



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



MCIAM
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

**FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA DE LA
SUBCUENCA COINTZIO EN MICHOACÁN, MÉXICO.**

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta

IDC.SOLEIDAD NOHEMI ACOSTA MUÑOZ

Director de tesis

DR. JUAN MANUEL ORTEGA RODRÍGUEZ

Co-directora de tesis

DRA. MARÍA ALCALÁ DE JESÚS

Morelia, Michoacán. Agosto de 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente al Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitirme formar parte de un posgrado de calidad, a todos los profesores, administrativos y personal en general, por sus enseñanzas y apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada y por la oportunidad de formarme como maestra en ciencias.

Al D. C. Juan Manuel Ortega Rodríguez, por todas sus enseñanzas, contribuciones, consejos, por la paciencia que me tuvo durante dos años y por apoyarme siempre en la búsqueda de soluciones para los problemas que se presentaron, no solo con la tesis, sino también con todas las cuestiones académicas y administrativas en general.

A la Dra. María Alcalá De Jesús, por todo su apoyo, enseñanzas, consejos, por regalarme parte de su tiempo y compartir su conocimiento para la mejora de mi trabajo.

A la M. C. Tohtli Zubieta Rojas, al M. C. Juan Carlos Gonzáles Cortés y al Dr. Julio César Orantes Ávalos, de igual manera por todo su apoyo, enseñanzas y contribuciones para mejorar mi trabajo.

Agradezco también a mis padres Eriberto Acosta Flores y Rosaura Muñoz Pérez; a David Talavera Abundez, Alicia Acosta Muñoz, Rafael Acosta Muñoz y demás familiares y amigos que me han acompañado y apoyado en estos dos años.

ÍNDICE GENERAL

	Página
GLOSARIO	13
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES	16
1.1 INTRODUCCIÓN	16
1.2 MARCO TEÓRICO	17
1.2.1 Conceptos generales	17
1.2.2 Filosofía del cálculo de la huella ecológica.....	18
1.2.3 Superficies bioproductivas	19
1.2.4 Unidades de cálculo de la huella y la capacidad ecológica	21
1.2.5 Factores de equivalencia.	21
1.2.6 Cuenca hidrográfica.....	23
1.2.7 Sistemas de información geográfica y teledetección	24
1.3 ANTECEDENTES	26
1.3.1 Situación mundial.....	26
1.3.2 Huella ecológica de México	29
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	31
1.5 JUSTIFICACIÓN	32
1.6 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	33
1.7 OBJETIVOS.....	34
1.7.1 Objetivo general.....	34
1.7.2 Objetivos específicos	34
1.8 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	35
1.8.1 Localización	35
1.8.2 Clima	36
1.8.3 Edafología.....	37

	Página
1.8.4 Uso de suelo y vegetación	38
1.8.5 Microcuencas	39
CAPÍTULO 2: ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD ECOLÓGICA DE LA	
SUBCUENCA DE COINTZIO	42
2.1 RESUMEN	42
2.2 INTRODUCCIÓN	43
2.3 METODOLOGÍA	44
2.3.1 Uso de suelo y cobertura vegetal	44
2.3.2 Uso potencial del suelo	46
2.3.3 Datos de población de la subcuenca	59
2.3.4 Capacidad ecológica de la subcuenca	61
2.3.5 Capacidad ecológica por microcuencas y localidades.	63
2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
2.4.1 Uso de suelo y cobertura vegetal	65
2.4.2 Uso potencial del suelo	69
2.4.3 Análisis de población de la subcuenca	74
2.4.4 Capacidad ecológica de la subcuenca	76
2.4.5 Capacidad ecológica por microcuencas	78
2.4.6 Capacidad ecológica por localidades	83
2.5 CONCLUSIONES	92

CAPÍTULO 3. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA COMO INDICADOR DE SUSTENTABILIDAD EN LA SUBCUENCA	93
3.1 RESUMEN	93
3.2 INTRODUCCIÓN	94
3.3 METODOLOGÍA	95
3.3.1 Huella ecológica por superficie productiva	97
3.3.2 Huella ecológica de la subcuenca y las microcuencas	101
3.3.3 Evaluación de las variantes metodológicas aplicadas	103
3.3.4 Huella ecológica de las localidades.....	106
3.3.5 Déficit o excedente ecológico.....	106
3.3.6 Espacialización de la huella ecológica	107
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	108
3.4.1 Huella ecológica por superficie productiva	108
3.4.2 Huella ecológica de la subcuenca.....	110
3.4.3 Huella ecológica por microcuenca.....	111
3.4.4 Evaluación de las metodologías.....	114
3.4.5 Huella ecológica por localidad.....	115
3.4.6 Déficit o excedente ecológico.....	123
3.4.7 Espacialización de la huella ecológica	127
3.5 CONCLUSIONES	131
3.6 RECOMENDACIONES	132
LITERATURA CITADA.....	133
ANEXOS.....	137

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Superficies productivas.....	20
Cuadro 2. Factores de equivalencia.	22
Cuadro 3. Categorías de idoneidad de la tierra a nivel global.	22
Cuadro 4. Huella ecológica por países.....	28
Cuadro 5. Número de localidades y población por microcuenca.	39
Cuadro 6. Clases de cobertura y uso de suelo.....	45
Cuadro 7. Clases de aptitud según el uso potencial del suelo.....	48
Cuadro 8. Porcentaje de obstrucción que representa cada fase física del suelo.....	50
Cuadro 9. Rangos de aptitud para pendiente, profundidad y obstrucciones.	54
Cuadro 10. Peso de los factores limitantes obtenidos del proceso analítico jerárquico.	57
Cuadro 11. Áreas utilizadas en el análisis MOLA.....	58
Cuadro 12. Factores de equivalencia.....	62
Cuadro 13. Coberturas y usos de suelo.....	66
Cuadro 14. Áreas de aptitud de los suelos.....	69
Cuadro 15. Áreas por uso potencial del suelo.....	72
Cuadro 16. Capacidad ecológica por superficie productiva.....	77
Cuadro 17. Capacidad ecológica por microcuenca.....	78
Cuadro 18. Capacidad ecológica de las microcuencas.....	80
Cuadro 19. Capacidad ecológica de las localidades de Acuitzio.....	85
Cuadro 20. Capacidad ecológica de las localidades de Atécuaro.....	86
Cuadro 21. Capacidad ecológica de las localidades de Cuanajo.....	87
Cuadro 22. Capacidad ecológica de las localidades de Fontezuelas.....	87
Cuadro 23. Capacidad ecológica de las localidades de Huiramba.....	88
Cuadro 24. Capacidad ecológica de las localidades de Jácuaro.....	89
Cuadro 25. Capacidad ecológica de las localidades de Tirio.....	89
Cuadro 26. Capacidad ecológica de las localidades de Tiripetío.....	90
Cuadro 27. Capacidad ecológica de las localidades de Umécuaro.....	91
Cuadro 28. Datos de concentración de CO ₂ a partir del satélite OCO-2.....	100

	Página
Cuadro 29. Factores de equivalencia.....	101
Cuadro 30. Huella ecológica por microcuenca.	111
Cuadro 31. Peso de los criterios para la evaluación de las metodologías.	114
Cuadro 32. Peso de las metodologías respecto a los criterios	114
Cuadro 33. Calificación de las metodologías	114
Cuadro 34. Huella ecológica de las localidades de Acuitzio	117
Cuadro 35. Huella ecológica de las localidades de Atécuaro	118
Cuadro 36. Huella ecológica de las localidades de Cuanajo	118
Cuadro 37. Huella ecológica de las localidades de Fontezuelas.	119
Cuadro 38. Huella ecológica de las localidades de Huiramba.	119
Cuadro 39. Huella ecológica de las localidades de Jácuaro.....	120
Cuadro 40. Huella ecológica de las localidades de Tirio	120
Cuadro 41. Huella ecológica de las localidades de Tiripetío.....	121
Cuadro 42. Huella ecológica de las localidades de Umécuaro.	122
Cuadro 43. Déficit ecológico por microcuenca.	125

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Clasificación de las cuencas según su tamaño.	23
Figura 2. Ciclo de los sistemas de información geográfica.	25
Figura 3. Elementos de la teledetección.....	25
Figura 4. Huella ecológica de algunos países.	27
Figura 5. Huella ecológica y capacidad ecológica de México de 1996 a 2008.	29
Figura 6. Huella ecológica por superficie productiva, México 2008.	30
Figura 7. Microcuencas de la subcuenca Cointzio.	35
Figura 8. Climogramas de las estaciones meteorológicas.....	36
Figura 9. Edafología de la subcuenca Cointzio.	37
Figura 10. Uso de suelo y cobertura vegetal.	38
Figura 11. Diagrama metodológico para obtener el uso potencial del suelo.....	46
Figura 12. Perfiles del suelo recopilados de distintas fuentes.	51
Figura 13. Reglas de decisión para el uso potencial agrícola.....	55
Figura 14. Reglas de decisión para el uso potencial pecuario.....	55
Figura 15. Reglas de decisión para el uso potencial forestal.....	55
Figura 16. Herramientas para el proceso analítico jerárquico.....	56
Figura 17. Diagrama metodológico para la capacidad ecológica de la subcuenca.	61
Figura 18. Uso de suelo y cobertura vegetal 2014.	65
Figura 19. Tendencias en usos de suelo y vegetación.....	67
Figura 20. Curva ROC para uso y cobertura del suelo.	68
Figura 21. Matriz de confusión para uso y cobertura del suelo.....	68
Figura 22. Uso potencial agrícola en 2014.....	70
Figura 23. Uso potencial pecuario en 2014.	71
Figura 24. Uso potencial forestal en 2014.	71
Figura 25. Uso potencial del suelo en 2014.	73
Figura 26. Matriz de confusión para uso potencial del suelo.	73
Figura 27. Crecimiento poblacional en la subcuenca.	74
Figura 28. Crecimiento poblacional por microcuenca.....	75
Figura 29. Capacidad ecológica de la subcuenca	76

	Página
Figura 30. Capacidad ecológica por microcuenca para 2014.....	79
Figura 31. Tendencia de la capacidad ecológica por microcuenca.....	81
Figura 32. Capacidad ecológica por superficie productiva por microcuenca	82
Figura 33. Capacidad ecológica por localidad en 1999.	83
Figura 34. Capacidad ecológica por localidad en 2009.	84
Figura 35. Capacidad ecológica por localidad en 2014.	84
Figura 36. Esquema metodológico de la estimación de la huella ecológica.	96
Figura 37. Jerarquización para la evaluación de las metodologías.....	103
Figura 38. Herramientas para el proceso analítico jerárquico.....	105
Figura 39. Ejemplo de matriz pareada para la comparación de metodologías.	105
Figura 40. Cálculo para el déficit o excedente ecológico.....	106
Figura 41. Huella ecológica por superficie productiva	109
Figura 42. Huella ecológica de la subcuenca.	110
Figura 43. Huella ecológica por microcuenca en 2014.....	112
Figura 44. Huella ecológica por habitante de las microcuencas en 2014.	113
Figura 45. Huella ecológica de las localidades en 1999.	115
Figura 46. Huella ecológica de las localidades en 2009.	116
Figura 47. Huella ecológica de las localidades en 2014.	116
Figura 48. Déficit ecológico de la subcuenca.	123
Figura 49. Déficit ecológico por habitante de la subcuenca.....	124
Figura 50. Déficit ecológico por habitante de las microcuencas.	125
Figura 51. Déficit ecológico por localidad en 2014.	126
Figura 52. Huella ecológica espacializada para 2014.....	128
Figura 53. Huella ecológica por habitante espacializada para 2014.	129
Figura 54. Déficit o excedente ecológico espacializado para 2014.....	130
Figura 55. Déficit ecológico por habitante espacializado para 2014.	130

ANEXOS

Anexo 1

- Mapa 1.1 Profundidad del suelo
- Mapa 1.2 Pendiente del terreno
- Mapa 1.3 Obstrucciones internas del suelo
- Mapa 1.4 Obstrucciones externas
- Mapa 1.5 Salinidad del suelo
- Mapa 1.6 Sodicidad del suelo

Anexo 2

- Mapa 2.1 Uso de suelo y cobertura vegetal en 1999
- Mapa 2.2 Uso de suelo y cobertura vegetal en 2009
- Mapa 2.3 Uso de suelo y cobertura vegetal en 2014

Anexo 3

Imágenes de los sitios visitados de las nueve microcuencas para rectificación de uso y uso potencial del suelo.

Anexo 4

- Mapa 4.1 Uso potencial agrícola en 1999
- Mapa 4.2 Uso potencial agrícola en 2009
- Mapa 4.3 Uso potencial agrícola en 2014

Anexo 5

- Mapa 5.1 Uso potencial pecuario en 1999
- Mapa 5.2 Uso potencial pecuario en 2009
- Mapa 5.3 Uso potencial pecuario en 2014

Anexo 6

- Mapa 6.1 Uso potencial forestal en 1999
- Mapa 6.2 Uso potencial forestal en 2009
- Mapa 6.3 Uso potencial forestal en 2014

Anexo 7

Mapa 7.1 Uso potencial del suelo en 1999

Mapa 7.2 Uso potencial del suelo en 2009

Mapa 7.3 Uso potencial del suelo en 2014

Anexo 8

Mapa 8.1 Capacidad ecológica por microcuenca en 1999

Mapa 8.2 Capacidad ecológica por microcuenca en 2009

Mapa 8.3 Capacidad ecológica por microcuenca en 2014

Anexo 9

Mapa 9.1 Huella ecológica en 1999

Mapa 9.2 Huella ecológica en 2009

Mapa 9.3 Huella ecológica en 2014

Anexo 10

Mapa 10.1 Huella ecológica por habitante en 1999

Mapa 10.2 Huella ecológica por habitante en 2009

Mapa 10.3 Huella ecológica por habitante en 2014

Anexo 11

Mapa 11.1 Déficit o excedente ecológico en 1999

Mapa 11.2 Déficit o excedente ecológico en 2009

Mapa 11.3 Déficit o excedente ecológico en 2014

Mapa 11.4 Déficit o excedente ecológico por habitante en 1999

Mapa 11.5 Déficit o excedente ecológico por habitante en 2009

Mapa 11.6 Déficit o excedente ecológico por habitante en 2014

Anexo 12

Mapa 12.1 Déficit o excedente ecológico por localidad en 1999

Mapa 12.2 Déficit o excedente ecológico por localidad en 2009

Mapa 12.3 Déficit o excedente ecológico por localidad en 2014

Anexo 13

Carpeta 13.1 Capacidad ecológica espacializada

Mapa 13.1.1 Capacidad ecológica espacializada para 1999

Mapa 13.1.2 Capacidad ecológica espacializada para 2009

Mapa 13.1.3 Capacidad ecológica espacializada para 2014

Mapa 13.1.4 Capacidad ecológica por habitante espacializada para 1999

Mapa 13.1.5 Capacidad ecológica por habitante espacializada para 2009

Mapa 13.1.6 Capacidad ecológica por habitante espacializada para 2014

Carpeta 13.2 Huella ecológica espacializada

Mapa 13.2.1 Huella ecológica espacializada para 1999

Mapa 13.2.2 Huella ecológica espacializada para 2009

Mapa 13.2.3 Huella ecológica espacializada para 2014

Mapa 13.2.4 Huella ecológica por habitante espacializada para 1999

Mapa 13.2.5 Huella ecológica por habitante espacializada para 2009

Mapa 13.2.6 Huella ecológica por habitante espacializada para 2014

Carpeta 13.3 Déficit o excedente ecológico espacializado

Mapa 13.3.1 Déficit o excedente ecológico espacializado para 1999

Mapa 13.3.2 Déficit o excedente ecológico espacializado para 2009

Mapa 13.3.3 Déficit o excedente ecológico espacializado para 2014

Mapa 13.3.4 Déficit o excedente espacializado por habitante para 1999

Mapa 13.3.5 Déficit o excedente espacializado por habitante para 2009

Mapa 13.3.6 Déficit o excedente espacializado por habitante para 2014

NOTA. La composición cartográfica de todos los mapas presentados se realizó en el SIG ArcMap 10.3.

GLOSARIO

HE	Huella ecológica
CE	Capacidad ecológica
gha	Hectáreas globales
gha hab ⁻¹	Hectáreas globales por habitante
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
DETENAL	Dirección General de Estudios del Territorio Nacional
USGS	United States Geological Survey
PSI	Porcentaje de sodio intercambiable
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
SIG	Sistema de información geográfica.
IDRISI Selva 17.0	Sistema de información geográfica empleado en los análisis de la tesis

RESUMEN

En el presente trabajo se abordó como objetivo la estimación de la huella ecológica, la capacidad ecológica y el déficit o excedente ecológico como indicadores de sustentabilidad espacializado en la subcuenca de Cointzio, para los años 1999, 2009 y 2014. Además, se pretendió aportar una metodología de fácil réplica, para que se aplique en cualquier cuenca hidrológica. La metodología incluyó el análisis de imágenes digitales, de uso potencial del suelo y de datos poblacionales para el cálculo de la capacidad ecológica. También se consideró la estimación de la huella ecológica de manera indirecta con apoyo de los sistemas de información geográfica y teledetección, a partir del análisis multitemporal de la degradación de recursos forestales y la demanda de superficies productivas como cultivos, pastos y áreas de ocupación directa. En el capítulo uno se presentan los aspectos generales de la tesis; en el capítulo dos se muestran los mapas de capacidad ecológica, de uso potencial de suelo y, de uso de suelo y cobertura vegetal para cada año analizado; y en el capítulo tres se presentan los mapas de la huella y el déficit ecológico como indicadores de sustentabilidad espacializados. Los resultados mostraron que en la mayoría del territorio de la subcuenca se tiene un déficit ecológico, se observó además que la capacidad, la huella y el déficit o excedente ecológico, varían tanto dentro de la subcuenca como de las microcuencas, por lo que, conocer lo que sucede a nivel global y nacional, no indica lo que sucede a nivel local.

PALABRAS CLAVE: déficit ecológico, excedente ecológico, hectáreas globales, sistemas de información geográfica, uso potencial del suelo, factores de equivalencia.

ABSTRACT

The present research addresses the use of the ecological footprint, biological capacity and the ecological deficit/reserve as sustainability indicators for the Cointzio sub-basin for the years of 1999, 2009, and 2014. Our methodology can be easily replicated and applied to evaluate any other water basin. In order to calculate biological capacity, we analyzed digital imagery, land use imagery and population data; an indirect estimation of ecological footprint was obtained with GIS and remote sensing by carrying out a multitemporal analysis of the degradation of forest resources and the demand increase for agricultural and urban lands. The first chapter explains the general aspects of this dissertation. On the second chapter we present the maps for biological capacity, potential and actual land use, and vegetation coverage for 1999, 2009, and 2014. The maps for ecological footprint and ecological deficit as indicators of sustainability are presented on chapter three. Our results show the majority of the Cointzio sub-basin has an important ecological deficit, and that its biological capacity, footprint and deficit/reserve have a significant variation among the sub-basin as a whole and the micro-basins it contains.

KEYWORDS: ecological deficit, ecological reserve, global hectares, GIS, land use, equivalence factors.

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

La concepción errónea de un planeta grande con recursos ilimitados disponibles en especial para los humanos, ha provocado el consumo desmedido de los recursos naturales y una gran producción de desechos. Siguiendo con el ritmo actual de la economía y el consumismo, se ha ignorado el daño que se causa al ambiente; sin embargo, a medida que los daños ambientales se reflejan de manera negativa en la economía y la salud humana, se ha tomado conciencia sobre la manera en que se utilizan los recursos. El cambio climático, la afectación en la capa de ozono, la falta de agua de calidad para el consumo humano, la pérdida de la fertilidad de los suelos, las enfermedades respiratorias causadas por la contaminación y la inversión térmica, entre otras problemáticas, no son más que el reflejo del mal uso que se le ha dado a los recursos que están a nuestra disposición.

A partir de esta problemática, temas como la sustentabilidad adquieren importancia; aprovechar de manera adecuada los recursos naturales y manejar los residuos de una mejor forma, es indispensable en la actualidad. El primer paso para hablar de desarrollo sustentable o sustentabilidad es precisamente conocer la manera y la proporción en que se utilizan los recursos así como la cantidad de residuos que se generan y la manera en que son manejados. La huella ecológica es uno de los indicadores de sustentabilidad más empleados en la actualidad, ya que a partir de ella se puede conocer el impacto ambiental de los seres humanos hacia el planeta o hacia un ecosistema específico (Carreño y Hoyos, 2010).

Una de las ventajas de la huella ecológica, es que puede ser aplicada en diferentes escalas de consumo: la humanidad en su conjunto, un país, un estado, un municipio, un individuo o una empresa (Chang y Xiong, 2005); sin embargo, y debido a la falta de disposición de datos, no se ha aplicado a una cuenca como unidad ecológica.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Conceptos generales

El término de Huella Ecológica introducido por Wackernagel y Rees se define como: *“La superficie de tierra productiva o ecosistema acuático necesario para mantener el consumo de recursos y energía, así como para absorber los residuos producidos por una determinada población humana o economía, considerando la tecnología existente, independientemente de en qué parte del planeta está situada esa superficie”* (Wackernagel y Rees, 1996).

La huella ecológica es uno de los indicadores de sustentabilidad más empleados en la actualidad. La sustentabilidad se refiere a *“La administración eficiente y racional de los recursos naturales, de manera tal que sea posible mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras”* (Gobierno de México, 2012).

La medida de la huella ecológica por sí sola, representa la cantidad en hectáreas (ha) o hectáreas globales (gha) de lo que una sociedad requiere para mantener sus niveles de consumo. Para que la huella ecológica sea un indicador de sustentabilidad, ésta debe ser comparada con la capacidad ecológica que se define como: *“La superficie bioproductiva de cultivos, pastos, mar productivo y bosque disponibles”* (Gobierno de España, 2007). La organización Global Footprint Network, por su parte, la define como: *“La capacidad de los ecosistemas de producir materiales biológicos útiles y absorber los materiales de desecho generados por los seres humanos, usando esquemas de administración y tecnologías de extracción actuales”* (Global Footprint Network, 2014).

La comparación entre huella ecológica (lo que se necesita) y capacidad ecológica (de lo que se dispone) es el verdadero indicador de sustentabilidad, a partir de esta comparación se conoce el **“Déficit ecológico”** o el **“Excedente ecológico”** (Lenzen *et al.*, 2003).

Si la huella ecológica es mayor que la capacidad ecológica, entonces se tendrá un “déficit ecológico”, esto indica que la sociedad está haciendo mal uso de los recursos de que dispone, es decir, está sobreexplotando su tierra bioproductiva u ocupando espacios que no le corresponden. Si por lo contrario, la capacidad ecológica es mayor que la huella ecológica, se tiene un “excedente ecológico”, que es indicador de un uso adecuado de los recursos y por lo tanto, de sustentabilidad (Gobierno de España, 2007).

1.2.2 Filosofía del cálculo de la huella ecológica

La filosofía del cálculo de la huella ecológica se basa en los siguientes aspectos (Gobierno de España, 2007):

1. Para producir cualquier bien o servicio se necesita un flujo de materia y de energía provenientes de sistemas ecológicos o del flujo de energía directa del sol en sus diferentes manifestaciones.
2. Se necesitan sistemas ecológicos para absorber los residuos generados durante el proceso de producción y el uso de los productos finales.
3. El espacio es también ocupado por infraestructura, viviendas y equipamientos, entre otros, reduciendo de esa manera la superficie del ecosistema productivo.

Basados en estos tres aspectos, las actividades humanas que se pueden evaluar para calcular la huella ecológica son las siguientes (Gobierno de España, 2007):

- Alimentación. En la que se calculan las superficies necesarias para la producción de alimentos, incluyendo los costos energéticos asociados a su producción.
- Vivienda y servicios. En la que se calculan las superficies demandadas por el sector doméstico y servicios, ya sea en forma de energía o terrenos ocupados para la urbanización, infraestructuras o los centros de trabajo.

- Movilidad y transporte. Superficies asociadas al consumo energético y terrenos ocupados por infraestructura de comunicación y transporte.
- Bienes de consumo. Superficies necesarias para la producción de bienes de consumo, ya sea en forma de energía y materias primas para su producción, o bien, terrenos directamente ocupados para la actividad.

Además de evaluar las superficies necesarias para las actividades antropogénicas antes mencionadas, en el cálculo de la huella ecológica se incluye la evaluación de la superficie necesaria para absorber el CO₂ producido por cada una de ellas (Martínez, 2008).

1.2.3 Superficies bioproductivas

Las superficies bioproductivas consideradas para satisfacer los consumos de las actividades anteriores se clasifican en seis grupos: cultivos, pastos, bosques, mar productivo, terreno construido y área de absorción de CO₂ (Tobasura, 2008) (Cuadro 1).

Las superficies biológicamente productivas se definen como: “Áreas de tierra o agua que sostienen actividad fotosintética y acumulación de biomasa significativa, utilizada por humanos, no incluidas las áreas no productivas, áreas marginales con escasa e irregular vegetación ni áreas con biomasa que no son de utilidad para los humanos” (Global Footprint Network, 2014).

En este contexto es importante mencionar que la productividad se refiere a la cantidad de material biológico útil para los humanos que se genera en determinada área. En agricultura, la productividad es llamada rendimiento, el cual es la cantidad de producto primario regenerado, en general reportado en toneladas por hectárea por año, que los humanos pueden extraer por unidad de área (Global Footprint Network, 2014).

Cuadro 1. Superficies productivas.

Superficie	Definición
Cultivos	Superficies con actividad agrícola que constituyen la tierra más productiva ecológicamente hablando, pues es donde hay una mayor producción neta de biomasa utilizable por las comunidades humanas.
Pastos	Espacios utilizados para el pastoreo de ganado, en general considerados menos productivos que los agrícolas.
Bosques	Superficies forestales naturales o repobladas, siempre que se encuentren en explotación.
Mar productivo	Superficies marinas en las que existe una producción biológica mínima para que pueda ser aprovechada por la sociedad humana.
Ocupación directa	Áreas urbanizadas y ocupadas por infraestructura.
Área de absorción de CO ₂	Superficie necesaria para la absorción de las emisiones de CO ₂ , debidas al consumo de combustibles fósiles para la producción de energía.

Fuente: (Gobierno de España, 2007).

1.2.4 Unidades de cálculo de la huella y la capacidad ecológica

La huella ecológica, puede ser calculada en hectáreas globales (gha) o hectáreas locales. Una hectárea global es un área ponderada según la productividad del tipo de superficie de la que se trate y es utilizada para expresar las hectáreas de diferentes usos de suelo en una misma unidad; una hectárea local es el área ponderada según su productividad utilizada para reportar tanto la capacidad como la huella ecológica de una región local. Las hectáreas locales se normalizan según la productividad promedio ponderada para cada superficie bioproductiva de una región específica (Global Footprint Network, 2014).

Dos aspectos fundamentales en el cálculo de la huella ecológica son los factores de rendimiento y factores de equivalencia que permiten convertir todo tipo de unidades partiendo del consumo, a unidades de hectáreas, hectáreas globales o hectáreas locales. Los factores de productividad se definen como: “*Factores que dan cuenta de las diferencias entre países en la productividad de un determinado tipo de terreno*”; los factores de equivalencia por su parte son: “*Factores de escala basados en la productividad que convierten un tipo específico de terreno en una unidad universal de área biológicamente productiva*” (Global Footprint Network, 2014).

1.2.5 Factores de equivalencia.

Los factores de equivalencia reflejan la productividad relativa de los diferentes tipos de uso del suelo a nivel mundial, estos factores son los mismos para todos los países, varían muy poco de un año a otro y son calculados por la Global Footprint Network (2008) (Cuadro 2).

Su cálculo se realizó mediante índices de idoneidad del modelo de zonas agroecológicas mundial (GAES), combinado con información sobre áreas actuales de las tierras de cultivo, bosque y zona de pastoreo de FAOSTAT (Global Agro-Ecological Zones; FAO ResourceSTAT Statistical Database).

Cuadro 2. Factores de equivalencia.

Categoría de terreno productivo	Factor de equivalencia
Cultivos	2.18
Pastos	0.49
Bosques	1.37
Mar productivo	1.37
Ocupación directa	2.18
Área de absorción de CO ₂	0.36

Fuente: (Global Footprint Network, 2008).

Con base en lo anterior, se divide toda la tierra a nivel mundial en cinco categorías, a cada una de las cuales se les asigna una puntuación de idoneidad (Cuadro 3):

Cuadro 3. Categorías de idoneidad de la tierra a nivel global.

Categoría	Puntuación
Muy conveniente	0.9
Conveniente	0.7
Moderadamente apropiado	0.5
Marginalmente aptas	0.3
No conveniente	0.1

El cálculo de los factores de equivalencia supone que a las tierras más productivas se les dé un uso agrícola, que la próxima tierra más adecuada esté bajo bosque y la tierra menos adecuada sea el área de pastoreo. El factor de equivalencia se calculó mediante la relación entre el índice promedio de idoneidad para un tipo de uso de la tierra dada, dividido por el índice medio de idoneidad para todos los tipos de uso del suelo. El factor de equivalencia para la superficie artificializada, se estableció igual que el de las tierras de cultivo, lo anterior parte del supuesto de que la infraestructura ocupa las tierras que anteriormente eran de cultivo. Para el área marina se calculó de tal manera, que una sola hectárea global de los pastos producirá una cantidad de calorías de la carne de vacuno, igual a la cantidad de calorías de salmón que se pueden producir en una sola hectárea global de la superficie marina.

1.2.6 Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es un aspecto fundamental en la presente investigación, por ser la escala a la que se desea estimar la huella ecológica. Una cuenca se define como “El espacio de territorio delimitado por la línea divisoria de las aguas, conformado por un sistema hídrico que conducen sus aguas a un río principal, a un río muy grande, a un lago o a un mar en un ámbito tridimensional que integra las interacciones entre la cobertura sobre el terreno, las profundidades del suelo y el entorno de la línea divisoria de las aguas” (World Vision, 2000).

Comúnmente, las cuencas hidrológicas son denominadas también espacios territoriales delimitados por un parteaguas (parte más alta de las montañas), en donde se concentran todos los escurrimientos de agua que confluyen y desembocan en un punto común, este puede ser un lago, un río o el océano. Las cuencas se clasifican en endorreicas (cuencas cerradas) o exorreicas (cuencas abiertas) según tengan una salida de agua o no, también se dividen según su tamaño en cuencas, subcuencas o microcuencas (Figura 1) (SEMARNAT, 2013).

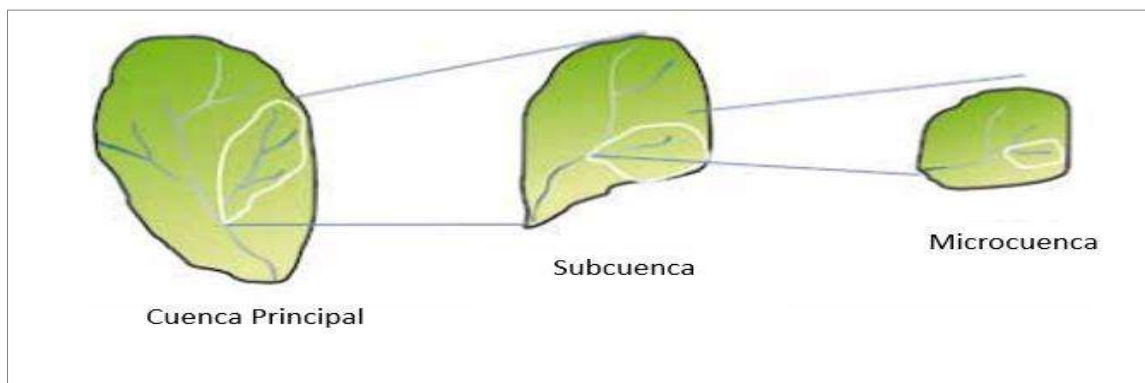


Figura 1. Clasificación de las cuencas según su tamaño.
Fuente: (SEMARNAT, 2013)

Las cuencas, subcuencas o microcuencas se pueden considerar unidades naturales que sirven de base como territorio, para articular procesos de gestión que tienden al desarrollo sustentable, ya que sus habitantes comparten un sistema natural del cual demandan recursos para la satisfacción de sus necesidades (Casillas, 2004).

En las cuencas, los procesos socioecológicos están íntimamente ligados entre sí, por lo tanto, el manejo sustentable de los recursos naturales dentro de dicho territorio depende de la planeación, implementación y evaluación de acciones mediante la participación organizada e informada de la población.

Los componentes que integran una cuenca son físicos, biológicos y antropogénicos, éstos tres están interrelacionados y en un determinado equilibrio, por lo tanto, si se modifica o altera alguno de ellos, todo el sistema lo hace; comprender la capacidad ecológica y conocer la huella ecológica dentro de este territorio delimitado de forma natural, es más apegado a la realidad que tomando en cuenta límites políticos establecidos por los humanos (Dardón y Morales, 2002).

1.2.7 Sistemas de información geográfica y teledetección

Los sistemas de información geográfica y la teledetección, son de suma importancia, ya que permiten incorporar la parte espacial dentro del cálculo de la capacidad y la huella ecológica, y su uso como indicador de sustentabilidad.

Los sistemas de información geográfica se definen como un conjunto de herramientas diseñadas para capturar, manejar, manipular, transformar, analizar y modelizar datos geográficos, permitiendo representar los objetos del mundo real en términos de posición, atributos y de las interrelaciones espaciales, con el objeto de analizar estos datos y de resolver problemas reales. El ciclo de los sistemas de información geográfica abarca desde la recopilación de datos, su análisis y manipulación, hasta la interpretación del usuario final (Figura 2) (INEGI, 2014b).



Figura 2. Ciclo de los sistemas de información geográfica.
Fuente: (INEGI, 2014b)

“La teledetección o percepción remota por su parte, puede entenderse como la técnica que permite obtener información acerca de la superficie de la tierra sin estar en contacto con ella, a partir de la detección y grabación de energía emitida y reflejada, el procesamiento, el análisis y la aplicación de esa información”. Los elementos de la teledetección son: la fuente de energía, la cubierta terrestre, el sistema sensor, el sistema de recepción, el intérprete y el usuario final (Figura 3) (Chuvieco, 1995).

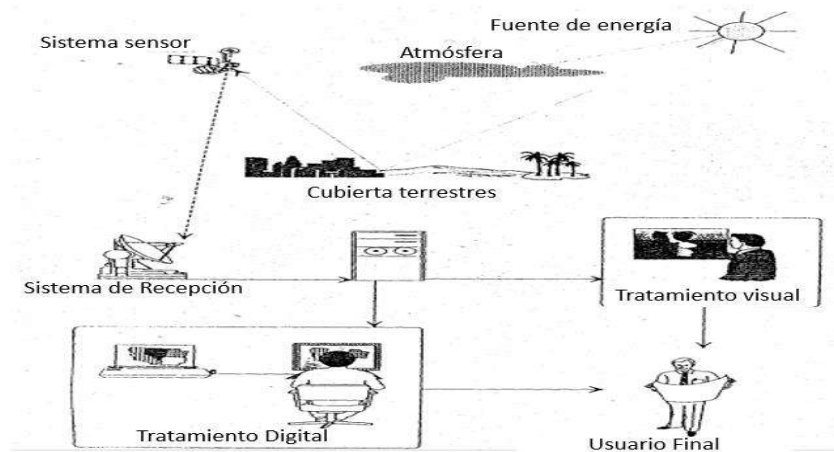


Figura 3. Elementos de la teledetección.
Fuente: (Chuvieco, 1995)

1.3 ANTECEDENTES

A partir de que inició el tema de la sustentabilidad, se ha presentado una constante búsqueda de métodos que apoyen a la toma de decisiones para lograr un desarrollo sustentable (Van y Smeets, 2000). El término de huella ecológica surgió como uno de los indicadores más prometedores para medir el impacto de los seres humanos hacia el planeta (Doménech y González, 2008).

1.3.1 Situación mundial

A nivel mundial, la estimación de la huella ecológica ha mostrado resultados preocupantes, se calcula que el planeta tiene aproximadamente 12 600 millones de hectáreas ecológicas productivas; sin embargo, y debido a que no somos los únicos seres vivos que habitamos la tierra, entre 10% y 12% de esas hectáreas (Martínez, 2009), deben ser destinadas a la conservación de la biodiversidad, por lo que se estiman 11 088 millones de hectáreas globales ecológicamente productivas para los seres humanos. Dividiendo estas hectáreas entre la población total se conoce la capacidad ecológica del planeta.

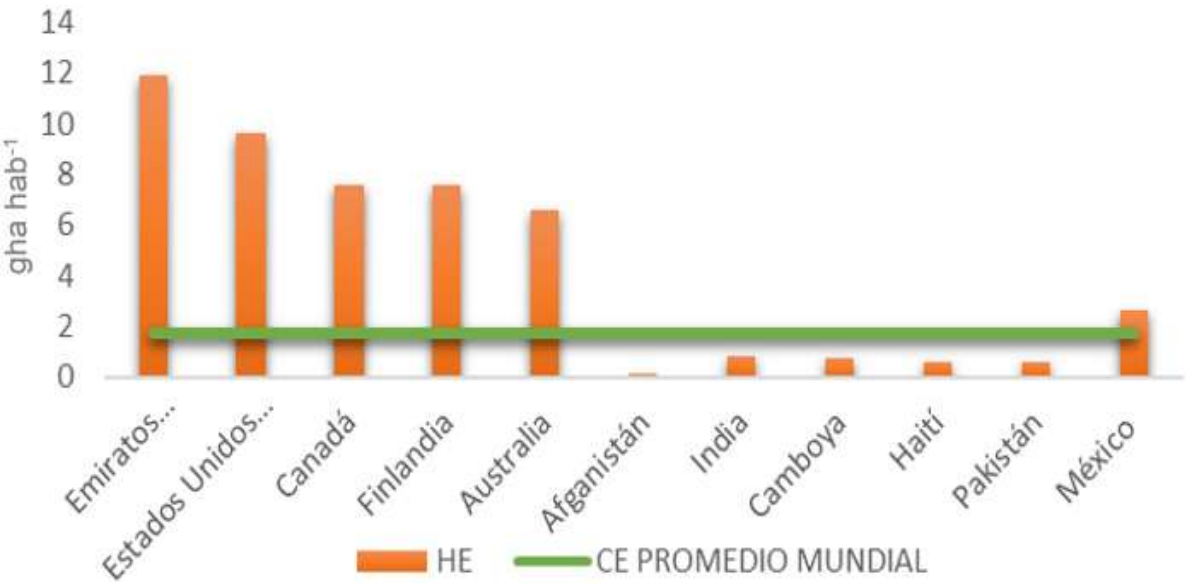
En 2008, la capacidad ecológica del planeta era de 1.7 gha hab⁻¹, mientras que la huella ecológica global era de 2.8 gha hab⁻¹, lo cual representa un déficit ecológico de 1.1 gha hab⁻¹, es decir un consumo del 64.7% más por habitante del que corresponde (Martínez, 2008).

En otra investigación, se menciona que la capacidad ecológica global es de 2.2 gha hab⁻¹ y la huella ecológica por habitante supera 30% este número. Aunado a lo anterior, para el año 2050 se estima que la población alcanzará los 10 mil millones de habitantes, lo cual reduciría la capacidad ecológica a 1 gha hab⁻¹ (Martínez, 2009).

Además de los malos hábitos de consumo, el crecimiento demográfico como puede observarse, es una de las principales causas de los problemas ambientales. A pesar de que el ser humano tiene miles de años habitando el planeta, hasta 1804 la población mundial llegó a ser de mil millones de habitantes. Para 1927 en sólo 123 años, la población llegó a los dos mil millones de habitantes; en 1972 sólo 45 años

después, la población mundial se duplicó; este crecimiento ha continuado y a finales del siglo XX, la población mundial superó los 6 mil millones de habitantes (INEGI, 2013). El estado de Michoacán en el 2010 tenía una población de 4 351 037 habitantes, ocupando el noveno lugar a nivel nacional en cuanto a densidad de población (INEGI, 2013).

En el año 2003, se reportó que los países con mayor huella ecológica eran: Emiratos Árabes Unidos con 11.9 gha hab⁻¹, Estados Unidos de América con 9.6 gha hab⁻¹, Canadá y Finlandia con 7.6 gha hab⁻¹ y Australia con 6.6 gha hab⁻¹, mientras que los países con la huella ecológica más baja fueron: Afganistán con 0.1 gha hab⁻¹, India con 0.8 gha hab⁻¹, Camboya con 0.7 gha hab⁻¹ y, Haití y Pakistán con 0.6 gha hab⁻¹. Para México, se estima una huella ecológica de 2.6 gha hab⁻¹, comparándola con la capacidad ecológica promedio mundial de 1.7 gha hab⁻¹, se tiene un déficit ecológico de 0.9 gha hab⁻¹ (Figura 4) (Martínez, 2009).



HE: huella ecológica, CE: capacidad ecológica
 Figura 4. Huella ecológica de algunos países.
 Fuente (Martínez, 2009)

Con base en los datos de la organización “Global Footprint Network”, en Latinoamérica, los países con más huella ecológica son: Argentina, Chile y Bolivia; sin embargo, debido a que su capacidad ecológica es superior, no tienen un déficit ecológico. En este estudio se reporta para México una huella ecológica de 3.25 y una capacidad ecológica de 1.7 gha hab⁻¹ (Carreño y Hoyos, 2010).

El déficit o el excedente ecológico de algunos países, se puede observar en el Cuadro 4. Países como Nueva Zelanda y Canadá, tienen huella ecológica que supera las 4 gha hab⁻¹, sin embargo tienen capacidades ecológicas superiores a las 10 gha hab⁻¹, lo cual los lleva a tener un excedente ecológico considerable. Como caso contrario, la República Dominicana tiene una huella ecológica inferior a 2 gha hab⁻¹, pero con una capacidad ecológica de apenas 0.56 gha hab⁻¹. Por otra parte, países como Estados Unidos de América a pesar de tener una capacidad ecológica superior a 4 gha hab⁻¹, su huella ecológica supera este número, dando como resultado un déficit ecológico de 4.59 gha hab⁻¹.

Cuadro 4. Huella ecológica por países.

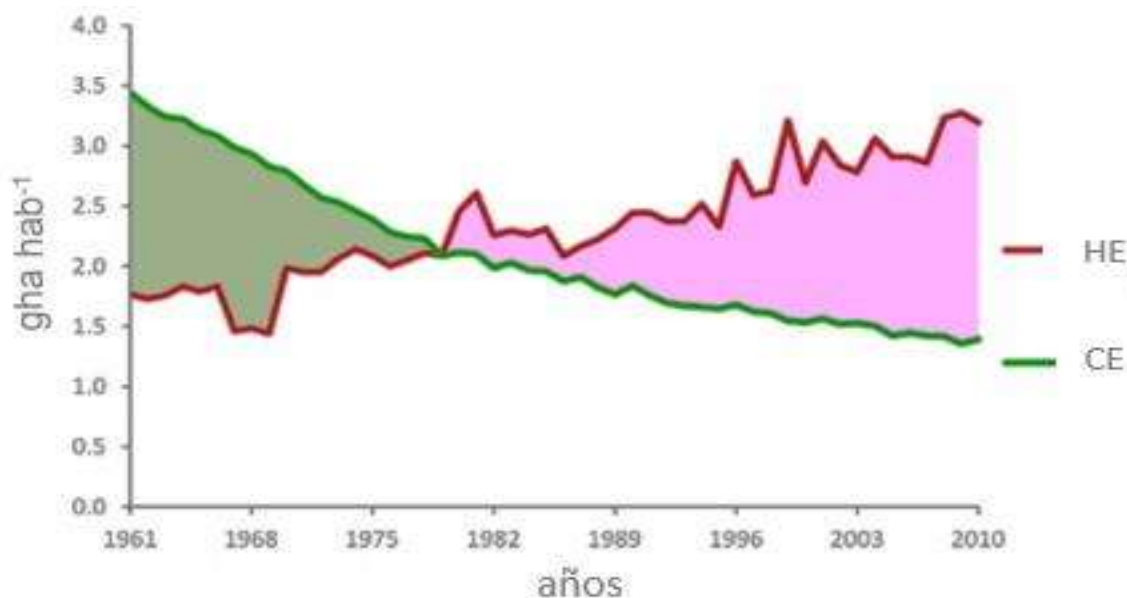
País	Huella ecológica gha hab ⁻¹	Capacidad ecológica gha hab ⁻¹	Déficit o excedente gha hab ⁻¹
Suráfrica	2.74	1.72	-1.2
Emiratos Árabes Unidos	10.29	1.36	-8.93
Kuwait	7.90	0.52	-7.38
Japón	4.11	0.62	-3.49
Nueva Zelanda	7.58	12.04	4.46
Estados Unidos	9.02	4.43	-4.59
Canadá	5.76	17.08	11.76
Bolivia	2.41	19.33	16.92
Argentina	3.00	7.05	4.04
México	3.25	1.70	-1.55
República Dominicana	1.36	0.56	-0.82
Holanda	4.60	1.05	-3.55
Grecia	5.76	1.36	-4.4
Francia	4.60	2.83	-1.77

Fuente: (Carreño y Hoyos, 2010); gha hab⁻¹= hectáreas globales por habitante

1.3.2 Huella ecológica de México

A pesar de que México es un país con una gran biodiversidad, su capacidad ecológica no es suficiente para mantener los niveles de consumo actuales de sus habitantes, ya que dicha capacidad es superada por la huella ecológica desde 1979.

El crecimiento demográfico y el uso insustentable de los recursos ha provocado que la huella ecológica de México se encuentre en constante crecimiento. Mientras que en 1961 la huella ecológica estimada era de 1.7 gha hab⁻¹, para 2008 alcanzó un valor de 3.3 gha hab⁻¹; aunado a esto, la capacidad ecológica del país no ha permanecido constante, debido a la pérdida de la biodiversidad y a la degradación de los ecosistemas. La capacidad ecológica ha disminuido de 3.4 gha hab⁻¹ en 1961 a 1.42 gha hab⁻¹ en 2008 (Figura 5) (Global Footprint Network, 2008).



HE: huella ecológica, CE: capacidad ecológica.

Figura 5. Huella ecológica y capacidad ecológica de México de 1961 a 2008.

Fuente: (Global Footprint Network, 2008)

Esta situación en 2008, representó un déficit para México de 1.88 gha hab⁻¹. Según el informe de la SEMARNAT (2012), la superficie forestal requerida para la absorción del CO₂ es la que ha tenido el mayor incremento, pasando de 0.07 gha hab⁻¹ en 1996 a 1.7 gha hab⁻¹ en 2008. La huella ecológica no ha sido calculada para todas las ciudades del país ni para todos los estados, algunos lugares con datos registrados son Xalapa en el estado de Veracruz con 2.9 gha hab⁻¹ y, las zonas urbanas de Cabo Corrientes, Tomatlán y Puerto Vallarta en el estado de Jalisco con 2.75 gha hab⁻¹ en promedio, con un déficit ecológico de 0.80 gha hab⁻¹ (Figura 6) (SEMARNAT, 2012).

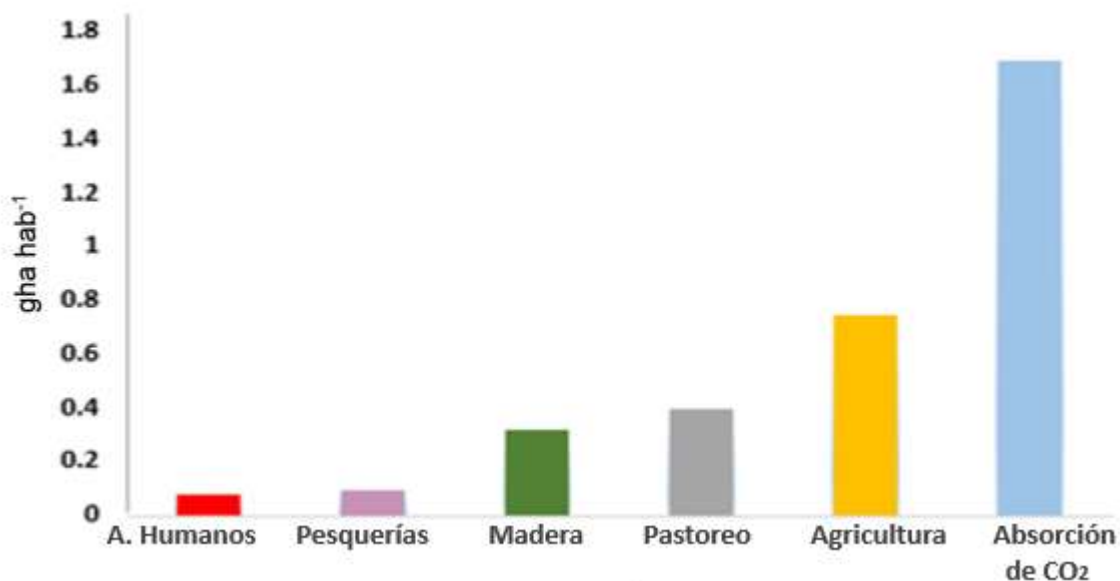


Figura 6. Huella ecológica por superficie productiva, México 2008.
Fuente: (Global Footprint Network, 2008)

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los hábitos actuales de consumo demandan cada vez más recursos y generan gran cantidad de desechos, a partir de esto se han creado una serie de problemas ambientales como el cambio climático, la falta de agua de calidad para el consumo humano y la pérdida de fertilidad de los suelos, entre otros.

La huella ecológica de la humanidad, cada vez es más alta y la capacidad ecológica tiene una tendencia decreciente. En promedio, un habitante del planeta consume casi 65% más de los recursos de los que debería, para que su consumo fuera sustentable (Martínez, 2008). Sin embargo, no todos los habitantes del planeta tienen el mismo consumo, un habitante mexicano requiere más del doble de hectáreas de las que marca la capacidad ecológica de México. Estos datos indican la falta de sustentabilidad en el planeta y en México; lo que pasa a nivel estatal, municipal o regional, se desconoce, debido a la falta de estudios a estas escalas.

La demanda de recursos no es la misma para todas las personas del planeta ni para los habitantes de un país, de un estado o de un municipio, a pesar de esto y debido a la falta de disposición de datos no se han realizado estudios a nivel regional y el cálculo de la huella ecológica, no se ha aplicado a una unidad ecológica.

Debido a que no se han realizado estudios a escalas locales, las metodologías empleadas no se adaptan completamente al análisis de la huella ecológica en una subcuenca. Finalmente, la huella ecológica se ha dado a conocer como un dato puntual y homogéneo en un territorio determinado, sin que sea el comportamiento real de este indicador de sustentabilidad.

1.5 JUSTIFICACIÓN

A partir de la problemática ambiental actual, surge la necesidad de implementar actividades sustentables, que aprovechen de forma consciente los recursos naturales y disminuyan el impacto ambiental. La huella ecológica se ha empleado en los últimos años como un indicador de sustentabilidad, su importancia radica en que permite conocer el impacto que los seres humanos tienen sobre los ecosistemas de una manera cuantitativa, y en conjunto con la capacidad ecológica, permite conocer que tan sustentable es un sistema.

Las cuencas, comprenden un territorio que facilita la relación entre sus habitantes, de manera independiente del agrupamiento en asentamientos delimitados por cuestiones políticas-administrativas, debido a su dependencia común a un sistema hídrico, recursos naturales, caminos y vías de acceso entre otras cosas. Las cuencas son consideradas unidades naturales que sirven de base para el fomento del desarrollo sustentable. Por lo tanto, se requiere conocer la manera en que se utilizan los recursos no sólo a nivel municipal, estatal o nacional, sino al nivel de cuencas hidrográficas.

La adaptación de la metodología del cálculo de la huella ecológica a una cuenca, es de suma importancia, debido a que cada región del planeta tiene consumos, recursos e impactos diferentes, por lo tanto, la estimación de la huella ecológica en una cuenca, se espera que sea más real que a una escala mayor. Su espacialización por otra parte, permitirá conocer el comportamiento de la huella ecológica en la subcuenca y no tenerla como un dato puntual homogéneo.

1.6 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Es posible evaluar la huella ecológica a partir de métodos indirectos de medición al nivel de una cuenca hidrológica?
2. ¿Cuál es la huella ecológica de la subcuenca de Cointzio?
3. ¿Cuál es la capacidad ecológica del área de estudio?
4. ¿Cómo se puede espacializar la huella ecológica en la subcuenca?
5. ¿Existe déficit o excedente ecológico en la subcuenca?

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo general

Estimar la huella ecológica y la capacidad ecológica como indicadores de sustentabilidad de la subcuenca de Cointzio y sus microcuencas.

1.7.2 Objetivos específicos

- Adaptar la metodología para la estimación de la capacidad y la huella ecológica a la escala de una subcuenca hidrológica.
- Calcular la capacidad ecológica total de la subcuenca y de cada una de las microcuencas, en distintas fechas.
- Estimar la huella ecológica y el déficit o excedente ecológico total, así como para cada microcuenca.
- Espacializar la huella ecológica en la Subcuenca
- Obtener una metodología de fácil replicación para cualquier cuenca.

1.8 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.8.1 Localización

La Subcuenca de Cointzio se localiza entre los 19° 24' y 19° 38' de latitud norte y, los 101° 08' y 101° 33' de longitud oeste; forma parte de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, y se ubica en la región hidrológica de Lerma-Chapala, dentro del Sistema Volcánico Transversal en el Centro Occidente de México; tiene una extensión territorial de 665 km² aproximadamente (Figura 7) (Medina *et al.*, 2009).

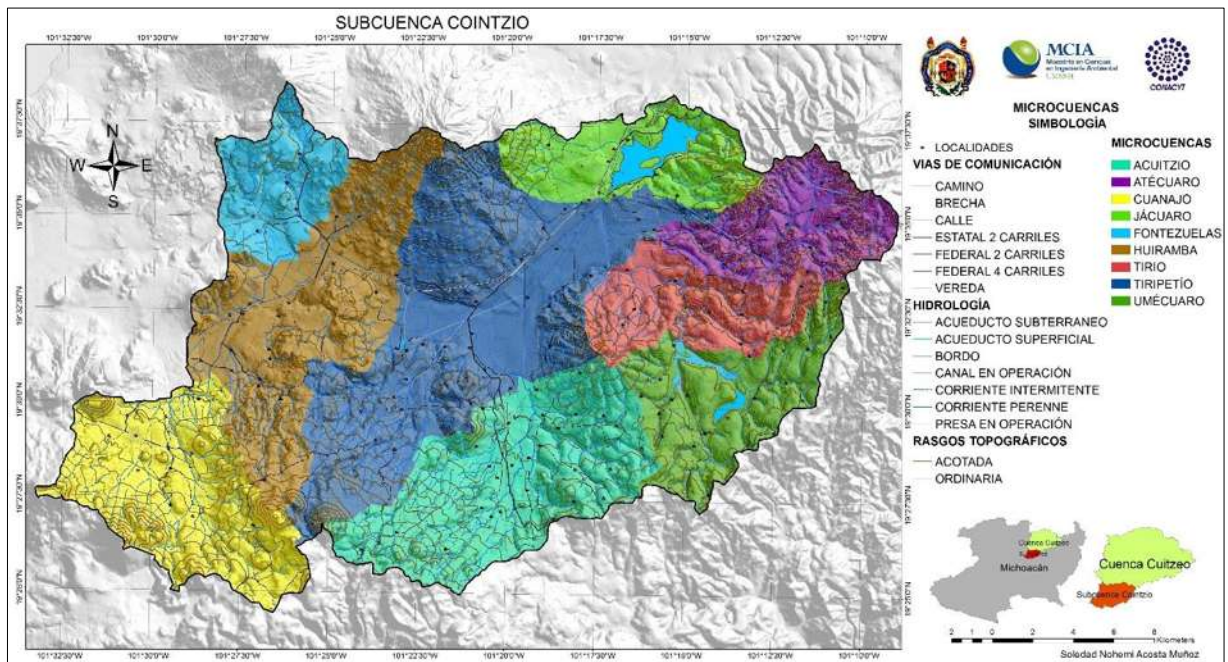


Figura 7. Microcuencas de la subcuenca de Cointzio.
Fuente: (INEGI, 2014a)

La subcuenca Cointzio es de gran importancia para la ciudad de Morelia, al producir el agua que se almacena en la presa Cointzio, la cual aporta 30% para el consumo doméstico de la población urbana. Se encuentra en seis municipios: Morelia, Acuitzio, Huiramba, Lagunillas, Pátzcuaro y Tzintzuntzan; tiene 148 localidades, de las cuales 144 son rurales y cuatro son urbanas, el número total de habitantes es de 46 170 (INEGI, 2014a).

1.8.2 Clima

El clima es templado subhúmedo con una precipitación media anual de 900 mm, concentrada durante junio a noviembre, y una temperatura media anual 15 °C con temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C, y la del mes más caliente menor de 22 °C (Medina *et al.*, 2009) .

Dentro de la subcuenca se encuentran tres estaciones meteorológicas: Acuitzio del Canje, Coitzio y Santiago Undameo, estas estaciones registran el periodo de lluvias de mayo a octubre en los tres sitios, la temperatura máxima y media disminuyen en el periodo de lluvias y la temperatura mínima aumenta con dicho periodo (Figura 8).

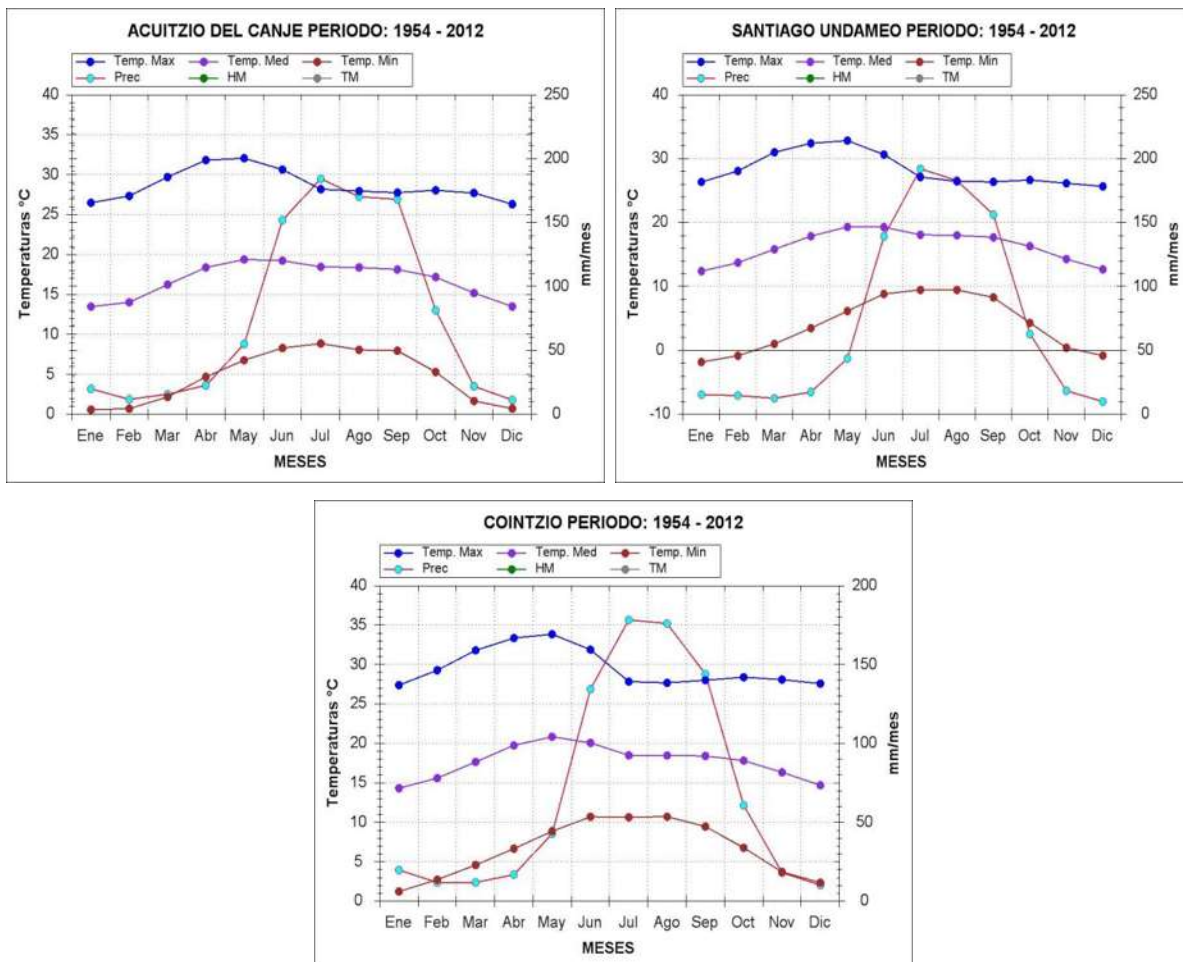


Figura 8. Climogramas de las estaciones meteorológicas en la subcuenca Coitzio. Fuente:(Manzanilla, 2016).

1.8.3 Edafología

Los suelos dominantes en la subcuenca Cointzio son Andosoles, Acrisoles y Luvisoles (Figura 9):

Los **Andosoles** se presentan en altitudes de 2300 a 3100 m. Estos suelos se originan de cenizas volcánicas y se desarrollan en bosques de pino-encino, aunque hay áreas usadas para la agricultura, la cual es limitada por la inmovilización de fósforo.

Los **Acrisoles** y **Luvisoles** se localizan en ambientes similares, pero a menor altitud entre los 1900 y los 2700 m. Se caracterizan por ser ácidos y estar fuertemente meteorizados. Tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial; la vegetación de estos suelos es de bosque de pino y encino, pastizal y agricultura. Estos suelos son susceptibles de sufrir compactación por efecto del pastoreo y con frecuencia presentan erosión en cárcavas (Cabrera *et al.*, 2010).

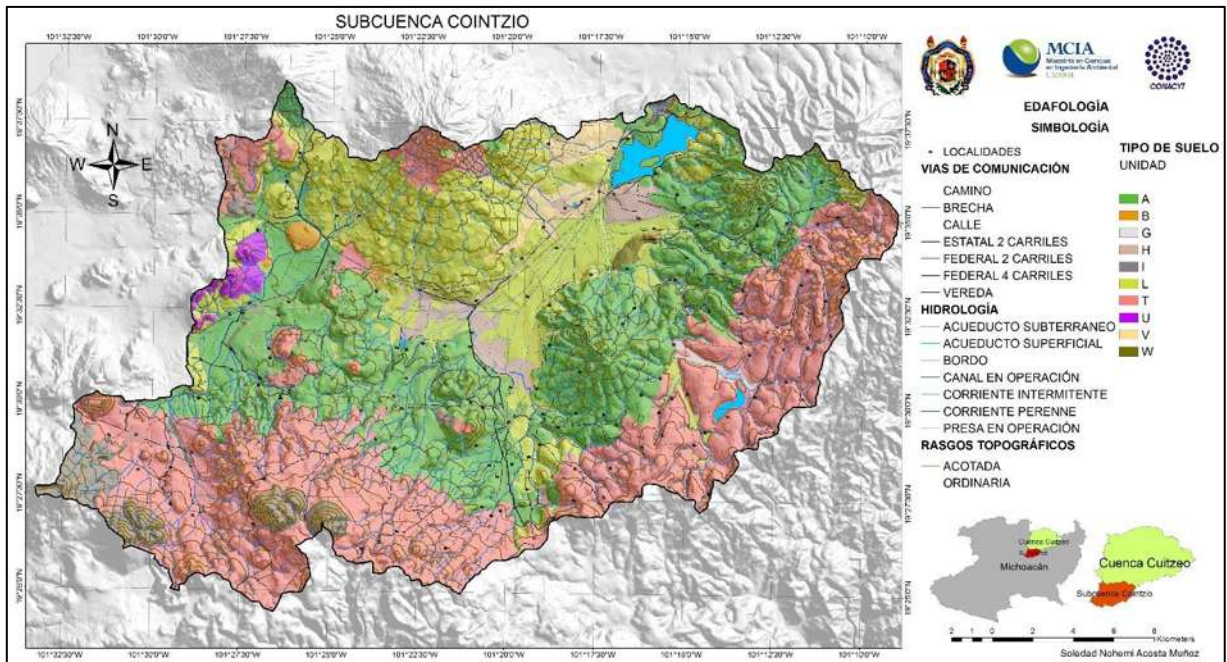


Figura 9. Edafología de la subcuenca Cointzio.
Fuente: (DETENAL, 1979a, 1979b, 1979c) y (DGG, 1982)

1.8.4 Uso de suelo y vegetación

En el uso de suelo, la agricultura de temporal y la agricultura de riego abarcan la mitad del territorio de la subcuenca con 40% y 10%, respectivamente; la vegetación secundaria está presente en 13% del territorio; en cuanto a la vegetación forestal, los bosques de pino ocupan 10%, los bosques de pino encino 9% y en el resto del territorio se encuentran: pastizal inducido, bosque de encino, asentamientos humanos, bosque cultivado, cuerpos de agua y bosque de oyamel (Figura 10) (INEGI, 2011).

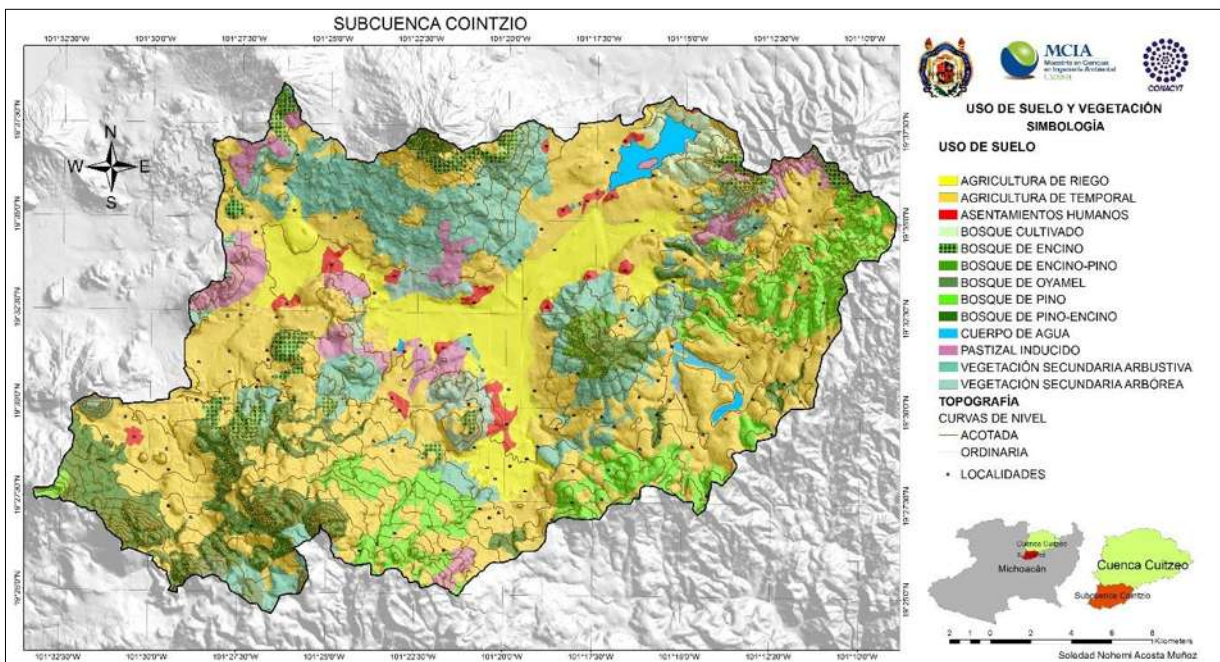


Figura 10. Uso de suelo y cobertura vegetal.
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2011).

1.8.5 Microcuencas

La subcuenca se divide en nueve microcuencas: Fontezuelas, Estación Jácuaro (Colonia La Reunión), Huiramba, Tiripetío, Atécuaro, Tirio, Umécuaro, Acuitzio del Canje y Cuanajo. La microcuenca con mayor superficie territorial y con más localidades es la de Tiripetío, mientras que la de Huiramba es la de mayor número de habitantes. La microcuenca más pequeña en cuanto a superficie territorial y número de localidades es Fontezuelas; sin embargo, la de menor número de habitantes es Atécuaro. Tres de las microcuencas se encuentran en el municipio de Morelia, una en Acuitzio y las demás se localizan dentro de dos o más municipios (Cuadro 5).

Cuadro 5. Número de localidades y población por microcuenca.

Microcuenca	Área	Número de comunidades	Población
	km ²		habitantes
Fontezuelas	35	6	1780
Estación Jácuaro	48	9	4053
Huiramba	99	19	11 773
Tiripetío	157	29	8199
Atécuaro	47	12	1209
Tirio	42	13	1548
Umécuaro	56	20	1269
Acuitzio Del Canje	98	29	9495
Cuanajo	80	12	6844

Fuente:(INEGI, 2010a)

De acuerdo con el INEGI (2010) e INEGI (2011) enseguida se hace la caracterización para cada una de las microcuencas:

Fontezuelas. Esta microcuenca se encuentra al noroeste de la subcuenca de Cointzio, tiene aproximadamente 35 km² de superficie y dentro de ésta existen seis localidades rurales; tiene 1780 habitantes y forma parte de dos municipios (Lagunillas y Tzintzintzan). El 33% de esta microcuenca está ocupada por vegetación secundaria arbustiva, 22% por agricultura de temporal, 15% por pastizal inducido, 13% por agricultura de riego y 8% por bosque de encino.

Estación Jácuaro. Se localiza al norte de la subcuenca, alberga a 4053 personas de nueve localidades, todas rurales y del municipio de Morelia; tiene una extensión territorial de 48 km². La cobertura de suelo dominante es agricultura de temporal con 41%, seguida del bosque cultivado con 20%, vegetación secundaria con 17% y ocupado por la presa Cointzio con 10%.

Huiramba. Se encuentra al oeste de la subcuenca, tiene aproximadamente 99 km² de superficie, cuenta con 19 localidades de las cuales dos son urbanas y la habitan 11 773 personas. Se ubica entre cuatro municipios (Huiramba, Lagunillas, Pátzcuaro y Tzintzintzan). El uso de suelo es agrícola en 55% del territorio siendo de temporal 44% y de riego 11%; 18% del territorio tiene una vegetación secundaria y 10% es pastizal inducido.

Tiripetío. Se localiza al centro de la subcuenca y es la microcuenca de mayor extensión territorial con 157 km²; en esta área viven 8209 personas, distribuidas en 32 localidades, todas rurales las cuales pertenecen a los municipios de Acuitzio, Lagunillas y Morelia. La agricultura se presenta en más de la mitad del territorio, 30% es de temporal y 24% de riego, y 27% con vegetación secundaria.

Atécuaro. Se encuentra al noreste de la subcuenca, alberga a 1226 personas de 13 localidades rurales que pertenecen al municipio de Morelia; tiene una extensión territorial de 47 km². El 38% de la superficie se utiliza para agricultura de temporal, 33% para bosque de pino, 12% para pastizales inducidos y 10% es vegetación secundaria.

Tirio. Se localiza al este de la subcuenca, alberga a 1548 personas de 13 localidades rurales que pertenecen al municipio de Morelia. Tiene una extensión territorial de 42 km², 33% de esta superficie es para agricultura de temporal, 22% es vegetación secundaria y, 37% son bosques, 23% de pino y 14% de pino-encino.

Umécuaro. Se localiza al este de la subcuenca, su extensión territorial es de 56 km², en donde viven 1269 personas en 20 localidades rurales que pertenecen a los municipios de Acuitzio, Madero y Morelia. El 71% de la microcuenca es de uso agrícola de temporal, mientras que sólo 20% pertenece a bosques de pino.

Acuitzio. Se encuentra al sur de la subcuenca, tiene una extensión territorial de 98 km², en donde viven 9511 personas distribuidas en 29 localidades rurales y sólo una urbana del municipio de Acuitzio del canje. Más de la mitad del territorio de esta microcuenca es ocupado por agricultura de temporal (40%) y de riego (13%), 24% es para bosque de pino y 13% para vegetación secundaria arbustiva, el resto del territorio es ocupado por otro tipo de uso de suelo o cobertura vegetal.

Cuanajo. Se localiza al sureste de la subcuenca. Su extensión territorial es de 80 km², tiene una población de 6844 habitantes en 12 localidades de los municipios de Huiramba y Pátzcuaro. Los usos de suelo dominantes en esta microcuenca son la agricultura de temporal (43%) y el bosque de pino encino (41%).

CAPÍTULO 2: ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD ECOLÓGICA DE LA SUBCUENCA DE COINTZIO

2.1 RESUMEN

El presente capítulo, se abordó como objetivo el cálculo de la capacidad ecológica de la subcuenca Cointzio que comprende nueve microcuencas y 148 localidades para los años 1999, 2009 y 2014, así como el análisis de su tendencia a través de estas fechas. La metodología incluye el análisis de imágenes digitales, de uso potencial del suelo, de datos poblacionales para cada año estudiado y el cálculo de las superficies productivas, así como los cálculos necesarios para obtener la capacidad ecológica a la escala deseada. Se obtuvieron mapas de capacidad ecológica por localidad, así como la magnitud de la capacidad ecológica por microcuenca y de la subcuenca en total. Se obtuvieron además, mapas de uso potencial de suelo, de cobertura y de uso de suelo para cada año analizado. Los resultados indican que la capacidad ecológica de las localidades varía a pesar de estar en la misma microcuenca; la capacidad ecológica de las microcuencas es distinta entre ellas y con la de la subcuenca, a la vez que ésta última, es diferente de la capacidad ecológica nacional y global, lo que demuestra que la capacidad ecológica no es homogénea en todo el país, sino que varía incluso en áreas pequeñas.

PALABRAS CLAVE: hectáreas globales, imágenes digitales, sistemas de información geográfica, uso potencial del suelo, factores limitantes, factores de equivalencia.

2.2 INTRODUCCIÓN

La capacidad ecológica depende del valor de los bienes materiales y servicios que sus habitantes logren producir, mediante el uso de los recursos naturales disponibles dentro de su territorio; sin embargo, la falta de conocimiento sobre el estado en el que se encuentran dichos recursos en un territorio, conlleva al mal uso de los mismos, hasta el momento de creer que los recursos son ilimitados, esto ha provocado la falta de sustentabilidad en el planeta. Por lo tanto, conocer la capacidad ecológica de la subcuenca y de cada microcuenca estudiada, es de suma importancia, ya que indica el estado de los recursos naturales disponibles dentro de este territorio.

Debido al mal uso de los recursos naturales, la capacidad ecológica ha disminuido a través del tiempo, en tendencia decreciente que se ve tanto a nivel mundial, como a nivel de país. En México, la capacidad ecológica ha disminuido de 3.4 gha hab⁻¹ en 1961 a 1.42 gha hab⁻¹ en 2008 (Global Footprint Network, 2008). Sin embargo, a niveles regionales, de igual manera que la huella ecológica, se desconoce la magnitud de esta capacidad, por lo que es importante conocer la capacidad ecológica a niveles regionales, por ser a estos niveles a los que se manejan los recursos naturales en general.

Por otra parte, el cálculo de la capacidad ecológica se ha realizado mediante el conteo de las superficies bioproductivas, con base en el uso que le dan las personas a estas superficies; sin embargo, la capacidad ecológica se refiere a la superficie bioproductiva con la que cuenta una población (Gobierno de España, 2007), de manera independiente del uso que se le esté dando, es por esta razón que en el presente trabajo se determinó la capacidad ecológica con base en un análisis de uso potencial del suelo a nivel de subcuenca, microcuencas y localidades.

2.3 METODOLOGÍA

Estimar la capacidad ecológica de la cuenca, consiste en hacer el conteo de las hectáreas de superficie productiva que se tiene, ya sean pastos, cultivos, bosques, tierra artificializada, superficie de absorción de CO₂ y mar productivo, en el caso del área de estudio no se requiere la última categoría, por lo cual solo se contemplaron las cinco categorías restantes.

La capacidad ecológica se calculó para los años 1999, 2009 y 2014, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección, a partir del análisis de uso del suelo y cobertura vegetal, el uso potencial del suelo y tomando en cuenta la información poblacional del área de estudio.

2.3.1 Uso de suelo y cobertura vegetal

Determinar el uso de suelo y la cobertura vegetal en cada una de las fechas analizadas, es de suma importancia para conocer la capacidad ecológica de la subcuenca y de cada una de las microcuencas. Este análisis se realizó mediante la interpretación de imágenes digitales.

Se eligieron tres imágenes, de las cuales dos fueron obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos, una de Landsat 7, con path = 28 y row = 46, tomada el mes de noviembre para el año 1999 con el sensor ETM, y otra de Landsat 8, igualmente con path = 28 y row = 46, obtenida el mes de diciembre para el año 2014 con el sensor OLI (USGS, 2015), para la tercer imagen se usaron dos escenas, obtenidas del Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia con sensor SPOT 5, la primer escena con path = 583 y row = 311 tomada en el mes de diciembre de 2009 (CNES, 2009) y la segunda escena con path =584 y row =311 tomada el mes de marzo de 2010 (CNES, 2010). Para todas las imágenes se cuidó que no tuvieran nubosidad dentro del área de estudio y que fueran de la misma época del año, en este caso del periodo invernal.

Una vez elegidas las imágenes se mejoró la resolución de las mismas, con el SIG utilizando el módulo PANSHARPEN con la técnica *color space transformation*, dicho módulo utiliza una imagen de alta resolución pancromática para aumentar la resolución espacial de las imágenes de baja resolución multiespectrales (Eastman, 2012). De esta manera, se cambió la resolución de 30 a 15 m en las imágenes Landsat y de 10 a 2.5 m en la imagen SPOT.

Se recortaron las imágenes al área de estudio y se realizó un compuesto en falso color rojo, con la finalidad de facilitar la interpretación visual.

Se determinaron nueve clases de cobertura y uso de suelo como se muestra en el Cuadro 6, posteriormente y con base en estas clases se realizó la digitalización y clasificación de las imágenes en el programa CartaLinx; se digitalizó primeramente en la imagen SPOT debido a que presentaba la mejor resolución y se registraron a partir de ésta, los cambios presentes en las imágenes Landsat.

Cuadro 6. Clases de cobertura y uso de suelo.

Clase	Clase
1 Agricultura	6 Áreas forestales
2 Pastizal	7 Vegetación secundaria forestal
3 Cuerpo de agua	8 Matorral
4 Vegetación acuática	9 Banco de materiales
5 Asentamientos humanos	

Se obtuvieron los archivos vectoriales para cada una de las fechas analizadas y se realizó la composición cartográfica en el programa ArcMap 10.3; se generaron los mapas de uso de suelo y de cobertura vegetal de los años 1999, 2009 y 2014.

Finalmente, se llevó a cabo una rectificación con datos de campo en 18 sitios dentro de las nueve microcuencas; se realizó una matriz de confusión y se utilizó el estadístico ROC (Receiver Operating Characteristic), para verificar la confiabilidad y validez de la clasificación realizada.

2.3.2 Uso potencial del suelo

La metodología empleada para este análisis se basó en los sistemas de clasificación de la capacidad agrológica de la tierra (INEGI, 2006) y el índice de STORIE modificado que es un sistema de evaluación paramétrico para capacidades de uso (Figura 11) (Cabrera *et al.*, 1997).

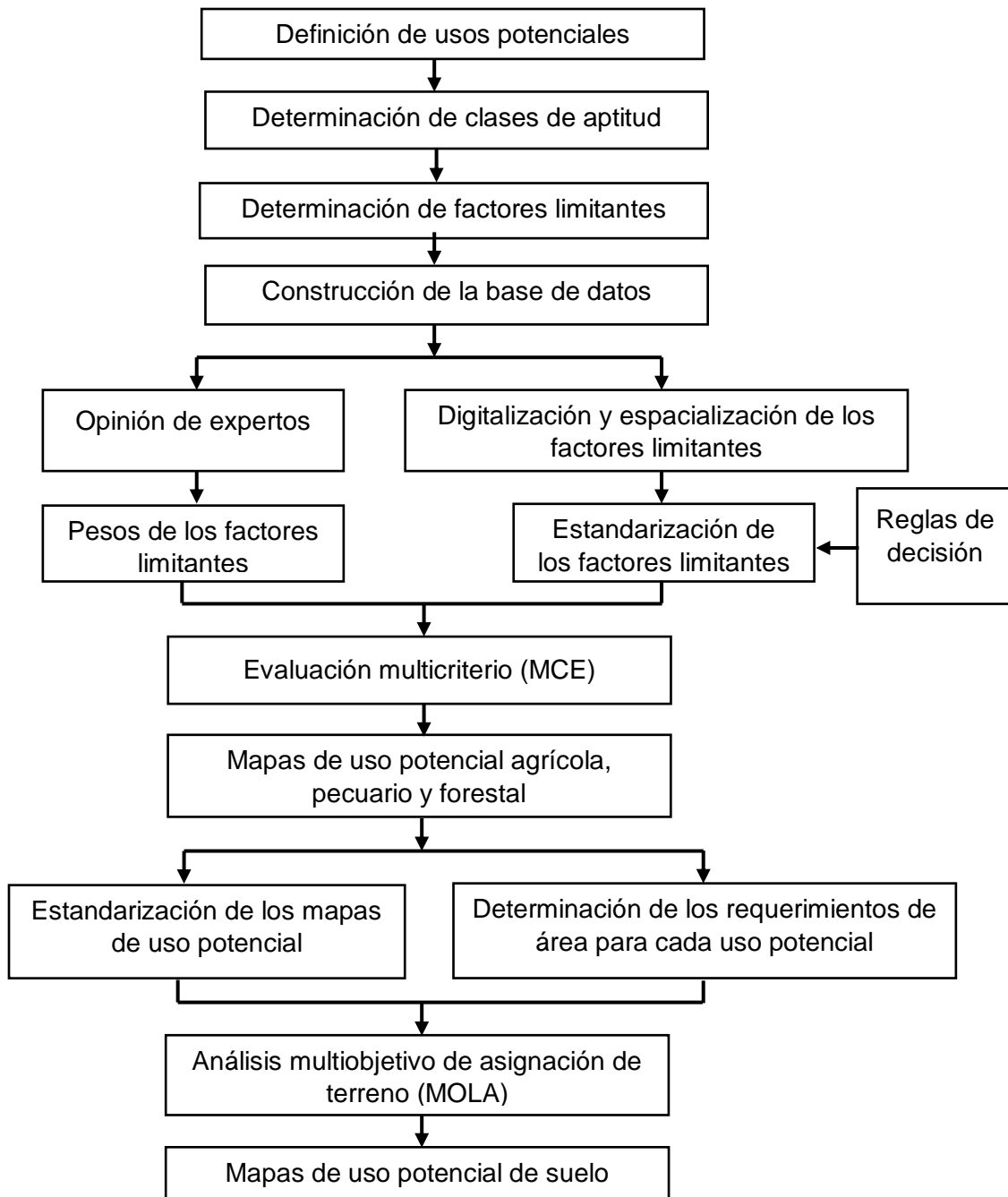


Figura 11. Diagrama metodológico para obtener el uso potencial del suelo.

Determinar la aptitud del suelo, forma parte del proceso de planificación de uso y manejo de los recursos naturales, y es importante para conocer los recursos con los que cuenta un determinado territorio

Definición de usos potenciales y determinación de clases de aptitud. Se definieron los siguientes usos potenciales de acuerdo con el INEGI (2006):

1. Agrícola. Se fundamenta en la aptitud para el desarrollo de los cultivos, la labranza y la implantación de obras para riego.
2. Pecuario. Se da en función de la aptitud para el desarrollo de las especies forrajeras, el establecimiento de praderas cultivadas, la movilidad del ganado en el área de pastoreo y las características de la vegetación aprovechable.
3. Forestal. Se define por las condiciones de la vegetación forestal y la aptitud para la extracción de los recursos forestales.

Con base en estos tres usos se establecieron distintas clases de aptitud, cuatro para el uso potencial agrícola, cuatro para el uso potencial pecuario y tres para el uso potencial forestal, en función del tipo de procedimiento que puede ser utilizado para llevar a cabo la labranza del suelo, las posibilidades que ofrecen los terrenos para llevar a cabo diferentes tipos de pastoreo, en función de las condiciones topográficas del suelo y de la vegetación natural dominante, todo esto tomando en cuenta los factores limitantes que determinan las condiciones del terreno (Cuadro 7).

Cuadro 7. Clases de aptitud según el uso potencial del suelo.

	Clase	Descripción
Agrícola	A1	Representa los terrenos más valiosos para la agricultura, ya sea mecanizada, de tracción animal o manual, en forma continua.
	A2	Terrenos que son aptos para la agricultura, pero que por sus condiciones ambientales, presentan algunas limitaciones.
	A3	Son terrenos en los que únicamente es posible llevar a cabo agricultura de carácter manual. Este tipo de terrenos puede ser empleado para agricultura pero representa limitaciones graves.
	A4	No aptos para uso agrícola
Pecuario	P1	Áreas en donde es posible desarrollar praderas cultivadas.
	P2	Terrenos sin posibilidades de desarrollar praderas cultivadas, pero que permiten el aprovechamiento de la vegetación natural, pastos u otro tipo de agostaderos.
	P3	Terrenos sin posibilidades de desarrollar praderas cultivadas y que sólo son útiles para pastoreo de ganado caprino.
	P4	No aptos para actividades pecuarias
Forestal	F1	Terrenos que permiten una explotación forestal con propósitos industriales, comerciales o para uso doméstico.
	F2	Terrenos que permiten una explotación forestal, pero que representa algunas limitaciones.
	F3	Terrenos no aptos para uso forestal

Factores limitantes y construcción de la base de datos. El uso potencial del suelo se definió con base en ocho factores limitantes, que representan característica del terreno: topografía, profundidad efectiva del suelo, obstrucciones tanto internas como externas, inundación, salinidad, sodicidad y tipo de vegetación.

Pendiente. Se refiere a la inclinación del terreno medida en porcentaje. Los datos de pendiente fueron creados a partir del modelo digital de elevaciones del estado de Michoacán del INEGI, con una resolución de 15 m.

Obstrucción interna. En este factor limitante se tomó en cuenta la fase física del suelo, la cual señala la presencia de fragmentos de roca y materiales cementados, que impiden o limitan el uso agrícola del suelo y el empleo de maquinaria agrícola entre otros aspectos (INEGI, 2004). Se obtuvo a partir de las cartas edafológicas de Pátzcuaro (DETENAL, 1979b), Morelia (DETENAL, 1979a), Villa Escalante (DETENAL, 1979c) y Villa Madero (DGG, 1982).

A la fase física presente en el área de estudio se le dio un porcentaje (Cuadro 8). La fase pedregosa y gravosa representa la presencia de piedras o gravas dentro de los primeros 30 cm de profundidad en una abundancia media; a la fase lítica que representa una capa de roca dura y continua o un conjunto de trozos de roca muy abundantes que impiden la penetración de las raíces se le dio un porcentaje mayor, esta fase puede dividirse en superficial, si se encuentra a menos de 50 cm y en profunda, si se localiza entre los 50 y 100 cm, dando un porcentaje menor a la profunda por ser también menor la obstrucción; la fase dúrica representa una capa cementada y endurecida con sílice, a esta capa se le conoce comúnmente como tepetate y no se rompe con facilidad, pero al ser profunda, la obstrucción también disminuye (INEGI, 2004).

Cuadro 8. Porcentaje de obstrucción que representa cada fase física del suelo.

Fase física	Obstrucción
	%
Pedregosa	20
Gravosa	20
Lítica	50
Lítica profunda	30
Lítica y pedregosa	70
Dúrica profunda	30

Tipo de vegetación. Se consideró el tipo de cubierta vegetal y el aprovechamiento que se le puede dar a la misma. Se obtuvo de las imágenes digitales utilizadas para el análisis de uso de suelo y cobertura vegetal. Este factor se usó de manera exclusiva para determinar el uso potencial forestal, tomando en cuenta la presencia de recursos forestales y la abundancia en la que se presentan estos.

Los cinco factores restantes (profundidad del suelo, obstrucciones externas, salinidad, sodicidad e inundación) se obtuvieron mediante la recopilación de información edafológica de distintas fuentes. Se utilizó información sobre el medio físico y, propiedades físicas y químicas del suelo; se tomaron en cuenta los datos de 125 perfiles de suelo distribuidos en la subcuenca (Figura 12), de los cuales, 29 de ellos se obtuvieron de la carta edafológica E14A22 de Pátzcuaro (DETENAL, 1979b), 25 de la carta E14A23 de Morelia (DETENAL, 1979a), 13 de la carta E14A32 de Villa Escalante (DETENAL, 1979c) y siete de la carta E14A33 de Villa Madero (DGG, 1982), 25 perfiles se obtuvieron de la base de datos correspondiente al equipo de trabajo del proyecto DESIRE en México (Prat *et al.*, 2009) y los últimos 26 perfiles de suelo, se obtuvieron de distintos estudios que presentan datos edafológicos en el área de estudio (Ramos, 2012), (Maldonado, 2013) y (Cortés, 2010).

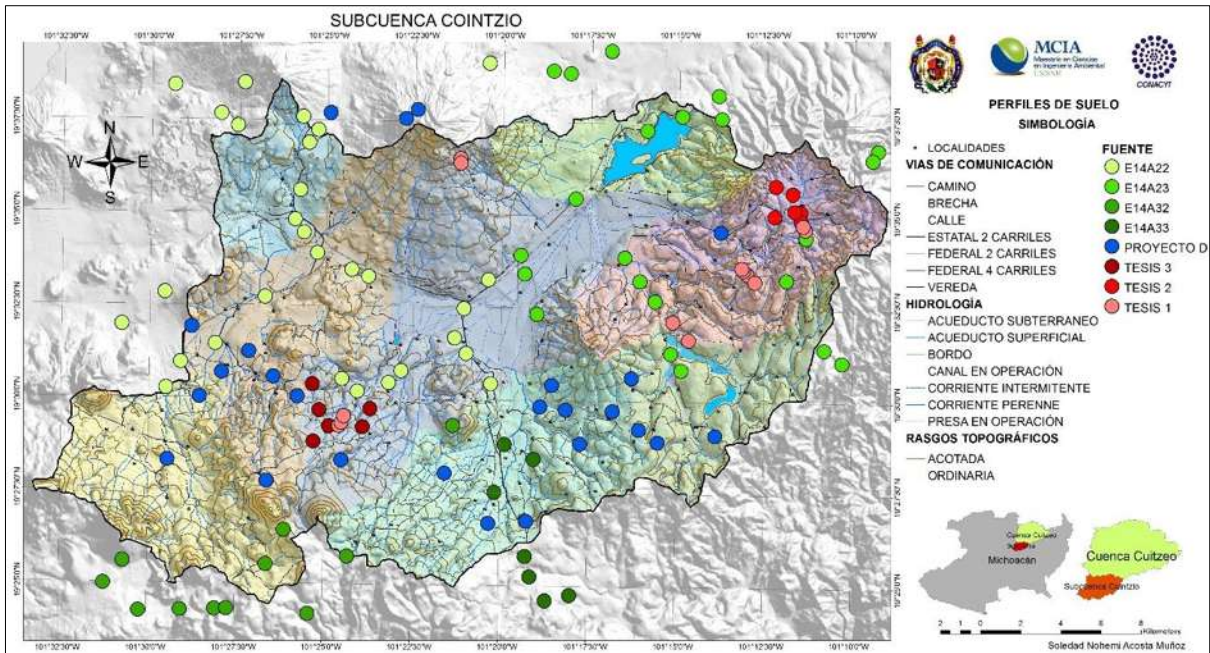


Figura 12. Perfiles del suelo recopilados de distintas fuentes.

Profundidad efectiva del suelo. Se consideró la distancia que existe desde su superficie, hasta el sitio en donde aparece un estrato rocoso que limita el crecimiento de las raíces y la penetración de las herramientas agrícolas.

Obstrucciones externas. Obstáculos físicos en la superficie del suelo como pedregosidad y afloramientos rocosos, principalmente.

Inundación. Se consideraron los puntos específicos que pueden tener problemas de inundación, tomando en cuenta el drenaje interno del suelo, el tipo o unidad edafológica y la pendiente.

Salinidad y sodicidad. Se revisaron las concentraciones de sales y/o de sodio en el suelo que pueden afectar, e incluso impedir, el desarrollo de los cultivos. La salinidad se midió tomando como referencia la conductividad eléctrica en mmhos cm^{-1} y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (INEGI, 2006).

Para calcular el PSI se tomaron los datos de sodio intercambiable en $\text{meq } 100 \text{ g}^{-1}$ de suelo, la capacidad de intercambio catiónico del suelo y se aplicó la Ecuación 1 (Cabrera *et al.*, 1997):

Ecuación 1. Porcentaje de sodio intercambiable.

$$PSI = \frac{\text{Sodio intercambiable (meq } 100\text{g}^{-1})}{\text{C. I. C. (meq } 100\text{g}^{-1})} \cdot 100$$

Donde:

PSI = porcentaje de sodio intercambiable (meq 100g⁻¹ de suelo)

C.I.C.= capacidad de intercambio catiónico (meq 100g⁻¹ de suelo)

Digitalización y espacialización de los factores limitantes. Los factores limitantes de la pendiente, las obstrucciones internas y la vegetación, ya se tenían espacializadas, solo se ajustaron al área de estudio y en el caso de las obstrucciones internas y la vegetación, se rasterizaron con apoyo del SIG.

Para los demás factores sólo se tenían los datos puntuales de cada uno de los perfiles de suelo y en el caso de la profundidad efectiva del suelo y las obstrucciones internas, para su espacialización se utilizaron correlaciones, con factores que ya estaban espacializados.

Profundidad del suelo. En este caso se partió del supuesto de que áreas en donde las pendientes son mayores e incrementan las obstrucciones internas, la profundidad del suelo es menor, por lo tanto, se realizó un análisis de correlación múltiple en el programa STATISTICA 7 y con un $\alpha = 0.05$ se obtuvo un coeficiente de correlación múltiple de 0.72 y un valor de F de 50.93 mayor al valor de F de tablas, y se calculó la profundidad del suelo mediante la Ecuación 2.

Ecuación 2. Profundidad efectiva del suelo.

$$P_s = 95.18 - (1.00 \cdot O_i) - (0.017 \cdot P_t)$$

Donde:

P_s = profundidad del suelo (cm)

O_i = obstrucciones internas del suelo en porcentaje

P_t = pendiente en grados

Obstrucciones externas. Se obtuvieron mediante un análisis de correlación múltiple con las obstrucciones internas y la profundidad del suelo, bajo el supuesto de que suelos menos profundos y con mayores obstrucciones internas, presentan más obstrucción externa. En el programa STATISTICA 7 con un $\alpha = 0.05$ se obtuvo un coeficiente de correlación múltiple de 0.71 y un valor de F de 48.80 mayor al valor de F de tablas, y se calculó la obstrucción externa mediante la ecuación 3.

Ecuación 3. Porcentaje de obstrucción externa del suelo.

$$O_E = 24.48 - (0.2086 \cdot P_s) - (0.225 \cdot O_i)$$

Donde:

O_E = obstrucción externa del suelo

P_s = profundidad del suelo

O_i = obstrucción internas del suelo

Los factores limitantes de salinidad, sodicidad e inundación, no fue necesario espacializarlos, ya que a partir del análisis de los datos puntuales de los perfiles de suelo no se presentaron áreas con problemas respecto a estos factores. A lo largo de la distribución de la cuenca en cada perfil de suelo, la salinidad fue menor de los 2 mmhos cm^{-1} y el PSI menor de 10.

Debido a lo anterior, se consideró que estos tres factores no eran representativos para la determinación del uso potencial del suelo, por lo que en los análisis posteriores no se incluyeron. Los mapas de cada uno de los factores limitantes y su comportamiento espacial, pueden consultarse en el Anexo 1.

Evaluación multicriterio. La conjunción de los factores limitantes para obtener los mapas de uso potencial del suelo se realizó con el SIG, mediante una evaluación multicriterio.

Estandarización de los factores limitantes. Para realizar la evaluación multicriterio se estandarizaron los factores limitantes con apoyo del módulo FUZZY, este módulo convierte cada factor de sus respectivas unidades a una escala común, que en este caso fue la escala *byte*, que comprende un intervalo de valores que va de 0 a 255, con base en reglas de decisión establecidas para cada factor.

Para aplicar las reglas de decisión, se tomaron en cuenta los sistemas de clasificación de la capacidad agrológica de la tierra del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2006) y el índice de STORIE (Cabrera *et al.*, 1997).

En el caso de la pendiente, la profundidad y las obstrucciones tanto internas como externas, los valores de aptitud se muestran en el Cuadro 9. En cuanto a la vegetación o uso de suelo, para el uso pecuario y agrícola se consideraron como restricción, las áreas urbanas y los cuerpos de agua; para el uso forestal, además de las restricciones mencionadas, se tomó como máxima aptitud las áreas con vegetación forestal y con mediana aptitud, las zonas con vegetación secundaria forestal.

Cuadro 9. Intervalos de aptitud para pendiente, profundidad y obstrucciones.

Aptitud	Pendiente			Profundidad			Obstrucciones		
	A	P	F	A	P	F	A	P	F
	%	%	%	cm	cm	cm	%	%	%
Alta	0-5	0-30	0-70	0-90	0-30	...	0-5	0-35	0-70
Media	6-15	31-40	71-80	89-60	29-15	...	6-10	36-50	71-80
Baja	16-30	41-70	>80	59-30	14-8	...	11-50	51-70	>80
Nula	>30	>70		<30	<8	...	>50	>70	

A= agrícola, P= pecuario, F=forestal

A partir de estos rangos, se aplicaron las reglas de decisión para cada uso de suelo y para cada variable. En el caso de la profundidad del suelo se usó la función Sigmoidal creciente y para los factores restantes, se utilizó la misma función, pero decreciente. En la Figura 13 se muestran las reglas de decisión para el uso potencial agrícola, en la Figura 14 se observan las reglas de decisión empleadas para el uso potencial pecuario y en la Figura 15, se presentan las reglas de decisión para el uso forestal.

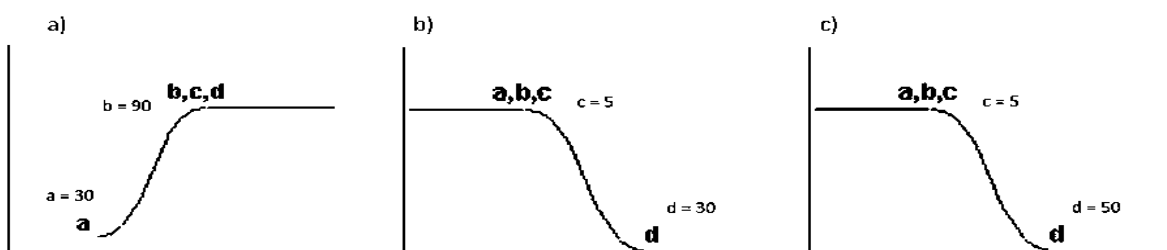


Figura 13. Reglas de decisión para el uso potencial agrícola: a) profundidad efectiva del suelo (cm), b) pendiente (%), c) obstrucciones internas y externas (%).

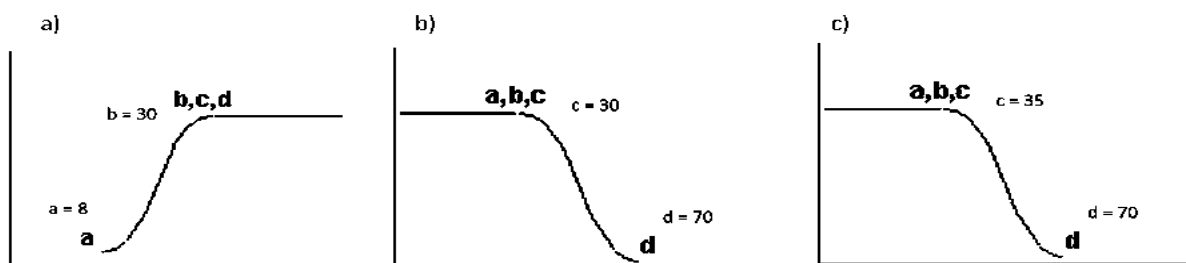


Figura 14. Reglas de decisión para el uso potencial pecuario: a) profundidad efectiva del suelo (cm), b) pendiente (%), c) obstrucciones internas y externas (%).

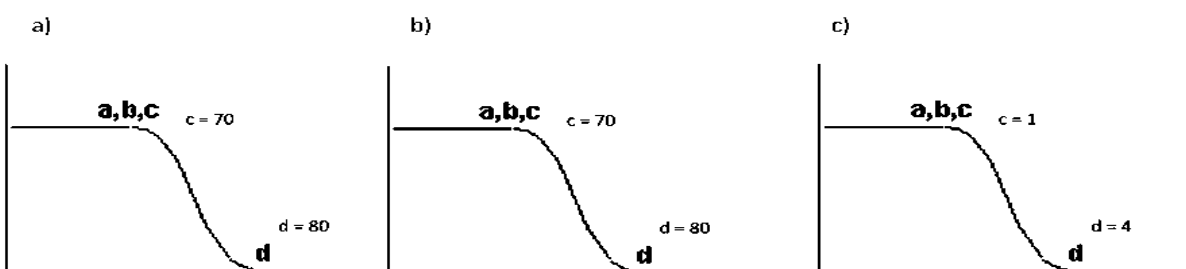


Figura 15. Reglas de decisión para el uso potencial forestal: a) pendiente (%), b) obstrucciones internas y externas (%), c) vegetación, en donde el valor 1 corresponde a la vegetación forestal, 2 a vegetación secundaria forestal, 3 a matorrales y 4 a otros usos de suelo o cubierta vegetal.

Pesos de los factores limitantes. La asignación de los pesos a cada uno de los factores, se llevó a cabo mediante el Proceso Analítico Jerárquico o AHP por sus siglas en inglés (Analytical Hierarchical Process). Se crearon cuatro matrices de comparación pareada para cada uso potencial, en donde se incluyó la opinión de cuatro expertos: el D. C. Juan Manuel Ortega Rodríguez, la D. C. María Alcalá de Jesús, el M.C. Juan Carlos González Cortés y la M.C. Tohtli Zubieta Rojas; dichas matrices fueron llenadas utilizando la escala de posición continua de Saaty (Figura 16), a través de la comparación por pares y la importancia relativa de los factores para cada uso potencial evaluado.

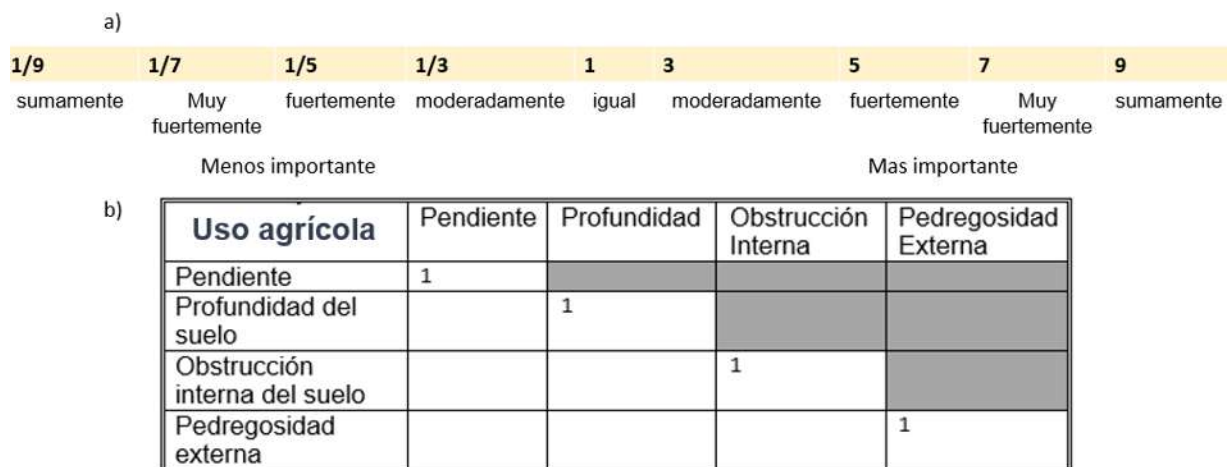


Figura 16. Herramientas para el proceso analítico jerárquico: a) Escala de posición continua de Saaty y b) Ejemplo de matriz pareada.

Una vez recopilada la opinión de expertos en las matrices, se calcularon los pesos utilizando el módulo WEIGHT. Por experto consultado, se obtuvo un peso diferente para cada factor en cada uso potencial de suelo y el peso final correspondió al promedio de los valores obtenidos por todos los expertos (Cuadro 10).

Cuadro 10. Peso de los factores limitantes obtenidos del proceso analítico jerárquico.

Factor limitante	Uso de suelo		
	agrícola	pecuario	forestal
Pendiente	0.24	0.30	0.15
Profundidad	0.40	0.31	0.55
Obstrucciones internas	0.15	0.14	0.13
Obstrucciones externas	0.20	0.26	0.17
Suma	1.00	1.00	1.00

Una vez obtenidos los factores estandarizados y los pesos de cada uno de ellos, se realizó la evaluación multicriterio, mediante el método de combinación lineal ponderada WLC, este método toma en cuenta los pesos asignados a cada factor de modo que mientras mayor sea el peso, mayor será la influencia del factor en el mapa final de uso potencial, además contempla las restricciones añadidas, en este caso se agregaron como restricciones los cuerpos de agua y los asentamientos humanos.

Esta metodología se aplicó para obtener los mapas de uso potencial de cada año, la mayoría de los factores limitantes permaneció constante a excepción de la vegetación, ya que ésta presenta cambios de 1999 a 2009 y a 2014, de igual manera las restricciones como las áreas urbanas presentan cambios, por lo que se contemplan las áreas ocupadas exclusivamente de cada año.

Finalmente, los mapas de uso potencial obtenidos en una escala byte, fueron reclasificados para obtener las cuatro clases de uso pecuario y agrícola, y las tres clases de uso forestal inicialmente definidas; los rangos para su clasificación se obtuvieron con el método de rompimientos naturales en el programa ArcMap 10.3.

Análisis multiobjetivo de asignación de terreno (MOLA). Una vez obtenidos los mapas de uso potencial agrícola, pecuario y forestal por separado, se conjuntaron en un solo mapa de uso potencial de suelo, a través de un análisis multiobjetivo de asignación de terrenos MOLA que también se realizó mediante el SIG. El módulo MOLA busca la solución a problemas de asignación de tierras para los casos con objetivos en conflicto.

Con base en la información de los mapas de aptitud, los pesos relativos para asignar a cada uso potencial, y la cantidad de área que se asignará a cada uno, MOLA determina una solución de compromiso que intenta maximizar la adecuación de tierras para cada objetivo, dado los pesos asignados.

El primer paso para este análisis fue estandarizar los mapas de aptitud agrícola, pecuaria y forestal, para lo cual, se tomaron los mapas que estaban en la escala byte y se adecuaron para su uso en MOLA con ayuda del módulo RANK.

Posteriormente, se calcularon los requerimientos de área para cada uso potencial del suelo en cada año, tomando el área en celdas que ocupa la primera clase en los mapas clasificados de uso potencial agrícola y pecuario así como la suma de la primera y la segunda clase para el uso potencial forestal, como los requerimientos de área necesarios (Cuadro 11).

Cuadro 11. Áreas utilizadas en el análisis MOLA.

Año	Uso potencial		
	Agrícola	Pecuario	Forestal
	*celdas	celdas	celdas
1999	1 314 662	1 319 263	2 153 695
2009	1 312 890	1 293 862	2 151 242
2014	1 311 173	1 283 687	2 148 866

* cada celda equivale a 0.0225 ha

Se realizó el análisis multiobjetivo para cada año, con sus respectivos mapas de aptitud estandarizados y sus requerimientos de áreas, dando un peso de 20 al uso potencial forestal, un peso de 10 al uso potencial agrícola y un peso de 5 al uso potencial pecuario, en estos pesos establecidos no importa el valor asignado sino el significado relativo con respecto a los demás usos, es decir el hecho de que se hayan asignado estos valores, significa que se da el doble de peso al uso forestal que al agrícola y a la vez el doble de peso a éste último que al uso pecuario; por lo que de esta manera se obtuvo un solo mapa de uso potencial de suelo para cada año analizado.

Finalmente, se realizó una rectificación en 16 sitios de la subcuenca, revisando aspectos que pueden ser observados en el campo como la vegetación, la pendiente del terreno, obstrucciones externas y pedregosidad del suelo, para determinar por medio de una matriz de confusión, la confiabilidad y validez de la asignación de uso potencial de suelo.

2.3.3 Datos de población de la subcuenca

Otro aspecto importante para el cálculo de la capacidad ecológica son los datos de población, conocer cuántas personas habitan la subcuenca, cómo se distribuyen en las nueve microcuencas y en cada localidad, es de suma importancia para los cálculos de capacidad ecológica.

Los datos poblacionales de las 148 localidades dentro del área de estudio, se obtuvieron de la base de datos del INEGI; para el año 1999 se tomó en cuenta la población registrada en el XII Censo General de Población y Vivienda (INEGI, 2000), para el año 2009 se contempló la población registrada en el Censo de Población y Vivienda del año 2010 (INEGI, 2010b).

En el caso del año 2014 se realizó una proyección tomando en cuenta la tasa de crecimiento, que mostró la población del año 2000 al 2010 y con apoyo de las fórmulas de proyección de la Comisión Nacional del Agua (Ecuaciones 4 y 5) (CONAGUA, 2001).

Ecuación 4. Tasa de crecimiento poblacional.

$$T_c = \left[(P_2/P_1)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \cdot 100$$

Ecuación 5. Proyección de la población al año 2014.

$$P_3 = P_2 (1 + T_c)^n$$

Donde

T_c = tasa de crecimiento

P_1 = población en el año 2000

P_2 = población en el año 2010

P_3 = población en el año 2014

n = periodo transcurrido en años

Estas ecuaciones se aplicaron a cada localidad para obtener la población proyectada para el 2014. Para obtener la población por microcuenca se sumó la población de las localidades y para la población total, se sumaron las poblaciones de las nueve microcuencas.

2.3.4 Capacidad ecológica de la subcuenca

El cálculo de la capacidad ecológica total de la subcuenca se muestra de manera resumida en la Figura 17.

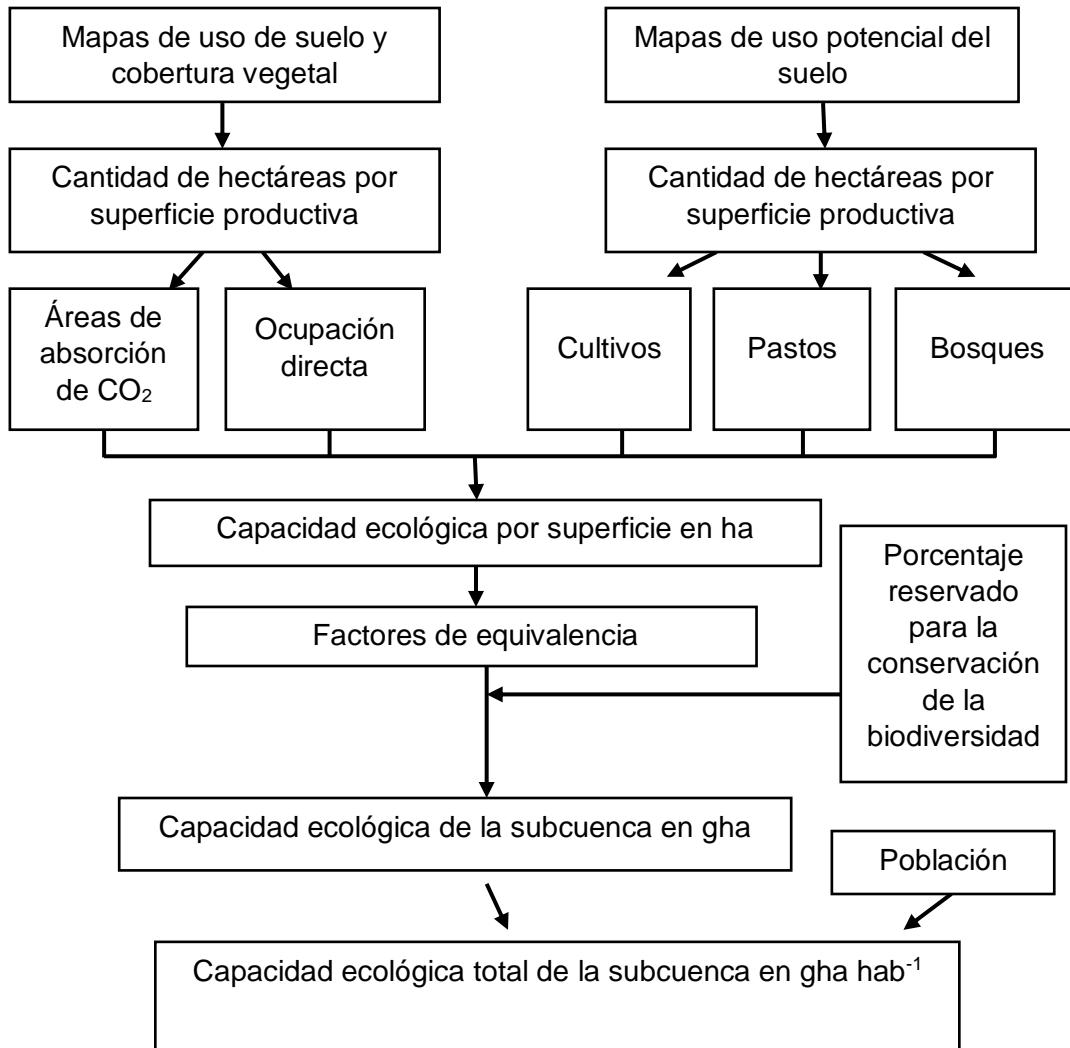


Figura 17. Diagrama metodológico para la capacidad ecológica de la subcuenca.

A partir de los mapas de uso de suelo y de vegetación, se contabilizaron las hectáreas de superficies de ocupación directa, en donde se registraron las hectáreas de asentamientos humanos ocupadas en cada año y las áreas de absorción de CO₂, en donde se contaron las áreas boscosas, específicamente. A partir de los mapas de uso potencial de suelo se calcularon las hectáreas de cultivos, pastos y bosques, obteniendo de esta manera la capacidad ecológica por superficie productiva en la subcuenca.

Una vez obtenida la cantidad de hectáreas de cada superficie, se multiplicaron por los factores de equivalencia desarrollados por la organización global de la huella ecológica (Cuadro 12) (Global Footprint Network, 2008) para obtener las hectáreas globales de cada superficie, posteriormente éstas se sumaron y al resultado final se le restó un 12%, este porcentaje debe ser destinado para la conservación de la biodiversidad, resultando finalmente la capacidad ecológica total de la subcuenca (Martínez, 2009).

Cuadro 12. Factores de equivalencia.

Categoría de terreno productivo	Factor de Equivalencia
Cultivos	2.18
Pastos	0.49
Bosques	1.37
Superficie artificializada	2.18
Área de absorción de CO ₂	0.36

Para tener los resultados por habitante, la capacidad ecológica se dividió entre el número total de habitantes como se observa en la Ecuación 6.

Ecuación 6. Capacidad ecológica por habitante.

$$CE_T = \frac{[\sum(CE_s \cdot w)] - [\sum(CE_s \cdot w) \cdot 0.12]}{N}$$

Donde:

CE_T = capacidad ecológica de la subcuenca (gha hab⁻¹)

CE_s = capacidad ecológica por superficie productiva (ha)

N = número total de habitantes de la subcuenca

w = factor de equivalencia

2.3.5 Capacidad ecológica por microcuencas y localidades.

La capacidad ecológica para las microcuencas, se obtuvo contabilizando las hectáreas de cada superficie productiva, pero en este caso, para las áreas que se encontraban dentro de cada microcuenca por separado; mediante la misma metodología que para el cálculo de la capacidad ecológica total (Ecuación 7).

Ecuación 7. Capacidad ecológica por microcuenca.

$$CE_m = \frac{[\sum(CE_{sm} \cdot w)] - [\sum(CE_{sm} \cdot w) \cdot 0.12]}{N_m}$$

Donde:

CE_m = capacidad ecológica de las microcuencas (gha hab⁻¹)

CE_{sm} = capacidad ecológica por superficie en cada microcuenca (ha)

N_m = número total de habitantes de la microcuenca

w = factor de equivalencia

Una vez obtenida la capacidad ecológica de las microcuencas, para obtener la capacidad ecológica de cada localidad, se multiplicó este resultado por el número de habitantes en cada localidad (Ecuación 8).

Ecuación 8. Capacidad ecológica por localidades.

$$CE_l = CE_m \cdot n$$

Donde:

CE_l = capacidad ecológica por localidades (gha)

CE_m = capacidad ecológica de las microcuencas (gha hab⁻¹)

n = habitantes por localidad

Los cálculos para los resultados finales, se realizaron con apoyo del programa Excel 2013 y, la composición cartográfica de cada uno de los mapas resultantes, se llevó a cabo con el programa de ArcMap 10.3.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La capacidad ecológica obtenida para la cuenca, así como para las microcuencas y las localidades, depende directamente de los resultados obtenidos en los análisis de cobertura y uso de suelo, uso potencial del suelo y tendencias poblacionales para cada año considerado.

2.4.1 Uso de suelo y cobertura vegetal

La subcuenca Cointzio tiene una extensión territorial de 66 215 ha aproximadamente. El uso agrícola es el de mayor extensión territorial, seguido de las áreas forestales y en menor medida áreas de pastizal, matorral, asentamientos humanos, cuerpos de agua, vegetación acuática y algunos bancos de materiales (Cuadro 13 y Figura 18). Se obtuvieron mapas de uso de suelo y cobertura vegetal para los años 1999, 2009 y 2014, los cuales se muestran en el Anexo 2

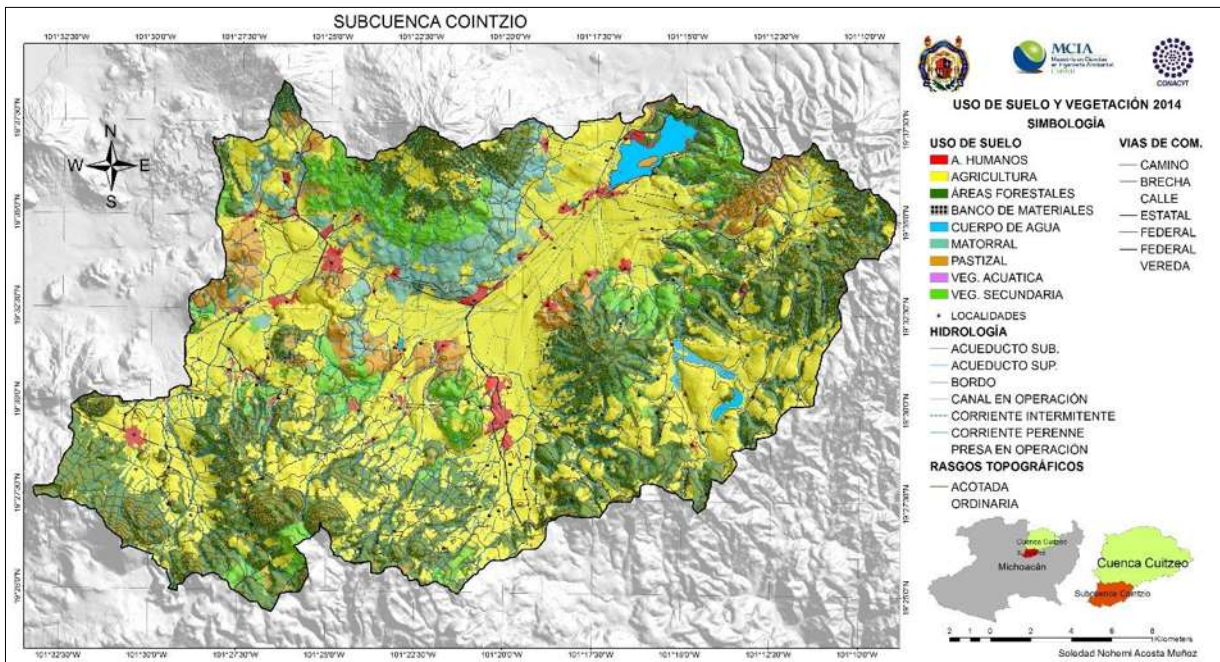


Figura 18. Uso de suelo y cobertura vegetal 2014.

Cuadro 13. Coberturas y usos de suelo.

	Años		
	1999	2009	2014
	ha	ha	ha
Agricultura	29 438	29 943	30 092
Forestal	22 468	21 191	21 041
Vegetación secundaria forestal	5747	6483	6413
Matorral	3325	3347	3325
Pastizal	3205	3208	3142
Asentamientos Humanos	1218	1300	1372
Cuerpo de agua	766	614	775
Banco de materiales	43	48	50
Vegetación Acuática	5	81	5

El uso de suelo y la cobertura vegetal, han sido dinámicos, desde 1999 hasta la fecha, con base en el análisis realizado, se pudo observar una tendencia creciente de los asentamientos humanos y como consecuencia, el incremento en la superficie para el desarrollo de actividades agropecuarias y la disminución de las áreas forestales en los últimos 15 años.

Los asentamientos humanos aumentaron 82 ha de 1999 al 2009 y 72 ha de 2009 a 2014, dando un aumento total de 154 ha, el cual se relaciona con el incremento de la población dentro de la cuenca. En cuanto a la agricultura de 1999 a 2009 aumentó 505 ha, y de éste último año a 2014 aumentó 149 ha, lo que indica un aumento de 654 ha desde 1999 hasta 2014. En comparación con las zonas agrícolas, las áreas forestales disminuyen en los primeros años en 1277 ha y con el año más reciente, en 150 ha, disminuyendo en total 1427 ha en el periodo analizado (Figura 19).

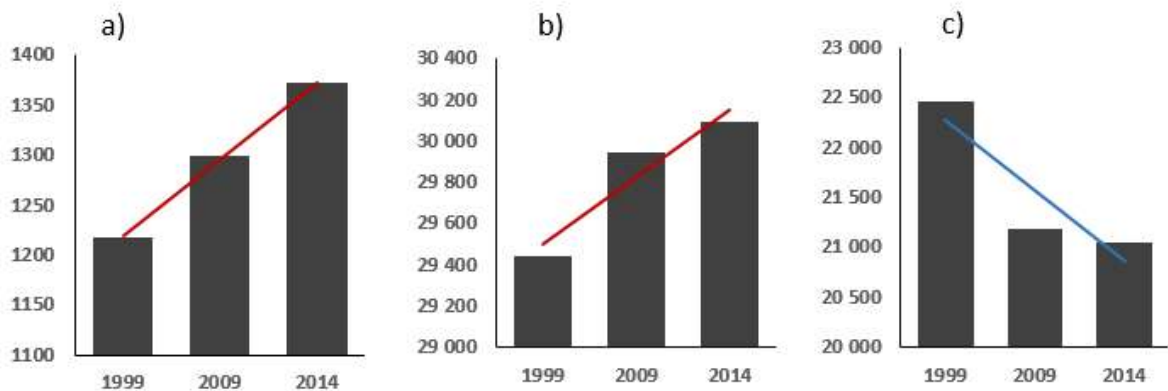


Figura 19. Tendencias en usos de suelo y vegetación: a) Tendencia creciente en las áreas ocupadas por asentamientos humanos, b) Tendencia de las áreas agrícolas en la subcuenca y c) disminución de las áreas forestales en la subcuenca.

Los cambios de las tres categorías de uso de suelo y cobertura vegetal antes mencionados, son determinantes para el análisis de la tendencia de la capacidad ecológica. Las áreas de asentamientos humanos que crecen, en general ocupan áreas aptas para uso agrícola, por lo tanto, el área disponible para los cultivos es menor; sin embargo, debido a que la población aumenta, se requieren más áreas agrícolas para el abastecimiento de alimentos, razón por la cual las áreas agrícolas invaden áreas forestales, lo que provoca disminución en la capacidad ecológica de los bosques y de las áreas de absorción de CO₂.

En cuanto a la rectificación de campo, de los 18 sitios analizados, 17 de ellos fueron clasificados correctamente. En el Anexo 3 presentan fotografías de los sitios visitados. El análisis del estadístico ROC mostró 97% de confiabilidad (Figura 20) y la matriz de confusión 94.4 % (Figura 21), por lo que la clasificación realizada es aceptable en ambos casos.

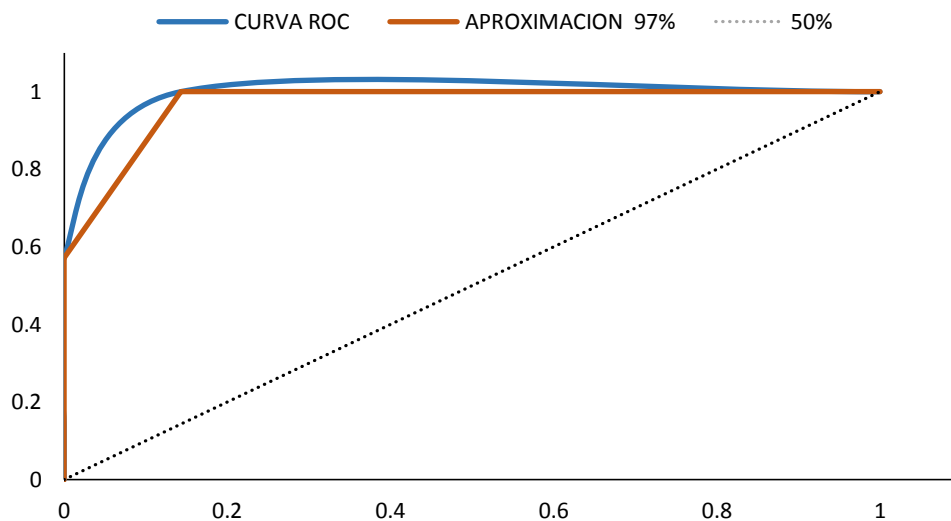


Figura 20. Curva ROC para uso y cobertura del suelo.

Asignados \ Campo	Agricultura	Pastizal	Asentamientos Humanos	Bosques	Vegetación Secundaria forestal	Matorral	Banco de material	Total	Exactitud	Error de omisión
Agricultura	8							8	100	0
Pastizal	1	2						3	66.7	33.3
A. humanos			1					1	100	0
Bosques				2				2	100	0
Vegetación secundaria forestal					1			1	100	0
Matorral						2		2	100	0
Banco de materiales							1	1	100	0
Total	9	2	1	2	1	2	1	18		
Exactitud	88.9	100	100	100	100	100	100		%	
Error de comisión	11.1	0	0	0	0	0	0		general	94.44444

Figura 21. Matriz de confusión para uso y cobertura del suelo.

2.4.2 Uso potencial del suelo

El uso potencial del suelo ha presentado cambios en el periodo estudiado. La degradación de los recursos naturales y el aumento de los asentamientos humanos, han provocado que las áreas disminuyan su aptitud para actividades agropecuarias y forestales (Cuadro 14).

Cuadro 14. Áreas de aptitud de los suelos.

Uso	Clase	Años		
		1999	2009	2014
		ha	ha	Ha
Agrícola	A1	28 483	28 068	28 031
	A2	17 917	18 203	18 189
	A3	11 090	11 143	11 121
	A4	8724	8801	8873
Pecuario	P1	46 043	45 990	45 940
	P2	15 410	15 385	15 365
	P3	1506	1506	1505
	P4	3256	3333	3405
Forestal	F1	22 327	21 052	20 905
	F2	5877	6609	6539
	F3	38 011	38 554	38 771

Aptitud de los suelos: A1= agrícola alta; A2= agrícola media; A3= agrícola baja; A4= agrícola nula; P1= pecuaria alta; P2= pecuaria media; P3= pecuaria baja; A4= pecuaria nula; F1= forestal alta; F2= forestal media; F3= forestal nula.

En cuanto al uso potencial agrícola, en promedio de las tres fechas analizadas, 43% del territorio tiene aptitud alta, esto hace valiosos a los terrenos para la agricultura mecánica, de tracción animal o manual, 27% son de aptitud media y 17% de aptitud baja, terrenos en los que sólo es posible la agricultura manual, debido a que presentan limitaciones graves, por ejemplo, pendientes superiores a 30% o pedregosidad superior al 50%, y 13% del territorio no es apto. La distribución de las clases de aptitud agrícola en la subcuenca para el año 2014 se muestra en la Figura 22, y los mapas para los años 1999 y 2009 se pueden consultar en el Anexo 4.

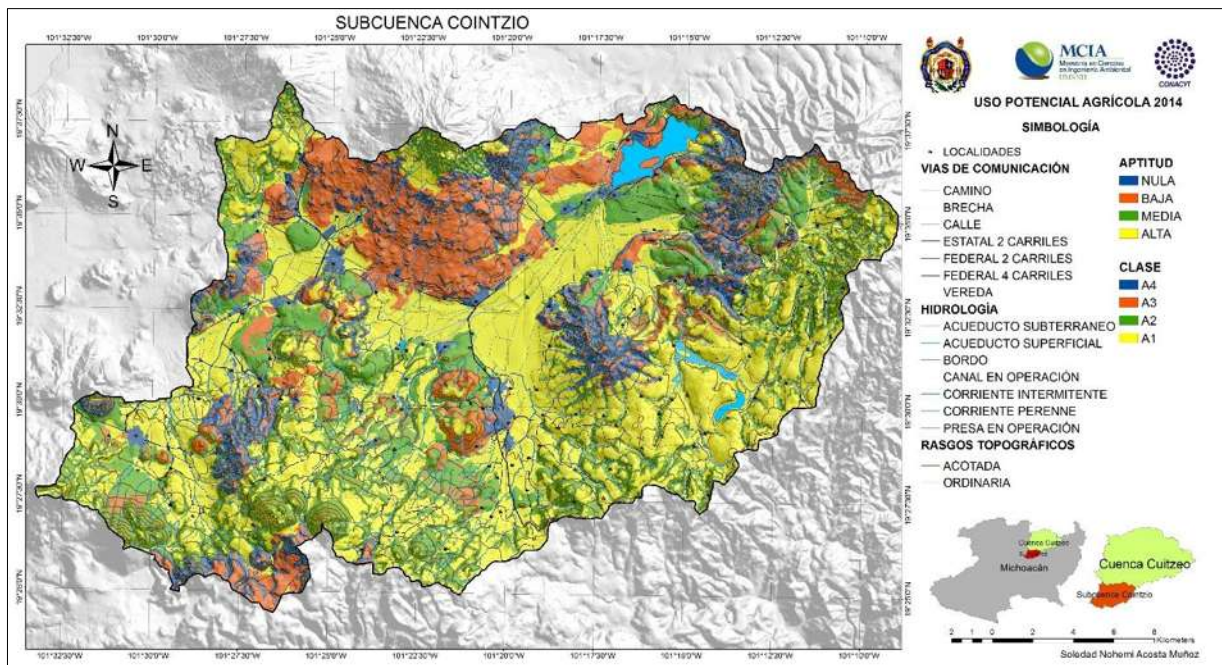


Figura 22. Uso potencial agrícola en 2014.

El uso potencial pecuario es menos exigente en cuanto a sus requerimientos (Figura 23). Del total del territorio de la subcuenca, 69% presenta una aptitud alta, ya que se pueden desarrollar praderas, 23% tiene aptitud media, áreas en donde los terrenos sólo permiten el aprovechamiento de vegetación natural, pastos u otro tipo de agostaderos, 2% de la zona tienen aptitud baja y 5% no es apto para actividades pecuarias (ver Anexo 5).

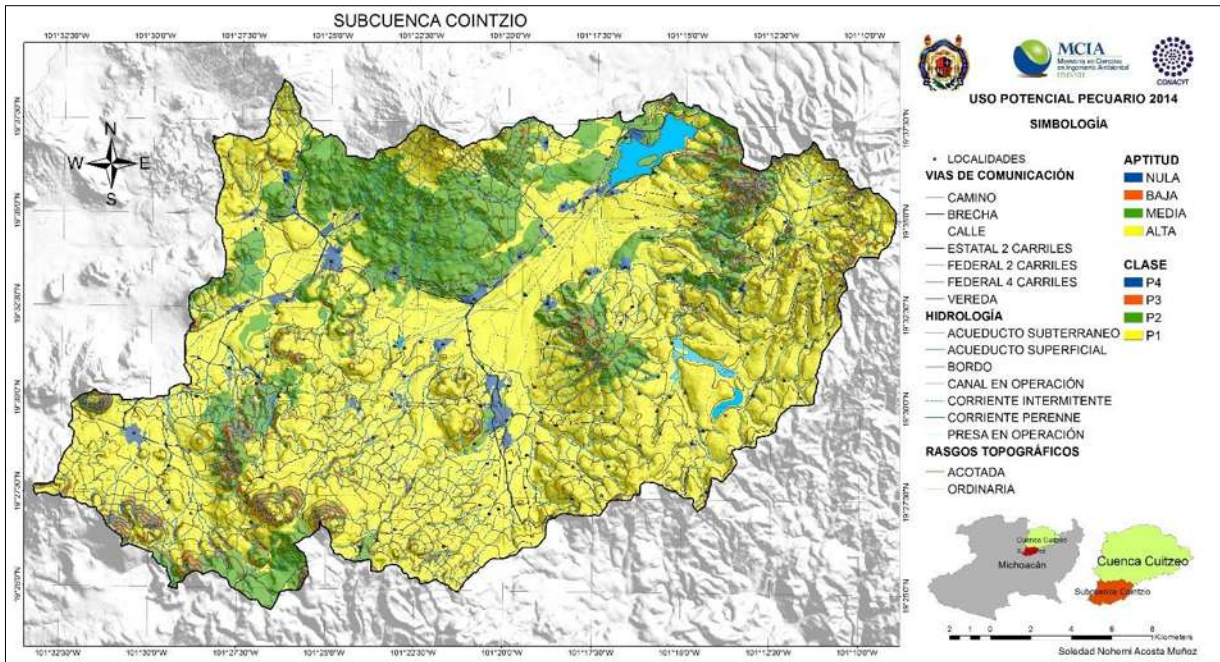


Figura 23. Uso potencial pecuario en 2014.

Por otra parte, el uso potencial forestal que sólo se dividió en tres clases (Figura 24), es menor en hectáreas de aptitud alta (32%) y aptitud media (10%) y 58% del territorio no es apto para el uso forestal (Anexo 6).

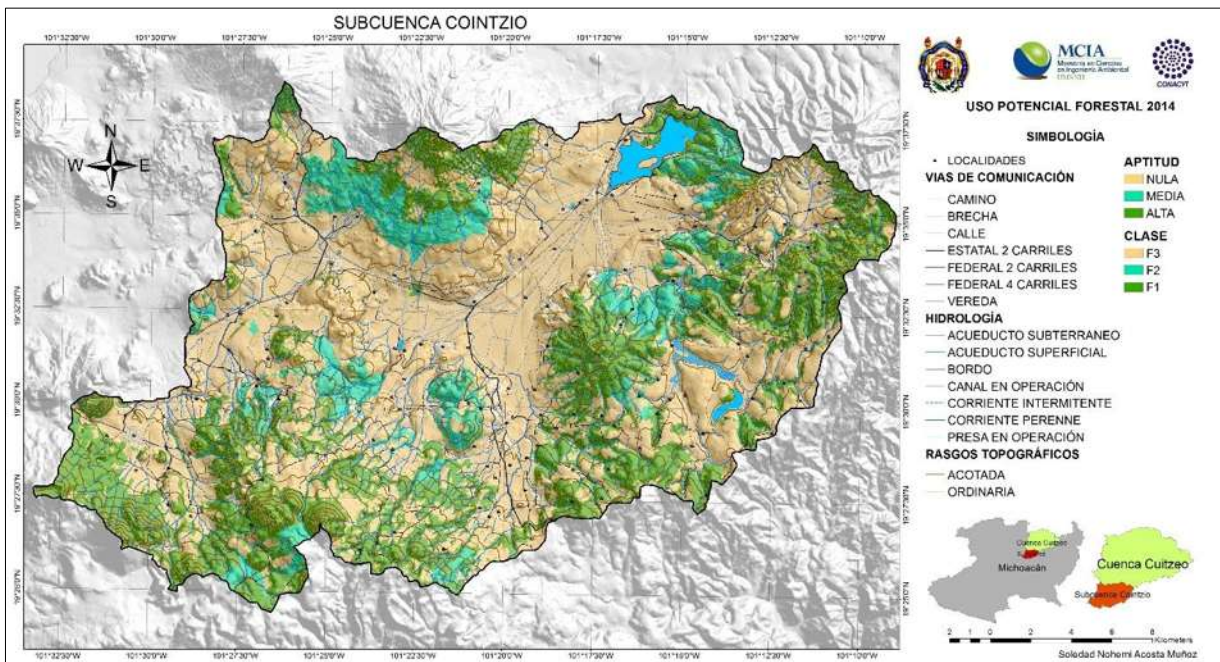


Figura 24. Uso potencial forestal en 2014.

El uso potencial del suelo cambió en cada año estudiado; el uso forestal y agrícola mostraron una tendencia decreciente, en cambio el uso pecuario aumentó. De 1999 a 2009 la aptitud forestal se redujo 545 ha y de 2009 a 2014 la disminución fue de 216 ha. En cuanto a la aptitud agrícola, la disminución fue sólo de 71 ha desde 1999 a 2014, por el contrario la aptitud pecuaria, aumentó 682 ha en el periodo estudiado, lo cual puede ser consecuencia, como antes se mencionó, de la degradación de los recursos naturales y del aumento de los asentamientos humanos en el caso agrícola y forestal, y la tendencia de aumento en el uso pecuario, puede deberse a que los requerimientos para esta actividad no son tan exigentes (Cuadro 15).

Cuadro 15. Áreas por uso potencial del suelo.

Uso Potencial	Años		
	1999	2009	2014
	ha	ha	ha
Forestal	28 204	27 659	27 443
Agrícola	25 690	25 654	25 619
Pecuario	10 319	10 821	11 001

El promedio de los tres años, mostró que 42% del territorio de la subcuenca es apto para el aprovechamiento forestal, 39% tiene aptitud para actividades agrícolas y 16% presenta una aptitud pecuaria.

Las áreas de aptitud forestal y agrícola se encuentran distribuidas en toda la subcuenca; sin embargo, las áreas de aptitud forestal se congregan en general al norte de la subcuenca. En la Figura 25 se observa la distribución de aptitud del suelo general en la subcuenca para el año 2014; los mapas para los años 1999 y 2009 se pueden consultar en el Anexo 7.

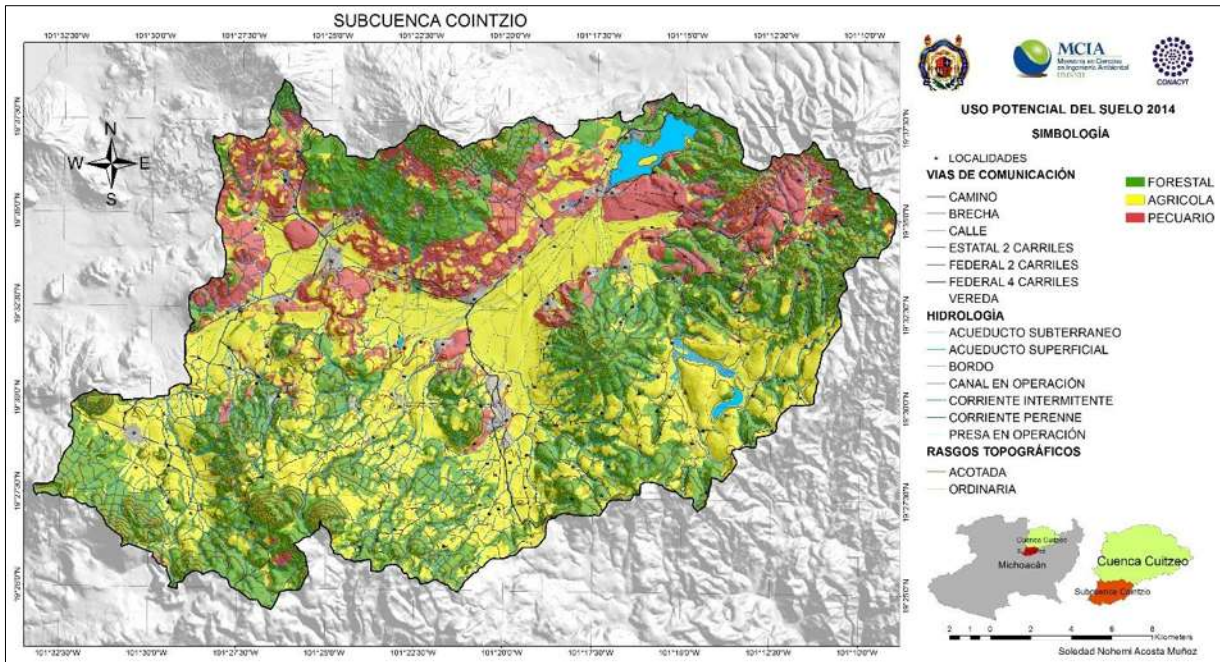


Figura 25. Uso potencial del suelo en 2014.

La matriz de confusión de la rectificación de campo para uso potencial de suelo, mostró una exactitud del 93.8%, por lo que el uso potencial definido es aceptado (Figura 26).

Definido \ Observado en campo	Agrícola	Pecuario	Forestal	Total	Exactitud	Error de omisión
Agrícola	7			7	100	0
Pecuario		4	1	5	80	20
Forestal			4	4	100	0
Total	7	4	5	16		
Exactitud	100	100	80			%
Error de comisión	0	0	20			general 93.8

Figura 26. Matriz de confusión para uso potencial del suelo.

2.4.3 Análisis de población de la subcuenca

El crecimiento poblacional es uno de los aspectos que influyen en la capacidad ecológica de un territorio, al aumentar la población, la capacidad ecológica per cápita es menor. A nivel mundial y nacional el crecimiento poblacional, representa un factor preocupante en el tema, el panorama no cambia mucho para la subcuenca Cointzio, y la tendencia de la población, al igual que a nivel global y nacional es creciente (Figura 27).

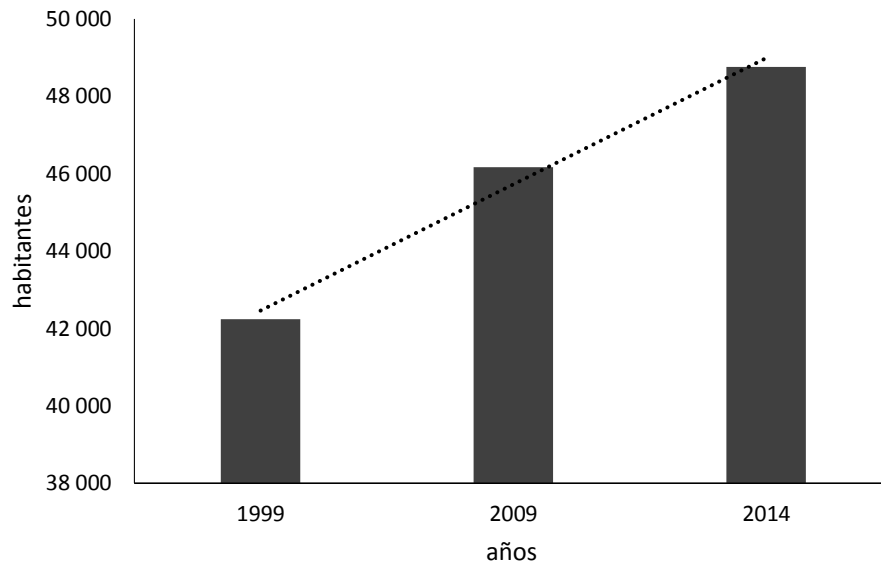


Figura 27. Crecimiento poblacional en la subcuenca.

Con base en los datos del INEGI (2000), en ese año la población total de la subcuenca era de 42 234, para el año 2010 aumentó a 46 170 habitantes y la proyección para el año 2014 indica que este número crecerá a 48 764. Cabe mencionar que la mayoría de las localidades de la subcuenca son rurales y no todas tienen una tasa de crecimiento positiva; de las 148 localidades estudiadas sólo 88 presentan crecimiento poblacional de 2000 al 2014, las restantes 60 tienen una tasa de crecimiento negativa, probablemente a causa de otros factores de la dinámica poblacional, tales como la migración.

El comportamiento por microcuenca es diferente, seis de ellas presentan una tasa de crecimiento poblacional positiva; sin embargo, Atécuaro, Cuanajo y Umécuaro, tienen una tasa negativa (Figura 28).

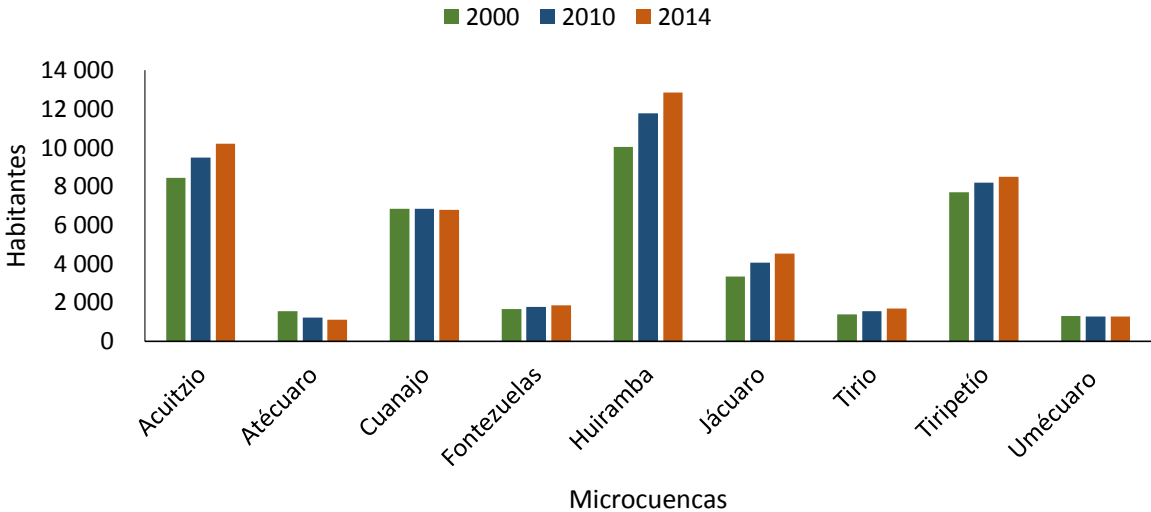


Figura 28. Crecimiento poblacional por microcuenca.

2.4.4 Capacidad ecológica de la subcuenca

La capacidad ecológica de la subcuenca, indica la cantidad de recursos naturales de los que dispone su población, para la obtención de bienes materiales y servicios. En el análisis realizado, se observó que a nivel de subcuenca, la capacidad ecológica ha disminuido desde 1999 hasta la fecha (Figura 29). En el año de 1999 la capacidad ecológica de la subcuenca fue de 111 871 gha, tomando como referencia la población registrada para el año 2000, la capacidad ecológica por habitante fue de 2.6 gha hab⁻¹; para el año 2009 la capacidad ecológica había cambiado a 111 140 gha y con base en esta disminución y el aumento de la población, la capacidad per cápita fue de 2.4 gha hab⁻¹; para el año 2014 la capacidad ecológica fue de 111 000 gha, lo que representa 2.3 gha hab⁻¹.

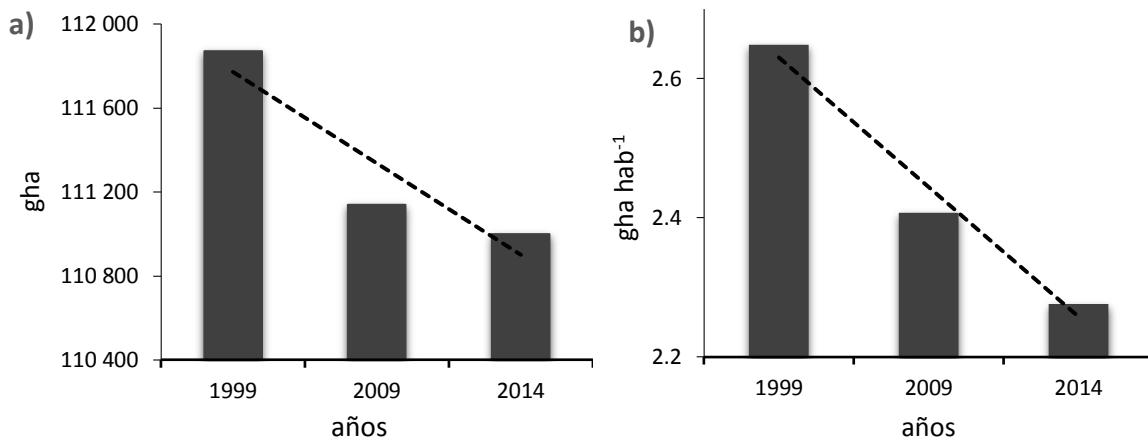


Figura 29. Capacidad ecológica de la subcuenca: a) en gha y b) per cápita en gha hab⁻¹.

Comparando los datos anteriores con los datos registrados en otros estudios, se observa que la capacidad ecológica de la subcuenca está por arriba de los promedios a nivel nacional y global. En el año 2008 se estima que la capacidad ecológica global era de 1.7 gha hab⁻¹, lo que representa 0.7 gha hab⁻¹ menos que en la subcuenca (Martínez, 2008). En el caso de México, también para el año 2008, se reportó una capacidad ecológica de 1.42 gha hab⁻¹, menor que el promedio mundial y que la capacidad de la subcuenca (Global Footprint Network, 2008).

Lo anterior, muestra que la capacidad ecológica no se comporta de manera puntual y homogénea a nivel mundial y en México, sino que varía de acuerdo con la distribución de los recursos dentro de un territorio.

A pesar de la tendencia decreciente de la capacidad ecológica general, no todas las superficies de tierra productiva tienen la misma tendencia, la capacidad ecológica de los pastos y de la superficie ocupada directamente por los humanos, ha aumentado en los 15 años estudiados, esto como ya se mencionó en apartados anteriores, tiene relación con el aumento poblacional y con que los requerimientos para el desarrollo de actividades pecuarias que no son muy exigentes. Por el contrario, la capacidad ecológica de la subcuenca en las restantes superficies productivas disminuye en este periodo (Cuadro 16).

Cuadro 16. Capacidad ecológica por superficie productiva.

Superficie Productiva	Años		
	1999	2009	2014
	ha	ha	ha
Bosques	28 204	27 659	27 443
Cultivos	25 690	25 654	25 619
Pastos	10 319	10 821	11 001
Ocupación directa	1218	1300	1372
Área de absorción de CO ₂	22 468	21 191	21 041

2.4.5 Capacidad ecológica por microcuencas

La capacidad ecológica de las microcuencas varía desde más de 27 000 gha que tiene Tiripetío, hasta alrededor de las 4000 gha en Fontezuelas y varía en cada año analizado (Cuadro 17).

Cuadro 17. Capacidad ecológica por microcuenca.

Microcuenca	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Acuitzio	18 656	18 925	19 038
Atécuaro	5347	5316	5302
Cuanajo	14 841	14 758	14 763
Fontezuelas	4561	4467	4381
Huiramba	16 766	16 544	16 481
Jácuaro	5809	5587	5567
Tirio	6994	6913	6928
Tiripetío	27 634	27 230	27 119
Umécuaro	11 263	11 398	11 421

De la capacidad ecológica total, tres de las microcuencas juntas (Tiripetío, Acuitzio y Huiramba) tienen más del 50% de las hectáreas globales, en cambio, las microcuencas más pequeñas como Jácuaro, Tirio, Fontezuelas y Atécuaro tienen una capacidad ecológica menor. A pesar de la diferencia de la capacidad ecológica en los años estudiados, los porcentajes para cada una con respecto a la capacidad total, no varían de un año al otro.

Las microcuencas con mayor extensión territorial, tienen por ende más recursos naturales disponibles; sin embargo, también tienen mayor población, por lo tanto, al incorporar este factor para obtener la capacidad ecológica per cápita de cada microcuenca, el panorama cambia por completo (ver Anexo 8). La microcuenca que tiene una capacidad ecológica por habitante mayor, es Umécuaro, seguida de Atécuaro y Tirio, sin importar la extensión territorial, en cambio, Estación Jácuaro y Huiramba tienen capacidades ecológicas menores (Figura 30).

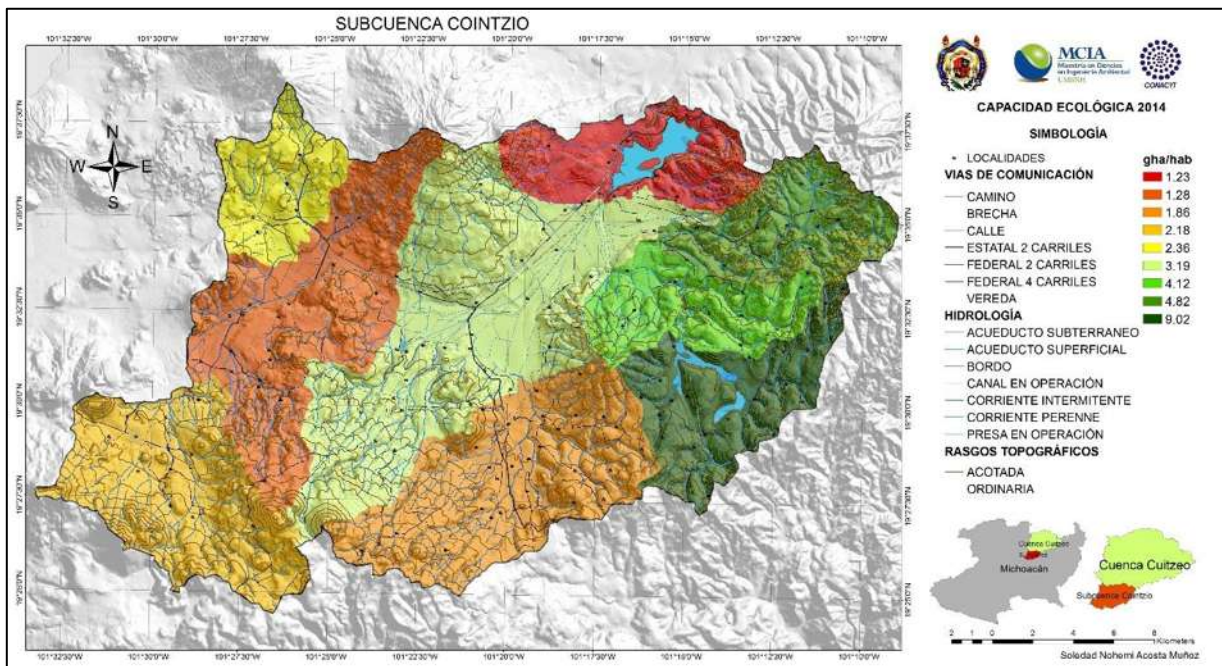


Figura 30. Capacidad ecológica por microcuenca para 2014.

La variación de las capacidades ecológica en las microcuencas, muestra que aun dentro de la subcuenca se tienen diferencias, tanto en la distribución de los recursos, como en la cantidad de personas que hacen uso de dichos recursos. Las microcuencas de Tiripetío, Tirio, Umécuaro y Atécuaro tienen capacidades ecológicas por habitante mayores que las de la subcuenca, por tanto, mayores a las registradas a nivel nacional y global. Las microcuencas de Fontezuelas y Cuanajo son parecidas a la capacidad de la subcuenca, aún mayores que los datos nacionales y globales; la microcuenca de Acuitzio tiene una capacidad ecológica similar a la global y nacional; sin embargo, Jácuaro y Huiramba tienen capacidad ecológica menor (Cuadro 18).

Cuadro 18. Capacidad ecológica de las microcuencas.

Microcuenca	Años		
	1999	2009	2014
	gha hab ⁻¹	gha hab ⁻¹	gha hab ⁻¹
Acuitzio	2.21	1.99	1.86
Atécuaro	3.45	4.40	4.82
Cuanajo	2.17	2.16	2.18
Fontezuelas	2.75	2.51	2.36
Huiramba	1.67	1.41	1.28
Jácuaro	1.75	1.38	1.23
Tirio	5.04	4.47	4.12
Tiripetío	3.59	3.32	3.19
Umécuaro	8.61	8.98	9.02

El cambio de la capacidad ecológica con el tiempo, también tiene comportamiento diferente en cada microcuenca y se relaciona principalmente por el estado de los recursos naturales y la tendencia de crecimiento de la población.

Las microcuencas de Fontezuelas, Huiramba, Estación Jácuaro y Tiripetío, disminuyen en los tres años su capacidad ecológica total, por lo tanto, disminuye su capacidad para obtener bienes materiales y servicios. Aunado a lo anterior, su población aumenta, al haber menor recurso y más personas la capacidad ecológica por habitante disminuye. En la microcuenca de Atécuaro, también disminuye la capacidad ecológica total; sin embargo, la población en esta microcuenca tiene una tasa de crecimiento negativa, a tal grado que la capacidad por habitante aumenta.

En las microcuencas de Cuanajo y Tirio la capacidad ecológica en hectáreas globales disminuye de 1999 a 2009, sin embargo, de este último año a 2014 se presenta un ligero aumento. A pesar de esta dinámica, en Tirio la capacidad ecológica por habitante disminuye en los tres años, debido al aumento de la población. En Cuanajo, la población se mantiene estable y como consecuencia, la capacidad ecológica por persona se mantiene constante.

En las microcuencas de Acuitzio y Umécuaro aumentan la capacidad ecológica, debido a que crece la capacidad para obtener bienes materiales y servicios de los recursos naturales. Aunado a lo anterior, en Umécuaro la población disminuye, lo que provoca un lógico aumento de la capacidad ecológica por habitante, en cambio, la población de Cuanajo aumenta en tal medida que a pesar de que exista mayor capacidad ecológica total, por habitante ésta disminuye (Figura 31).

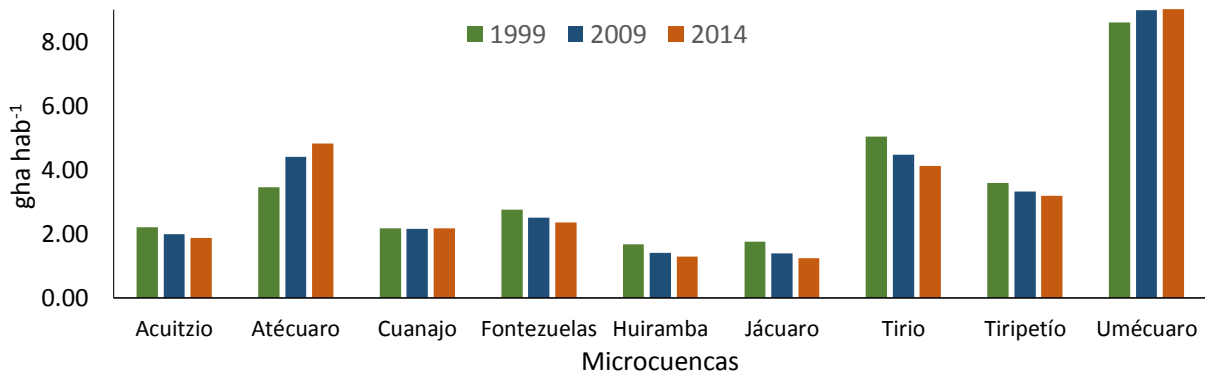


Figura 31. Tendencia de la capacidad ecológica por microcuenca.

Las superficies productivas se distribuyen de forma heterogénea. Las microcuencas con mayor superficie de bosque y con mayor capacidad de absorción de CO₂ son Cuanajo y Acuitzio. Tiripetío es la microcuenca con más áreas de cultivo, de pastos y de áreas de ocupación directa. La superficie productiva dominante en la mayoría de las microcuencas es la de cultivos, seguida por las áreas de bosque, con excepción de Atécuaro, Jácuaro y Tirio en donde el comportamiento es contrario, dominando las áreas de bosque y posteriormente las de cultivos, este comportamiento permanece en los tres años analizados (Figura 32).

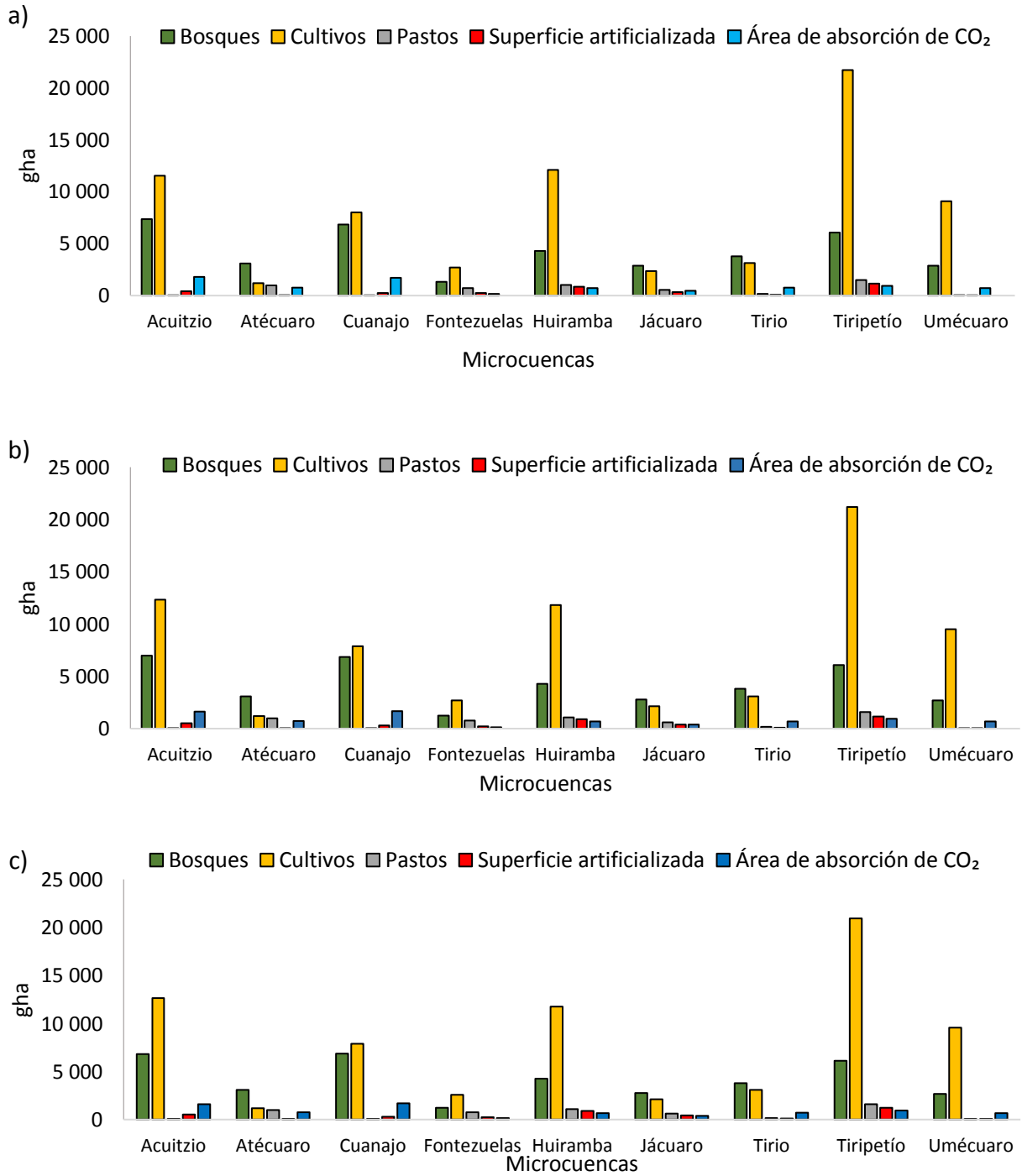


Figura 32. Capacidad ecológica por superficie productiva por microcuenca: a) 1999, b) 2009 y c) 2014.

2.4.6 Capacidad ecológica por localidades

La capacidad ecológica de cada localidad se obtuvo considerando que los recursos con los que cuenta cada microcuenca, son repartidos entre todos sus habitantes, de modo que a cada persona le corresponda la misma cantidad de recursos, por lo tanto, la capacidad de cada localidad, depende del número de habitantes que tiene en cada año y la cantidad de recursos que le corresponde y de la microcuenca a la que pertenezca.

En el año 1999, 78 localidades, más del 50% de las localidades de la subcuenca, tenían una capacidad ecológica menor a 321 gha; 39 localidades entre 322 y 857 gha; 19, entre 858 y 1970 gha, y sólo 12 localidades presentaron una capacidad ecológica mayor a 1970 gha (Figura 33).

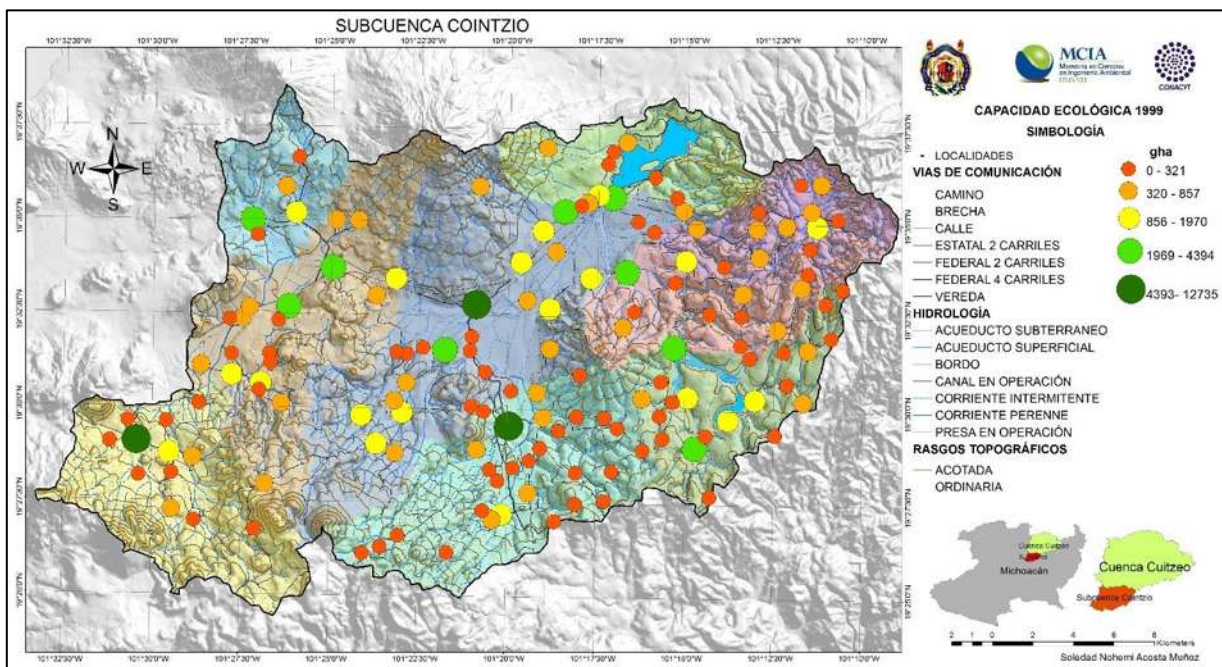


Figura 33. Capacidad ecológica por localidad en 1999.

En 2009, 76 localidades tenían una capacidad ecológica menor a 321 gha; 42, entre 322 y 857 gha; 18, entre 858 y 1970, y de igual manera que en 1999, sólo 12 presentaron una capacidad ecológica mayor (Figura 34).

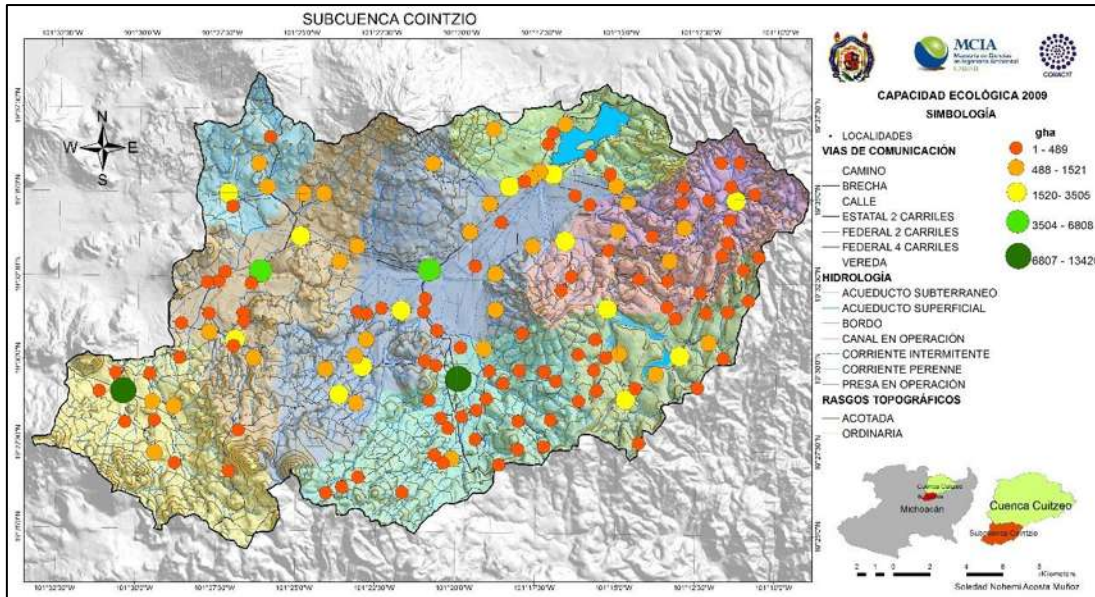


Figura 34. Capacidad ecológica por localidad en 2009.

En 2014, como en los años anteriores, las localidades con mayor capacidad ecológica permanecen. Tiripetío, Cuanajo y Acuitzio presentan una Capacidad mayor que 4398 gha; 79 localidades tenían una Capacidad menor a 321 gha; 39, entre 322 y 857 gha, y 18, entre 858 y 1970 (Figura 35).

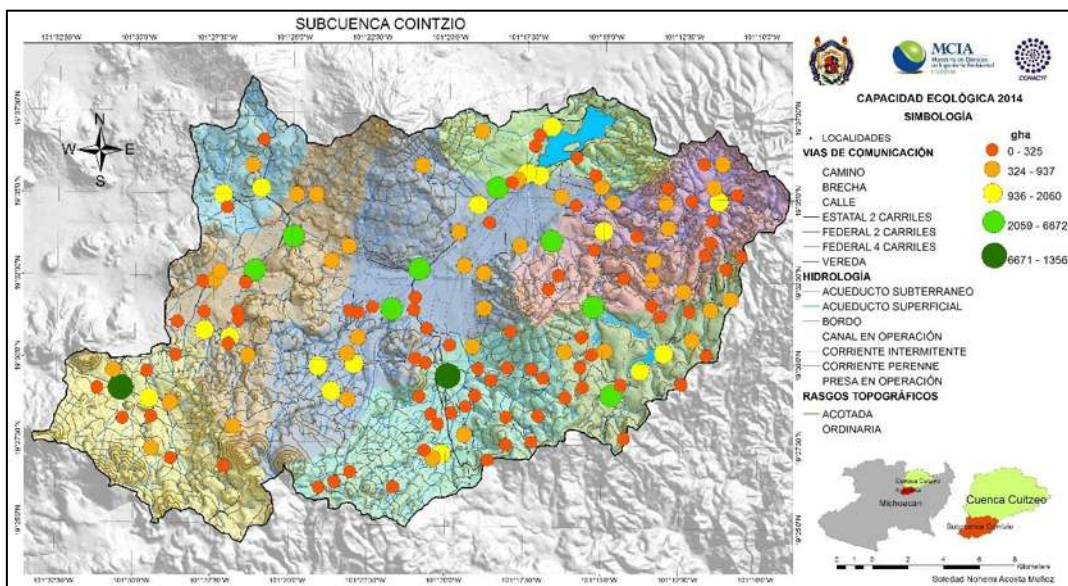


Figura 35. Capacidad ecológica por localidad en 2014.

En la microcuenca de Acuitzio, la cantidad de recursos por habitante disminuye, sin embargo, debido al incremento de la población, 13 localidades aumentan su capacidad ecológica y las restantes 16 la disminuyen. La capacidad ecológica de las 29 localidades, que pertenecen a esta microcuenca, varía de 2 gha a 13 563 gha (Cuadro 19).

Cuadro 19. Capacidad ecológica de las localidades de Acuitzio.

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
El Moral	44	2	-
Tepatzicuaro	-	2	2
Agua Puerca	139	14	4
Cruz Gorda	155	18	6
El Terrero	84	26	14
Agua Grande	46	24	17
Colonia Francisco Villa	0	30	30
El Melón	49	38	33
El Paredón	77	48	37
Loma del Pastor	24	38	47
Paso del Muerto	66	72	74
Rosa de Castilla	181	104	77
La Vinata	190	112	84
El Auxilio (Los Tanques)	223	130	97
La Laja	146	138	132
Corralo (Tirindiriz)	130	146	151
La Huizata	57	112	153
El Varal	148	159	163
La Campana	219	201	190
Los Aguacates	214	203	195
Las Juntas	84	155	208
La Peñita	243	267	276
Tamanguío	437	339	294
Tirípano	446	365	325
Páramo	508	448	415
Huajumbo	373	419	436
La Palma	550	574	577
Cúzaro (Cúzaro)	1087	1323	1438
Acuitzio del Canje	12 735	13 420	13 563

En la microcuenca de Atécuaro, aumenta la capacidad ecológica de cuatro localidades y ocho la disminuyen; en este grupo de localidades, la capacidad ecológica varía de 7 gha a 2058 gha (Cuadro 20).

Cuadro 20. Capacidad ecológica de las localidades de Atécuaro.

Localidades	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
El Salto	48	31	24
Cañada de Buena Vista	72	40	28
Torrecillas	249	185	154
La Laguna (Los Caracoles)	7	57	160
La Ciénega (Torrecillas de Atécuaro)	356	224	173
El Taray	235	211	194
Zimpanio Sur	566	466	410
Huertitas	445	440	424
El Arenal	463	475	467
La Cofradía	666	550	484
Las Cruces	663	717	723
Atécuaro	1578	1921	2058

La capacidad ecológica de las localidades de la microcuenca de Cuanajo, varía de 6 gha en la localidad de Curine a 10 806 gha en Cuanajo, que es una de las localidades con mayor capacidad ecológica. Ocho de las localidades tienden al aumento y cuatro a la disminución (Cuadro 21).

Cuadro 21. Capacidad ecológica de las localidades de Cuanajo.

Localidades	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Curine (Cuartel dos)	-	6	7
Agua Nueva	87	19	9
El Tigre (Rincón de Catácuaro)	-	26	28
La Noria	247	211	198
Pueblo Nuevo	247	213	201
La Presa	211	259	290
Colonia la Cantera	-	367	392
Unguarán (Inguarán)	521	530	542
Yuretzio (La Mesa)	501	526	546
Canacucho	1107	1143	1175
El Refugio	1114	1197	1256
Cuanajo	10 806	10 260	10 120

En la microcuenca de Fontezuelas, a pesar de que baja la capacidad ecológica por habitante, cuatro de las localidades la aumentan y sólo una disminuye. La capacidad varía de ocho gha a 2469 gha (Cuadro 22).

Cuadro 22. Capacidad ecológica de las localidades de Fontezuelas.

Localidades	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
La Calzada del Obispo	-	8	8
La Loma	-	13	13
Las Pilas	807	823	819
La Caja	1286	1521	1630
Fontezuelas	2469	2103	1912

De las 19 localidades que pertenecen a la microcuenca de Huiramba, 10 disminuyen su capacidad ecológica y nueve la aumentan a pesar de que la capacidad ecológica por habitante en la microcuenca tiene una tendencia decreciente; en este caso la capacidad ecológica varía de 20 gha a 4394 gha (Cuadro 23).

Cuadro 23. Capacidad ecológica de las localidades de Huiramba.

Localidades	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
El Llanito	-	21	20
El Refugio	60	32	24
Joya Chica	67	48	40
La Providencia	160	125	110
Las Trojes	115	112	111
La Reunión	234	254	264
Quiríngaro (San Simón Quiríngaro)	473	343	291
El Sauz	394	410	417
El Carmen	595	489	441
Condémbaro	344	416	455
El Romeral (El Jicote)	526	562	578
Huatzangio	857	700	630
Ojo de Agua de Pastores	521	698	805
San José Coapa	993	870	811
Las Tablas	755	818	847
El Sobrado	1163	1268	1317
El Pedregal	1288	1647	1854
Lagunillas	3825	3505	3340
Huiramba	4394	4226	4125

En la microcuenca de Jácuaro, disminuye la capacidad ecológica por habitante, cinco de las localidades disminuyen su capacidad y cuatro la aumentan; la cantidad de hectáreas globales en las localidades, varía de cinco gha a de 2000 gha, siendo Santiago Undameo y Estación Jácuaro, las que mayor capacidad ecológica tienen (Cuadro 24).

Cuadro 24. Capacidad ecológica de las localidades de Jácuaro.

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Quinta María José	-	6	5
La Sanguijuela	14	10	8
El Aguaje	-	23	22
Arroyo Colorado	321	250	221
Joya de la Huerta	512	517	523
Nueva Florida	644	634	633
Estación Jácuaro (Colonia La Reunión)	1217	1159	1138
Uruapilla	697	983	1174
Santiago Undameo	2404	2006	1842

De las localidades de la microcuenca de Tirio, nueve de ellas disminuyen su capacidad ecológica de 1999 al 2014 y sólo cuatro aumentaron. Rancho Maldonado es la de menor capacidad con 12 gha en 2014, por el contrario, Tirio presenta la mayor capacidad con 2999 gha en el mismo año (Cuadro 25).

Cuadro 25. Capacidad ecológica de las localidades de Tirio.

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Rancho Maldonado	15	13	12
Puerto de Celaya	60	27	17
Patambo	242	67	35
Puente Gallegos	86	58	47
La Codorniz	45	49	50
Loma Puerto del Tigre	202	130	102
Puentecillas (Puentecitas)	348	317	296
La Palmita (La Trampa)	670	406	310
Puerto del Madroño	338	464	533
Campichahua	317	473	566
Buenavista	857	679	592
El Escobal	1396	1398	1370
Tirio	2419	2831	2999

En la microcuenca de Tiripetío, a pesar de que la capacidad ecológica por habitante disminuye en los años analizados, 18 localidades, más del 50%, aumentaron su capacidad y 11 disminuyeron, variando su capacidad de 1.0 gha a más de 7000 gha (Cuadro 26).

Cuadro 26. Capacidad ecológica de las localidades de Tiripetío.

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Ojo de Agua	25	3	1
Carindapaz (San Francisco)	-	20	20
La Florida	-	33	34
Aróstaro	43	50	54
El Barretero Tercera Etapa	-	56	57
La Providencia	-	76	78
El Bañito	93	126	147
San Rafaelillo (La Haciendita)	140	159	170
La Tinaja	147	186	209
El Mesón Colorado	183	223	245
Yerbabuena Vieja	-	252	257
Hermenegildo Galeana	582	465	415
Cuanajillo del Toro	651	535	485
San Carlos Coapa	1086	674	531
Santa Rosalía	280	438	548
San Miguel Coapa	543	588	612
Pueblo Viejo	679	668	662
La Maiza	712	711	710
La Angostura	687	774	821
San Antonio Coapa	1420	1049	902
Isaac Arriaga (Noriega)	1186	1003	922
La Yerbabuena	514	767	937
El Reparó	1762	1372	1210
Potrerillos	1050	1202	1287
San Andrés Coapa	1970	1740	1636
Chihuerio	1675	1923	2060
La Estancia	2459	2620	2705
San Rafael Coapa	2657	2707	2732
Tiripetío	7089	6808	6672

De las localidades de la microcuenca de Umécuaro, 11 aumentaron su capacidad ecológica y nueve disminuyeron, esto varió las hectáreas globales de 16 a más de 3000 (Cuadro 27).

Cuadro 27. Capacidad ecológica de las localidades de Umécuaro.

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Rancho Viejo	181	36	16
El Reparó	155	36	17
La Pera	-	27	29
Ojo de Agua	525	126	61
Las Tinajas (La Tinaja)	95	90	86
El Landín	86	90	90
Palo Amarillo	-	135	143
Los Capulines	43	99	147
Las Mesitas	86	126	149
Puente Hernández	34	108	188
Curimeo	121	180	216
La Artesa	586	431	364
Las Canoas	646	449	368
Las Palomas	207	350	449
Hojas Anchas	1042	665	522
El Tejocote (La Cortina)	-	719	764
Loma Caliente	1628	1635	1611
Nieves	3350	2982	2767
Umécuaro	2480	3108	3421

La tendencia de la capacidad ecológica de las localidades, cambia con respecto a los años analizados. La variación de la capacidad ecológica está relacionada en gran medida con el cambio en la población; sin embargo también influye la cantidad de recursos que se tienen en cada microcuenca, así como la capacidad de los habitantes para obtener bienes materiales y servicios de dichos recursos.

2.5 CONCLUSIONES

La capacidad ecológica de la subcuenca Cointzio ha variado de 2.6 a 2.3 gha hab⁻¹ del año 1999 a 2014, valor que rebasa el estimado en 2008 a nivel nacional (1.42 gha hab⁻¹) y mundial (1.7 gha hab⁻¹).

La capacidad ecológica de las microcuencas varía de 1.23 gha hab⁻¹ a 9 gha hab⁻¹. Umécuaro presentó la capacidad más alta, mientras que, Jácuaro y Huiramba la más baja.

Los resultados indican que la capacidad ecológica a nivel nacional o global, no representa lo que sucede a escalas locales, ya que los recursos naturales que se tienen son distintos incluso en las microcuencas estudiadas.

La metodología empleada para el cálculo de la Capacidad ecológica, considera los aspectos generales de cálculo a nivel nacional y global; sin embargo, al adaptarla incorporando el uso potencial del suelo y la población, los resultados se apegan a la realidad de cada región.

La capacidad ecológica de cada microcuenca, depende de un conjunto de factores como son: las características físicas y químicas del suelo, la topografía, el uso de suelo y la cobertura vegetal, así como aspectos relacionados con la dinámica poblacional.

Los resultados de capacidad ecológica a escala regional pueden ser comparados con la huella ecológica y obtener un índice de sustentabilidad que indique lo que sucede a nivel local.

CAPÍTULO 3. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA COMO INDICADOR DE SUSTENTABILIDAD EN LA SUBCUENCA

3.1 RESUMEN

En este capítulo, se abordaron como objetivos obtener una metodología de fácil reproducción para el cálculo de la huella ecológica, así como la estimación y espacialización de dicho indicador en la subcuenca Cointzio. Ésta comprende nueve microcuencas y 148 localidades, en donde se realizaron análisis de tendencia para los años 1999, 2009 y 2014. Las metodologías empleadas implican la estimación de la huella ecológica de manera indirecta con apoyo de los sistemas de información geográfica y la teledetección, a partir del análisis multitemporal de la degradación de recursos forestales y la demanda de superficies productivas como cultivos, pastos y áreas de ocupación directa. Se obtuvo información sobre la huella ecológica y el déficit o excedente ecológico de la subcuenca, las microcuencas y las localidades, así como mapas de la huella y el déficit ecológico como un indicador de sustentabilidad espacializado. Los resultados indican que la huella ecológica varía dentro de la subcuenca y de las microcuencas con base en el uso de los recursos para cada área específica, por lo cual conocer lo que sucede a nivel global y nacional no indica lo que ocurre a nivel local.

PALABRAS CLAVE: tasa de cambio, factores de equivalencia, uso potencial del suelo, déficit ecológico, excedente ecológico.

3.2 INTRODUCCIÓN

La huella ecológica es uno de los indicadores de sustentabilidad más empleados en la actualidad, ya que a partir de ella se puede conocer el impacto ambiental de los seres humanos hacia el planeta o hacia un ecosistema específico (Carreño y Hoyos, 2010). Este indicador ha sido empleado a escala global y nacional; sin embargo, debido a la falta de datos a nivel local, las metodologías empleadas hasta el momento no pueden ser aplicadas a esta escala.

Por otra parte, la huella ecológica es considerada como un dato puntual y homogéneo, sin tomar en cuenta que la demanda de recursos de los habitantes es diferente en cada región y para cada superficie productiva.

En México, la huella ecológica ha aumentado de 1.7 gha hab⁻¹ en 1961 a 3.3 gha hab⁻¹ en 2008 y supera la capacidad ecológica desde 1979 (Global Footprint Network, 2008). A nivel global, la huella ecológica supera en 64% la capacidad del planeta teniendo en 2008 un déficit de 1.1 gha hab⁻¹ (Martínez, 2008). Lo anterior muestra que las actividades humanas no son sustentables a nivel nacional y global; sin embargo, lo que sucede a nivel local se desconoce.

Para saber lo que pasa a nivel local, se tomó como área de estudio una subcuenca hidrológica, por ser una unidad delimitada de manera natural y en la que sus habitantes comparten el manejo de los recursos naturales; se usaron métodos indirectos de cálculo. La metodología empleada partió del análisis multitemporal de la degradación de recursos y la demanda de superficies productivas, con apoyo de los sistemas de información geográfica y la teledetección. Finalmente, se espacializó la huella y el déficit o excedente ecológico a nivel de microcuenca y por superficie productiva.

3.3 METODOLOGÍA

Para estimar la huella ecológica de la subcuenca y de las microcuencas, se planteó una metodología aplicable a este nivel, ya que las metodologías existentes para la estimación de este indicador a nivel nacional y global, no se adaptan a las necesidades y datos existentes en una unidad ecológica. A escalas locales, no se cuenta con bases de datos de consumo de bienes materiales o servicios y los datos existentes consideran los límites políticos, no definidos naturalmente.

Estimar la huella ecológica a partir de datos de consumo de bienes, no es factible en una unidad ecológica, por lo tanto se desarrolló una metodología con tres variantes, que en lo subsecuente se les nombrara como metodología 1, 2 y 3 (Figura 36).

En esta propuesta metodológica se consideraron los aspectos generales para el cálculo de la huella ecológica, se partió de la misma filosofía, se tomaron en cuenta los mismos factores de equivalencia, y las mismas superficies productivas y unidades de medida.

Se partió del supuesto de que los habitantes de una subcuenca o una microcuenca, satisfacen sus necesidades de consumo de los recursos naturales de dicha unidad ecológica; considerando de manera indirecta las importaciones y exportaciones, tomando en cuenta que los bienes materiales y servicios que ingresan son importados a expensas de otros que se producen dentro de la cuenca.

El consumo se obtuvo a partir del análisis multitemporal de la degradación de recursos y la demanda de superficies productivas, bajo el supuesto de que si los recursos naturales se degradan o se demanda una mayor cantidad de superficies productivas, el consumo será mayor; se consideró por lo tanto, que los recursos naturales son utilizados únicamente por los habitantes de la subcuenca o microcuenca analizada y que todas las personas utilizan de igual manera los recursos a escala local.

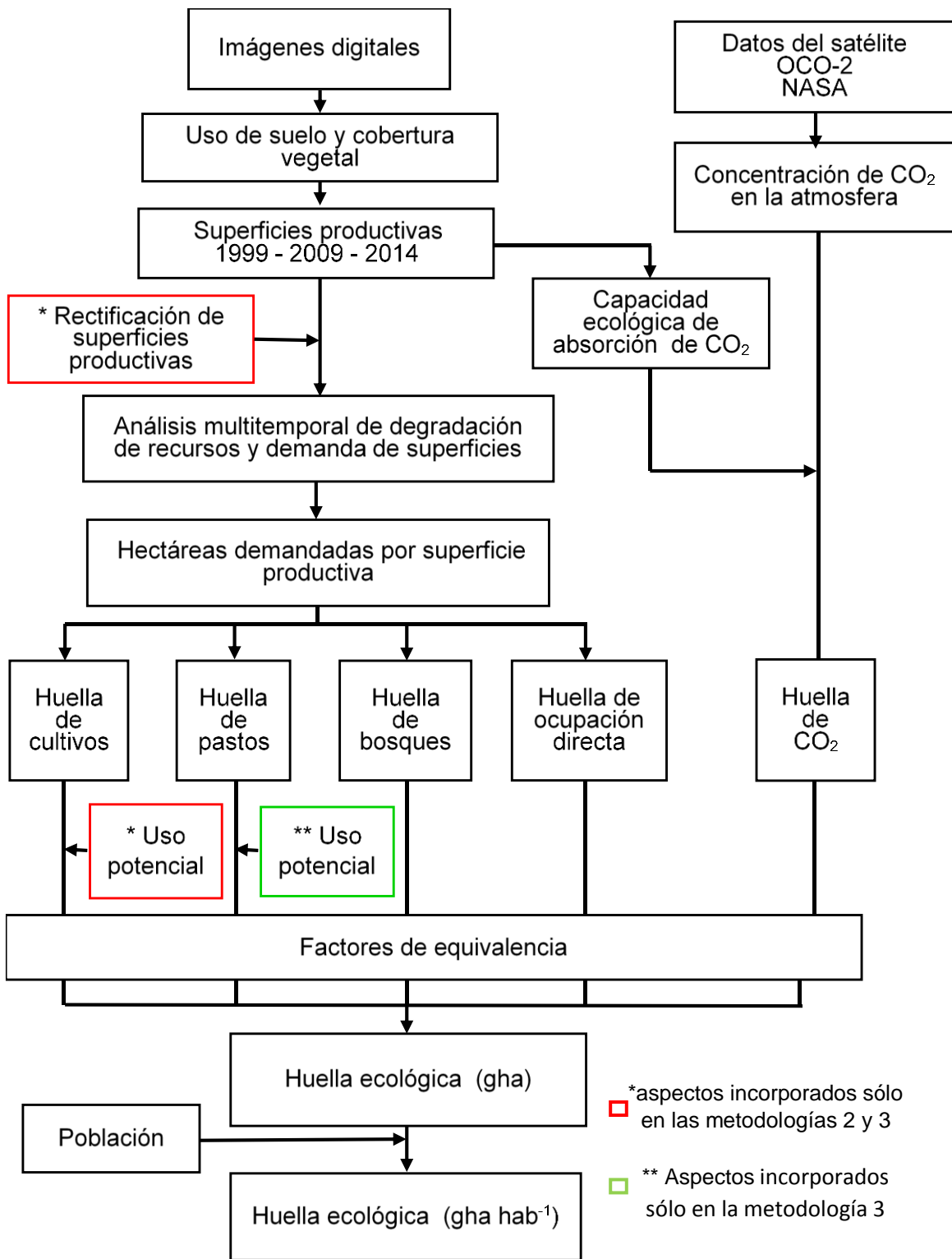


Figura 36. Esquema metodológico de la estimación de la huella ecológica. Los colores representan las tres metodologías empleadas.

3.3.1 Huella ecológica por superficie productiva

El análisis multitemporal de degradación de recursos y demanda de superficies, es la base para el cálculo de la huella ecológica, éste análisis se realizó a partir de la comparación de los mapas de uso de suelo y coberturas de tres fechas distintas (1999, 2009 y 2014) obtenidos en el capítulo anterior.

Metodología 1. Se calcularon las áreas de bosques, cultivos, pastizales y asentamientos humanos para los años 1999, 2009 y 2014. Una vez obtenidas las áreas se calculó la tasa de cambio anual que expresa las transiciones de la superficie al inicio de cada año a través de la Ecuación 9 (Velázquez *et al.*, 2002).

Ecuación 9. Tasa de cambio anual de las superficies productivas.

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

Donde:

δ = tasa de cambio anual

S_1 = superficie productiva en la primer fecha (ha)

S_2 = superficie productiva en la segunda fecha (ha)

n = número de años entre la fecha uno y la fecha dos

Metodologías 2 y 3. Además del análisis de cambio, en estas metodologías se rectificaron las áreas productivas por medio del análisis de cambio entre superficies productivas; se generó una matriz de transición con apoyo del SIG y se eliminaron las transiciones imposibles, que pueden deberse a errores de digitalización, por ejemplo, superficies que cambiaron de cuerpos de agua a otras categorías como bosques o cultivos.

Bosques. La huella ecológica de bosques, se calculó con el mismo procedimiento en las tres metodologías aplicadas, bajo el supuesto de que la degradación de los recursos forestales, se relaciona de manera directa con el consumo de dichos recursos, por lo tanto, si la tasa de cambio de las áreas forestales es de cero, es decir, que la superficie en el primer año analizado sea igual que la superficie del segundo año, indicaría que los habitantes consumen de manera sustentable esos recursos; sin embargo, si la tasa de cambio es negativa, se entendería que los habitantes consumen mayor cantidad de recursos de los que puede proporcionarles el ecosistema, en la misma proporción de su degradación.

A partir de las áreas de bosques y vegetación secundaria para 1999, 2009 y 2014, y de la tasa de cambio en cada año, se estimó la huella ecológica de bosques aplicando la Ecuación 10.

Ecuación 10. Huella ecológica de los bosques.

$$HE_b = S_{1b} - (S_{1b} \cdot \delta)$$

Donde:

HE_b = huella ecológica de bosques

S_{1b} = superficie forestal del primer año

δ = tasa de cambio anual de superficies forestales

Cultivos, pastos y ocupación directa. La huella ecológica para estas superficies productivas, se calcularon a partir de las áreas obtenidas para 1999, 2009 y 2014, y para la tasa de cambio, se supuso que la demanda de superficies para el desarrollo de la agricultura, las actividades pecuarias y el desarrollo urbano está directamente relacionada con el consumo de los recursos y la ocupación de espacios de los habitantes de la subcuenca o microcuenca, por lo tanto, las áreas requeridas para satisfacer la demanda de recursos agropecuarios y de desarrollo urbano, aumentará proporcionalmente a la tasa de cambio de estas superficies.

A partir de las áreas de cultivos, pastos y asentamientos humanos de los años analizados y de la tasa de cambio en cada año, se estimó la huella ecológica de cada superficie mediante las ecuaciones 11, 12 y 13.

Ecuación 11. Huella ecológica de cultivos.

$$HE_c = S_{1c} + (S_{1c} \cdot \delta)$$

Donde:

HE_c = huella ecológica de cultivos

S_{1c} = superficie agrícola del primer año

δ = tasa de cambio anual de superficies agrícolas

Ecuación 12. Huella ecológica de pastos.

$$HE_p = S_{1p} + (S_{1p} \cdot \delta)$$

Donde:

HE_p = huella ecológica de pastos

S_{1p} = superficie de pastizales del primer año

δ = tasa de cambio anual de pastizales

Ecuación 13. Huella ecológica de ocupación directa.

$$HE_{od} = S_{1od} + (S_{1od} \cdot \delta)$$

Donde:

HE_{od} = huella ecológica de ocupación directa

S_{1od} = superficie de asentamientos humanos del primer año

δ = tasa de cambio anual de asentamientos humanos

Absorción de CO₂. La estimación de la superficie de bosque para absorber el CO₂, se obtuvo a partir de los datos mensuales de concentración de CO₂ en la atmosfera obtenidos con el satélite OCO-2 de la NASA. Se descargaron los datos mensuales para el área de estudio, entre las coordenadas, 19° 24' y 20°1' de latitud norte y 101°09' y 101° 42' de longitud oeste (NASA, 2016).

Se obtuvo una tasa de crecimiento anual promedio de 2014, 2015 y 2016, que se utilizó en las tres fechas analizadas, debido a que el satélite fue lanzado en 2014 no se pudieron obtener datos para los años anteriores.

Se utilizaron datos sobre la concentración de CO₂ en la atmosfera de noviembre de 2014 a octubre de 2015, y de enero de 2015 a enero de 2016. Además se utilizó en promedio el crecimiento anual de concentración de CO₂ en la atmosfera de 0.39% (Cuadro 28).

Cuadro 28. Datos de concentración de CO₂ a partir del satélite OCO-2

Fecha 1	CO ₂	Fecha 2	CO ₂	Aumento anual
	ppm		ppm	%
Noviembre 2014	396.735	Octubre 2015	397.158	0.11
Enero 2015	400.085	Enero 2016	402.804	0.68
Promedio	398.41		399.981	0.39

ppm: partes por millón

Para el cálculo de la huella ecológica de absorción de CO₂, se partió del supuesto de que el aumento en la concentración de este gas en la atmosfera se relaciona directamente con las emisiones de los habitantes, por lo que para transformar los datos de partes por millón a hectáreas, se consideró que si el aumento anual en la concentración es de 0.39%, la capacidad ecológica sólo absorbió 99.6% de las emisiones, por lo tanto, la huella ecológica es 0.39% más que la capacidad ecológica y se obtuvo mediante la Ecuación 14.

Ecuación 14. Huella ecológica de áreas de absorción de CO₂.

$$HE_{CO_2} = CE_{CO_2} + (CE_{CO_2} \cdot 0.0039)$$

Donde:

HE_{CO₂} = huella ecológica de ocupación directa

CE_{CO₂} = superficie de asentamientos humanos del primer año

3.3.2 Huella ecológica de la subcuenca y las microcuencas

Metodología 1. Una vez obtenidas las hectáreas de cada superficie, éstas se multiplicaron por los factores de equivalencia desarrollados por la organización global de la huella ecológica (Cuadro 29) (Global Footprint Network, 2008) y posteriormente se sumaron para obtener la huella ecológica total de la subcuenca en gha. La huella ecológica por habitante se obtuvo a partir de la Ecuación 15.

Categoría de terreno productivo	Factor de equivalencia
Cultivos	2.18
Pastos	0.49
Bosques	1.37
Superficie artificializada	2.18
Área de absorción de CO ₂	0.36

Ecuación 15. Huella ecológica per cápita de la subcuenca.

$$HE_T = \frac{\sum(HE_s \cdot w)}{N}$$

Donde:

HE_T = huella ecológica de la subcuenca (gha hab⁻¹)

HE_s = huella ecológica por superficie productiva (ha)

N = Número total de habitantes de la subcuenca

w = factor de equivalencia

Metodología 2. Se consideró que la productividad promedio de las áreas de cultivo dependerá a nivel local del uso potencial, y esto afecta la cantidad de bienes y servicios que directa o indirectamente los habitantes obtienen a partir de los recursos naturales, es decir, las áreas que se ocupan para cultivos, pero que tienen un uso potencial distinto, tendrán también una productividad menor, por lo tanto, las superficies en hectáreas utilizadas para cultivos se multiplicaron por el factor de equivalencia que le correspondía según su uso potencial.

Metodología 3. Partiendo del mismo criterio aplicado en la metodología dos, a las áreas utilizadas para pastos y cultivos, se les asignó el factor de equivalencia según el uso potencial de dichas áreas. En el caso de los bosques, ocupación directa y áreas de absorción de CO₂ se les aplicó el mismo factor de equivalencia, ya que el uso potencial no afecta de manera directa la obtención de bienes naturales.

En el caso de las microcuencas, se utilizaron las mismas metodologías, tomando como unidad de estudio a cada una de las nueve microcuencas. Para ello, empleó la Ecuación 16.

Ecuación 16. Huella ecológica por microcuenca.

$$HE_M = \frac{\sum(HE_{sm} \cdot w)}{n}$$

Donde:

HE_M = huella ecológica por microcuenca (gha hab⁻¹)

HE_{sm} = huella ecológica por superficie productiva de cada microcuenca (ha)

n = número total de habitantes de la microcuenca

w = factor de equivalencia

Los datos de población se obtuvieron de la base de datos del INEGI (2000 y 2010). Para el año 1999 se tomó en cuenta la población registrada en el XII Censo General de Población y Vivienda de 2000; para 2009 se consideró la población registrada en el Censo de Población y Vivienda de 2010. En el caso de 2014, se realizó una proyección tomando en cuenta la tasa de crecimiento que mostró la población del año 2000 al 2010 y utilizando las fórmulas de proyección de la Comisión Nacional del Agua que se muestran en el capítulo anterior (CONAGUA, 2001).

3.3.3 Evaluación de las variantes metodológicas aplicadas

Las variantes metodológicas se evaluaron por medio del proceso analítico jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty (Alphonse, 1997), el cual considera aspectos objetivos e incorpora el conocimiento subjetivo para la evaluación de distintas alternativas. Se estableció como objetivo estimar la huella ecológica de la manera más certera y apegada a la realidad, para ello, se determinaron cinco criterios y las tres alternativas que se describen a continuación (Figura 37).

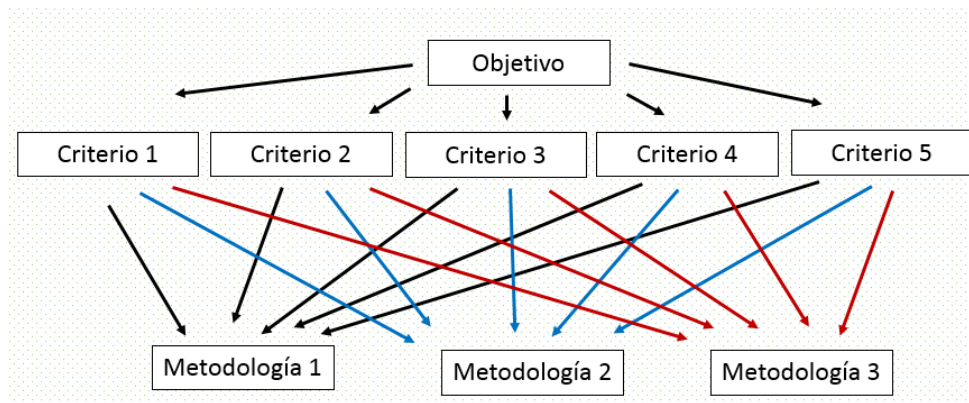


Figura 37. Jerarquización para la evaluación de las metodologías.

Criterios.

1. Que muestre la degradación de los recursos y la demanda de espacios.
2. Calidad en los datos de uso de suelo y vegetación en las tres fechas analizadas.
3. Facilidad de aplicación de la metodología.
4. Que refleje el consumo aparente de manera indirecta.
5. Que tome en cuenta la productividad local.

Alternativas.

- Metodología 1. A partir del análisis multitemporal de degradación de recursos, demanda de espacios y de los factores de equivalencia asignados según la productividad global.
- Metodología 2. A partir del análisis multitemporal de degradación de recursos, demanda de espacios y de los factores de equivalencia asignados según la productividad global a excepción de las áreas de cultivo, a las que se les asigna el factor de equivalencia según el uso potencial, además se realiza una rectificación en las áreas y transiciones de cada superficie productiva en las distintas fechas.
- Metodología 3. A partir del análisis multitemporal de degradación de recursos, demanda de espacios y de los factores de equivalencia asignados según el uso potencial para el caso de cultivos y pastos, realizando también la rectificación en las áreas y transiciones de cada superficie productiva en las distintas fechas.

Peso de los criterios. Una vez establecidos los criterios se obtuvo su peso relativo, mediante una matriz de comparación pareada, en la cual cada criterio fue evaluado por su importancia relativa respecto a los otros, a partir de la escala de posición continua de Saaty a criterio del autor (Figura 38); este procedimiento se realizó con apoyo del SIG y se consideró además que la inconsistencia en el llenado de las matrices fuera menor al 10%.

a)

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
sumamente	Muy fuertemente	fuertemente	moderadamente	igual	moderadamente	fuertemente	Muy fuertemente	sumamente

b)

	Menos importante			Mas importante	
Criterios	1	2	3	4	5
1	1				
2		1			
3			1		
4				1	
5					1

Figura 38. Herramientas para el proceso analítico jerárquico.
a) Escala de posición continua de Saaty y
b) Matriz pareada de criterios.

Peso de las metodologías con respecto a los criterios. Posteriormente se evaluaron las tres metodologías con cada criterio a partir de matrices de comparación pareada valoradas con la escala de posición continua de Saaty y con apoyo del SIG se obtuvieron los pesos relativos de cada metodología. (Figura 39).

CRITERIO 1	alternativa 1	alternativa 2	alternativa 3	CRITERIO 2	alternativa 1	alternativa 2	alternativa 3
alternativa 1	1			alternativa 1	1		
alternativa 2		1		alternativa 2		1	
alternativa 3			1	alternativa 3			1

Figura 39. Ejemplo de matriz pareada para la comparación de metodologías.

Calificación de las metodologías. Finalmente, se obtuvieron las calificaciones de cada alternativa *sensu* Alphonse (1997), a partir de la sumatoria de los pesos de cada criterio, multiplicados por los pesos de cada alternativa respecto a dicho criterio.

3.3.4 Huella ecológica de las localidades

Para estimar la huella ecológica de las localidades, se consideró la huella de las microcuencas, obtenida mediante la metodología con mayor calificación en el proceso analítico jerárquico, y la población de cada localidad (Ecuación 17).

Ecuación 17. Huella ecológica por localidades

$$HE_l = HE_m \cdot n$$

Donde:

HE_l = huella ecológica por localidades (gha)

HE_m = huella ecológica de las microcuencas (gha hab⁻¹)

n = habitantes por localidad

3.3.5 Déficit o excedente ecológico

El cálculo del déficit o excedente ecológico, consiste en comparar los resultados obtenidos de la capacidad ecológica y de la huella ecológica. Esta comparación se realizó a nivel de subcuenca, microcuenca y localidad. Al restar la huella de la capacidad ecológica, los resultados negativos se consideraron como déficit y los positivos como excedente (Figura 40).

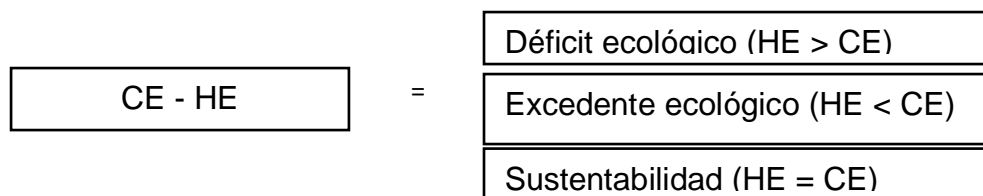


Figura 40. Cálculo para el déficit o excedente ecológico.

3.3.6 Espacialización de la huella ecológica

Para mostrar la huella ecológica de manera espacializada, se partió del supuesto de que los habitantes no impactan únicamente las áreas en donde se encuentran, sino que aprovechan los recursos naturales del ecosistema o de la microcuenca en general de manera distinta según su uso, por lo tanto, se le asignaron a cada pixel las hectáreas globales según la clase de superficie productiva y la microcuenca a la que pertenecía. De esta manera se obtuvo la huella ecológica por cada microcuenca espacializada de forma continua en toda la superficie analizada. Finalmente se conjuntaron los mapas de las nueve microcuencas para tener el mapa de la subcuenca. Para obtener la huella ecológica por habitante, se dividieron los valores del mapa resultante entre la población de cada microcuenca.

Además, el mismo procedimiento fue útil para determinar la capacidad ecológica con la finalidad de comparar los mapas y obtener el déficit o excedente ecológico espacializado.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1 Huella ecológica por superficie productiva

La huella ecológica de las superficies productivas varía de acuerdo con el año analizado y de la metodología aplicada; sin embargo, los resultados de las tres metodologías coinciden en que la superficie productiva con mayor huella es la de cultivos, seguida de bosques, áreas de absorción de CO₂ y finalmente, áreas de ocupación directa y de pastos (Figura 41).

La tendencia de la huella ecológica por superficie productiva de 1990 a 2014, coincide en las tres metodologías, mostrando un pequeño aumento en las áreas de cultivo y ocupación directa, y una disminución en las áreas de pastos, bosques y de absorción de CO₂.

Los resultados anteriores reflejan que en la subcuenca los habitantes obtienen la mayor cantidad de bienes y servicios de superficies de cultivo y bosques, situación que ha prevalecido desde 1990 hasta la fecha, lo cual puede deberse a que en la subcuenca, la mayoría de las localidades son rurales.

La cantidad de superficie para la absorción de CO₂ es pequeña comparada con la que se requiere a nivel mundial y nacional que ocupa alrededor de 50% de la huella ecológica total en ambos casos (Global Footprint Network, 2010). En la subcuenca, este porcentaje se encuentra entre 5.6% y 6.8%. Lo anterior puede deberse a que la mayoría de las localidades de la subcuenca son rurales, por lo tanto, la población y el tráfico vehicular son menores que en áreas urbanizadas y la actividad industrial es prácticamente nula, lo que demuestra que la manera en que se utilizan los recursos y la cantidad que se requiere, varían en cada región y no son homogéneos para un país o a nivel global.

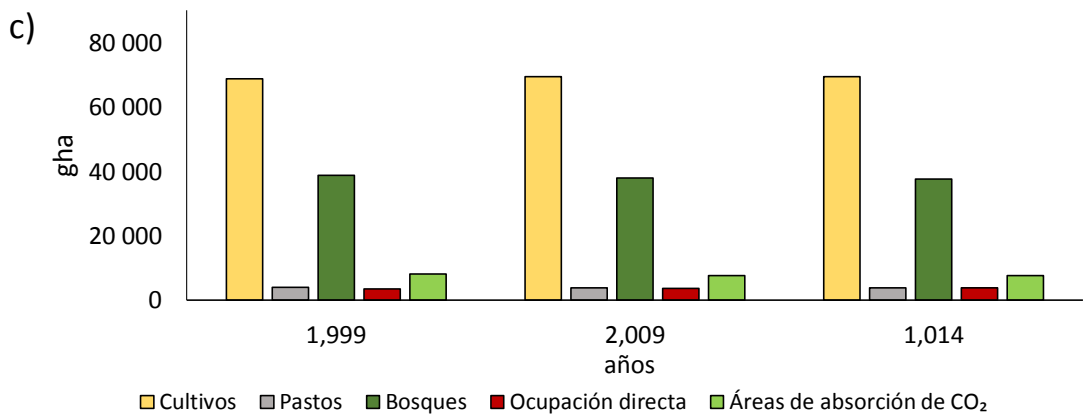
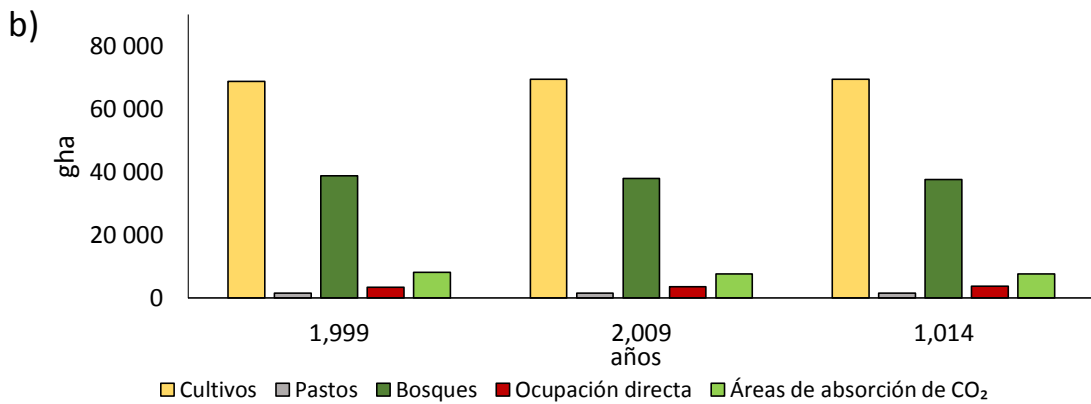
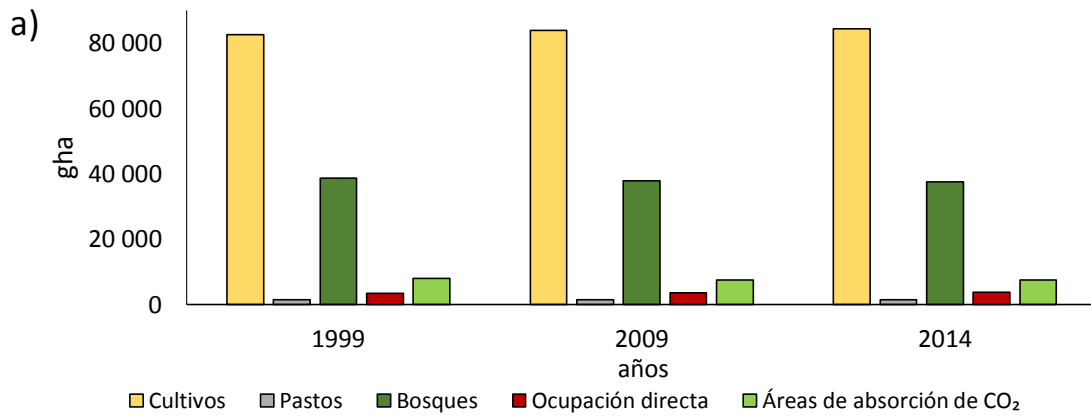


Figura 41. Huella ecológica por superficie productiva. a) Metodología 1, b) Metodología 2 y c) Metodología 3.

3.4.2 Huella ecológica de la subcuenca

La huella ecológica indica la cantidad de recursos naturales que se requieren para satisfacer las necesidades de consumo. En la subcuenca de Cointzio, la huella ecológica ha disminuido a la par que la reducción de la capacidad ecológica, sin embargo, de 1990 a 2014 ha sido mayor que la capacidad, debido a la falta de sustentabilidad en el manejo de los recursos. De acuerdo con los datos de la metodología con mejor calificación, en 1990 la huella ecológica de la subcuenca era de 122 842 gha que representa 2.91 gha hab⁻¹. En 2009, la huella ecológica total era de 122 449 gha y según su población, tenía una huella de 2.65 gha hab⁻¹. En 2014, la huella ecológica total era de 122 441 gha y la huella per cápita de 2.51 gha hab⁻¹.

Los resultados de huella ecológica varían según la variante metodológica empleada, pero en todos los casos se aprecia una disminución en los años analizados (Figura 42), lo cual está relacionado con la dinámica poblacional, y la cantidad y disponibilidad de los recursos naturales. En los años recientes, la cantidad de recursos es menor y el acceso que se tiene a ellos disminuye, por lo tanto, al aumentar la población existe una tendencia decreciente en la huella ecológica en la subcuenca.

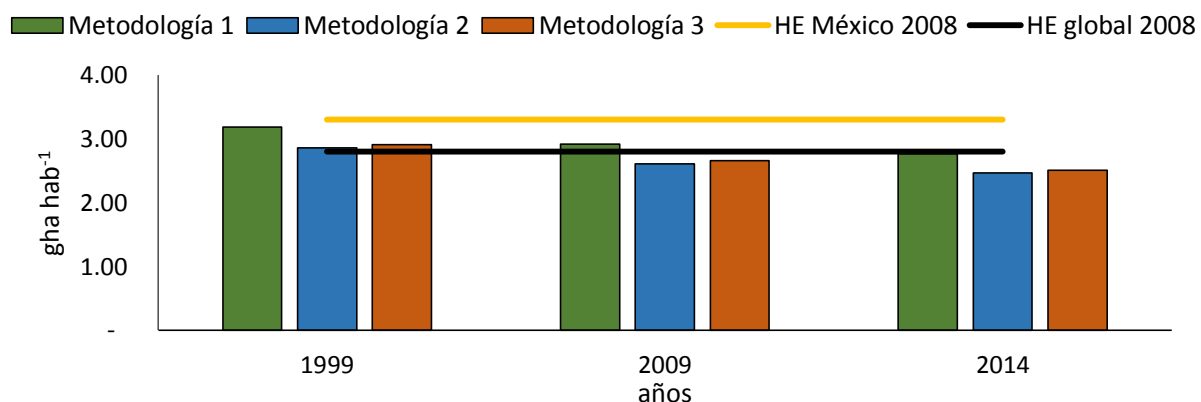


Figura 42. Huella ecológica de la subcuenca.

Comparado con datos obtenidos en estudios a nivel nacional y global, la huella ecológica por habitante de la subcuenca Cointzio es diferente. En 2008, se reportó a nivel nacional una huella de 3.3 gha hab⁻¹ (Global Footprint Network, 2008), menor a

la del área estudiada en 2009. A nivel global se reportó una huella de 2.8 gha hab⁻¹ muy cercana a la HE de la subcuenca Cointzio.

3.4.3 Huella ecológica por microcuenca

La huella ecológica de las microcuencas varía en los tres años analizados de acuerdo con la metodología empleada. Acuitzio y Umécuaro aumentaron con las tres metodologías, en cambio, Cuanajo, Fontezuelas y Huiramba disminuyen, y la tendencia de las microcuencas restantes no es clara (Cuadro 30).

Cuadro 30. Huella ecológica por microcuenca.

	Microcuenca	1999	2009	2014	1999	2009	2014
		gha	gha	gha	gha hab ⁻¹	gha hab ⁻¹	ghahab ⁻¹
Metodología 1	Acuitzio	21 386	21 657	21 830	2.53	2.28	2.14
	Atécuaro	9228	9234	9309	5.96	7.64	8.45
	Cuanajo	17 020	16 976	16 976	2.49	2.48	2.50
	Fontezuelas	6110	6027	6027	3.69	3.39	3.25
	Huiramba	19 587	19 552	19 522	1.95	1.66	1.52
	Jácuaro	8474	8782	8698	2.55	2.17	1.92
	Tirio	8 056	8 053	8 080	5.80	5.20	4.80
	Tiripetío	31 823	31 737	31 802	4.14	3.87	3.74
	Umécuaro	12 342	12 487	12 529	9.44	9.84	9.90
Metodología 2	Acuitzio	19 683	20 070	20 261	2.49	2.25	2.12
	Atécuaro	5561	5466	5420	3.59	4.52	4.92
	Cuanajo	16 358	16 134	16 055	2.39	2.36	2.37
	Fontezuelas	4508	4380	4325	2.72	2.46	2.33
	Huiramba	18 438	18 330	18 335	1.84	1.56	1.43
	Jácuaro	6348	6267	6318	1.91	1.55	1.40
	Tirio	7345	7341	7366	5.29	4.74	4.38
	Tiripetío	28 600	28 344	28 418	3.72	3.46	3.34
	Umécuaro	12 305	12 458	12 491	9.41	9.82	9.87
Metodología 3	Acuitzio	19 757	20 074	20 337	2.49	2.25	2.12
	Atécuaro	5597	5503	5449	3.61	4.55	4.95
	Cuanajo	16 429	16 153	16 118	2.40	2.36	2.38
	Fontezuelas	4736	4604	4517	2.86	2.59	2.43
	Huiramba	19 126	19 007	18 997	1.91	1.61	1.48
	Jácuaro	6493	6378	6418	1.95	1.57	1.42
	Tirio	7346	7344	7366	5.29	4.74	4.38
	Tiripetío	29 645	29 312	29 387	3.86	3.58	3.46
	Umécuaro	12 346	12 475	12 526	9.44	9.83	9.89

A pesar de la variación de los resultados con las tres metodologías, los datos coinciden en que la microcuenca con mayor huella es Tiripetío, lo cual se asocia con un mayor número de habitantes, razón por la que requiere de más recursos. La microcuenca con menor huella ecológica es Fontezuelas con menor número de habitantes. En la Figura 43 se muestra la huella para el año 2014. Las variaciones en 1999 y 2009 se presentan en el Anexo 9.

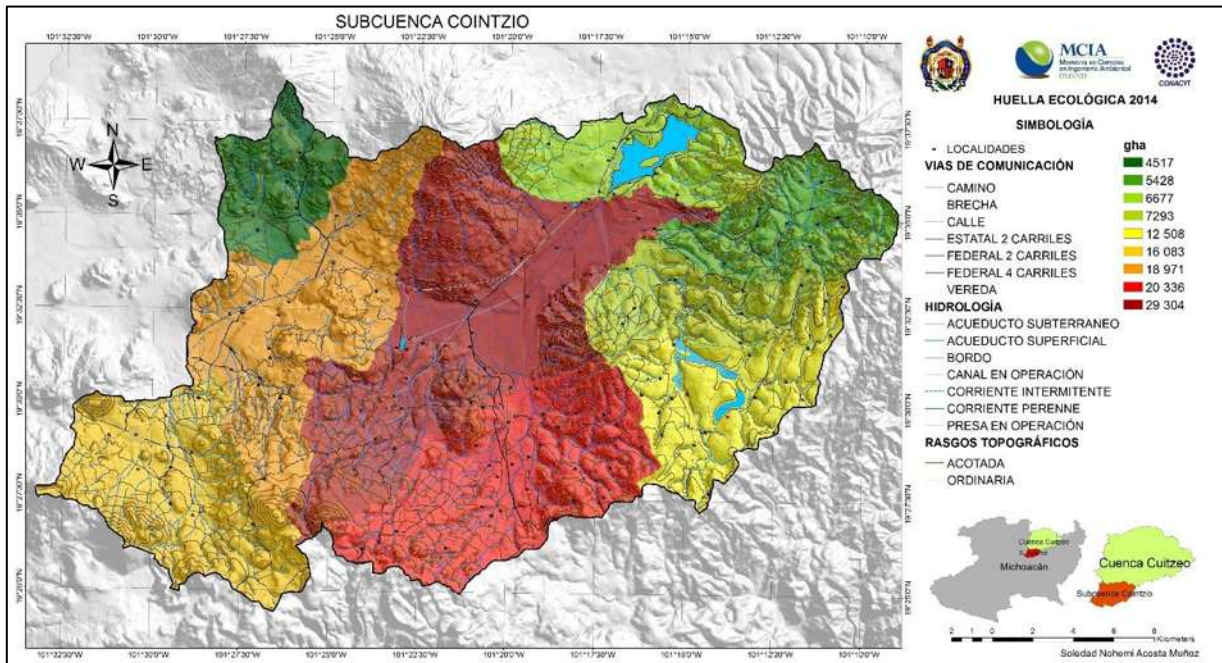


Figura 43. Huella ecológica por microcuenca en 2014.

La huella ecológica más grande por habitante se presenta en la microcuenca de Umécuaro en donde el número de habitantes no es alto; sin embargo, los recursos se han degradado en los años analizados. La menor huella por habitante la tiene la microcuenca de Huiramba a pesar de ser la de mayor población y ocupar el tercer lugar en la huella total. La variación en la subcuenca, señala que tanto la huella como la capacidad ecológica son indicadores diferentes para cada región, incluso en áreas pequeñas. Las microcuencas de Acuitzio, Cuanajo, Fontezuelas, Huiramba y Jácuaro presentan huellas ecológicas menores a las reportadas a nivel nacional y mundial. Tiripetío tiene una huella ecológica parecida a la del país, sin embargo, las de Atécuaro, Tirio y Umécuaro son superiores a las reportadas para México y a nivel mundial (Figura 44).

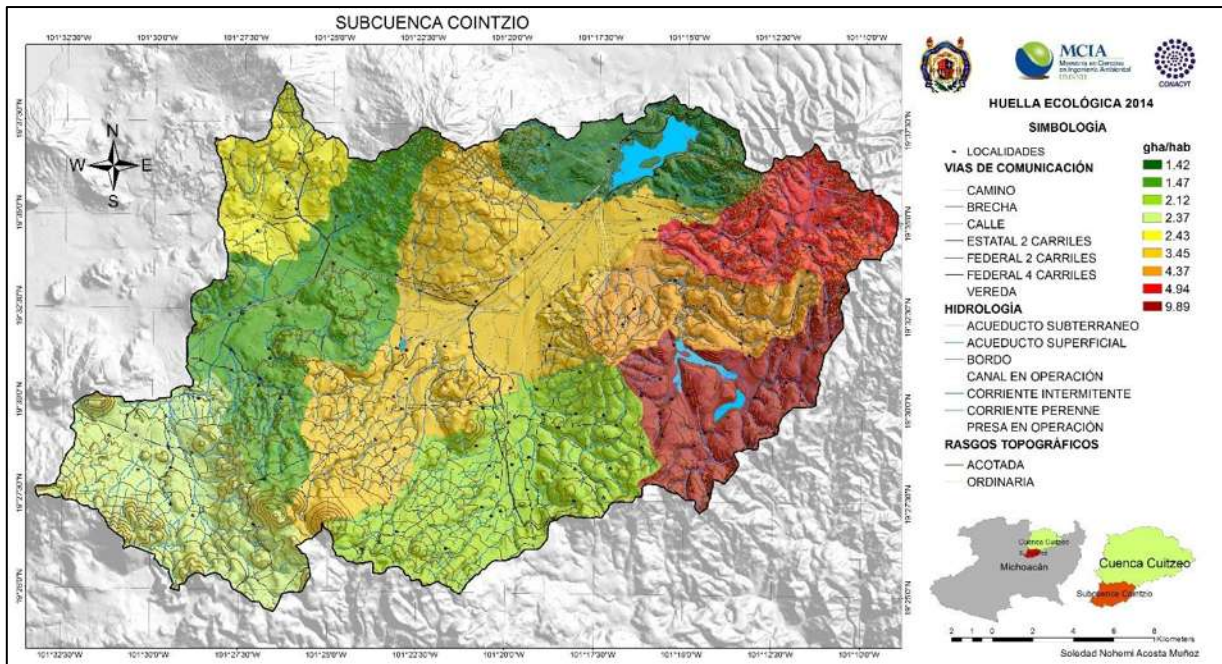


Figura 44. Huella ecológica por habitante de las microcuencas en 2014.

La huella ecológica de las microcuencas por habitante, depende tanto de la cantidad de habitantes como de la degradación de recursos y la demanda de superficies productivas, por ejemplo, algunas microcuencas requieren con el tiempo mayor cantidad de recursos a medida que la población aumenta, por lo tanto la huella por habitante permanece constante. En algunos casos, se requieren más recursos sin que haya aumento en la población, motivo por el que la huella por habitante incrementa. Los mapas de huella ecológica por habitante en las microcuencas para los años 1999, 2009 y 2014 se muestran en el Anexo 10.

El tamaño de la microcuenca no influye de manera directa en el uso de los recursos naturales, es decir, la huella ecológica por habitante no depende de la superficie de cada microcuenca, por ejemplo, la microcuenca de Tiripetío, una de las más grandes de la subcuenca y Tirio que es de las más pequeñas, tienen huellas ecológicas parecidas.

3.4.4 Evaluación de las metodologías

En orden de importancia, los criterios tomados en cuenta para evaluar las metodologías se presentan en el Cuadro 31.

Cuadro 31. Peso de los criterios para la evaluación de las metodologías.

Criterio	Descripción	Peso
4	Que refleje el consumo aparente de manera indirecta	0.4628
1	Que muestre la degradación de los recursos y la demanda de espacios.	0.2748
5	Que tome en cuenta la productividad local.	0.1612
2	Calidad en los datos de uso de suelo y vegetación en las tres fechas analizadas.	0.0651
3	Facilidad de aplicación de la metodología	0.036

En cuanto a los criterios uno, cuatro y cinco, la metodología más adecuada es la tres; con respecto a la calidad de datos, las metodologías dos y tres tienen el mismo peso; y en cuanto a la facilidad de aplicación, la metodología uno es la mejor (cuadro 32).

Cuadro 32. Peso de las metodologías respecto a los criterios

Criterios	Metodología		
	1	2	3
1	0.1634	0.297	0.5396
2	0.0909	0.4545	0.4545
3	0.7258	0.1721	0.102
4	0.1172	0.2684	0.6144
5	0.1095	0.309	0.5816

La metodología tres obtuvo la mejor calificación en la evaluación, por lo que los análisis posteriores se realizaron con ésta (Cuadro 33).

Cuadro 33. Calificación de las metodologías

Metodología	1	2	3
Calificación	0.15	0.29	0.56

3.4.5 Huella ecológica por localidad

La huella ecológica por localidad está relacionada con la huella de las microcuencas y con la cantidad de habitantes. En el año 1999, 126 localidades tenían una huella ecológica menor a 1340 gha, 15 presentaban entre 1340 y 2838 gha y sólo siete localidades tenían huellas ecológicas mayores a 2839 gha (Figura 45).

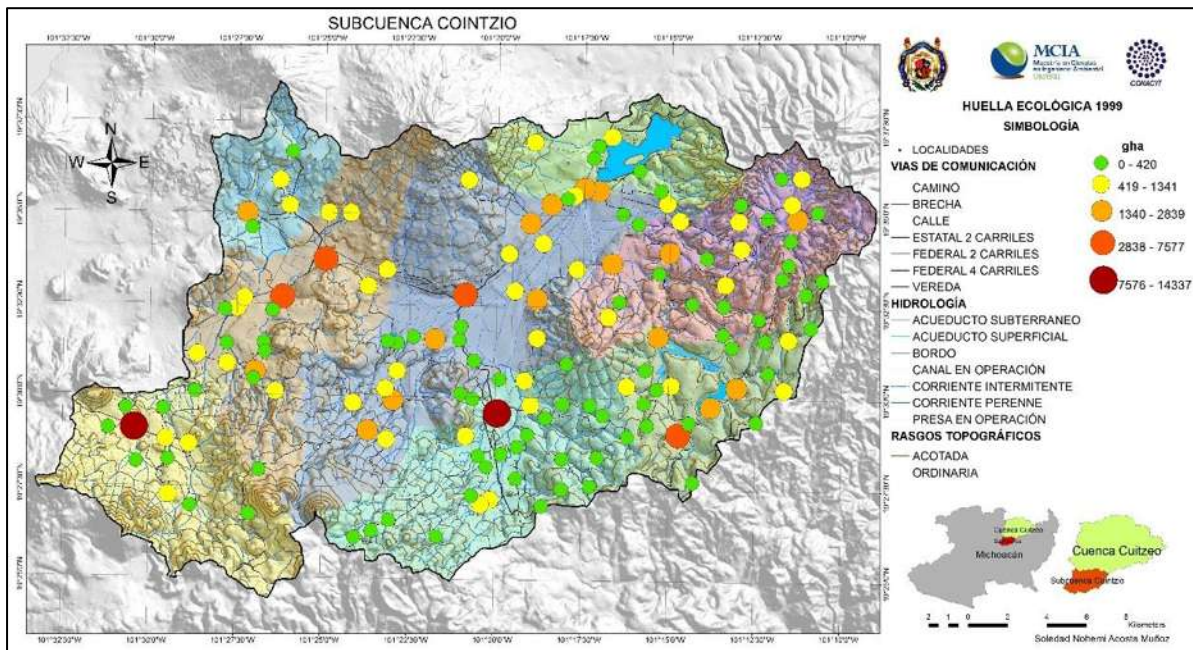


Figura 45. Huella ecológica de las localidades en 1999.

En el año 2009, 125 localidades tenían una huella ecológica menor a 1384 gha; 18 presentaban una huella ecológica entre 1385 y 3395 gha, y cinco tenían más de 3396 gha (Figura 46).

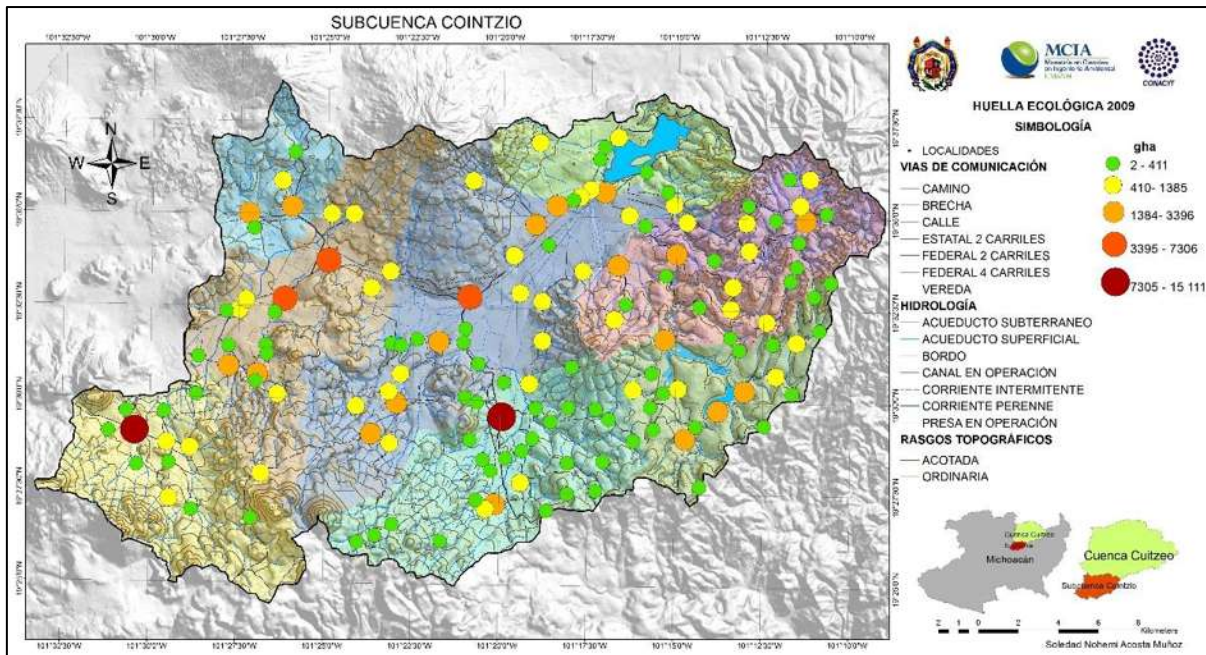


Figura 46. Huella ecológica de las localidades en 2009.

Para el año 2014, 120 localidades tenían una huella ecológica menor a 1013 gha; 18, entre 1013 y 2224 gha, y 10 tenían huellas mayores a 2224 gha (Figura 47).

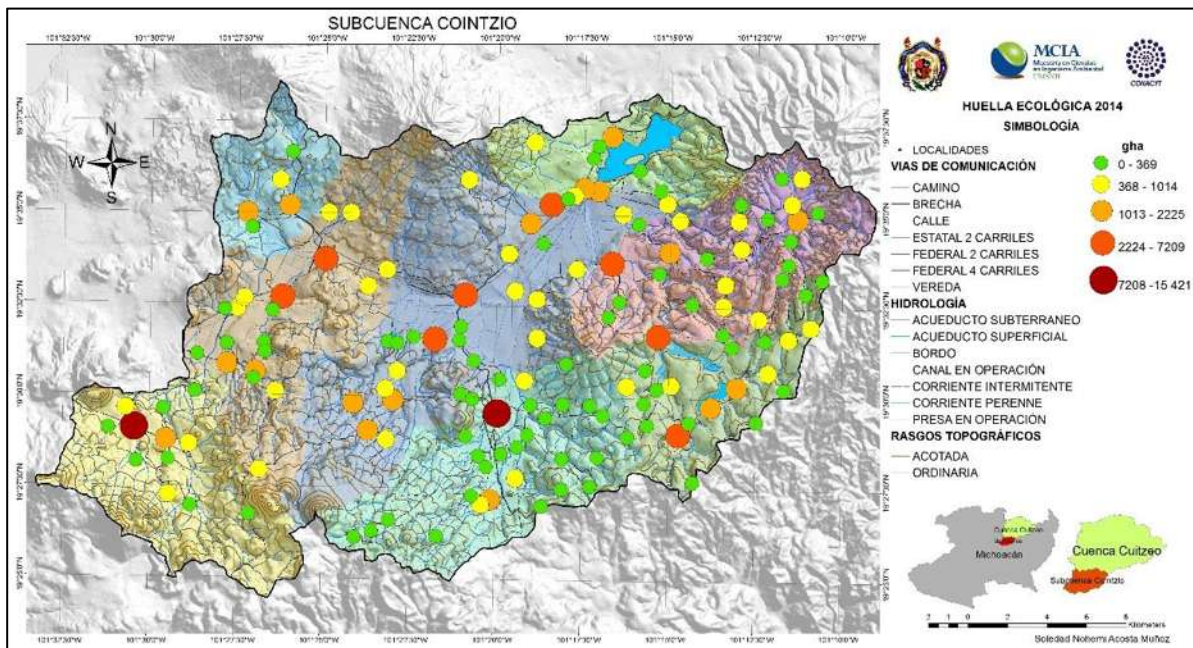


Figura 47. Huella ecológica de las localidades en 2014.

En la microcuenca de Acuitzio la huella ecológica aumenta de manera general; sin embargo, en algunas localidades disminuye, debido a la dinámica en el crecimiento de la población. En 16 localidades la huella ecológica aumentan y 13 disminuyen. La localidad con menor huella ecológica es Tepatzicuaro con menos de 5 gha en los tres años y la de mayor huella es Acuitzio del Canje con más de 14 000 gha (Cuadro 34).

Cuadro 34. Huella ecológica de las localidades de Acuitzio

Localidades	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Acuitzio del Canje	15 111	15 420	14 336
Los Aguacates	229	223	241
El Auxilio (Los Tanques)	146	110	251
La Campana	227	216	246
Cruz Gorda	20	6	174
Cútzaro (Cúzaro)	1490	1634	1223
Huajumbo	471	496	420
La Laja	155	150	164
La Palma	646	657	619
Páramo	505	473	572
El Paredón	54	42	87
Paso del Muerto	81	83	75
Tamanguío	382	335	492
Tirípano	411	369	502
El Varal	180	184	167
La Vinata	126	95	214
Agua Grande	27	19	52
Agua Puerca	16	4	157
Corralo (Tirindiriz)	164	172	147
La Peñita	301	314	273
Rosa de Castilla	117	87	204
El Terrero	29	17	94
La Huizata	126	174	65
Las Juntas	175	237	94
El Melón	43	38	55
El Moral	2	-	50
Loma del Pastor	43	53	27
Colonia Francisco Villa	33	33	33
Tepatzicuaro	2	2	2

En la microcuenca de Atécuaro, ocho localidades aumentan su huella ecológica y cuatro disminuyen. En esta área la menor huella ecológica se observa en la localidad Cañada de Buena Vista y la mayor en Atécuaro (Cuadro 35).

Cuadro 35. Huella ecológica de las localidades de Atécuaro

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Atécuaro	1983	2105	1646
La Cofradía	567	498	695
Las Cruces	740	740	691
Huertitas	454	434	465
Zimpanio Sur	481	419	591
El Taray	218	197	245
El Salto	32	25	50
Torrecillas	191	158	259
La Ciénega (Torrecillas de Atécuaro)	231	177	371
La Laguna (Los Caracoles)	59	163	7
Cañada de Buena Vista	41	30	76
El Arenal	490	478	483

En el caso de la microcuenca de Cuanajo, a pesar de que la huella ecológica disminuye de manera general, cuatro de las localidades aumentan las hectáreas globales que necesitan para satisfacer de sus necesidades de consumo (Cuadro 36).

Cuadro 36. Huella ecológica de las localidades de Cuanajo

Localidades	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
La Presa	283	315	233
Canacucho	1248	1280	1223
Cuanajo	11 205	11 026	11 938
La Noria	231	216	273
Pueblo Nuevo	233	218	273
Unguarán (Inguarán)	579	590	576
Yuretzio (La Mesa)	575	595	554
Agua Nueva	21	9	96
Colonia La Cantera	400	427	427
Curine	7	7	7
El Tigre (Rincón de Catácuaro)	28	31	31

La microcuenca de Fontezuelas disminuyó su huella ecológica y sus localidades conservan esa tendencia. El requerimiento de superficies productivas varía de menos de 10 gha en La Calzada del Obispo a más de 1900 gha en Fontezuelas (Cuadro 37).

Cuadro 37. Huella ecológica de las localidades de Fontezuelas.

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
La Caja	1577	1685	1341
Fontezuelas	2181	1978	2575
Las Pilas	854	847	841
La Loma	13	12	12
La Calzada del Obispo	8	7	7

En la microcuenca de Huiramba, a pesar de que la huella ecológica disminuye, 50% de sus localidades aumentan las hectáreas globales que requieren (Cuadro 38).

Cuadro 38. Huella ecológica de las localidades de Huiramba.

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Huiramba	4849	4749	5008
El Carmen	561	508	678
Joya Chica	55	46	76
El Pedregal	1890	2134	1468
La Providencia	144	127	183
Quiríngaro (San Simón Quiríngaro)	393	335	539
El Refugio	37	27	69
El Sobrado	1455	1517	1325
Las Tablas	939	975	861
Las Trojes	129	127	131
La Reunión	292	304	267
El Sauz	471	480	449
El Llanito	24	24	24
Lagunillas	4022	3845	4359
Huatzangio	803	725	977
Ojo de Agua de Pastores	801	926	594
El Romeral (El Jicote)	645	666	600
San José Coapa	998	933	1131
Condébaro	477	524	392

En la microcuenca de Jácuaro, huella ecológica de las localidades varía de menos de 10 gha en la localidad Quinta María José a casi 3000 gha de Santiago Undameo (Cuadro 39).

Cuadro 39. Huella ecológica de las localidades de Jácuaro

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Arroyo Colorado	298	266	378
Joya De La Huerta	618	627	602
Nueva Florida	758	759	758
Estación Jácuaro (Colonia La Reunión)	1385	1365	1431
Santiago Undameo	2396	2211	2828
Uruapilla	1174	1408	819
La Sanguijuela	12	10	16
Quinta María José	7	6	6
El Aguaje	28	27	27

En la microcuenca de Tirio, la huella ecológica varía de menos de 15 gha del Rancho Maldonado a más de 2500 gha de la localidad de Tirio. Ocho localidades aumentaron su huella de 1999 a 2014 y 5 disminuyeron (Cuadro 40).

Cuadro 40. Huella ecológica de las localidades de Tirio

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Buenvista	713	624	887
Campichahua	497	594	329
Puerto Del Madroño	488	563	350
El Escobal	1468	1443	1446
Loma Puerto Del Tigre (Loma Del Tigre)	136	108	209
Puentecillas (Puentecitas)	333	312	360
Tirio	2974	3159	2505
Puente Gallegos	61	48	89
La Palmita (La Trampa)	427	325	694
Puerto De Celaya	28	17	63
La Codorniz	52	52	47
Patambo	70	35	251
Rancho Maldonado	14	13	16

Las localidades de la microcuenca de Tiripetío presentan huellas ecológicas que varían de 21 gha en Carindapaz (San Francisco), a más de 7000 gha de la comunidad de Tiripetío que es una de las localidades con mayor huella ecológica de la subcuenca. 16 localidades disminuyen su huella ecológica y 12 aumentan (Cuadro 41).

Cuadro 41. Huella ecológica de las localidades de Tiripetío.

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
La Angostura	830	886	734
Aróstaro	53	59	46
La Florida	36	38	38
San Andrés Coapa	1868	1766	2105
La Tinaja	200	224	158
Yerbabuena Vieja	271	276	276
El Bañito	135	159	100
Cuanajillo Del Toro	574	524	695
Chihuerio	2064	2225	1790
La Estancia	2812	2921	2628
Isaac Arriaga (Noriega)	1076	997	1268
La Maiza	763	766	761
Potrerosillos	1290	1390	1122
Pueblo Viejo	716	714	726
El Reparó	1472	1307	1883
San Antonio Coapa	1126	976	1518
San Carlos Coapa	723	573	1160
San Miguel Coapa	631	662	580
San Rafael Coapa	2905	2953	2839
Santa Rosalía	470	593	300
Tiripetío	7306	7209	7577
La Yerbabuena	823	1014	549
San Rafaelillo (La Haciendita)	171	183	150
Hermenegildo Galeana	499	448	622
El Mesón Colorado	239	266	196
El Reparó	1472	1307	1883
Carindapaz (San Francisco)	21	21	21
El Barretero Tercera Etapa	60	62	62

Para las localidades de la microcuenca de Umécuaro, la huella ecológica varía de 10 gha en El Renoyal a más de 3000 gha en la localidad de Nieves. Aunque la huella ecológica aumenta de manera general en la microcuenca, localidades como Los Capulines y Las Mesitas disminuyen su huella de 1999 a 2014 (Cuadro 42).

Cuadro 42. Huella ecológica de las localidades de Umécuaro.

Localidad	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Las Canoas	491	405	707
La Pera	29	30	30
Curimeo	196	237	132
Hojas Anchas	726	573	1140
Loma Caliente	1786	1769	1781
Nieves	3258	3033	3665
Ojo De Agua	137	69	575
La Artesa	471	395	641
Las Palomas	383	494	226
Rancho Viejo	39	20	198
Las Tinajas (La Tinaja)	98	99	104
Umécuaro	3396	3745	2714
Puente Hernández	118	207	38
El Landín	98	99	94
Los Capulines	108	158	47
Las Mesitas	137	168	94
Palo Amarillo	147	158	158
El Tejocote (La Cortina)	785	840	840
El Renoyal	10	10	10

3.4.6 Déficit o excedente ecológico

En la subcuenca Cointzio, la huella ecológica es mayor a la capacidad ecológica a pesar de que ha disminuido, por lo tanto, existe un déficit en los tres años analizados. En 1999 el déficit era de 10 971 gha, valor que aumentó a 11 309 gha en 2009 y a 11 242 gha en 2014(Figura 48).

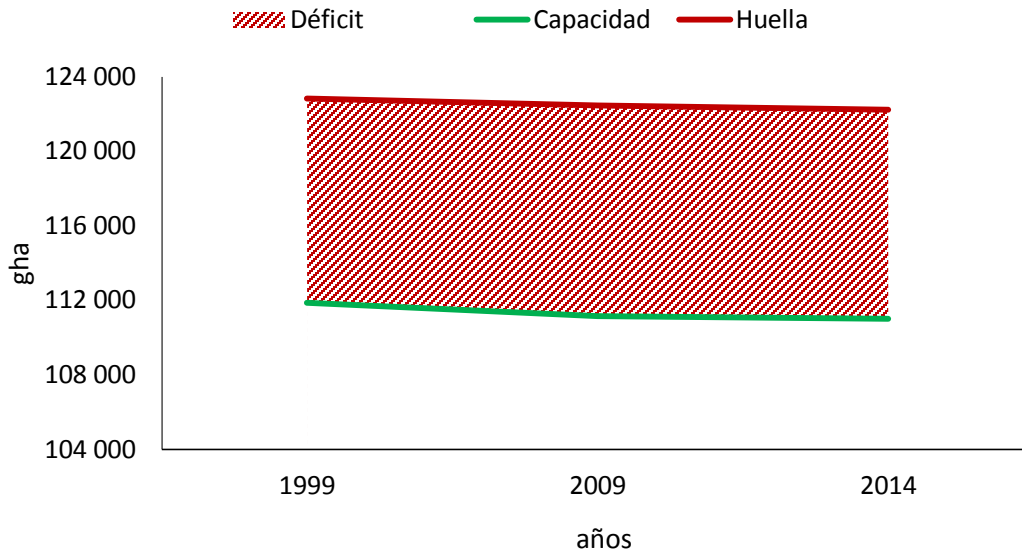


Figura 48. Déficit ecológico de la subcuenca.

A pesar de las hectáreas globales registradas como déficit en la subcuenca, al dividir entre los habitantes el déficit no es tan grande. El déficit per cápita en 1999 fue de 0.26 gha hab⁻¹, en 2009 de 0.24 gha hab⁻¹ y en 2014 de 0.23 gha hab⁻¹ (Figura 49), que comparados con el déficit a nivel global y nacional, los valores anteriores son pequeños. En 2008 se registró un déficit ecológico global de 1.1 gha hab⁻¹ (Martínez, 2008) y nacional de 1.88 gha hab⁻¹ (Global Footprint Network, 2008)

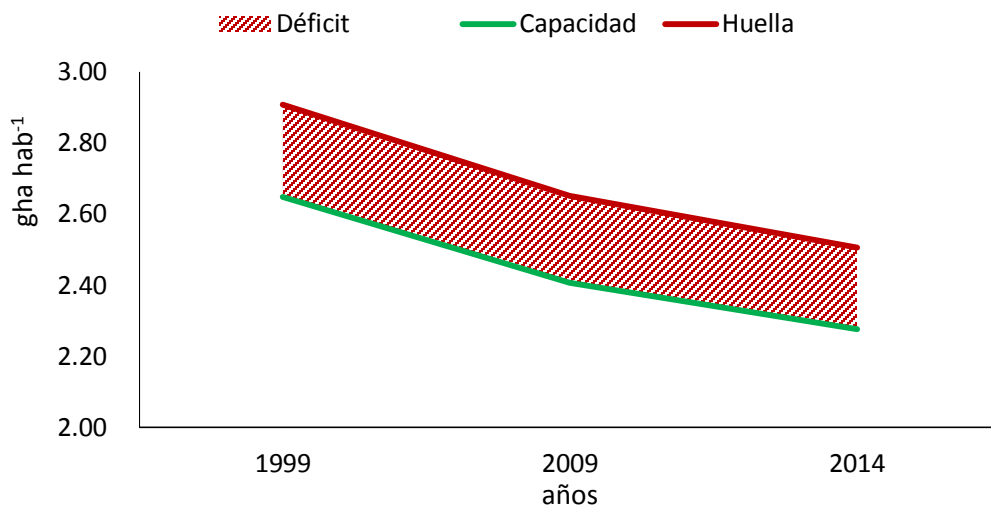


Figura 49. Déficit ecológico por habitante de la subcuenca.

El déficit o excedente ecológico nacional o global, no reflejan la realidad de cada región. La situación a nivel local, depende de la manera en que se utilizan los recursos naturales, de la degradación de las áreas forestales y de la demanda de superficies para actividades agropecuarias, así como del desarrollo urbano. Las localidades de la subcuenca Cointzio, son principalmente rurales; por lo tanto, la densidad poblacional, el tráfico vehicular y la presencia de industrias son menores, mientras que los recursos forestales y agropecuarios son mayores y más fáciles de adquirir.

La dinámica poblacional, la capacidad de regeneración de los ecosistemas, el desarrollo tecnológico y la situación socioeconómica, cultural y política son aspectos fundamentales y únicos de cada región, éstos se reflejan en la capacidad, la huella y el déficit o excedente ecológico local.

Las nueve microcuencas también presentan déficit ecológico, pues su huella supera a su capacidad en los tres años analizados; la microcuenca con mayor déficit es Tiripetío con más de 2000 gha, mientras que la de menor déficit es la de Atécuaro con alrededor de 200 gha; las microcuencas de Acuitzio, Cuanajo y Umécuaro tienen déficit mayor a 1000 gha y en el resto de las microcuencas el déficit es menor a 800 gha (Cuadro 43).

Cuadro 43. Déficit ecológico por microcuenca.

Microcuenca	Años		
	1999	2009	2014
	gha	gha	gha
Acuitzio	-1102	-1149	-1299
Atécuaro	-250	-187	-147
Cuanajo	-1588	-1395	-1355
Fontezuelas	-175	-137	-135
Huiramba	-2361	-2462	-2516
Jácuaro	-685	-790	-851
Tirio	-353	-430	-439
Tiripetío	-2011	-2082	-2268
Umécuaro	-1083	-1077	-1105

La microcuenca con mayor déficit ecológico por habitante es Umécuaro con más de 0.8 gha hab⁻¹ y la de menor déficit es Fontezuelas con menos de 0.11 gha hab⁻¹. Umécuaro, a aunque es de las microcuencas con menor número de habitantes, tienen mayor déficit en hectáreas globales (Figura 50). Las nueve microcuencas tienen déficit ecológico por habitante menor que lo registrado tanto para México como a nivel global. Los mapas de déficit ecológico para los años 1999 y 2009 pueden consultarse en el Anexo 11.

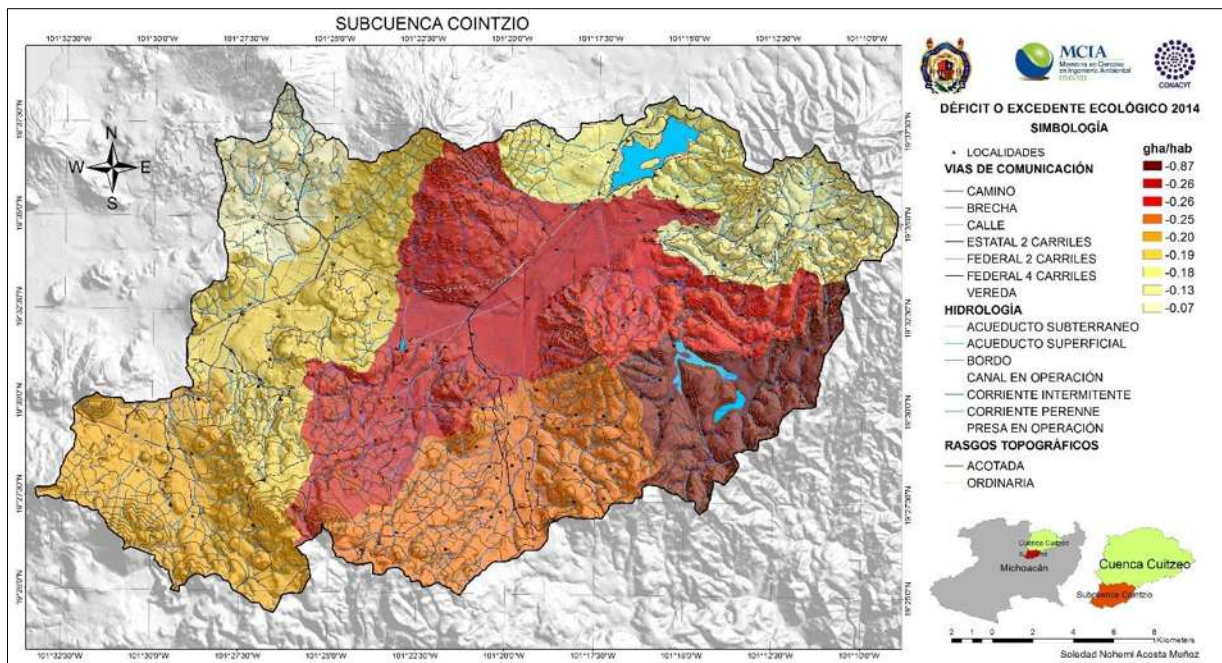


Figura 50. Déficit ecológico por habitante de las microcuencas.

En cuanto a las localidades, cuatro de ellas presentan un excedente ecológico: la localidad de Agua Puerca de Acuitzio; La Loma del municipio de Lagunillas, en la microcuenca Fontezuelas; La calzada del obispo de Fontezuelas, en el municipio de Tzintzuntzan y Puerto de Celaya del municipio de Morelia, en la microcuenca de Tirio. Las 143 localidades restantes tienen déficit ecológico en los tres años analizados. En la Figura 51 se observa el déficit o excedente ecológico de las localidades durante el año 2014. Los mapas de 1999 y 2009 se pueden consultar en el Anexo 12.

Entre las localidades con mayor déficit ecológico se encuentran Acuitzio del Canje, Tiripetio, Lagunillas, huiramba y Cuanajo. La mayoría de las localidades tienen déficit menor a 195 gha; 10, entre 196 y 503 gha; cuatro 504 y 1856 gha y sólo una tiene déficit mayor de 1856 gha.

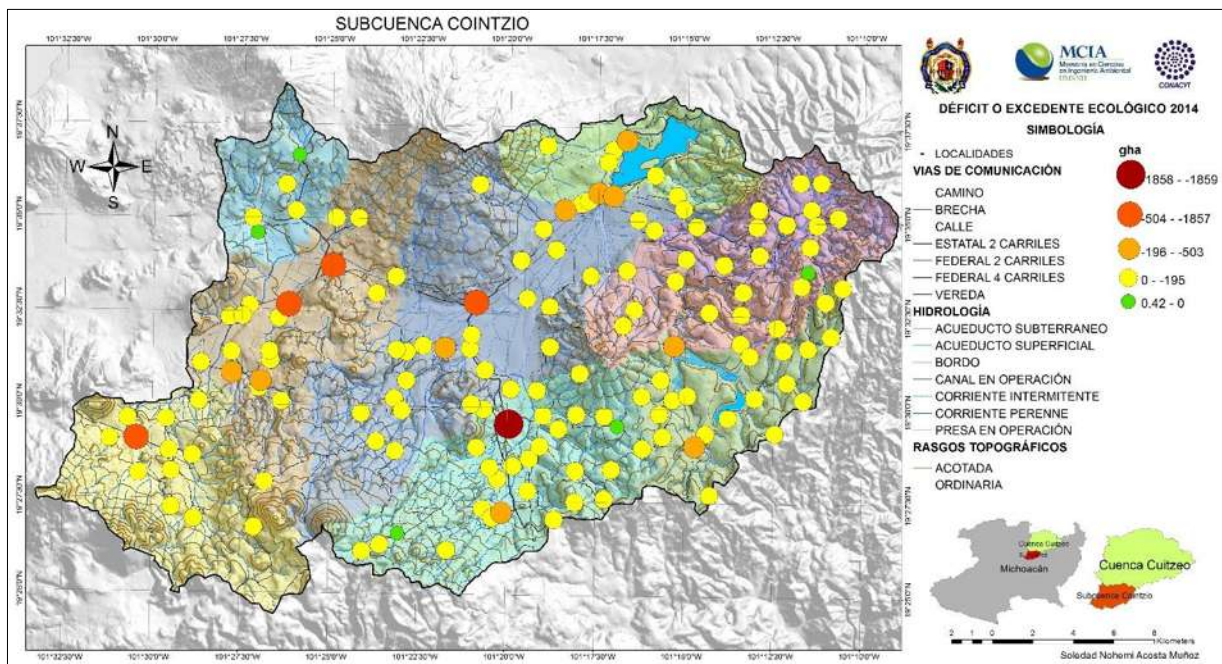


Figura 51. Déficit ecológico por localidad en 2014.

Puede observarse que tanto a nivel de subcuenca como de microcuencas y localidades se tiene un déficit ecológico de manera general, que a pesar de ser menor a los registros nacionales y globales, son números negativos que indican el uso inadecuado o insustentable de los recursos naturales en la región.

3.4.7 Espacialización de la huella ecológica

Dentro de las microcuencas, la huella ecológica varía ya sea por localidad o por superficie productiva. En cada localidad se requiere diferente cantidad de recursos dependiendo del uso que se les da y de la cantidad de habitantes que tienen. Existen localidades en las que su economía depende en gran medida del uso de los recursos forestales, mientras que otras se dedican más a la agricultura o a la ganadería. Espacializar la huella ecológica por superficie productiva, permite visualizar desde una perspectiva espacial aquellas áreas en las que se ejerce mayor presión por parte de los habitantes de las microcuencas, así como las áreas en las que se utilizan los recursos de manera más sustentable o menos sustentable.

Lo anterior, permite observar en qué parte de la subcuenca o microcuenca y en qué recursos y áreas en específico se necesita implementar actividades que promuevan un desarrollo más sustentable.

La huella ecológica de las superficies varía con respecto a los años analizados. En esta sección se presentan los mapas espacializados por superficie productiva de huella y déficit o excedente ecológico para el año 2014. Las variaciones en 1999 y 2009 así como los mapas espacializados de capacidad ecológica se muestran en el Anexo 13.

La huella ecológica más grande se presenta en las áreas de cultivo de microcuenca de Tiripetío con 19 324 gha en 1999, 19 187 gha en 2009 y 19 230 gha en 2014. En las microcuencas de Acuitzio, Huiramba y Umécuaro también se presentan huella ecológicas altas en las áreas de cultivo, de 9000 gha a más de 12 500 gha. Las áreas de pastos y ocupación directa en todas las microcuencas son las que presentan menor huella ecológica y en las áreas de bosques, las huellas son intermedias (Figura 52).

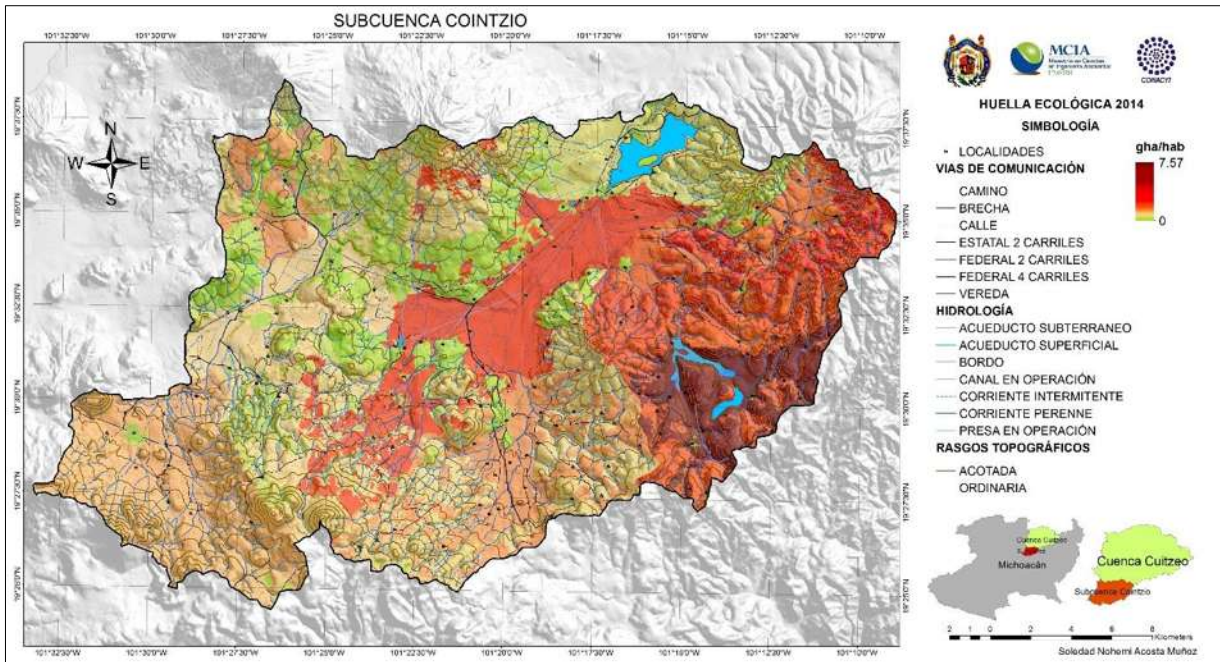


Figura 53. Huella ecológica por habitante espacializada para 2014.

Comparando los datos de huella con los de capacidad, el déficit ecológico más alto se presentó en las áreas de cultivos de la microcuenca de Acuitzio con 1264 gha en el año 1999, 1349 gha en 2009 y 1465 gha en 2014 con tendencia al aumento. En las áreas de absorción de CO₂ de la microcuenca de Huiramba, el déficit fue de 1294 gha en 1999, 1349 gha en 2009 y 1406 gha en 2014, también con tendencia al aumento. En las áreas de cultivo de Umécuaro se obtuvieron valores de 1000 gha a más de 1100 gha también con tendencia al aumento en los años analizados. Algunas áreas de pastos en las microcuencas de Atécuaro y Fontezuelas presentan excedentes ecológicos que llegan a 551 gha (Figura 54).

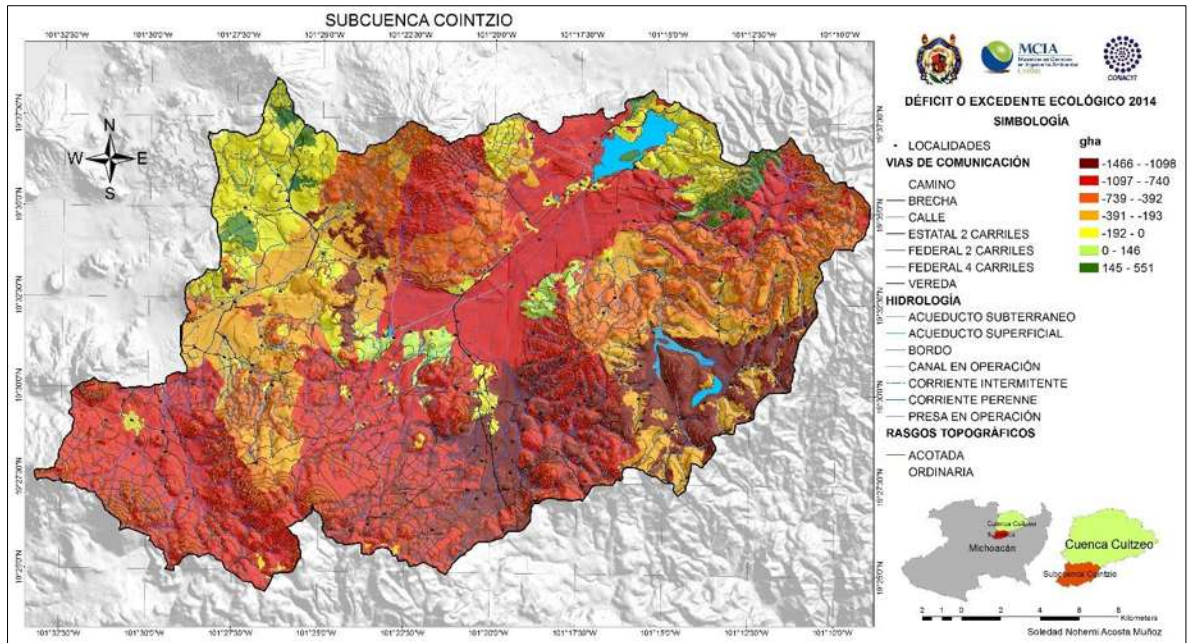


Figura 54. Déficit o excedente ecológico espacializado para 2014.

El déficit por habitante más grande se presenta en las áreas de cultivo de Umécuaro con $0.82 \text{ gha hab}^{-1}$ en el año 1999, $0.87 \text{ gha hab}^{-1}$ en 2009 y $0.90 \text{ gha hab}^{-1}$ en 2014; sólo en las áreas de pastos de la microcuenca Atécuaro se observa un excedente que llega a 0.5 gha hab^{-1} en 2014 (Figura 55).

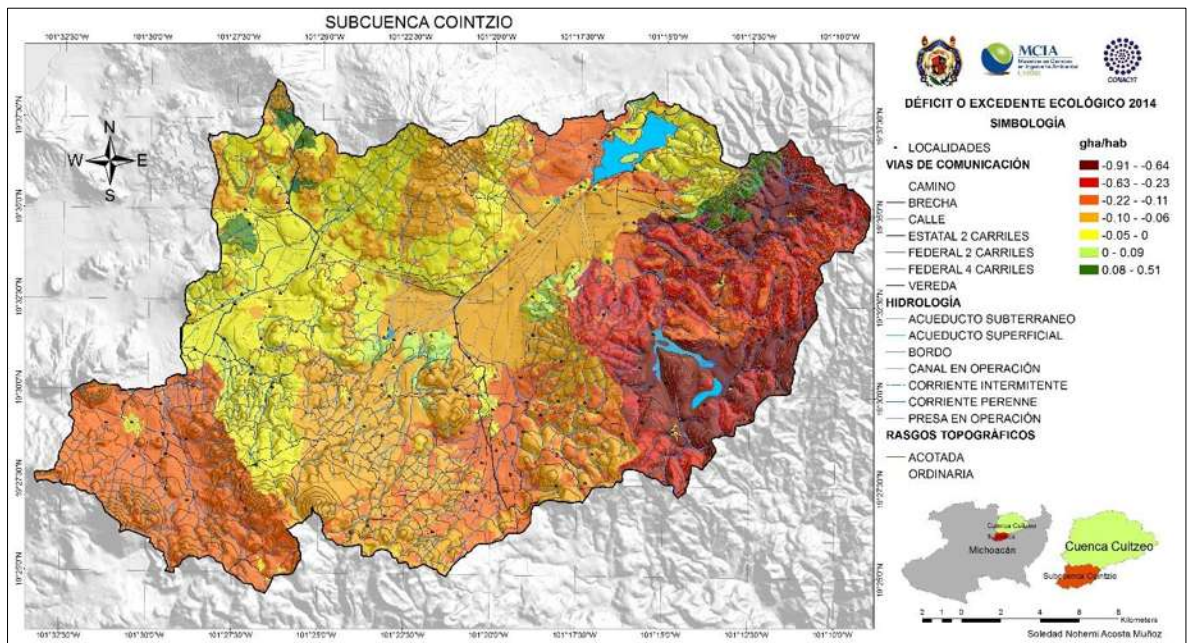


Figura 55. Déficit ecológico por habitante espacializado para 2014.

3.5 CONCLUSIONES

La huella ecológica se puede estimar en una subcuenca hidrológica de manera indirecta, a partir del análisis multitemporal de degradación de recursos y demanda de superficies productivas, mediante sistemas de información geográfica y teledetección, pero considerando los aspectos generales de cálculo a nivel nacional y mundial.

En la subcuenca Cointzio, la huella ecológica ha variado de 2.91 a 2.51 gha hab⁻¹ de 1999 a 2014, valores similares al promedio mundial de huella ecológica y menores a los de nivel nacional.

El comportamiento de la huella ecológica y la capacidad ecológica es distinto en cada región y conocerla a escala nacional o global, no indica lo que sucede a escala local. La dinámica poblacional, la capacidad de regeneración de los ecosistemas, el desarrollo tecnológico y la situación socioeconómica, cultural y política son aspectos fundamentales y únicos de cada región, éstos se reflejan en la capacidad, la huella y el déficit o excedente ecológico local.

En la subcuenca Cointzio el déficit ecológico es de 11 242 gha que representa 0.23 gha hab⁻¹. En la mayoría de las áreas de la subcuenca el déficit por habitante es menor a 0.15 gha hab⁻¹. En las nueve microcuencas y en la mayoría de las localidades fue evidente el déficit ecológico.

La huella ecológica se espacializó por superficie productiva considerando el uso de suelo, lo cual demuestra que es factible mostrar el comportamiento de esta en un contexto territorial, a diferencia de la forma puntual en que se presenta con las metodologías comunes.

Mediante la comparación entre la huella y la capacidad ecológica se obtuvo un indicador de sustentabilidad espacializado, que da un indicio del manejo de los recursos naturales a escala local. Lo cual es de importancia en la toma de decisiones para implementar actividades, programas o proyectos relacionados con el desarrollo sustentable y para la conservación.

3.6 RECOMENDACIONES

El déficit o excedente ecológico, indica si los recursos naturales se están usando en menor o mayor medida de la capacidad del ecosistema; sin embargo, cuando se habla de un excedente ecológico, no debe interpretarse como la oportunidad de sobreexplotar los recursos, sino como la oportunidad de realizar un manejo racional de los mismos, ya sea para su aprovechamiento o para cuestiones de conservación.

A pesar de tomar en cuenta los aspectos generales de cálculo para la huella ecológica, al comparar los datos locales con los nacionales y globales, debe considerarse que se obtuvieron mediante metodologías diferentes. En la actualidad, no existen estudios en otras cuencas hidrológicas con los que se puedan comparar o validar los resultados del presente trabajo, por lo que realizar estudios similares en otras cuencas del país sería importante.

Sin duda, la aplicación de la propuesta aquí desarrollada, proporcionaría un panorama diferente, al mostrar que el comportamiento de la huella ecológica en México no es homogéneo, tal como ocurre con las metodologías actuales.

Una línea de investigación futura es la búsqueda de estrategias de validación de los resultados de la estimación de la huella ecológica a diferentes escalas.

La obtención de los datos edafológicos para la estimación de la capacidad ecológica, es uno de los aspectos más complejos en la metodología, por lo cual, si se desea implementarla en otras cuencas, se debe tener cuidado tanto con la calidad como con la escala de los datos y realizar una búsqueda exhaustiva de dicha información.

Los datos de concentración de CO₂ en la atmosfera, obtenidos del satélite OCO-2 se encuentran solo a partir del año 2014, por lo que debe considerarse, que para los años anteriores se usó sólo un estimado. Tomar datos de CO₂ de los años estudiados, mejoraría la calidad de los resultados obtenidos.

Conocer el área de estudio, observar el estado de los recursos naturales y rectificar el uso de suelo y la cobertura vegetal en campo son aspectos fundamentales en la interpretación y comprensión de los resultados finales.

LITERATURA CITADA

Alphonse, C. B. 1997. Application of the analytic hierarchy process in agriculture in developing countries. Elsevier Science 53:97- 112.

Cabrera G., A., L. E. Medina O., M. Alcalá D.J., J. F. Sánchez E. y J. M. Ayala G. 2010. Características físicas: Suelo *in*. Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental. Universidad Nacional Autónoma De México, Centro De Investigaciones En Geografía Ambiental, y Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo, México.

Cabrera G., A., J. M. Ortega R. y J. M. Ayala G. 1997. Instructivo para la Evaluación de la Capacidad de Uso del Suelo, Índice de Storie (Modificado). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.

Carreño C., C. y N. Hoyos T. 2010. La huella ecológica: un indicador potencial de sustentabilidad. Fragua - Universidad de Medellín 3:17-34.

Casillas G., J. A. 2004. El programa nacional de microcuencas: una estrategia de desarrollo integral. URL: http://www.fidamerica.org/fida_old/seccion.php?seccion=458.

CNES. (Centre National d'Etudes Spatiales). 2009. SPOT 5 escena 583-311. URL: <https://cnes.fr/en>.

CNES. 2010. SPOT 5 escena 584-311. URL: <https://cnes.fr/en>.

CONAGUA. (Comisión Nacional del Agua). 2001. Norma Técnica, Métodos de Proyección de Población. NT-011-CNA-2001. URL: <http://www.ceajalisco.gob.mx/transparencia/pdf/ley/nom/cna/nt-011-cna-2001.pdf>.

Cortés V., M. O. 2010. Clasificación y colección de suelos en la Microcuenca de Atécuaro Mpio. de Morelia Mich. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.

Chang, B. y Xiong, L. 2005. Ecological footprint analysis based on RS and GIS in arid land. Journal of Geographical Sciences. 1009-637X.

Chuvienco, E. 1995. Fundamentos de la Teledetección espacial. Ediciones Rialp, S.A. Edición, Madrid.

Dardón S., J. y C. Morales G. 2002. La cuenca hidrográfica y su importancia para la gestión regional del desarrollo sustentable del altiplano occidental de Guatemala. Centro Pluricultural Para la Democracia "Kemb'al Tinimit" , Guatemala.

DETENAL. (Dirección General de Estudios del Territorio Nacional). 1979a. Carta edafológica Morelia E14A23. México. URL: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825658052>.

DETENAL. 1979b. Carta edafológica Pátzcuaro E14A22. México. URL: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825658045>.

DETENAL. 1979c. Carta edafológica Villa Escalante E14A32. URL: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825658137>.

DGG. (Dirección General De Geografía). 1982. Carta edafológica Villa Madero E14A33. URL: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825658144>.

Doménech, J. L. y M. González A. 2008. La huella ecológica de las empresas: 4 años de seguimiento en el puerto de Gijón. Revista Oidles 2. 1988-2483.

Eastman, j., R. 2012. Idrisi selva. Guia para SIG y procesamiento de imágenes. Clark University.

Global Footprint Network. 2008. Huella ecológica y capacidad ecológica de México de 1996 a 2008. URL: <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/trends/mexico/>.

Global Footprint Network. 2010. Ecological footprint atlas 2010. URL: <http://www.footprintnetwork.org>.

Global Footprint Network. 2014. Glosario 2003-2014 Global Footprint Network. URL: <http://www.footprintnetwork.org/es/index.php/GFN/page/glossary/#conversionfactor>.

Gobierno de España. 2007. Análisis de la Huella Ecológica de España, Ministerio Del Medio Ambiente, M.R.Y.M., Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica, 978-84-491-0913-3, España.

Gobierno de México. 2012. Plan Nacional de Desarrollo, eje 4: Sustentabilidad Ambiental, Secretaría De Desarrollo Social, México.

INEGI. (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2000. XII Censo General de Población y Vivienda. México. URL: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/cpv2000/default.aspx>.

INEGI. 2004. Guía para la interpretación de cartografía, Edafología.

INEGI. 2006. Guía para la interpretación de cartografía, Uso potencial del suelo. Aguascalientes, México.

INEGI. 2010a. Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda. URL: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825002398>.

INEGI. 2010b. Censo de Población y Vivienda 2010. URL: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>.

INEGI. 2011. Cobertura y uso de suelo: serie V. URL: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/default.aspx>.

INEGI. 2013. Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente. Morelia, Mich. URL: <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?c=274>.

INEGI. 2014a. Cartas Topográficas: E14A22, E14A23, E14A32, E14A33. México. URL: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/default.aspx>.

INEGI. 2014b. Sistemas de Información Geográfica. URL: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>.

Lenzen, M., S. Lundie, G. Bransgrove, L. Charet y F. Sack. 2003. Assessing the Ecological Footprint of a Large Metropolitan Water Supplier: Lessons for Water Management and Planning towards Sustainability. *Journal of Environmental Planning and Management*.

Maldonado L., R. E. 2013. Tierras campesinas de la Microcuenca El Calabozo, municipio de Morelia Michoacán. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.

Manzanilla Q., U. 2016. Reconstrucción dendrocronológica de la temperatura media y precipitación dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Martínez C., R. 2008. Education and ecological footprint. *Revista Electrónica del Instituto de Investigación en Educación, Universidad de Costa Rica* 8. 1409-4703.

Martínez R., S. E. 2009. La huella ecológica del sistema económico y urbano actual: el caso de China y del Distrito Federal. *Procuraduría agraria*.

Medina O., L. E., M. Bravo E. y M. E. Mendoza C. 2009. Escenarios de erosión bajo dos manejos agrícolas en Acrisoles de la cuenca de Cointzio, Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita* 51.

NASA. (National Aeronautics and Space Administration). 2016. CO2 Virtual Science Data Environment. URL: <https://co2.jpl.nasa.gov//build/?dataset=OCO2L2Stdv7&product=FULL>.

Prat, C. , M. Alcalá, L. Medina, A. Ramos, J. J. Ramos, M. Mendoza y D. González. 2009. Base de datos sobre los indicadores de degradación del medio de la Cuenca de Cointzio, Michoacán. Grupo de trabajo en México (IRD, UMSNH- UNAM-CIGA) del Proyecto europeo DESIRE (Desertification mitigation and remediation of land): a global approach for local solutions (-UE FP6-2005-Global-4, OJ 2005 C 177/15).IRD (Institut de recherche pour le développement)–LTHE, Michoacán, México.

Ramos R., A. G. 2012. Relación entre el tiempo de cambio de uso de suelo y el nivel de degradación de los suelos en la cuenca de Cointzio, Michoacán. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.

SEMARNAT. (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2012. La huella ecológica de México. URL: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/01_poblacion/recuadro3.html.

SEMARNAT. 2013. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Page 36. URL: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001596.pdf>.

Tobasura A., I. 2008. Huella ecológica y biocapacidad: indicadores biofísicos para la gestión ambiental. El caso de Manizales, Colombia. Revista Luna Azul:122.

USGS. (United States Geological Survey). 2015. Science for a changing world. Estados Unidos de América. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov>.

Van V., D.P. y M. W. Smeets E. 2000. Ecological footprints of Benin, Bhutan, Costa Rica and the Netherlands. Elsevier 34:115-116.

Velázquez, A, J. F. Mas, J. R. Díaz G., R. Mayorga S., P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. Gaceta Ecológica 62:29. ISSN 1405-2849.

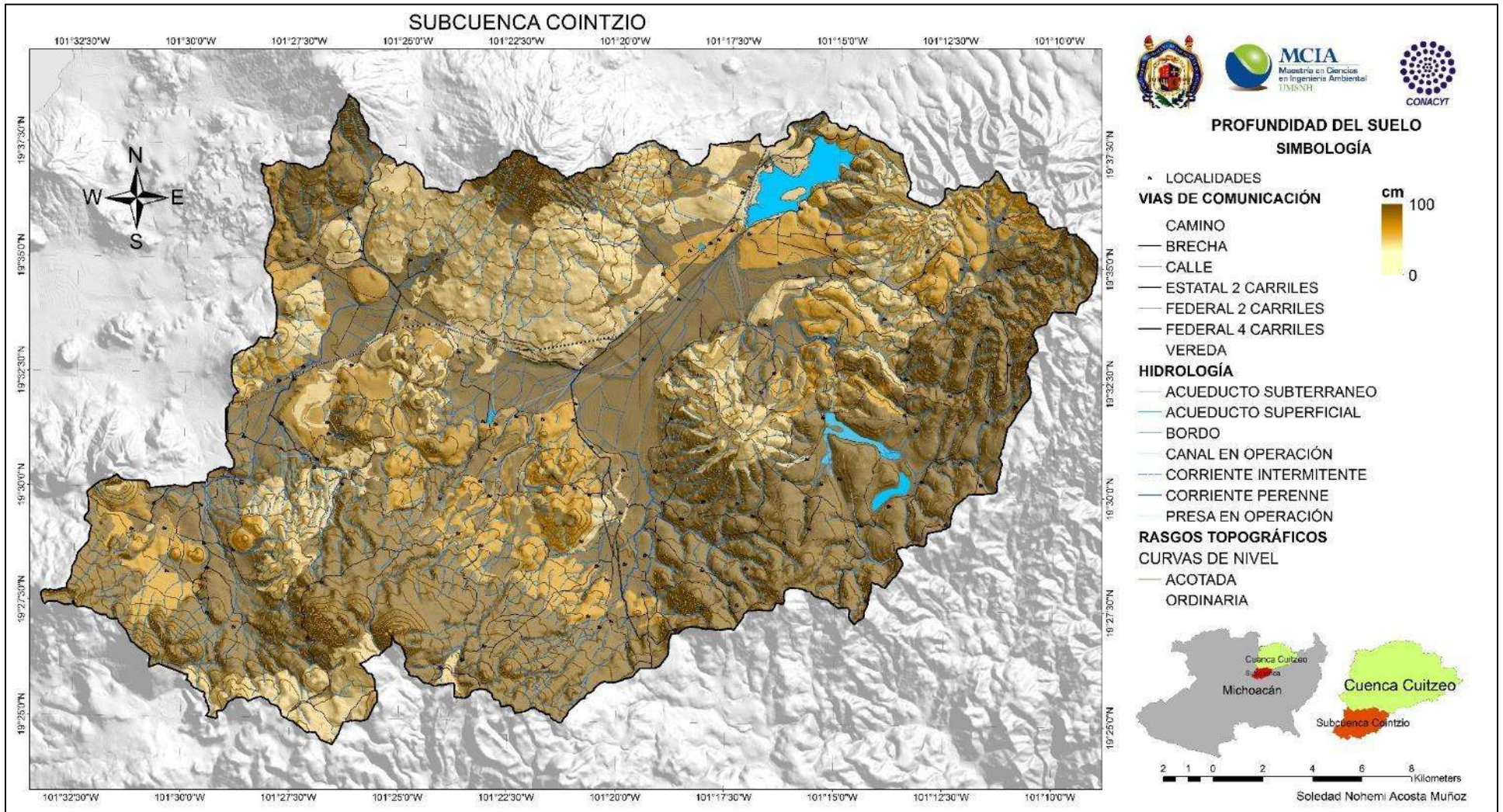
Wackernagel, M y W. E. Rees. 1996. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. New Society Publishers, Canada. 1-55092-251-3.

World Vision C. 2000. Manual de manejo de cuencas. URL: <http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuencas/documentos/Manual de Manejo de Cuencas Vision Mundial mod.pdf>.

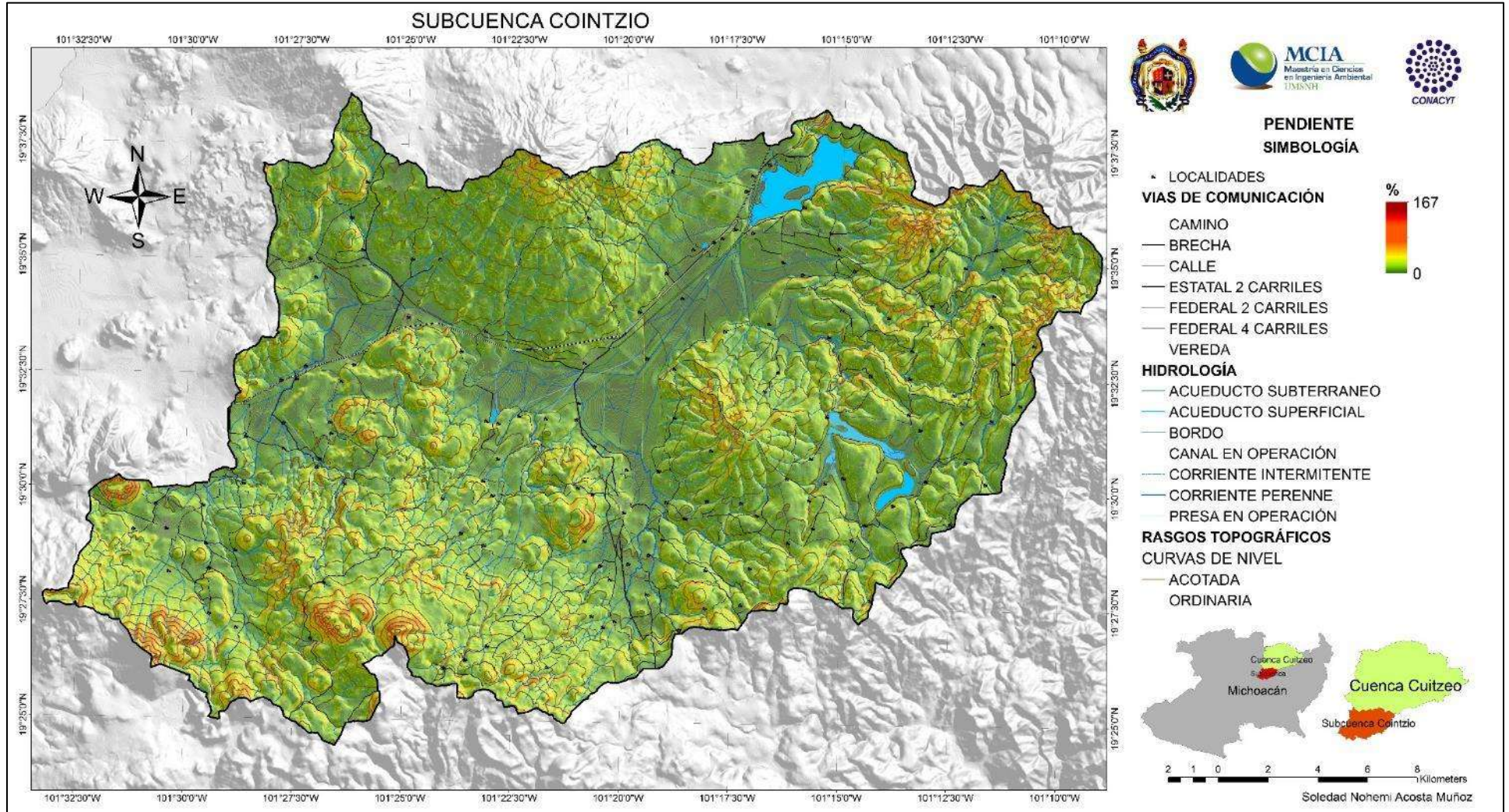
ANEXOS

Anexo 1

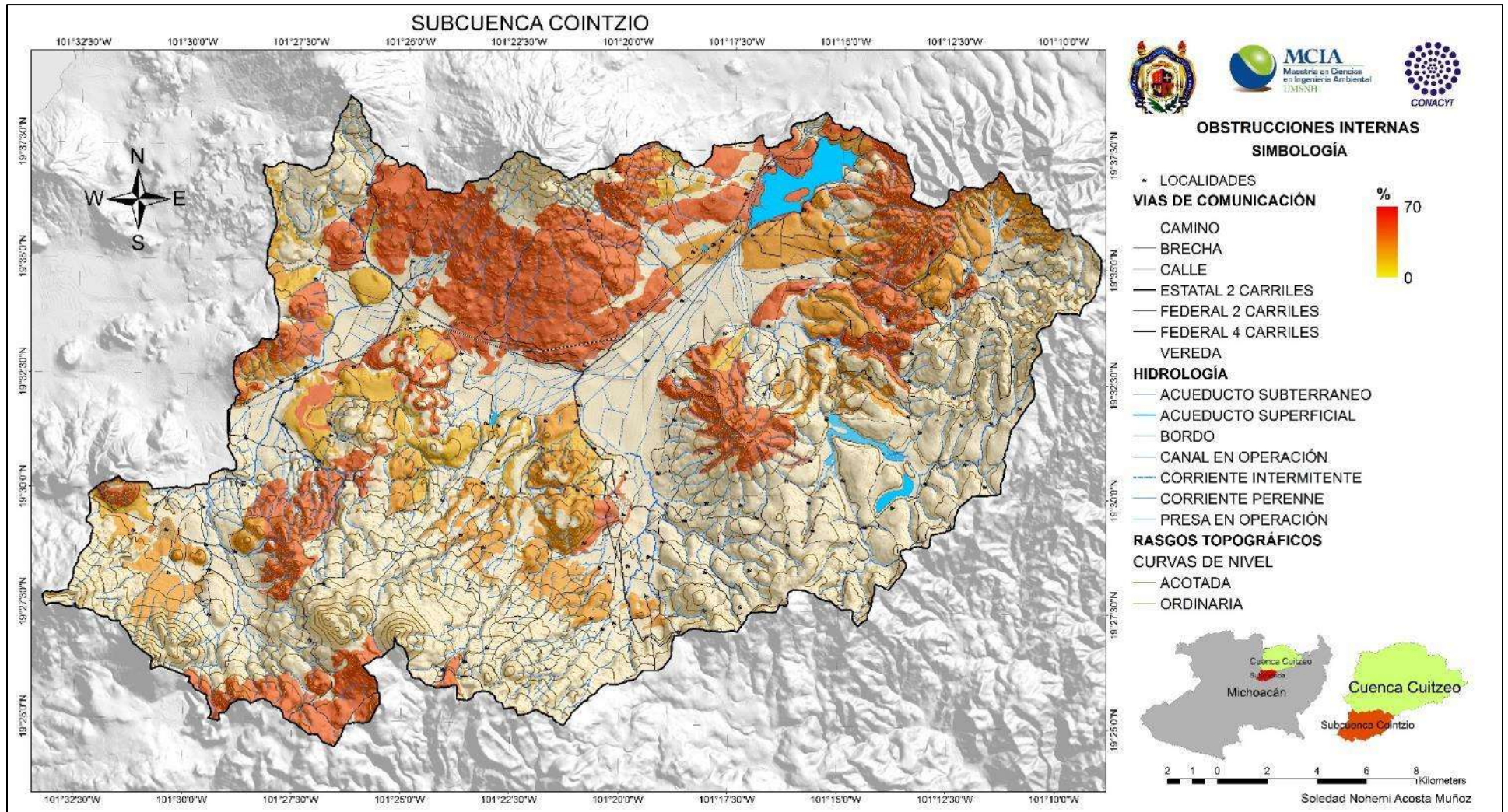
Mapa 1.1 Profundidad del suelo.



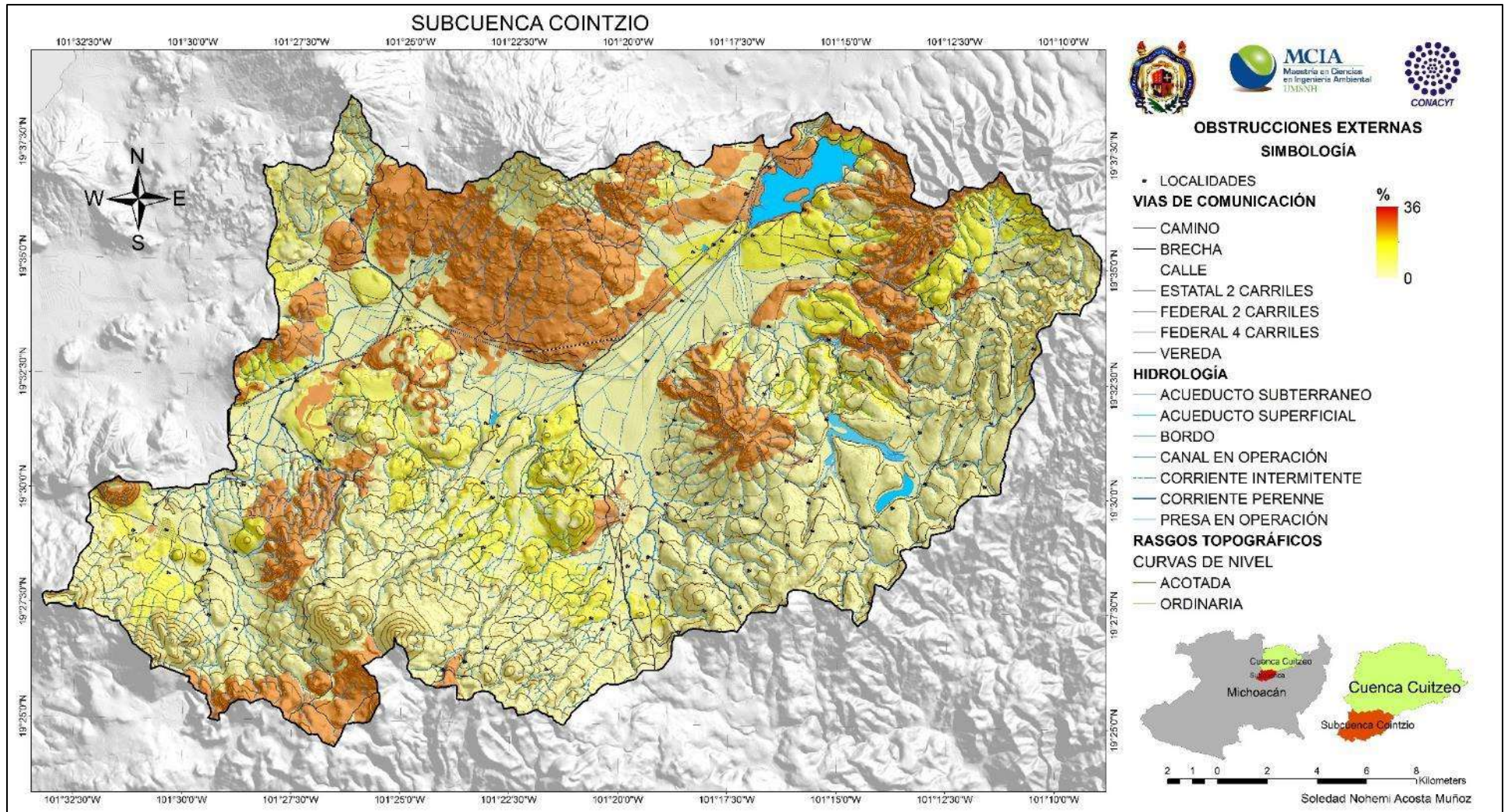
Mapa 1.2 Pendiente del terreno.



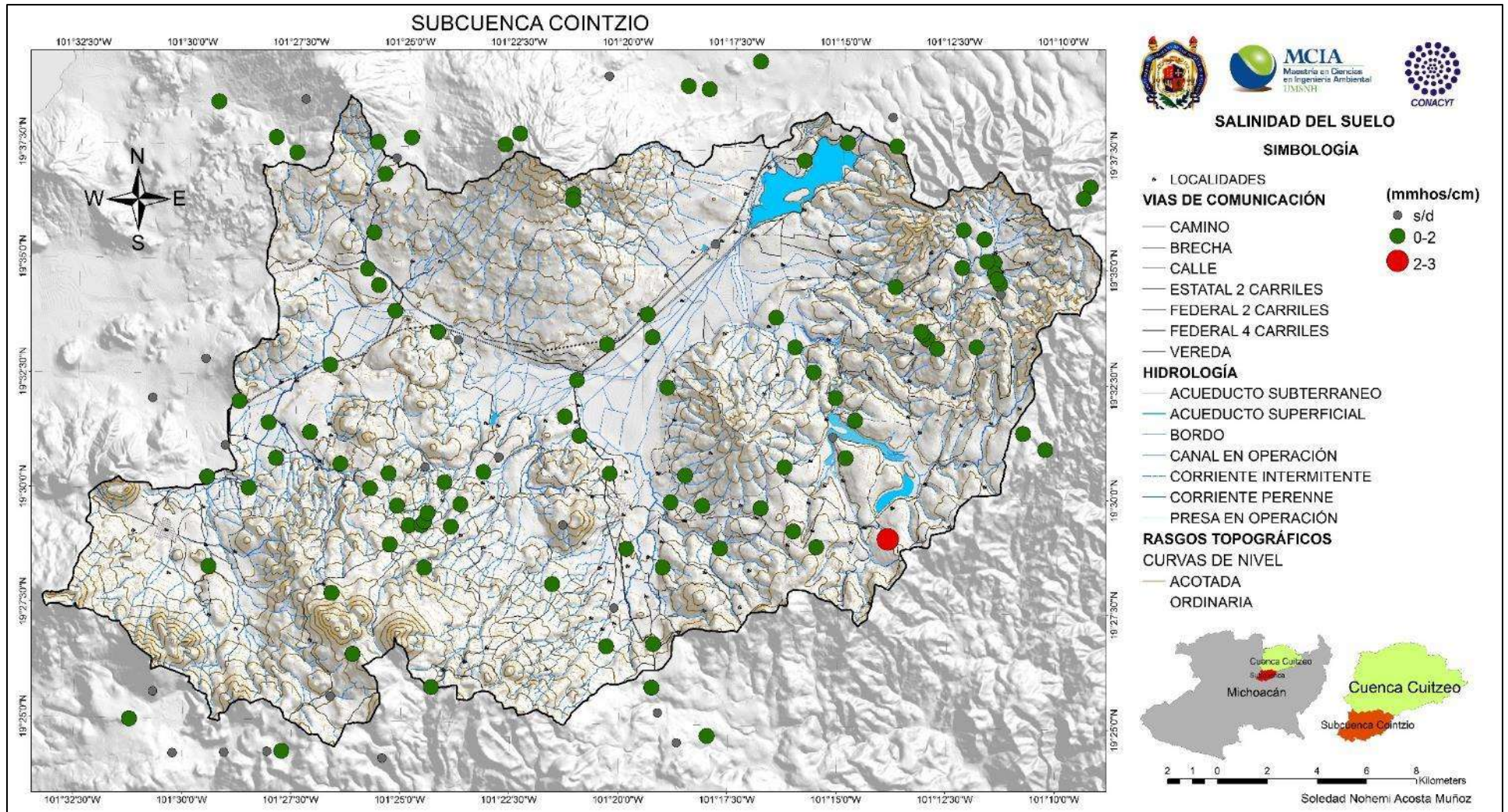
Mapa 1.3 Obstrucciones internas del suelo.



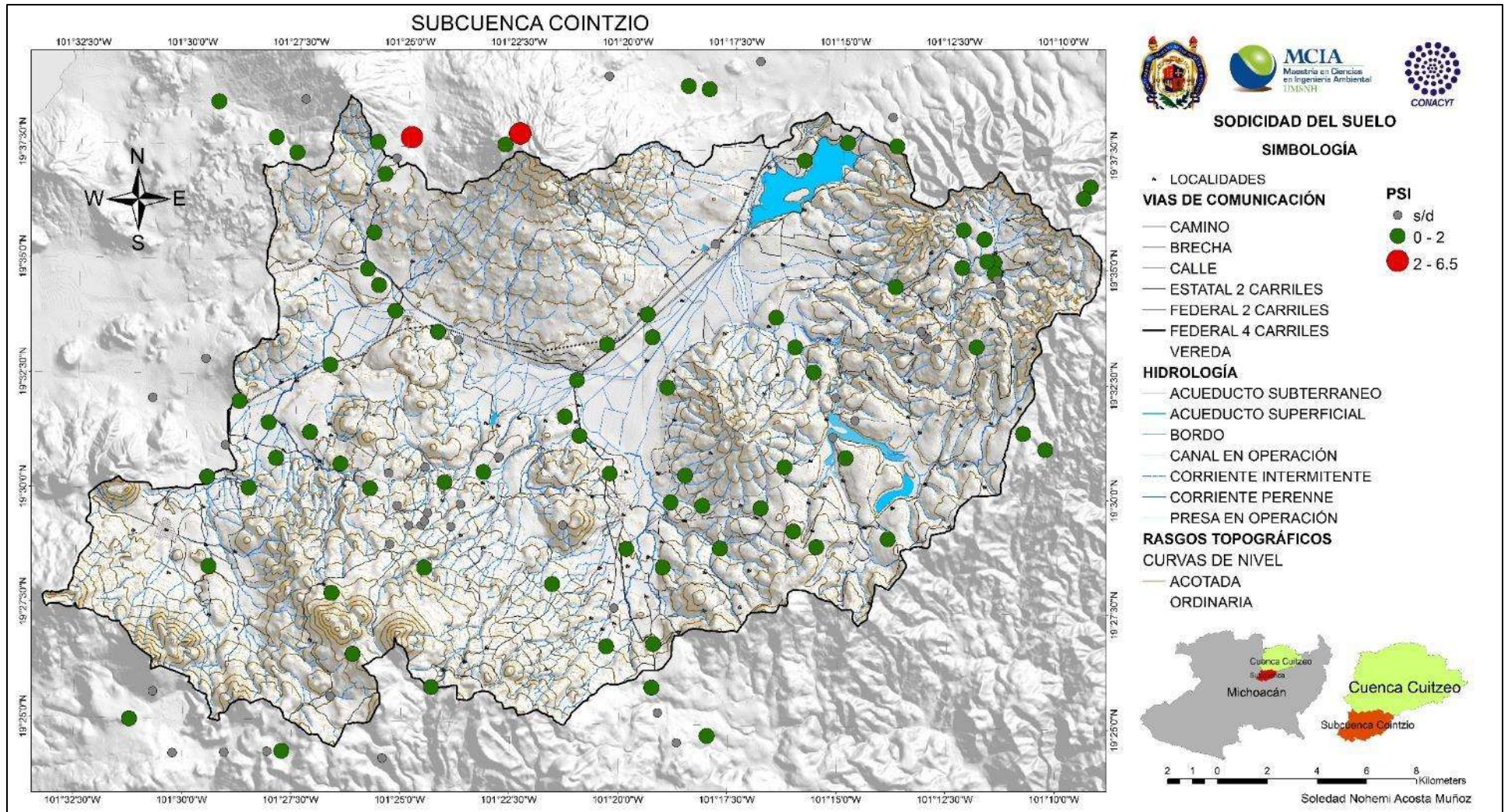
Mapa 1.4 Obstrucciones externas.



Mapa 1.5 Salinidad del suelo.

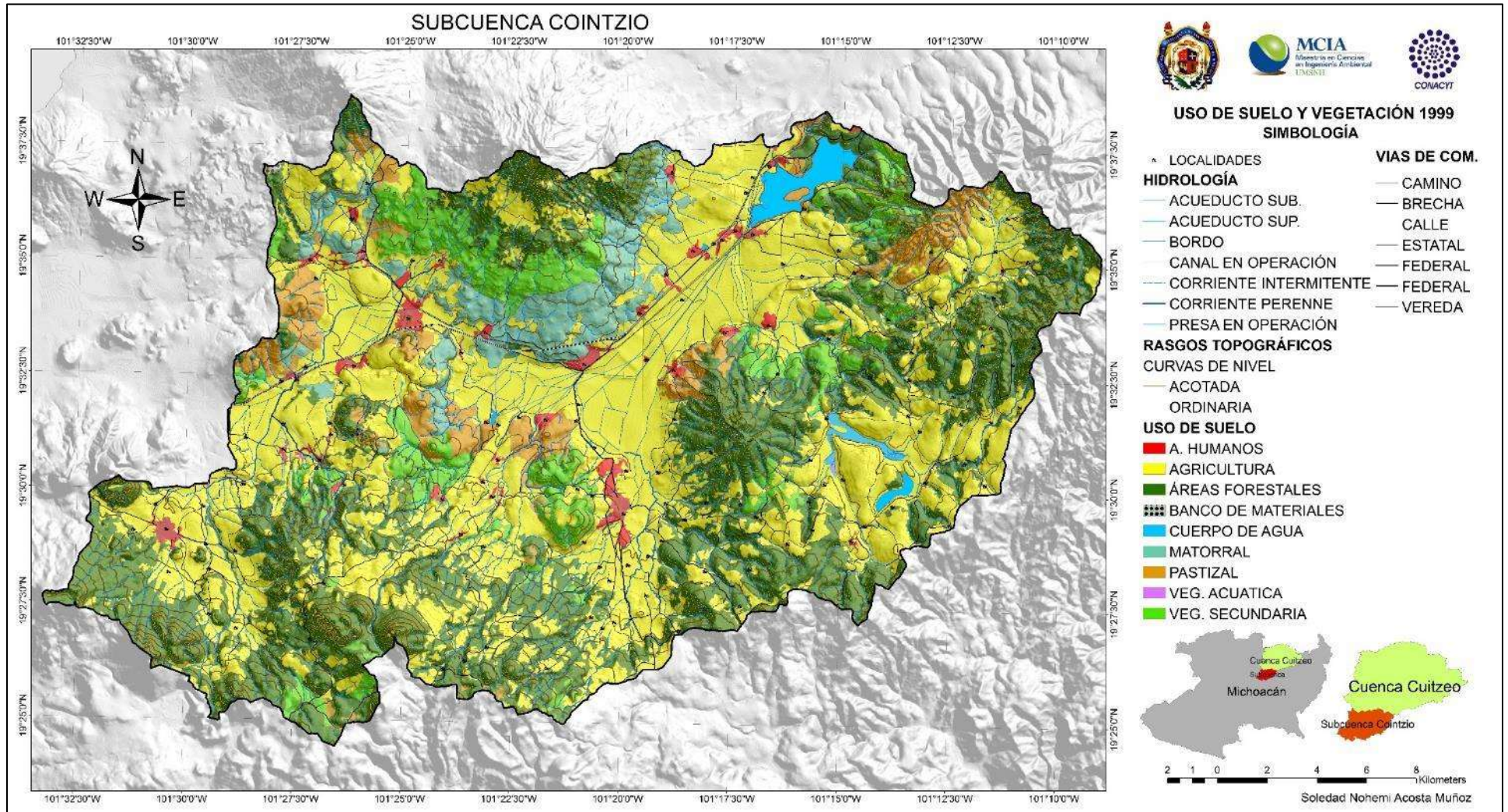


Mapa 1.6 Sodicidad del suelo.

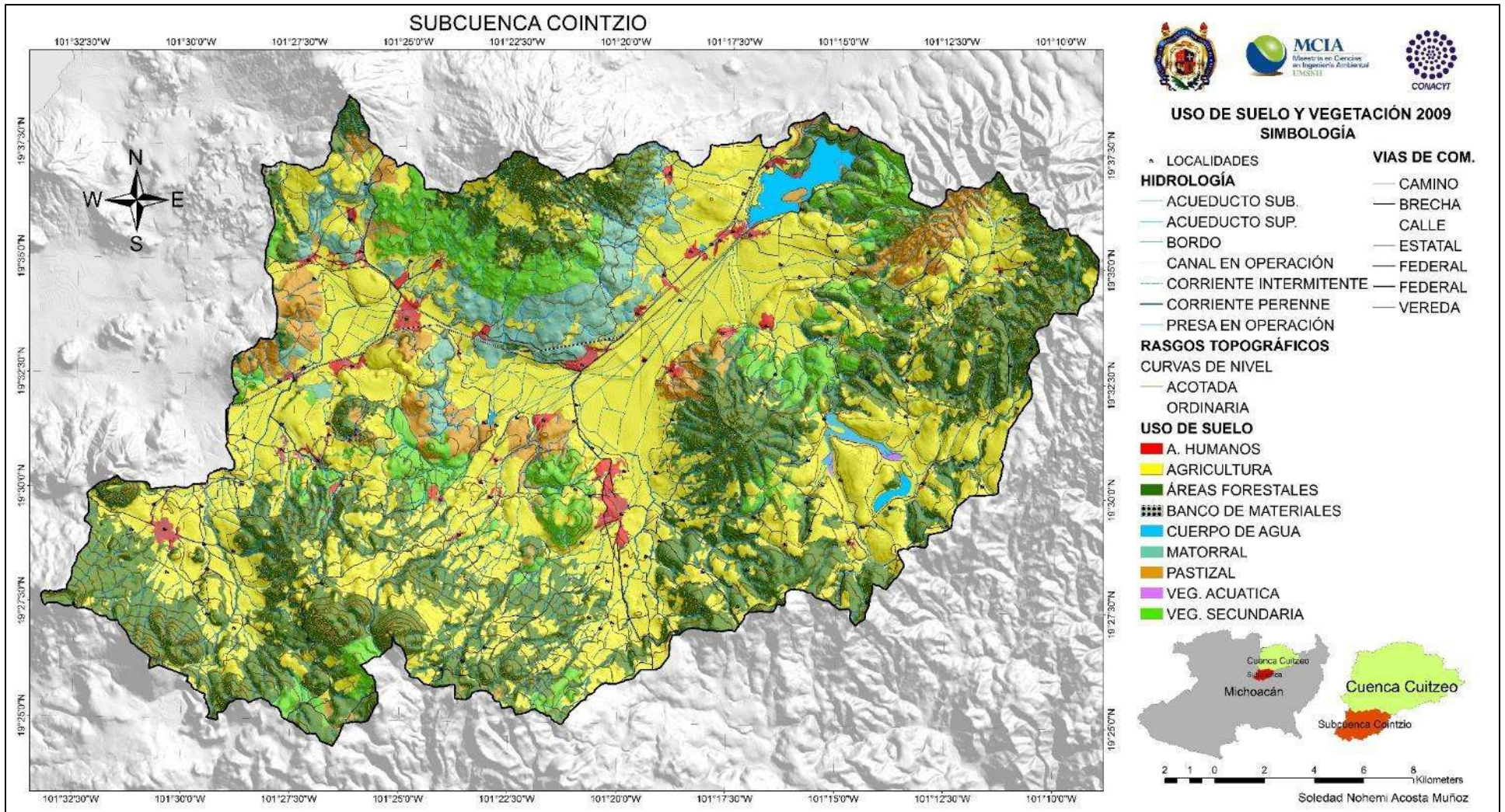


Anexo 2

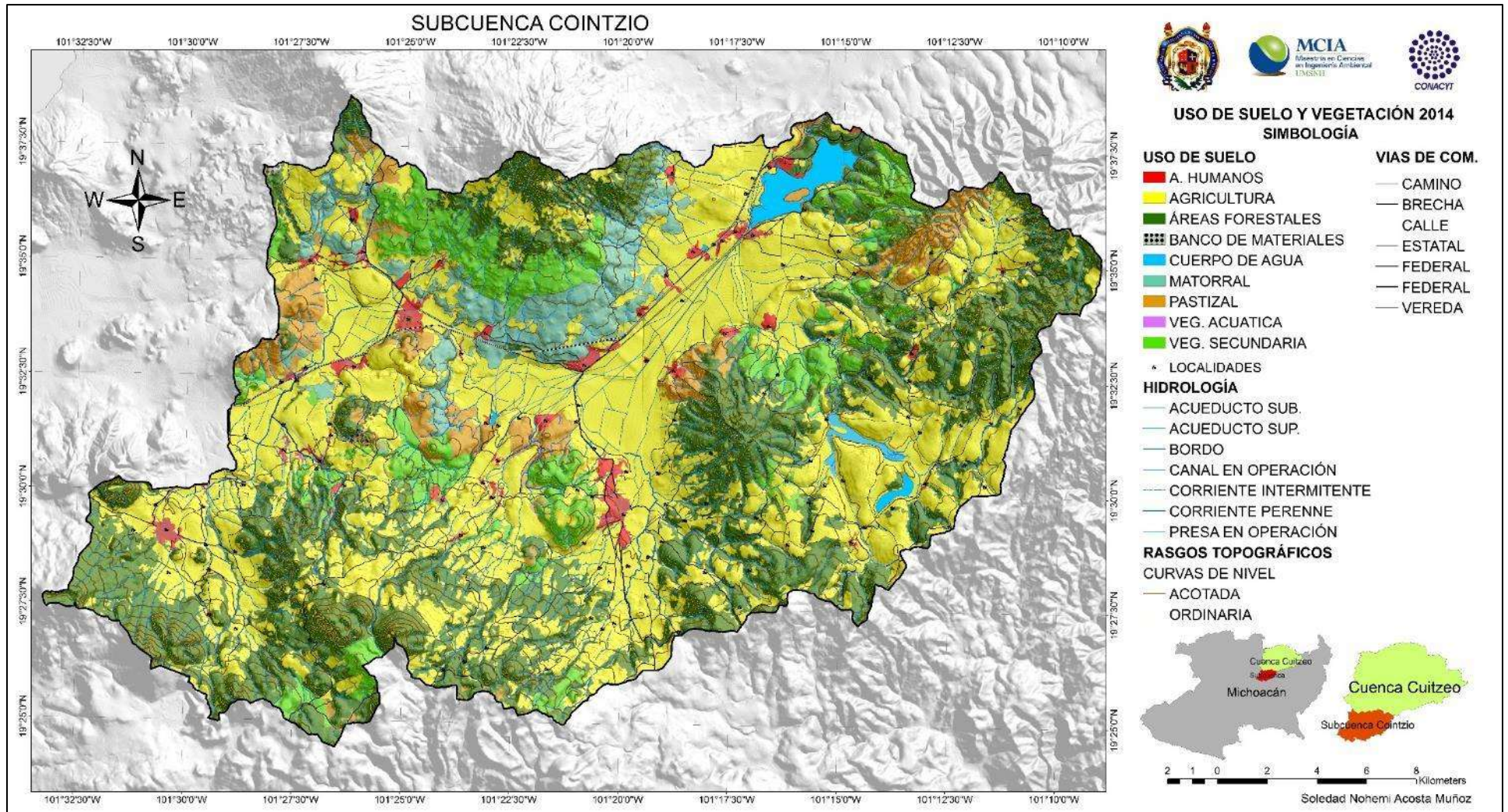
Mapa 2.1 Uso de suelo y cobertura vegetal en 1999



Mapa 2.2 Uso de suelo y cobertura vegetal en 2009



Mapa 2.3 Uso de suelo y cobertura vegetal en 2014



Anexo 3

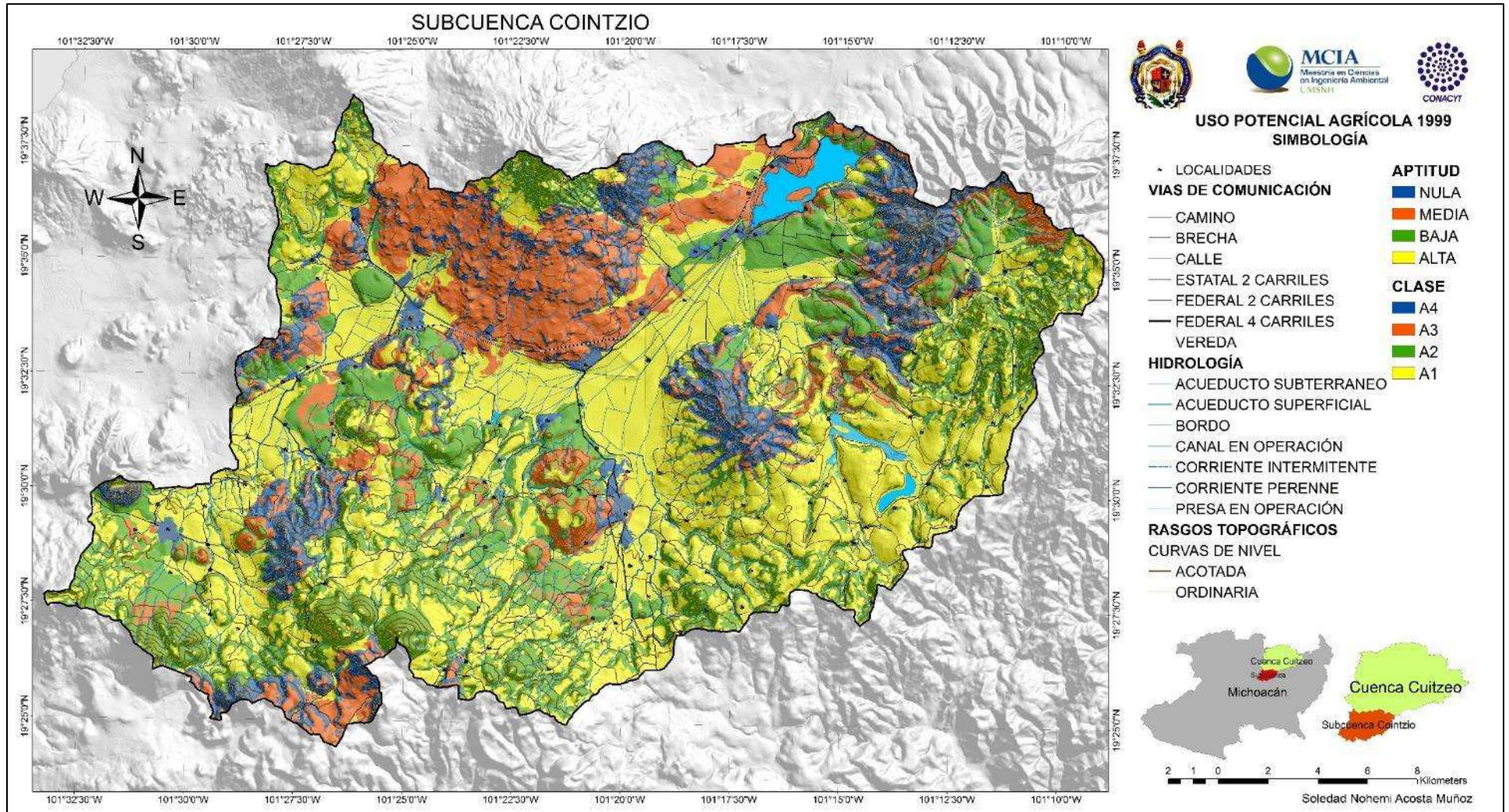
Imágenes de los sitios visitados de las nueve microcuencas para rectificación de uso y uso potencial del suelo.



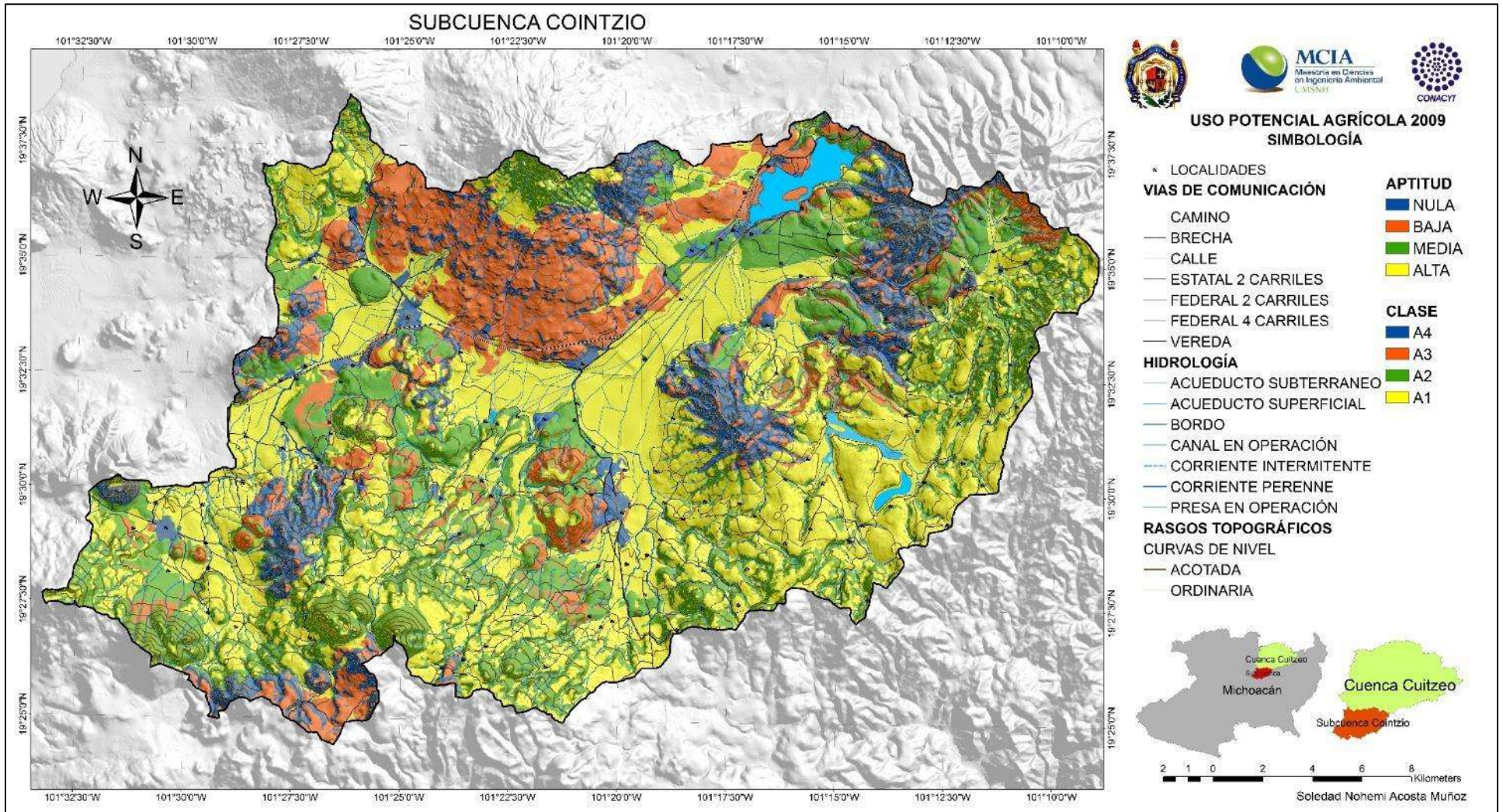


Anexo 4

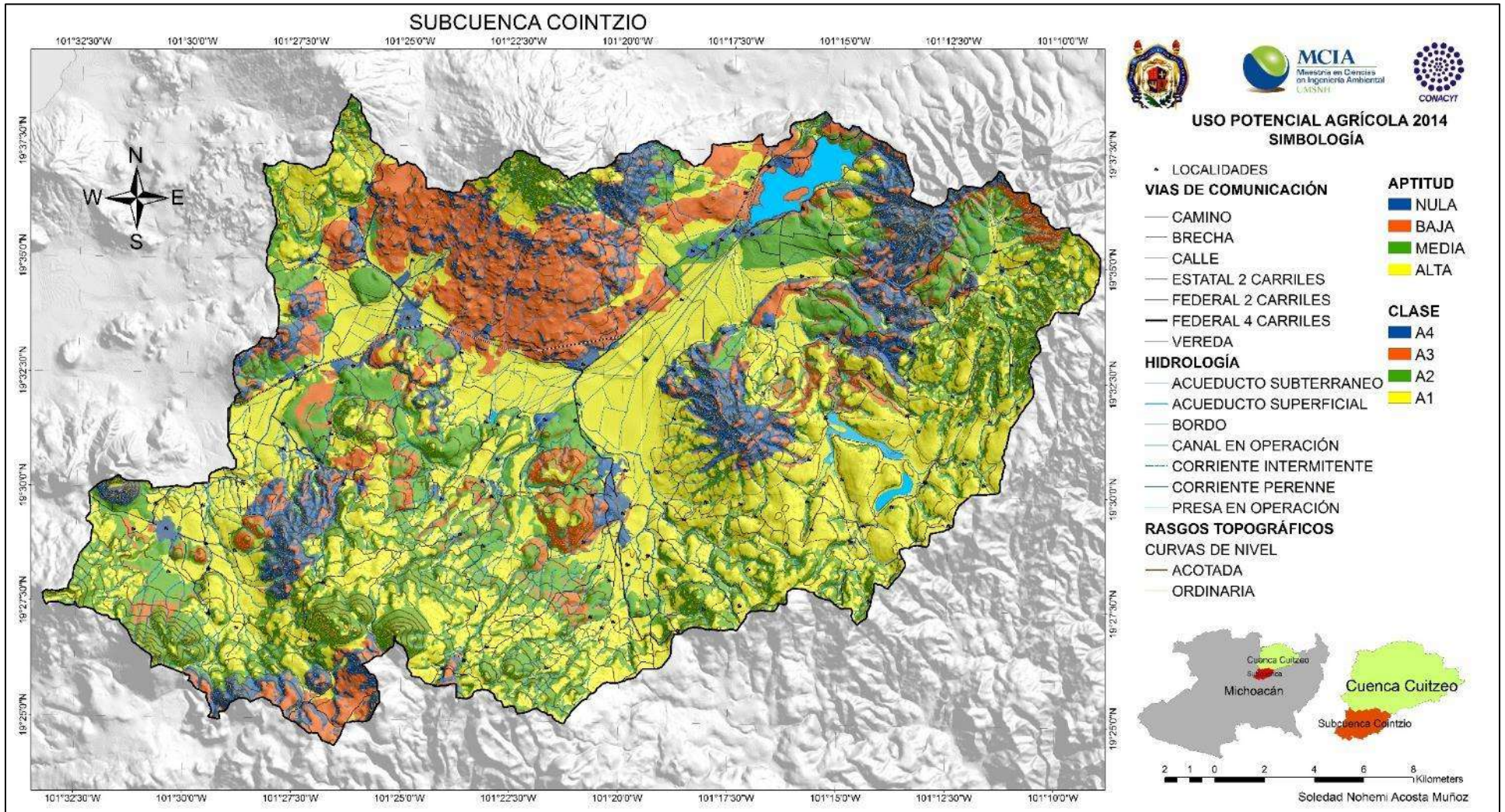
Mapa 4.1 Uso potencial agrícola en 1999



Mapa 4.2 Uso potencial agrícola en 2009

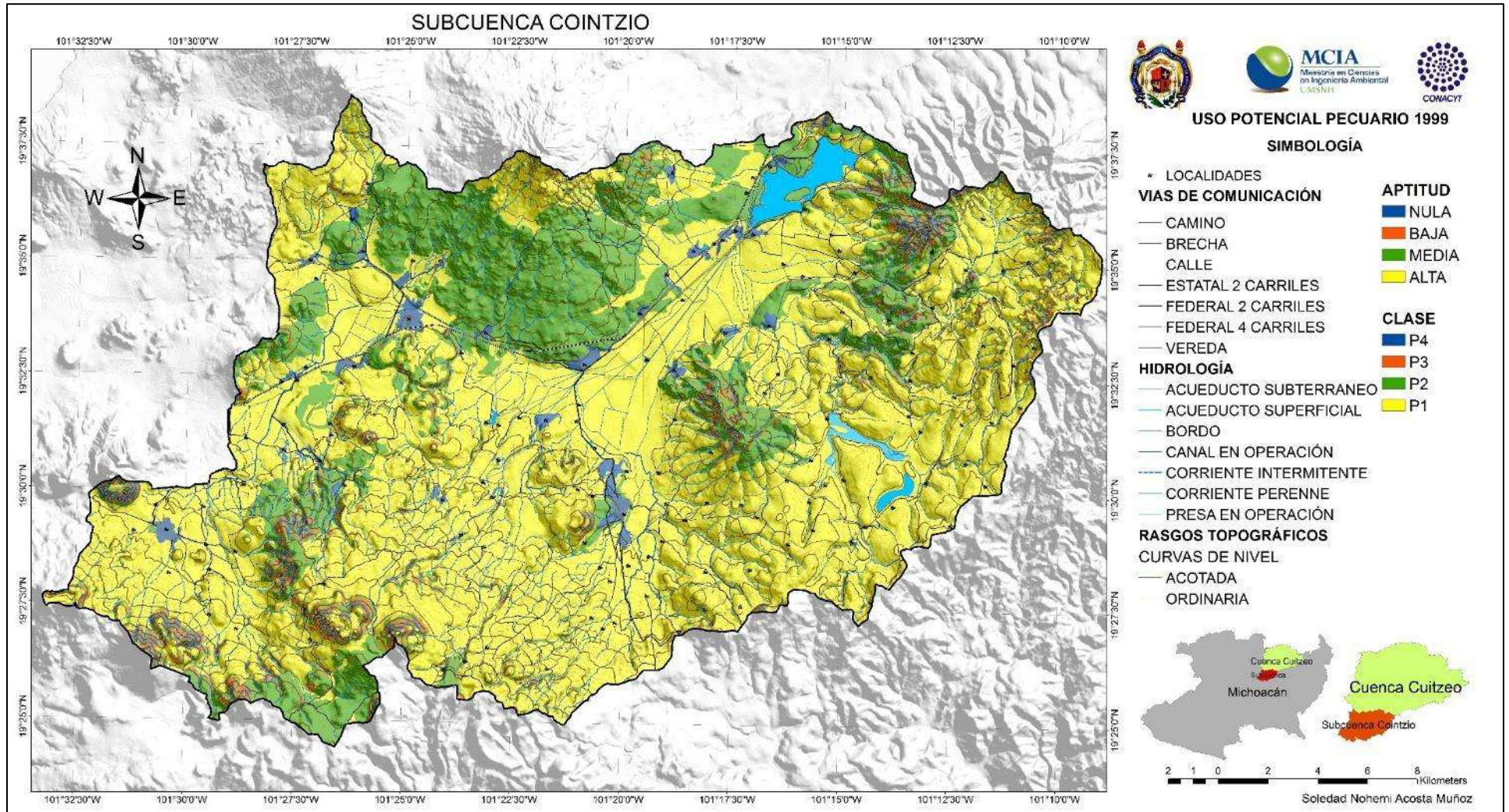


Mapa 4.3 Uso potencial agrícola en 2014

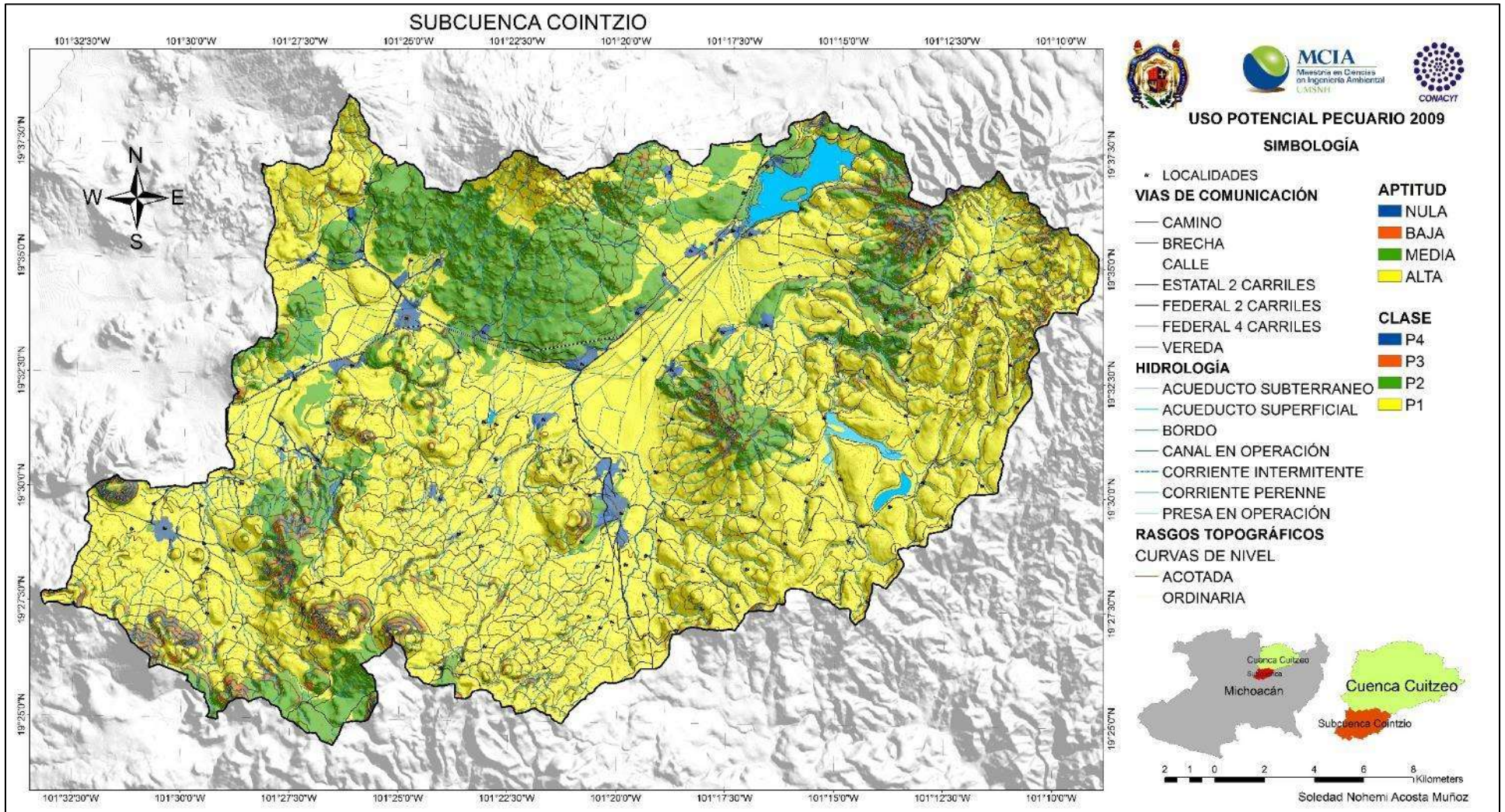


Anexo 5

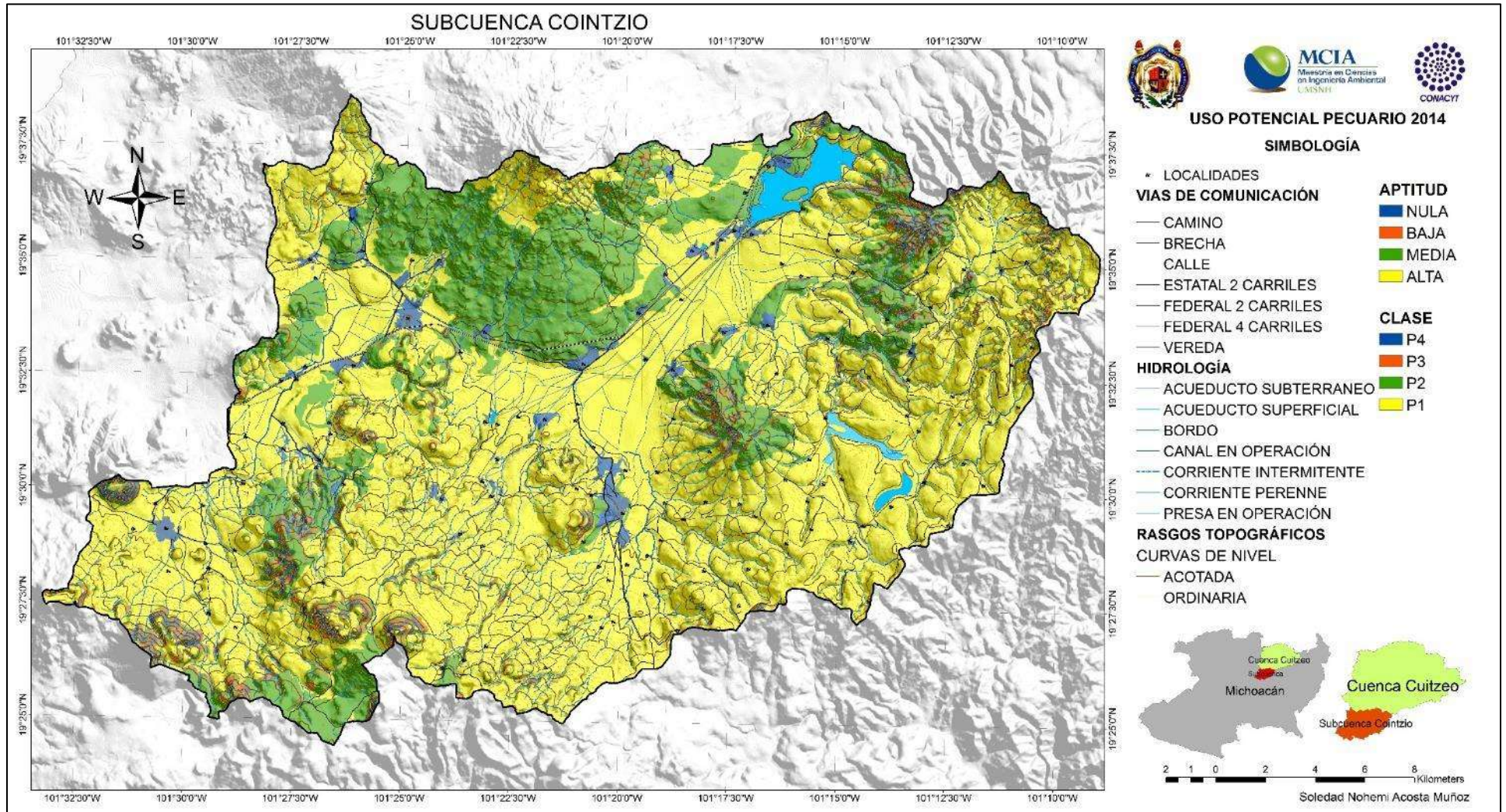
Mapa 5.1 Uso potencial pecuario en 1999



Mapa 5.2 Uso potencial pecuario en 2009

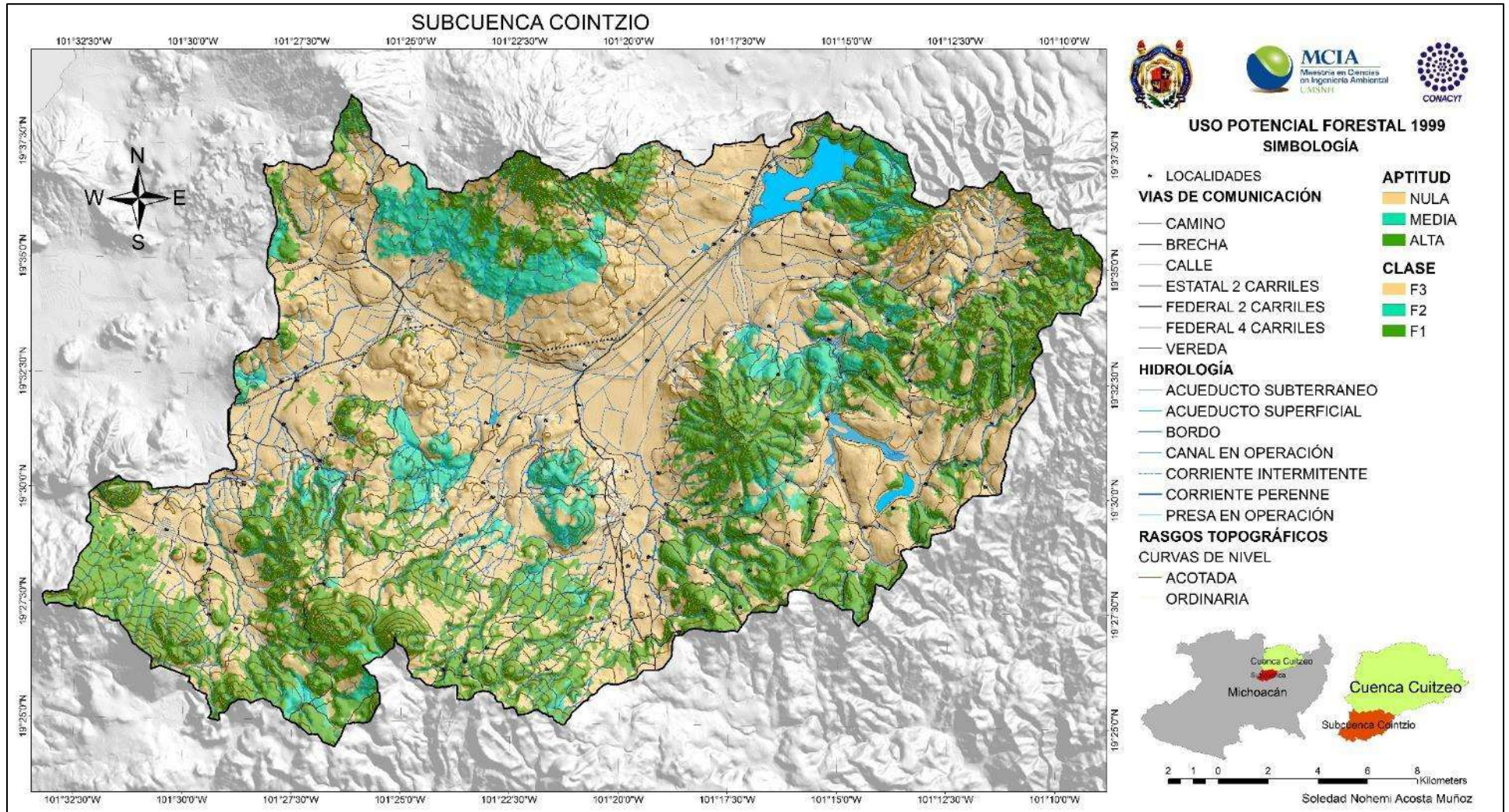


Mapa 5.3 Uso potencial pecuario en 2014

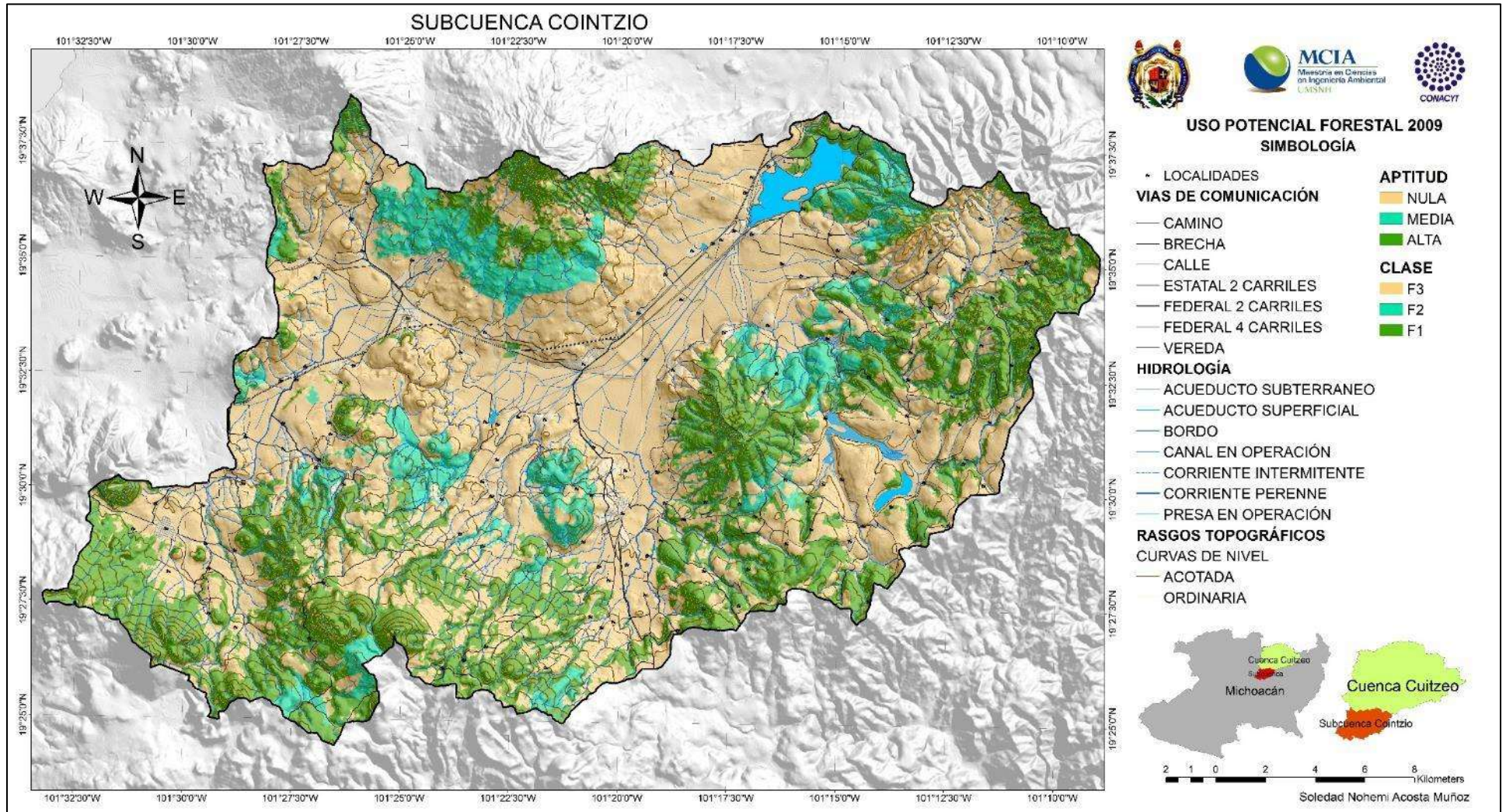


Anexo 6

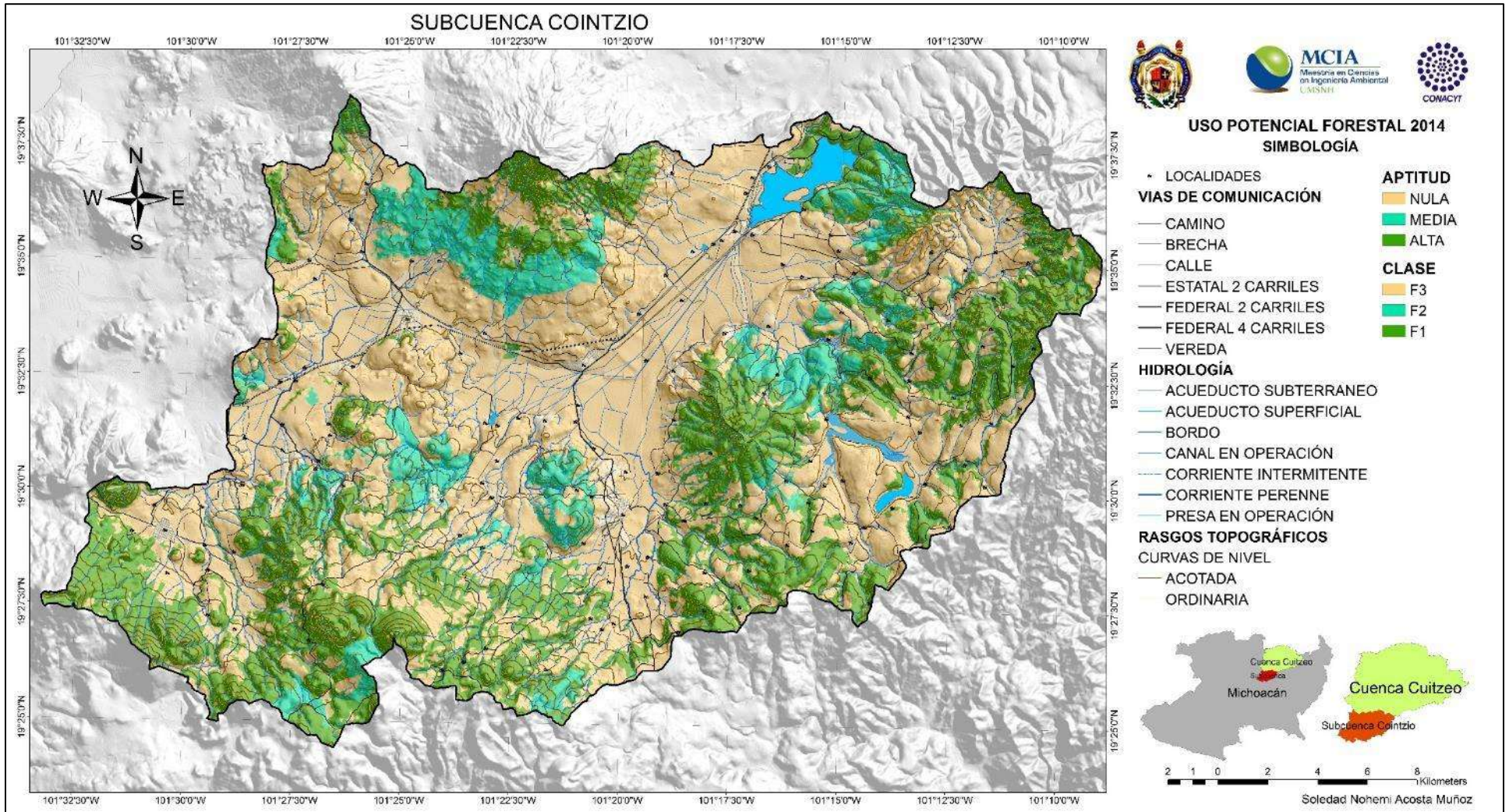
Mapa 6.1 Uso potencial forestal en 1999



Mapa 6.2 Uso potencial forestal en 2009

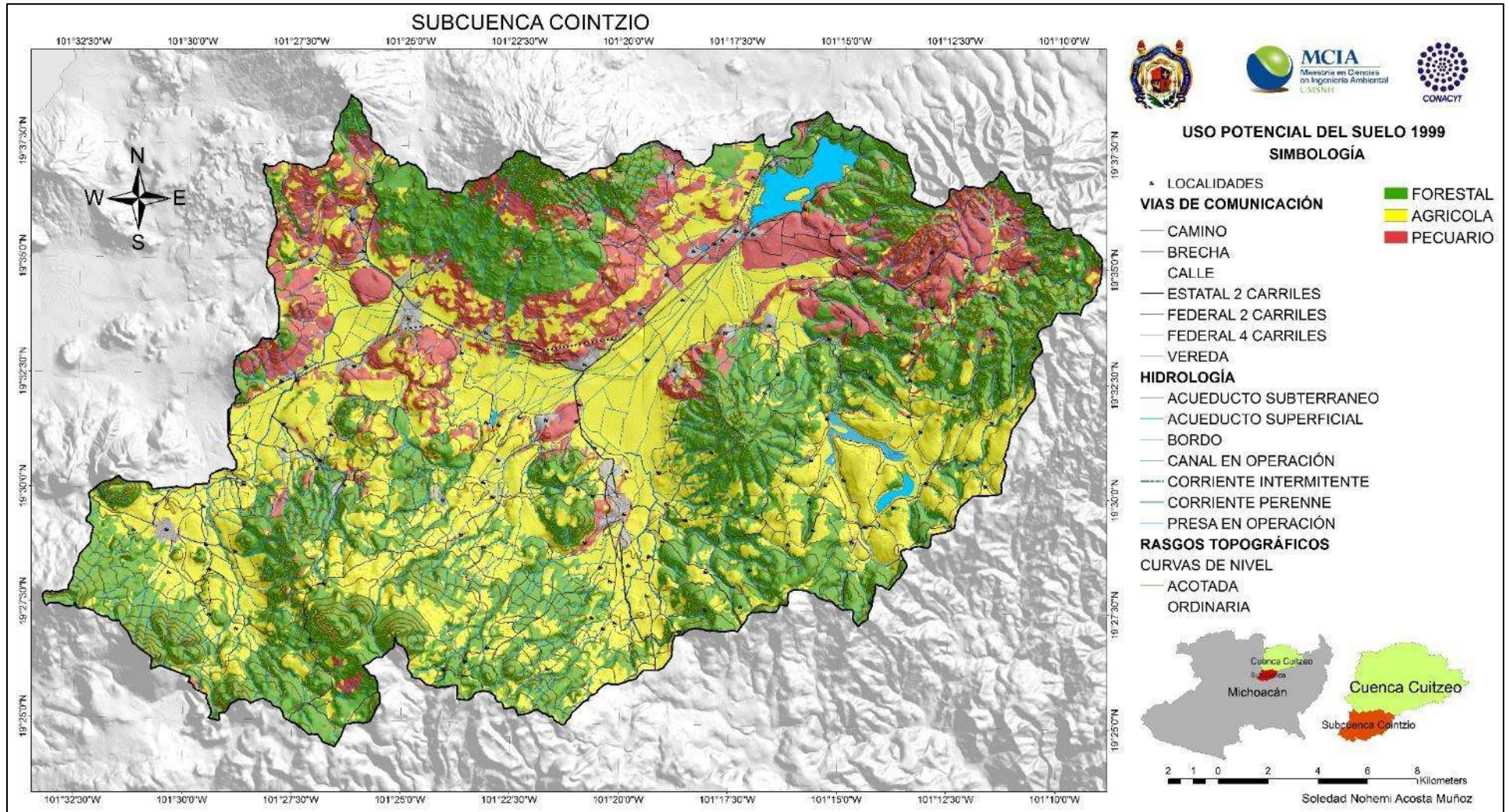


Mapa 6.3 Uso potencial forestal en 2014

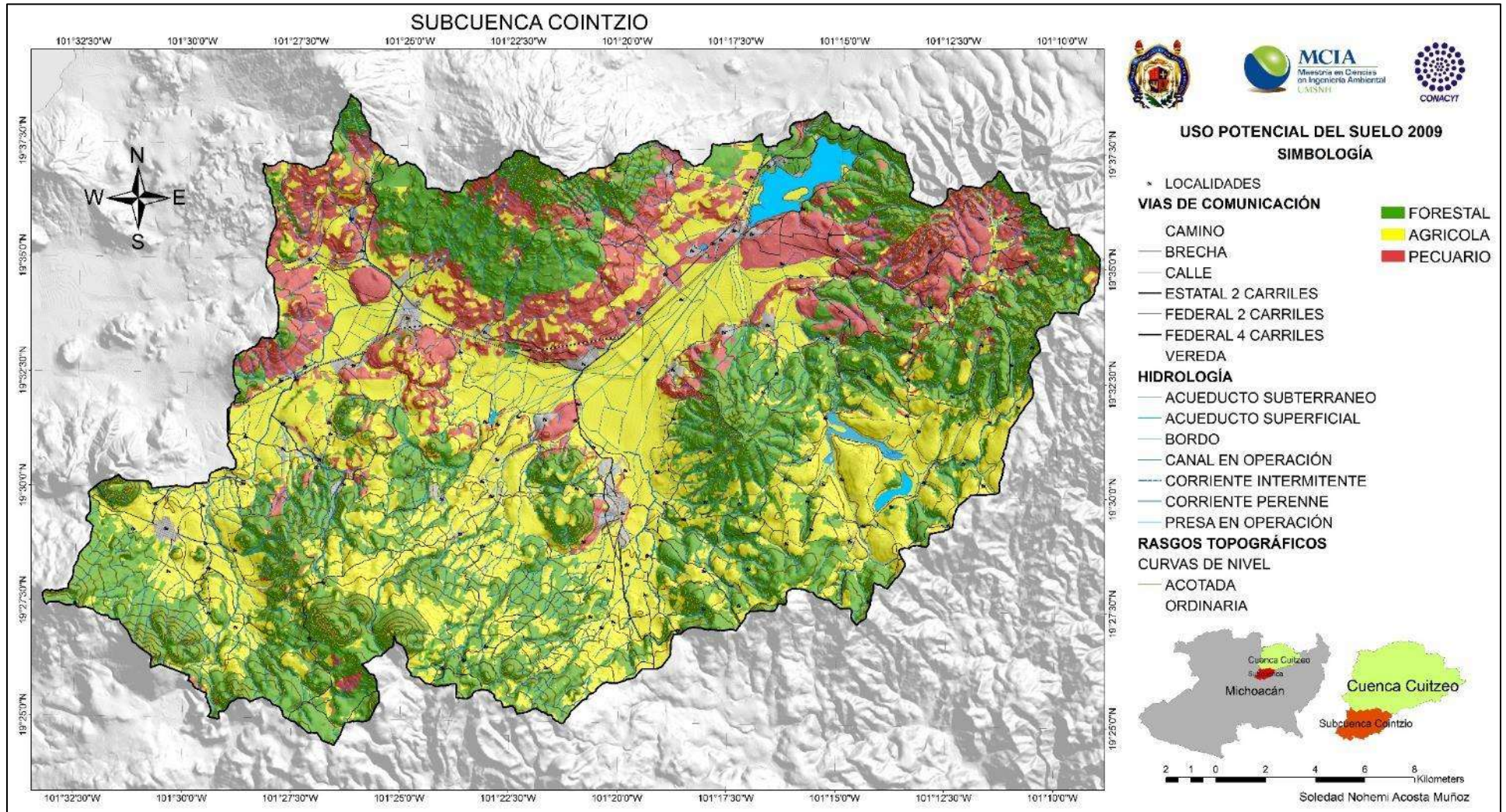


Anexo 7

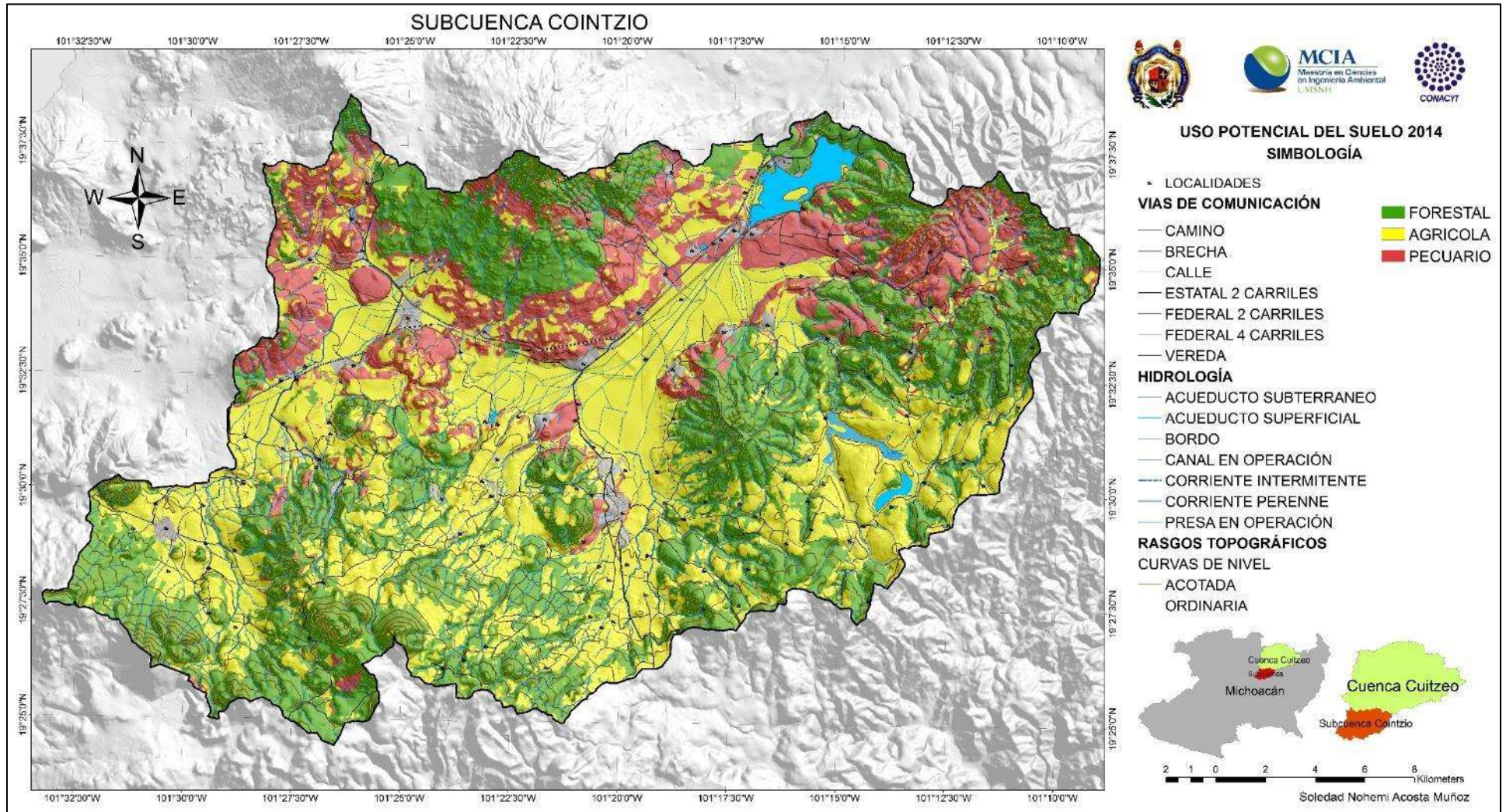
Mapa 7.1 Uso potencial del suelo en 1999



Mapa 7.2 Uso potencial del suelo en 2009

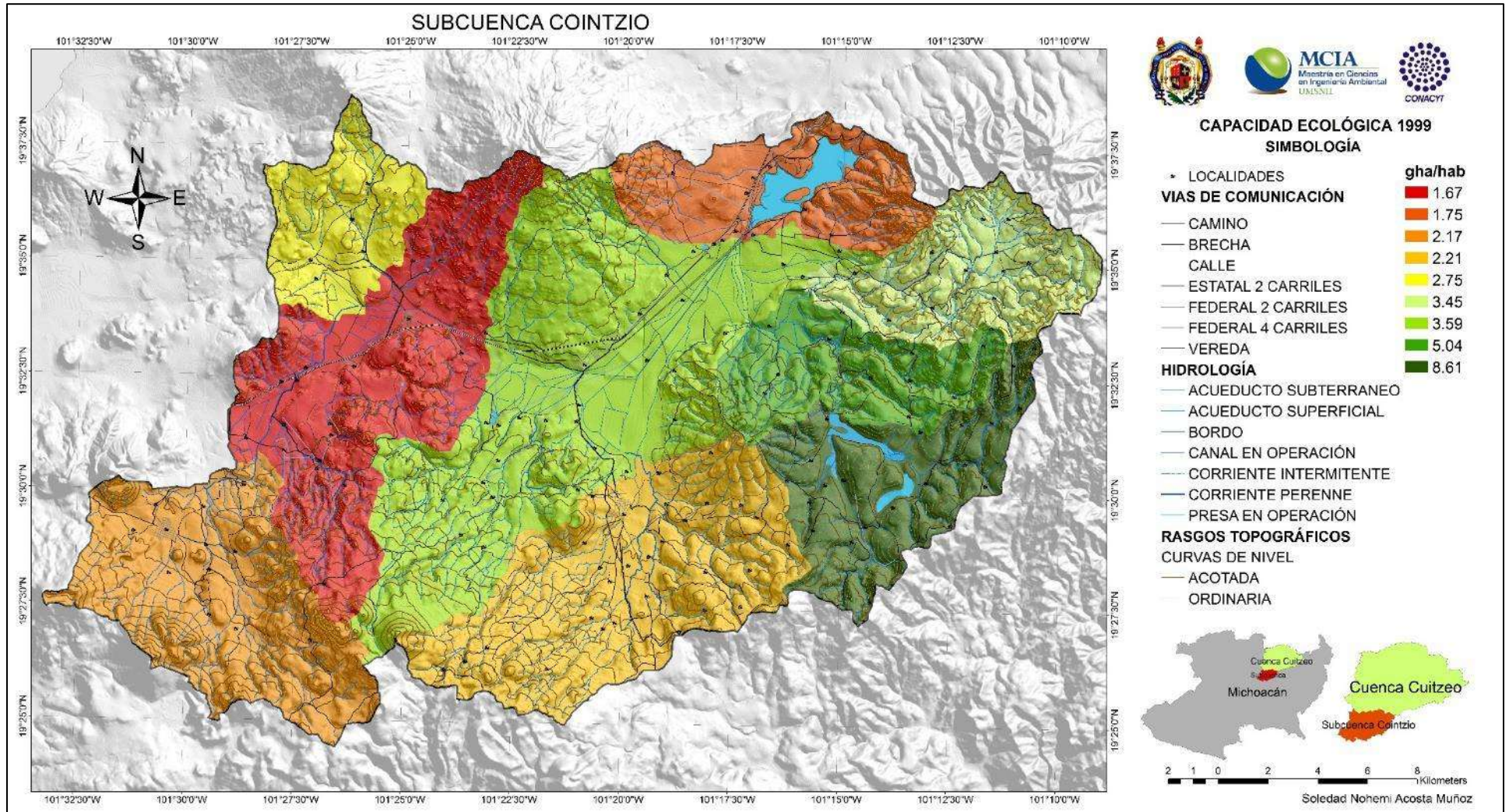


Mapa 7.3 Uso potencial del suelo en 2014

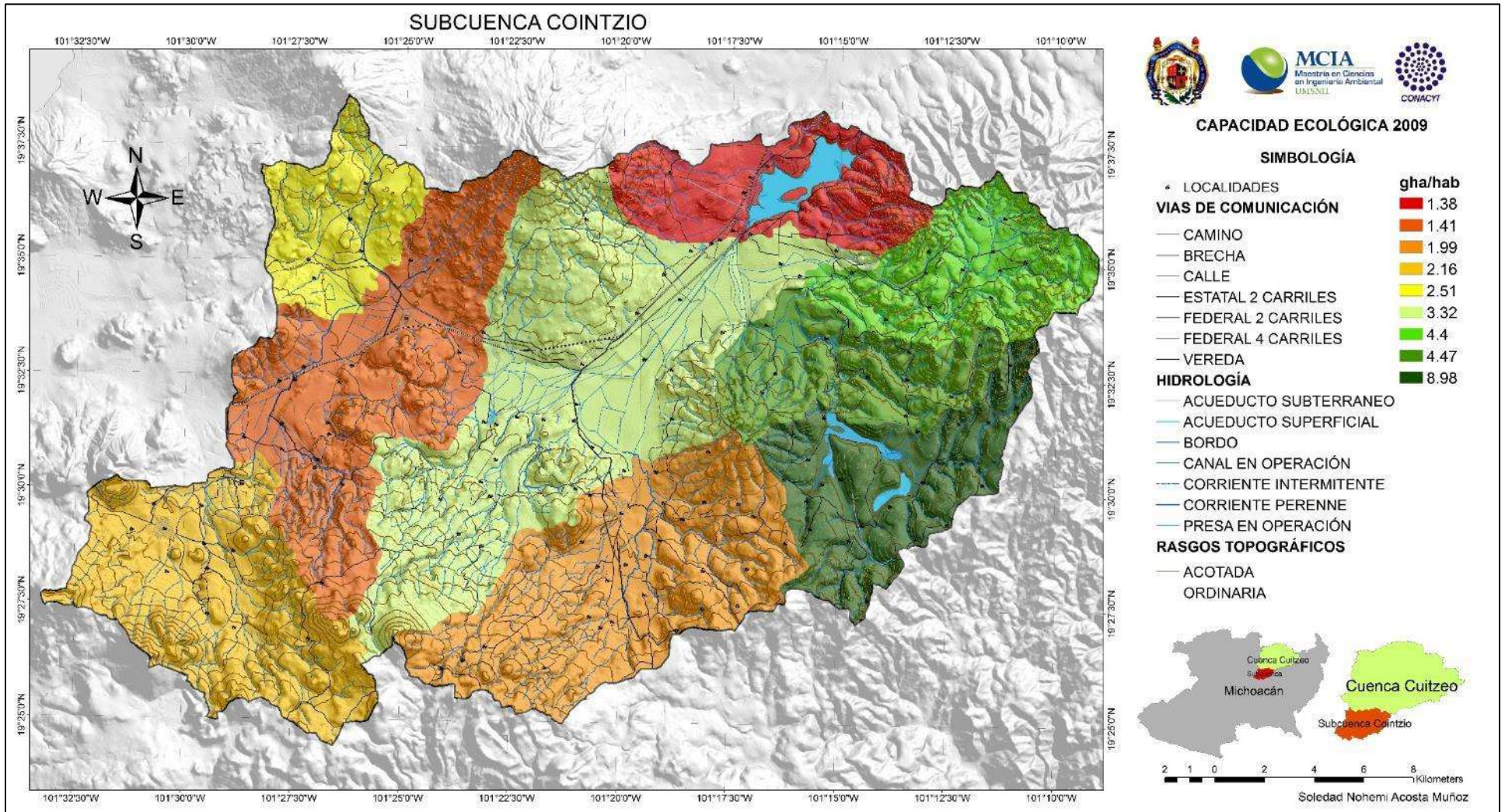


Anexo 8

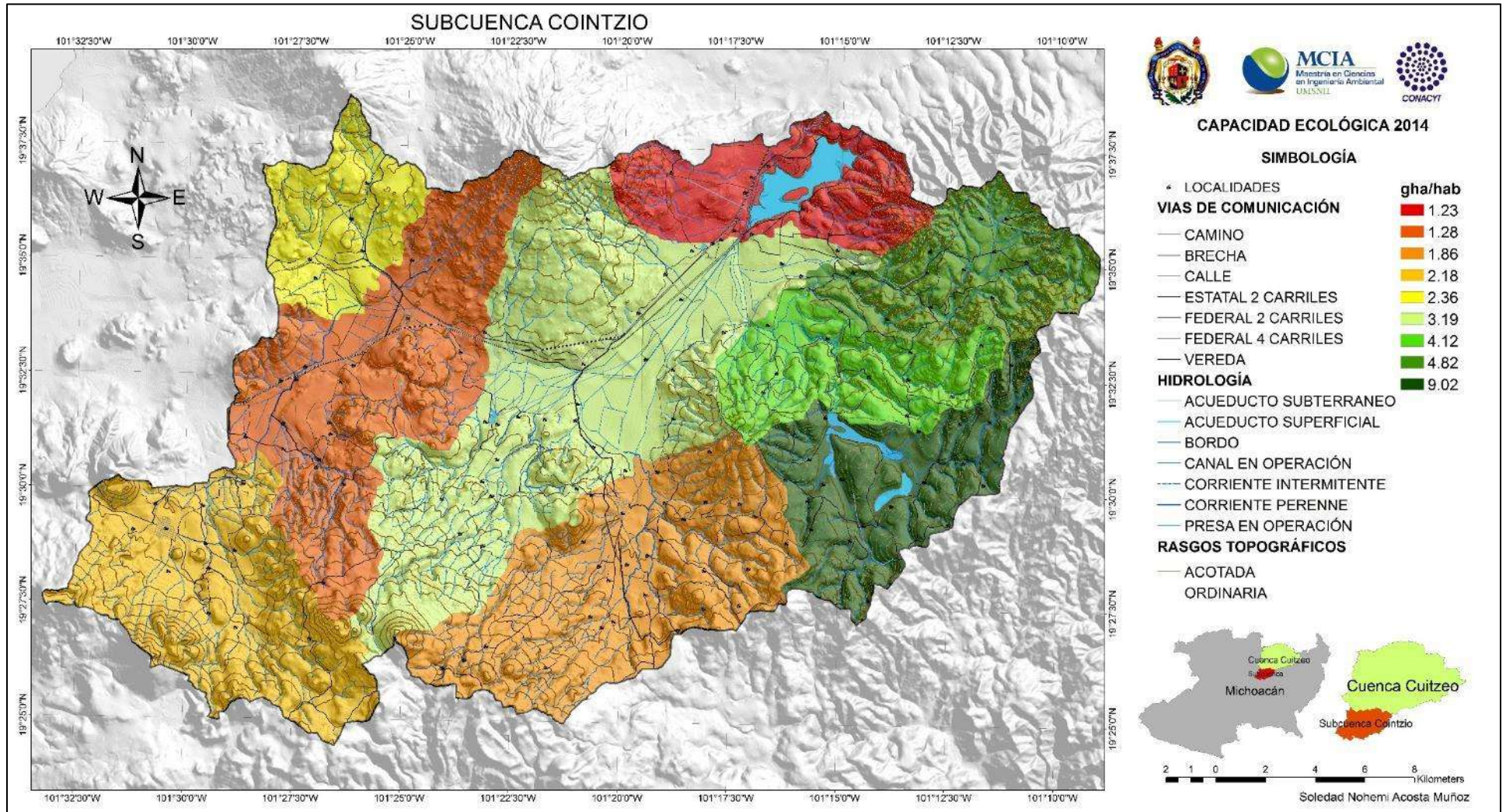
Mapa 8.1 Capacidad ecológica por microcuenca en 1999



Mapa 8.2 Capacidad ecológica por microcuenca en 2009

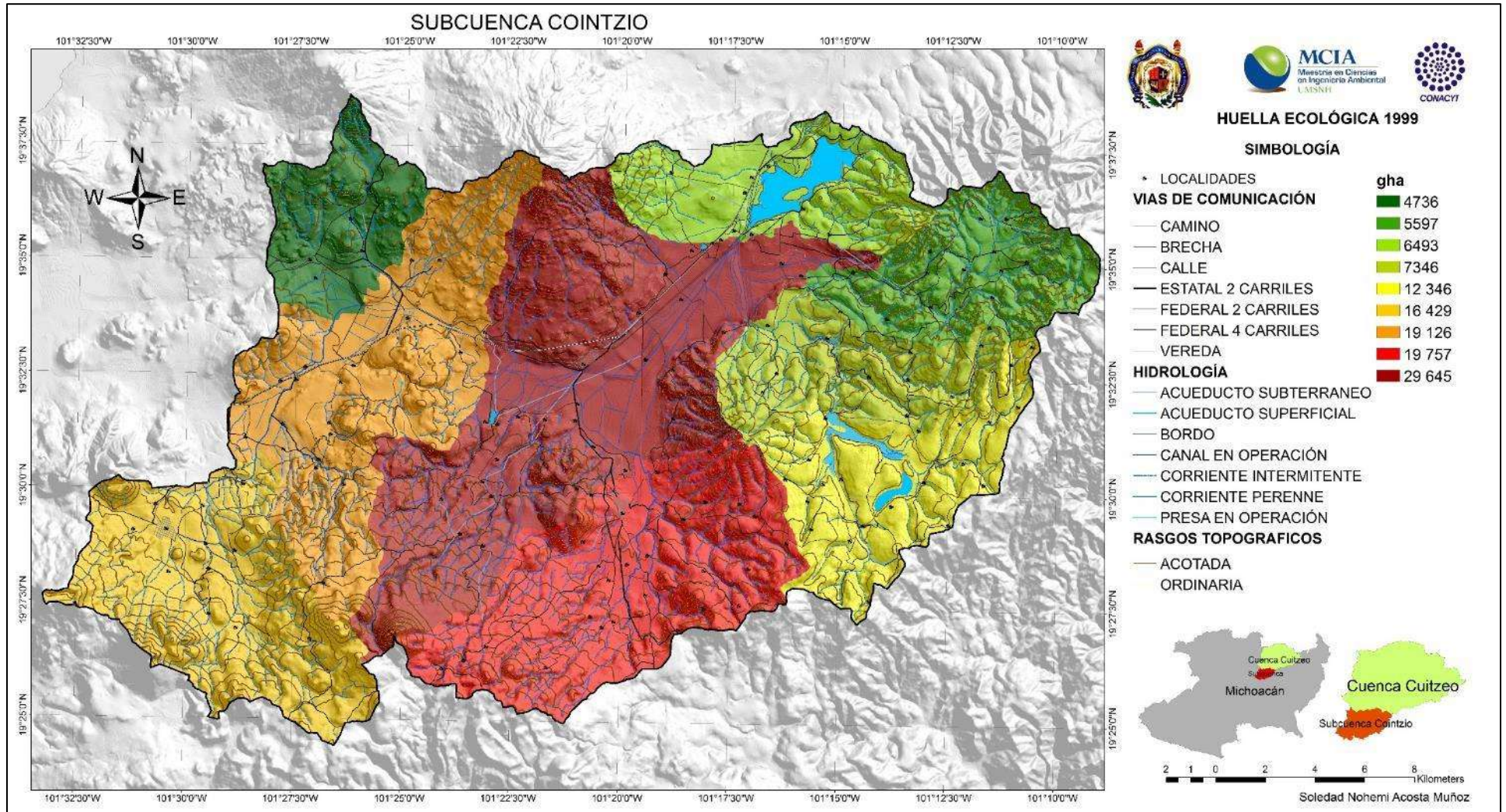


Mapa 8.3 Capacidad ecológica por microcuenca en 2014

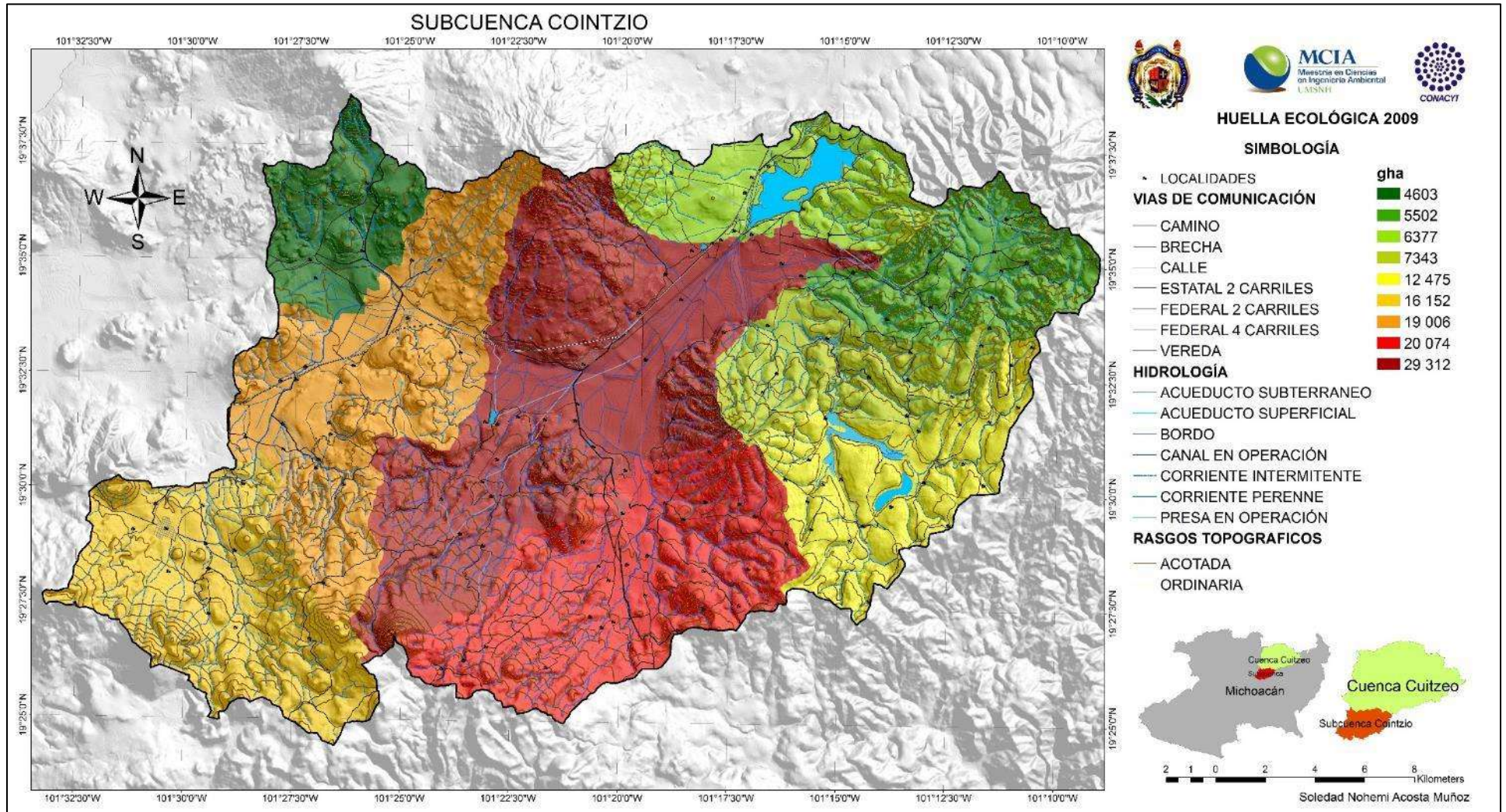


Anexo 9

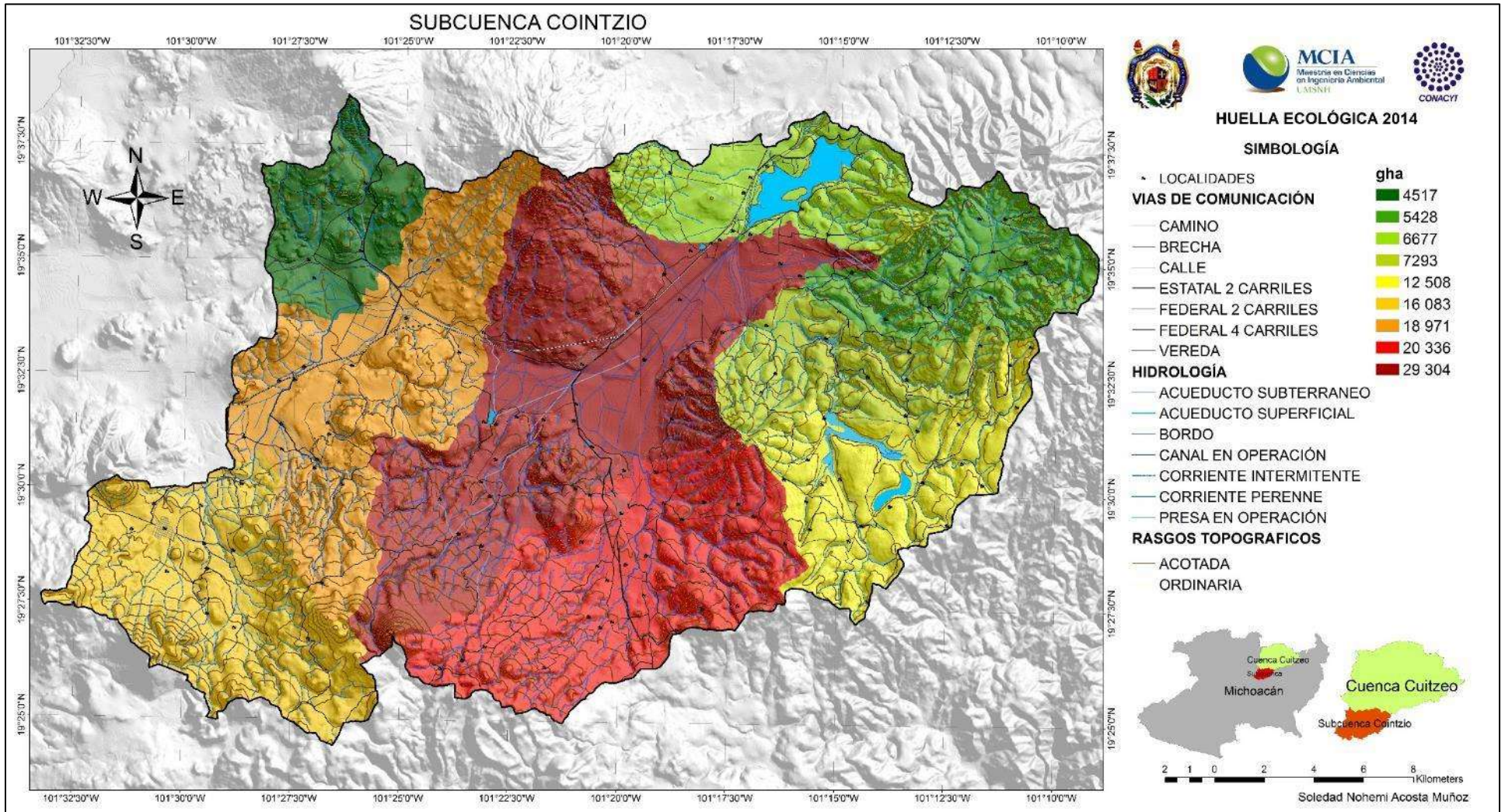
Mapa 9.1 Huella ecológica en 1999



Mapa 9.2 Huella ecológica en 2009

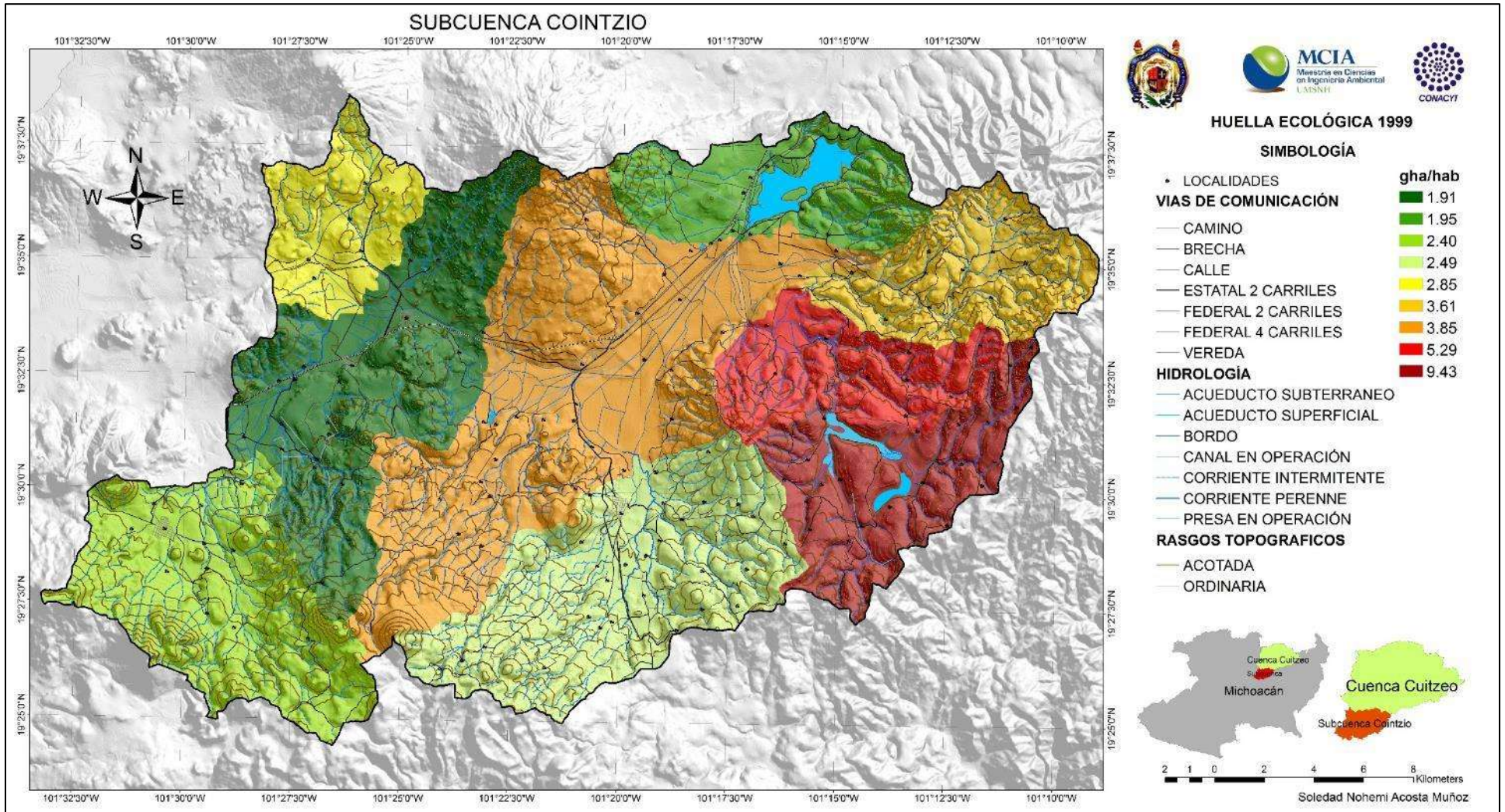


Mapa 9.3 Huella ecológica en 2014

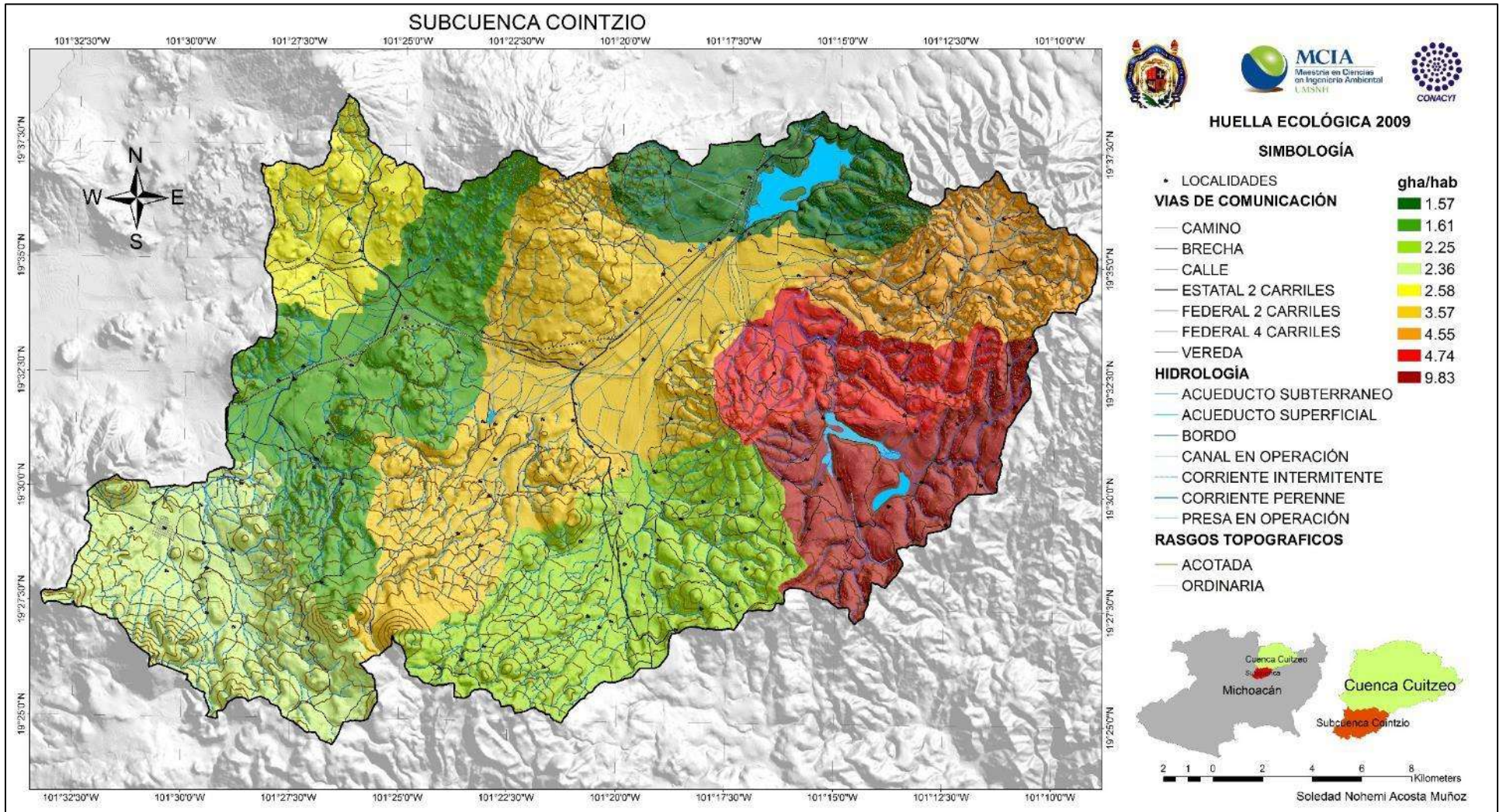


Anexo 10

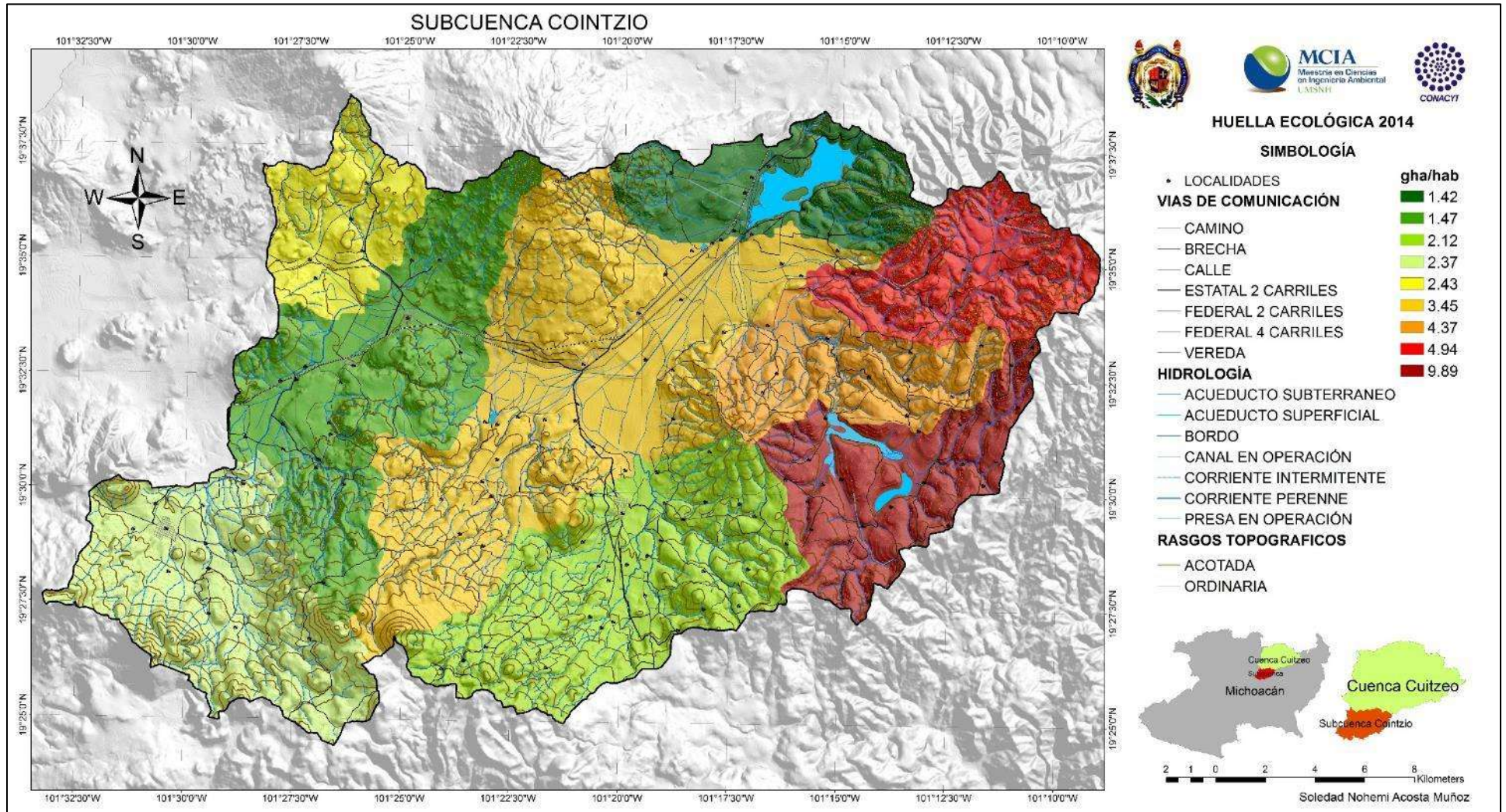
Mapa 10.1 Huella ecológica por habitante en 1999



Mapa 10.2 Huella ecológica por habitante en 2009

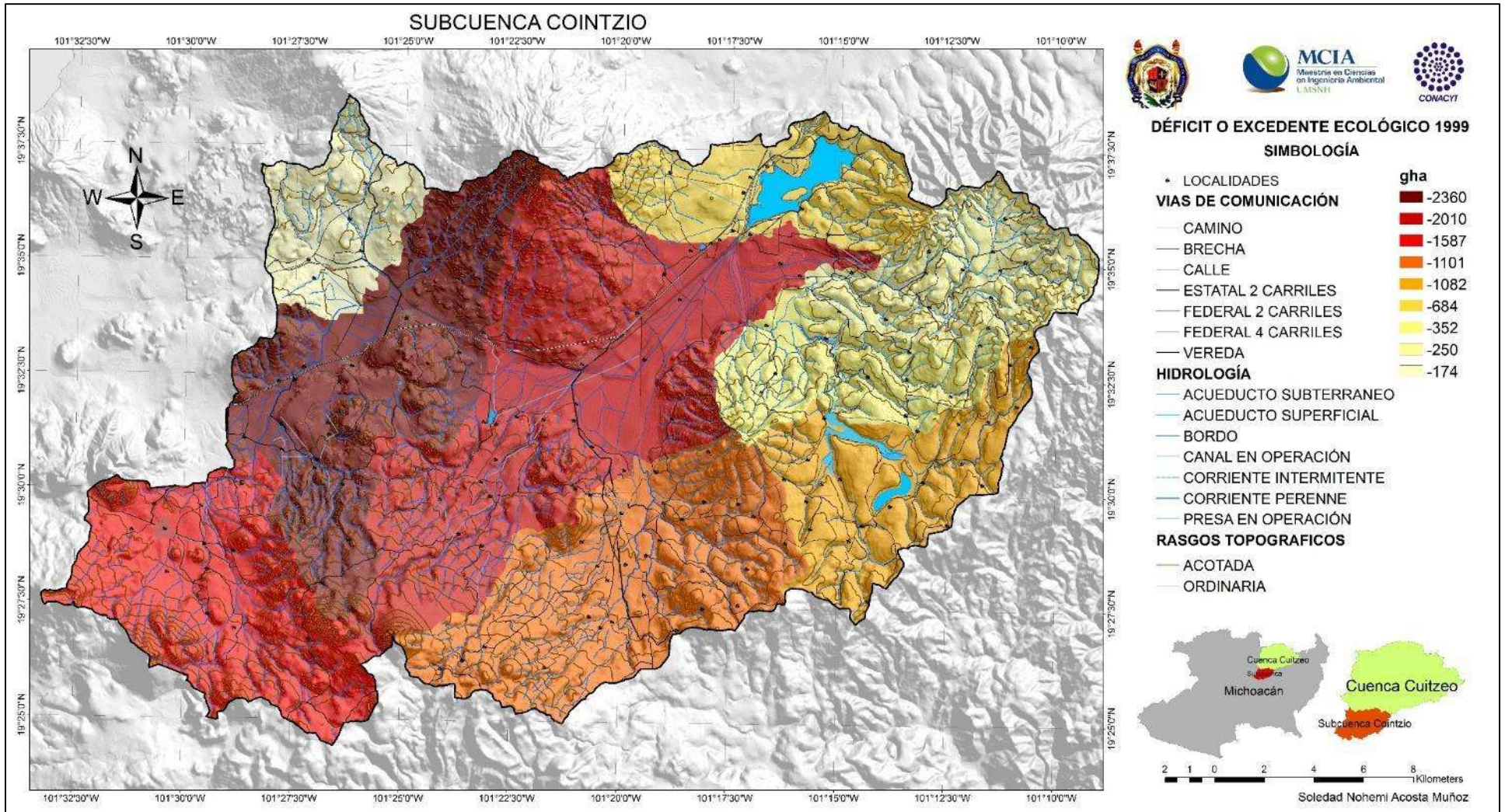


Mapa 10.3 Huella ecológica por habitante en 2014

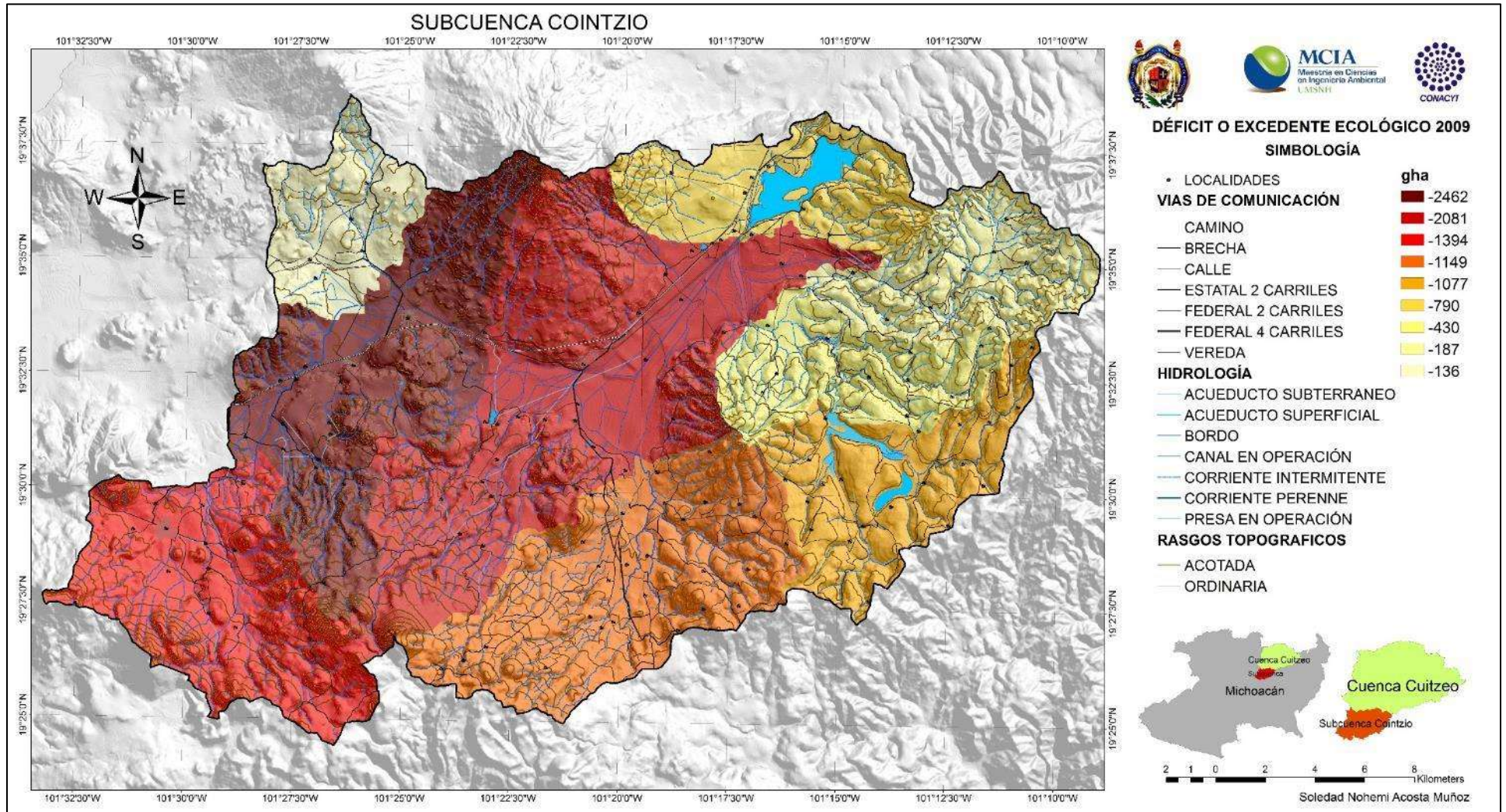


Anexo 11

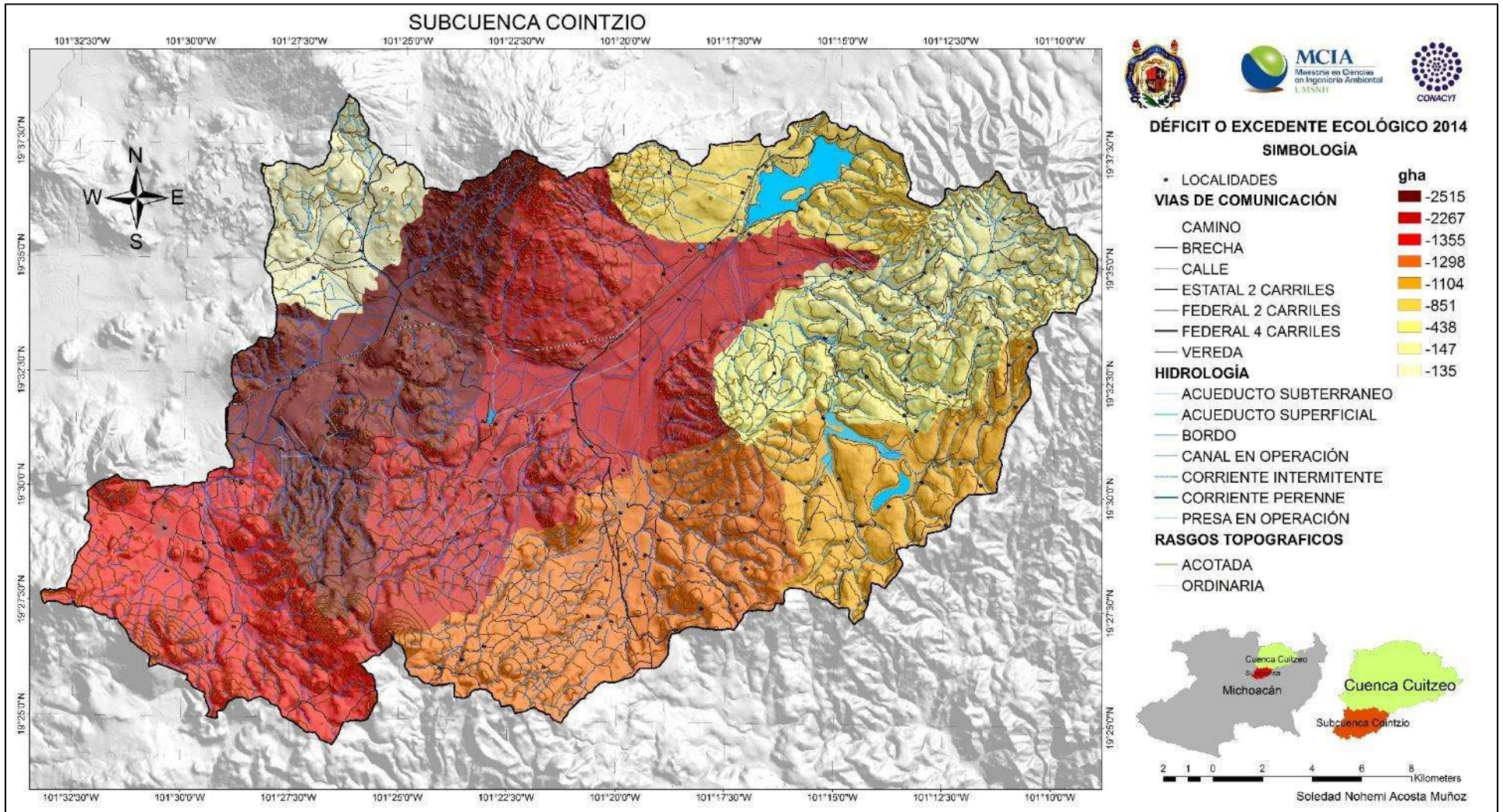
Mapa 11.1 Déficit o excedente ecológico en 1999



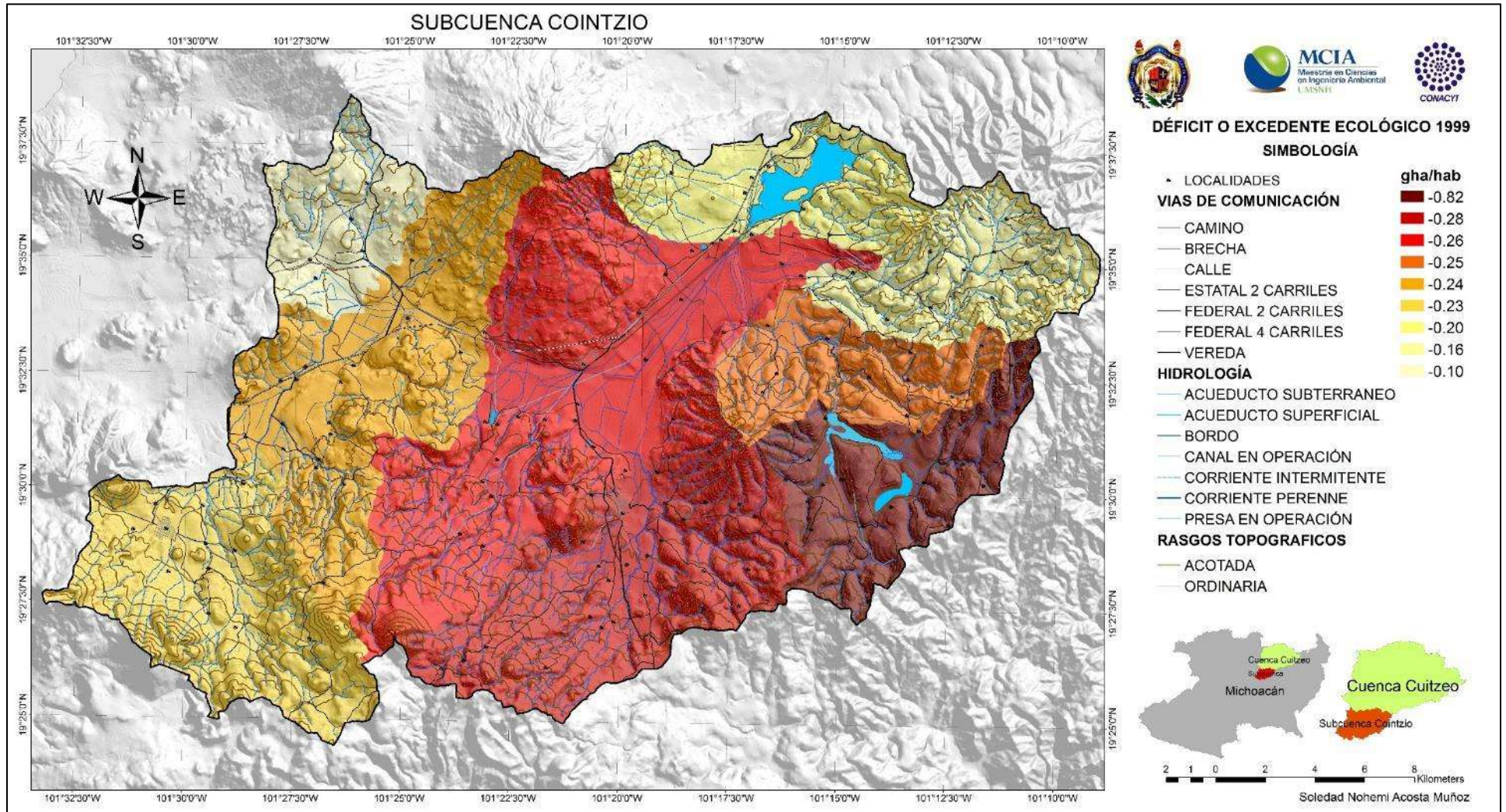
Mapa 11.2 Déficit o excedente ecológico en 2009



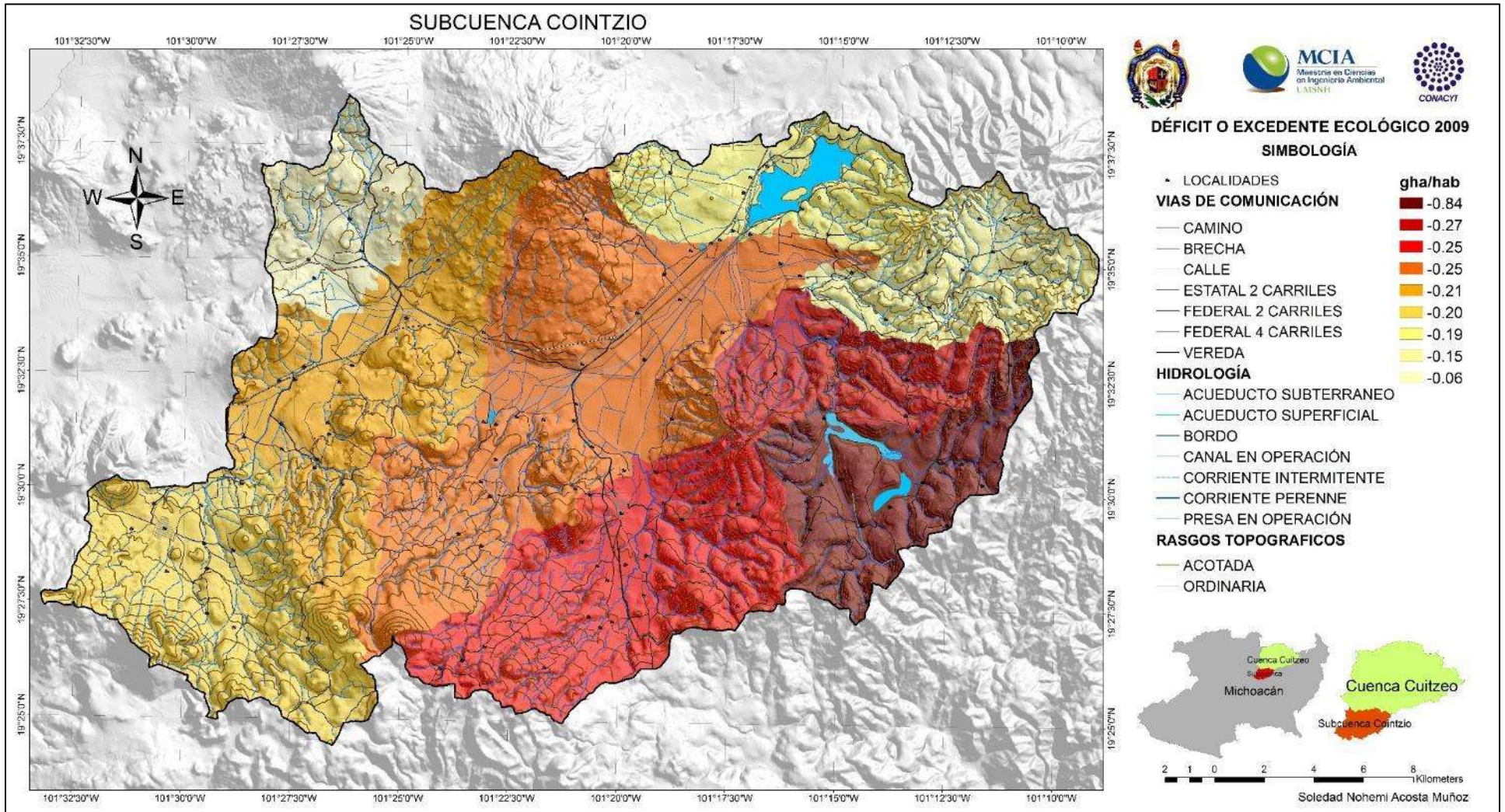
Mapa 11.3 Déficit o excedente ecológico en 2014



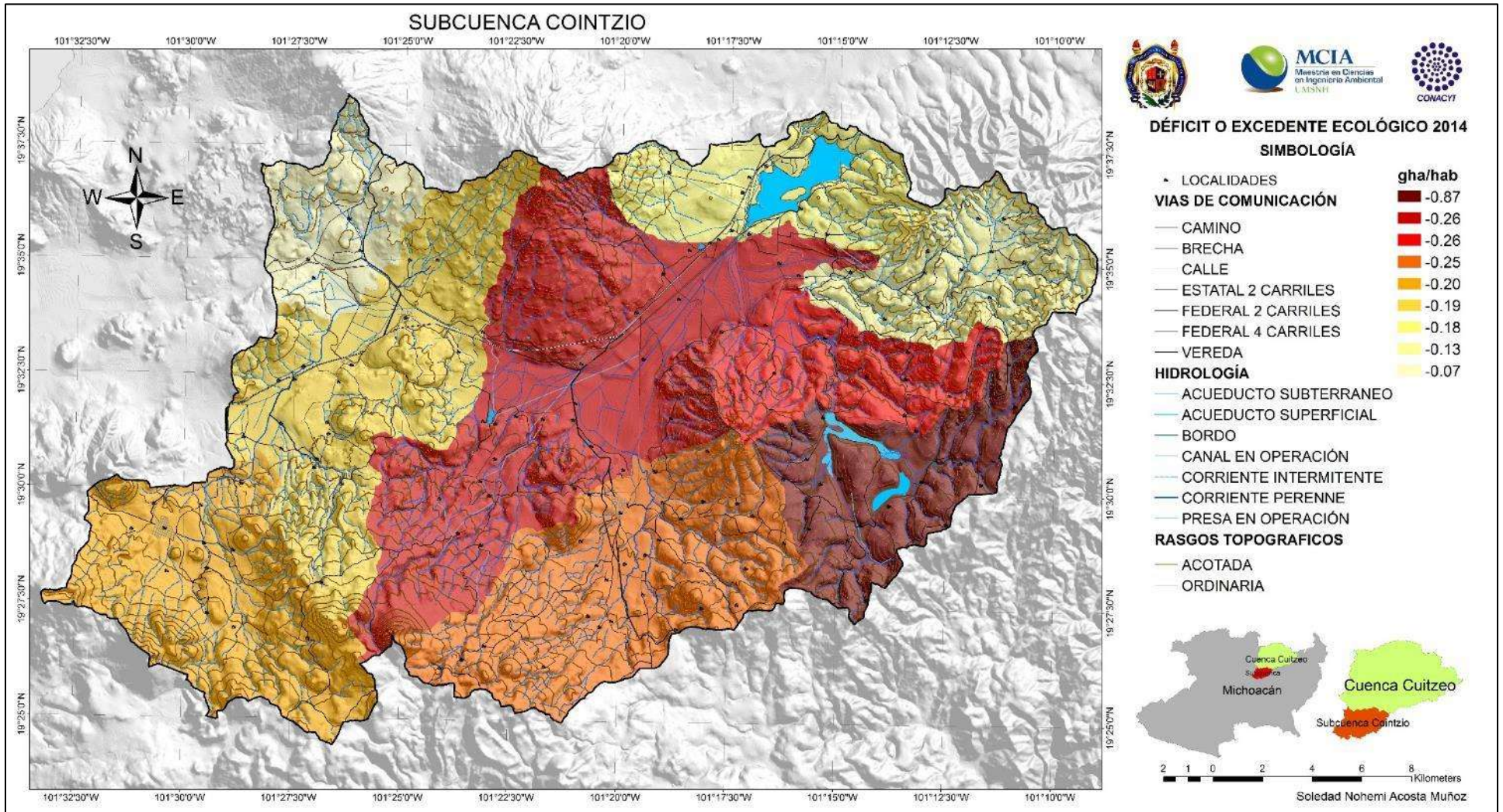
Mapa 11.4 Déficit o excedente ecológico por habitante en 1999



Mapa 11.5 Déficit o excedente ecológico por habitante en 2009

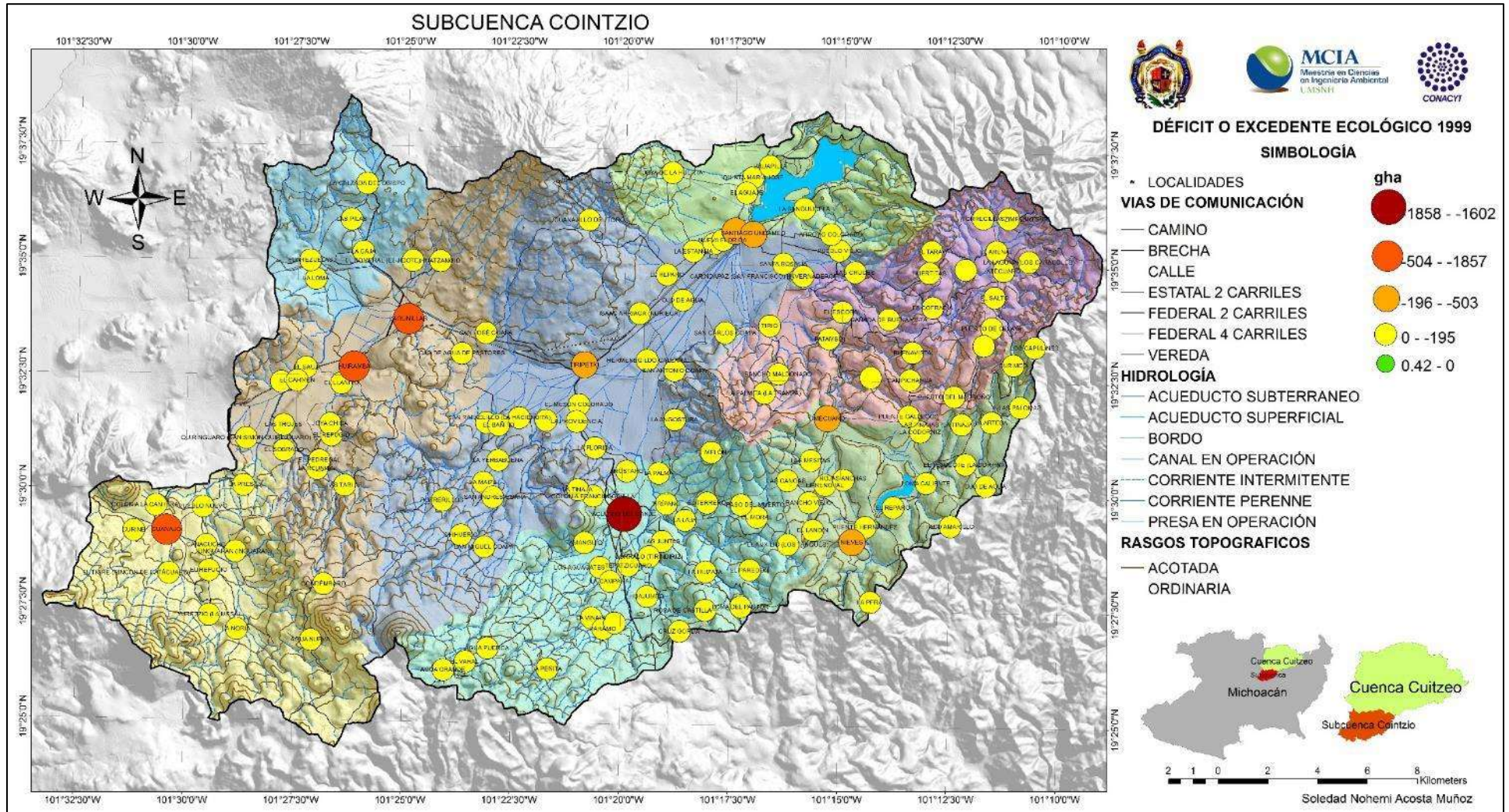


Mapa 11.6 Déficit o excedente ecológico por habitante en 2014

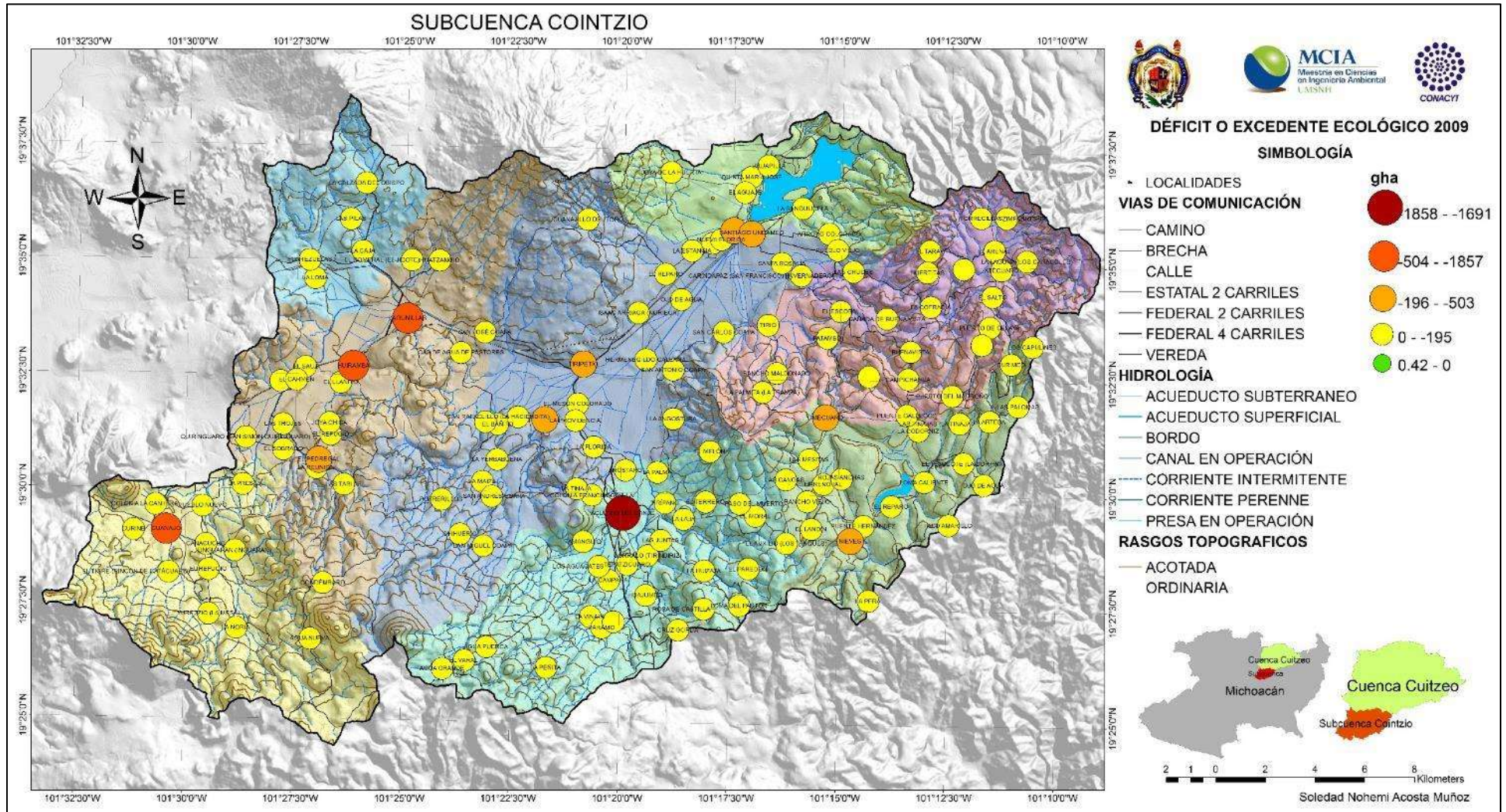


Anexo 12

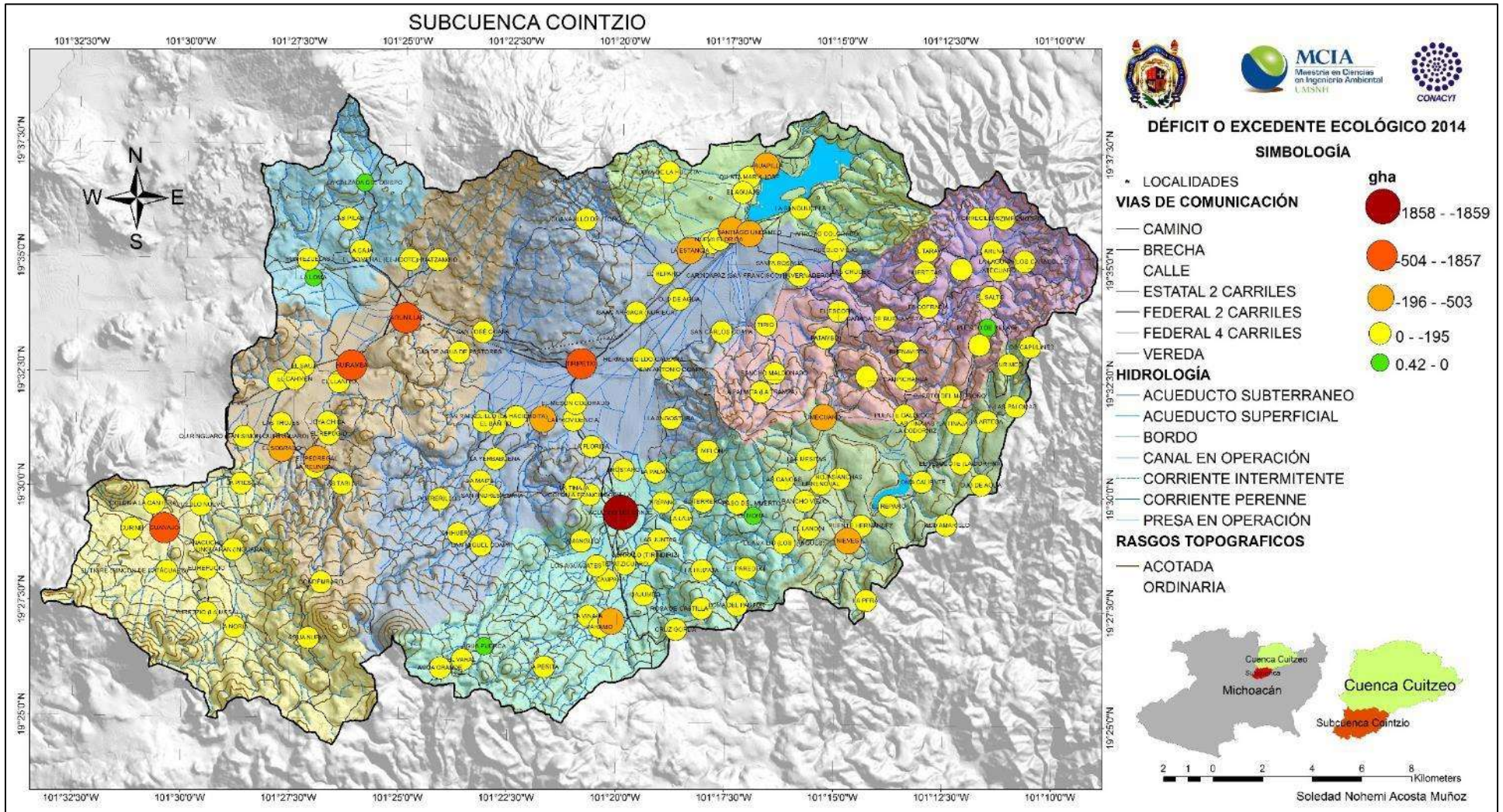
Mapa 12.1 Déficit o excedente ecológico por localidad en 1999



Mapa 12.2 Déficit o excedente ecológico por localidad en 2009



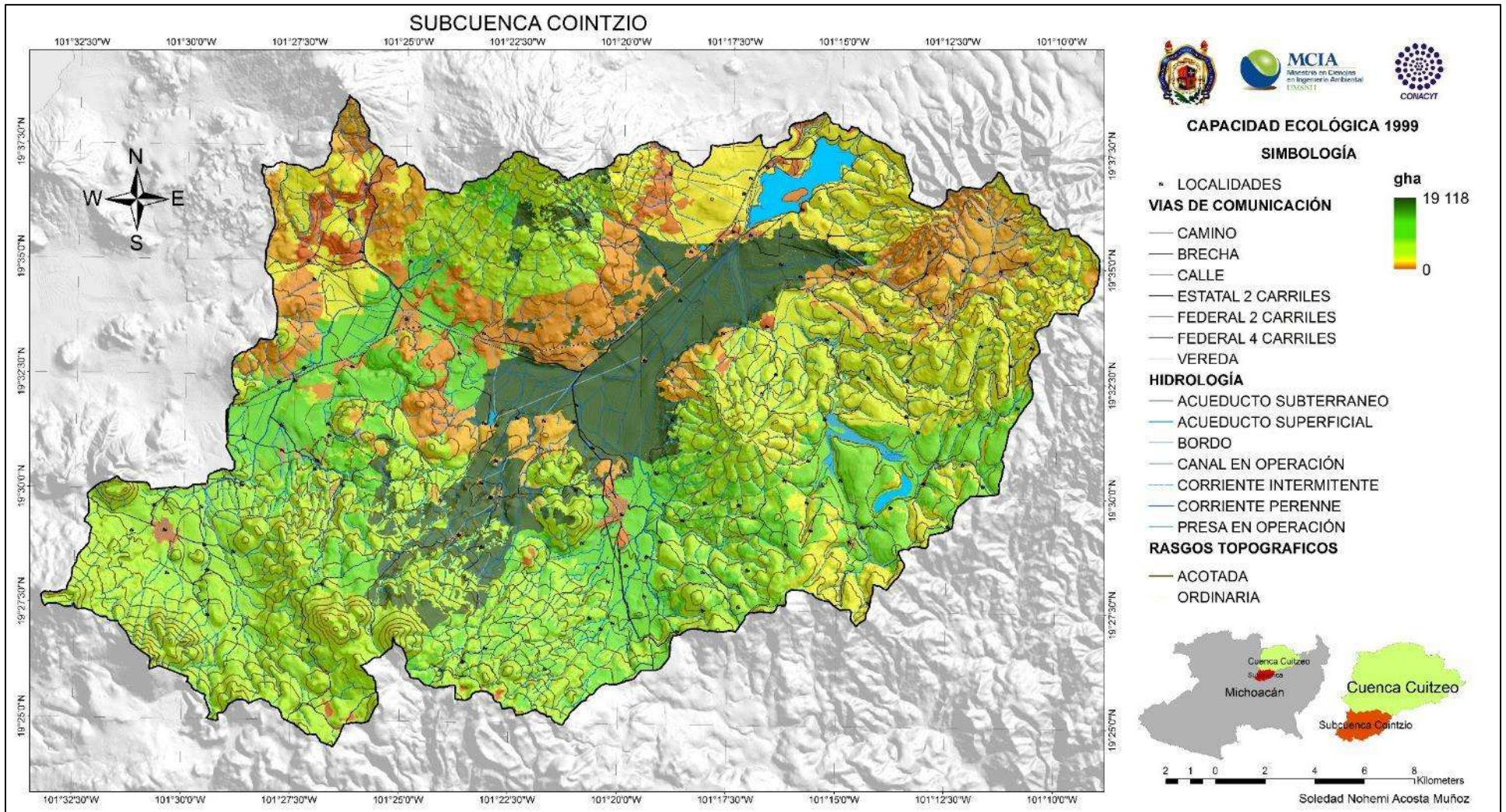
Mapa 12.3 Déficit o excedente ecológico por localidad en 2014



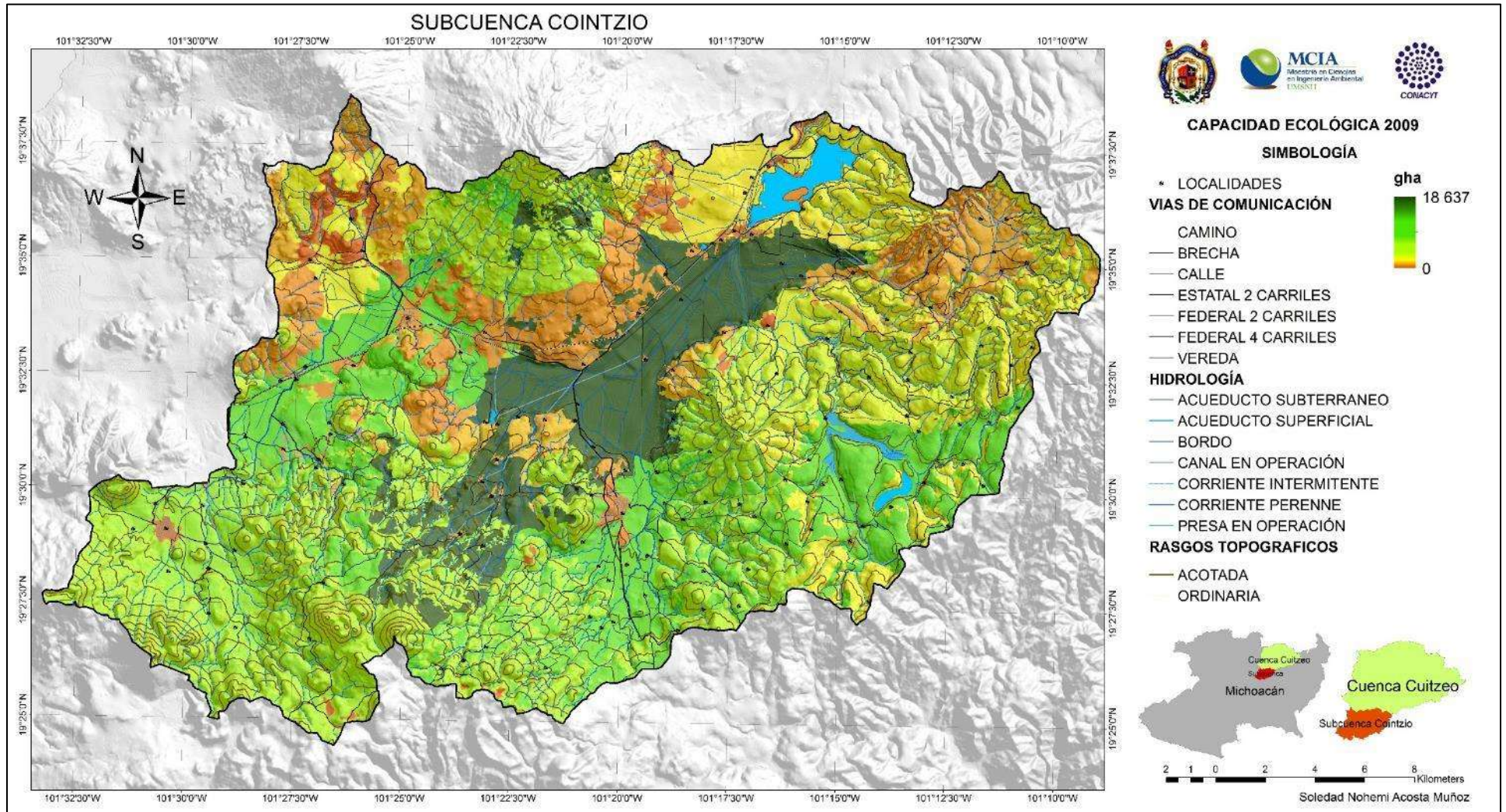
Anexo 13

13.1 Mapas de Capacidad ecológica espacializada

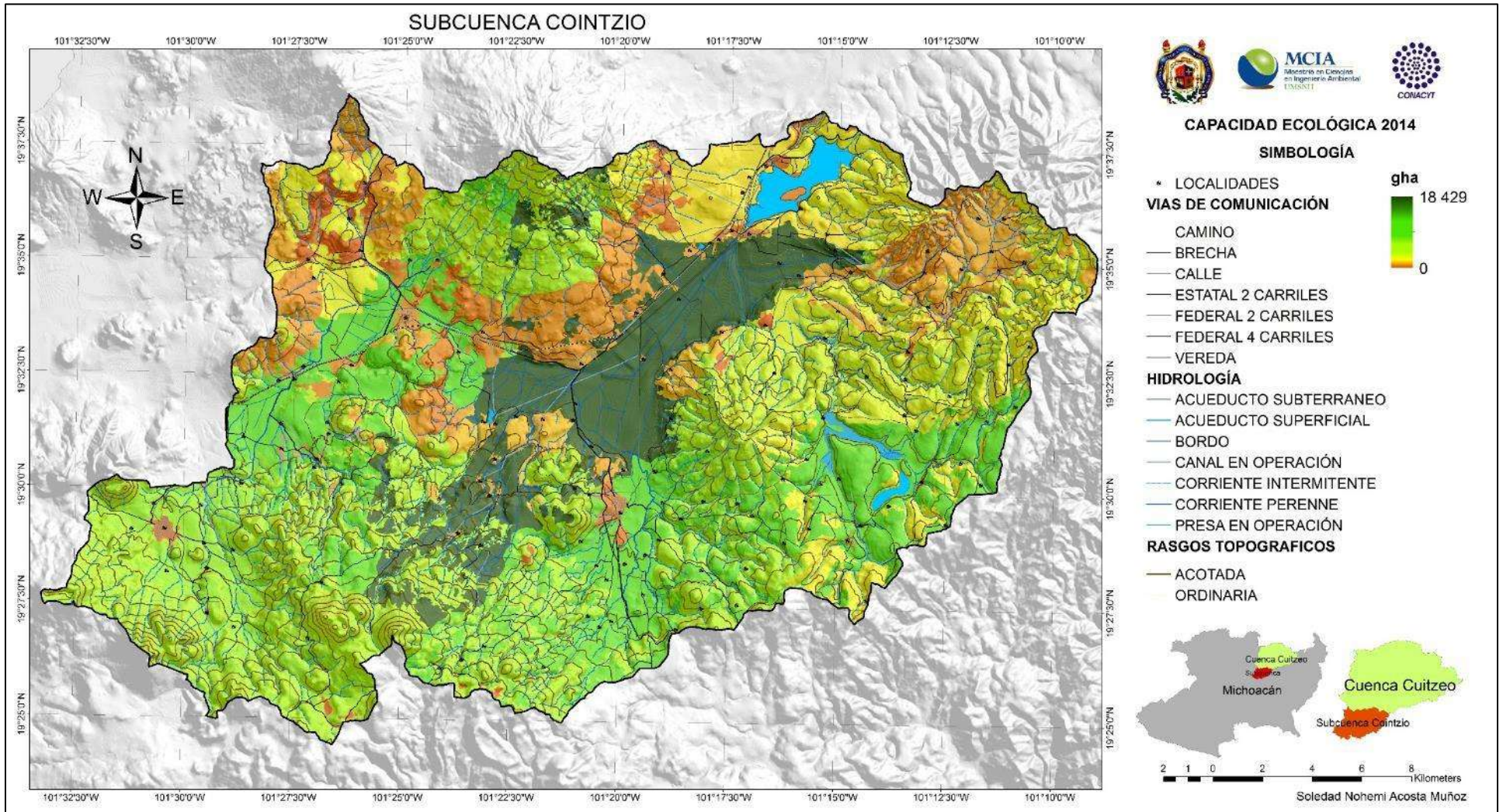
Mapa 13.1.1 Capacidad ecológica espacializada para 1999



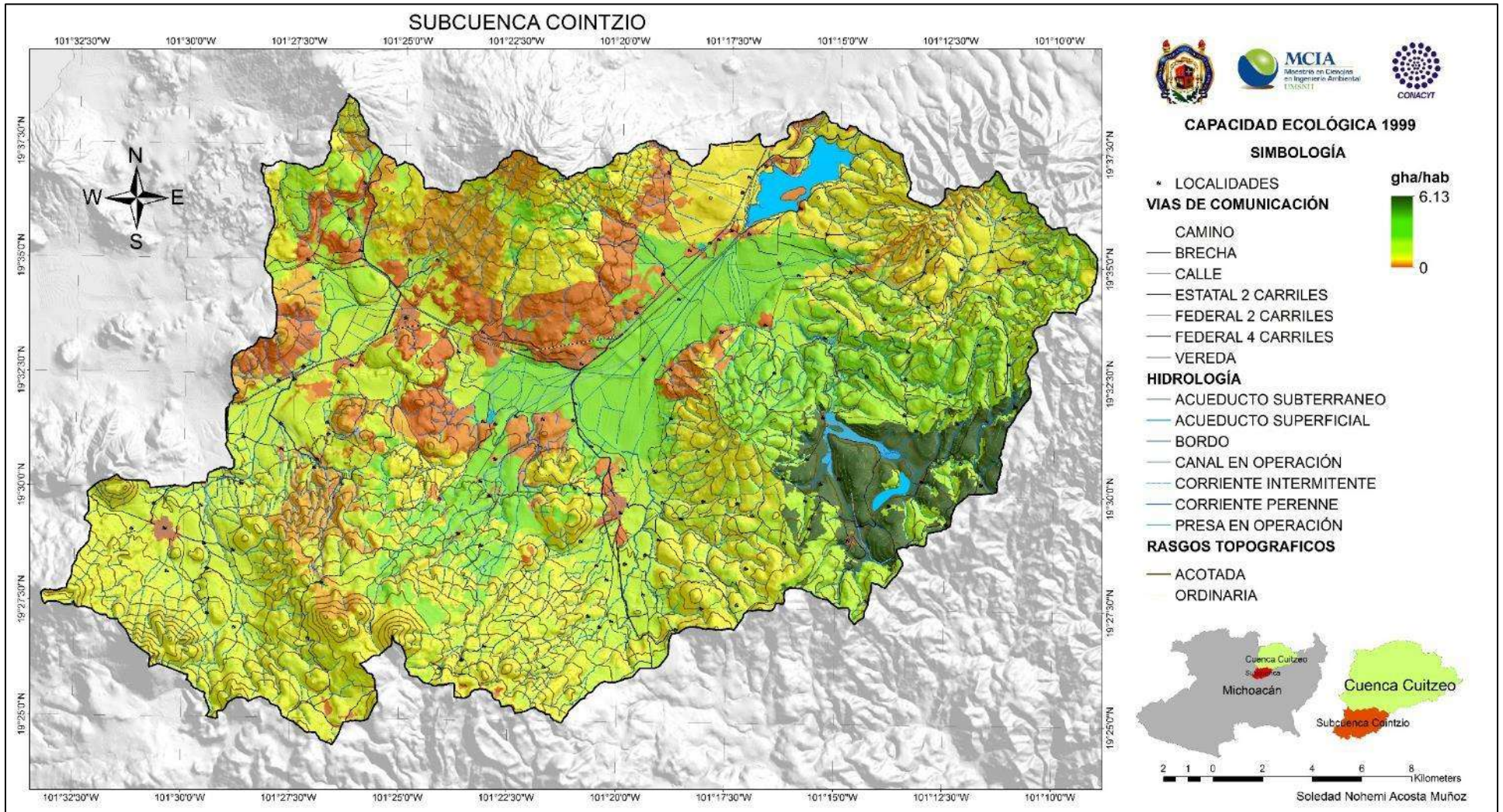
Mapa 13.1.2 Capacidad ecológica espacializada para 2009



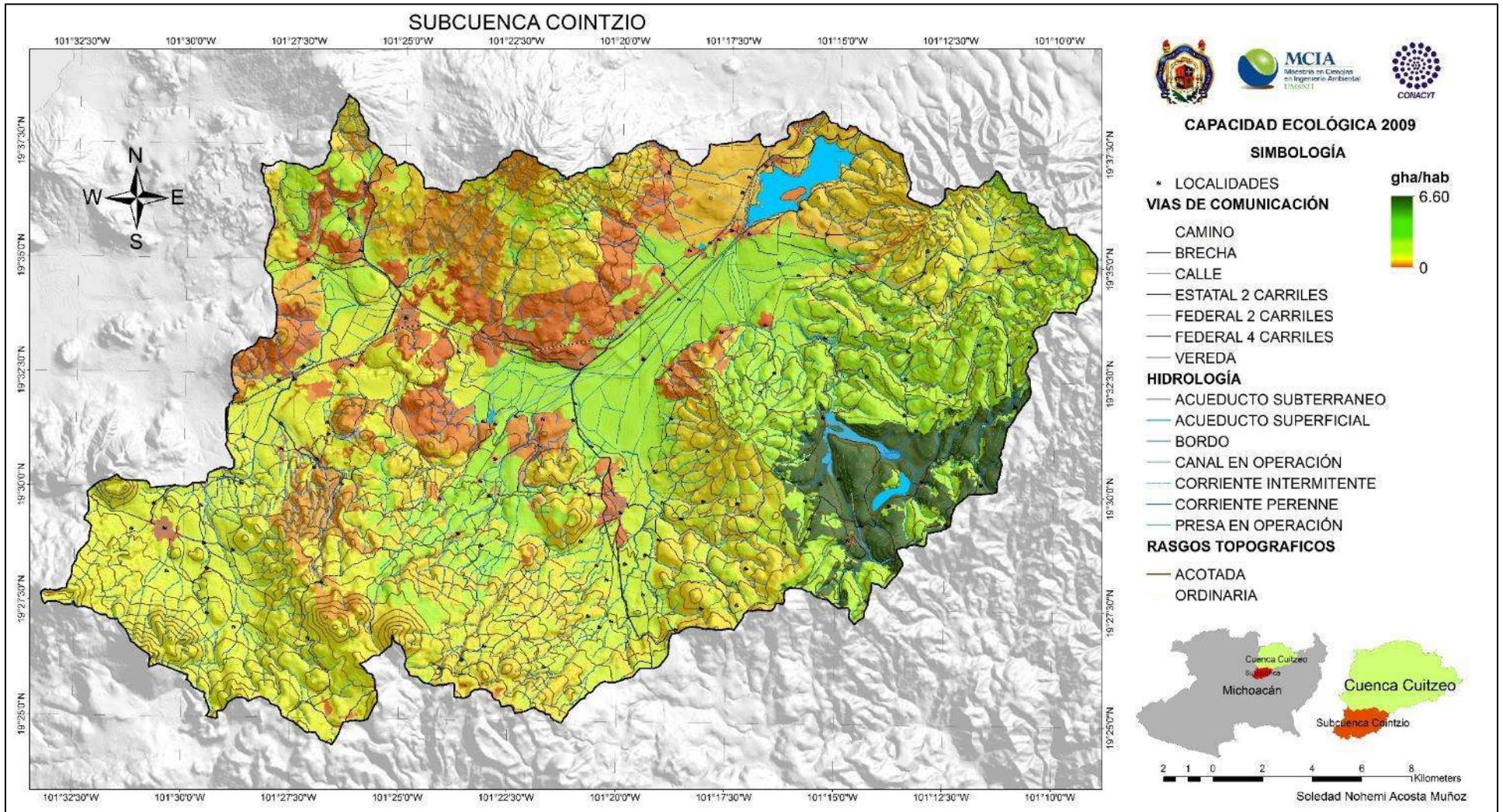
Mapa 13.1.3 Capacidad ecológica espacializada para 2014



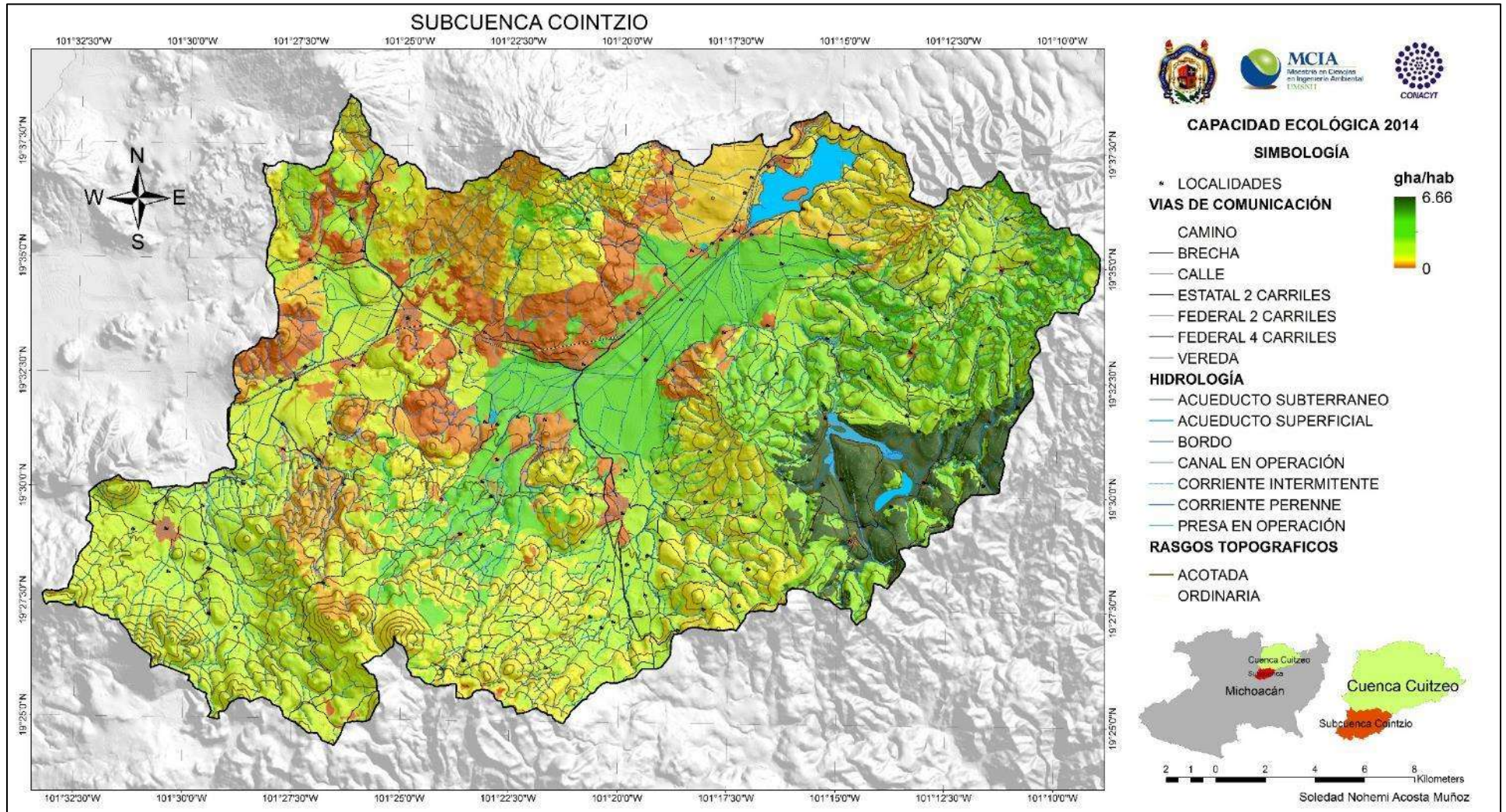
Mapa 13.1.4 Capacidad ecológica por habitante espacializada para 1999



Mapa 13.1.5 Capacidad ecológica por habitante espacializada para 2009

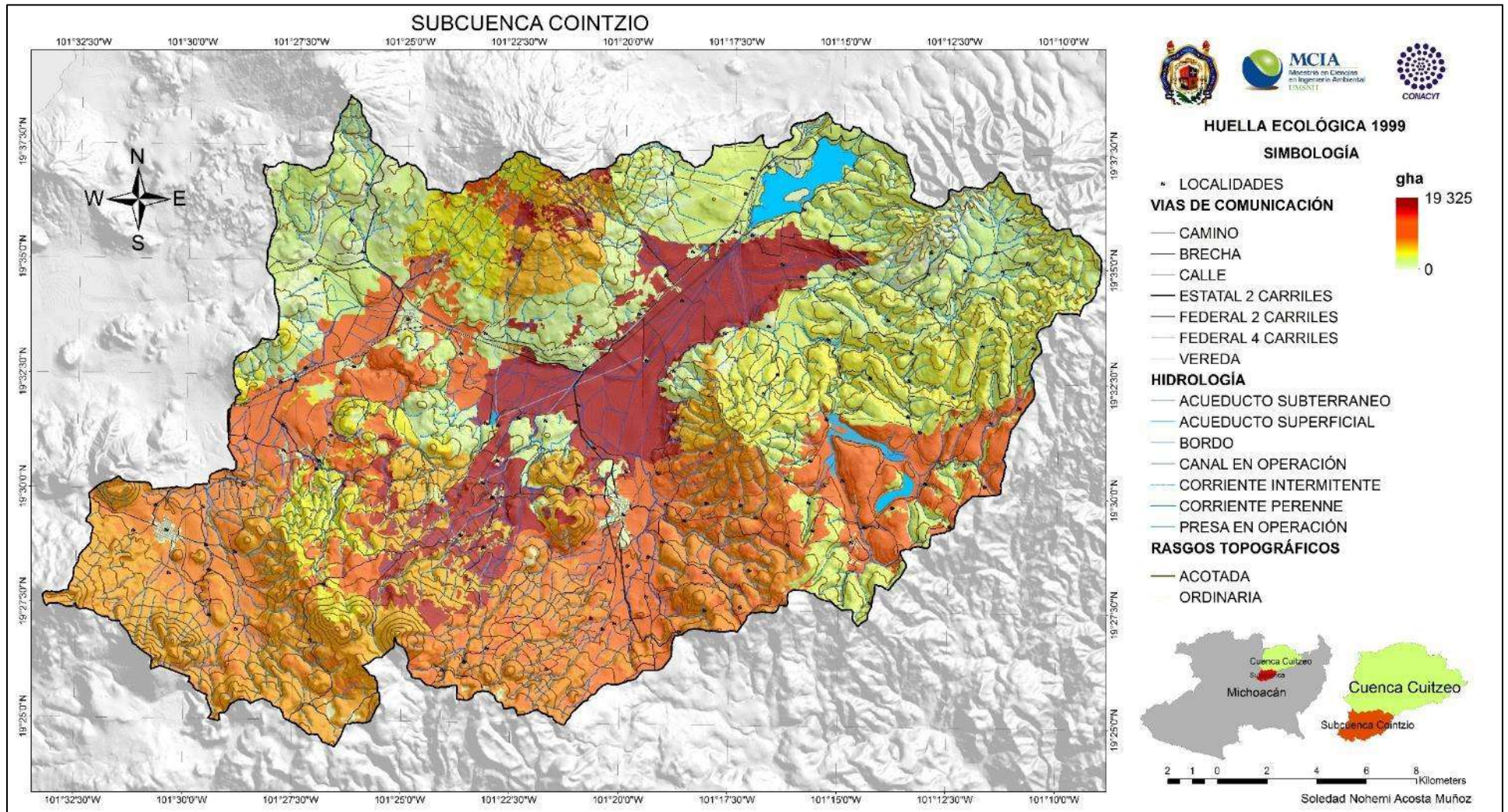


Mapa 13.1.6 Capacidad ecológica por habitante espacializada para 2014

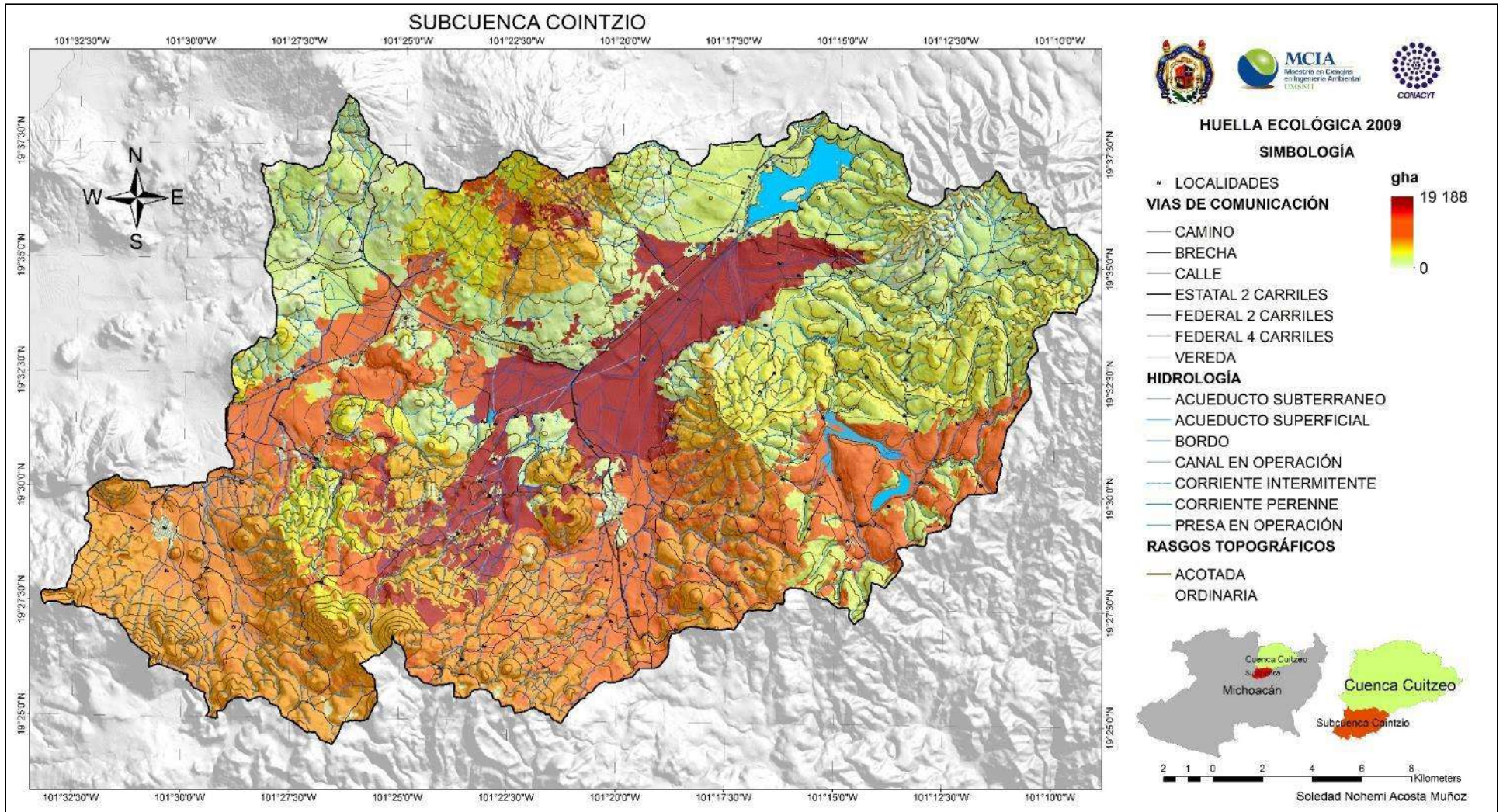


13.2 Mapas de huella ecológica espacializada

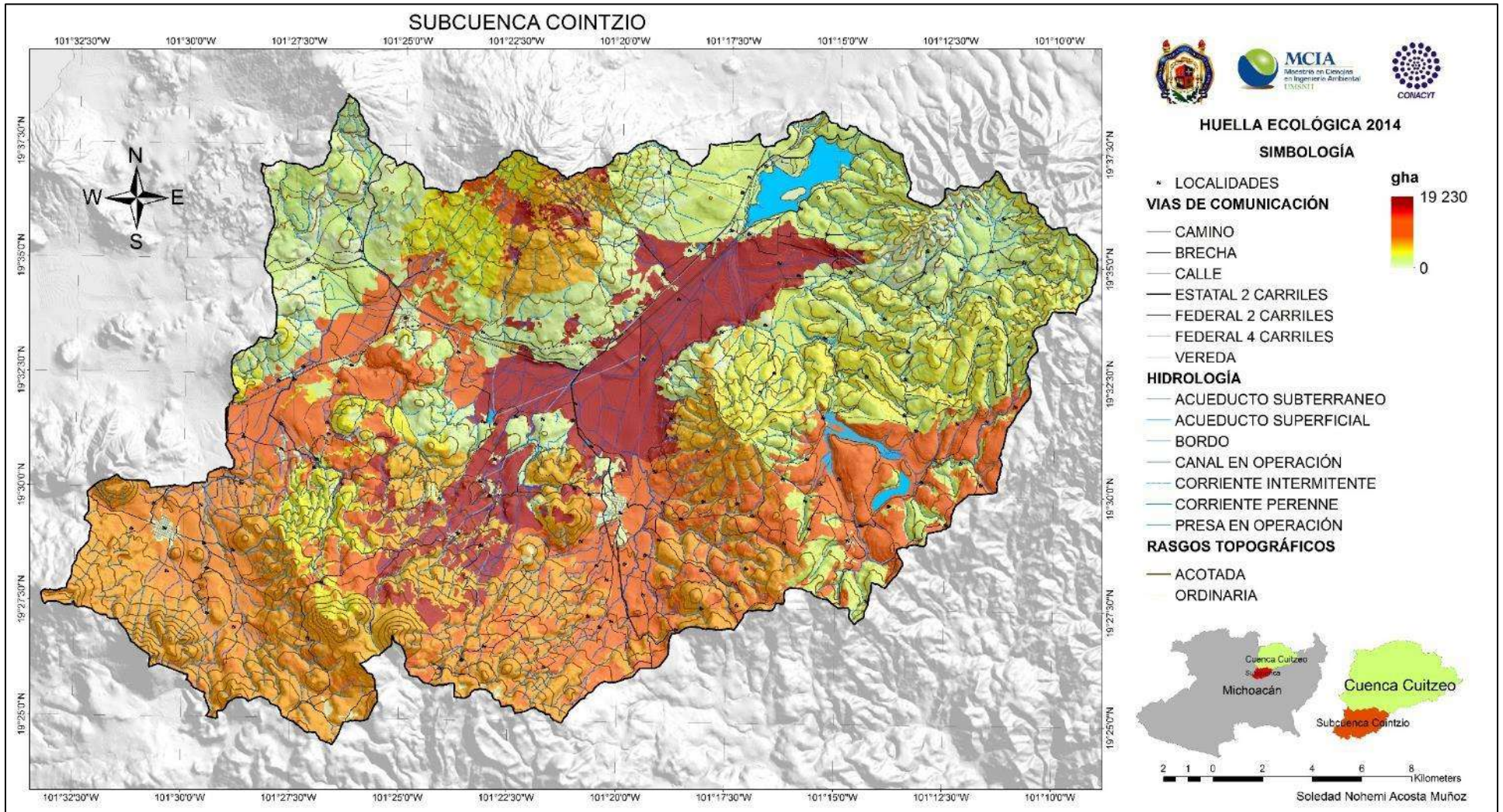
Mapa 13.2.1 Huella ecológica espacializada para 1999



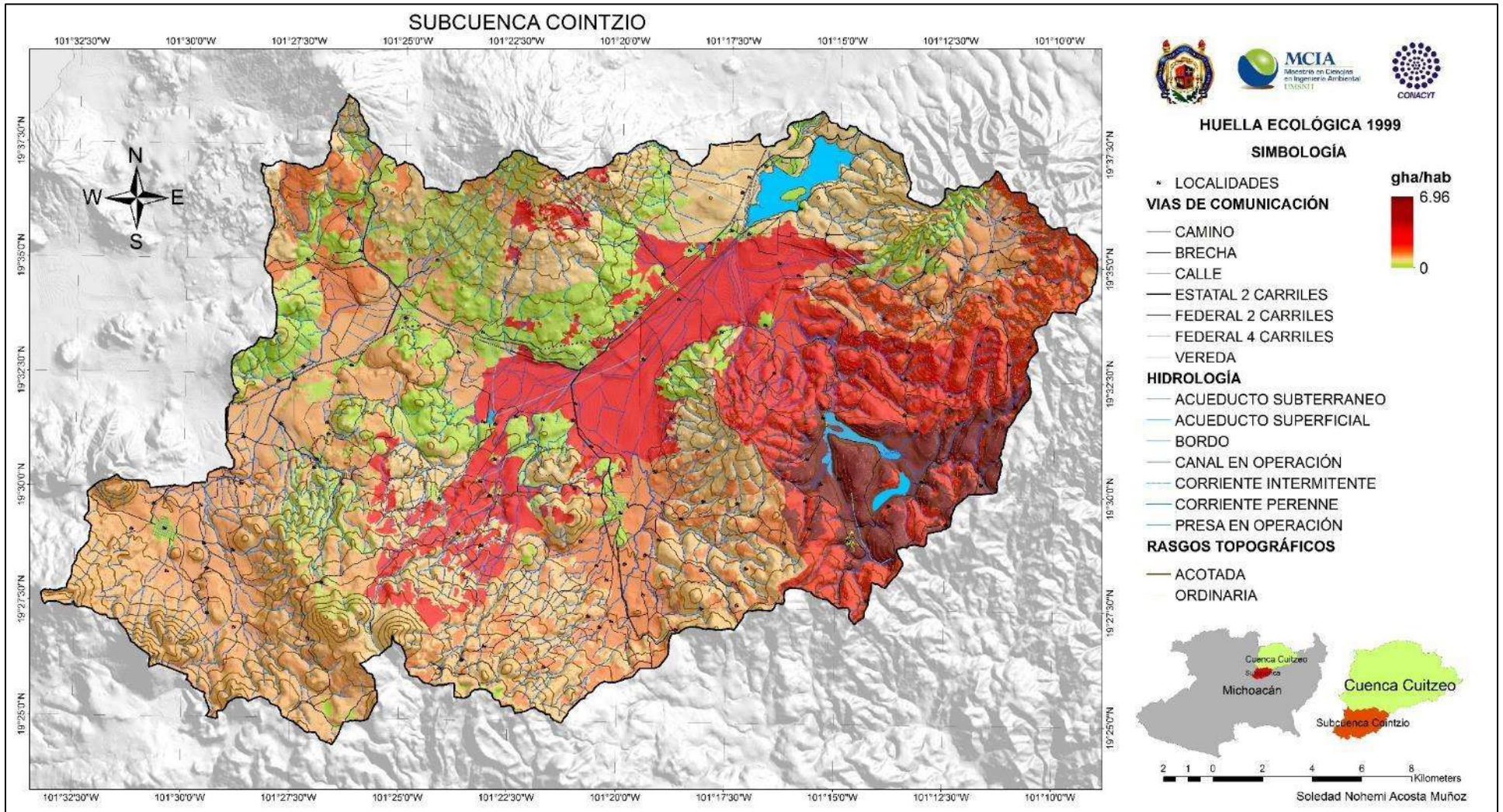
Mapa 13.2.2 Huella ecológica espacializada para 2009



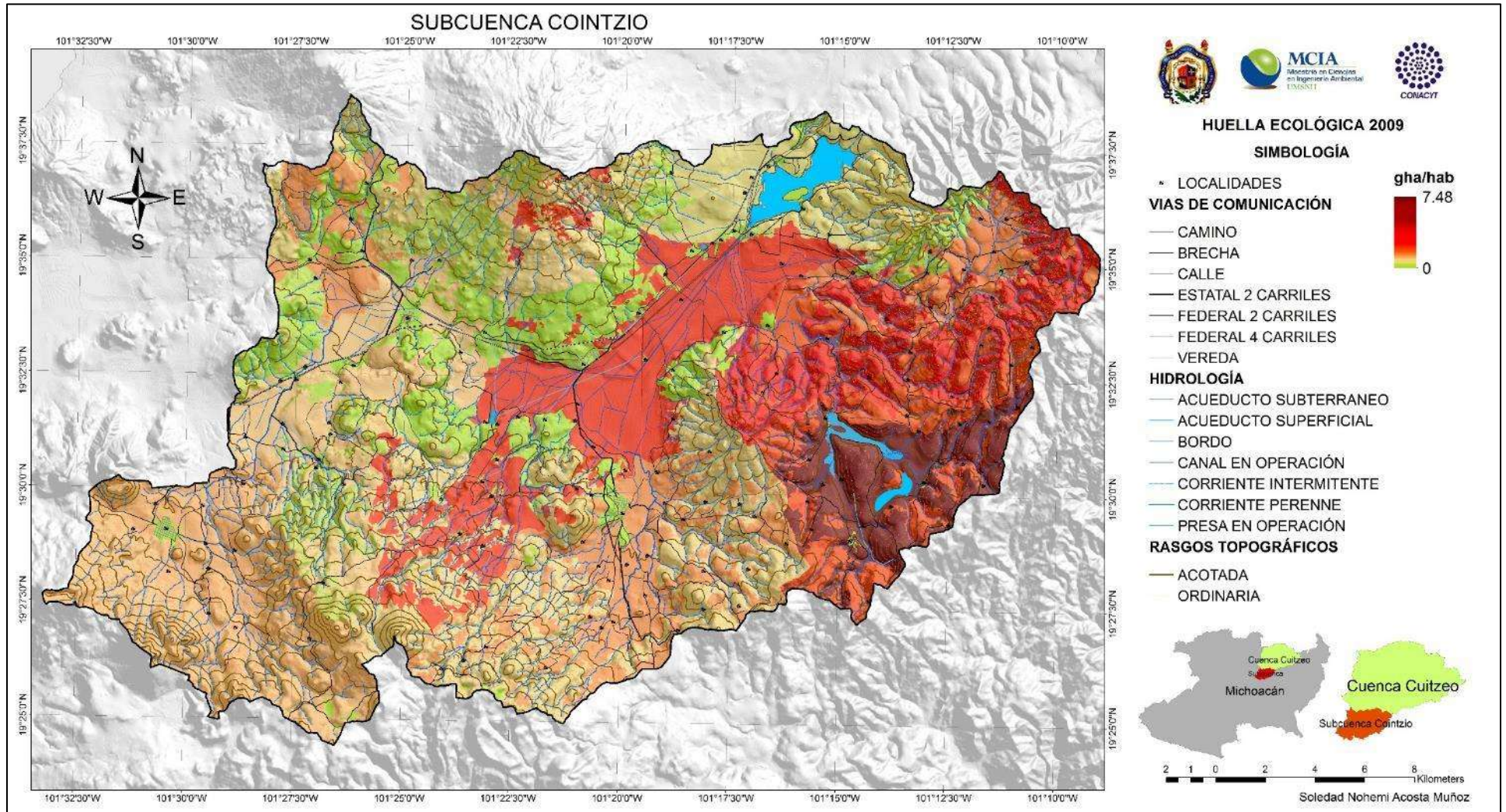
Mapa 13.2.3 Huella ecológica espacializada para 2014



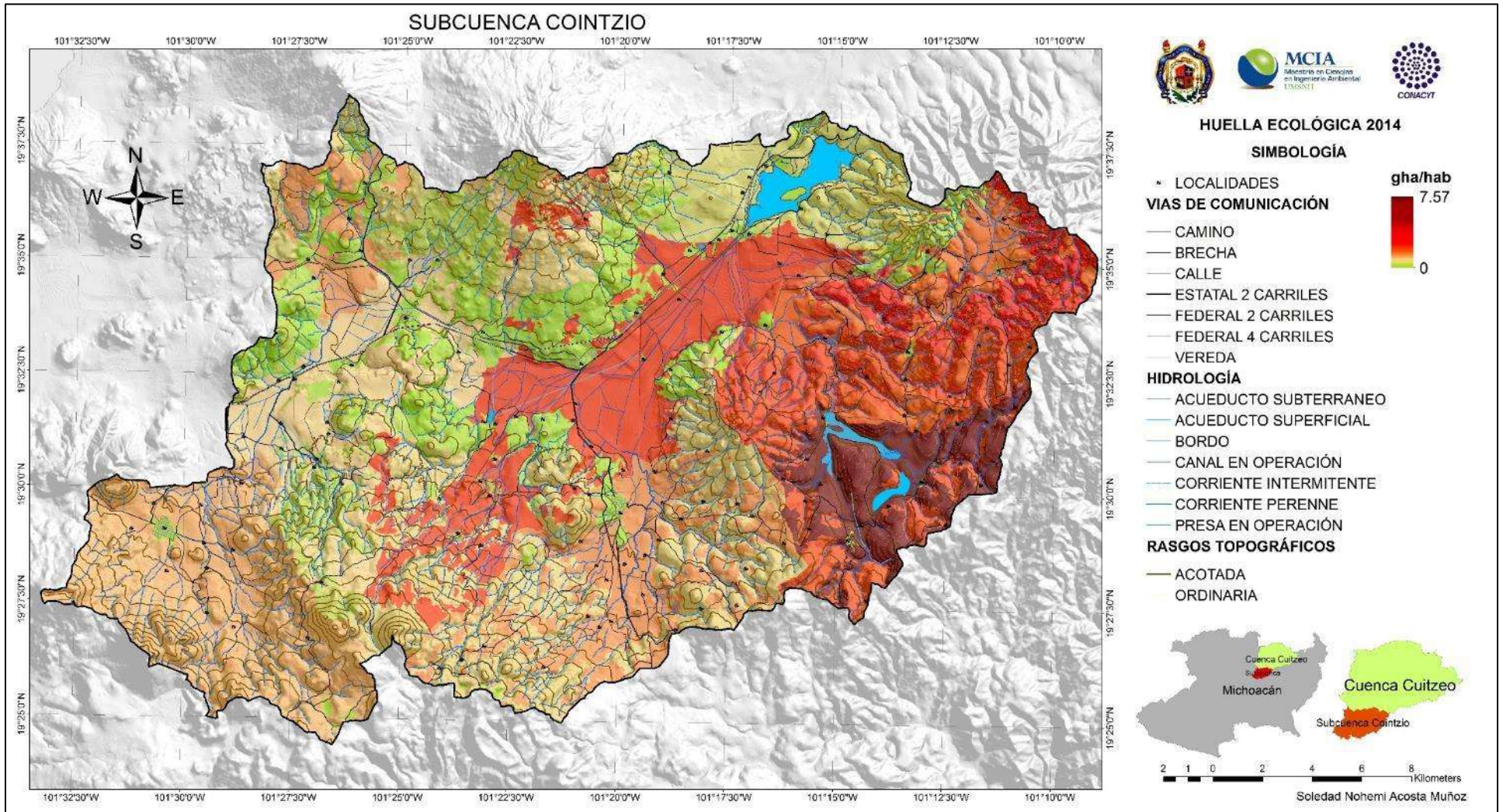
Mapa 13.2.4 Huella ecológica por habitante espacializada para 1999



Mapa 13.2.5 Huella ecológica por habitante espacializada para 2009

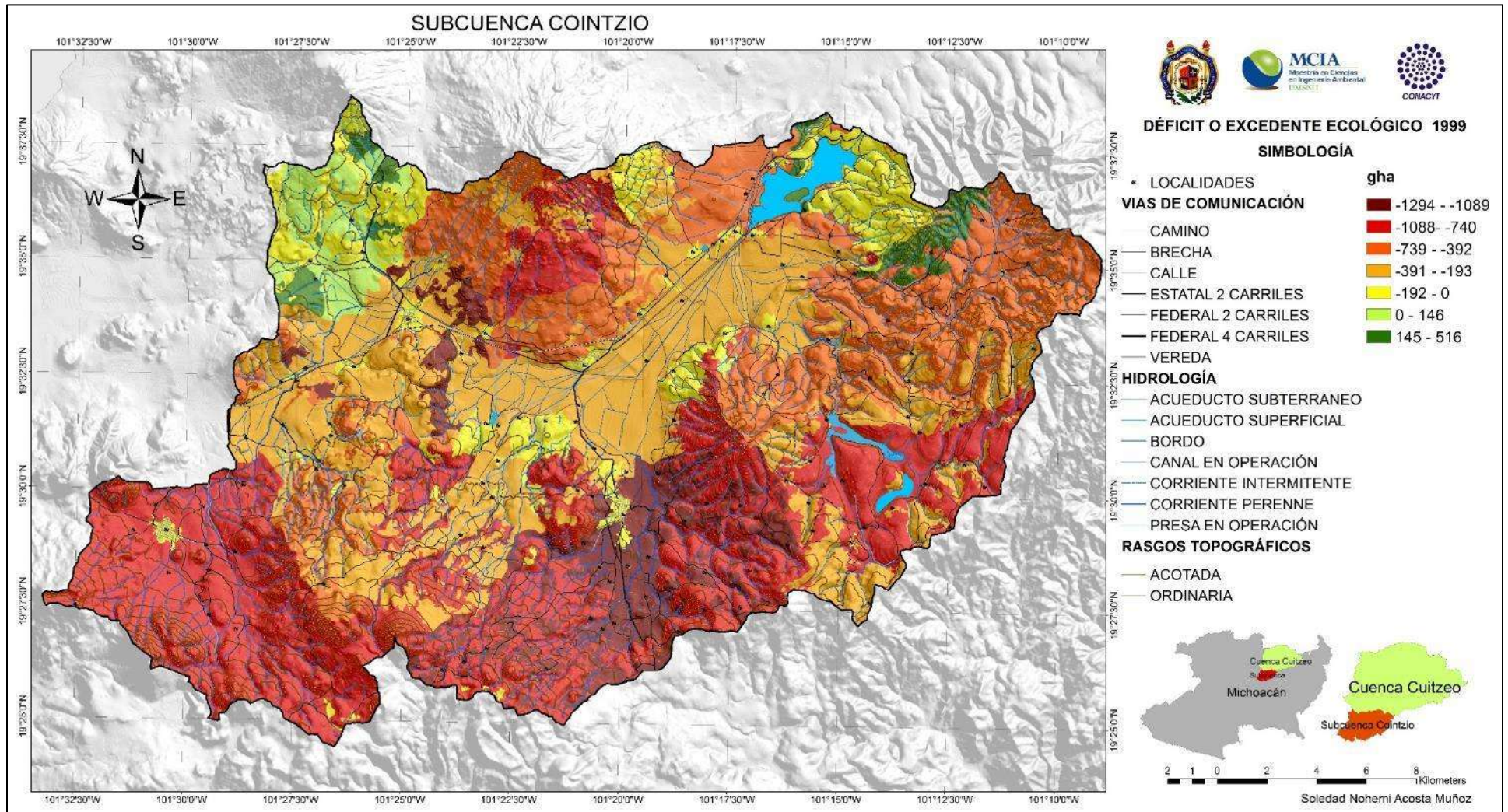


Mapa 13.2.6 Huella ecológica por habitante espacializada para 2014

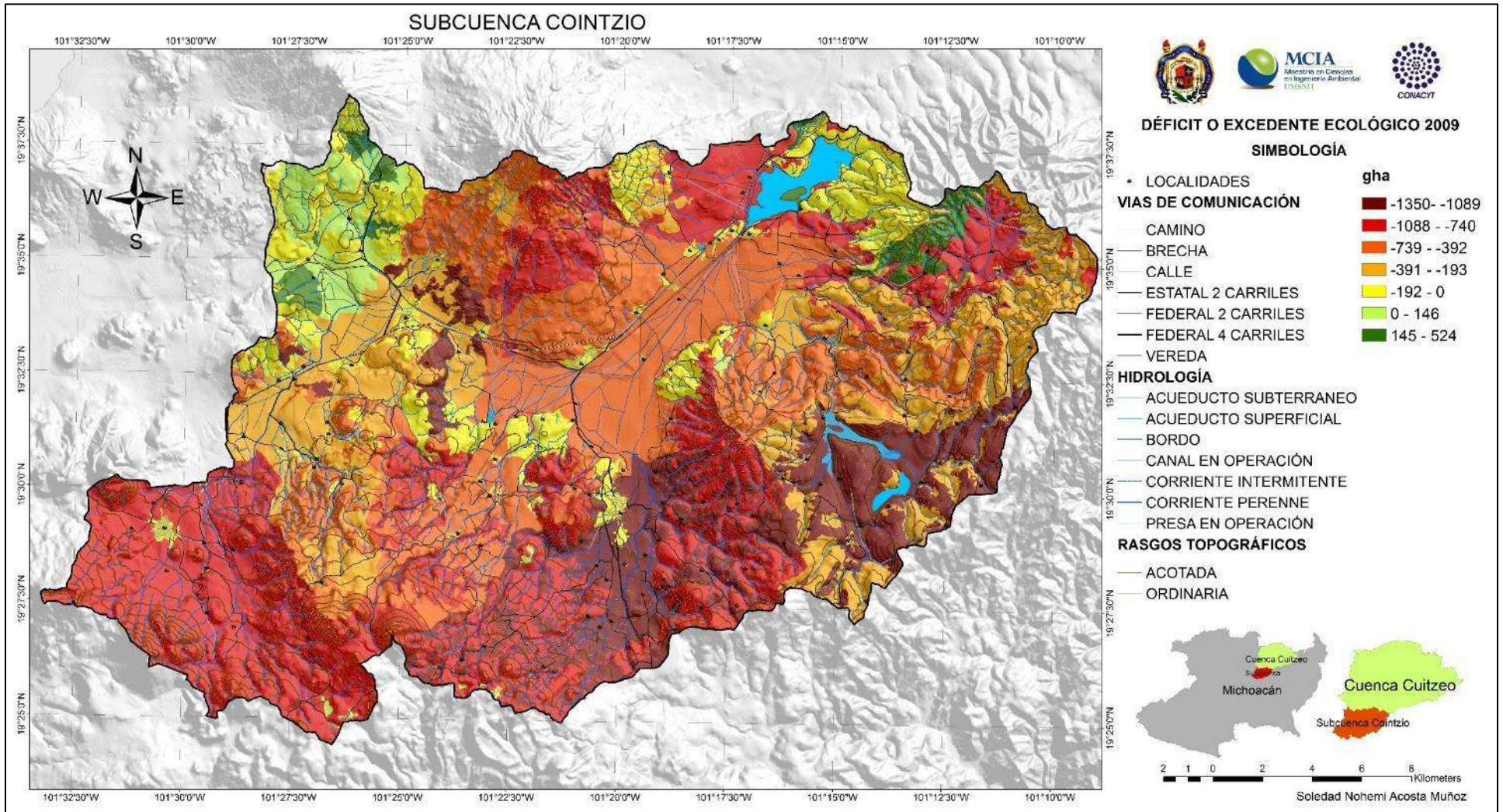


13.3 Mapas de déficit o excedente ecológico espacializado

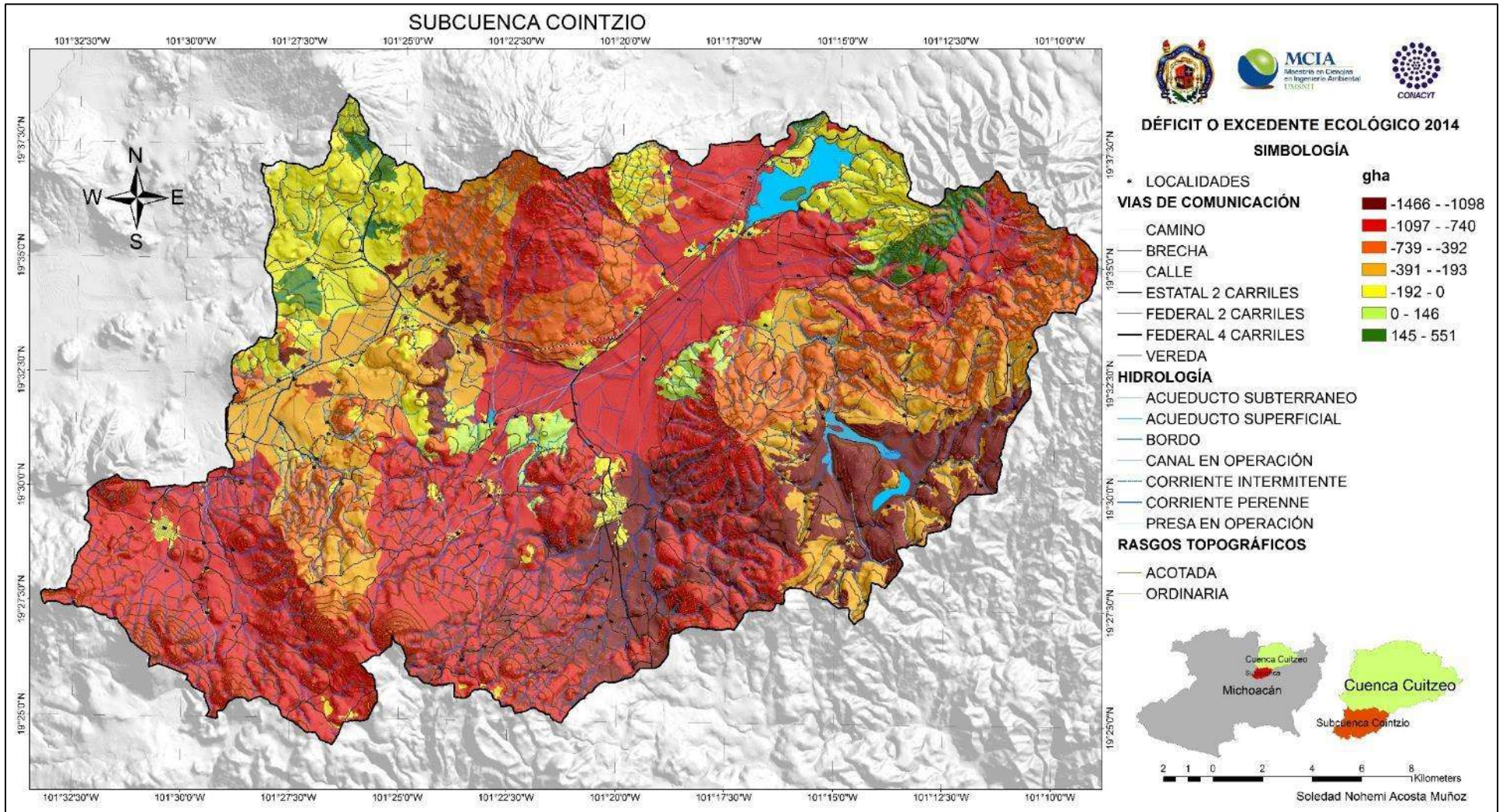
Mapa 13.3.1 Déficit o excedente ecológico espacializado para 1999



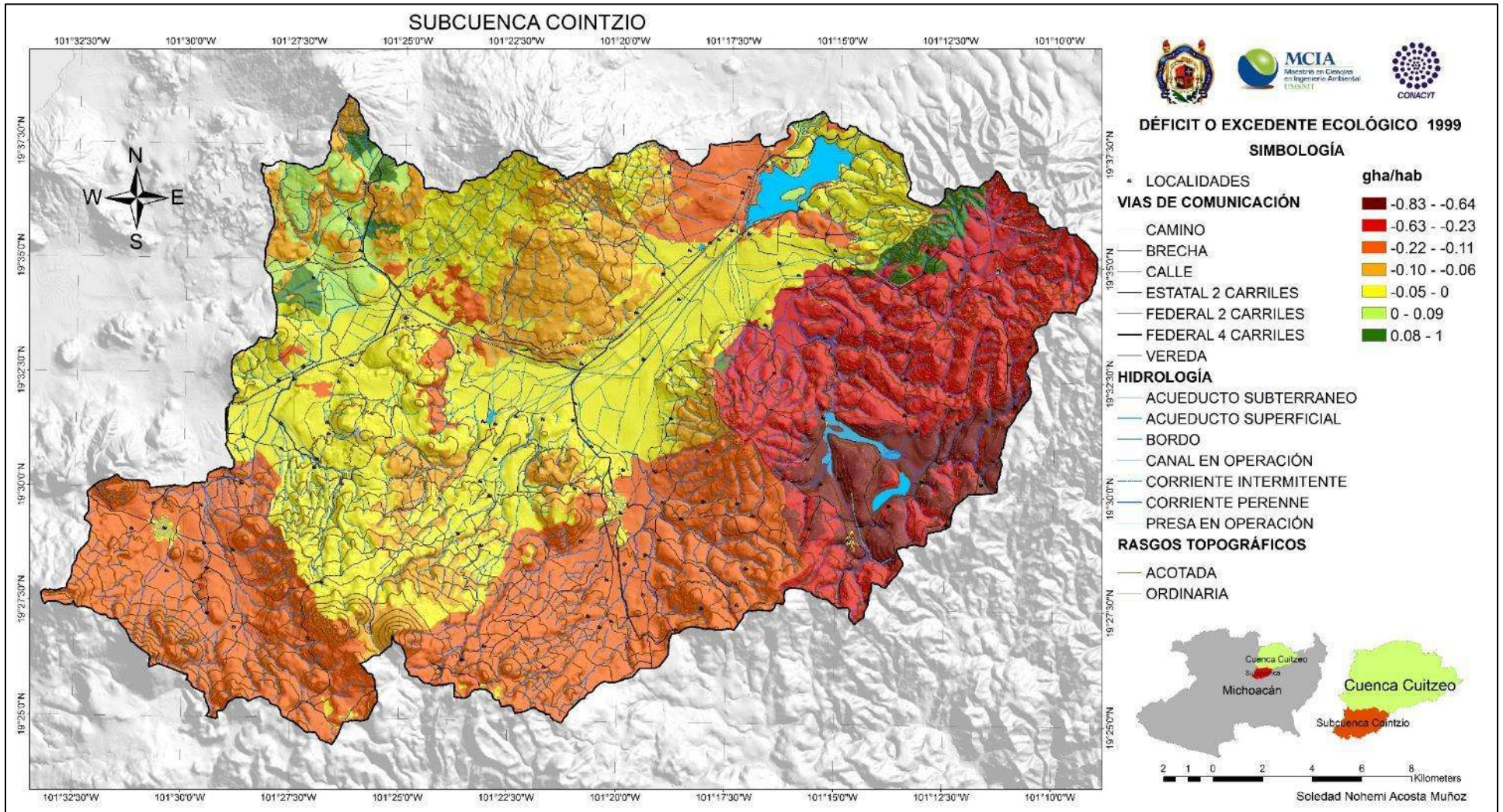
Mapa 13.3.2 Déficit o excedente ecológico espacializado para 2009



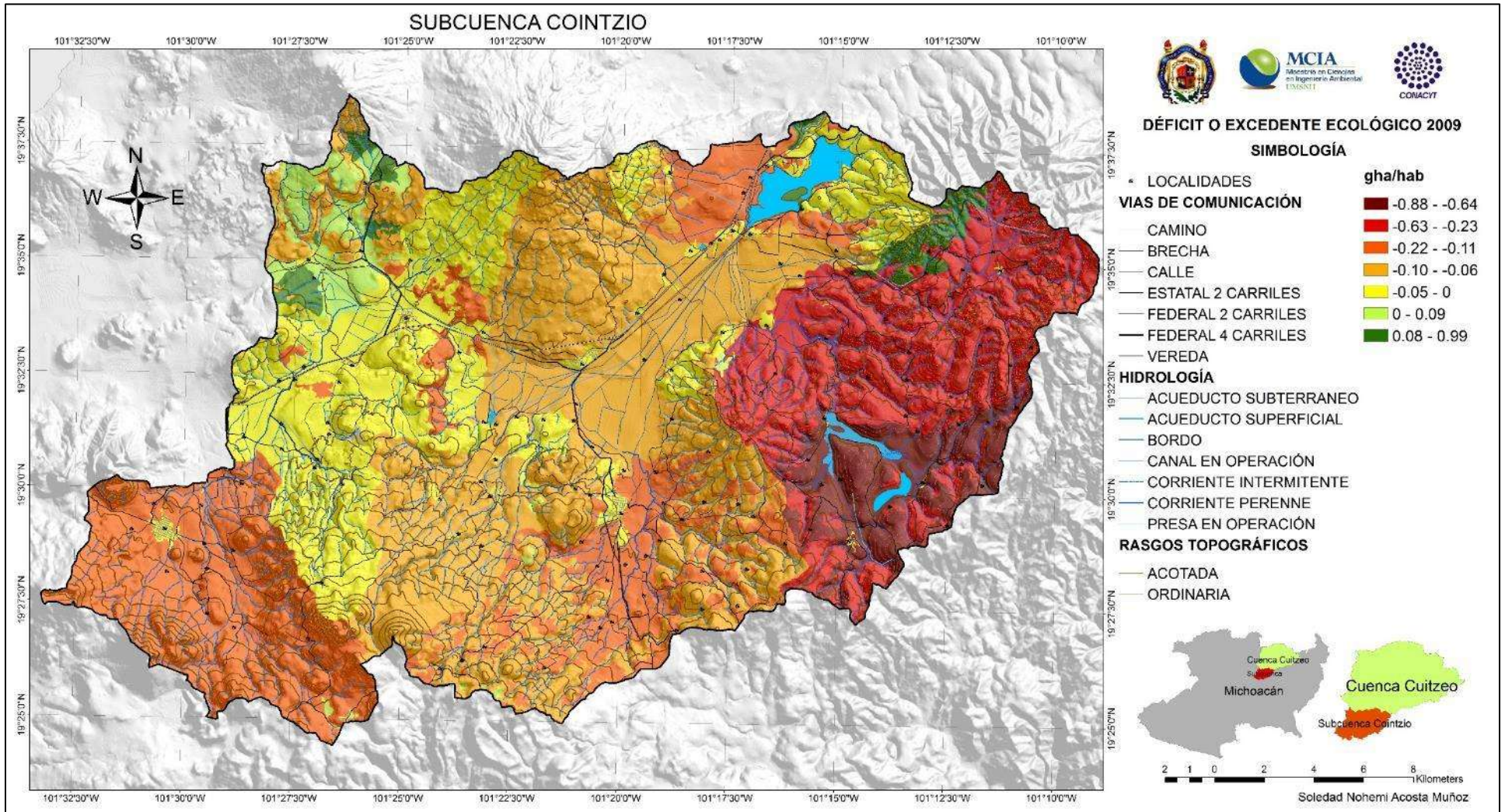
Mapa 13.3.3 Déficit o excedente ecológico espacializado para 2014



Mapa 13.3.4 Déficit o excedente espacializado por habitante para 1999



Mapa 13.3.5 Déficit o excedente espacializado por habitante para 2009



Mapa 13.3.6 Déficit o excedente espacializado por habitante para 2014

