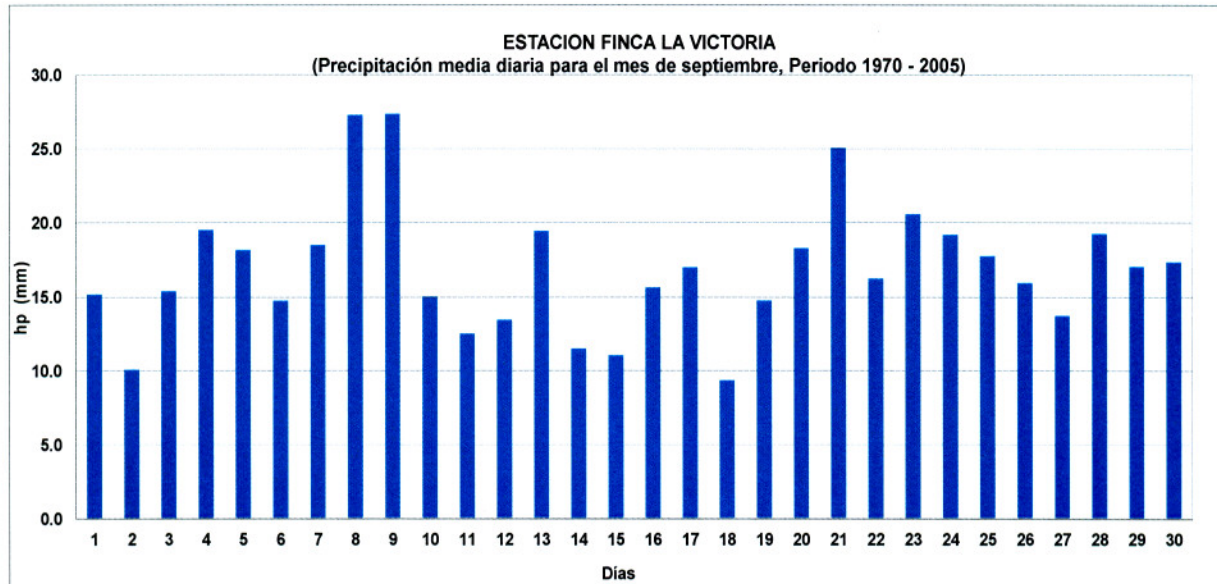
Anexo C2. Histograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Belisario Domínguez para el periodo 1970-2005.



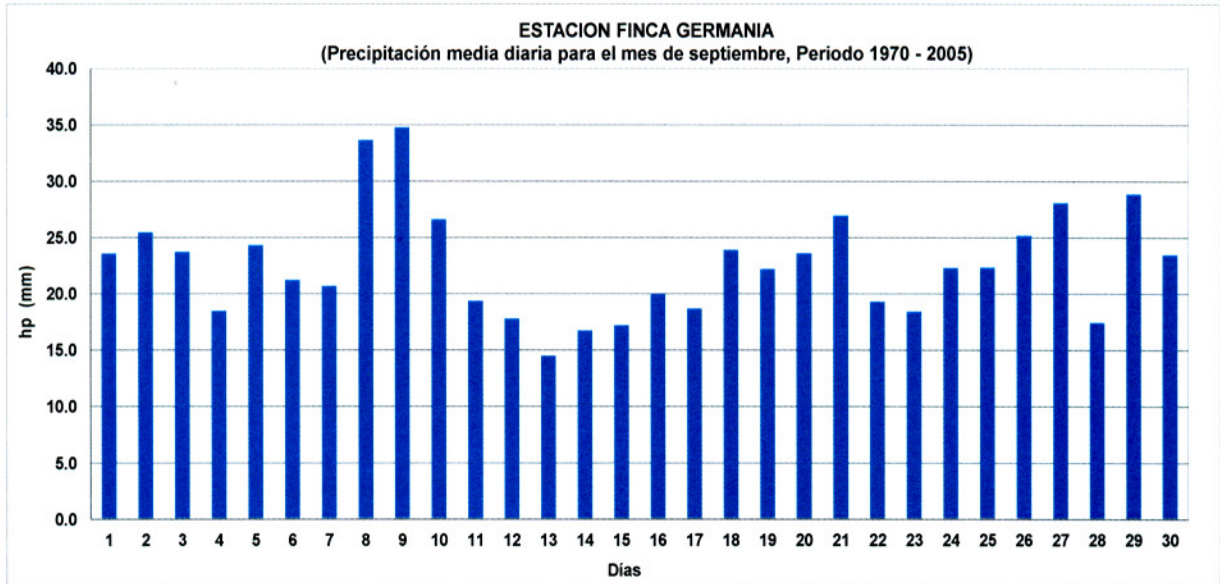
Anexo C3. Histograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Huixtla para el periodo 1970-2005.



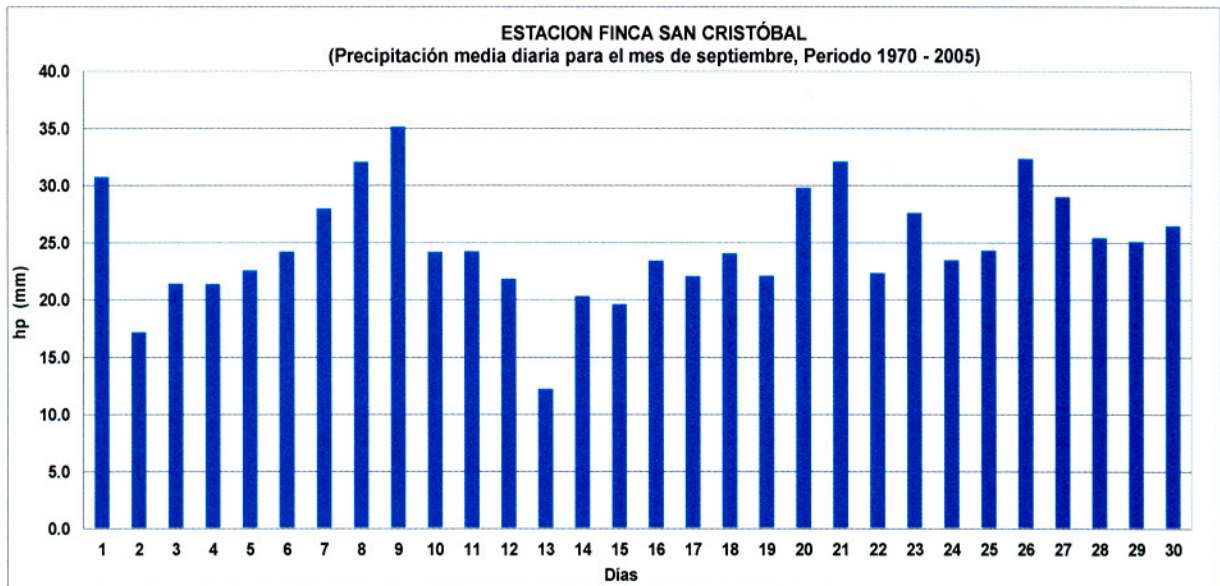
Anexo C4. Histograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Finca La Victoria para el periodo 1970-2005.



Anexo C5. Histograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Finca Germania para el periodo 1970-2005.

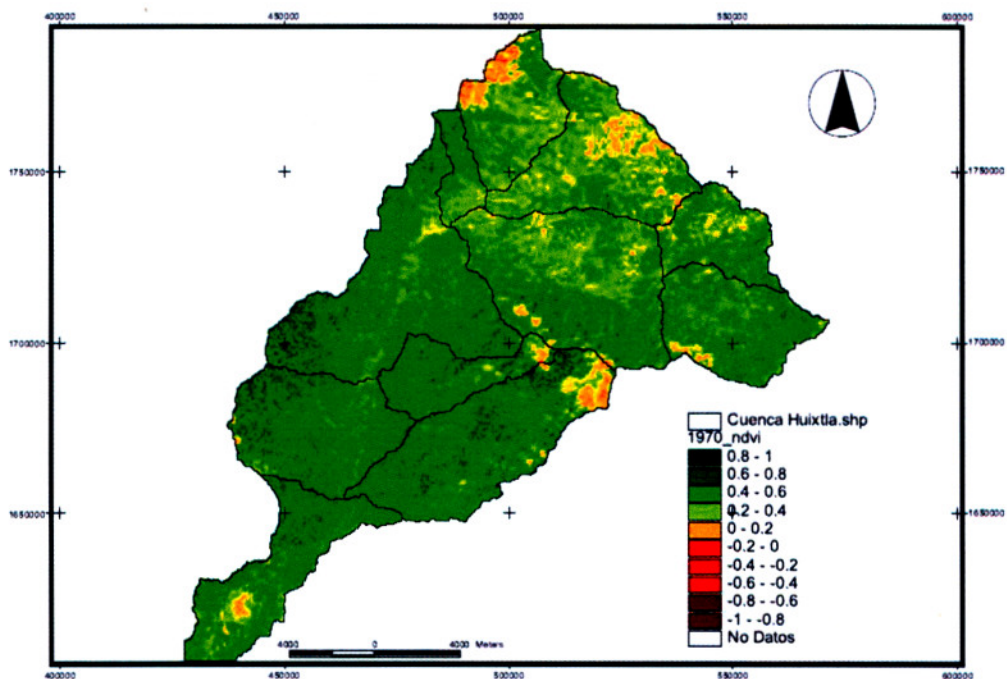


Anexo C6. Histograma de precipitación media diaria para el mes de septiembre en la estación Finca San Cristóbal para el periodo 1970-2005.

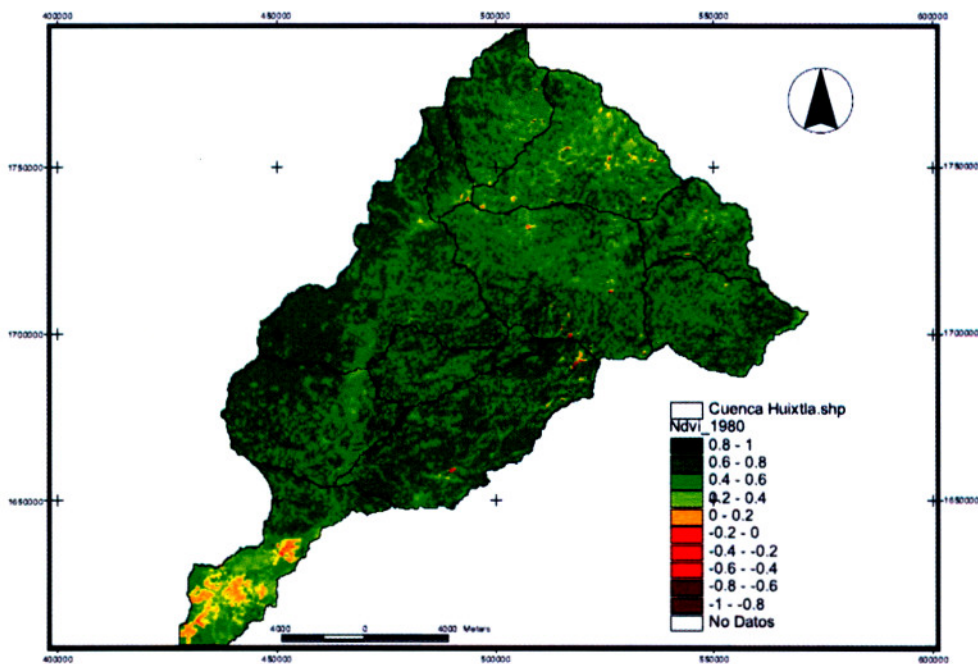


ANEXO D. Mapas de valores anuales del NDVI para la cuenca del río Huixtla para los años 1970, 1980, 1990, 2000, 2005 y 2009.

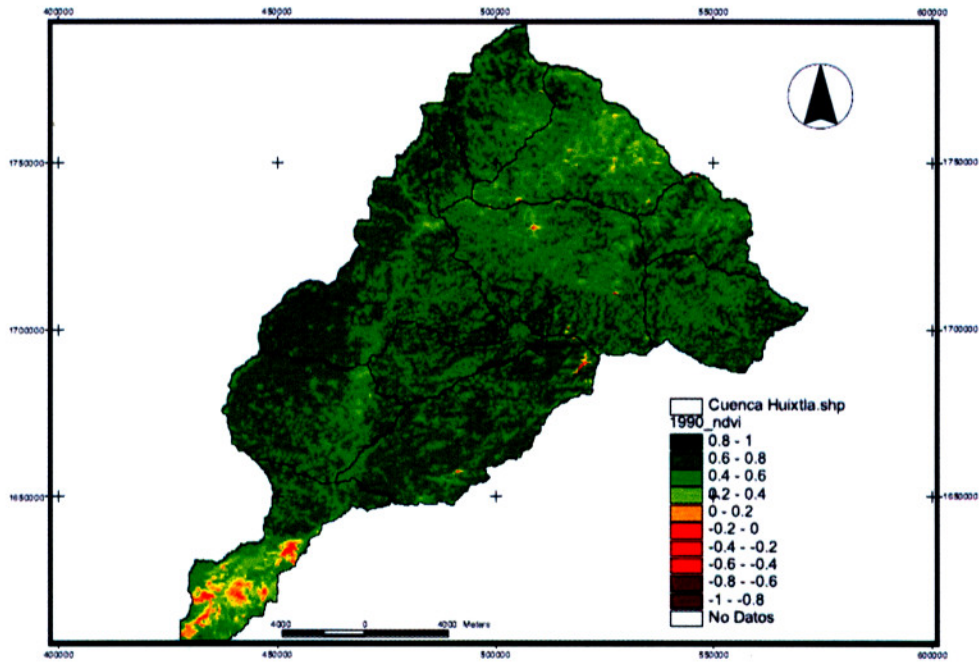
Anexo D1. Mapa del NDVI para el año 1970.



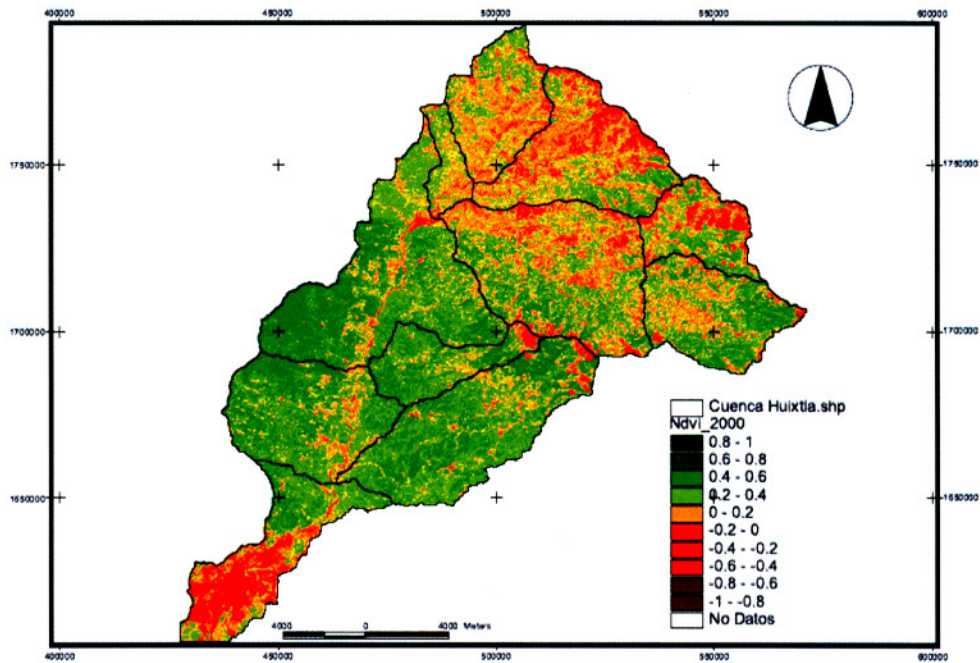
Anexo D2. Mapa del NDVI para el año 1980.



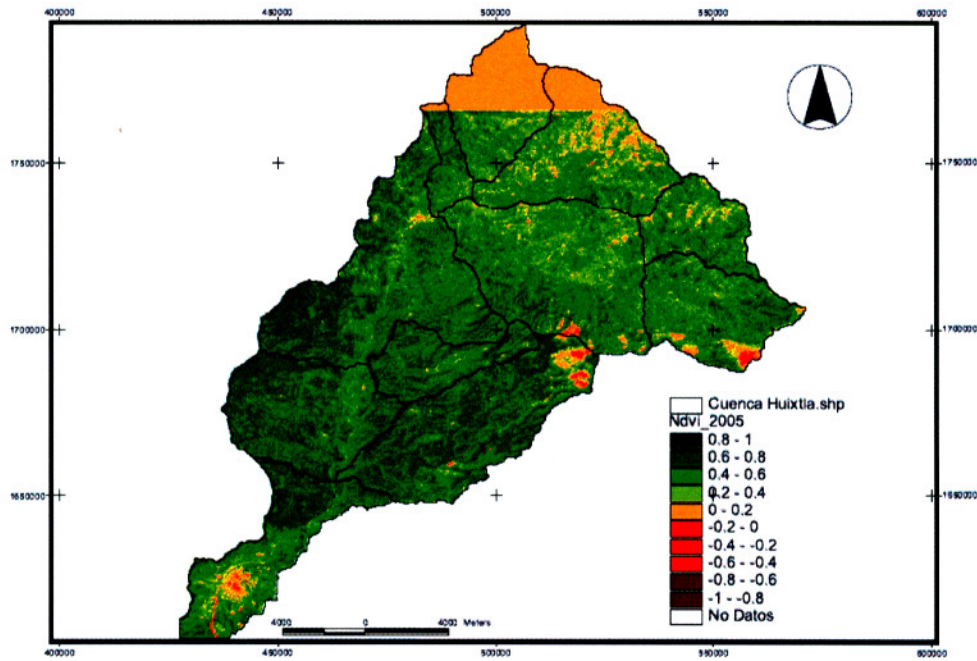
Anexo D3. Mapa del NDVI para el año 1990.



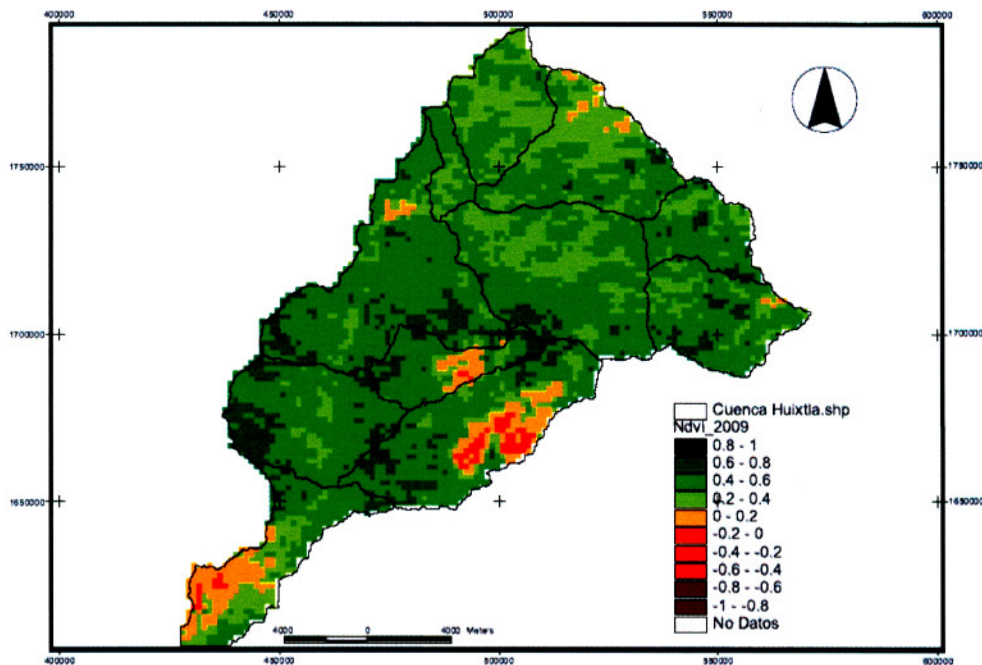
Anexo D4. Mapa del NDVI para el año 2000.



Anexo D5. Mapa del NDVI para el año 2005.



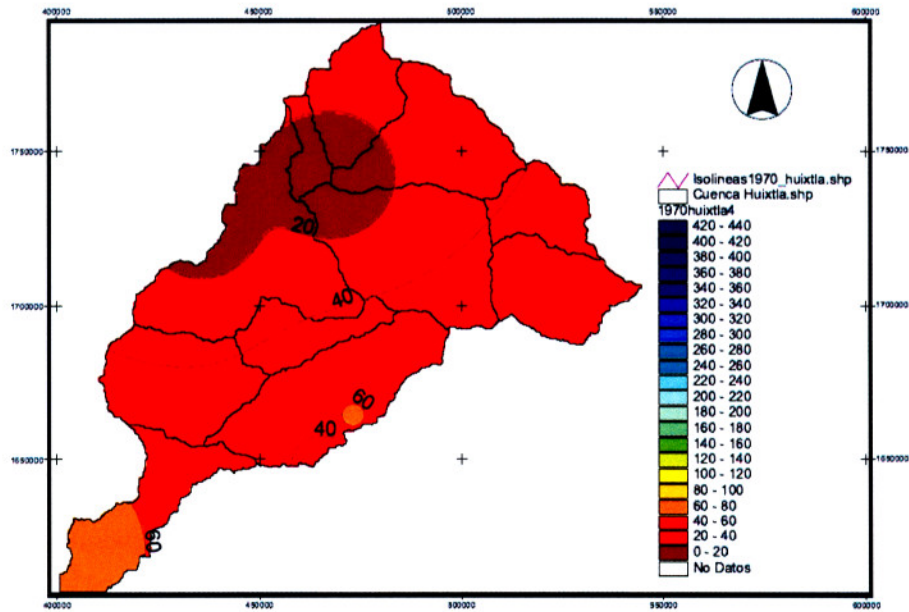
Anexo D6. Mapa del NDVI para el año 2009.



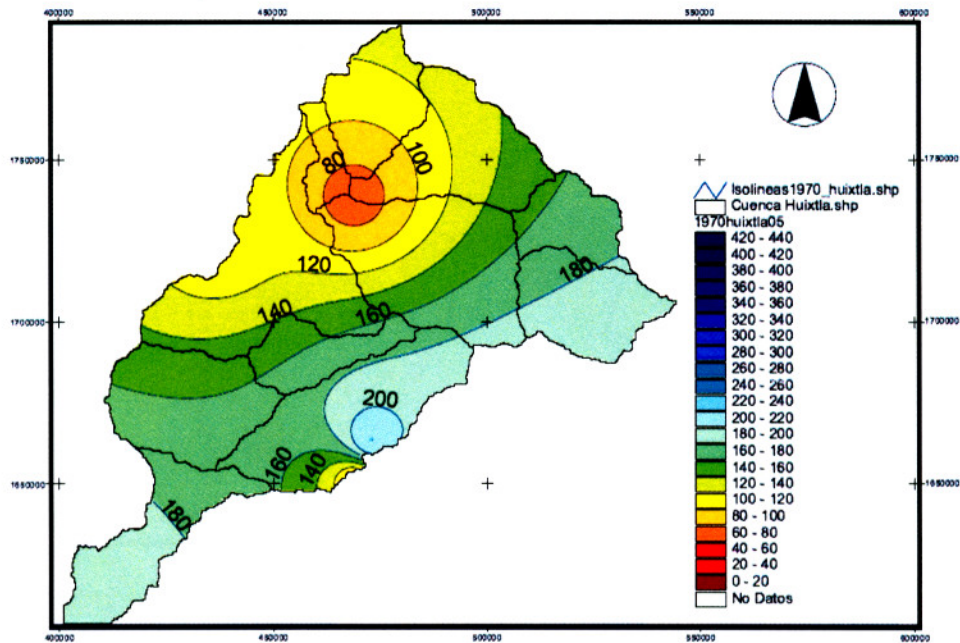
ANEXO E. Mapas de Isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI para los años 1970, 1980, 1990, 2000 y 2005.

Anexo E1. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 1970.

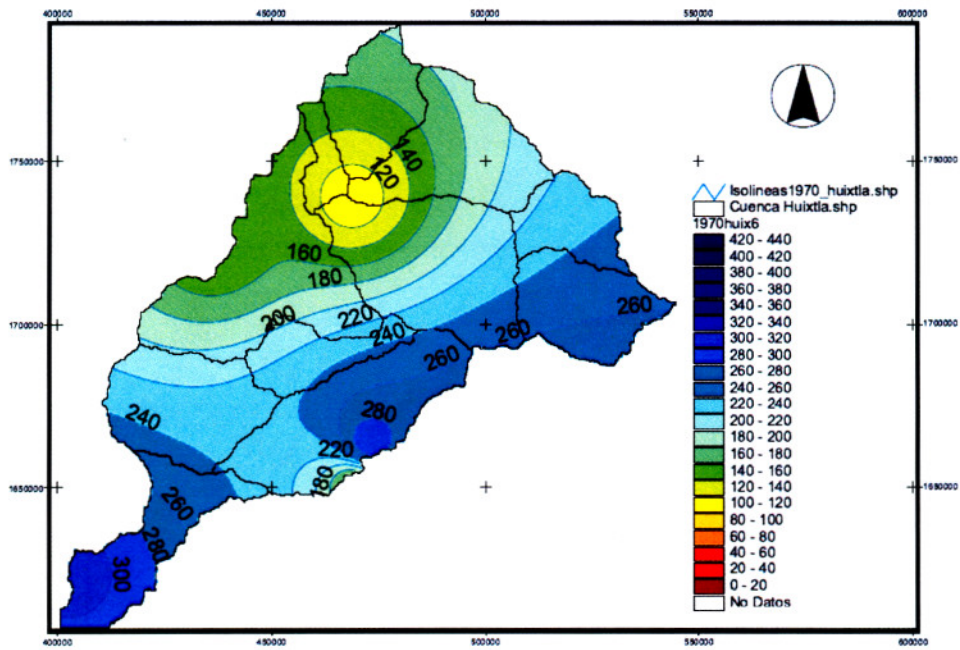
Isoyetas de cuatro meses antecedentes al NDVI de 1970



Isoyetas de cinco meses antecedentes al NDVI de 1970

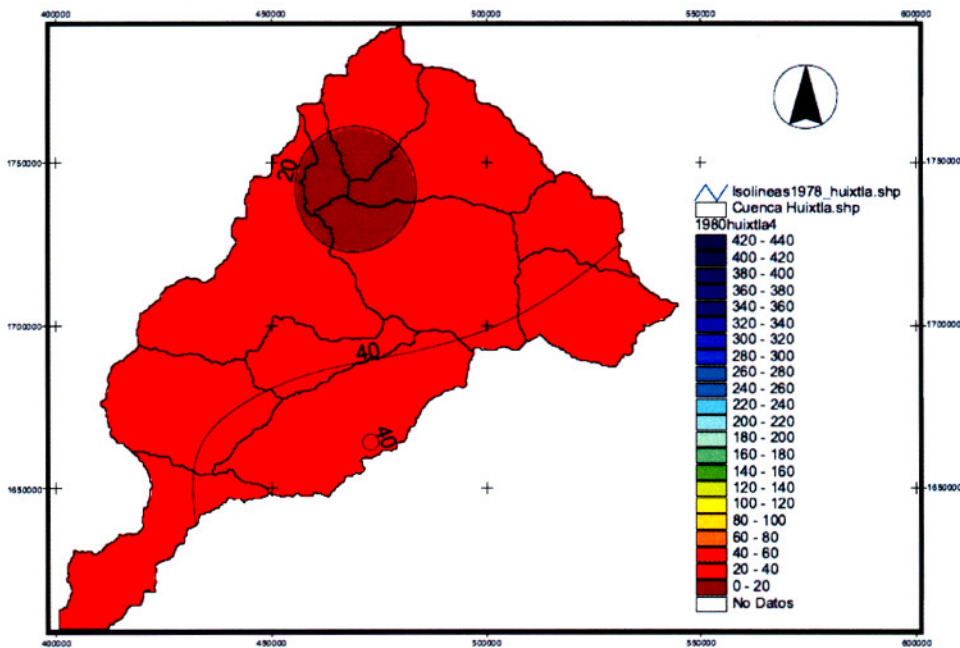


Isoyetas seis meses antecedentes al NDVI de 1970

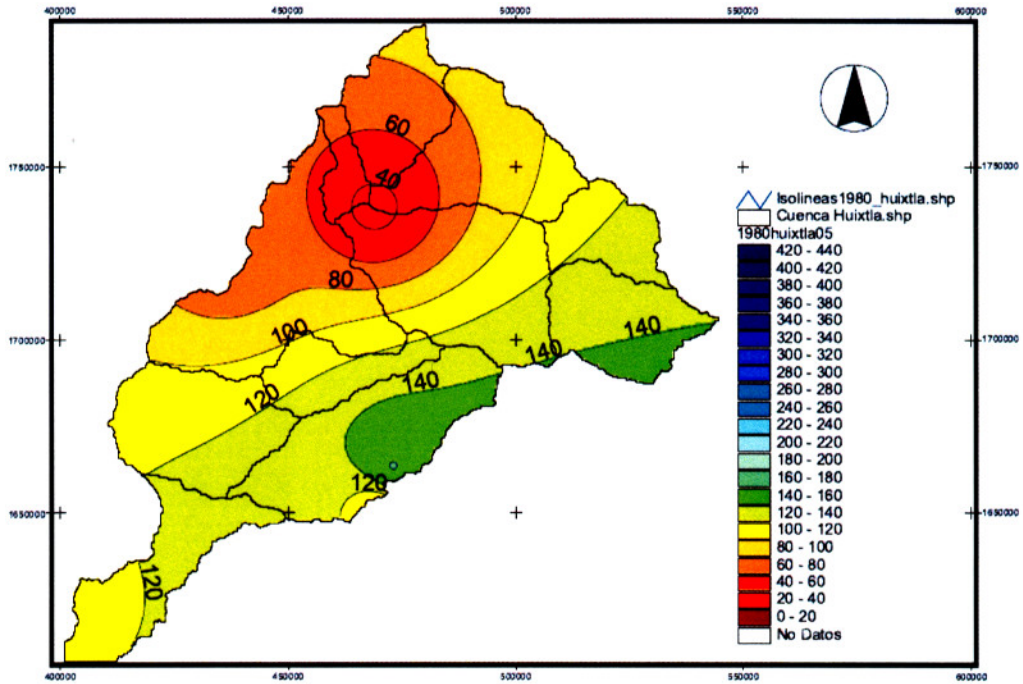


Anexo E2. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 1980.

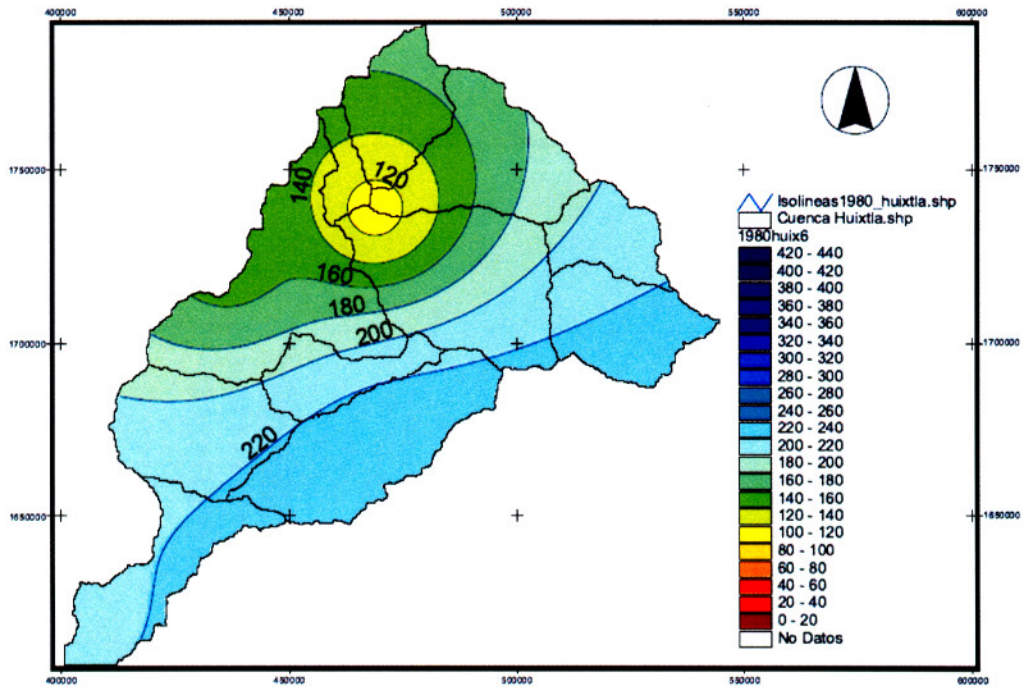
Isoyetas de cuatro meses antecedentes al NDVI de 1980



Isoyetas de cinco meses antecedentes al NDVI de 1980

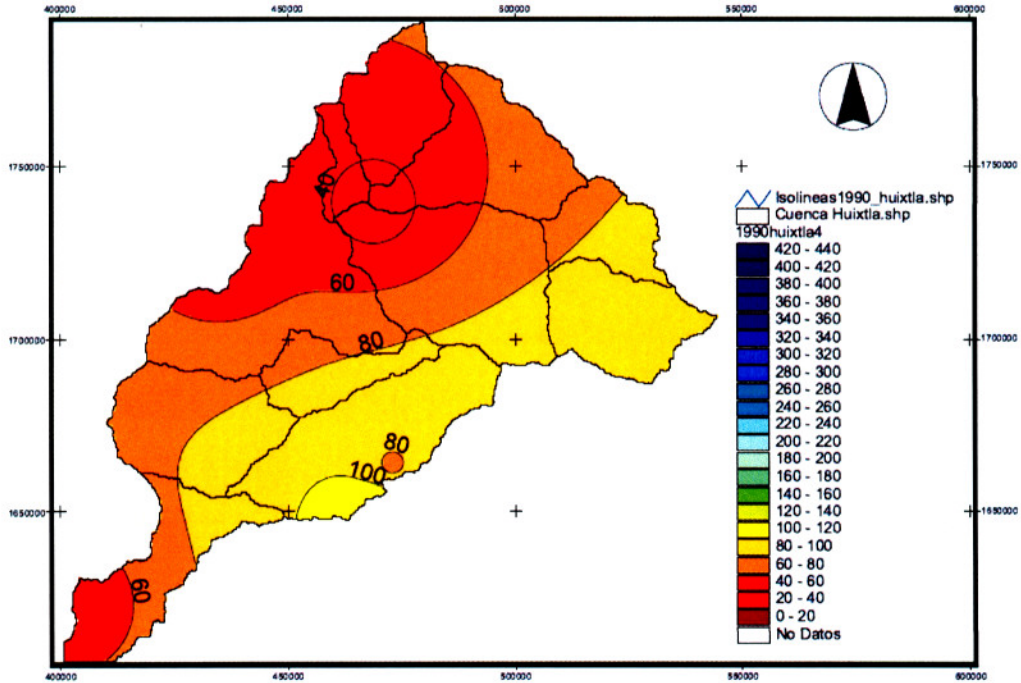


Isoyetas de seis meses antecedentes al NDVI de 1980

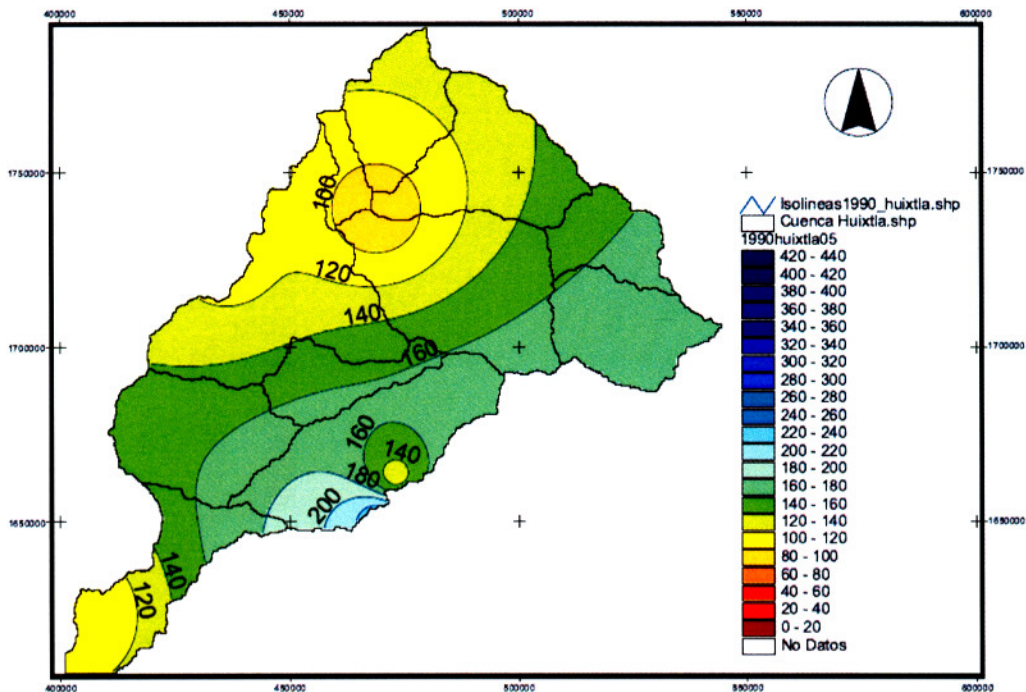


Anexo E3. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 1990.

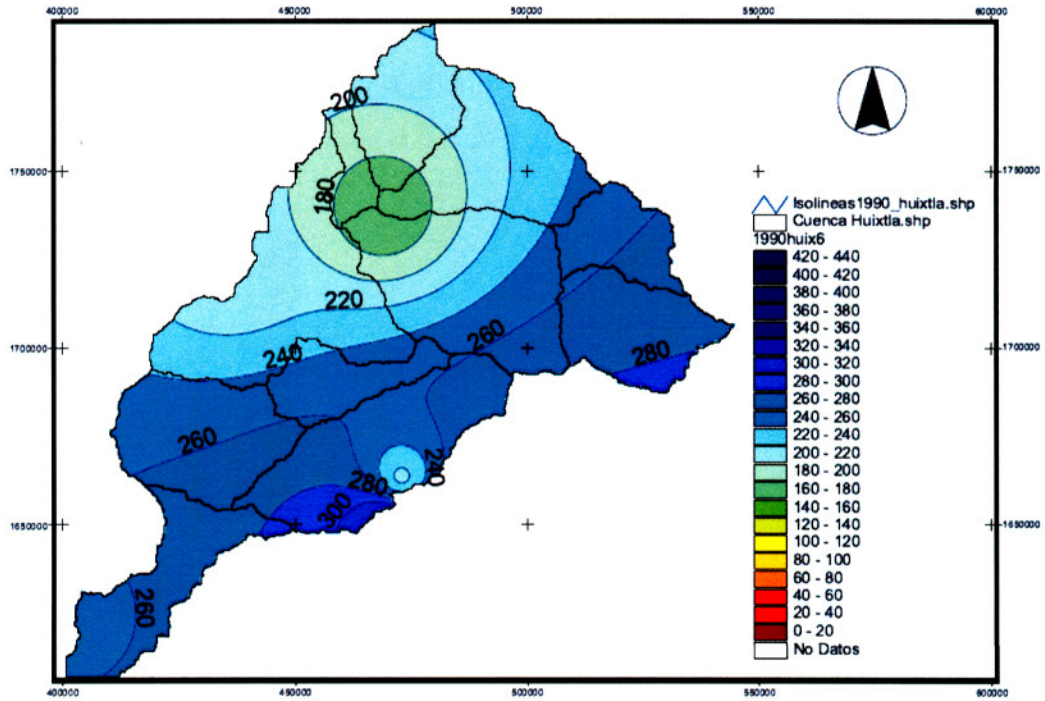
Isoyetas de cuatro meses antecedentes al NDVI de 1990



Isoyetas de cinco meses antecedentes al NDVI de 1990

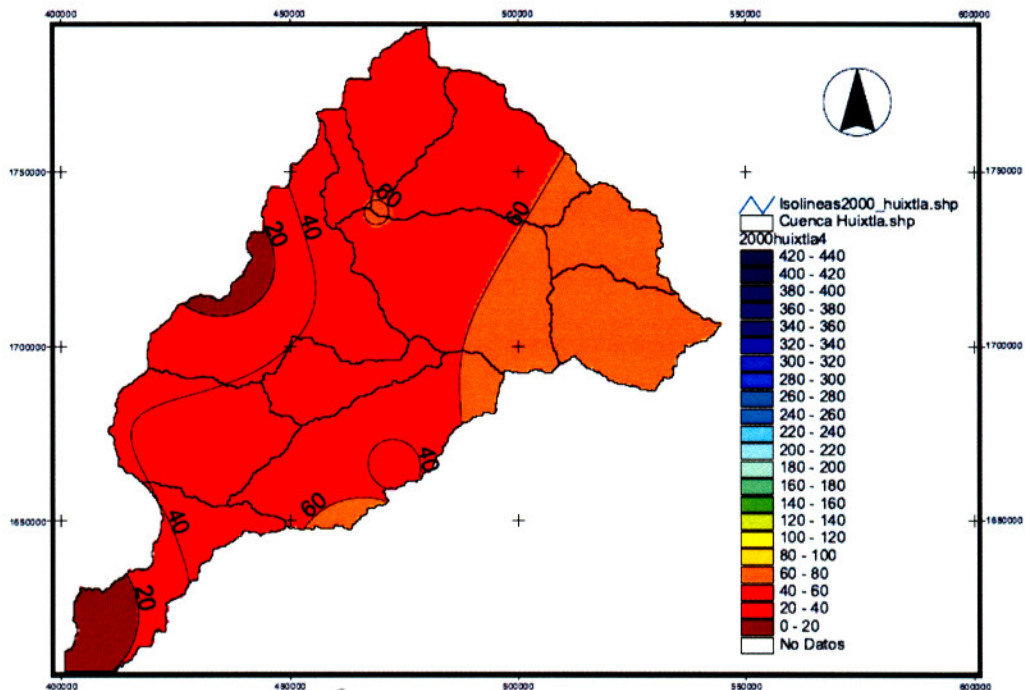


Isoyetas de seis meses antecedentes al NDVI de 1990

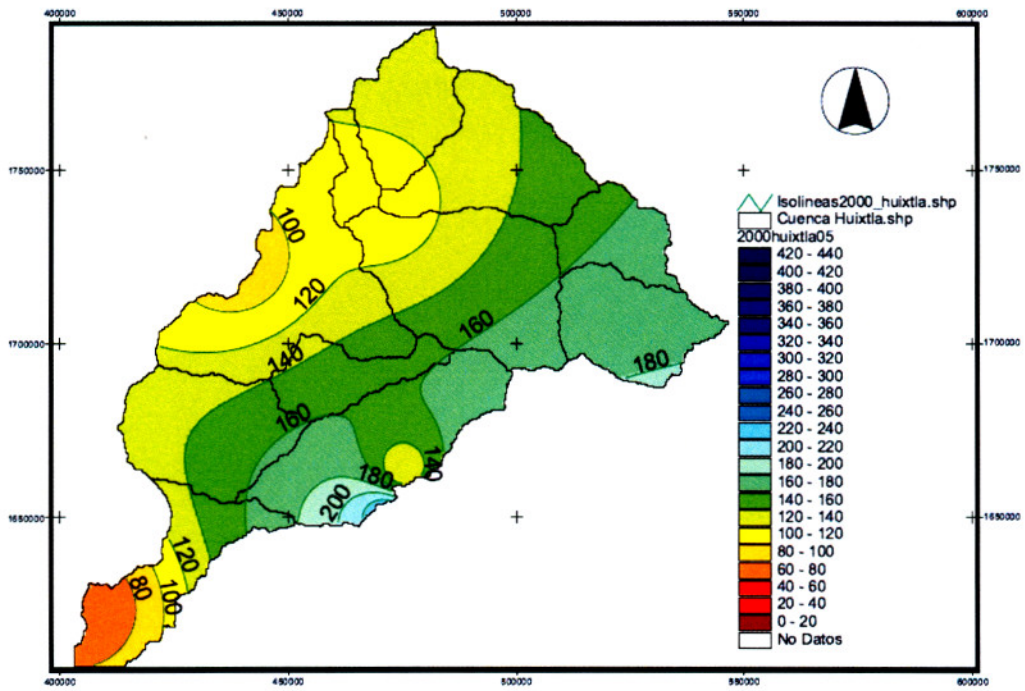


Anexo E4. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 2000.

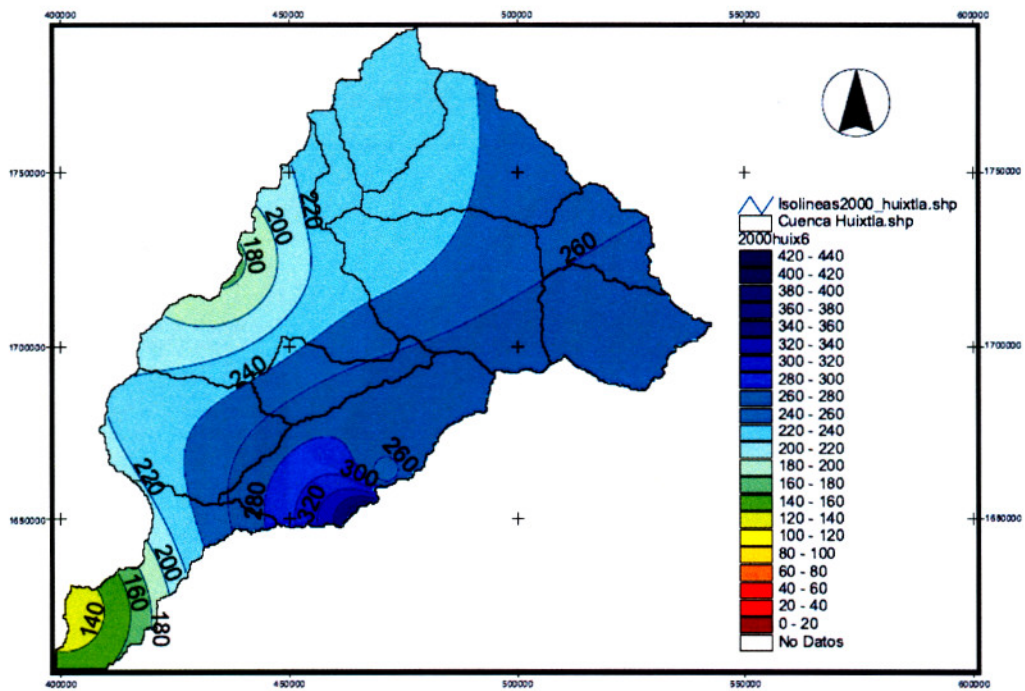
Isoyetas de cuatro meses antecedentes al NDVI de 2000



Isoyetas de cinco meses antecedentes al NDVI de 2000

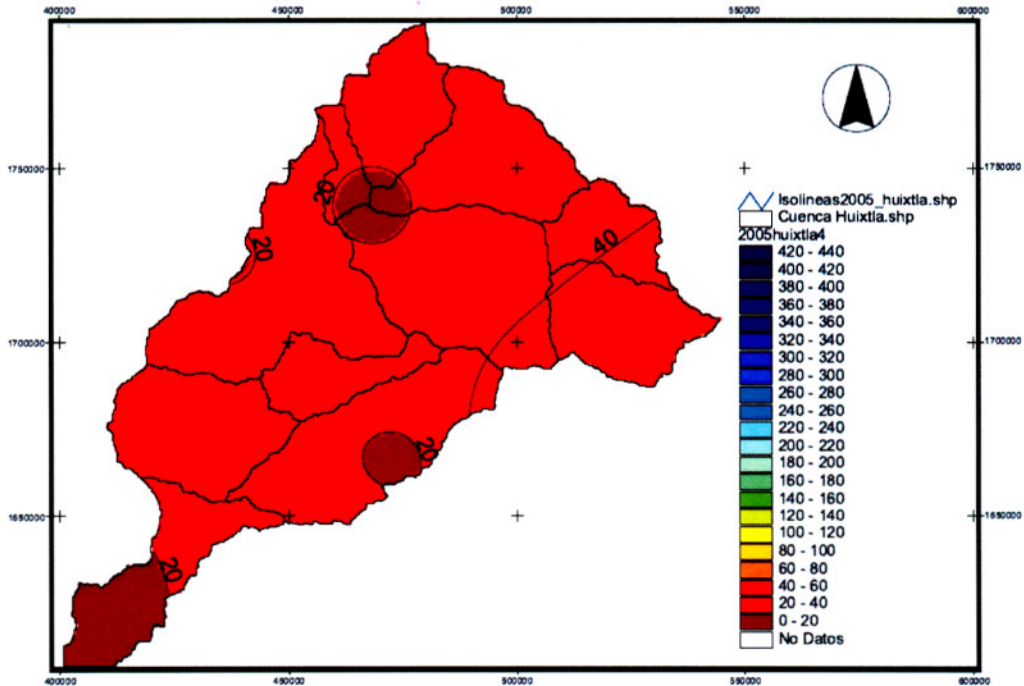


Isoyetas de seis meses antecedentes al NDVI de 2000

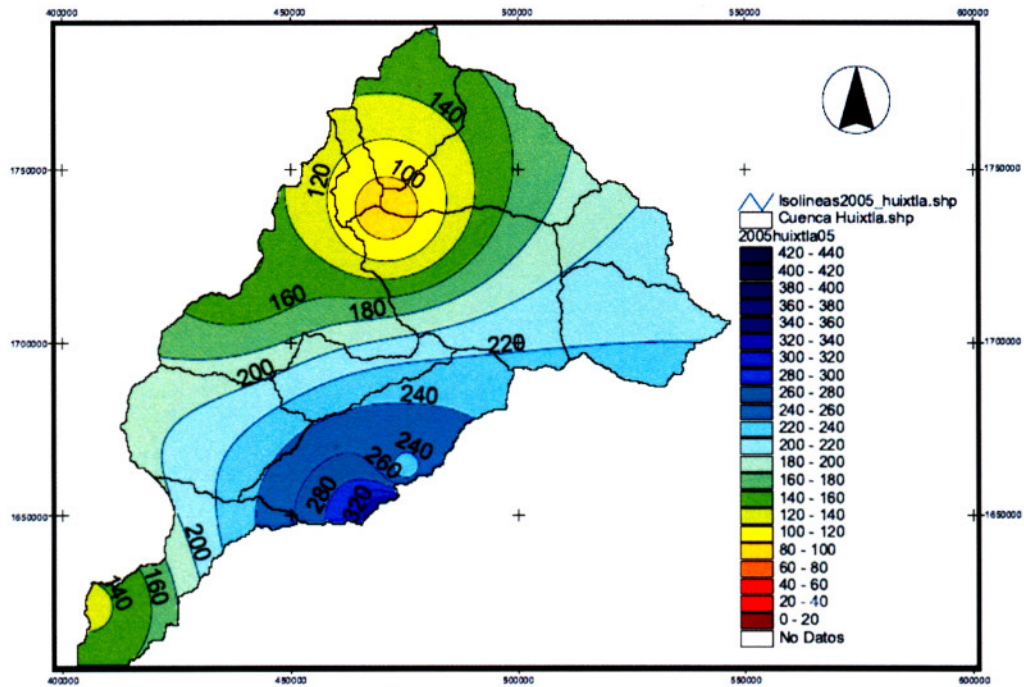


Anexo E5. Mapa de isoyetas de la cuenca del río Huixtla para los 4, 5 y 6 meses antecedentes al NDVI del año 2005.

Isoyetas de cuatro meses antecedentes al NDVI de 2005



Isoyetas de cinco meses antecedentes al NDVI de 2005



Isoyetas de seis meses antecedentes al NDVI de 2005

