



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES
Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

Dirección

El Jicarero, Jojutla, Morelos, 06 de febrero de 2020.

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
DE LA UAEM

PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. ÁNGEL ARAM FIGUEROA GONZÁLEZ**, con el título del trabajo: **"CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS, DURANTE EL PERIODO 1997-2017"**.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: _____

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

ATENTAMENTE

M. I. ERIKA ALMIRUDIS ECHEVERRÍA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES
Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

Dirección

El Jicarero, Jojutla, Morelos, 06 de febrero de 2020.

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
DE LA UAEM

PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. ÁNGEL ARAM FIGUEROA GONZÁLEZ**, con el título del trabajo: **"CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS, DURANTE EL PERIODO 1997-2017"**.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: sí

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

U.A.E.M.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DEL JICARERO

ATENTAMENTE

DR. JUAN MANUEL RIVAS GONZÁLEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES
Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

Dirección

El Jicarero, Jojutla, Morelos, 06 de febrero de 2020.

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
DE LA UAEM

PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. ÁNGEL ARAM FIGUEROA GONZÁLEZ**, con el título del trabajo: **“CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS, DURANTE EL PERIODO 1997-2017”**.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: A favor.

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

ATENTAMENTE

DRA. OFELIA SOTELO CARO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES
Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

Dirección

El Jicarero, Jojutla, Morelos, 06 de febrero de 2020.

**DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
DE LA UAEM**

PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. ÁNGEL ARAM FIGUEROA GONZÁLEZ**, con el título del trabajo: **“CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS, DURANTE EL PERIODO 1997-2017”**.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: _____

✓ 9

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

ATENTAMENTE

BIOL. JOSUÉ CHICHIA GONZÁLEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES
Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

Dirección

El Jicarero, Jojutla, Morelos, 06 de febrero de 2020.

**DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
DE LA UAEM**

PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. ÁNGEL ARAM FIGUEROA GONZÁLEZ**, con el título del trabajo: **“CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS, DURANTE EL PERIODO 1997-2017”**.

VOTO A FAVOR: Si

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

ATENTAMENTE

DRA. MA. VENTURA ROSAS ECHEVERRÍA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DEL JICARERO

**CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD
HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE
CUERNAVACA, MORELOS,
DURANTE EL PERIODO 1997-2017**

**TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
P R E S E N T A:
ÁNGEL ARAM FIGUEROA GONZÁLEZ**

**DIRECTOR
M.I. ERIKA ALMIRUDIS ECHEVERRÍA**

JOJUTLA, MORELOS

NOVIEMBRE, 2019

AGRADECIMIENTOS A:

*Dra. Erika Almirudis Echeverría
Biol. Josué Chichia González
Dra. Ofelia Sotelo Caro
Dr. Juan Manuel Rivas González*

Gracias por haber aceptado acompañarme y asesorarme a lo largo de la realización de este trabajo de investigación, por sus importantes aportaciones, por su gran paciencia y dedicación, y sobre todo por compartir conmigo su tiempo y conocimientos.

Así mismo,

Agradezco a mi familia, amigos y profesores, por ser parte importante en mi desarrollo profesional y personal durante mi formación académica. En ellos encontré inspiración, admiración, apoyo incondicional, pero sobre todo sabiduría y experiencias invaluable. Cada uno de ellos han influido profundamente en la persona y el profesional que soy hoy en día.

A todos ellos, ¡GRACIAS!

RESUMEN

La microcuenca de Cuernavaca alberga a la zona metropolitana de dicha ciudad. En las últimas décadas ha presentado un acelerado crecimiento poblacional y territorial. Lo anterior, aunado a la falta de planeación y gestión integral de los recursos naturales y de las actividades humanas productivas que ahí se desarrollan, han generado cambios en la configuración de la ciudad, incrementando la demanda de recursos naturales, principalmente agua y suelo. Esto se ve reflejado en importantes cambios de uso de suelo y vegetación (CUSV) en toda la microcuenca.

Los objetivos de este trabajo se orientan al análisis en la dinámica de los CUSV, y sus efectos junto a la variabilidad climática sobre los servicios hidrológicos de la microcuenca de Cuernavaca. Para ello se generaron mapas de uso de suelo (USV), analizando imágenes Landsat ETM, con herramientas SIG y se obtuvo una matriz de transición para un análisis más detallado de los cambios entre coberturas. Posteriormente mediante la generación de Años Meteorológicos Típicos (AMT) se realizó el análisis de variabilidad climática, con datos diarios de Temperatura máxima (T_{max}), Temperatura mínima (T_{min}), Precipitación (P) y Evaporación (Evap.). Finalmente empleando las ecuaciones de la NOM-011-CONAGUA-2015, se determinaron las variaciones en los volúmenes de infiltración en la microcuenca de Cuernavaca, durante el periodo 1997-2017.

Las zonas medias y baja presentaron mayores pérdidas de cobertura vegetal y fragmentación debido a la presión antropogénica. Así mismo, en estas zonas existió mayor variabilidad climática, siendo más evidente el comportamiento de la T_{max} y la P . Por otro lado, se determinó que en 2017 los volúmenes de infiltración en la microcuenca fueron ligeramente mayores a los volúmenes infiltrados veinte años antes. Los resultados sugieren que las condiciones hidrológicas en la microcuenca mejoraron, debido a que existe mayor infiltración, sin embargo, esto se relaciona directamente al aumento en los volúmenes de precipitación y no a que las condiciones ambientales en la microcuenca sean las óptimas para que los procesos hidrológicos ocurran con normalidad.

Índice de contenido

i.	Introducción	10
ii.	Planteamiento del problema	12
iii.	Justificación	13
iv.	Objetivos.....	19
iv.i.	Objetivo general.....	19
iv.ii.	Objetivos específicos.....	19
	Capítulo I. Generalidades.....	20
	I.1. Marco teórico	20
	I.1.1. Cuencas hidrológicas y su estructura jerárquica anidada	20
	I.1.2. Cuencas hidrológicas en México.....	22
	I.1.3. Cuencas hidrológicas frente al cambio climático global	23
	I.1.4. El clima y sus elementos.....	24
	I.1.5. Ciclo hidrológico y balance hídrico	26
	I.1.6. Cambio de uso de suelo y cubierta vegetal.....	30
	I.1.7. CUSV y sus efectos en los procesos hidrológicos de las cuencas.....	31
	I.2. Antecedentes	33
	I.3. Descripción de la zona de estudio.....	36
	I.3.1. Fisiografía	37
	I.3.2. Clima	37
	I.3.3. Geología.....	38
	I.3.4. Edafología	38
	I.3.5. Uso de suelo y vegetación	38
	I.3.6. Zona urbana.....	38
	Capítulo II. Metodología	42
	II.1. Tasa de deforestación, cambios de uso de suelo y cubierta vegetal en la microcuenca de Cuernavaca en el periodo 1997-2017	43
	II.1.1. Pre-clasificación y ubicación de puntos de control <i>Google Earth</i>	43
	II.1.2. Obtención de imágenes Landsat y procesamiento digital	43
	II.1.3. Elaboración de los mapas de USV del año 1997 y 2017.....	44
	II.1.4. Evaluación de los CUSV y estimación de la tasa de deforestación durante periodo 1997-2017	44
	II.2. Año Meteorológico Típico de los periodos 1992-1997 y 2011-2016, y análisis de variabilidad climática	46
	II.2.1. Generación de bases de datos meteorológicos	46

II.2.2. Método <i>SANDIA</i> y lenguaje R	49
II.3. Variación en la infiltración hídrica de la microcuenca de Cuernavaca a causa de los CUSV en el periodo 1997-2017.....	53
II.3.1. Obtención del Coeficiente de Escurrimiento (<i>CE</i>)	53
II.3.2. Infiltración total (<i>IT</i>).....	54
Capítulo III. Resultados	57
III.1. Tasa de deforestación, cambios de uso de suelo y cubierta vegetal en la microcuenca de Cuernavaca en el periodo 1997-2017	57
III.1.1. Pre-clasificación y ubicación de puntos de control en <i>Google Earth</i> ...	57
III.1.2. Uso de suelo y vegetación del año 1997 y 2017	60
III.1.3. CUSV en la microcuenca de Cuernavaca	65
III.1.4. Tasa de deforestación anual de las cubiertas forestales.....	65
III.2. Año meteorológico típico de los periodos 1992-1997 y 2011-2016, y análisis de variabilidad climática	67
III.2.1. Selección de los meses que conforman el AMT.....	67
III.2.2. Análisis de variabilidad climática	67
III.3. Variación en la infiltración hídrica de la microcuenca de Cuernavaca a causa de los CUSV en el periodo 1997-2017.....	78
III.3.1. Coeficiente de escurrimiento (<i>CE</i>).....	78
III.3.2. infiltración total (<i>IT</i>).....	79
Capítulo IV. Discusión.....	89
Capítulo V. Conclusión.....	97
<i>Referencias</i>	99

índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de las sub-regiones hidrológicas de la Región del Balsas..	15
Figura 2. Mapa de ubicación y distribución de los acuíferos del Estado de Morelos.....	16
Figura 3. Mapa de ubicación del Corredor Biológico del Chichinautzin	17
Figura 4. Mapa de las ZM del Estado de Morelos y su influencia en la subcuenca del Rio Apatlaco	18
Figura 5. Ejemplo de una cuenca exorreica (1a), endorreica (1b) y arreica (1c) (INEGI, INE, CONAGUA 2007).....	21
Figura 6. Esquema general del ciclo hidrológico (Maderrey & Jiménez, 2005).....	29
Figura 7. Efecto de la urbanización en los procesos hidrológicos (modificado de Aguilera, 2015)	32
Figura 8. Mapa de ubicación, de la Región Hidrológica del Balsas, la Cuenca del rio Amacuzac y el Estado de Morelos	39
Figura 9. Mapa de ubicación de la microcuenca de Cuernavaca	40
Figura 10. Municipios con influencia de la microcuenca de Cuernavaca	41
Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología general del proyecto	42
Figura 12. Diagrama de flujo del proceso para obtener los mapas de USV de los años 1997 y 2017	45
Figura 13. Ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionas para la generación del AMT	48
Figura 14. Diagrama de flujo del Método Sandia para generar el AMT (Morales, 2016)...	52
Figura 15. Diagrama de flujo para determinar la infiltración total (IT).....	55
Figura 16. Mapa de distribución de los puntos de control generados en Googlae Earth ..	59
<i>Figura 17. Mapa de USV del año 1997 obtenido mediante la herramienta SCP.....</i>	<i>62</i>
Figura 18. Mapa de USV del año 2017 obtenido mediante la herramienta SCP.....	63
Figura 19. Gráfica con los porcentajes de USV de los años 1997 y 2017	64
Figura 20. Gráfica de la tasa de deforestación anual del periodo 1997-2017	66
Figura 21. Boxplots de los datos diarios de Tmax. Estación “17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016	70
Figura 22. Boxplots de los datos diarios de Tmax. Estación “17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016	70

Figura 23. Boxplots de los datos diarios de Tmax. Estación “17014-TEMIXCO-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016.....	71
Figura 24. Boxplots de los datos diarios de Tmax. Estación “17071-PROGRESO-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016	71
Figura 25. Boxplots de los datos diarios de Tmin. Estación “17047-HUITZILAC-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016.....	72
Figura 26. Boxplots de los datos diarios de Tmin. Estación “17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016	72
Figura 27. Boxplots de los datos diarios de Tmin. Estación “17014-TEMIXCO-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016.....	73
Figura 28. Boxplots de los datos diarios de Tmin. Estación “17071-PROGRESO-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016	73
Figura 29. Boxplotsde los datos diarios de P. Estación “17047-HUITZILAC-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016.....	74
Figura 30. Boxplots de los datos diarios de P. Estación “17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016	74
Figura 31. Boxplots de los datos diarios de P. Estación “17014-TEMIXCO-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016.....	75
Figura 32. Boxplots de los datos diarios de P. Estación “17071-PROGRESO-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016.....	75
Figura 33. Boxplots de los datos diarios de Evap. Estación “17047-HUITZILAC-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016.....	76
Figura 34. Boxplots de los datos diarios de Evap. Estación “17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016	76
Figura 35. Boxplots de los datos diarios de Evap. Estación “17014-TEMIXCO-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016.....	77
Figura 36. Boxplots de los datos diarios de Evap. Estación “17071-PROGRESO-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016	77
Figura 37. Valores de la textura del suelo en la microcuenca de Cuernavaca. Los valores de 2 corresponden a suelos limosos y los valores de 3 a suelos arcillosos.....	80
Figura 38. Valores del parámetro K para el año 1997 en la microcuenca de Cuernavaca	81

Figura 39. Valores del parámetro K para el año 2017 en la microcuenca de Cuernavaca	82
Figura 40. Mapa de distribución de la P anual (mm) en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 1992-1997	83
Figura 41. Mapa de distribución de la P anual (mm) en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 2011-2016	84
Figura 42. Mapa de distribución del Coeficiente de escurrimiento (CE) en la microcuenca de Cuernavaca para el año 1997	85
Figura 43. Mapa de distribución del Coeficiente de escurrimiento (CE) en la microcuenca de Cuernavaca para el año 2017	86
Figura 44. Mapa de distribución de la infiltración total (IT) en la microcuenca de Cuernavaca para el año 1997	87
Figura 45. Mapa de distribución de la infiltración total (IT) en la microcuenca de Cuernavaca para el año 2017	88
Figura 46. Modelo alternativo de infiltración total (IT) para el periodo 1997-2017	96

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de K de acuerdo al tipo de cubierta vegetal y textura del suelo (NOM-011-CONAGUA-2015).....	56
Tabla 2. Clases de uso de suelo y vegetación en la microcuenca de Cuernavaca y puntos de control generados a través de Google Earth para el año 2017.....	58
Tabla 3. Superficie ocupada por cada clase en los años 1997 y 2017 en la microcuenca de Cuernavaca.....	64
Tabla 4. Matriz de transición de los CUSV en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 1997-2017	66
Tabla 5. Tasa de deforestación en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 1997-2017	66
Tabla 6. Valores de WS de los periodos 1992-1997 y 2011-2016 para cada estación meteorológica en la microcuenca de Cuernavaca	69

i. Introducción

Estudios y observaciones recientes (Roser, 2019) muestran que actualmente las tendencias en las tasas de crecimiento acelerado de la población mundial ya no se mantienen y, por el contrario, estas han estado bajando. En 1962 se observó el pico de crecimiento más alto con 2.1% y desde entonces ha caído a casi la mitad. Sin embargo, la sobrepoblación sigue siendo uno de los principales problemas que enfrenta la humanidad, y uno de los mayores retos en materia ambiental. Durante décadas la población mundial creció aceleradamente; según datos de las Naciones Unidas (*UN*, por sus siglas en inglés) y del Banco Mundial, a finales de 1950 se estimaba que el número de habitantes en el planeta era de 2 mil 600 millones, en 1999 aumentó hasta 6 mil millones y en 2015 la población mundial alcanzó los 7 mil 300 millones de habitantes. Esto significa un aumento del 1.33% de la población para el periodo 1950-1999 y de 1.2% para el periodo 1999-2015 (Sadik, 1999; *UN*, 2015). Lo anterior se traduce en una mayor demanda de recursos naturales, tales como agua, alimentos y territorio, principalmente, con el fin de satisfacer sus necesidades básicas. La producción industrial, agrícola y ganadera se ha incrementado hasta veinte veces desde 1900 hasta la actualidad, y con ello también se ha agravado la degradación del medio ambiente (Bidegain, 2009). En el 2015, aproximadamente 54% de la población mundial habitaba en ciudades (Grupo Banco Mundial, 2017). Este hecho convierte a la humanidad en una sociedad predominantemente urbana, cuya proporción se prevé que alcance el 69.6% para el 2050 de acuerdo con las Naciones Unidas (Díaz *et al.*, 2014; *UN*, 2014).

En México la población urbana se concentra en 59 zonas metropolitanas (ZM), que en 1990 sumaban más de 43 millones de personas y para 2010 se alcanzaron más de 63 millones, lo que significó una tasa de crecimiento anual del 3.9% durante este periodo (CONAPO, 2010). El Estado de Morelos cuenta con tres ZM: Jojutla, Cuautla y Cuernavaca, siendo esta última la más grande y atractiva, tanto para residir como para la instalación de actividades productivas (Olvera-Mancio 2016). El crecimiento poblacional en la ZM de Cuernavaca aumentó de poco más de 587

millones en 1990 a casi 925 millones en 2010, con una tasa de crecimiento de 4.5% anual (CONAPO, 2010).

Uno de los principales impactos del crecimiento urbano radica en la expansión territorial de las ciudades, pues incrementa la demanda de suelo para satisfacer las necesidades de viviendas y empleos resultando en diferentes cambios en el uso de suelo y en la configuración y movilidad interna de las ciudades. Además, dichos cambios afectan la disponibilidad de los recursos para el funcionamiento de las ciudades y de las áreas productivas que las rodean. Aunado a la disponibilidad de suelo, el agua es también un recurso sumamente indispensable para el crecimiento y desarrollo económico en áreas urbanas (Sánchez & Urquijo, 2014).

Por lo anterior, es de suma importancia la planeación y la gestión integral tanto de los recursos naturales como de las actividades humanas productivas de un territorio determinado para su aprovechamiento sustentable. Las unidades territoriales básicas para la gestión integral de los recursos naturales son las cuencas hidrológicas. Estas cuencas corresponden a unidades biogeofísicas con un alto grado de integridad funcional, consideradas sistemas relativamente homogéneos. Aunque existen procesos o actividades que atraviesan los límites de las cuencas, así como condiciones y actividades humanas distintas dentro de ellas, las características hidrológicas, geomorfológicas y ecológicas que se observan en una cuenca permite manejarlas como unidades básicas para la planificación y gestión de los recursos naturales, así como para mantener la calidad ambiental y la búsqueda del desarrollo sostenible (Barrow, 1998).

El crecimiento no planeado de las poblaciones ejerce presión sobre los recursos naturales en las cuencas hidrológicas. La problemática se complica aún más cuando no se establecen estrategias para el ordenamiento territorial, pues se generan procesos de degradación cuando el uso actual de suelo excede su capacidad, principalmente en la zonas media y alta de las cuencas, ya que generalmente constituyen las principales áreas de recarga hídrica (Richters, 1995; Hernández *et al.*, 2003). Otro gran problema al que se enfrentan las cuencas hidrológicas es la

variación espacial y temporal de la temperatura y la precipitación, afectadas por cambios climáticos y el actual calentamiento global (González-Villela *et al.*, 2017), que impacta directamente en la disponibilidad de agua ya que altera el ciclo hidrológico. Lo anterior ocasiona importantes impactos socioeconómicos y ambientales de gran proporción, debido a las afectaciones directas en las diferentes actividades humanas de carácter productivo, derivando en conflictos socioambientales (Montealegre & Pabon, 2000).

Crear modelos de proyección del clima y de los patrones tendenciales del cambio de uso de suelo y cubierta vegetal (CUSV), basados en el análisis de las variaciones espacial y temporal de estas características para una región en particular, se vuelve indispensable para implementar estrategias adaptativas y de mitigación ante las problemáticas previamente mencionadas, así como una buena gestión de los recursos naturales, especialmente del recurso hídrico y del suelo (Greene *et al.*, 2011).

Este trabajo busca analizar el CUSV en la microcuenca de Cuernavaca, que forma parte de la ZM más grande del Estado de Morelos, así mismo busca determinar el impacto de los CUSV y la variabilidad climática sobre los procesos hidrológicos de la microcuenca, principalmente en la infiltración. Lo anterior con el fin de que los resultados obtenidos contribuyan como base a las instituciones gubernamentales, científicas y sociales para la creación de estrategias y políticas que permitan un manejo y gestión sustentable de los recursos naturales, suelos y agua, principalmente.

ii. Planteamiento del problema

La urbanización y el crecimiento desorganizado y sin ningún tipo de planeación de la ZM de Cuernavaca han generado grandes y acelerados cambios en el uso del suelo, y con éstos se han incrementado las tasas de deforestación y los cambios en la cubierta vegetal (Monrroy-Ortiz, 2006). Estos cambios afectan directamente al ciclo hidrológico, e influyen en la variabilidad climática, lo que repercute en la disponibilidad de agua de la microcuenca.

Sin embargo, a la fecha no se han realizado estudios concretos de dicha problemática que permitan identificar las zonas más críticas, y de esta manera establecer estrategias de adaptación y mitigación, así como planes de desarrollo urbano y ordenamiento territorial orientados al desarrollo sustentable y una correcta gestión de los recursos naturales, como el territorio y el agua.

iii. Justificación

La disponibilidad de agua para aprovechamiento humano es uno de los principales problemas en materia ambiental, debido a la alta demanda se ejercen fuertes presiones sobre dicho recurso. Así mismo, también se relaciona fuertemente a otras problemáticas como el cambio climático, la erosión del suelo, la sobreexplotación de acuíferos, y cambios en los usos del suelo (ya sea para fines agrícolas, la expansión urbana o las actividades industriales), factores íntimamente ligados a la urbanización (Monrroy-Ortiz, 2006). Estos cambios alteran la función reguladora de los bosques sobre los flujos de agua y se condicionan la disponibilidad de los recursos hídricos (Calder *et al.*, 2007), ocasionando grandes afectaciones sobre el correcto funcionamiento de las cuencas e impactando prácticamente a todas las dimensiones del desarrollo humano (Landa, Magaña & Neri 2008; Tiscornia *et al.*, 2016).

Morelos se encuentra en la región del alto balsas y medio balsas (figura 1), zonas de especial importancia hídrica ya que registra la mayor precipitación pluvial al año (DOF, 26 de enero de 2011). Sin embargo, esta zona sufre de los efectos regionales y locales de la presión antropogénica para aprovechamiento de la oferta potencial del recurso (Valencia-Vargas, 2015). Los acuíferos, de los que se extrae el agua subterránea para su aprovechamiento, son recargados y alimentados por la infiltración vertical (Monrroy-Ortiz, 2006).

De los cuatro acuíferos con los que cuenta el Estado, el de Tepalcingo-Axochiapan tiene una sobreexplotación de cinco millones de metros cúbicos, mientras que, en los acuíferos de Cuernavaca, Cuautla-Yautepec y Zacatepec casi

alcanzan su equilibrio, lo que significa que cuentan con poca disponibilidad para nuevas concesiones (figura 2) (INE & UAEM 2006; Rivera, 2012).

Según datos de la CONAGUA (Monrroy-Ortiz, 2006; Rivera, 2012), del total del líquido extraído de los acuíferos de Morelos, el mayor volumen es destinado al sector agrícola (58%), seguido del sector público-urbano (34.9%), el cual se ha incrementado en las últimas décadas, le sigue el sector industrial (5.7%), y finalmente el uso doméstico (0.2%).

Las formaciones geohidrológicas explotadas en el Estado de Morelos corresponden a las zonas del Chichinautzin y Cuernavaca (figura 3), las cuales representan las zonas más importantes de recarga de acuíferos del Estado de Morelos (Vega *et al.*, 2008). En la ciudad de Cuernavaca, la permeabilidad de los suelos se modifica por su recubrimiento con concreto y asfalto, repercutiendo en la infiltración y contribuyendo al aumento de gases de efecto invernadero lo cual se relaciona con el calentamiento global y la variabilidad climática, alterando el ciclo hidrológico y por consiguiente la disponibilidad de agua (Monrroy-Ortiz, 2006). Es por esto que el análisis de observaciones hidroclimáticas es crucial en estudios dedicados a comprender el ciclo hidrológico y a mejorar el manejo de los recursos hídricos, pues provee información directa sobre cambios hidrológicos (Antico *et al.*, 2014).

Lo anterior nos lleva a prestar particular atención a la microcuenca de Cuernavaca, pues ésta alberga a la ZM de dicha ciudad y es vulnerable a los deterioros de los servicios hidroclimáticos que brinda. Además, la importancia de esta zona radica en que no sólo representa la zona de recarga del acuífero, sino también forma parte de la zona alta de la subcuenca del Río Apatlaco. Esto significa que funciona como zona de cabecera o captación de toda la subcuenca. Dicha subcuenca también alberga a la ZM de Jojutla-Zacatepec, que se encuentra en la zona baja, que es la zona de emisión. Así las alteraciones que se den en la zona alta repercutirán también en las zonas medias y bajas de toda la subcuenca (figura 4).

Con los resultados de este trabajo, se pretende tener una base científica sólida, a partir de la cual surjan estrategias políticas y sociales de adaptación y mitigación ante la problemática mencionada. Además, pretende servir como base para una gestión, manejo integral y sustentable del recurso hídrico.

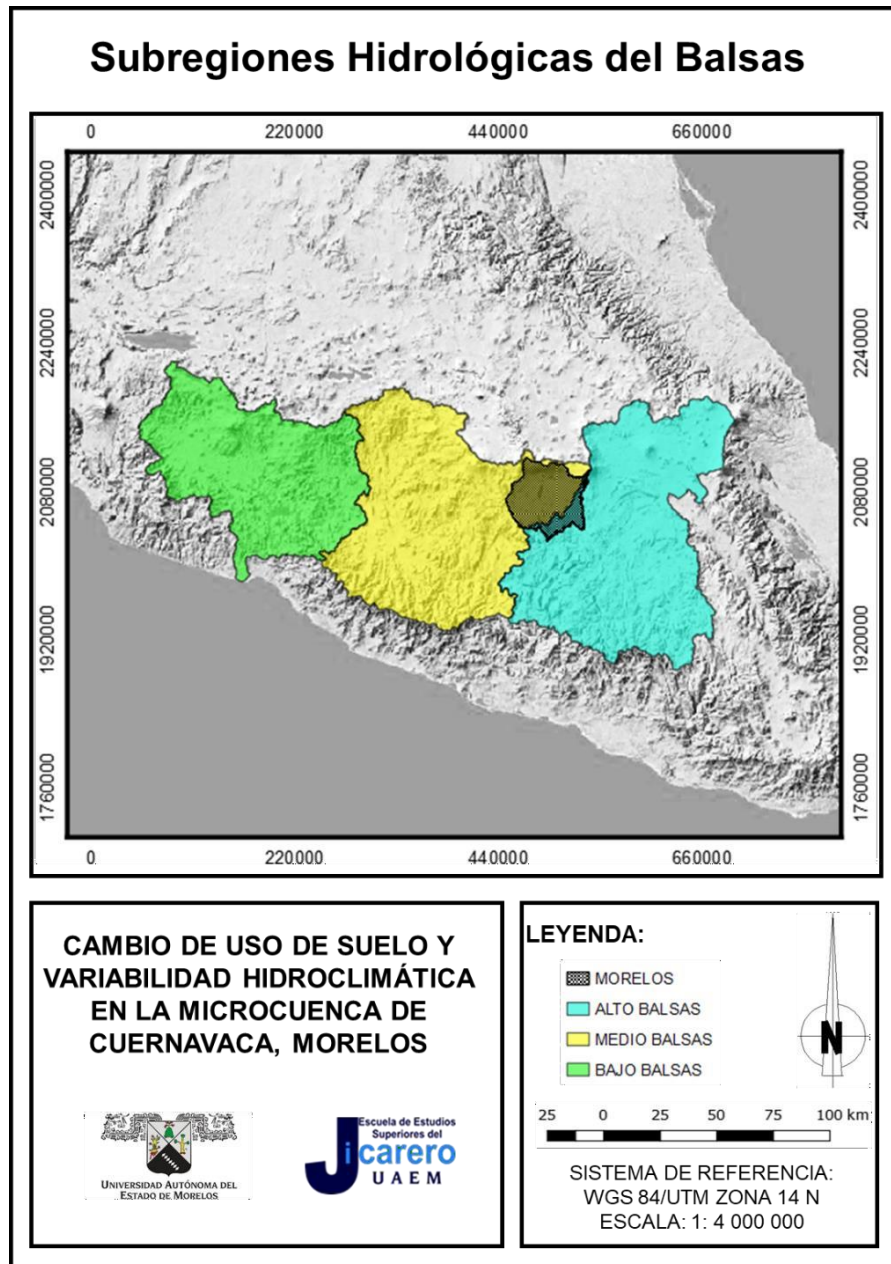


Figura 1. Mapa de ubicación de las sub-regiones hidrológicas de la Región del Balsas

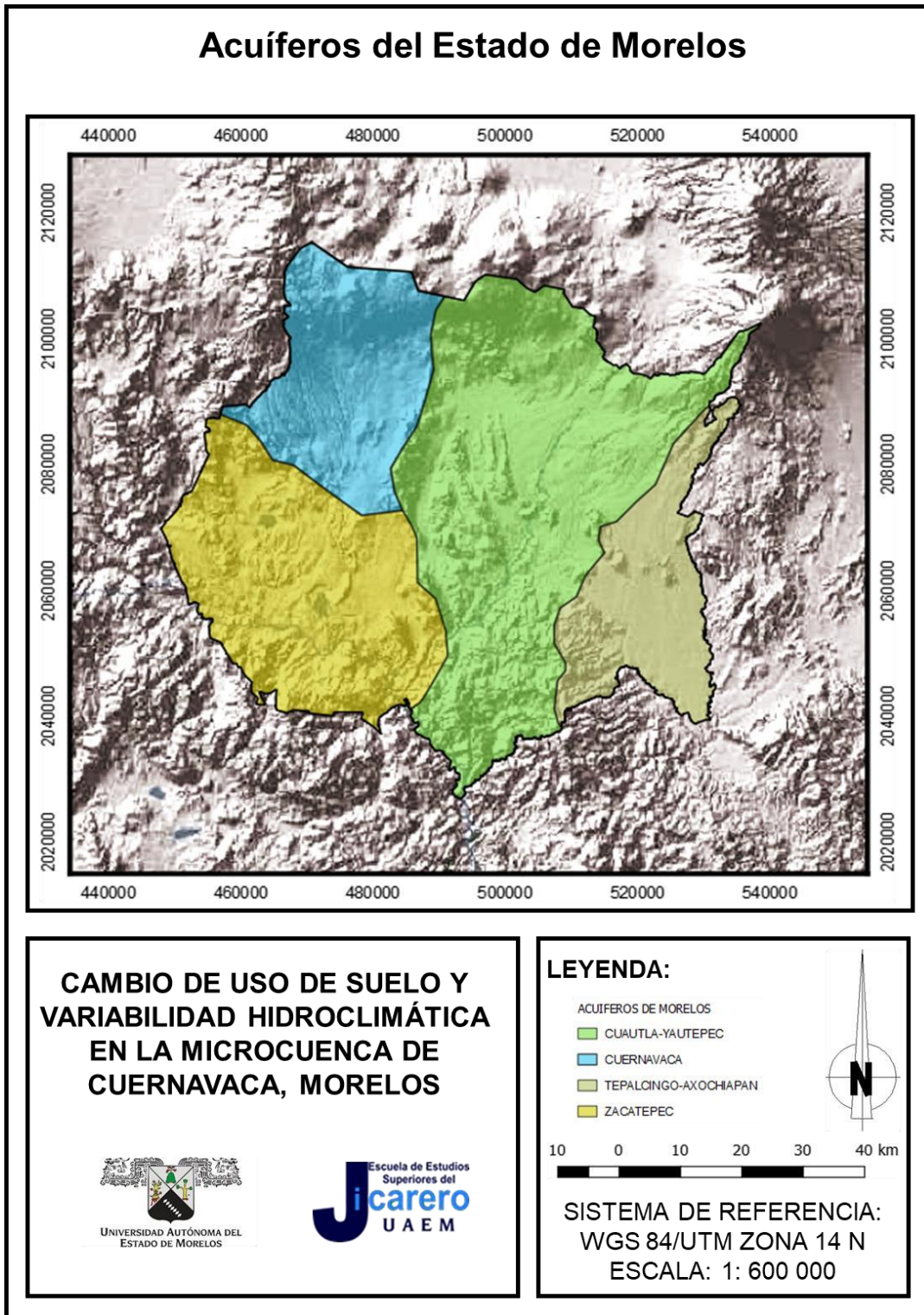


Figura 2. Mapa de ubicación y distribución de los acuíferos del Estado de Morelos

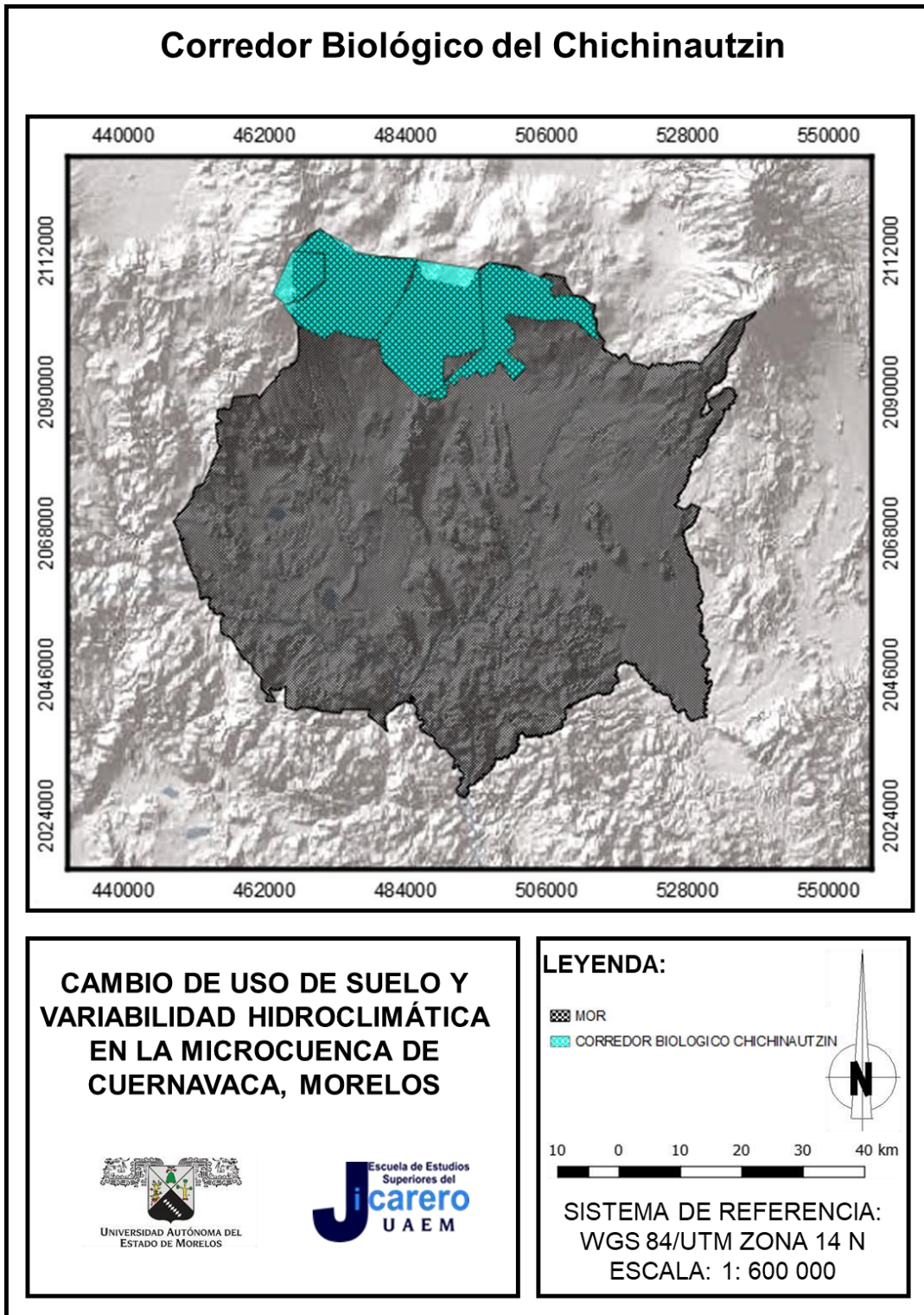


Figura 3. Mapa de ubicación del Corredor Biológico del Chichinautzin

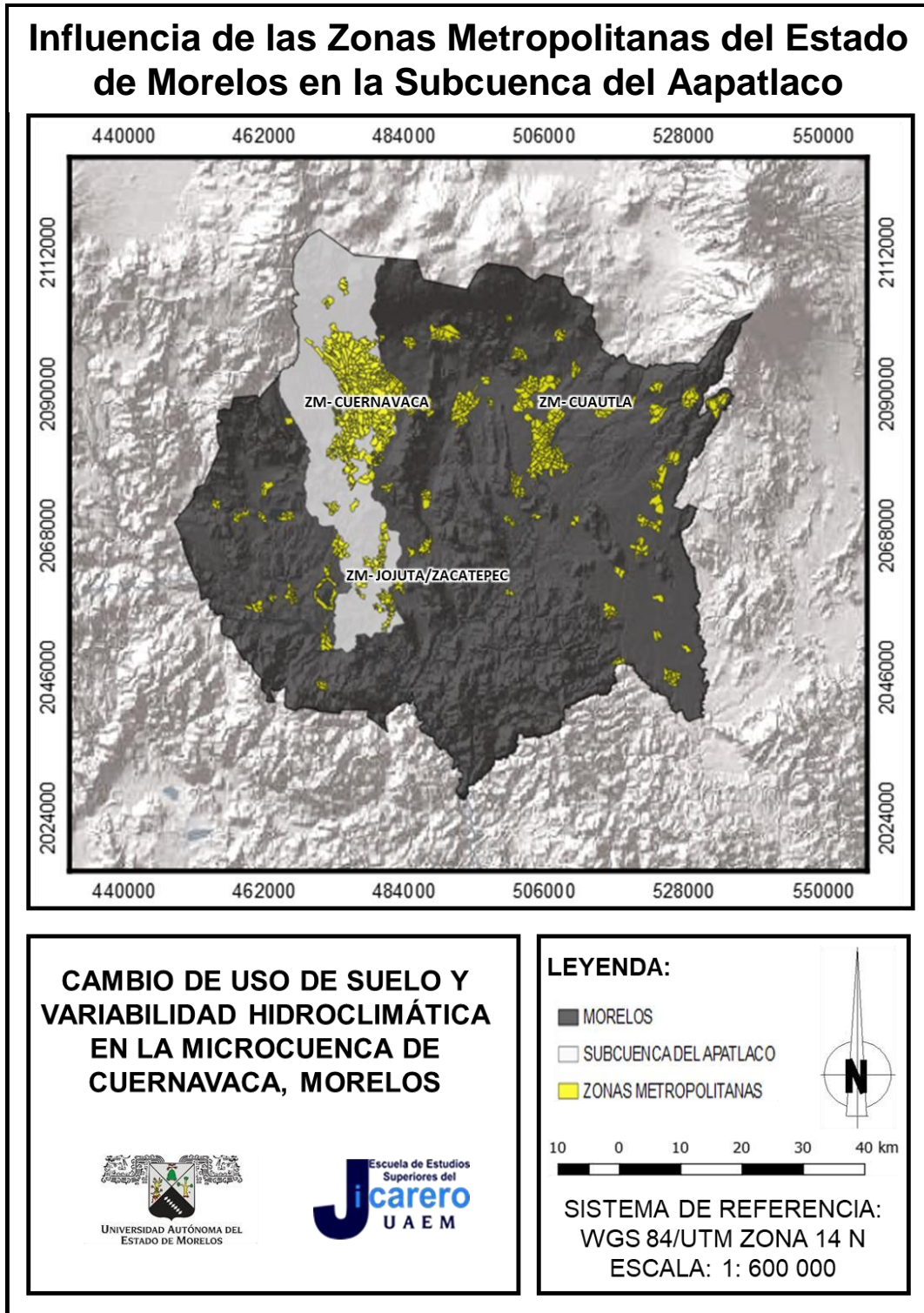


Figura 4. Mapa de las ZM del Estado de Morelos y su influencia en la subcuenca del Río Apatlaco

iv. Objetivos

iv.i. Objetivo general

Determinar los cambios de uso de suelo y cubierta vegetal (CUSV) así como la variabilidad climática y sus efectos en la capacidad de infiltración de la microcuenca de Cuernavaca, durante el periodo de 1997-2017.

iv.ii. Objetivos específicos

1. Determinar la tasa de deforestación y CUSV en la microcuenca de Cuernavaca, durante el periodo 1997-2017.
2. Analizar las variaciones climáticas en la microcuenca de Cuernavaca, por medio del año meteorológico típico (AMT), de los periodos 1992-1997 y 2012-2017.
3. Determinar los cambios en la capacidad de infiltración y la intercepción de la precipitación por la cubierta vegetal en la microcuenca de Cuernavaca en el periodo 1997-2017.

Capítulo I. Generalidades

I.1. Marco teórico

I.1.1. Cuencas hidrológicas y su estructura jerárquica anidada

Una cuenca hidrológica se define como una unidad territorial superficial que se delimita por divisorias o “parteaguas”. La cuenca hidrológica está conformada por áreas de drenaje superficial y a través de ellas escurre y se infiltra la precipitación, principalmente pluvial, drenando hacia un cauce principal y finalmente a un mismo punto de salida. Existen tres tipos de cuencas (Figura 5): (i) exorreicas, que descargan su escorrentía superficial hacia el mar o hacia un sistema lagunar costero; (ii) endorreicas, las cuales drenan hacia un cuerpo de agua interior como un lago, también llamadas cuencas cerradas; y (iii) arreicas, que se caracterizan por infiltrar sus aguas antes de llegar al mar o encontrar un cuerpo colector observable (INEGI, INE, CONAGUA, 2007; Aguilera, 2015).

Algunos autores definen la cuenca hidrológica como el espacio donde se organizan las diferentes actividades humanas, conociendo y comprendiendo las estructuras sistémicas que la conforman, así como las relaciones espaciotemporales que la determinan (Moreno & Renner, 2007). Además de los elementos naturales bióticos, como el hombre, la flora y la fauna, y abióticos como el agua, el suelo, el aire, los minerales, la energía y el clima, condicionados por características geográficas (latitud, altitud), geomorfológicas (relieve, densidad y tipo de drenaje), geológicas (orográficas, volcánicas y sísmicas) y demográficas, agregan al concepto de cuenca elementos antrópicos, que pueden ser de carácter socioeconómico y jurídico-institucional. Dentro de los elementos de carácter socioeconómico se encuentra la tecnología, la organización social, la cultura y las tradiciones, la calidad de vida y la infraestructura desarrollada. Dentro de los elementos jurídico-institucionales están las políticas, las leyes, la administración de los recursos y las instituciones involucradas en la cuenca.

Las cuencas cuyas aguas son conducidas hasta su desembocadura en el mar, pueden ser subdivididas en subcuencas, que generalmente vierten sus aguas en un lago o en la confluencia con otros ríos. Estas subcuencas son delimitadas ya sea a partir de criterios meramente topográficos, con base en su nivel altitudinal (cuenca alta, media, baja); e hidrográficos (red de drenaje superficial), o con base en su función primordial (cabecera-captación y transporte-emisión) (INEGI, INE, CONAGUA, 2007; Aguilera, 2015).

Una microcuenca, por su parte se distingue de las otras categorías (cuenca, subcuenca) por su superficie. La microcuenca se suele ligar a una comunidad que hace uso y manejo de forma directa de los recursos del área (principalmente suelo, agua, vegetación y fauna; Aguilera, 2015). La interrelación de la comunidad con el medio resulta en interacciones indivisibles, entre los aspectos económicos, sociales y ambientales. La dimensión de una microcuenca varía de acuerdo con la escala de análisis y el propósito: si bien suelen rondar en la literatura entre 250 y 2000 hectáreas, se identifican unidades denominadas microcuencas de una extensión notablemente mayor a dichas superficies (Moreno & Renner, 2007).

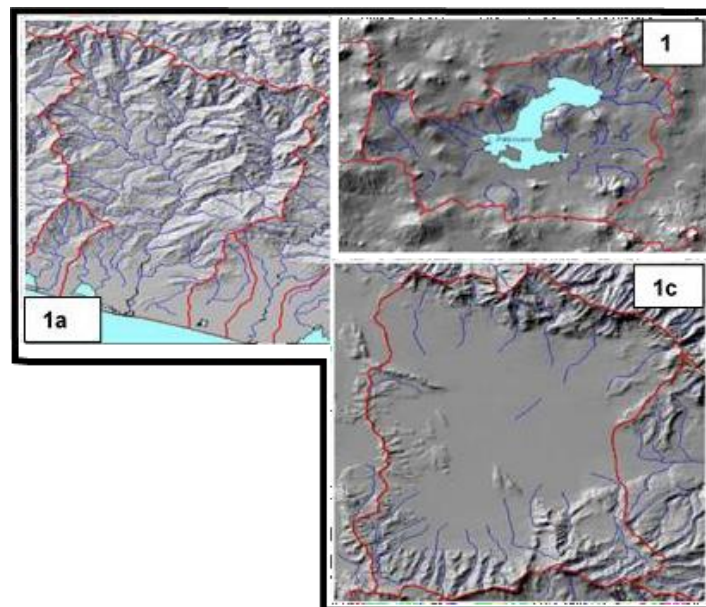


Figura 5. Ejemplo de una cuenca exorreica (1a), endorreica (1b) y arreica (1c) (INEGI, INE, CONAGUA 2007).

I.1.2. Cuencas hidrológicas en México

En México, la cuenca hidrológica la define la Ley de Aguas Nacionales como (Monterrosa, 2015):

“La unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas o divisoria de las aguas - aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad -, en donde escurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente”

Mass (2015), brinda una definición para cuenca desde una perspectiva socio ecosistémica la cual resume y engloba todos los aspectos mencionados anteriormente; y la define como:

“Un sistema complejo humano-bio-físico integrado, que debido a la naturaleza y diversidad de sus componentes hace que el comportamiento del agua en la cuenca no sólo sea producto de las leyes y procesos naturales, sino también de las leyes y procesos sociales”.

Plantea que la cuenca hidrológica constituye la unidad territorial básica para la planeación y el manejo de los recursos naturales, ya que su análisis requiere considerar interacciones sistémicas entre el medio biofísico, los modos de apropiación del territorio y las instituciones existentes. Además, la estructura jerárquica anidada (microcuencas dentro de subcuencas a su vez embebidas en cuencas más grandes) y con límites definidos (el parteaguas geográfico o geológico), permite un monitoreo eficiente, lo cual es indispensable para la implementación del manejo adaptativo de los recursos naturales.

A partir de esta perspectiva socio ecosistémica surge la necesidad de delimitar las cuencas hidrológicas de nuestro país para una buena administración de los recursos y servicios que éstas nos ofrecen. Se requiere conocer la oferta y demanda de dichos recursos para mantener un balance y poder tomar decisiones acertadas al momento de otorgar o negar el recurso siempre en función de su disponibilidad (Monterrosa, 2015).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene como obligación delimitar las cuencas en todo el territorio nacional, así como determinar, publicar y actualizar la disponibilidad de aguas nacionales, tanto superficiales como de los acuíferos al menos cada tres años (CONAGUA, 2015).

CONAGUA ha delimitado 37 grandes cuencas dentro del país, también denominadas Regiones Hidrológicas (RH), pero para fines netamente administrativos del recurso hídrico, ha hecho otra delimitación con base en estas RH considerando municipios completos. Lo anterior resulta en 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) administradas por el correspondiente Organismo de Cuenca y por la sociedad organizada a través de los Consejos de Cuenca y de las Comisiones de Cuenca, estos aspectos están contemplados dentro de la Ley de Aguas Nacionales. Las 37 RH están divididas en 731 cuencas, con el fin de poder determinar la disponibilidad de agua superficial por cuenca. La delimitación de éstas se llevó a cabo con la cartografía digital que produce el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); específicamente se utilizó la carta topográfica escala 1:250,000, y a partir de ésta y con el software ArcGIS se generó un modelo de elevación con resolución de 90 metros por pixel (CONAGUA, 2006; CONAGUA, 2015; Monterrosa, 2015). En 2007 se delimitaron 1,471 cuencas hidrológicas, de las cuales 1,389 son exorreicas, 77 endorreicas y 5 arreicas (INEGI, INE, CONAGUA, 2007; SEMARNAT, 2013).

I.1.3. Cuencas hidrológicas frente al cambio climático global

El cambio climático impacta directamente los patrones de temperatura y el comportamiento de la precipitación, afectando la dinámica hidrológica y el aporte de

agua disponible para las actividades productivas y el consumo humano. Estos impactos no se rigen ni están determinados por estructuras administrativas como municipios o Estados, sino más bien, se expresan a través de los flujos de agua que los atraviesan, integran y caracterizan a las cuencas hidrológicas. Para mitigar los impactos del cambio climático desde una perspectiva territorial se debe trabajar desde un enfoque de cuenca (SEMARNAT, 2013).

En la Estrategia Nacional de Cambio Climático se reconoce que (SEMARNAT, 2013; INECC, 2013):

(i) es necesario dar preferencia a medidas de gestión integral de la cuenca a fin garantizar la seguridad alimentaria ante las amenazas climáticas;

(ii) se debe impulsar con énfasis la gestión territorial en cuencas hidrológicas para la reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático de ecosistemas;

(iii) es necesario desarrollar programas de adaptación para mantener e incrementar la disponibilidad del agua superficial y subterránea, con un enfoque de manejo integral de cuencas hidrológicas.

I.1.4. El clima y sus elementos

El clima es el componente del medio físico natural que ejerce una acción más directa sobre los ecosistemas y el hombre. El hecho de que los desiertos y las áreas polares sean regiones de grandes vacíos demográficos es porque están condicionados por temperaturas extremas altas y bajas respectivamente, y las actividades esenciales, como la producción de alimentos, dependen de las condiciones climáticas. Los temas estudiados por la climatología están íntimamente relacionados con los hechos que se producen en la vida cotidiana y, a pesar de que la sociedad industrial mantiene una dependencia menor con el clima en comparación con una sociedad agrícola, existe una gran influencia entre éste y el modo de vivir y costumbres actuales (Fernández, 2012).

El clima en sentido estricto se entiende como las condiciones meteorológicas normales de un lugar y período de tiempo determinados. Involucra elementos físicos como temperatura, precipitación, humedad relativa, presión atmosférica y viento. El clima puede explicarse mediante descripciones estadísticas de las tendencias y la variabilidad de estos elementos en una región, o del mundo en su conjunto, durante cualquier período de tiempo (Fernández, 1995; Rodríguez *et al.*, 2004; OMM, 2011).

El clima es el resultado del funcionamiento de un sistema dinámico y abierto, alimentado por la energía procedente del sol y constituido por cinco elementos relacionados e interdependientes: la atmósfera, los océanos, la criósfera, la superficie terrestre y la biósfera (Mauro-Morales, 2002). El conocimiento y comprensión del clima exigen tener muy claras cuatro ideas fundamentales: (i) la diferenciación entre tiempo atmosférico y clima, (ii) los factores condicionantes, (iii) los elementos, y (iv) la escala (Fernández, 1995).

Cuando describimos las condiciones atmosféricas en un momento y lugar concretos, estamos hablando del tiempo atmosférico (Rodríguez *et al.*, 2004), el cual varía con bastante frecuencia, un día éste puede ser muy distinto al del precedente e incluso a lo largo de un mismo día el tiempo atmosférico varía. Por su parte, el clima sigue ritmos estacionales que suceden con bastante regularidad explicando algunos de los rasgos geográficos más característicos de una zona como los tipos de vegetación, las actividades agrarias o el tipo de vivienda tradicional (Fernández, 2012).

En resumen, el clima se suele definir como el estado promedio del tiempo atmosférico o, en un sentido más riguroso, como una descripción estadística de este en términos de los valores medios y de la variabilidad de éstos durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años (Gómez *et al.*, 1993). En un sentido más amplio, el clima es el estado del sistema climático en términos estadísticos (IPCC, 2007).

Las características geofísicas y geográficas de las que dependen los mecanismos que determinan el clima de una zona concreta se les denomina

factores controladores del clima. Estos factores pueden ser de tipos astronómicos, geográficos y meteorológicos (Rodríguez *et al.*, 2004; Fernández, 2012). Dentro de los primeros se encuentran la distancia entre el sol y la Tierra, la inclinación del eje de rotación y la actividad solar. Los factores geográficos incluyen la latitud, la distribución tierra-mar, la orografía y las corrientes oceánicas. Los factores meteorológicos se refieren a la localización de los principales centros de bajas y altas presiones, vientos dominantes, etc.

El clima puede tener variaciones en todas las escalas temporales y espaciales. Estas variaciones, más amplias que las de los fenómenos meteorológicos, se dan en el estado medio y en otras características estadísticas (p. ej. desviación típica, sucesos extremos, etc.). A esto se le conoce como variabilidad climática y puede deberse a factores internos naturales del sistema climático o a variaciones de forzamiento externo, ya sea de origen natural o antropogénico (IPCC 2007; Argeñal, 2010).

Las variaciones estadísticas del clima pueden persistir durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). A esto se le conoce como Cambio Climático y, al igual que la variabilidad climática, se puede deber a procesos naturales internos, cambios del forzamiento externo o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras (IPCC 2007; Argeñal, 2010).

I.1.5. Ciclo hidrológico y balance hídrico

El agua es el principal constituyente de los seres vivos y la sustancia más abundante en la Tierra. Este recurso constituye un factor clave en la climatización de nuestro planeta para la existencia humana y tiene una gran influencia en el progreso de la civilización (Brutsaert, 2005).

El agua se encuentra distribuida en la atmósfera, océanos, glaciares, lagos, ríos y el subsuelo en diferentes proporciones conformando la hidrósfera (Gómez *et al.*, 1993). Se estima que existen alrededor de 1 300 millones de km³ de agua, de

los cuales el 97% se concentra en los océanos como reserva de agua salada, el 2% constituye los hielos y glaciares, y sólo un porcentaje inferior al 0.5% forma parte del agua fácilmente aprovechable por el hombre (CONAGUA, 2016).

El agua circula en la hidrósfera por medio del ciclo hidrológico, impulsado por dos fuerzas básicas: la radiación solar y la fuerza de gravedad. El ciclo hidrológico constituye uno de los procesos naturales más importantes de las cuencas hidrológicas. Representa el concepto base y desde el cual parte la hidrología. Esta ciencia, según el *U.S Federal Council for Science and Technology*, estudia la ocurrencia, circulación, y distribución de las aguas de la Tierra, sus propiedades físicas y químicas, así como, su relación con el ambiente y los seres vivos (Campos, 1998; Pladeyra *et al.*, 2006).

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculante, indefinido, y permanente (figura 6). De manera general, la radiación solar proporciona la energía para calentar y evaporar el agua de los océanos, llega a la atmósfera, se condensa y es arrastrada por los vientos hacia los continentes. Debido a la fuerza de gravedad, ésta precipita y desciende hacia la corteza terrestre. Durante su trayecto, una parte vuelve a evaporar hacia la atmósfera, otra parte es interceptada y absorbida por la cubierta vegetal y es retenida como humedad en los suelos, regresando a la atmósfera casi en su totalidad por efectos de la evapotranspiración. Otra parte se infiltra a los acuíferos, se almacena y vuelve a la superficie en forma de manantiales. Finalmente, la fracción restante escurre hasta los cuerpos de agua superficiales como lagos y ríos, los cuales desembocan en el mar para iniciar nuevamente el ciclo (Campos, 1998; Maderey & Jiménez 2005; Pladeyra *et al*, 2006).

El ciclo hidrológico normalmente es estudiado por la hidrología en su fase terrestre, es decir, el recorrido superficial o subterráneo del agua y su almacenamiento en la corteza terrestre continental. La unidad básica para su análisis es la cuenca hidrológica y se cuantifican las cantidades de agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico. Este análisis se conoce como balance hídrico,

el cual estima los volúmenes de agua que representan las entradas y salidas de la cuenca en un periodo de tiempo determinado. Conocer el balance hídrico de una cuenca es necesario para la evaluación de los recursos hídricos y su correcto aprovechamiento.

En general, del agua que cae en un determinado sitio (precipitación = P), una parte vuelve a la atmósfera, ya sea por evaporación directa o por transpiración de la vegetación (evapotranspiración = ETR); otra parte escurre por la superficie (escorrentía superficial = ES), confluyendo a través de la red de drenaje hasta alcanzar los cauces principales y finalmente el mar, y el resto se infiltra en el terreno y se incorpora al sistema de aguas subterráneas o acuíferos (infiltración = I). Estas magnitudes deben cumplir con la ecuación del balance hidrológico (Campos, 1998; Pladeyra *et al*, 2006; Maderey & Jiménez 2005):

$$P - ETR = ES + I$$

La precipitación es la caída de partículas líquidas o sólidas de agua. Ésta origina a todas las corrientes superficiales y subterráneas, y proporciona la entrada de agua a la cuenca. La precipitación es consecuencia de la condensación y formación de nubes en la atmósfera, cuando el aire es enfriado. Este enfriamiento es causado por expansión adiabática de las masas de aire ascendentes, debido a la disminución de presión atmosférica con la altura.

Por su parte, la evaporación en un contexto meramente físico es la transformación del agua líquida a su fase gaseosa, y depende principalmente de la temperatura. Durante el ciclo hidrológico, el agua evaporada proviene de distintas fuentes, principalmente de las aguas superficiales, y de los suelos húmedos y la vegetación (evapotranspiración).

La infiltración es el volumen de agua que se mueve de la superficie al interior del suelo. Depende principalmente de las condiciones del suelo como la permeabilidad, textura, tipo de suelo y tipo de vegetación, así como la intensidad de

la precipitación. Una vez que el suelo alcanza su capacidad de absorción y se satura el resto de la precipitación se vuelve escorrentía.

La escorrentía es el exceso de agua superficial y subterránea que escurre hasta llegar a los ríos y posteriormente descarga en los océanos. Los factores directamente relacionados a la escorrentía son principalmente de tipo climáticos y fisiográficos (Maderrey & Jiménez 2005).

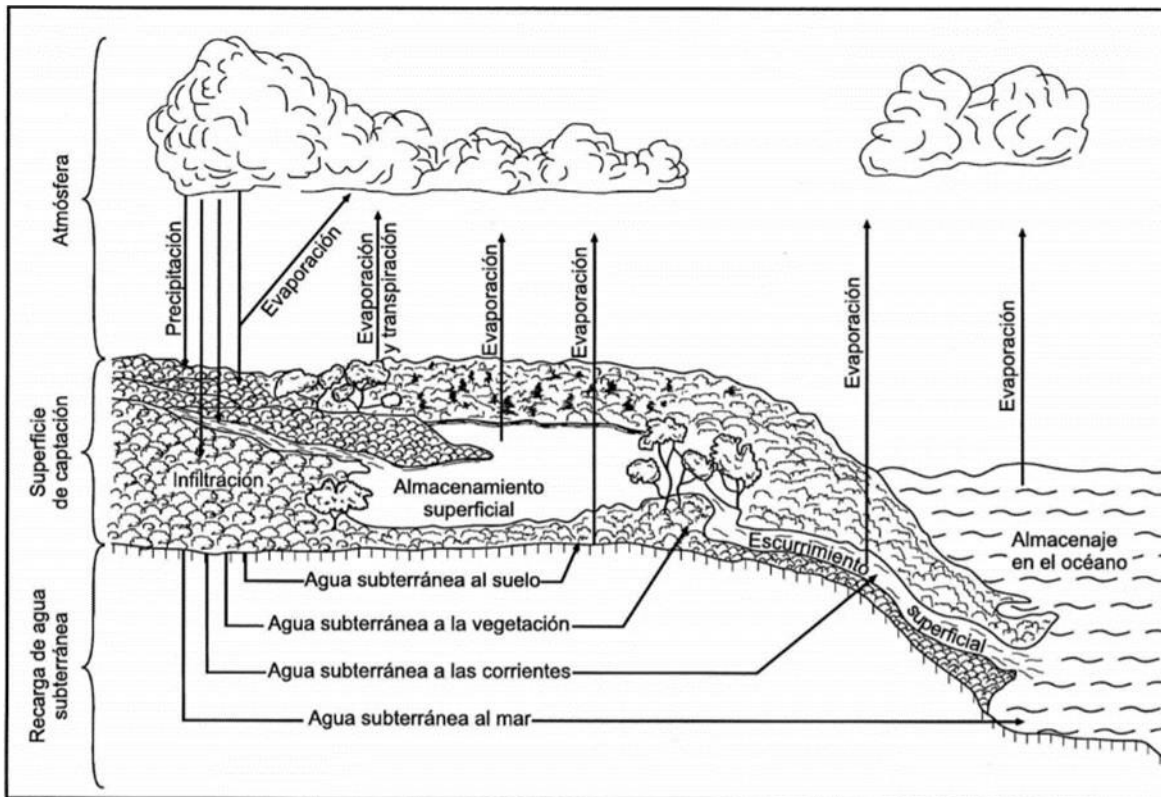


Figura 6. Esquema general del ciclo hidrológico (Maderrey & Jiménez, 2005)

I.1.6. Cambio de uso de suelo y cubierta vegetal

En México, los procesos de cambio en el uso del suelo y cubierta vegetal (CUSV) son producto de la interacción de diversos factores geográficos, económicos, políticos, sociales, demográficos y culturales. El cambio de la cubierta vegetal de bosques a áreas agrícolas o asentamientos urbanos repercute en los aspectos naturales, económicos y sociales (García *et al.*, 2012). En los últimos años, el cambio del uso de suelo ha sido reconocido como uno de los principales factores implicados en el cambio global, alterando procesos y ciclos (Pineda *et al.*, 2009). Con ello, se ha sumado importancia en la investigación ambiental el estudio de los procesos implicados en el cambio de uso del suelo y cubierta vegetal. Esto ha permitido identificar que dichos cambios repercuten a nivel global en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al calentamiento global y cambio climático. Así mismo a nivel regional, se ha identificado que afecta el funcionamiento de las cuencas hidrológicas y los asentamientos humanos, y finalmente a nivel local destaca la degradación de los suelos, pérdida de la biodiversidad de especies, y alteraciones en el microclima. (Bocco *et al.*, 2001).

El análisis del cambio en la cobertura y uso del suelo proporciona la base para conocer las tendencias de los procesos de fragmentación, deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Lambin *et al.* 2001). Una manera de evaluar estos cambios es mediante su dinámica espacio-temporal. Tradicionalmente, estas estimaciones se realizan a través de percepción remota (usualmente fotografías aéreas e imágenes de satélite) o cartografía temática de cobertura (Bocco *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2002).

El uso de fotografías aéreas ha sido la manera más común de obtener información sobre los CUSV. Sin embargo, la adquisición de imágenes satelitales de gran resolución espacial y espectral, como las imágenes Landsat ETM, y la aparición de los SIG para el procesamiento de dichas imágenes han permitido la

implementación de diversas metodologías y técnicas de clasificación para la obtención de mapas de uso de suelo y vegetación (Franco *et al.*, 2006).

Los cambios en la cubierta vegetal implican un declive en el potencial de uso y aprovechamiento de los diversos bienes y servicios ambientales, y están directamente relacionados con alteraciones al ciclo hidrológico y el resto de los ciclos biogeoquímicos, y por ende en la disponibilidad del recurso hídrico (Bocco *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2002; Pineda *et al.*, 2009; García *et al.*, 2012).

La elaboración de un mapa de vegetación se basa en el supuesto de que se pueden caracterizar comunidades vegetales como unidades naturales según su fisionomía y composición florística. Consecuentemente, un buen mapa de vegetación proporciona información resumida y gráfica sobre los paisajes, ecosistemas y biodiversidad (Killen *et al.*, 2005). Generar información geográfica que nos permita conocer la dinámica en los cambios del paisaje, cubiertas vegetales y usos de suelo, suscitados en el tiempo, permite un monitoreo constante de procesos de deforestación, fragmentación y pérdidas de riqueza y biodiversidad en los ecosistemas, así como la localización y delimitación de áreas prioritarias para la conservación.

I.1.7. CUSV y sus efectos en los procesos hidrológicos de las cuencas

El clima, en conjunto con los cambios en el uso de suelo y de la cobertura vegetal o deforestación, impactan considerablemente en el balance hídrico de una cuenca (Valenzuela-Núñez *et al.*, 2012;). Estos dos factores influyen en diversos parámetros, como son la captación e infiltración de agua, escorrentía superficial, evapotranspiración, entre otros (Kundu *et al.*, 2017).

Con la urbanización, los suelos pasan de tener cubiertas permeables como las tierras de cultivo, tierras baldías y zonas forestales, a tener cubiertas impermeables. Esto provoca que durante las lluvias el escurrimiento ya no sea recogido, retardado e infiltrado a los acuíferos. Por el contrario, los caudales de escurrimiento son mayores y se concentran más rápido en los puntos de convergencia (Figura 7). Lo

anterior resulta en inundaciones y, como efecto adicional y contrastante, la tasa de recarga de los acuíferos disminuye, provocando escases del recurso para aprovechamiento humano y de la cuenca propia, para su apto funcionamiento (Aguilera, 2015).

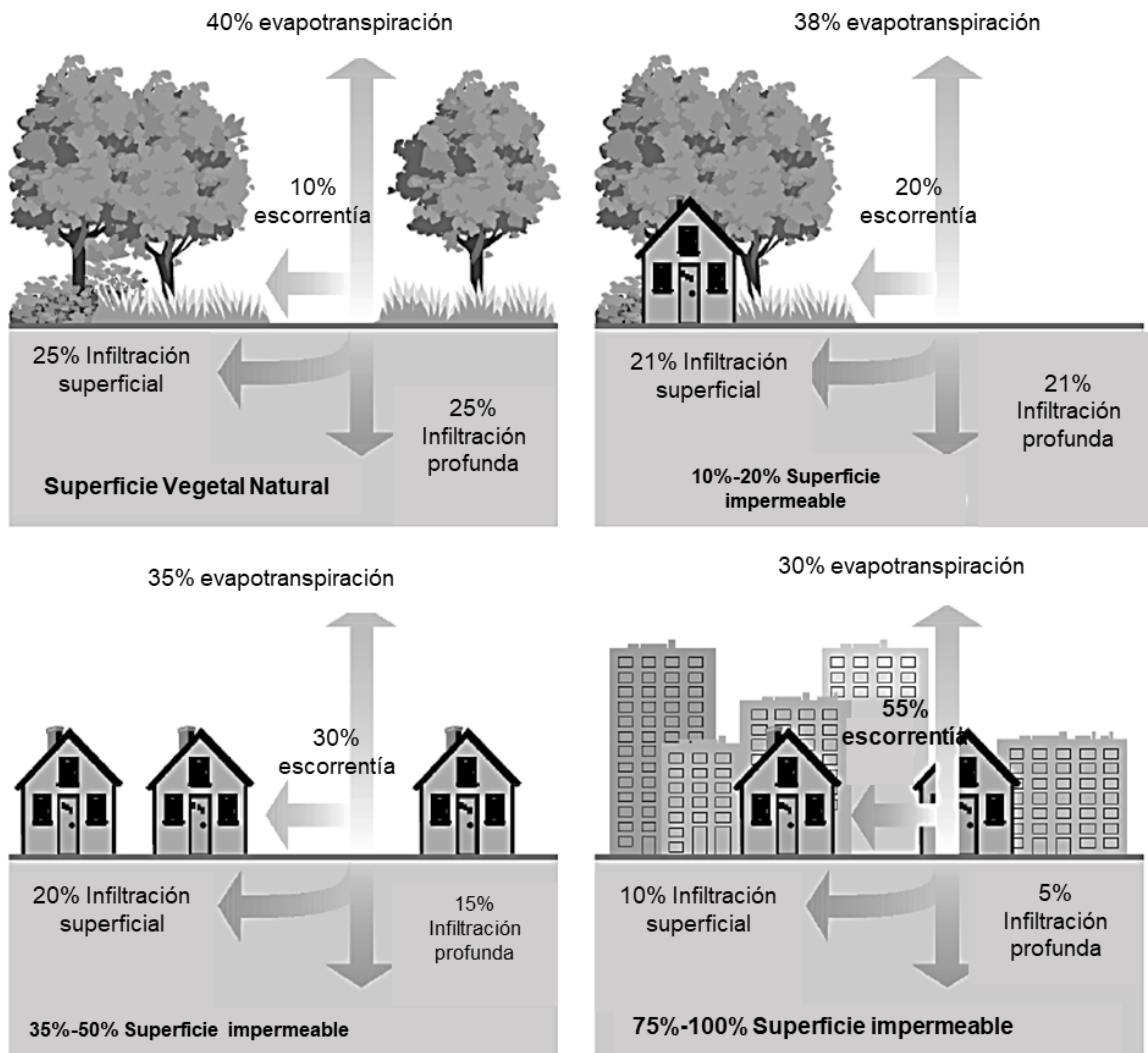


Figura 7. Efecto de la urbanización en los procesos hidrológicos (modificado de Aguilera, 2015)

I.2. Antecedentes

Varios han sido los estudios para determinar las tendencias climáticas que se presentan en diversas partes del mundo y su relación con el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua, tanto a nivel regional como a nivel local, buscando pronosticar el comportamiento del clima en un futuro (p. ej. Haiming *et al.*, 2015; Tan *et al.*, 2017; Brown *et al.*, 2017). Dichos estudios se han llevado a cabo con diversos fines, entre los que destacan los aplicados a sectores productivos agrícolas, y los de prevención de fenómenos climáticos extremos, como sequías o inundaciones, que puedan comprometer la integridad de la población. Las metodologías empleadas también han sido muy distintas, dependiendo de los objetivos específicos de cada investigación.

Martínez-Austria & Patiño-Gómez (2012) manifiestan que las variaciones de temperatura, nivel del mar y deshielo observados y registrados en las últimas décadas, en el hemisferio Norte y en el trópico de cáncer (en el que se ubica México), hacen al país altamente vulnerable ante el cambio climático. Prevén importantes disminuciones en la precipitación y por ende en el escurrimiento e infiltración, lo que ocasionará escasez y presión sobre los recursos hídricos. Dichos autores ponen en manifiesto que las condiciones desfavorables pronosticadas se están registrando ya en algunas de las principales cuencas hidrológicas de México y que, de no adoptarse medidas de adaptación, estará en riesgo la suficiencia hídrica y alimentaria del país.

Condiciones muy similares de vulnerabilidad, observaron García *et al.*, (2012) para Colombia. Estos autores exponen que los impactos sobre los sistemas de agua dulce principalmente se verán reflejados en las cuencas, donde las precipitaciones en tiempos húmedos serán más intensas y en épocas de secas las precipitaciones serán más bajas; impactando directamente en la economía, medio ambiente y sociedad.

Modelos de variabilidad climática

Amador & Alfaro (2009) describen los Modelos de Circulación General Atmosféricos-Oceánicos Acoplados y resaltan la capacidad de éstos para simular la evolución de las circulaciones a escala global. Sin embargo, estos modelos presentan desventajas al momento de aplicarlos al estudio de impactos locales debido a que su resolución espacial está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar. Como alternativa, presentan dos aproximaciones para lidiar con esta diferencia de escala e información: los métodos de reducción de escala dinámica y estadística.

Otro método para este tipo de análisis fue propuesto por Antico *et al.*, (2014). Para su análisis, los autores emplearon una nueva versión de la Descomposición Modal Empírica por Conjuntos (*EEMD*, por sus siglas en inglés), denominada EEMD Completa con Ruido Adaptativo (*CEEMDAN*). Este método está diseñado para descomponer datos no estacionarios y no lineales, como los registros hidroclimáticos, en modos (ciclos) y tendencias.

Greene *et al.*, (2011), proponen un método nuevo que consiste en una herramienta web, que para analizar y cuantificar la variabilidad climática la descompone en tres dimensiones: (i) tendencias a largo plazo, (ii) decadales e (iii) interanuales. Estas dimensiones corresponden a la variación meteorológica debida a actividades antropogénicas asociada con el cambio climático (tendencia de largo plazo) y a componentes de baja y alta frecuencia de la variabilidad climática natural (decadal, relacionada con eventos ENSO e interanual respectivamente). Posteriormente, este método fue empleado por Tiscornia *et al.*, (2016) para analizar la variabilidad climática en algunas regiones de Uruguay.

Modelos de CUSV e hidrológicos

De igual manera se pueden citar diversos estudios que relacionan la disponibilidad de agua con los procesos de urbanización y los CUSV.

En el área periurbana de Ciudad Cuauhtémoc, Díaz *et al.*, (2014), realizaron un análisis geoespacial del uso del suelo y agua a través de modelación geográfica y percepción remota. Estos autores evaluaron la dinámica del uso y cobertura de suelo, encontrando una gran relación entre estos factores y la alta competencia por el agua entre diversos usuarios.

Hernández *et al.*, (2003), realizaron un estudio en la cuenca del río Guacerique, Honduras, donde analizaron los cambios a lo largo del tiempo en el uso de suelo y la respuesta cuantitativa de caudales en la cuenca. Los autores aplicaron técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica creando tres escenarios de uso (1980, 1991 y 2003). El análisis de caudales permitió evaluar su patrón de comportamiento durante los escenarios. Se apoyaron de la herramienta para la evaluación de suelos y aguas (SWAT) simulando caudales en cada escenario, encontraron significativos cambios en la composición de las clases de uso de suelo.

Mintegui & Robredo (1994) exponen la importancia que tiene una correcta utilización de los modelos hidrológicos en el diagnóstico de la situación real de las cuencas hidrográficas sometidas a fenómenos torrenciales y con problemas para mantener y recuperar sus coberturas vegetales. Estos modelos hidrológicos distribuidos de manera espacial y temporal permiten el estudio conjunto tanto del recurso hídrico como edáfico, así como una exhaustiva ordenación agrohidrológica de una cuenca, sobre todo cuando se trata de abordar en ella un proyecto de restauración hidrológico-forestal.

Romero & Vázquez (2005), a través del uso de sistemas de información geográfica, estudiaron seis cuencas del piedemonte andino de la ciudad de Santiago, Chile, que se encuentran en diferentes fases del proceso de urbanización. Los autores analizaron el impacto de dichos procesos sobre indicadores ambientales, tales como productividad vegetal, biomasa, humedad en suelo, y temperaturas superficiales, además de las áreas totales de impermeabilización,

coeficientes de escorrentía y las áreas sensitivas ambientales, estimando el estado de las cuencas.

López-Moreno *et al.*, (2014), bajo varios escenarios de cambio climático y de uso de suelo, proyectaron las corrientes de agua en una cuenca montañosa mediterránea en el centro del Pirineo español. Los autores utilizaron series de corrientes de flujo proyectadas para el periodo 2021-2050. Las simulaciones se realizaron utilizando el Sistema Regional de Simulación Hidro-Ecológica (RHESys). Los modelos de tendencias de temperatura y precipitación se lograron mediante modelos climáticos regionales (MCR). Los resultados obtenidos de ambas simulaciones sugieren que el embalse de Yesa no logrará satisfacer la demanda actual de agua, según su capacidad de almacenamiento actual. Prevén que dichos efectos serán más severos en las partes bajas de las cuencas, pues los caudales del río aguas abajo del yacimiento se reducirán drásticamente.

Finalmente, Kundu *et al.*, (2017), mediante el método SWAT, evaluaron los cambios en el balance hídrico futuro y su relación con los impactos independientes e integrados de los cambios climáticos y de uso de suelo en una porción de la cuenca del río Narmada en Madhya Pradesh, India. Así mismo proyectaron a futuro las precipitaciones y temperaturas mínimas y máximas por los modelos LS-SVM (Modelo de Apoyo de Cuadro Suelto) y SDSM (Modelo de Escalado Estadístico) para estimar el impacto del cambio climático y la predicción del cambio de uso de suelo de la cuenca por el modelo de la cadena de Markov.

I.3. Descripción de la zona de estudio

El Estado de Morelos queda comprendido, en la RH del Río Balsas, y forma parte casi en su totalidad de la cuenca del río Amacuzac (Figura 8) y sólo una porción pequeña del Estado es parte de la cuenca del río Atoyac (INE & UAEM, 2006). Dentro de la cuenca del Río Amacuzac se delimitan seis sub-cuencas: (i) río Bajo Amacuzac; (ii) río Cuautla; (iii) río Yautepec; (iv) río Tembembe; (v) río Alto Amacuzac y (vi) río Apatlaco (CONAGUA, 2015b). Esta última abarca territorios de diez municipios del Estado de Morelos, entre ellos el municipio de Cuernavaca

(CONAGUA, 2008), que se ubica entre los paralelos 18° 50' y 19°10' de latitud Norte; los meridianos 99° 11' y 99° 21' de longitud Oeste; y cuenta con una altitud entre 1 100 y 3 000 m.s.n.m. (INEGI, 2010).

La microcuenca de Cuernavaca (Figura 9) atraviesa al municipio con el mismo nombre abarcando gran parte de su territorio, comienza en la parte Sur-Poniente del municipio de Huitzilac, y continúa hacia el Sur hasta terminar en pequeñas porciones territoriales de los municipios de Zapata, Temixco y Jiutepec. (Figura 10)

Según datos del INEGI (2010), Cuernavaca se caracteriza por los aspectos físicos que se describen en las secciones (I.3.1 - I.3.6).

I.3.1. Fisiografía

El 53.54% del territorio de Cuernavaca forma parte de la provincia del Eje Neovolcánico, mientras que el 46.46% restante forma parte de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur. A su vez, el municipio se encuentra comprendido por la sub-provincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac (53.54%) y Sierras y Valles Guerrerenses (46.46%). El sistema de topoformas que constituyen el municipio se compone de Lomerío con cañadas (45.20%), Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados (30.38%), Lomerío de basalto (23.17%) y Llanura aluvial con lomerío (1.25%).

I.3.2. Clima

Cuernavaca cuenta con cuatro tipos de clima distintos dentro de su territorio: (i) semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (65.04% del territorio cuenta con este clima); (ii) templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad (31.51% del territorio cuenta con este clima); (iii) cálido subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad (2.31% del territorio cuenta con este clima) y (iv) semicálido subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad (1.14%). El rango de temperatura del municipio es de 12-24°C y cuenta con una precipitación media de 800-1600 mm.

I.3.3. Geología

Las rocas que se encuentran aflorando en Cuernavaca datan del periodo Neógeno (50.76%) y Cuaternario (11.13%), y se constituye de rocas ígneas extrusivas: basalto (5.73%), andesita (5.69%) y basalto-brecha volcánica básica (5.39%); así como de rocas sedimentarias: arenisca y conglomerado (43.96%) y brecha sedimentaria (1.12%). El porcentaje faltante corresponde a la zona urbana con un 38.11%.

I.3.4. Edafología

Los suelos predominantes en el municipio de Cuernavaca son de tipo: Phaeozem (24.79%), Andosol (18.99%), Luvisol (18.07%) y Vertisol (0.04%). El porcentaje restante, corresponde a la zona urbana (38.11%).

I.3.5. Uso de suelo y vegetación

El uso del suelo en el municipio corresponde a áreas de agricultura (20.27%) y la zona urbana (38.11%). La vegetación se compone de pastizal (20.40%), bosque (19.40%) y selva (1.82%).

I.3.6. Zona urbana

Las zonas urbanas están creciendo sobre rocas sedimentarias del Neógeno y rocas ígneas extrusivas del Cuaternario, en lomeríos y sierras, sobre áreas donde originalmente había suelos denominados Andosol, Luvisol y Phaeozem. El clima es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media y templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad. La ciudad se está expandiendo sobre terrenos previamente ocupados por bosques, pastizales, selvas y agricultura.

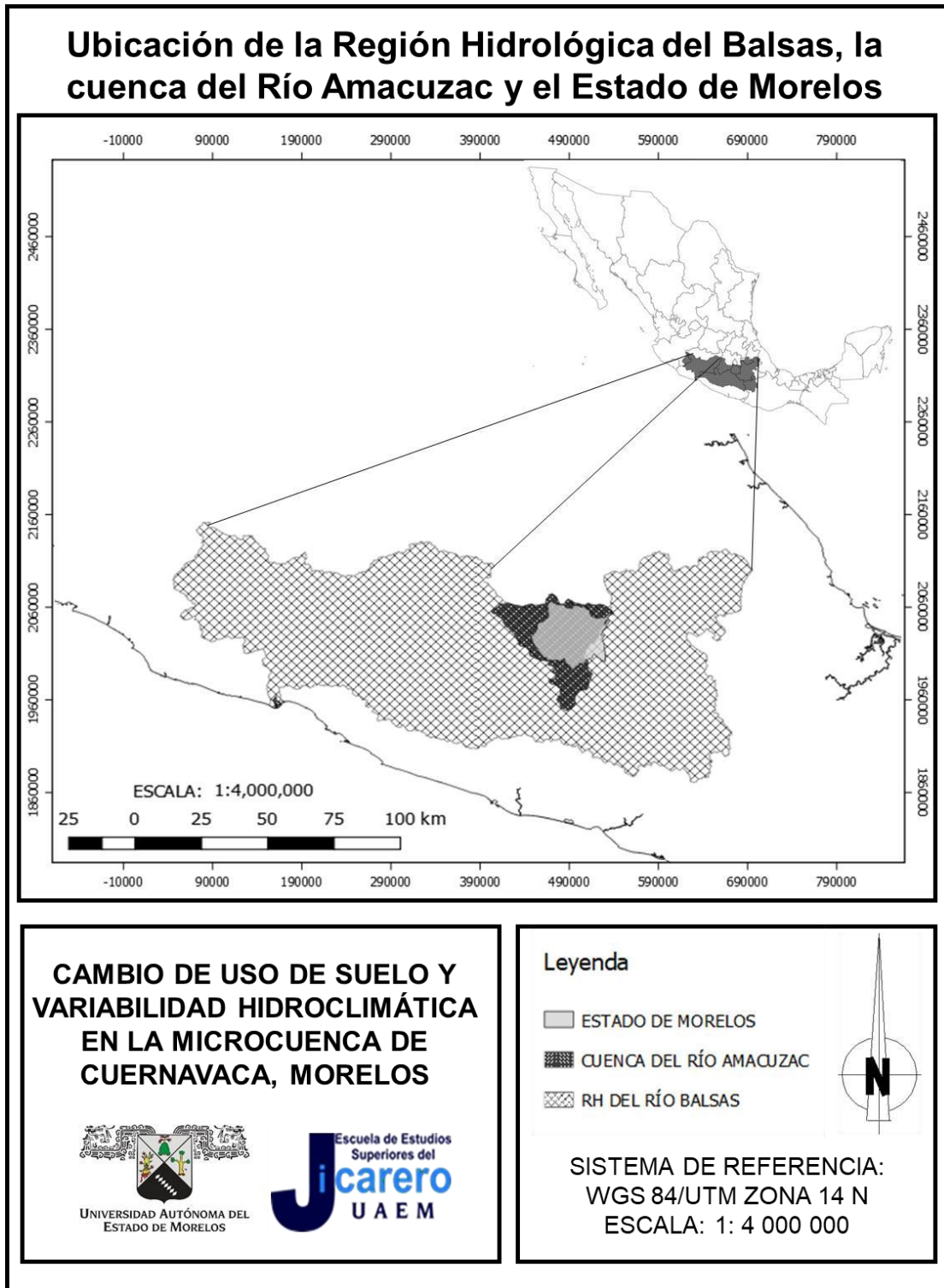


Figura 8. Mapa de ubicación, de la Región Hidrológica del Balsas, la Cuenca del río Amacuzac y el Estado de Morelos

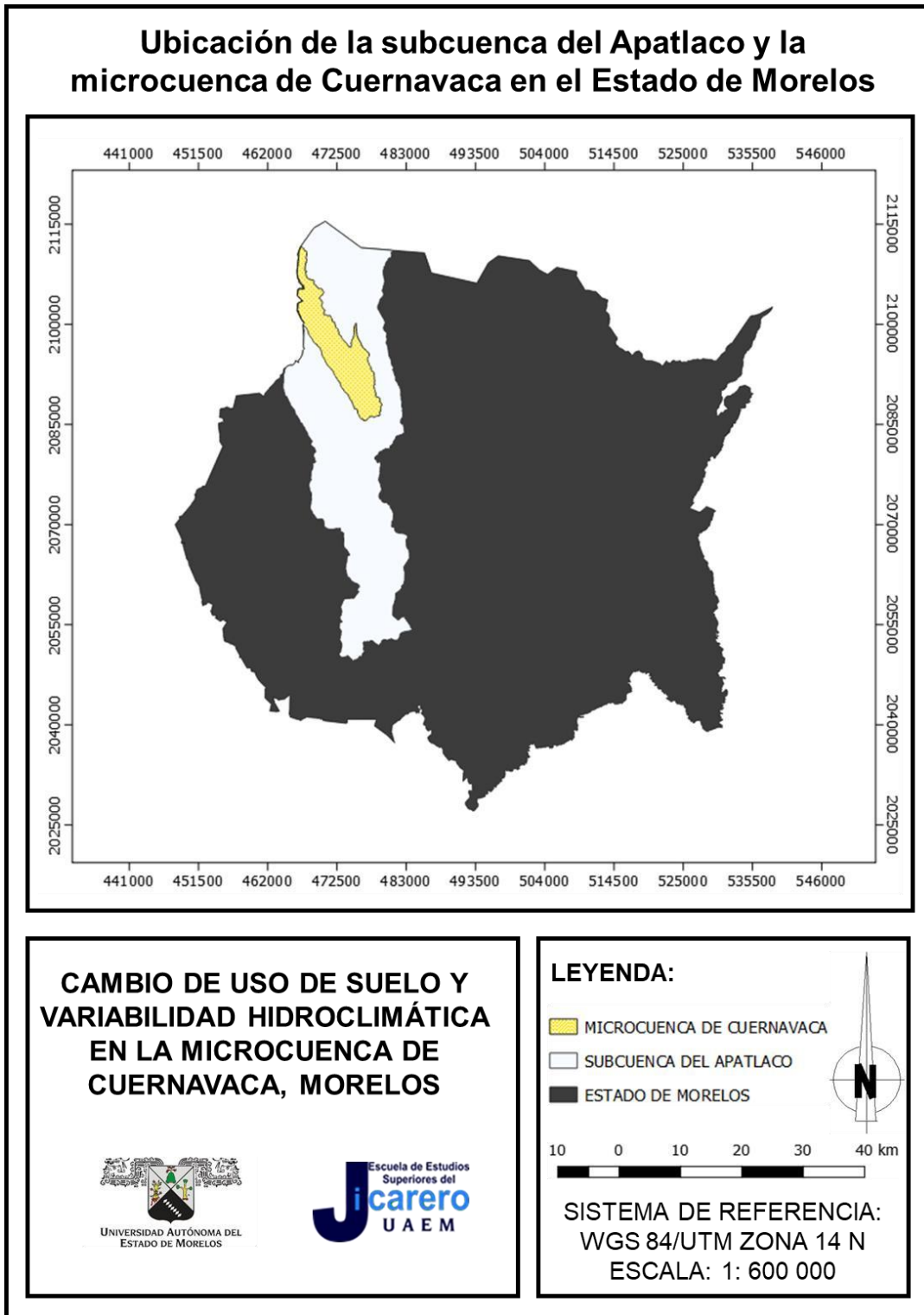


Figura 9. Mapa de ubicación de la microcuenca de Cuernavaca

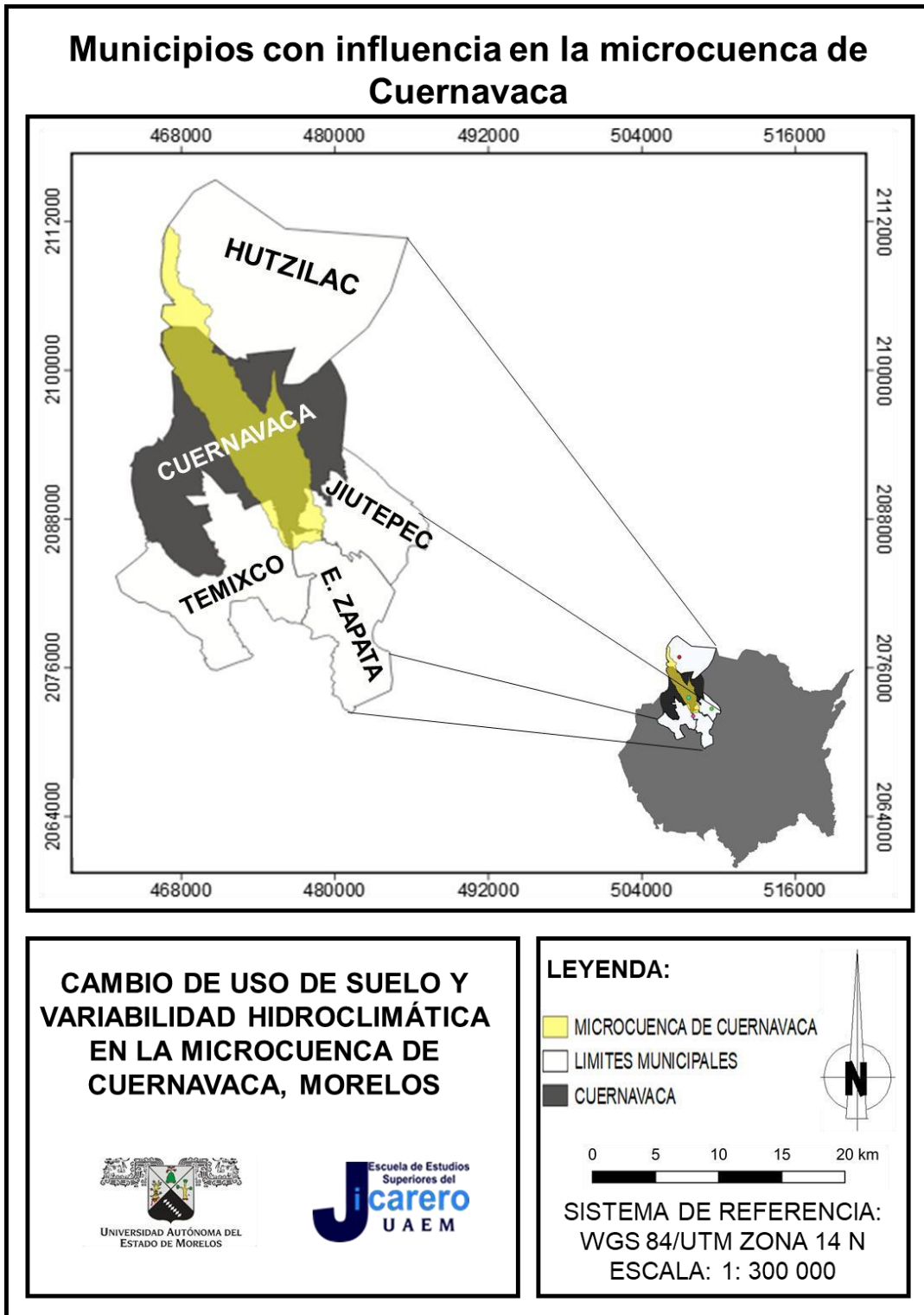


Figura 10. Municipios con influencia de la microcuenca de Cuernavaca

Capítulo II. Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados en este trabajo, fue necesario, primeramente, determinar mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat ETM, los cambios de uso de suelo y vegetación (CUSV) ocurridos durante el periodo 1997-2017. Posteriormente, se generaron Años Meteorológicos Típicos (AMT's) para los periodos 1992-1997 y 2011-2016, con los cuales se realizó un análisis de variabilidad climática. Finalmente, con los resultados de ambos análisis, se determinaron sus efectos en la infiltración hídrica de la microcuenca Cuernavaca durante el periodo 1997-2017 (Figura 11).

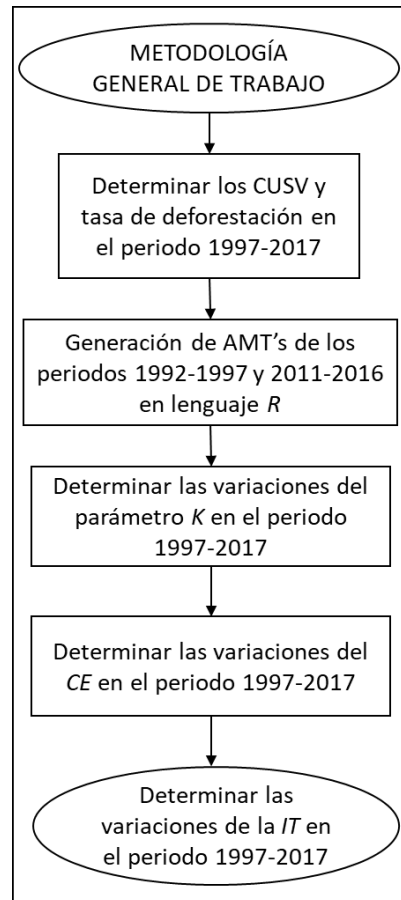


Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología general del proyecto

II.1. Tasa de deforestación, cambios de uso de suelo y cubierta vegetal en la microcuenca de Cuernavaca en el periodo 1997-2017

La generación de información geográfica para la elaboración de los mapas de uso de suelo y vegetación (USV) se llevó a cabo con imágenes Landsat ETM que fueron procesadas con el software QGIS y la herramienta “*Semi-automatic Classification Pluggin*” (SCP) (Figura 12). Posteriormente, se generó una matriz de transición con la herramienta MOLUSCE en QGIS, a fin de evaluar los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal (CUSV). Finalmente, se calculó la tasa de deforestación anual para cada una de las cubiertas forestales.

II.1.1. Pre-clasificación y ubicación de puntos de control *Google Earth*

Google Earth muestra un detalle adecuado del paisaje, como la vegetación y su composición, por lo que se utilizó como herramienta para generar una preclasificación del USV dentro de la microcuenca de Cuernavaca. Con lo observado a través de dicha herramienta, se generaron 77 puntos de control distribuidos aleatoriamente por toda la microcuenca, correspondientes a cada una de las clases de USV identificadas. Esto sirvió de base para generar el mapa de USV del año 2017, y para tener mayor confiabilidad en los resultados.

II.1.2. Obtención de imágenes Landsat y procesamiento digital

A través del Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS*, por sus siglas en inglés) y su plataforma electrónica “*EarthExplorer (EE)*”, se obtuvo una imagen satelital Landsat 5 correspondiente al año 1997 y una imagen satelital Landsat 8 correspondiente al año 2017. Ambas imágenes fueron procesadas mediante el software QGIS para obtener una imagen compuesta (*RGB*). Combinando las bandas (i) 4 (760nm – 900nm), 3 (630nm – 690nm) y 2 (520nm – 600nm) para Landsat 5; y (ii) 5 (850nm – 880nm), 4 (640nm – 670nm) y 3 (530nm – 590nm) para Landsat 8.

La imagen compuesta que resultó de la combinación de bandas resalta la vegetación y los usos de suelo, permitiendo categorizar y delimitar áreas mediante

el trazado de polígonos, y así medir la superficie ocupada de los distintos USV en la microcuenca de Cuernavaca.

II.1.3. Elaboración de los mapas de USV del año 1997 y 2017

Los mapas temáticos de USV se crearon con el software QGS, por medio del método no supervisado y la herramienta SCP. Para ello, se importó la imagen resultante de la combinación de bandas, sobre la cual se crearon áreas de entrenamiento con el fin de calibrar el algoritmo, calculando las firmas espectrales de las clases. Esto se comparó con los puntos de control generados en *Google Earth*.

II.1.4. Evaluación de los CUSV y estimación de la tasa de deforestación durante periodo 1997-2017

Una vez obtenidos los mapas de USV correspondientes a cada año (1997 y 2017) se calculó la tasa de deforestación anual para cada una de las cubiertas forestales con la ecuación 1 de la FAO (1995), modificada por Puyravaud (2003):

$$r = \frac{1}{t2 - t1} \cdot h \frac{A2}{A1} \quad (1)$$

donde:

A1 = Superficie del bosque al inicio del periodo.

A2 = Superficie del bosque al final del periodo.

t1 = Año inicial del periodo.

t2 = Año final del periodo.

Finalmente se realizó un cruce de los mapas de USV del año 1997 y 2017 con la herramienta "MOLUSCE" en QGIS, obteniendo la matriz de transición. Esta matriz permite evaluar la dinámica en los CUSV, es decir, los cambios de una clase a otra durante el periodo analizado. La matriz de transición consiste en una tabla

con arreglos simétricos: en uno de sus ejes se concentran las categorías de USV correspondientes al año de 1997 y en el otro eje los del año 2017. Así, cada una de las celdas de la diagonal principal de la matriz muestra la superficie (en porcentaje) que corresponde a la cobertura que permaneció sin cambios, mientras que el resto de las celdas estimará la transición de superficie de una determinada cobertura a otra.

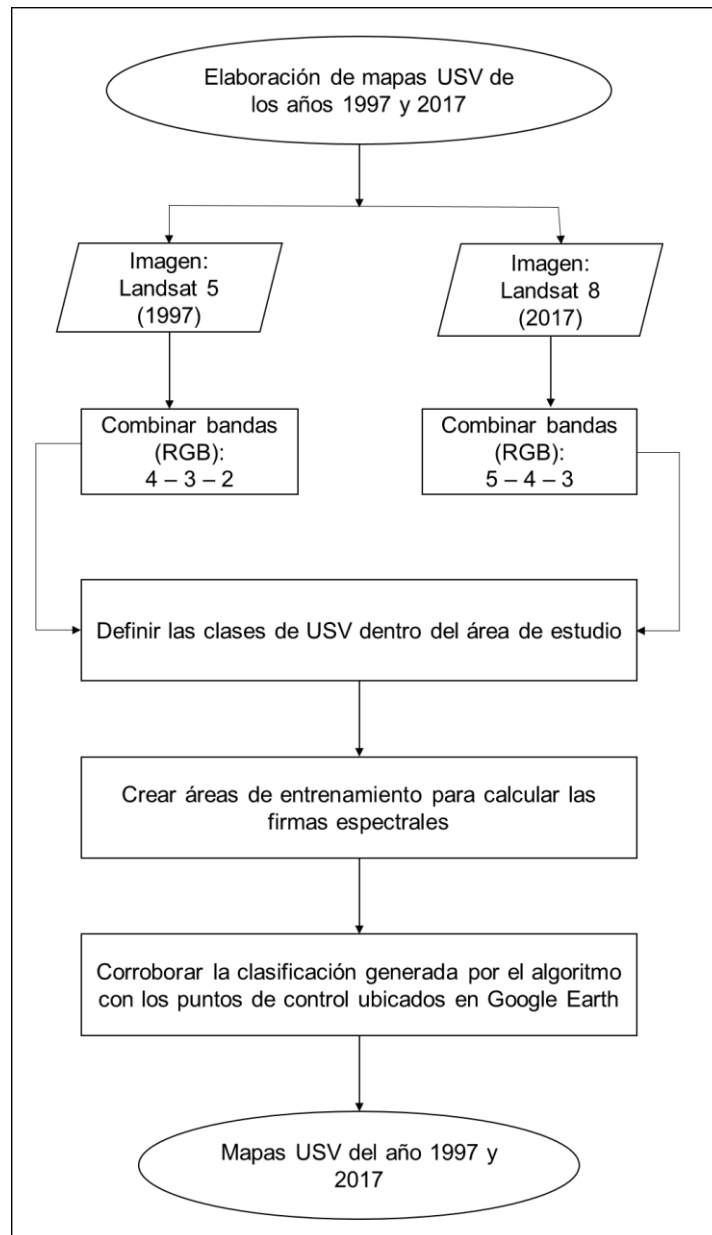


Figura 12. Diagrama de flujo del proceso para obtener los mapas de USV de los años 1997 y 2017

II.2. Año Meteorológico Típico de los periodos 1992-1997 y 2011-2016, y análisis de variabilidad climática

Las condiciones climáticas y sus variaciones espacio-temporales tienen una gran influencia en las condiciones hidrológicas de las cuencas, principalmente la variable de precipitación, ya que representa la entrada de agua en la microcuenca y da origen a todas las corrientes superficiales y profundas, así como a los distintos procesos que componen el ciclo hidrológico. Por ello, se realizó un análisis de variabilidad climática en la microcuenca a través de la generación de Años Meteorológicos Típicos de los periodos 1992-1997 y 2011-2016.

Un Año Meteorológico Típico (AMT) es un año “artificial” formado por un conjunto de datos de mediciones reales de diferentes variables meteorológicas (Morales, 2016). Comúnmente estas mediciones son por hora o por día. El AMT se integra a partir de una extensa base de datos, que ha sido tratada estadísticamente para obtener valores considerados típicos o de referencia.

Las mediciones deben ser a largo plazo, es decir, con valores medidos a lo largo de determinados periodos de tiempo (5, 6, 10, 20 o hasta 30 años). Un AMT lo conforman 12 meses de diferentes años, formando un año de referencia que muestre las condiciones típicas a largo del periodo analizado. Estos meses son seleccionados aplicando métodos estadísticos a las bases de datos, e indican qué meses de todos los años son los más representativos (Morales, 2016).

II.2.1. Generación de bases de datos meteorológicos

Se consultaron las bases de datos disponibles de las estaciones meteorológicas dentro de la microcuenca de Cuernavaca y cercanas a ella, a través de la plataforma digital CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de las cuales se seleccionaron cuatro (Figura 13): (I) Estación 17004-CUERNAVACA (DGE); (II) Estación 17014-TEMIXCO; (III) Estación 17047-HUITZILAC; y (IV) Estación 17071-PROGRESO. Dichas estaciones incluyen las series de datos más completas de los periodos 1992-1997 y 2011-2017.

Las variables seleccionadas para el presente análisis incluyen temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), precipitación (P) y evaporación ($Evap$). Se analizaron registros diarios de cada una de las variables.

A pesar de haber seleccionado las estaciones meteorológicas con las bases de datos más completas para los periodos de análisis (1992-1997 y 2012-2017), se encontraron datos faltantes significativos que se describen a continuación:

1. Estación 17004-CUERNAVACA (DGE): No existen datos para ninguna de las variables meteorológicas de interés en el periodo del 01/01/2015 al 31/08/2015.
2. Estación 17014-TEMIXCO: No existen datos para ninguna de las variables meteorológicas de interés en el periodo del 01/01/2015 al 31/03/2015 y para en el periodo de 01/05/2016 al 31/12/2016.
3. Estación 17047-HUITZILAC: No existen datos para ninguna de las variables meteorológicas de interés en el periodo del 01/07/2014 al 31/10/2014.
4. Estación 17071-PROGRESO: Al no existir ningún registro de datos para el año 2016 se consideró para el segundo periodo de análisis los años 2010-2015. Sin embargo, en adelante se referirá como periodo 2011-2016 como en el resto de las estaciones por cuestiones prácticas del análisis. Tampoco se cuenta con datos para la variable meteorológica de evaporación en el periodo 01/06/1995 al 31/12/1995, y en el periodo 01/12/2010 al 31/12/2010.

Una vez compilados los datos meteorológicos de las estaciones seleccionadas, se crearon bases de datos con registros diarios anuales, de los periodos 1992-1997 y 2011-2017, que incluyen las cuatro variables de interés (T_{max} , T_{min} , P , y $Evap$), es decir, se crearon 12 bases de datos por cada una de las cuatro estaciones. Estas bases de datos se sometieron a un proceso estadístico descrito en la sección II.2.2.

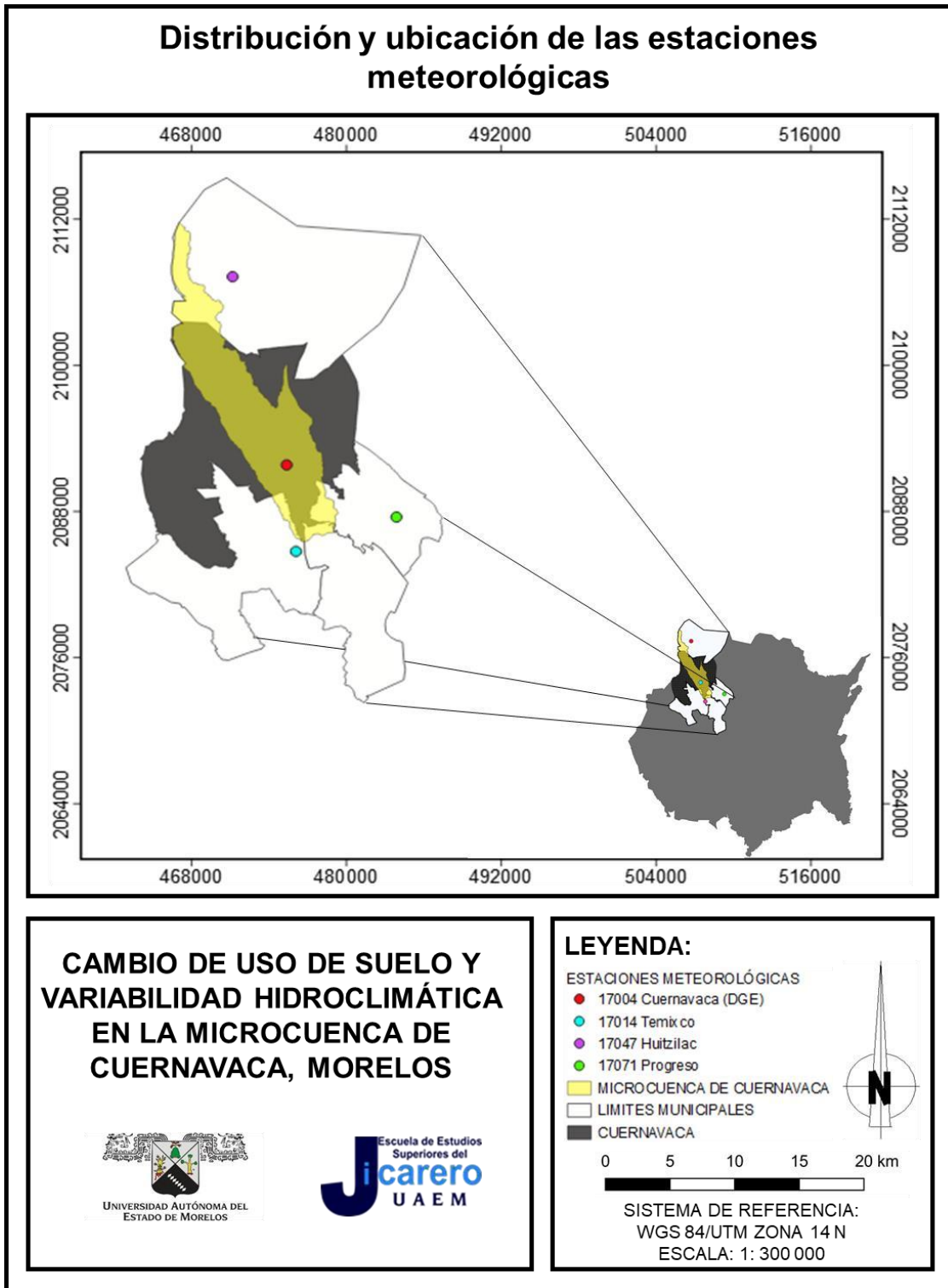


Figura 13. Ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionas para la generación del AMT

II.2.2. Método SANDIA y lenguaje R

El método estadístico que se aplicó a los datos meteorológicos compilados anteriormente en las bases de datos para generar el AMT fue el conocido como método *Sandia* (Morales, 2016).

El método *Sandia* selecciona los meses individuales del AMT de diferentes años dentro del periodo de análisis (seis años, en este caso). Es decir, todos los meses de enero a diciembre de estos seis años, se examinaron y se incluyeron en el AMT aquellos que resultaron más típicos o representativos. Cada uno de los meses seleccionados puede pertenecer a un año distinto y así, los meses adyacentes pueden ser discontinuos.

Los siguientes procedimientos del método se aplicaron a cada mes de cada año de cada periodo:

1. Función de distribución acumulada.

Se construyó una función de distribución acumulada (*CDF*, por sus siglas en ingles) para términos tanto de “largo plazo” como términos de “corto plazo” para cada una de las variables analizadas. Se denominan términos de corto plazo aquellos valores de la media diaria para un mes en específico de un año en especial y términos de largo plazo a los mismos valores tomados para el mismo mes, pero para un período determinado de años.

Las *CDF*'s se calcularon para cada una de las variables meteorológicas. Primero se ordenaron los datos de manera ascendente y se aplicó la ecuación 2:

$$CDF_j = \frac{j}{n}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

donde:

n= Número de días del mes escogido. Se dice entonces que, la probabilidad de que el parámetro adopte cualquier valor es de 1/n.

j = Intervalo de los datos clasificados.

2. Estadística de Finkelstein y Shafer

Se consideraron meses candidatos a conformar el AMT aquellos cuyo *CDF* de corto plazo se encuentra más cercano al *CDF* de largo plazo; esto se aplicó a todas las variables. La cercanía entre *CDF*'s se determinó mediante una diferencia absoluta entre éstos. Para medir la cercanía de los *CDF*'s se aplicó la estadística de *Finkelstein y Schafer (FS)*, que representa la diferencia del promedio mensual de cada variable entre los *CDF*'s a corto y a largo plazo, para cada variable meteorológica, empleando la ecuación 3:

$$FS_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (3)$$

donde:

I = Número de días en el mes

δ_i = Diferencia absoluta entre los términos a largo y a corto plazo de los *CDF*'s para el día " i " del mes en " n " número de días en el mes.

j = Variable meteorológica considerada. (T_{max} , T_{min} , P y $Evap$). Para T_{max} , $j = 1$, para T_{min} $j = 2$, y así sucesivamente hasta llegar a $j = 4$.

3. Ponderación de variables.

Finalmente, se asignó un índice de peso a cada variable meteorológica, donde no existe ninguna regla o metodología establecida para su asignación. Depende meramente de la aplicación que se le dará al AMT y del criterio de quien lo genere. Algunas variables suelen tener mayor importancia que otras. Para los objetivos de este trabajo en particular, a P , al representar la entrada de agua en la microcuenca, se le dio mayor importancia con respecto al resto de variables meteorológicas y tomó un índice de peso mayor, se le asignó un valor de 0.7, y un valor de 0.1 a cada

una de las variables restantes, sumando un total de uno. A su vez, también fue

necesario asignar una suma de peso (WS) de los FS_j para el mes que fue calculado, para lo cual se empleó la ecuación 4:

$$WS = \sum_{j=1}^n w_j FS_j \quad (4)$$

donde:

n = Número de variables meteorológicas o índices considerados.

w_j = Índice de peso asignado al parámetro j . FS_j =

Finkelstein-Schafer (FS), para la variable j .

La aplicación de cada uno de los procedimientos establecidos en el método *Sandia* a las bases de datos generadas para cada una de las estaciones meteorológicas fue a través de un software denominado *TMY*, programado con lenguaje R por Morales (2016). Dicho software procesó los datos de las estaciones. El código del programa está básicamente diseñado para introducir los datos y obtener al final el AMT; se pueden incluir como variables de entrada distintos parámetros meteorológicos y de radiación solar, así como distintos periodos de tiempo de los datos.

El diagrama de flujo en la figura 14 muestra el proceso lógico que sigue el programa para realizar el tratamiento de los datos mediante el método *Sandia* (Morales, 2016).

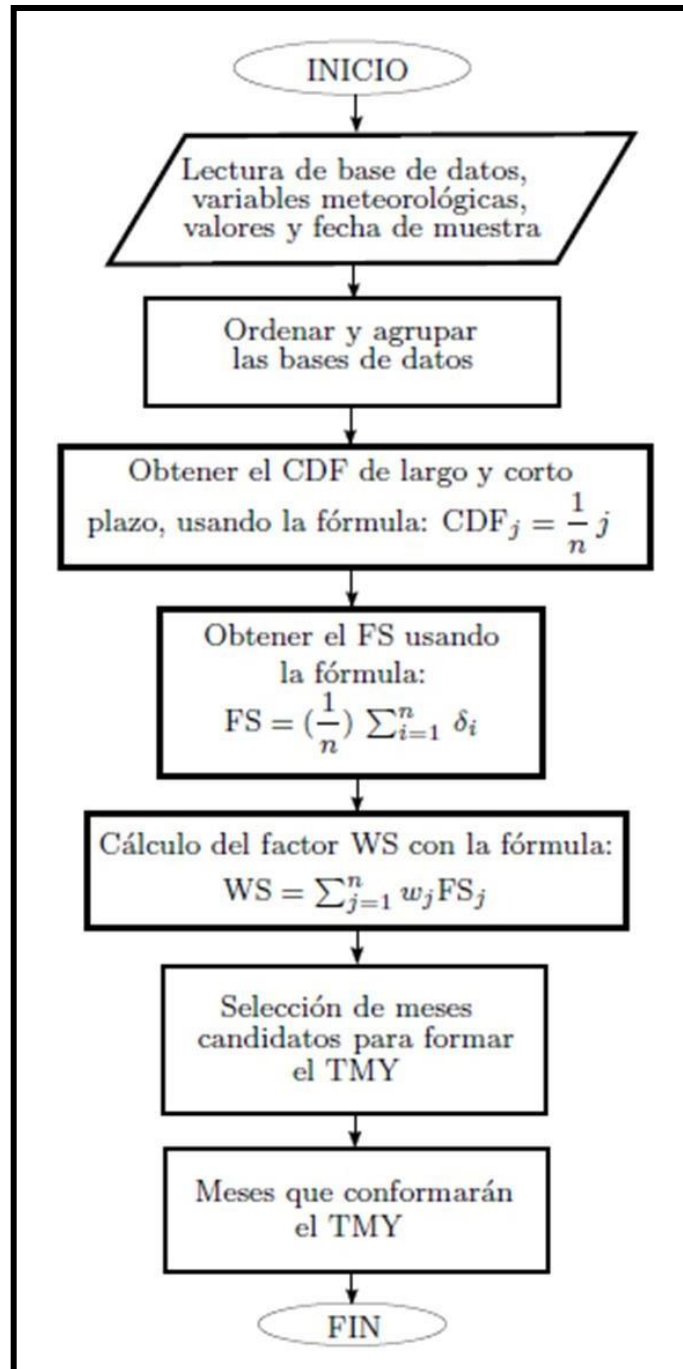


Figura 14. Diagrama de flujo del Método Sandia para generar el AMT (Morales, 2016)

II.3. Variación en la infiltración hídrica de la microcuenca de Cuernavaca a causa de los CUSV en el periodo 1997-2017

La infiltración, como parte del ciclo hidrológico en una cuenca, puede ser estimada por medio del balance hídrico. Este tiene una afectación directa por los cambios en la cubierta vegetal, los cambios en el uso del suelo y las variaciones climáticas. Para estimar las variaciones en la infiltración debidas a dichos factores, se tomaron como base las ecuaciones establecidas en la NOM-011-CONAGUA-2015. Estas ecuaciones incluyen el cálculo de: (i) el coeficiente de escurrimiento (*CE*), y (ii) la infiltración total (*IT*) (Figura 15).

II.3.1. Obtención del Coeficiente de Escurrimiento (*CE*)

El parámetro *K* es la relación de la textura o permeabilidad del suelo con el tipo de cubierta vegetal. Es necesario conocer su valor para poder obtener el *CE*, pues dicho parámetro indica la capacidad de infiltración del suelo y la capacidad de intercepción de la precipitación por parte de la cubierta vegetal.

El valor de *K* se obtiene de acuerdo con la Tabla 1, la cual estima la permeabilidad del suelo en función de su textura (suelos arenosos=1, suelos limosos=2 y suelos arcillosos=3). La textura del suelo se obtuvo de un archivo vectorial que contiene información edafológica del Estado de Morelos; dicho archivo fue proporcionado por la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Morelos. La información del uso de suelo y vegetación (USV) se obtuvo al convertir a polígonos (archivo vectorial) los archivos ráster derivados del USV del año 1997 y 2017.

Una vez obtenidos ambos archivos vectoriales (Textura de suelo y USV) se realizó una intersección de polígonos, generando un nuevo archivo vectorial que contiene la información de la clase de USV y la textura de suelo a la que corresponde cada polígono. Se procedió a agregar el valor de *K* a la tabla de atributos de acuerdo con la tabla 1.

El valor de la precipitación (P) empleado para calcular el CE fue el generado en el AMT para cada una de las estaciones meteorológicas dentro de la microcuenca de Cuernavaca y cercanas a ella. Con el valor de P anual de cada estación se realizó una interpolación mediante distancia inversa ponderada. Este método determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación.

Lo anterior dio como resultado un ráster con los valores de P en la microcuenca de Cuernavaca. Conociendo P y el parámetro K se empleó la ecuación 5, que se utiliza cuando $K > 0.15$, valor obtenido para la microcuenca de Cuernavaca y se generó un nuevo ráster con el valor de CE . La evapotranspiración está considerada en el cálculo del CE .

Para $K > 0.15$

$$CE = K\left(\frac{P - 250}{2000}\right) + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad (5)$$

II.3.2. Infiltración total (IT)

El valor de IT representa la porción de P que no se pierde en forma de escorrentía ni en forma de evapotranspiración (ecuación 6).

$$It = (1 - CE) P \quad (6)$$

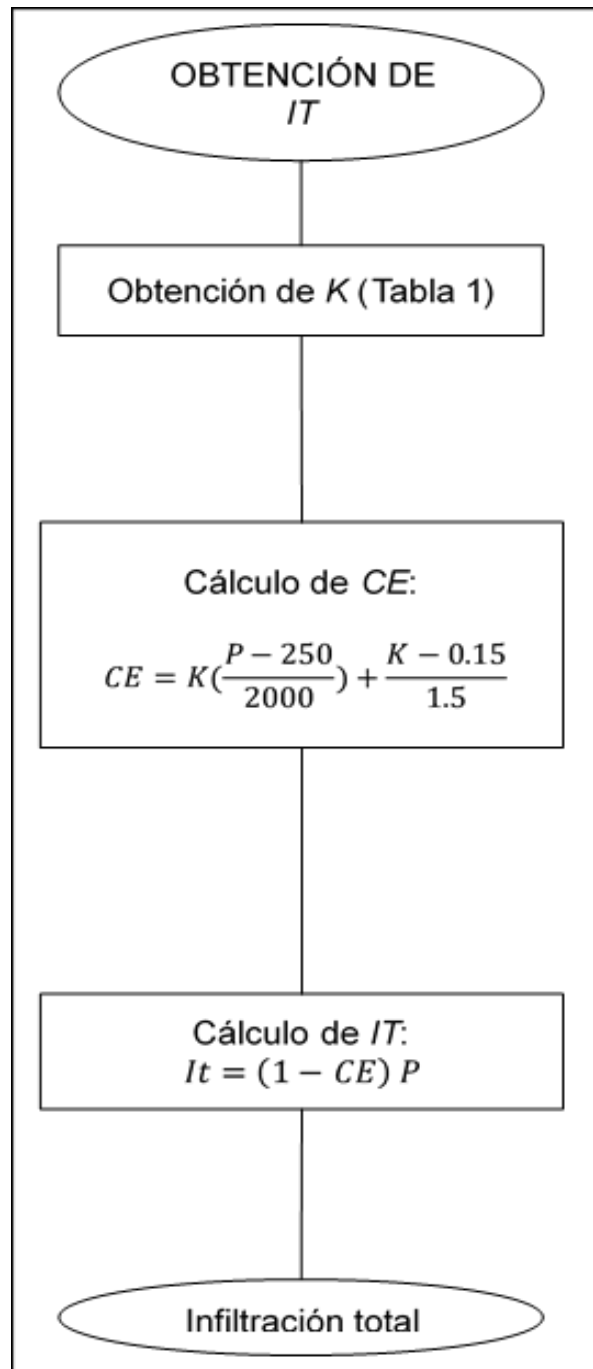


Figura 15. Diagrama de flujo para determinar la infiltración total (IT)

Tabla 1. Valores de K de acuerdo al tipo de cubierta vegetal y textura del suelo (NOM-011-CONAGUA-2015).

VALORES DE K			
Uso de suelo o cubierta vegetal	Textura de suelo		
	A (arena, 1)	B (limo, 2)	C (arcilla, 3)
Cultivos:			
En hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de praderas	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal (% de suelo cubierto/pastoreo):			
Más del 75% / Poco	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75% / regular	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% / mucho	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Otros usos:			
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30
Barbecho, áreas sin cultivo o desnudas	0.26	0.26	0.30
Cascos y zonas con edificaciones	0.26	0.29	0.32
Caminos (incluyendo derecho de vía)	0.27	0.30	0.33

Capítulo III. Resultados

III.1. Tasa de deforestación, cambios de uso de suelo y cubierta vegetal en la microcuenca de Cuernavaca en el periodo 1997-2017

El análisis de cambio de uso de suelo y vegetación (CUSV) ocurrido en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 1997-2017, permitió conocer las áreas ocupadas por cada clase de usos de suelo (USV). Así como la dinámica de transición entre cada una de las clases. Finalmente, permitió identificar las cubiertas forestales con mayores tasas de deforestación durante el periodo estudiado.

III.1.1. Pre-clasificación y ubicación de puntos de control en *Google Earth*

De acuerdo a los objetivos de este trabajo y lo observado en *Google Earth*, se distinguieron 12 clases de USV: (1) Bosque templado “**BT**”, (2) Suelo desnudo “**SD**”, (3) Cuerpo de agua “**CA**”, (4) Zonas agrícolas “**ZA**”, (5) Pastos “**Pa**”, (6) Zonas urbanas ZU, (7) Barrancas Ba., (8) Campo de Golf CG., (9) Vegetación de transición “**VT**”, (10) Zonas de agostadero “**Ag**”, (11) Bosque tropical caducifolio “**BTC**” y (12) Bosque de oyamel “**BO**”.

Una vez obtenida la clasificación previa, se ubicaron los 77 puntos de control distribuidos aleatoriamente en la microcuenca, para el año 2017 (Tabla 2 y figura 16).

Tabla 2. Clases de uso de suelo y vegetación en la microcuenca de Cuernavaca y puntos de control generados a través de Google Earth para el año 2017

CLASES DE USV			Puntos de control
1	Bosque Templado	BT	9
2	Suelo Desnudo	SD	17
3	Cuerpo de Agua	CA	4
4	Zona Agrícola	ZA	11
5	Pastos	Pa	10
6	Zona Urbana	ZU	6
7	Barrancas	Ba	8
8	Campo de Golf	CG	2
9	Vegetación de Transición	VT	3
10	Zonas de Agostadero	Ag	2
11	Bosque Tropical Caducifolio	BTC	5
12	Bosque de Oyamel	BO	0

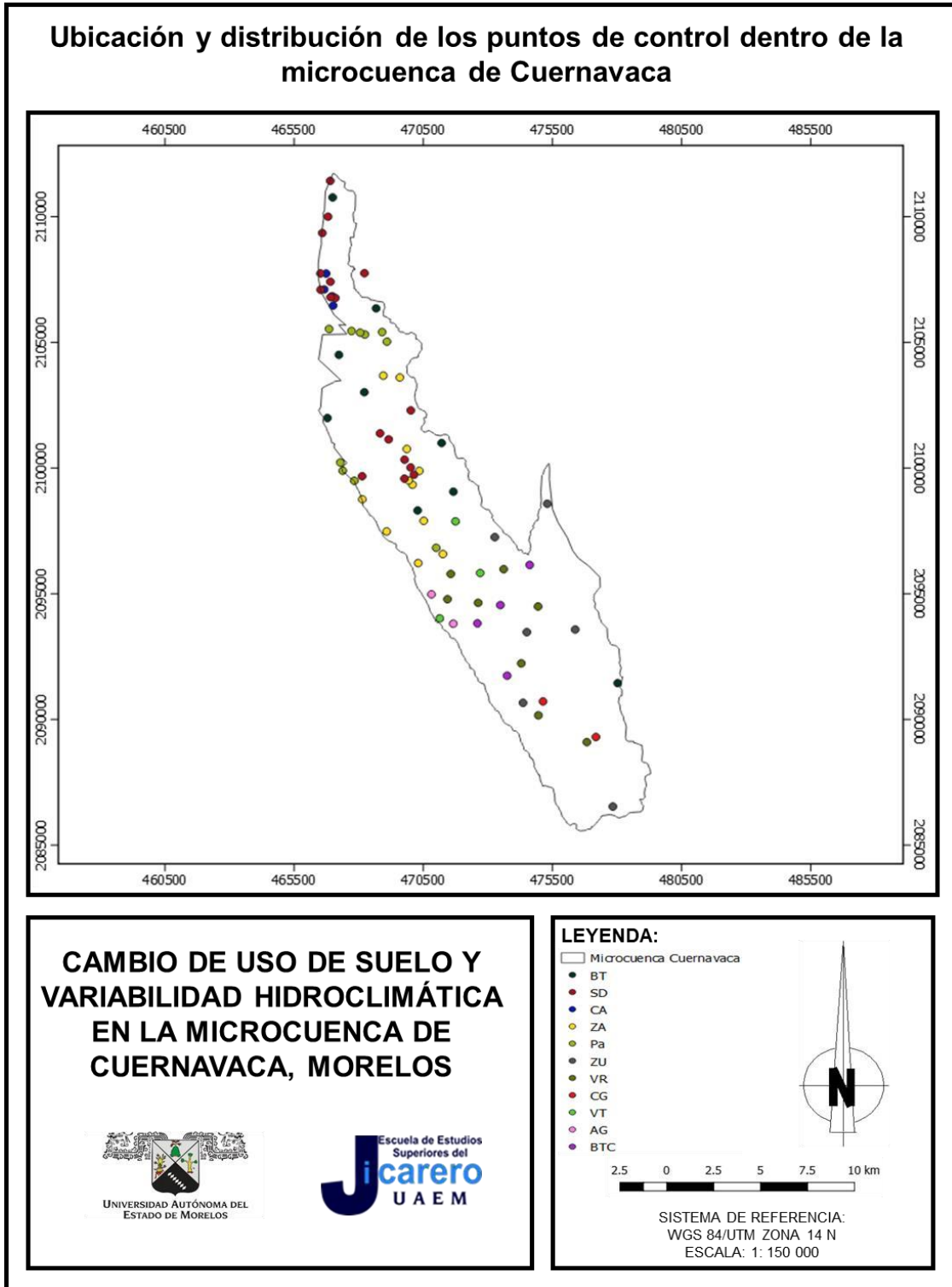


Figura 16. Mapa de distribución de los puntos de control generados en Google Earth

III.1.2. Uso de suelo y vegetación del año 1997 y 2017

La distribución espacial del USV para el año 1997 se muestra en la figura 17 y para el año 2017 en la figura 18. Al norte de la microcuenca se concentran las áreas mayormente cubiertas por bosque templado (BT), así como dos cuerpos de agua (CA) que corresponden a los lagos del parque nacional “Lagunas de Zempoala”. En la parte media de la microcuenca encontramos el bosque de oyamel (BO), la vegetación de transición (VT) y la vegetación riparia (VR). Además, se observa la aparición de zonas urbanas (ZU). Sin embargo, en la parte baja de la cuenca es donde encontramos mayor concentración de asentamientos urbanos, así como usos de suelo referentes a actividades económicas como la agricultura (ZA) y el pastoreo (Ag). También se observan pequeñas zonas de remanentes de bosque tropical caducifolio (BTC).

Comparando ambos mapas (Figura 17 y 18) son evidentes los cambios ocurridos en las zonas media y baja de la microcuenca, destacando el incremento en la expansión urbana y la presión y fragmentación que ocasionó en las zonas forestales, principalmente en el BO, la VT y el BTC. Sin embargo, este último parece mayormente afectado por las ZA, actividad que también generó cambios de uso en las Ag. En contraste, la parte alta de la microcuenca en 1997 presentaba distintas áreas de suelo desnudo (SD) y algunos pastos (Pa) que para el año del 2017 fueron cubiertas por el BT, es decir, existió una recuperación de este bosque.

La figura 19 y la tabla 3 muestran que para el año 1997, de las 10524.66 ha de superficie de la microcuenca de Cuernavaca 5388.63 ha correspondían a cubierta forestal, lo que representa el 51.2% del área distribuida entre el bosque templado con 1521.45 ha (14.46 %), el bosque de oyamel con 1073.78 ha (10.20 %), el bosque tropical caducifolio con 1278.71 ha (12.15 %), vegetación riparia con 692.98 ha (6.58 %), y la vegetación de transición con 821.71 (7.81 %). Mientras que para el año 2017, la cobertura forestal total fue de 5070.97 ha, es decir el 48.18% de la superficie de la microcuenca; 1448.48 ha (14.14%) corresponden al bosque templado, 769.36 ha (7.31%) de vegetación riparia, 722.86 ha (6.87%) a la

vegetación de transición, 939.11 ha (8.92%) de bosque tropical caducifolio y 1151.16 ha de bosque de oyamel (10.94%).

Entre las clases de uso de suelo restantes destaca la disminución de áreas de suelos desnudos a casi la mitad. En 1997 sumaban 9718.37 ha (8.73%) y para el 2017 sólo alcanzaban 461.93 h (4.93%). De manera similar, las zonas de agostadero se redujeron de 804.26 ha (7.64%) a 420.54 ha (4%). Por otra parte, las zonas urbanas crecieron considerablemente respecto al resto de clase de USV pasando de 1742.82 ha (16.56%) a 2239.56 ha (21.28%), junto con las zonas de uso agrícola que aumentaron de 855.15 ha (8.13%) a 1595.82 ha (15.16%).

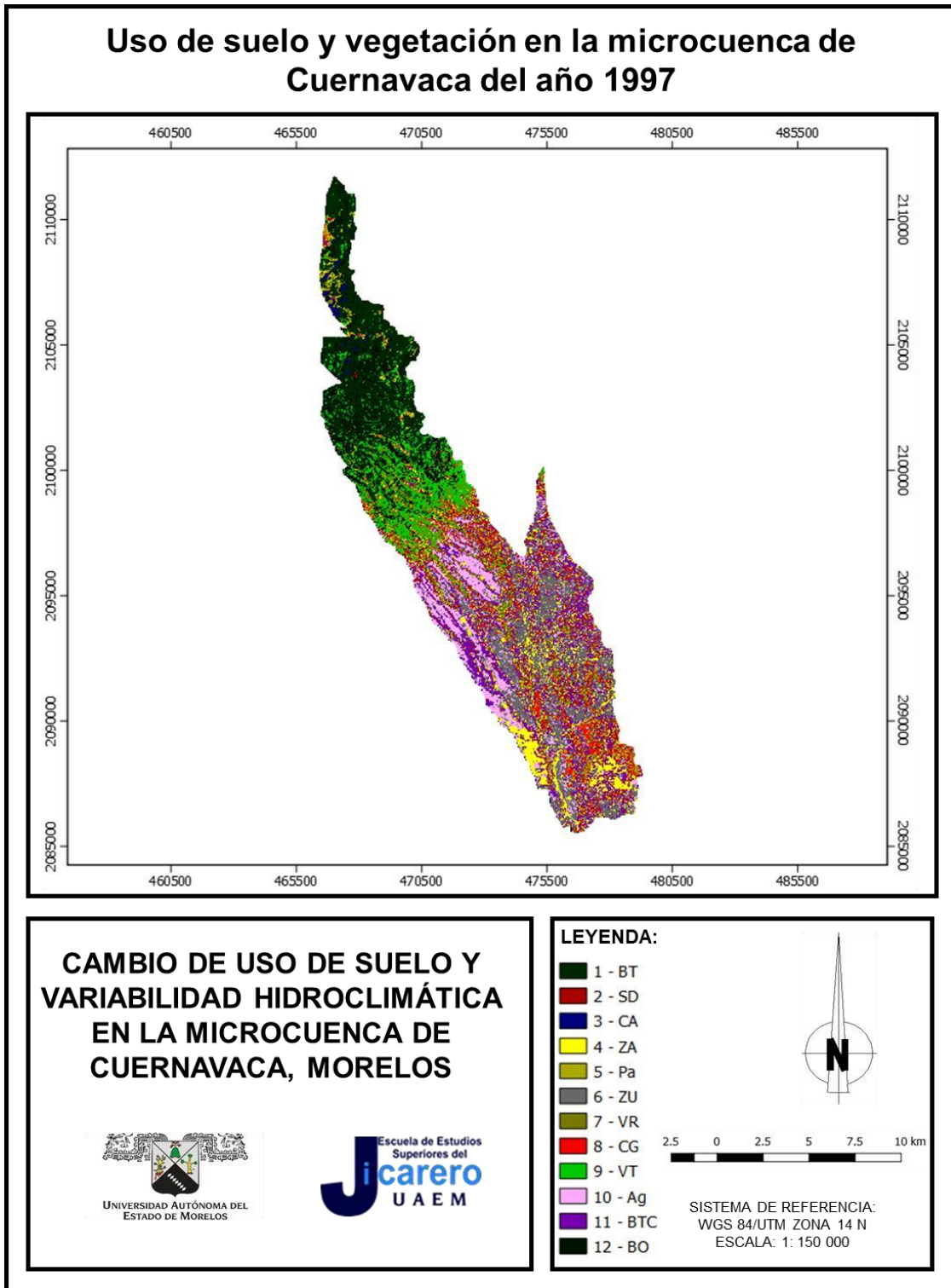


Figura 17. Mapa de USV del año 1997 obtenido mediante la herramienta SCP

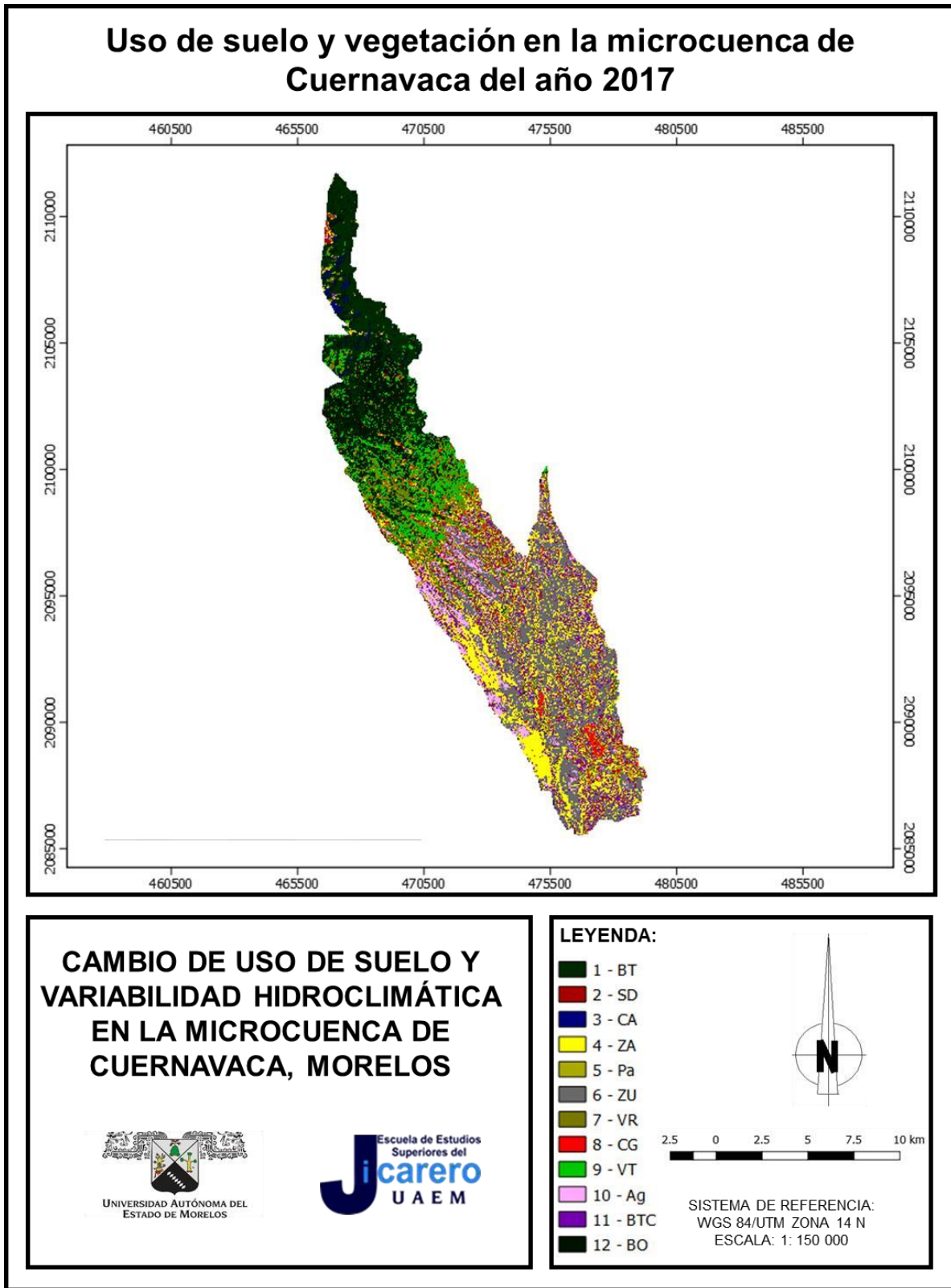


Figura 18. Mapa de USV del año 2017 obtenido mediante la herramienta SCP

CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS

Tabla 3. Superficie ocupada por cada clase en los años 1997 y 2017 en la microcuenca de Cuernavaca

CLASE	1997 ha	2017 ha	Δ ha	1997%	2017%	Δ %
1 – BT	1521.45	1488.48	32.97	14.46	14.14	0.31
2 – SD	918.37	461.93	456.44	8.73	4.39	4.34
3 – CA	51.72	51.72	0.00	0.49	0.49	0.00
4 – ZA	855.15	1595.82	-740.67	8.13	15.16	-7.04
5 – Pa	497.19	557.04	-59.84	4.72	5.29	-0.57
6 – ZU	1742.82	2239.56	-496.74	16.56	21.28	-4.72
7 – VR	692.98	769.36	-76.38	6.58	7.31	-0.73
8 – CG	266.50	127.09	139.41	2.53	1.21	1.32
9 – VT	821.71	722.86	98.86	7.81	6.87	0.94
10 – Ag	804.26	420.54	383.72	7.64	4.00	3.65
11 – BTC	1278.71	939.11	339.59	12.15	8.92	3.23
12 – BO	1073.78	1151.16	-77.38	10.20	10.94	-0.74
TOTAL	10524.66	10524.66		100.00	100.00	

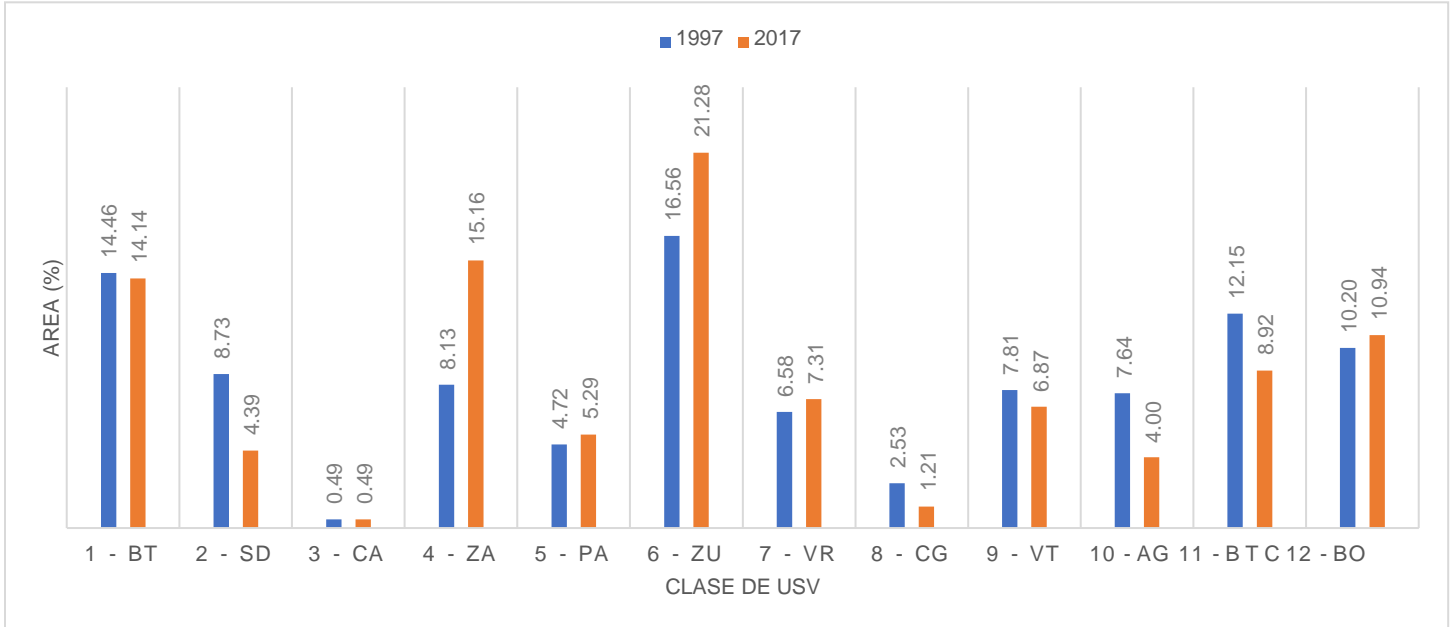


Figura 19. Gráfica con los porcentajes de USV de los años 1997 y 2017

III.1.3. CUSV en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 1997-2017

La matriz de transición (Tabla 4) muestra el porcentaje (%) de la superficie que se transformó en otro USV durante el periodo de tiempo analizado en términos de incremento (columnas), disminución (filas) o permanencia (diagonal).

El 50% de la superficie del BO se mantuvo sin ningún cambio. El mayor porcentaje de cambios de esta clase correspondió a cubiertas forestales, el 23% se convirtió en VT y el 26% en BT; únicamente el 2% de la superficie fue ocupada por Pa, por lo que existió una fragmentación. En contraste, el BTC sufrió grandes pérdidas de superficie y presión antropogénica: el 35% se modificó para usos agrícolas, el 27% se transformó en asentamientos urbanos, el 5% quedó sin cubierta (SD), otro 5% se transformó en Pa y 4% en Ag, únicamente se mantuvo el 24% de su cubierta original.

Se destaca que únicamente el 11% de las áreas de SD permaneció sin modificación, el 23% fue recubierto por el BT, el 1 % por la VT y el 6% por el BO. El 24% de las zonas de SD cambiaron a uso agrícola, el 14% a uso urbano, el 19% fue cubierto por Pa y el 2% se convirtió en Ag. Finalmente, es importante resaltar que grandes superficies se convirtieron en ZU, comenzando por 27% de BTC y de VR, el 20% de la VT, el 25% de las ZA y el 53% de las zonas de Ag.

III.1.4. Tasa de deforestación anual de las cubiertas forestales

En el periodo de 1997-2017, la microcuenca de Cuernavaca presentó una tasa de deforestación anual del 0.3%. Las clases forestales que sufrieron pérdidas de cubierta vegetal por cambios en el uso de suelo o procesos de deforestación fueron: (i) el BT con una tasa de deforestación anual (r) del 0.1%, seguido por (ii) la VT que presentó pérdidas del 0.6% y en mayor medida el (iii) BTC que perdió 1.5% anual de su cubierta. Lo anterior se resume en la tabla 5 y la figura 20.

CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS

Tabla 4. Matriz de transición de los CUSV en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 1997-2017

CLASE	2017	1 - BT	2- SD	3 - CA	4 - ZA	5 - Pa	6 - ZU	7 - VR	8 - CG	9 - VT	10 - Ag	11 - BTC	12 - BO
1997													
1 - BT		65%								9%			26%
2- SD		23%	11%		24%	19%	14%			1%	2%		6%
3 - CA				100%									
4 - ZA		1%	4%		52%	7%	25%			1%	9%		
5 - Pa		16%	10%		17%	23%	6%			18%	2%	7%	2%
6 - ZU							100%						
7 - VR					12%	10%	27%	36%		15%			
8 - CG									100%				
9 - VT		11%	1%		1%	2%	20%			44%			21%
10 - Ag			6%		13%	1%	53%				27%		
11 - BTC			5%		35%	5%	27%				4%	24%	
12 - BO		26%				2%				23%			50%

Tabla 5. Tasa de deforestación en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 1997-2017

CLASE		1997 ha	2017 ha	Δ ha	r (%)
1 - BT		1521.45	1488.48	32.97	0.1
9 - VT		821.71	722.86	98.86	0.6
11 - BTC		1278.71	939.11	339.59	1.5

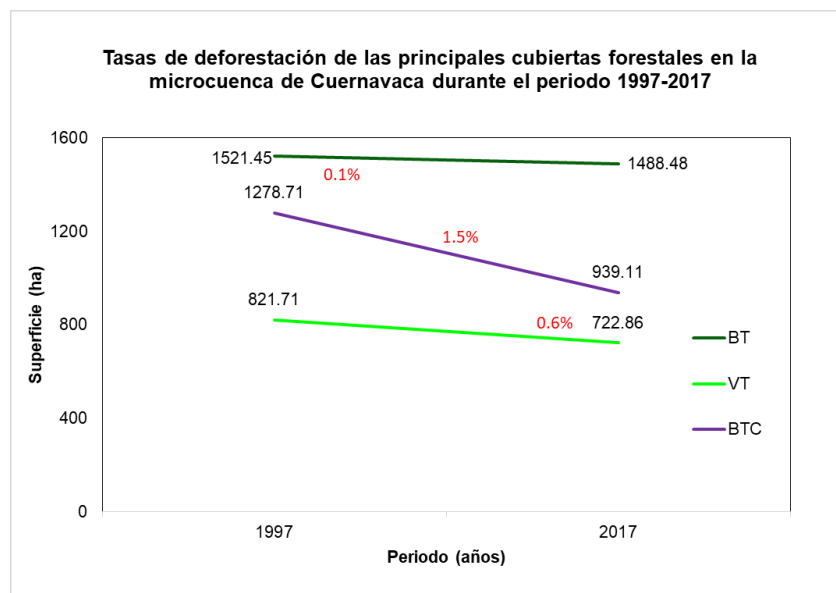


Figura 20. Gráfica de la tasa de deforestación anual del periodo 1997-2017

III.2. Año meteorológico típico de los periodos 1992-1997 y 2011-2016, y análisis de variabilidad climática

III.2.1. Selección de los meses que conforman el AMT

Tras ejecutar el programa *TMY* se generó una tabla con los valores de *WS* asignado a cada mes de cada año del periodo analizado (Tabla 6). Se seleccionaron los valores más cercanos a cero, que corresponden a los meses más típicos o representativos del periodo analizado y que conformaron el AMT

III.2.2. Análisis de variabilidad climática

Una vez obtenidos los meses que conforman el AMT para ambos periodos, se aplicó estadística descriptiva a los datos diarios de cada una de las variables, obteniendo así valores promedio, valores mínimos y máximos, así como primer y tercer cuartil. Los resultados se representaron en boxplots en las figuras 21-36.

La *Evap* mantuvo un patrón de comportamiento relativamente constante en ambos periodos de análisis, sin embargo, se observaron valores más bajos (intervalo promedio de -0.4 mm) durante el segundo periodo (2011-2016).

De manera similar la T_{min} no se observaron variaciones importantes en su patrón de comportamiento y también mostro una tendencia con valores más bajos (intervalo promedio de -0.7 °C) para el segundo periodo de análisis (2011-2016)

Por otra parte, los valores medios de la T_{max} se mantuvieron dentro de los 27°C en ambos periodos de análisis (1992-1997 y 2011-2016). Sin embargo, durante el segundo periodo se observó un aumento (intervalo promedio +1 °C) en los valores máximos, mientras que los valores mínimos mostraron una disminución (intervalo promedio -1 °C). Esta fluctuación entre los valores máximos y mínimos sugiere una evidente variabilidad en el comportamiento diario de la temperatura con una amplitud térmica muy amplia.

Cabe destacar que el comportamiento de la T_{max} descrito anteriormente obedece únicamente a una observación general en la microcuenca de Cuernavaca y durante los periodos completos de análisis. Sin embargo, al observar de manera

particular su comportamiento en cada una de las estaciones y durante periodos de tiempo más cortos (meses seleccionados para formar el AMT), las variaciones en los valores medios son más significativas, principalmente en las zonas medias de la microcuenca, donde se localiza la ZM de Cuernavaca. Caso evidente de lo anterior es el de la estación "17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR", en el mes de mayo durante el periodo 1992-1997 la T_{max} alcanzó un valor promedio de 29.7 °C, mientras que, para el mes de mayo del periodo 2011-2016 el valor alcanzado fue de 35.6 °C, es decir, aumentó 5.9 °C el valor medio de la T_{max} .

La P presentó la variación más significativa con un incremento promedio de 313 mm en los volúmenes de lluvia durante el segundo periodo de análisis (2011-2016). Sin embargo, en algunas zonas de la microcuenca de Cuernavaca como el caso de la estación meteorológica 17071-PROGRESO se observó un incremento de más del 100% en el volumen de precipitación. Dicha estación, durante el periodo 1992-1997 registró una precipitación anual acumulada de 668.5 mm, mientras que para el periodo 2011-2016 se observó un volumen de precipitación anual acumulada de 1447.6 mm. Es decir, precipitaron 779 mm más durante el periodo 2011-2016.

CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS

Tabla 6. Valores de WS de los periodos 1992-1997 y 2011-2016 para cada estación meteorológica en la microcuenca de Cuernavaca

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Estación "17004-Cuernavaca (DGE)-MOR"												
0.0398	0.0216	0.0193	0.0038	0.0340	0.0147	0.0086	0.0170	0.0265	0.0130	0.0168	0.0159	1992
0.0082	0.0034	0.0027	0.0100	0.0030	0.0025	0.0038	0.0119	0.0086	0.0066	0.0093	0.0145	1993
0.0117	0.0060	0.0098	0.0023	0.0076	0.0094	0.0069	0.0034	0.0144	0.0155	0.0024	0.0071	1994
0.0053	0.0142	0.0061	0.0036	0.0037	0.0073	0.0046	0.0061	0.0085	0.0068	0.0082	0.0051	1995
0.0100	0.0065	0.0080	0.0119	0.0101	0.0059	0.0049	0.0046	0.0081	0.0040	0.0025	0.0091	1996
0.0123	0.0051	0.0102	0.0049	0.0085	0.0034	0.0060	0.0064	0.0122	0.0047	0.0093	0.0060	1997
0.0294	0.0145	0.0122	0.0316	0.0055	0.0151	0.0049	0.0044	0.0221	0.0206	0.0220	0.0296	2011
0.0116	0.0060	0.0139	0.0082	0.0062	0.0096	0.0135	0.0226	0.0037	0.0042	0.0188	0.0071	2012
0.0126	0.0085	0.0160	0.0124	0.0139	0.0182	0.0205	0.0065	0.0136	0.0065	0.0083	0.0147	2013
0.0119	0.0119	0.0186	0.0097	0.0147	0.0089	0.0133	0.0110	0.0071	0.0207	0.0078	0.0252	2014
0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0116	0.0091	0.0278	0.0349	2015
0.0322	0.0204	0.0298	0.0198	0.0127	0.0325	0.0202	0.0179	0.0138	0.0212	0.0228	0.0120	2016
Estación "17047-Huitzilac-MOR"												
0.0201	0.0264	0.0131	0.0141	0.0166	0.0246	0.0242	0.0201	0.0143	0.0084	0.0233	0.0204	1992
0.0101	0.0047	0.0089	0.0069	0.0123	0.0121	0.0057	0.0147	0.0170	0.0069	0.0074	0.0136	1993
0.0074	0.0049	0.0119	0.0132	0.0215	0.0178	0.0174	0.0123	0.0041	0.0097	0.0164	0.0039	1994
0.0065	0.0030	0.0078	0.0123	0.0079	0.0106	0.0048	0.0201	0.0067	0.0122	0.0057	0.0090	1995
0.0118	0.0108	0.0081	0.0109	0.0025	0.0166	0.0034	0.0095	0.0052	0.0097	0.0151	0.0022	1996
0.0096	0.0099	0.0080	0.0188	0.0096	0.0129	0.0058	0.0108	0.0133	0.0064	0.0187	0.0063	1997
0.0207	0.0132	0.0206	0.0040	0.0058	0.0072	0.0179	0.0233	0.0157	0.0068	0.0068	0.0110	2011
0.0141	0.0148	0.0086	0.0104	0.0079	0.0086	0.0141	0.0201	0.0097	0.0092	0.0106	0.0106	2012
0.0045	0.0051	0.0090	0.0045	0.0065	0.0103	0.0182	0.0183	0.0217	0.0157	0.0092	0.0062	2013
0.0063	0.0206	0.0233	0.0099	0.0075	0.0047	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0223	0.0181	2014
0.0136	0.0063	0.0151	0.0130	0.0113	0.0079	0.0069	0.0156	0.0103	0.0106	0.0139	0.0053	2015
0.0365	0.0228	0.0321	0.0028	0.0136	0.0078	0.0078	0.0106	0.0095	0.0074	0.0054	0.0080	2016
Estación "17071-Progreso-MOR"												
0.0161	0.0202	0.0156	0.0106	0.0123	0.0056	0.0097	0.0098	0.0098	0.0049	0.0192	0.0099	1992
0.0067	0.0042	0.0115	0.0051	0.0306	0.0047	0.0037	0.0104	0.0056	0.0037	0.0054	0.0075	1993
0.0132	0.0140	0.0043	0.0062	0.0085	0.0072	0.0166	0.0114	0.0052	0.0082	0.0094	0.0075	1994
0.0101	0.0067	0.0027	0.0219	0.0263	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1995
0.0106	0.0081	0.0035	0.0091	0.0112	0.0037	0.0045	0.0070	0.0100	0.0031	0.0157	0.0067	1996
0.0099	0.0083	0.0048	0.0265	0.0165	0.0099	0.0080	0.0114	0.0063	0.0078	0.0095	0.0119	1997
0.0189	0.0148	0.0061	0.0025	0.0081	0.0145	0.0032	0.0069	0.0145	0.0054	0.0044	NA	2011
0.0024	0.0068	0.0026	0.0183	0.0185	0.0052	0.0134	0.0049	0.0081	0.0053	0.0053	0.0030	2012
0.0071	0.0071	0.0182	0.0147	0.0095	0.0053	0.0068	0.0146	0.0062	0.0074	0.0048	0.0088	2013
0.0074	0.0294	0.0035	0.0093	0.0059	0.0175	0.0054	0.0088	0.0042	0.0215	0.0102	0.0044	2014
0.0051	0.0058	0.0160	0.0073	0.0069	0.0035	0.0057	0.0071	0.0062	0.0044	0.0044	0.0118	2015
0.0104	0.0081	0.0041	0.0129	0.0094	0.0055	0.0119	0.0106	0.0161	0.0136	0.0062	0.0052	2016
Estación "17014-Temixco-MOR"												
0.0215	0.0196	0.0211	0.0148	0.0161	0.0040	0.0103	0.0163	0.0096	0.0135	0.0189	0.0130	1992
0.0039	0.0046	0.0079	0.0042	0.0168	0.0060	0.0108	0.0057	0.0051	0.0074	0.0034	0.0065	1993
0.0039	0.0042	0.0036	0.0055	0.0051	0.0164	0.0071	0.0121	0.0082	0.0125	0.0175	0.0162	1994
0.0119	0.0173	0.0193	0.0113	0.0165	0.0043	0.0183	0.0132	0.0116	0.0052	0.0059	0.0044	1995
0.0118	0.0097	0.0193	0.0144	0.0144	0.0057	0.0126	0.0093	0.0162	0.0095	0.0189	0.0094	1996
0.0186	0.0199	0.0062	0.0063	0.0022	0.0083	0.0117	0.0198	0.0099	0.0103	0.0049	0.0156	1997
0.0054	0.0101	0.0094	0.0063	0.0079	0.0043	0.0164	0.0179	0.0153	0.0074	0.0145	0.0077	2011
0.0129	0.0227	0.0141	0.0031	0.0084	0.0144	0.0108	0.0070	0.0092	0.0066	0.0091	0.0159	2012
0.0054	0.0085	0.0101	0.0024	0.0081	0.0146	0.0143	0.0184	0.0170	0.0151	0.0059	0.0112	2013
0.0129	0.0091	0.0098	0.0094	0.0140	0.0116	0.0052	0.0094	0.0090	0.0109	0.0169	0.0217	2014
0.0398	0.0403	0.0403	0.0058	0.0146	0.0115	0.0073	0.0068	0.0050	0.0142	0.0145	0.0205	2015
0.0165	0.0158	0.0242	0.0064	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403	2016

CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS

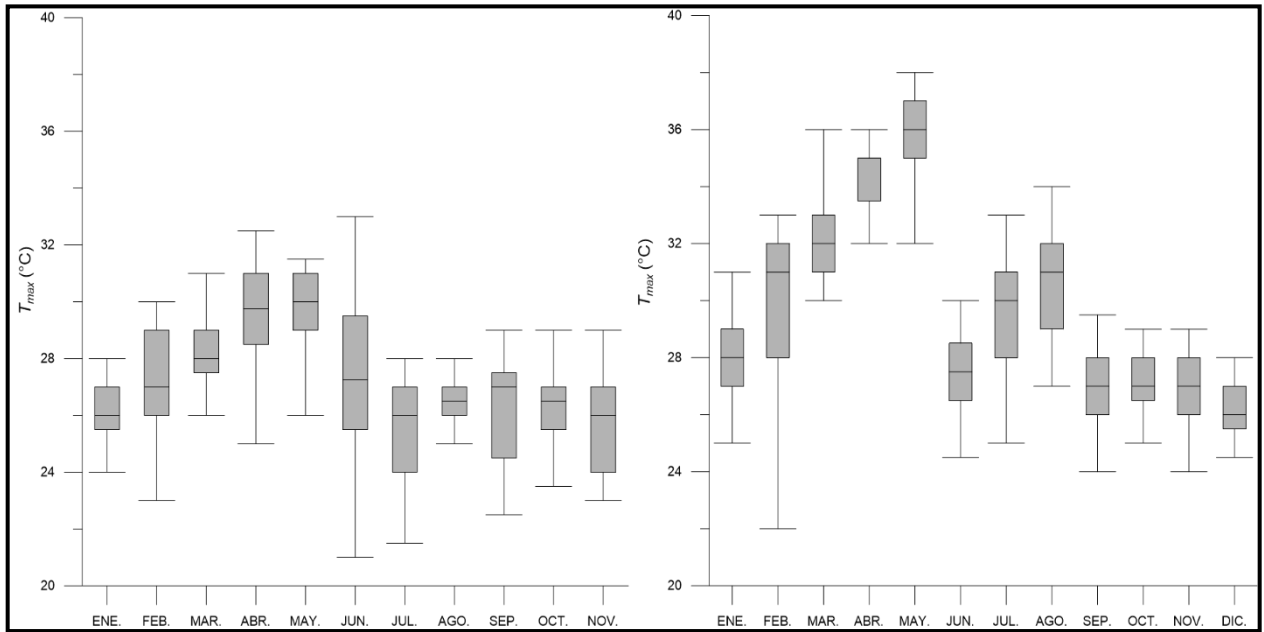


Figura 21. Boxplots de los datos diarios de T_{max} . Estación “17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

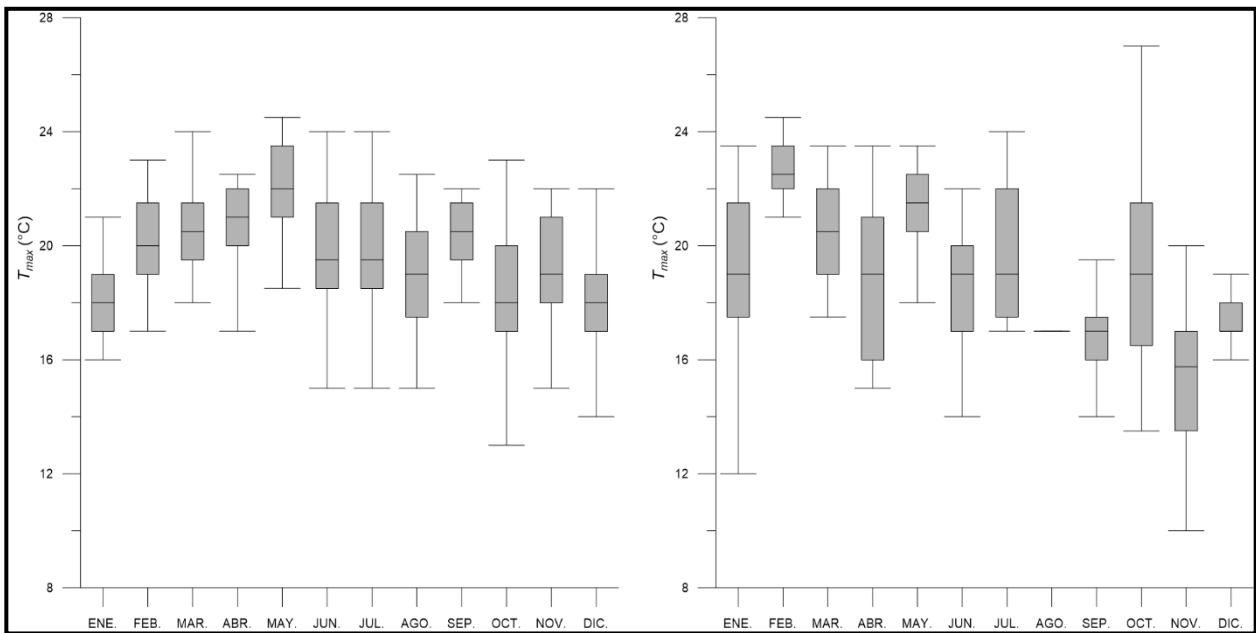


Figura 22. Boxplots de los datos diarios de T_{max} . Estación “17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS

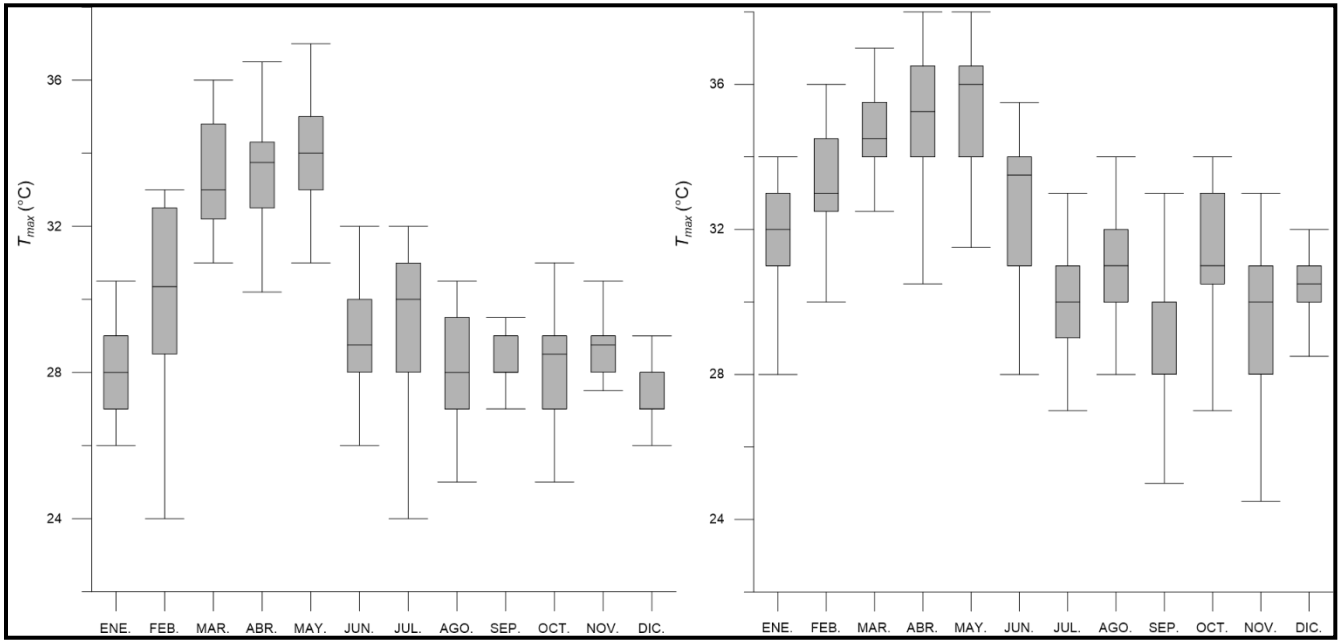


Figura 23. Boxplots de los datos diarios de T_{max} . Estación "17014-TEMIXCO-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

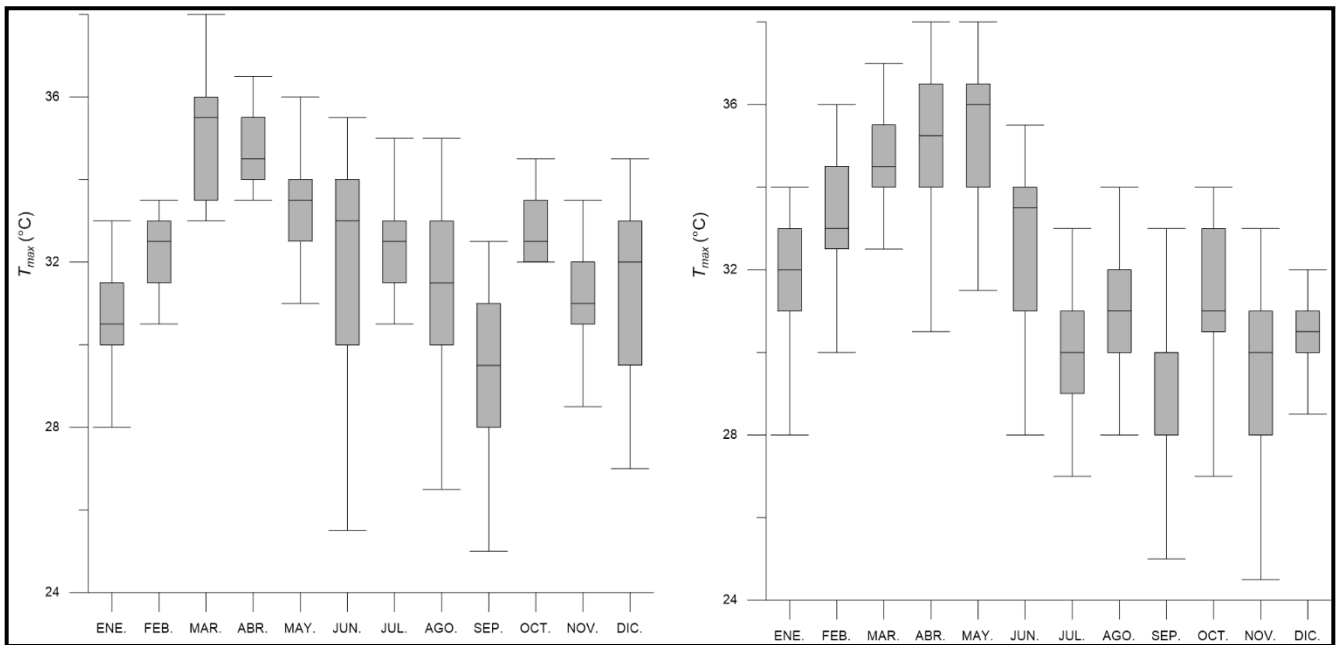


Figura 24. Boxplots de los datos diarios de T_{max} . Estación "17071-PROGRESO-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

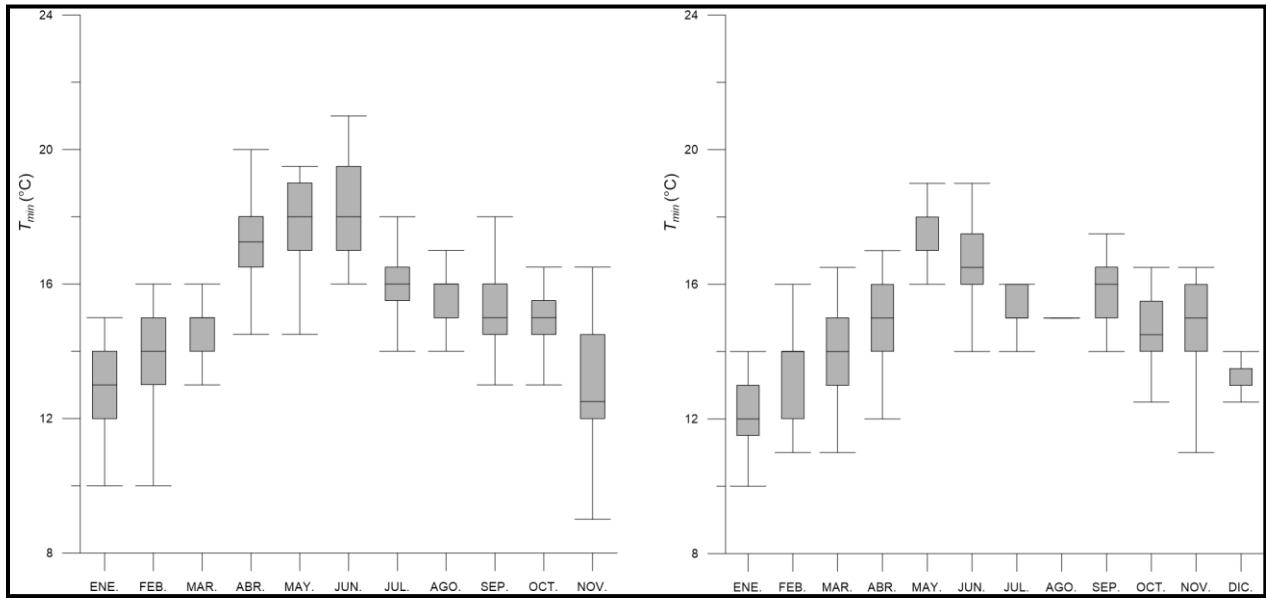


Figura 25. Boxplots de los datos diarios de Tmin. Estación "17047-HUITZILAC-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

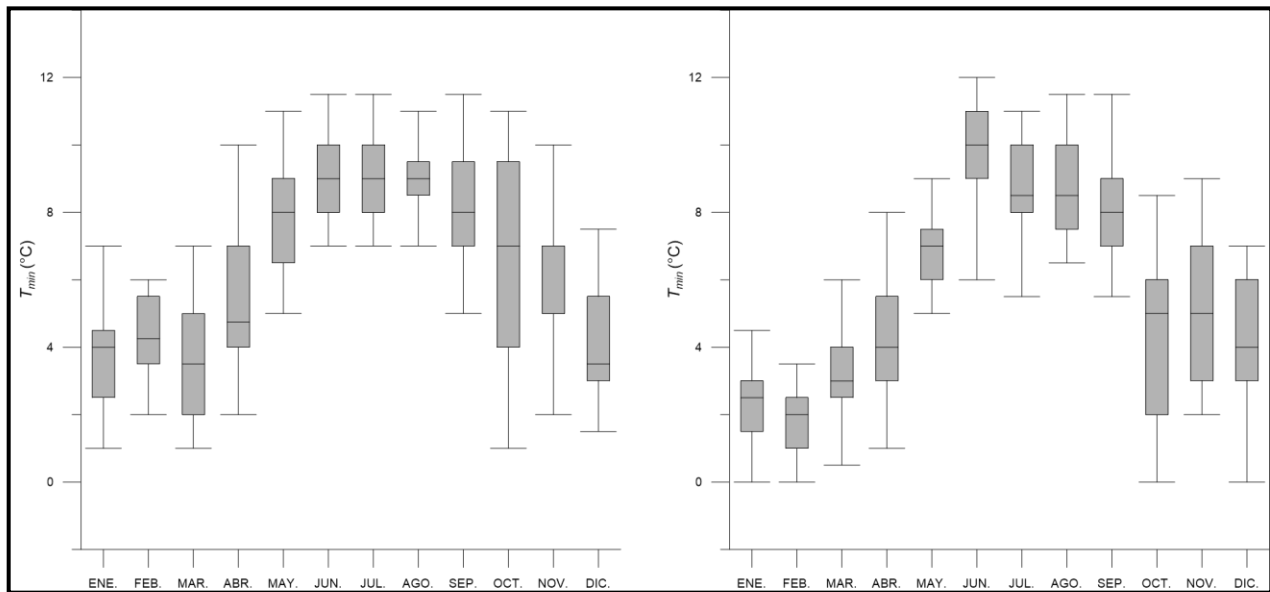


Figura 26. Boxplots de los datos diarios de Tmin. Estación "17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

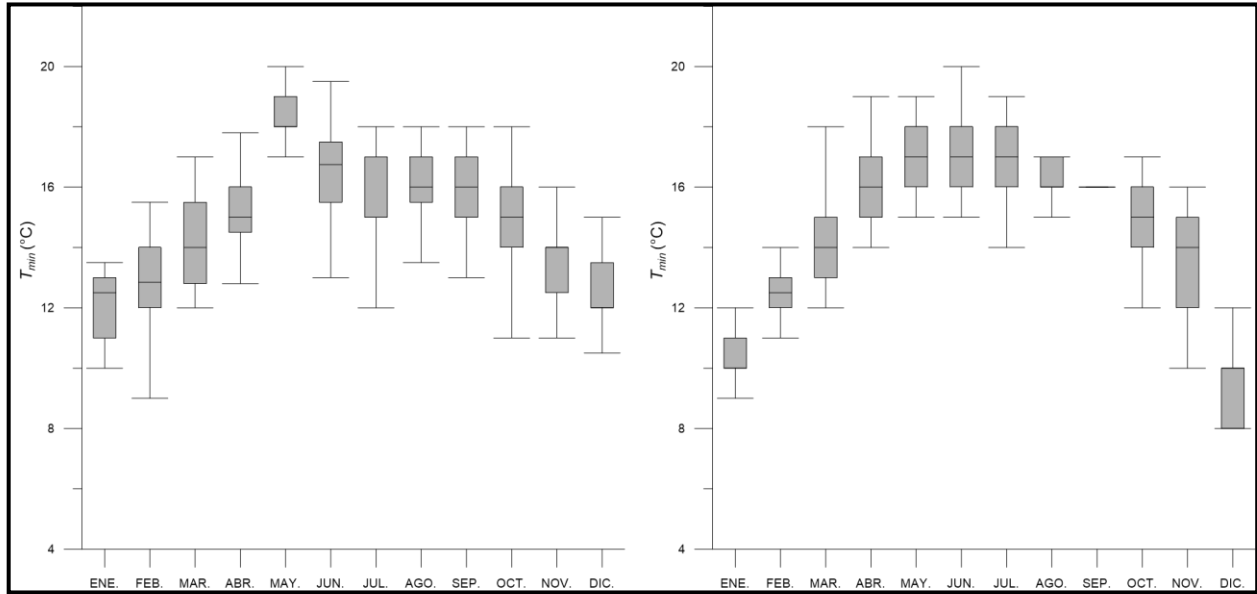


Figura 27. Boxplots de los datos diarios de T_{min} . Estación "17014-TEMIXCO-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

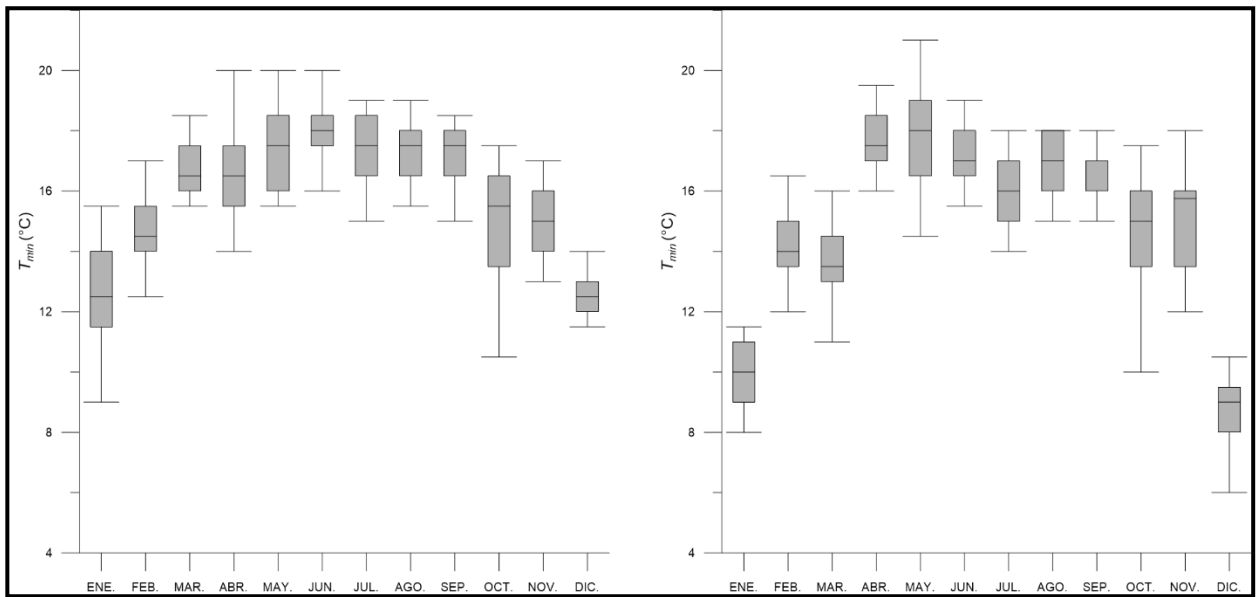


Figura 28. Boxplots de los datos diarios de T_{min} . Estación "17071-PROGRESO-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

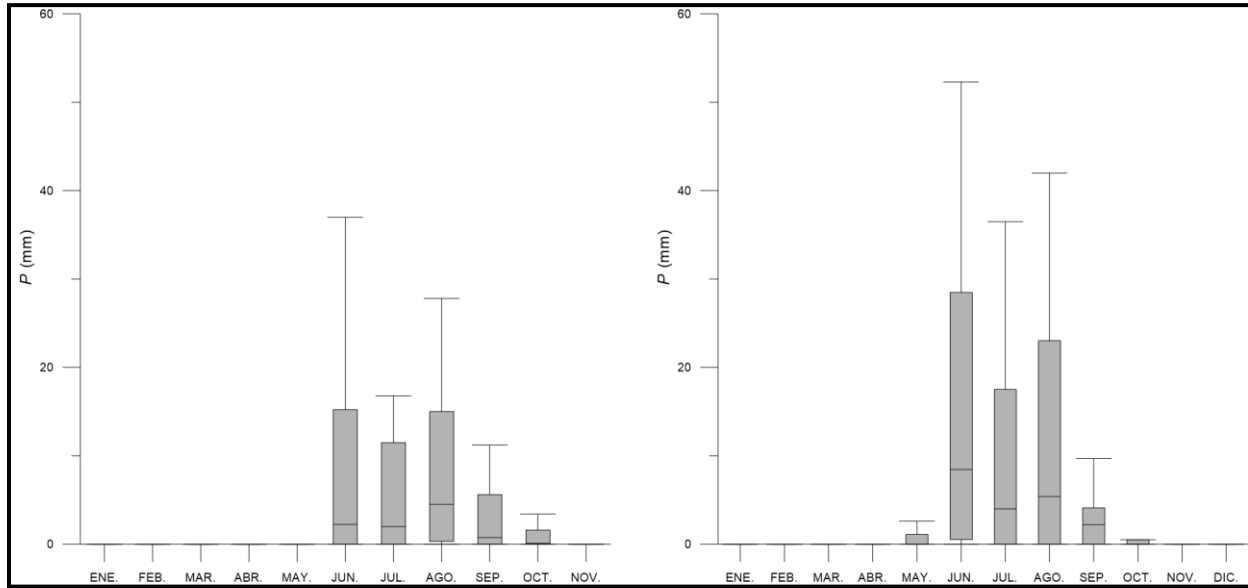


Figura 29. Boxplots de los datos diarios de *P*. Estación “17047-HUITZILAC-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

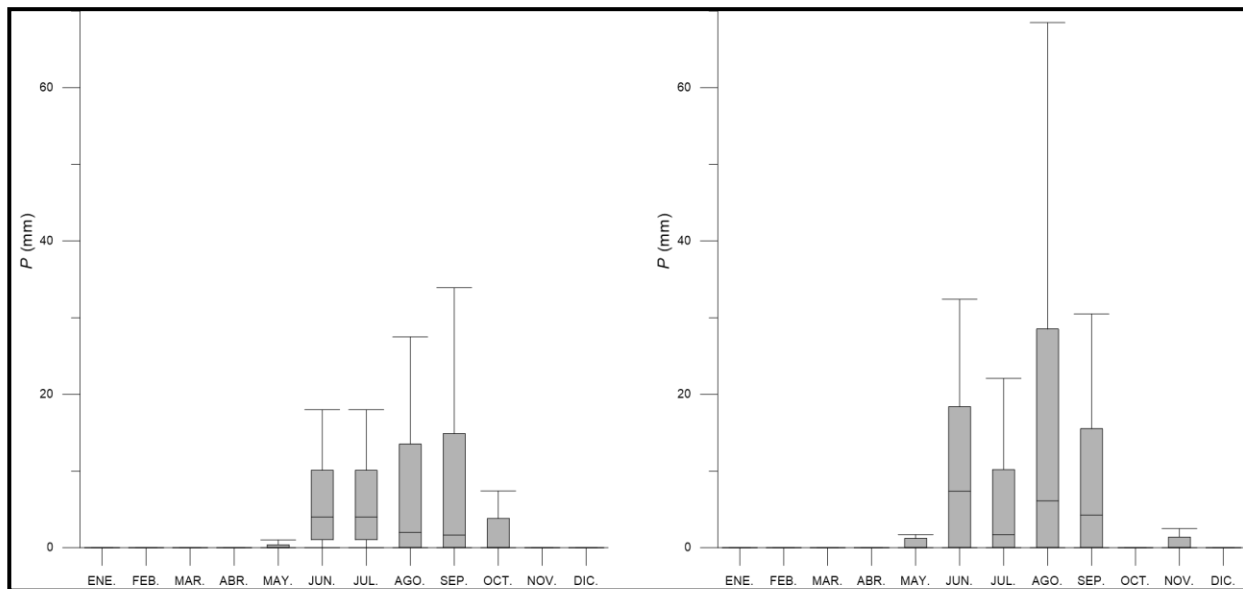


Figura 30. Boxplots de los datos diarios de *P*. Estación “17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE CUERNAVACA, MORELOS

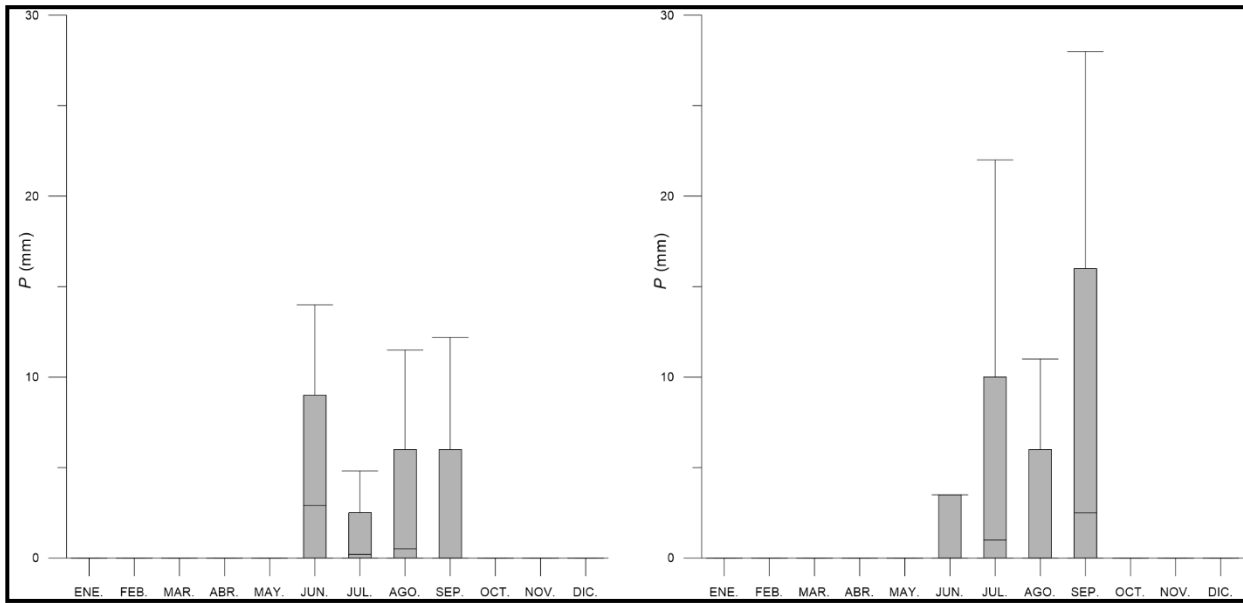


Figura 31. Boxplots de los datos diarios de P. Estación "17014-TEMIXCO-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

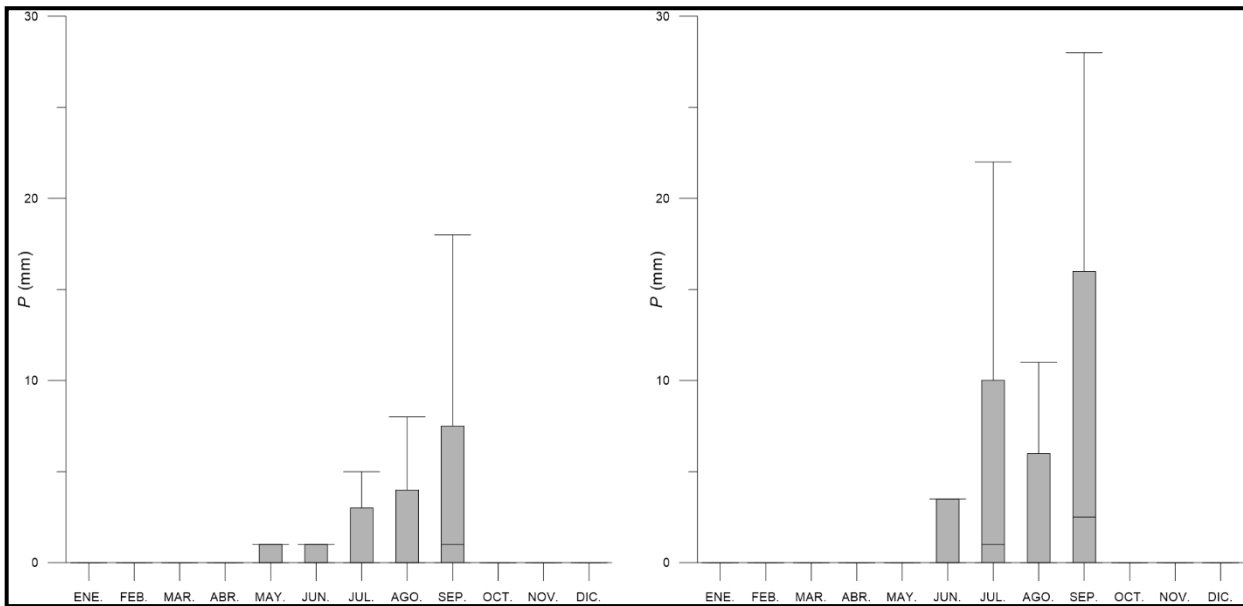


Figura 32. Boxplots de los datos diarios de P. Estación "17071-PROGRESO-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

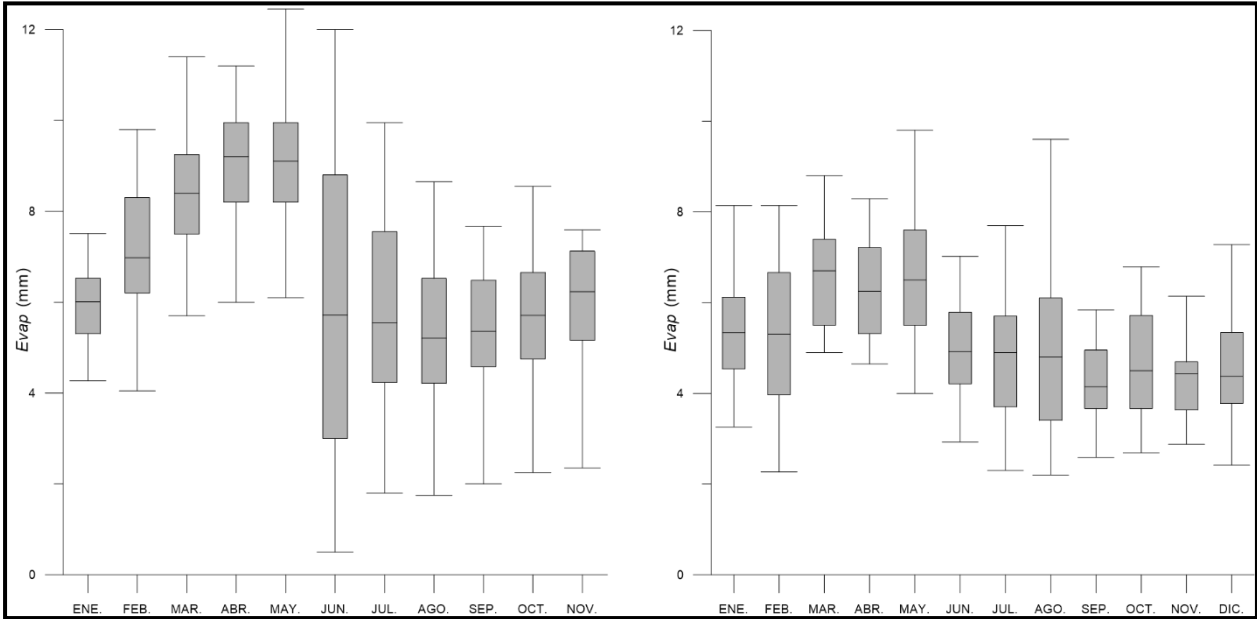


Figura 33. Boxplots de los datos diarios de Evap. Estación “17047-HUITZILAC-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

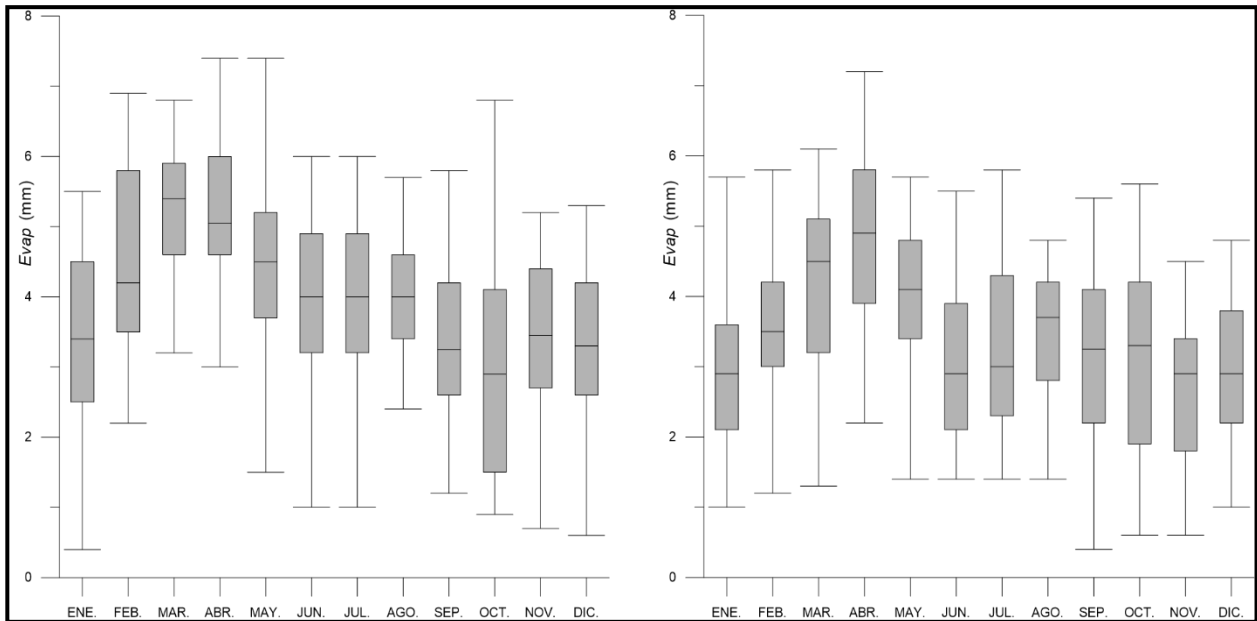


Figura 34. Boxplots de los datos diarios de Evap. Estación “17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR”. A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

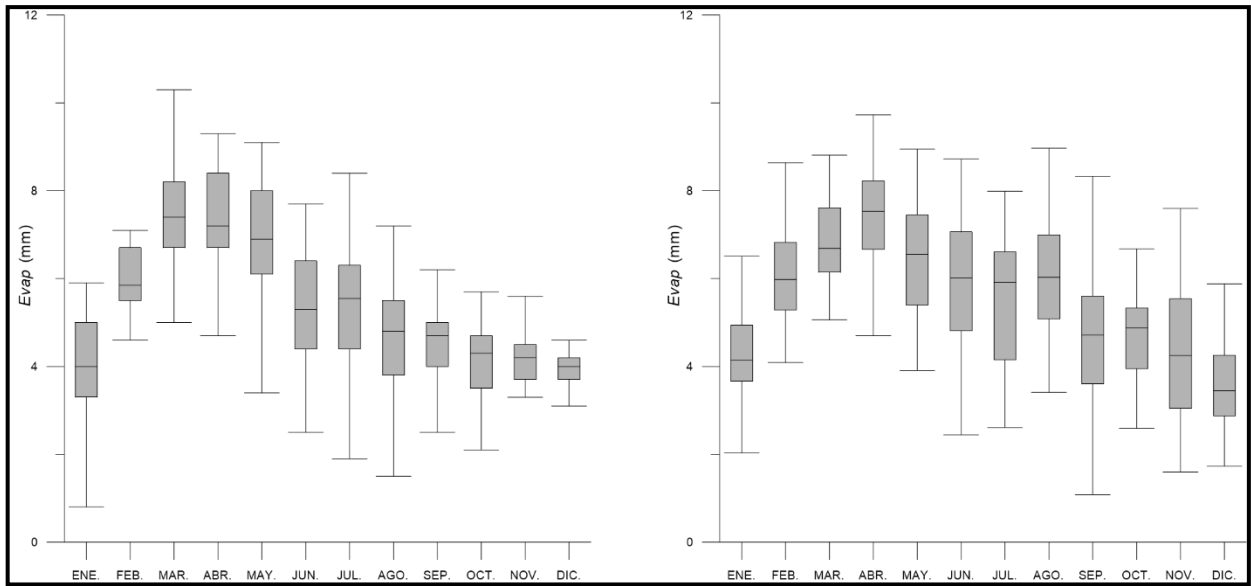


Figura 35. Boxplots de los datos diarios de Evap. Estación "17014-TEMIXCO-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

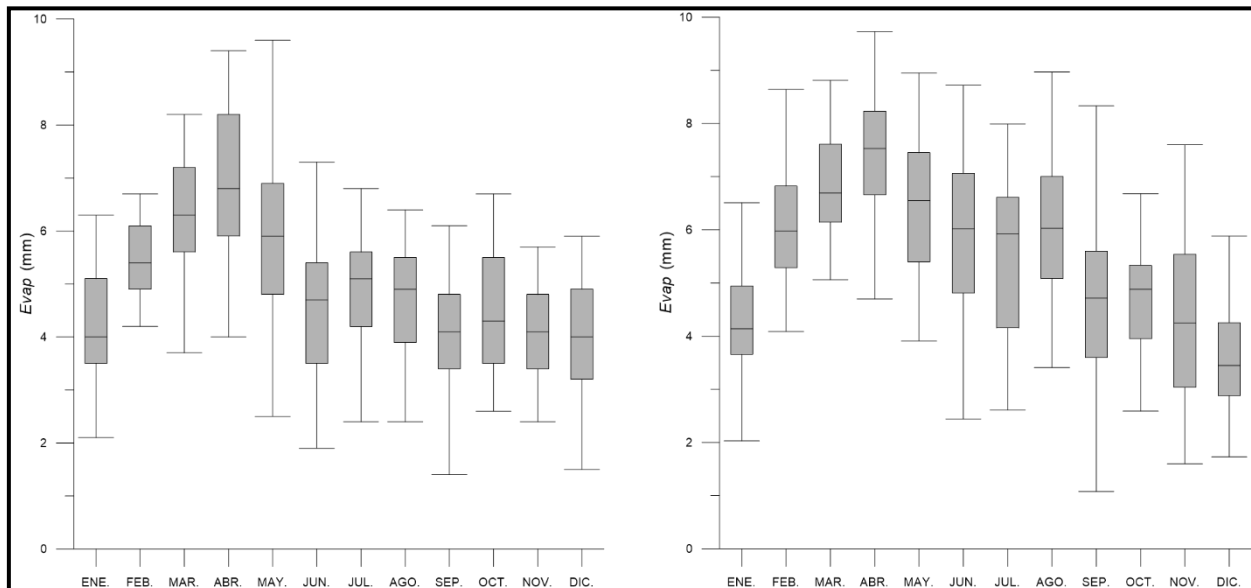


Figura 36. Boxplots de los datos diarios de Evap. Estación "17071-PROGRESO-MOR". A la izquierda se representa el periodo 1992-1997 y a la derecha el periodo 2011-2016

III.3. Variación en la infiltración hídrica de la microcuenca de Cuernavaca a causa de los CUSV en el periodo 1997-2017

III.3.1. Coeficiente de escurrimiento (*CE*)

Las texturas del suelo en la microcuenca de Cuernavaca corresponden a arcillas y limos, por lo que se les asignaron valores de 1 y 2, respectivamente (Figura 37). Según lo establecido en la Tabla 1 y de acuerdo con el USV de 1997 y 2017, se obtuvieron los valores del *parámetro K*.

Las zonas permeables y con mayor capacidad de intercepción de la precipitación por parte de la cubierta vegetal (valores de *K* más cercanos a cero y representados con tonos de menor intensidad en las figuras 38 y 39) se concentran en la parte alta de la microcuenca y corresponden a zonas forestales. Por otro lado, las zonas impermeables (valores de *K* más cercanos a uno y representados por tonos de mayor intensidad en las figuras 38 y 39) corresponden a las zonas bajas y se relacionan a zonas con actividades antropogénicas y asentamientos urbanos.

Las variaciones del *parámetro K* se presentaron principalmente en la zona media de la microcuenca, donde también son evidentes los cambios de la VT y BTC a usos agrícolas o asentamientos urbanos. Estas superficies forestales de igual manera presentaron las tasas de deforestación más altas, convirtiéndose en zonas impermeables o con menor capacidad de infiltración de la precipitación.

Las figuras 40 y 41 muestran la distribución espacial de la precipitación. Las partes altas de la microcuenca registran mayor volumen de precipitación, con valores de 1400 y 1600 mm anuales para el periodo 1992-1997 y valores de 1560 y 1685 mm anuales para el periodo de 2011-2016. En la parte media de la microcuenca precipitaron entre 1260 y 1380 mm anuales para el periodo 1992-1997 y entre 1470 y 1500 mm para el periodo 2011-2016. La zona baja de la microcuenca presentó menor precipitación, durante el periodo 1992-1997 precipito entre 750 y 1100 mm por año y durante el periodo 2011-2016 se registraron precipitaciones de 960 a 1300 mm anuales. Es evidente que existió un aumento en el volumen de la

precipitación en el periodo 2011-2016 respecto al periodo 1992-1997, principalmente en las zonas media y baja de la microcuenca.

Con los valores de K y P se calculó CE representado en las figuras 42 y 43. Los valores de CE más cercanos a uno (tonos de mayor intensidad) representan las superficies donde potencialmente puede escurrir mayor volumen de precipitación, mientras que los valores más cercanos a cero (tonos de menor intensidad) representan las superficies donde existe menor escurrimiento. Las zonas con menor CE se localizan principalmente en la parte alta y media alta de la microcuenca. Por el contrario, en la zona media (donde se concentran los asentamientos urbanos,) presentan superficies con mayor CE . En el año 2017, la zona media alta de la microcuenca presentó CE mayores con respecto a 1997. Esto posiblemente debido a la fragmentación de la VT y BO que mostró el análisis de CUSV.

III.3.2. infiltración total (IT)

Conociendo los valores de P y CE se calculó la infiltración total (IT ; Figuras 44 y 45). En estas figuras se observa que para el año 2017 los valores de infiltración aumentaron respecto al año 1997, es decir, actualmente se infiltra mayor volumen de agua, probablemente debido al aumento que también ha existido en los volúmenes de la precipitación. Sin embargo, también se debe destacar que como ocurrió con el parámetro K y el CE en las zonas medias de la cuenca que han sufrido fragmentación de las cubiertas forestales, también existió variación en la infiltración.

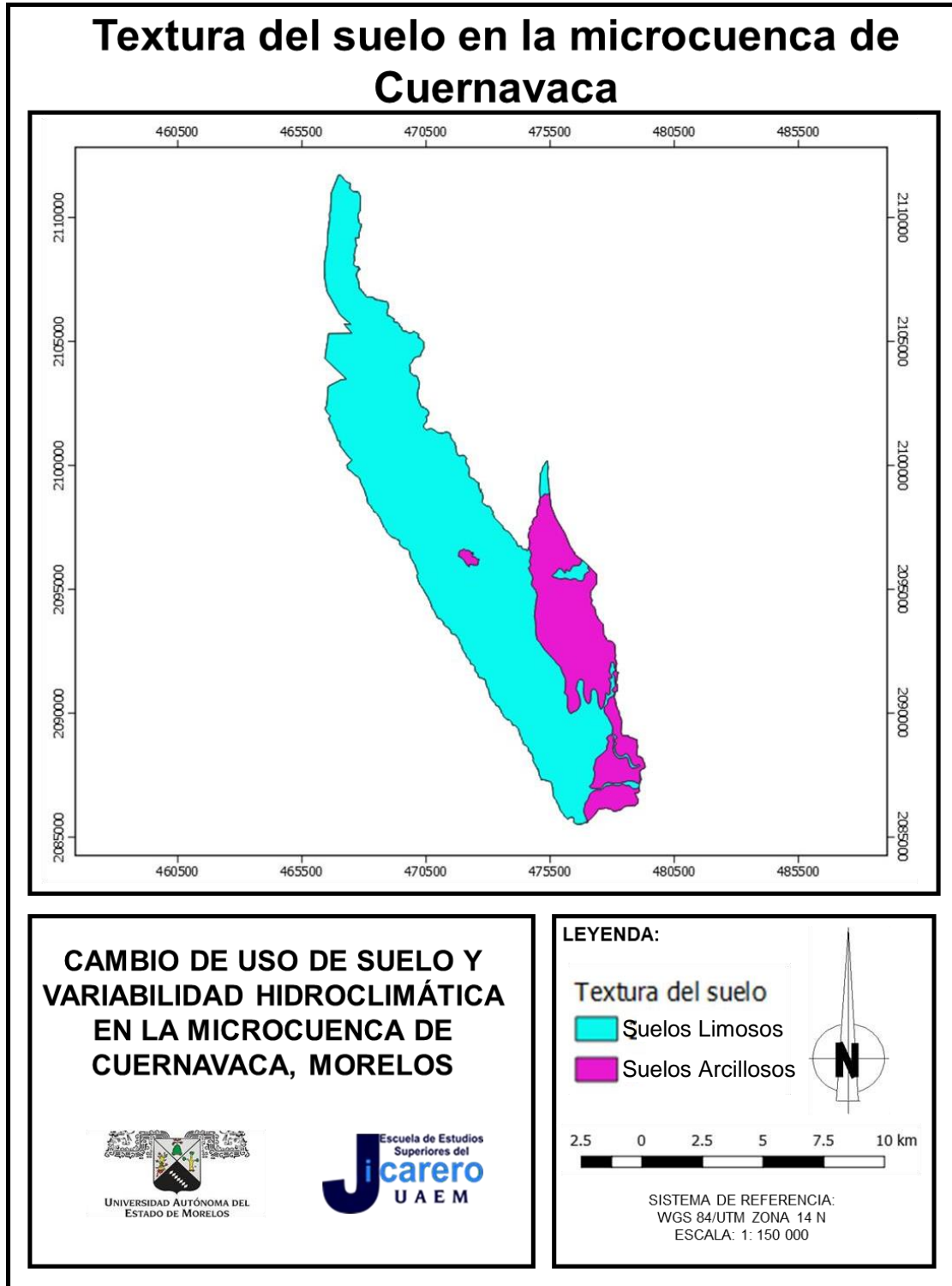


Figura 37. Valores de la textura del suelo en la microcuenca de Cuernavaca. Los valores de 2 corresponden a suelos limosos y los valores de 3 a suelos arcillosos.

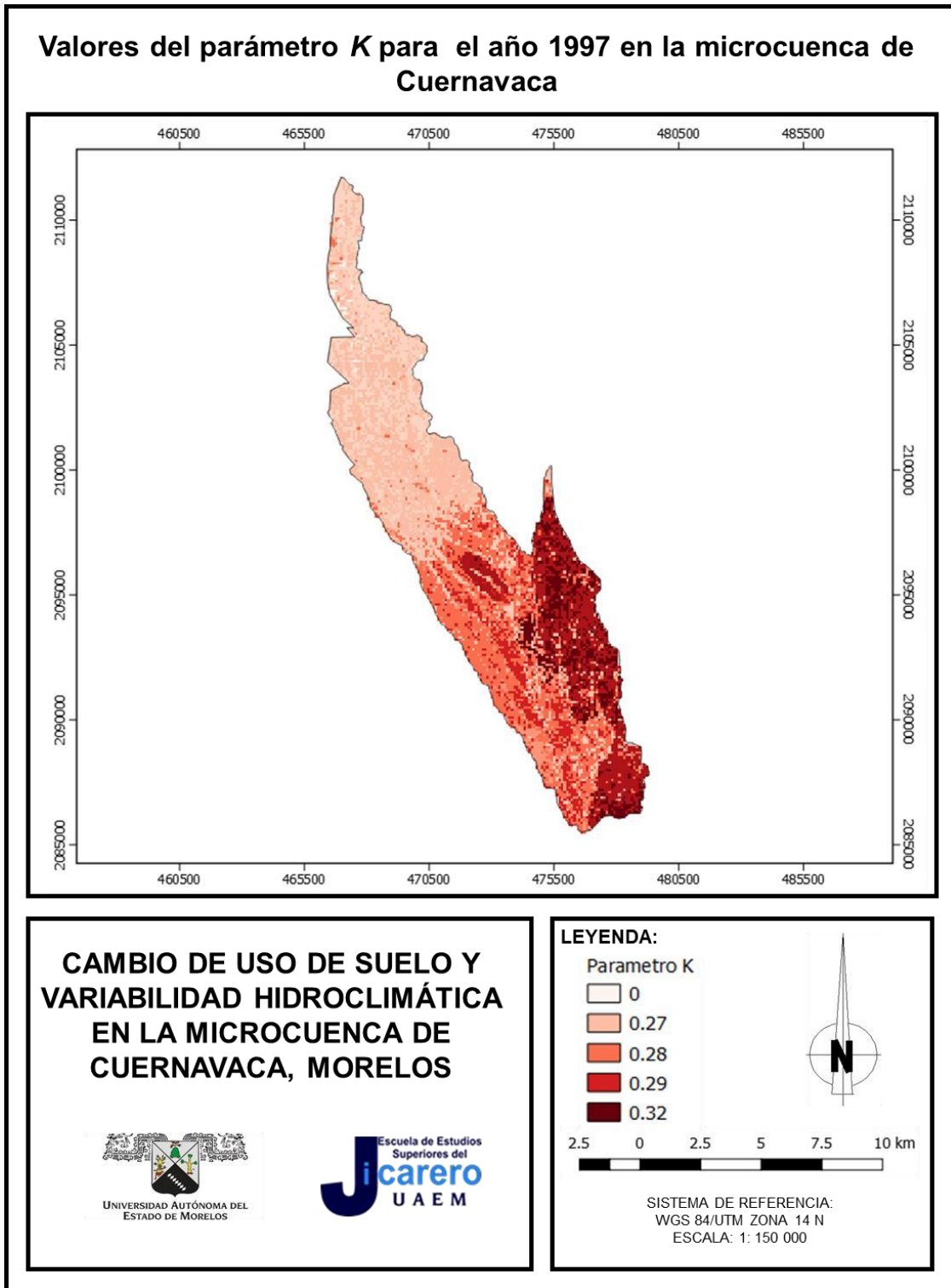


Figura 38. Valores del parámetro K para el año 1997 en la microcuenca de Cuernavaca

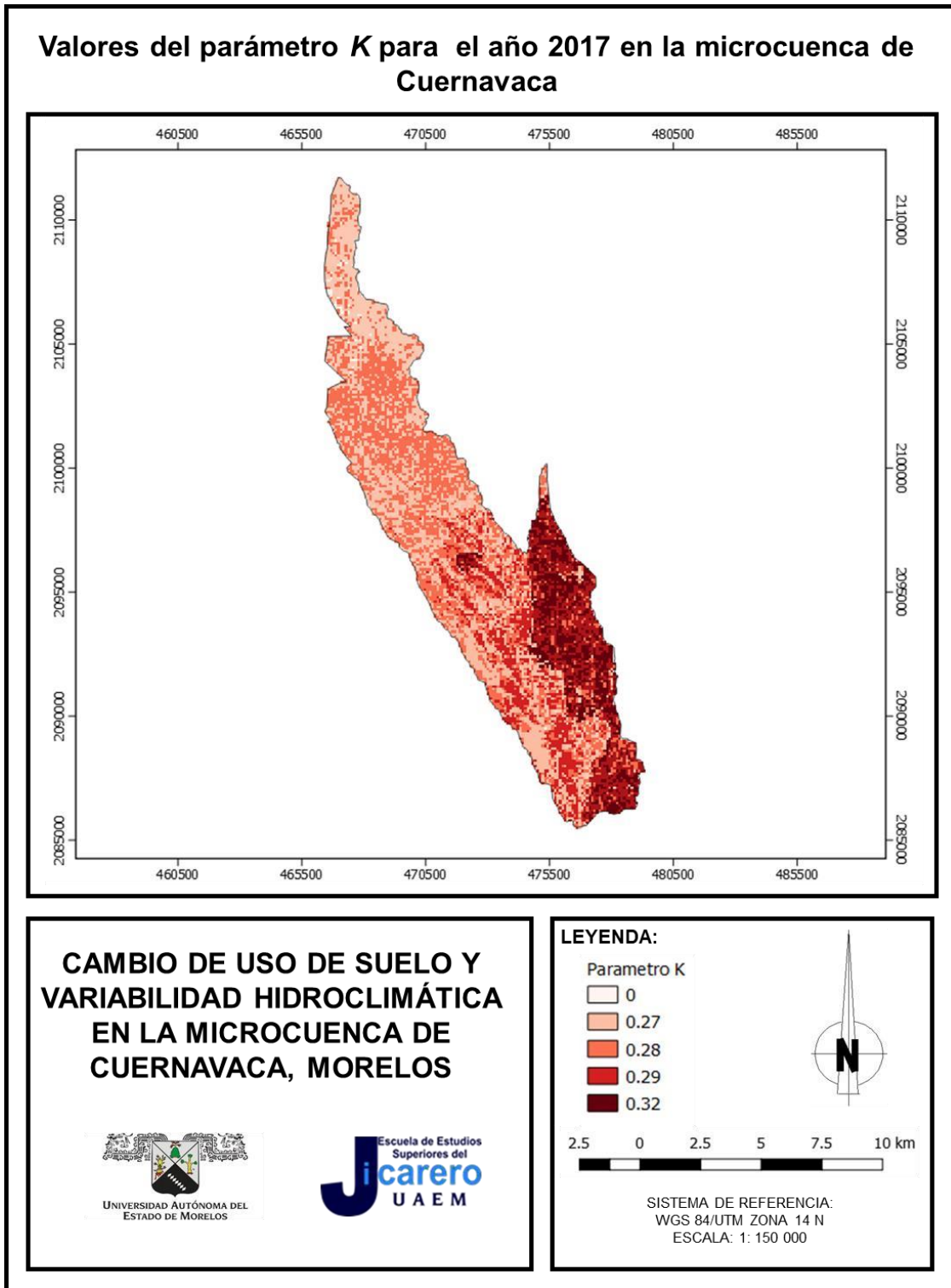


Figura 39. Valores del parámetro K para el año 2017 en la microcuenca de Cuernavaca

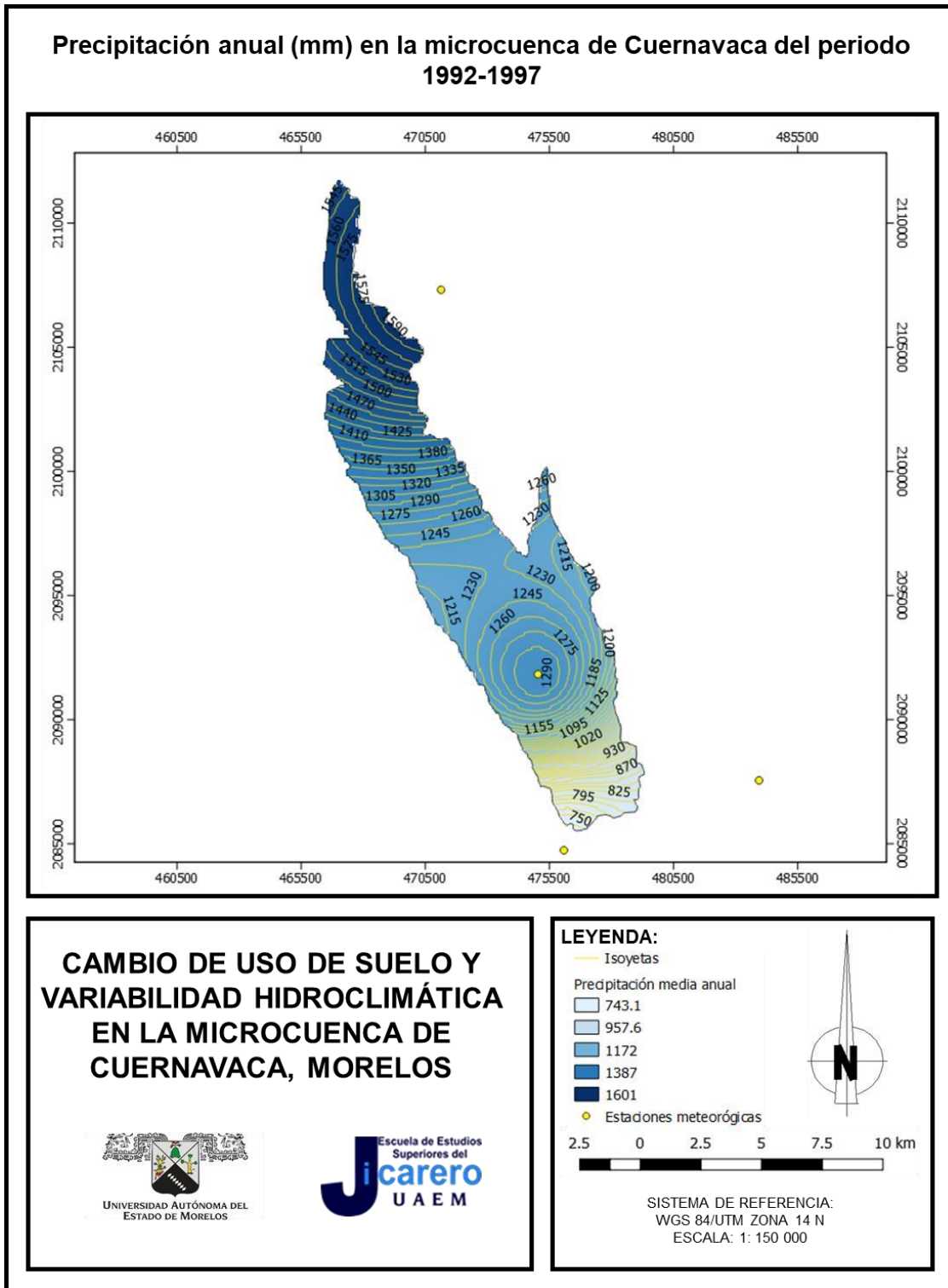


Figura 40. Mapa de distribución de la P anual (mm) en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 1992-1997

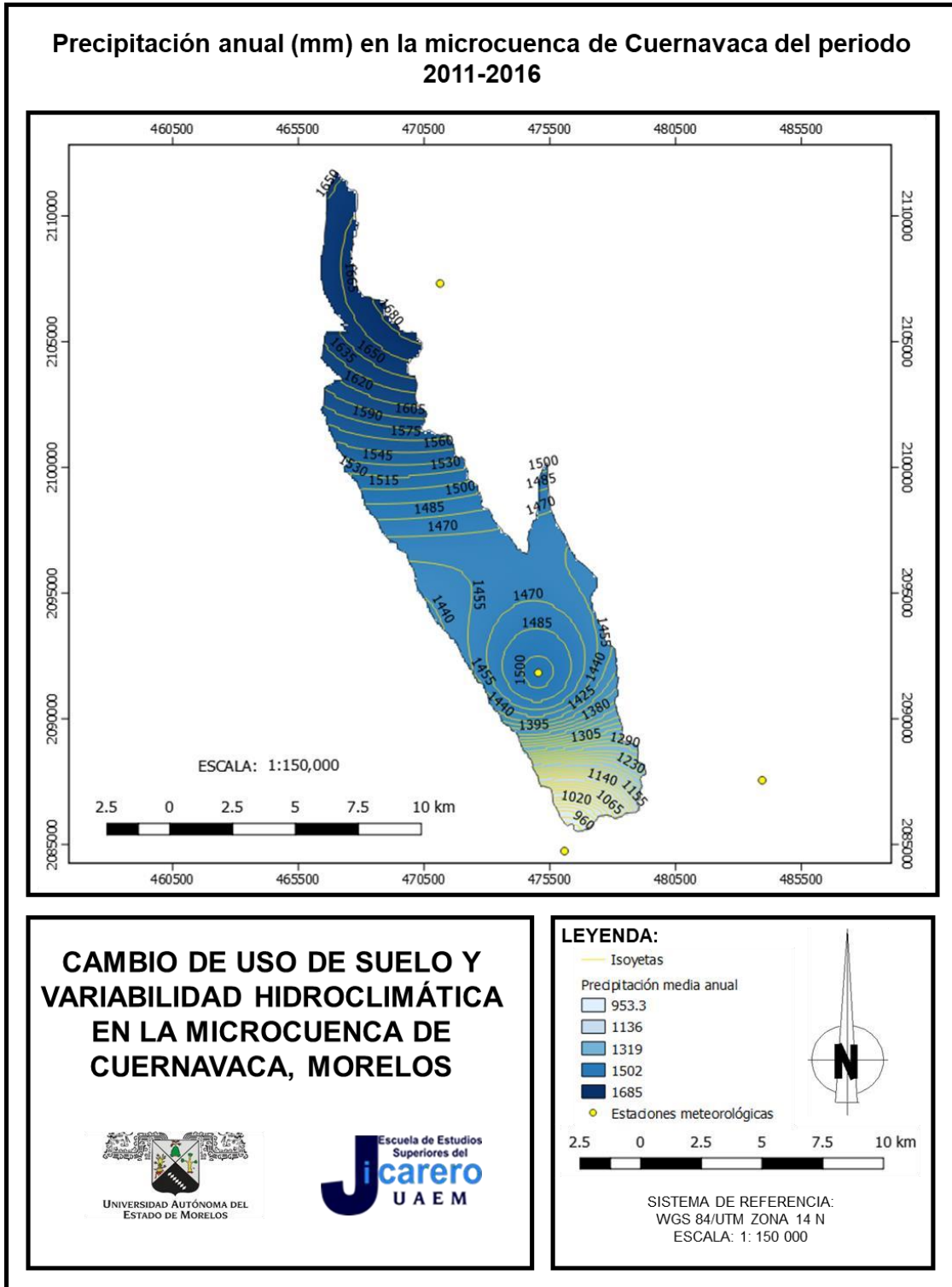


Figura 41. Mapa de distribución de la P anual (mm) en la microcuenca de Cuernavaca durante el periodo 2011-2016

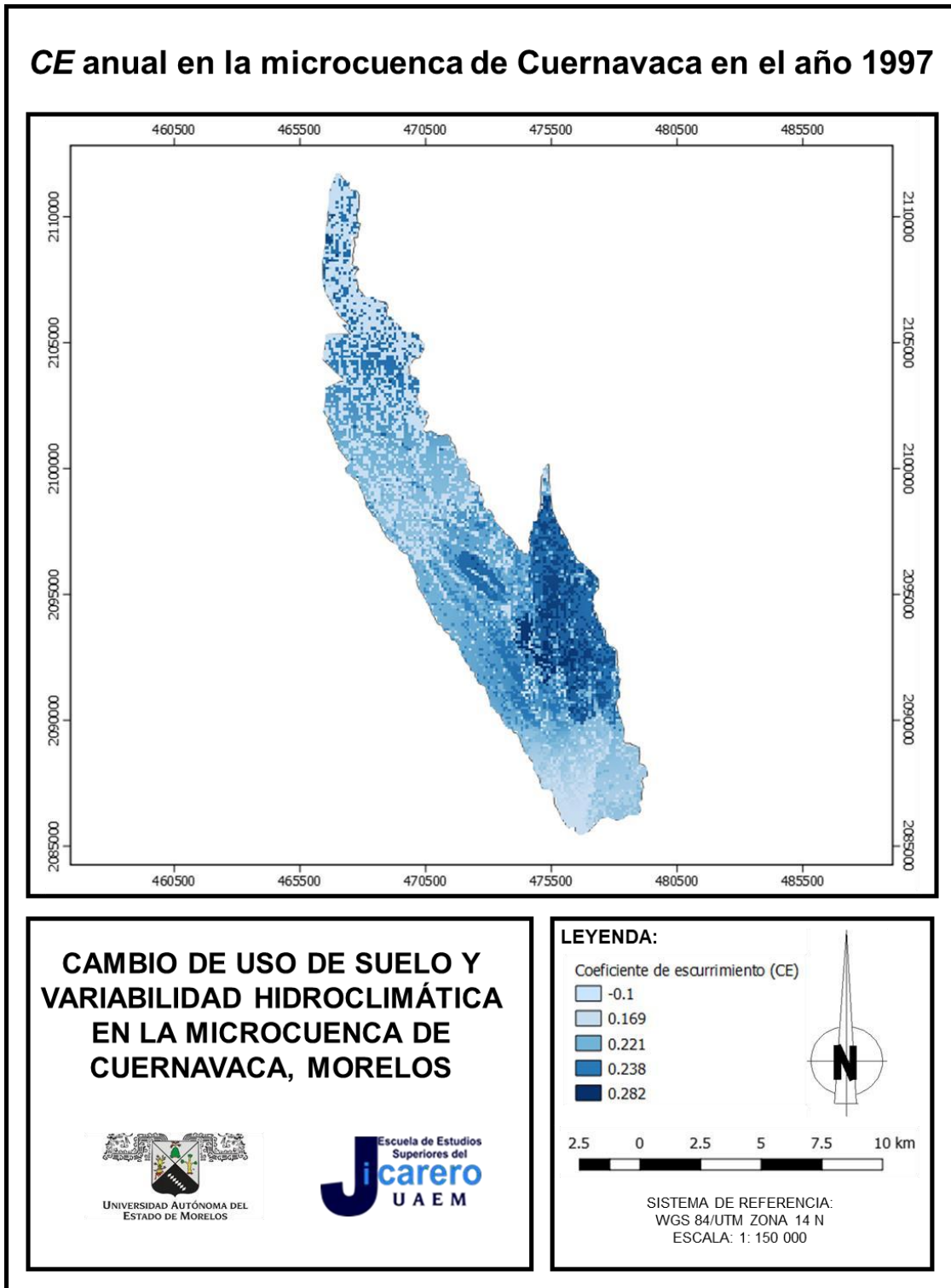


Figura 42. Mapa de distribución del Coeficiente de escurrimiento (CE) en la microcuenca de Cuernavaca para el año 1997

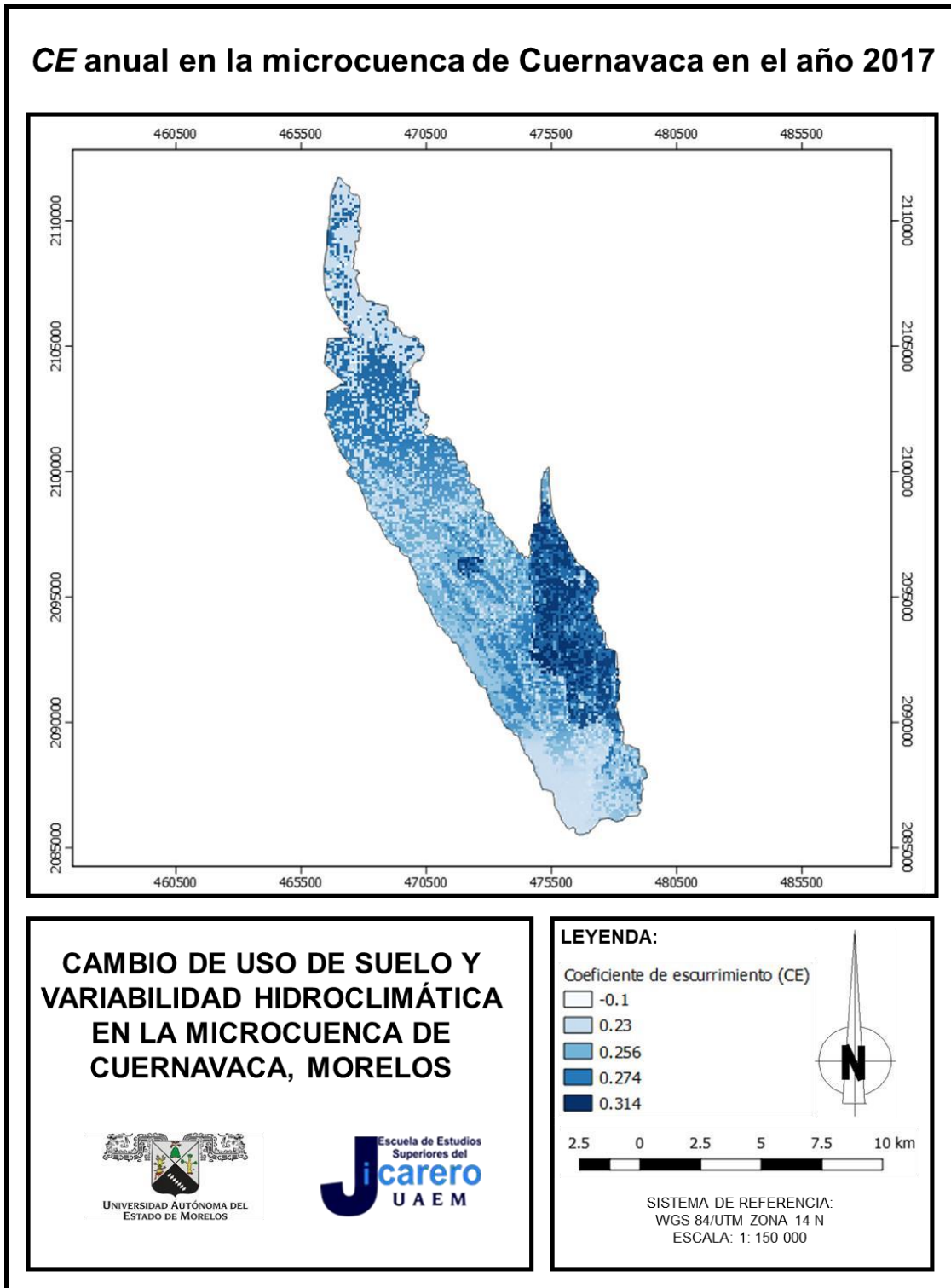


Figura 43. Mapa de distribución del Coeficiente de escurrimiento (CE) en la microcuenca de Cuernavaca para el año 2017

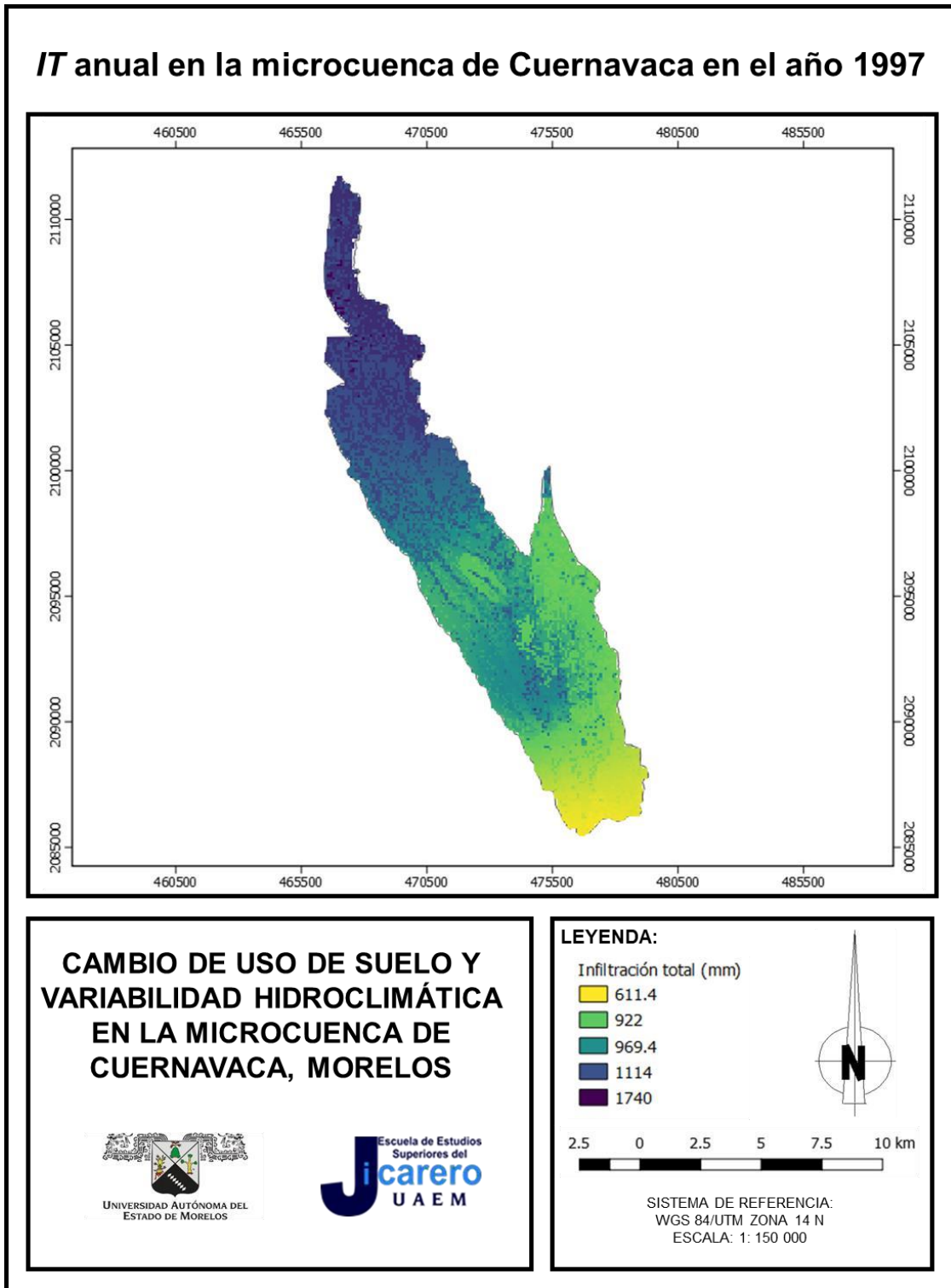


Figura 44. Mapa de distribución de la infiltración total (IT) en la microcuenca de Cuernavaca para el año 1997

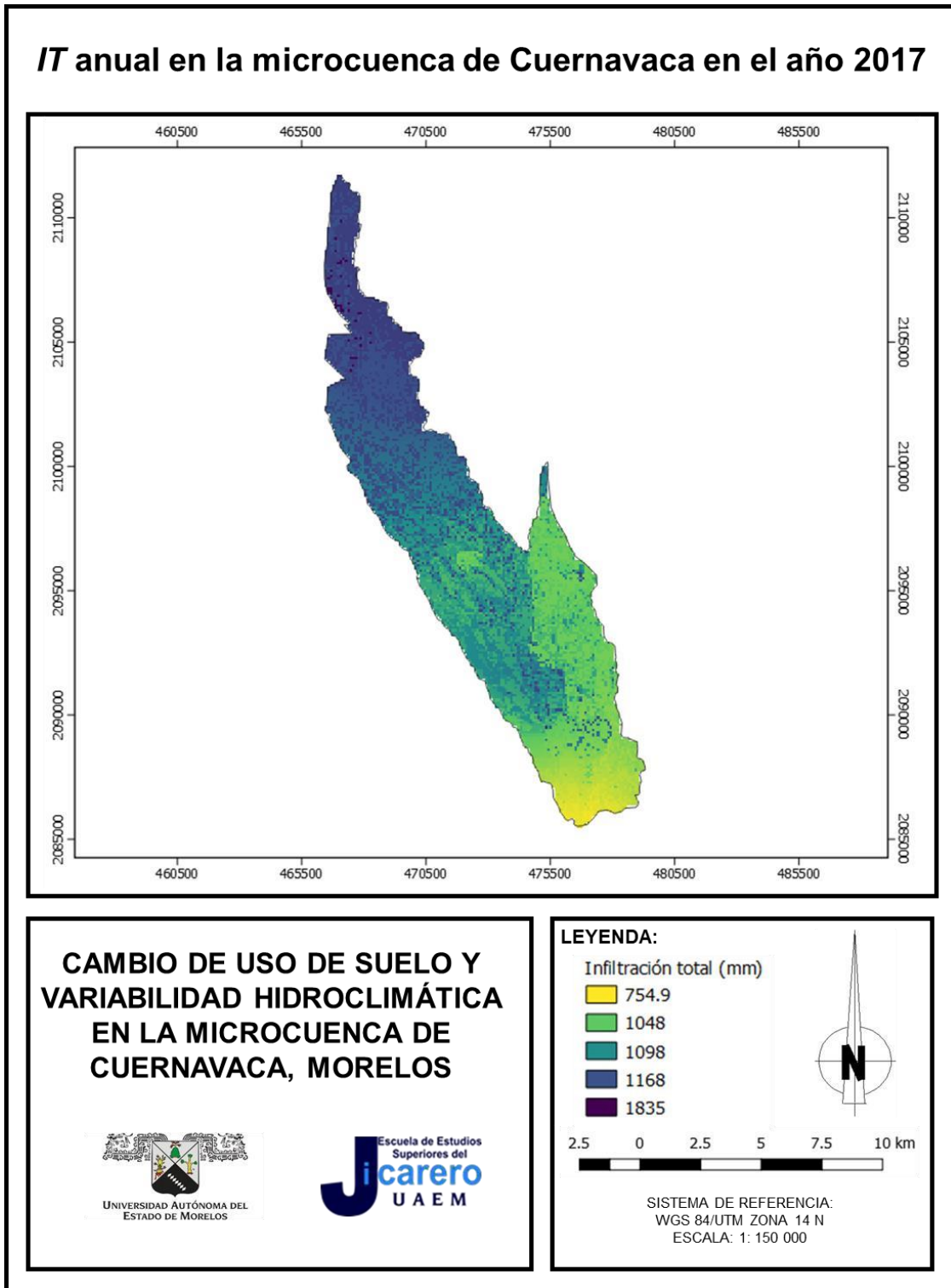


Figura 45. Mapa de distribución de la infiltración total (IT) en la microcuenca de Cuernavaca para el año 2017

Capítulo IV. Discusión

Los factores analizados en este trabajo fueron: (i) los cambios de uso de suelo y vegetación y (ii) la viabilidad climática. Estos factores tienen una estrecha influencia en los procesos y condiciones hidrológicas de las cuencas, y pueden modificar parámetros como la precipitación, escurrimiento superficial, infiltración, evapotranspiración, entre otros (Valenzuela-Núñez *et al.*, 2012; Kundu *et al.*, 2017).

La microcuenca de Cuernavaca presentó cambios significativos de uso de suelo y vegetación (CUSV) durante el periodo 1997-2017. Estos cambios influyen directamente en los procesos de infiltración del suelo y en la interceptación de la precipitación (P) por parte de la cubierta vegetal (representados por el parámetro K). Lo anterior, junto a las variaciones meteorológicas como la T y la P , repercute directamente en las condiciones hidrológicas de la microcuenca.

La cuenca alta funge como zona de recarga o captación hídrica, por ser la zona con mayor precipitación. Esta zona se debe considerar una de las prioritarias para su conservación. A pesar de no haber presentado una tasa de deforestación significativa de áreas de Bosque Templado (BT), sino contrariamente, se observó una recuperación forestal. Mantener estas condiciones de conservación o reforestación, implica una mejora general en las condiciones hidrológicas de toda la microcuenca. Al presentar áreas conservadas de BT, la lluvia permanece más tiempo en forma de humedad en el suelo y la vegetación, dando oportunidad a que ocurran los procesos de infiltración y recarga de los acuíferos, la evapotranspiración, y reduce los volúmenes en los caudales de escurrimiento, evitando la erosión y el arrastre de contaminantes a las zonas medias y bajas de la microcuenca. Dichas condiciones se observaron en los modelos del parámetro K y CE . En la cuenca alta se identificaron las zonas con mayor permeabilidad, menor variación en el coeficiente de escurrimiento y mayores volúmenes de infiltración.

Por otro lado, la cuenca media que funge como zona de transporte y la cuenca baja que es la zona de emisión, presentaron los cambios más significativos de usos de suelo, en cubiertas forestales, tales como: (i) Bosque de Oyamel (BO)

que sufrió procesos de fragmentación en el 50% de su superficie, (ii) Vegetación de Transición (VT) que además de fragmentación, presentó una considerable tasa de deforestación (0.6% anual) y (iii) Bosque Tropical Caducifolio (BTC) que sufrió las tasas de pérdida más altas (1.5%) durante el periodo de análisis. Este último valor muy cercano al reportado por Trejo & Dirzo (2000), quienes calcularon pérdidas del BTC de 1.4% para el Estado de Morelos durante el periodo 1973-1989. En contraste, Sotelo-Caro *et al.* (2015) durante el periodo 2002-2012, en la subcuenca del Río Apatlaco, a la cual pertenece la microcuenca de Cuernavaca, reportaron una tasa de deforestación para el BTC mucho menor (0.13%). Sin embargo, de acuerdo con dichos autores, estas pérdidas se asocian a la presión de las actividades antropogénicas como la agricultura y el pastoreo, así como el crecimiento urbano del área metropolitana.

Los CUSV ocurridos se reflejaron en los parámetros K y CE . En las zonas con los principales cambios identificados, la capacidad de infiltración y las áreas permeables se redujeron considerablemente durante el periodo 1997-2017, y en consecuencia las zonas con potencial de escurrimiento aumentaron.

El análisis de variabilidad climática a través de la generación de los AMT's de los periodos 1992-1997 y 2011-2016, reflejó el considerable aumento de la **temperatura máxima** (T_{max}), principalmente en las zonas urbanas (cuenca media y baja) y particularmente en los meses que anteceden a las lluvias. Por ejemplo, en la estación "17004-CUERNAVACA (DGE)-MOR" ubicada dentro de la zona metropolitana de Cuernavaca, los valores medios alcanzaron un valor de 30°C para el mes de mayo durante el periodo 1992-1997, mientras que para el periodo 2011-2016 hubo un aumento de seis grados, alcanzando un valor de 36°C.

Luévano (2015) observó un caso similar al realizar un análisis comparativo de intensidad y frecuencia en ondas cálidas entre la década de 1980 y 2010 en la zona metropolitana de Xalapa. Con el fin de determinar la influencia de los CUSV en el comportamiento de la T_{max} , particularmente con la sustitución de cubiertas vegetales sustituidas por asentamientos urbanos, encontró una tendencia de

aumento de esta variable. Para la década de 1980 reportó valores máximos de 36.1 °C, mientras que para 2010 el máximo alcanzado fue de 38.4°C.

Por otro lado, la **amplitud térmica diaria** entre T_{max} y T_{min} fue mayor en el período 2011-2016 en la microcuenca de Cuernavaca, lo que indica variaciones diarias de la temperatura oscilando entre los valores extremos de ambas variables. Para el periodo 1992-1997 la amplitud térmica diaria osciló entre 15°C, mientras que para el periodo 2011-2016 osciló entre 20°C.

En la microcuenca de Cuernavaca la **precipitación** presentó variaciones considerables. Se observó un aumento en los volúmenes y días de lluvia. Durante el periodo 1992-1997, la precipitación acumulada varió entre 740 mm y 1600 mm anuales, y durante el periodo 2011-2016 los volúmenes registrados fueron entre 950 mm y 1685 mm anuales. Lo anterior sugiere que en general las condiciones hidrológicas propiciaron mayores volúmenes de precipitación.

Dicho aumento en la precipitación se vio reflejado en el modelo de **infiltración** de la microcuenca. Se observó un incremento en los volúmenes de lluvia infiltrados en el año 2017 (750-1835 mm), respecto al año 1997 (600-1740 mm). Esto se explica por el aumento en la precipitación anual en toda la microcuenca. Sin embargo, es importante señalar que, en la cuenca media, zona que presentó una significativa disminución de áreas permeables y un aumento en áreas con altos **CE**, debido a los CUSV suscitados, se afectó el proceso de infiltración. Principalmente en las zonas donde incrementaron los asentamientos urbanos, existieron pérdidas de BTC y la VT y BO sufrieron fragmentación.

Mendoza *et al.* (2002) observaron condiciones muy similares en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. Las variaciones en los componentes del balance hídrico de dicha cuenca fueron relativamente pequeñas y las condiciones hidrológicas regionales de la cuenca mejoraron. Sin embargo, se presentó un incremento en los valores de escorrentía, lo cual se explica por el incremento de la superficie ocupada por asentamientos humanos, áreas sin vegetación y destinadas al uso agricultura. Sin embargo, a pesar de existir una fuerte presión sobre el

recurso hídrico en las zonas bajas de la cuenca, sus condiciones hidrológicas regionales se encuentran al menos igual que hace 25 años.

Resumiendo, el modelo de infiltración o recarga hídrica de la microcuenca de Cuernavaca muestra mejores condiciones hidrológicas para el año 2017 con respecto al año 1997, reflejado en la observación de un mayor volumen de infiltración. En 1997 las zonas con menor infiltración (cuenca media y baja) registraron volúmenes entre 611 y 922 mm anuales, mientras que para el año 2017, estas mismas zonas alcanzaron volúmenes de infiltración entre 754 y 1048 mm anuales. La cuenca alta (zona con mayor potencial de infiltración), en el año 1997 infiltró entre 1100 y 1740 mm anuales, y para 2017 los volúmenes alcanzados fueron entre 1100 y 1835 mm anuales.

Por ello, se generó un modelo alternativo de IT para el año 2017 (figura 46) únicamente con las condiciones meteorológicas de la microcuenca de Cuernavaca del año 1997, es decir, modelo no consideró el aumento en los volúmenes de P para el año 2017, pero si consideró los CUSV ocurridos durante el periodo de análisis. Lo anterior con el fin de evaluar el comportamiento de la IT ante los CUSV, ya que en el modelo original la IT solo se ve aumentada porque aumento la P y no porque las condiciones en la microcuenca sean óptimas. En general el modelo tampoco muestra una diferencia significativa de volúmenes de IT, en 1997 oscilan entre 669 y 1583 mm/anuales y para 2017 oscilan entre 671-1574 mm/anuales. Sin embargo, las zonas de mayor infiltración (zonas en tonos rojos) si se redujeron significativamente en el modelo de 2017 con respecto al modelo de 1997.

Así, este modelo demuestra que la IT sólo se ve aumentada en el 2017 gracias a que aumentó la P . De manera regional ambos modelos de infiltración no indican una repercusión debida a los CUSV, pero de manera local sí, siendo evidente en las zonas de mayor IT (zonas en tonos rojos).

En general se observa una mayor producción hídrica debido al aumento de la precipitación. Sin embargo, así como existe mayor volumen de infiltración actualmente, también se observa un incremento en el volumen de escurrimiento,

así como pérdidas significativas de cubiertas forestales, y en consecuencia una baja interceptación de la precipitación por parte de la cubierta vegetal, que permita retener la humedad por más tiempo. Limitando los procesos de evapotranspiración. Sumando el aumento de la precipitación, se genera mayor caudal de escurrimiento, erosión e inundaciones en la zona de transporte (cuenca media), la cual alberga la zona metropolitana de Cuernavaca. Y el arrastre de contaminantes y sedimentos a las zonas de emisión (cuenca baja) provocando mayor contaminación de los afluentes y cuerpos de agua superficiales. Lo anterior se ha registrado en distintas cuencas y regiones (Marini & Piccolo, 200; Romero & Vázquez, 2005; Vidal & Romero, 2010)

Por lo anterior, es importante implementar estrategias de conservación, recuperación, y reforestación en las zonas de la cuenca media y baja. Así como tecnologías sustentables para las actividades económicas primarias que ahí se desarrollan, como el pastoreo y la agricultura, además de infraestructura sustentable en la zona urbana, para la captación y aprovechamiento de la precipitación pluvial.

Cabe resaltar que las zonas sin modificaciones hidrológicas significativas corresponden a la cuenca alta. La cual se favorece no solo por sus condiciones meteorológicas, (bajas temperaturas y abundante precipitación), sino también por la baja presión antropogénica presente en la zona que permite la conservación y recuperación del bosque templado. Lo anterior genera condiciones que favorecen la retención de humedad, permiten una mayor infiltración y un mayor equilibrio o balance entre los procesos del ciclo hidrológico, como el caso observado en la ciudad de los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile (Enríquez *et al.*, 2006).

En este sentido, en los últimos años, se han implementado políticas y estrategias en programas de ordenamiento territorial y desarrollo urbano sustentable así como de ordenamiento ecológico para el Estado de Morelos, como instrumentos de planeación y regulación del uso de suelo y las actividades productivas, en busca de lograr la protección del medio ambiente, la preservación y

el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos, y pretende contribuir a mejorar el nivel y calidad de vida de la población urbana y rural. (Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Morelos, 2014). Es importante evaluar su desempeño y operatividad en sentido del cumplimiento de sus objetivos, e identificar que estrategias han llevado a obtener los resultados deseados, cuales necesitan ser modificadas, y cuales se pueden tomar de base para ser aplicadas en otro sitio, así como que metas hacen falta por cumplir.

A nivel global, se han realizado diversos estudios que evalúan los procesos de CUSV y su relación con factores hidrológicos y climáticos en diferentes cuencas y regiones del mundo, Asia y África, principalmente (Detlef *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2017; Popp *et al.*, 2017; Anand *et al.*, 2018; Doelman *et al.*, 2018; Vijith *et al.*, 2018; Yalew *et al.*, 2018). Estos estudios presentan modelaciones futuras de tendencias potenciales de USV bajo distintos escenarios de desarrollo social, económico y político, así como sus consecuencias sobre distintos elementos ambientales (p. ej. cambio climático, emisiones de GEIs, etc.) y sociales (p. ej. seguridad alimentaria, eficiencia agrícola, etc.). En dichos estudios se observa que, durante las últimas décadas, tal como ha ocurrido en la microcuenca de Cuernavaca, grandes superficies de bosques (Tropical caducifolio principalmente) han sufrido deforestación como consecuencia de la creciente demanda de producción de alimentos y territorio, consecuencias a su vez del crecimiento poblacional. Es por ello que los USV destinados a zonas agrícolas y urbanas han incrementado significativamente.

De manera general, las consecuencias de dichos CUSV van desde el aumento en las emisiones de GEIs, contribuyendo al cambio climático, hasta alteraciones en el ciclo hidrológico, principalmente la disminución de la evapotranspiración e infiltración y el incremento de las escorrentías. Afectando la eficiencia agrícola (Matiu *et al.*, 2017), e incrementando los costos de producción (Choi & Entenmann, 2019), llegando incluso a poner en riesgo la seguridad

alimentaria de la población que se beneficia por los servicios ecosistémicos que brindan las cuencas hidrológicas.

Los distintos escenarios socioeconómicos bajo los que se modelaron las tendencias potenciales en los próximos años de CUSV y sus consecuencias parten de cinco supuestos: (i) se sigue una estrategia de desarrollo sustentable con una economía basada en las energías renovables, (ii) se lleva un patrón de desarrollo intermedio, (iii) se presenta una mayor fragmentación entre regiones, (iv) existe un aumento de la desigualdad entre las regiones y (v) se continua con un desarrollo basado en combustibles fósiles.

Con base en lo anterior, los resultados de los modelos sugieren que, si en los próximos años se cuenta con tecnologías que permitan un desarrollo socioeconómico sostenible, basado en sistemas energéticos renovables, impulsando políticas ambientales adecuadas, desarrollo científico, mejor nivel educativo, disminución de brechas sociales, reducción de la pobreza, disminución de los índices de crecimiento poblacional, etc, además de un cambio en los hábitos alimenticios, como la reducción del consumo de carne (Choi & Entenmann, 2019), se puede lograr una baja en la demanda de productos agrícolas (Choi & Entenmann, 2019), y sumado al desarrollo de tecnologías para incrementar la eficiencia agraria, e impulsar el comercio globalizado se tendría el potencial de mejorar la productividad de las áreas de cultivo actuales, frenando la deforestación, desertificación, erosión de suelos, pérdida de la biodiversidad, y la demanda de territorio para la expansión agrícola (Runyan & Stehm, 2018).

Lo conlleva a conseguir bajas significativas en las emisiones de GEI's (reduciendo los efectos del cambio climático), disminuir los costos y eficientizar la producción agrícola, garantizando la seguridad alimentaria (Alexander *et al.*, 2016).

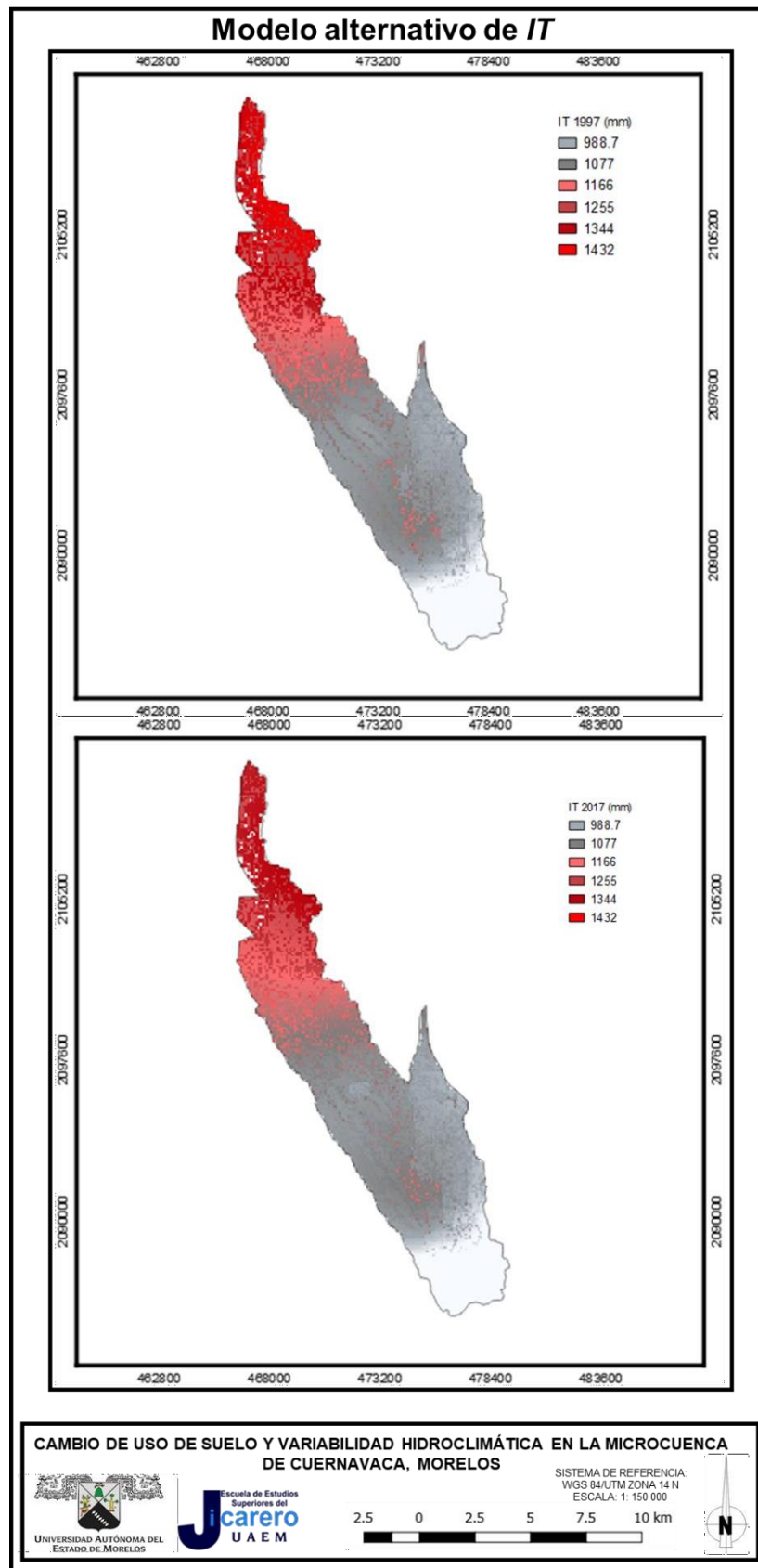


Figura 46. Modelo alternativo de infiltración total (IT) para el periodo 1997-2017

Capítulo V. Conclusión

Durante el desarrollo del presente estudio se evaluaron (i) los cambios de uso de suelo y cubierta vegetal (*CUSV*), (ii) la variabilidad climática, y (iii) la influencia de ambos fenómenos en los procesos hidrológicos en la microcuenca de Cuernavaca, durante el periodo 1997-2017.

El análisis de imágenes satelitales Landsat ETM, mediante el método no supervisado a través de la herramienta *SCP* de QGIS, permitió generar los mapas de uso de suelo y vegetación (*USV*) de los años 1997 y 2017. Se identificaron doce clases de *USV* y las superficies ocupadas por cada una dentro de la microcuenca.

Se realizó el cruce de las coberturas de *USV* de 1997 y 2017 generadas con el complemento *MOLUSCE* de QGIS. Se obtuvo una matriz de transición que permitió determinar la dinámica de los *CUSV*, así como conocer el porcentaje de superficies que se destinaron a un *USV* distinto al que originalmente recibían. Se calcularon las tasas de cambio para cada clase de *USV* y las tasas de deforestación de las cubiertas forestales.

Se observó que los *CUSV* más significativos se presentaron en la zona media y baja de la microcuenca. Incrementó el uso agrícola y urbano a expensas del Bosque tropical caducifolio, el cual presentó la tasa de pérdida anual más alta (1.5%), en menor medida que el Bosque de Oyamel y la Vegetación de Transición, provocando su fragmentación.

Con la generación de *AMT'S* de los periodos 1992-1997 y 2011-2016 a través del método estadístico *SANDIA* programado en lenguaje *R*, se analizó el comportamiento de las variables meteorológicas T_{max} , P , T_{min} , y $Evap$, a fin de determinar la variabilidad climática en la microcuenca de Cuernavaca. Se observó una tendencia al incremento de la T_{max} principalmente en las zonas donde existe mayor concentración de asentamientos urbanos (cuenca media). Así mismo, también el volumen anual de P aumentó en toda la microcuenca.

Finalmente, con base en los resultados de los análisis de CUSV y variabilidad climática se cuantificó por el método propuesto en la NOM-011-CONAGUA-2015: (i) la capacidad de interceptación de la P y de retención de la humedad en función del USV y textura del suelo (**parámetro K**), (ii) el coeficiente de escurrimiento (**CE**), y (iii) la infiltración total (**IT**). Estos datos permitieron modelar el comportamiento de los procesos hidrológicos en la microcuenca durante el periodo 1997-2017. Dichos modelos sugieren que los CUSV no han afectado los procesos hidrológicos de la microcuenca, ya que no se encontraron variaciones significativas en los volúmenes de infiltración entre el año 1997 y 2017. Sin embargo, los cambios en las cubiertas vegetales y las altas tasas de deforestación si han afectado la permeabilidad del suelo, pero esto se ha compensado con el aumento de la precipitación. Por ello, se generó un modelo alternativo de infiltración, el cual no contempla este aumento en la precipitación para el año 2017, pero si considera los CUSV. Dicho modelo, tampoco muestra una diferencia significativa en volúmenes de infiltración a nivel regional o de cuenca, sin embargo, a nivel local se observa que las zonas con alto potencial de infiltración se han reducido. Lo anterior demuestra que la IT sólo se ve aumentada en el 2017 gracias a que aumentó la P , es decir que de manera regional ambos modelos de infiltración no indican una repercusión debida a los CUSV, pero que de manera local sí, dichas repercusiones se observan en la reducción de zonas permeables.

Por ello es necesaria la implementación de políticas públicas integrales en materia de planeación y ordenamiento territorial y urbano, regulando el crecimiento de los asentamientos urbanos, evitando afectar aquellas zonas que proveen importantes servicios ecosistémicos, como es el caso de la regulación del ciclo hidrológico.

Referencias

- Aguilera, A. 2016. Caracterización de la subcuenca del Guayabo para el aprovechamiento de agua pluvial en el desarrollo urbano en la zona metropolitana de Guadalajara. Tesis por el grado de Maestría. Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Tlaquepaque, Jalisco. 147 p.
- Alexander, P., C. Brown, A. Arneeth, J. Finnigan & M. D. A. Rounsevell. 2016. Human appropriation of land for food: The role of diet. *Global Environmental Change*, 41:88-98.
- Amador, A. J. & E. J. Alfaro. 2009. Método de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 11:39-52.
- Anand, J., A.K. Gosain & R. Khosa. 2018. Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model. *Science of the Total Environment*, 644:503–519.
- Antico, A., G. Schlotthauer, & M. E. Torres. 2014. Análisis de la variabilidad hidroclimática de la cuenca del Paraná mediante un nuevo método de descomposición modal empírica, II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe, Argentina, septiembre del 2010.
- Argeñal, F.J. 2010. Variabilidad Climática y Cambio Climático en Honduras. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD. Honduras. 85 pp.
- Barrow, C.J. 1998. River Basin Development Planning and Management: A critical Review. *World Development*, 26:171-186.

- Bidegain, M. 2009. Situación actual y perspectivas del cambio climático. Capacidades tecnológicas para la estimación del fenómeno. *Revista Estrategia*, 1:21-30.
- Bocco, G., M. Mendoza & O. R. Maser. 2001. La dinámica del cambio de uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 44:18-38.
- Brown, K., M. Kamruzzaman & S. Beecham. 2017. Trends in sub-daily precipitation in Tasmania using regional dynamically downscaled climate projections. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 10:18-34.
- Brutsaert, W. 2005. *Hydrology: An Introduction*. Cambridge University Press. Cambridge. 605 pp.
- Calder, I., T. Hofer, S. Vermont & P. Warren. 2007. Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. David Lubin Memorial Library, Food and Agriculture Organization of the U. N. Rome. <http://www.fao.org/docrep/010/a1598s/a1598s02.htm>; última consulta: junio 2017.
- Campos, D.F. 1998. *Procesos del ciclo hidrológico*. Editorial Universitaria Potosina. San Luis Potosí, México. 30 pp.
- Choi, H. S. & S. K. Entenmann. 2019. Land in the EU for perennial biomass crops from freed-up agricultural land: A sensitivity analysis considering yields, diet, market liberalization and world food prices. *Land Use Policy*, 82:292-306.
- CONAGUA, 2006. *Estadística del Agua en México, 2006*. Cuarta edición. CONAGUA. CDMX. 201 pp.

CONAGUA, 2008. La cuenca del río Apatlaco. Recuperemos el patrimonio ambiental de los morelenses. SEMARNAT. Coyoacán, CDMX. 120 pp.

CONAGUA, 2015. Estadística del Agua en México, 2015. CONAGUA. CDMX. 297 pp.

CONAGUA 2015b. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuernavaca (1701), Estado de Morelos. Diario Oficial de la Federación (2015-abril-20). Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103145/DR_1701.pdf.

CONAGUA, 2016. Estadística del Agua en México, 2016. CONAGUA. CDMX. 276 pp.

CONAPO, 2010. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010. CONAPO. CDMX. 215 pp.

Detlef, P.V.V., E. Stehfest, D.E.H.J. Gernaata, J. C. Doelman, M. Van den Berg, M. Harmsen, H. Sytze de Boer, L.F. Bouwman, V. Daioglou, O.Y. Edelenbosch, B. Girod, T. Kram, L. Lassaletta, P.L. Lucas, H. van Meijl, C. Müller, B.J. van Ruijven, S. van der Sluis, A. Tabeau. 2017. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Global Environmental Change*, 42:237–250.

Díaz, R. E., L. C. Bravo & E. Sánchez. 2014. Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua en el área peri-urbana de Cuauhtémoc, Chihuahua. Un estudio socioambiental en el norte de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 83:116-130.

Doelman, J.C., E. Stehfest, A. Tabeau, H. van Meijl, L. Lassaletta, D.E.H.J. Gernaat, K. Hermans, M. Harmsen, V. Daioglou, H. Biemans, S. van der Sluis, D.P. van Vuuren. 2018. Exploring SSP land-use dynamics using the IMAGE model: Regional and gridded scenarios of land-use change and land-based climate change mitigation. *Global Environmental Change*, 48: 119-135.

DOF, 26 de enero de 2011. ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas.

Henríquez, C., G. Azócar & Mauricio Aguayo. 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 36:61-74.

FAO, 1995. *Forest Resources Assessment 1990*. Roma. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/007/v5695e/v5695e00.htm>

Fernández, F. 1995. *Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación. Síntesis*. Madrid, 285 pp.

Fernández, F. 2012. *Meteorología y climatología. Índice*, 50:6-9.

Franco, S., H. H. Regil, C. González & G. Nava. 2006. Cambio de uso de suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-200. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 61:38-57.

García, J. A., J. G. Cedillo, J. I. Juan & M. A. Balderas. 2012. Proceso de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano Mexicano. El caso del Río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía*, 55-56:63-73.

González-Villela, R., J.S. Montero & J.S. Santana. 2017. Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico en el río Conchos. *En: Montero, M.J. & O.F. Ibáñez. (Comp.). La cuenca del río conchos: Una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Pp. 109-156.

Greene, A. M., L. Goddard & R. Colisin. 2011. Web Tool Deconstructs Variability in Twentieth-Century Climate. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 92:397-398.

Grupo Banco Mundial, 2017. Población Urbana (% del Total). Naciones Unidas, Perspectivas de la urbanización mundial. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS>. Última consulta: Junio, 2017.

Haiming, L., R. B. Bryant, A. R. Buda, A. S. Collick, G. J. Folmar & P. J. A. Kleinman. Long-term trends in climate and hydrology in an agricultural, headwater watershed of central Pennsylvania, USA. 2015. Journal of Hydrology: Regional Studies, 4:713-731.

Hernández, A. J., S. Velázquez, F. Jiménez & S. Rivera. 2003. Dinámica del uso de la tierra y de la oferta hídrica en la cuenca del río Guacerique, Tegucigalpa, Honduras. Recursos Naturales y Ambiente, 45:21-27.

INE & UAEM, 2006. Informe final. Análisis de la Vulnerabilidad y Capacidad de Adaptación al Cambio Climático en los Sectores más Relevantes del Estado de Morelos. "diagnóstico del impacto y riesgo derivado de la variabilidad climática y el cambio climático global en la disponibilidad y manejo del agua y en la agricultura". Recuperado de: <http://docplayer.es/25251037-Universidad-autonoma-del-estado-de-morelos.html>

INECC, 2013. Estrategia Nacional de Cambio Climático, visión 10-20-40. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/documentos/estrategia-nacional-de-cambio-climatico-vision-10-20-40>. Última consulta: Junio, 2017.

INEGI, 2010. Compendio de información geográfica municipal 2010 Cuernavaca Morelos. INEGI. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx>

INEGI, INE & CONAGUA, 2007. Documento técnico del mapa de Cuencas hidrográficas de México (escala 1: 250 000).

IPCC, 2007. 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. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.
- Killeen, T. J., T. M. Siles, L. Soria & L. Correa. Estratificación de vegetación y cambio de uso de suelo en los Yungas y Alto Beni de La Paz. *Ecología en Bolivia*, 40:32-69.
- Kundu, S., D. Khare, A. Mondal. 2017. Individual and combined impacts of future climate and land use changes on the water balance. *Ecological Engineering*, 30:42-57.
- Lambin, E. F., B. L. Turner, H. J. Geist, S. B. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruce, O. T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. F. Moran, M. Mortimore, P.S. Ramakrishnan, J. F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G. D. Stone, U. Svedin, T. A. Veldkamp, C. Vogel & J. Xu. 2001. The cause of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11:261-269.
- Landa, R., V. Magaña & C. Neri. 2008. Agua y clima, elementos para la adaptación al cambio climático. SEMARNAT. CDMX. 135 pp.
- Li, G., F. Zhang, Y. Jing, Y. Liu, G. Sun. 2017. Response of evapotranspiration to changes in land use and land cover and climate in China during 2001–2013. *Science of the Total Environment*, 596–597:256–265
- López-Moreno, J. I., J. Zabalza, S. M. Vicente-Serrano, J. Revuelto, M. Gilaberte, C. Azorin-Molina, E. Morán-Tejeda, J. M. García-Ruiz & C. Tague. 2014. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of the Total Environment*, 493:1222-1231.
- Luévano, A. C. 2015. Cambio de uso de suelo y su impacto en temperaturas máximas en la Zona Metropolitana de Xalapa. Trabajo Recepcional para

- obtener el diploma de: especialista en diagnóstico y gestión ambiental.
Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 65 p.
- Mederey, L. E., A. Jiménez. 2005. Principio de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. UNAM. CDMX. 105 pp.
- Marini, F., M. C. Piccolo. 200. El balance hídrico en la Cuenca del Río Quequén Salado, Argentina. Papeles de Geografía, 31:39-53.
- Martinez-Austria, P. F., C. Patiño-Gómez. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. Tecnología y Ciencias del Agua, 3:5-20.
- Mass, J. M. 2015. El manejo de cuencas desde un enfoque ecosistémico. Cuencas de México, 1:3-8.
- Matiu, M., D. P. Ankerst & A. Menzel. 2017. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961-2014. PLOS ONE, 12(5), e0178339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178339>
- Mauro-Morales, A. El sistema climático: fundamentos físicos del clima. Universidad de Valparaíso-Editorial. Valparaíso, Chile. 383 pp.
- Mendoza, M., G. Bocco, E. López-Granados & M. Bravo. 2002. Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 49:92-11.
- Mintegui, J. A. & J. C. Robredo. 1994. Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración hidrológico-forestal, mediante modelos hidrológicos. Ingeniería del Agua, 1:69-82.
- Monroy-Ortiz, R. 2006. El agua en Cuernavaca. La ruta de la insustentabilidad. Economía Informa, 339:46-57.

- Montealegre, J. E. & J. D. Pabón. La Variabilidad Interanual asociada al ciclo El niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 2:7-21.
- Monterrosa, G. G., 2015. Cuencas Hidrológicas de México. *Cuencas de México*, 1:9-12.
- Morales, F. U. 2016. Análisis de datos de radiación para la evaluación del recurso solar. Memoria de estadía para obtener el título de Ingeniero en Energías Renovables. Instituto de Energías Renovables, UNAM. Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca. San Pablo Huixtepec. 68 p.
- Moreno, A. & I. Renner. 2007. Gestión Integral de Cuencas. La experiencia del Proyecto Regional Cuencas Andinas. CIP. Lima, Peru. 234 pp.
- Olvera-Mancio, D. A. 2016. El cambio de uso de suelo en el municipio de Xochitepec: propuesta de una estrategia desde la gestión social. Tesis profesional para obtener el grado de licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas, EESJ, UAEM. Jojutla, Mor. 77p.
- OMM, 2011. Guía de Practicas climatológicas. OMM. Ginebra, Suiza. 128 pp.
- Pineda, N. B., J. Bosques, M. Gómez, W. Plata. 2009. Análisis de cambio de uso de suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 69:33-52.
- Pladeyra, S.C., O. Escolero, E. Domínguez & S. Martínez. 2006. Ciclo Hidrológico. *En: Cotler, H., M. Mazari & J. de Anda. (eds.). Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala: Construyendo una visión conjunta. Instituto Nacional de Ecología (INE), CDMX. pp. 46-52.*
- Popp, A., K. Calvin, S. Fujimori, P. Havlik, F. Humpenöder, E. Stehfest, B.L. Bodirsky, J.P. Dietrich, J.C. Doelmann, M. Gusti, T. Hasegawa, P. Kyle, M.

- Obersteiner, A. Tabeau, K. Takahashi, H. Valin, S. Waldhoff, I. Weindl, M. Wise, E. Kriegler, H. Lotze-Campen, O. Fricko, K. Riahi, D.P. van Vuuren. 2017. Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 42:331-345.
- Puyravaud, J. P. 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177:593-596.
- Richters, E. J. 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central: hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 440 pp.
- Rivera, S. 2012-sep-29. Revela la Conagua que hay 46 acuíferos sobre explotados en la región Balsas. La Unión. Recuperado de: <https://launion.com.mx/morelos/sociedad/noticias/43733-revela-la-conagua-que-hay-46-acu%C3%ADferos-sobre-explotados-en-la-regi%C3%B3n-balsas.html>.
- Rodríguez, R. M., A. Benito & A. Pórtela. 2004. Meteorología y Climatología. *En: FECYT (eds.). Meteorología y Climatología. Semana de la Ciencia y la Tecnología 2004. FECYT. Pp. 3-90.*
- Romero, H. & A. Vázquez. 2005. Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *eure*, 31:97-118.
- Roser, M. 2019. Future Population Growth. OurWorldInData.org. Recuperado de: <https://ourworldindata.org/future-population-growth>. Última consulta: mayo, 2019.
- Runyan, C. W., & J. Stehm. 2018. Land Use Change, Deforestation and Competition for Land Due to Food Production. Reference Module in Food Science. doi:10.1016/b978-0-08-100596-5.21995-1.
- Sadik, N. 1999. Estado de la población mundial 1999. FNUAP. New York. 76 pp.

- Sánchez, H. U. & P. S. Urquijo. 2014. La expansión urbana en el suroriente de Morelia. Una revisión histórico-ambiental, 1885-2010. *En: Vieyra, A. & A. Larrazabal (Eds.). Urbanización, Sociedad y Ambiente. Experiencia en ciudades medias.* UNAM, CIGA, SEMARNAT, INECC. CDMX. Pp. 13-46.
- Secretaria de Desarrollo Sustentable del Estado de Morelos. 2014. Ordenamiento territorial. [Sustentable.morelos.gob.mx](http://sustentable.morelos.gob.mx). Recuperado de: <http://sustentable.morelos.gob.mx/p-territorial>. Última consulta: Mayo, 2019.
- SEMARNAT, 2013. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. SEMARNAT. Guadalajara, Jalisco. 31 pp.
- Sotelo-Caro, O., J. Chichia-González, V. Sorani & A. Flores-Palacio. Changes in the deforestation dynamics of a river sub-basin of Mexico: non-recovery of primary habitats following cessation of deforestation. *Revista de Geografía Norte Grande*, 61:205-219.
- Tan, X., T. Y. Gan & D. Shao. 2017. Effects of persistence and large-scale climate anomalies on trends and change points in extreme precipitation of Canada. *Journal of Hydrology*, 550:453-465.
- Tiscornia, G., A. Cal & A. Giménez. 2016. Análisis y caracterización de la variabilidad climática en algunas regiones de Uruguay. *RIA*, 42:66-71.
- Trejo, I. & R. Dirzo. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation*, 94:133-142.
- UN, 2014. World Urbanization Prospects. UN. New York. 27 pp.
- UN, 2015. World Population 2015. UN. New York. 66 pp.
- Valencia-Vargas, J.C. 2015. Desarrollo de la región hidrológica del Balsas mediante la modificación de su veda. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI:81-97.

- Valenzuela-Núñez, L. M., J. A. Muñoz-Villalobos, J. L. González-Barrios, G. González-Cervantes & M. A. Velázquez-Valle. 2012. Cambio de uso de suelo en la porción norte de la microcuenca “Las Amapolas” en Guanajuato, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 11:15-22.
- Vega, A., J. López-García & L.L. Manzo. 2008. Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México. *Investigaciones geográficas*, 67:59-75.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra & J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecologica*, 62:21-37.
- Vidal, C., H. Romero. 2010. Efectos ambientales de la urbanización de las Cuencas de los Ríos Biobío Y Andalién sobre los riesgos de inundaciones y anegamiento de la ciudad de Concepción. En: Pérez, L. & R. Hidalgo. *Concepción Metropolitano (AMC). Planes, procesos y proyectos*, Instituto de geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/118084>.
- Vijith, H., A. Hurmain, D. Dodge-Wan. 2018. Impacts of land use changes and land cover alteration on soil erosion rates and vulnerability of tropical mountain ranges in Borneo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12:57-69.
- Yalew, S.G., T. Pilz, C. Schweitzer, S. Liersch, J. van der Kwast, A. van Griensven, M.L. Mul, C. Dickens, P. van der Zaag. 2018. Coupling land-use change and hydrologic models for quantification of catchment ecosystem services. *Environmental Modelling & Software*, 109: 315-328.