



**MCIAM**  
Maestría en Ciencias  
en Ingeniería Ambiental  
UMSNH

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS  
DE HIDALGO**

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

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

**“ZONIFICACIÓN DE LA SEGURIDAD ECOLÓGICA EN UNA  
CUENCA DEL EJE NEVOLCÁNICO TRANSMEXICANO”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN  
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA**

**ING. DAVID TALAVERA ABUNDEZ**

Director de tesis:

**DR. JUAN MANUEL ORTEGA RODRÍGUEZ**

Co-directora de Tesis:

**MC. TOHTLI ZUBIETA ROJAS**

Morelia Michoacán, Agosto del 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer en primera instancia al D. C. Juan Manuel Ortega Rodríguez por la asesoría que me dio durante todo el proceso de investigación, a mi co-directora de tesis M.C. Tohtli Zubieta Rojas y a mis sinodales Dr. María Alcalá de Jesús, M.C. Juan Carlos Gonzáles Cortéz y D. C. Julio César Orantes por los comentarios y la atención que siempre mostraron.

En segunda instancia pero no menos importante, al CONACYT por la beca, porque sin ella el dedicarle tiempo completo a mi investigación habría sido imposible. Agradezco también a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Agradezco a mis compañeros, amigos y familiares porque hicieron más agradable esta aventura.

# CONTENIDO

	Página
GLOSARIO .....	9
ABSTRACT .....	10
INTRODUCCIÓN .....	12
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO .....	14
1. SEGURIDAD ECOLÓGICA.....	14
1.1. Concepto .....	14
1.2. La seguridad ecológica y, el cambio de cobertura y uso de suelo .....	15
1.3. El estudio de las cuencas hidrológicas como base para el desarrollo .....	18
1.4. El desarrollo sustentable y la seguridad ecológica .....	18
1.5. Integración de variables para la identificación de la seguridad ecológica .....	19
1.6. Importancia de los Sistemas de Información Geográfica en la identificación de la seguridad ecológica .....	22
1.6.1. La percepción remota como apoyo a los SIG para la identificación de la seguridad ecológica.....	23
1.7. Análisis multicriterio en la evaluación de la seguridad ecológica.....	25
1.7.1 El proceso analítico jerárquico (AHP) en la identificación de la seguridad ecológica .....	25
2. ANTECEDENTES .....	31
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	33
4. JUSTIFICACIÓN .....	34
5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	35
6. OBJETIVOS .....	35
6.1 Objetivo general.....	35
6.2 Objetivos específicos .....	35
7. ÁREA DE ESTUDIO .....	36
7.1 Localización de la cuenca.....	36
7.2 Municipios y localidades .....	37
7.3. Climas .....	39
7.4. Coberturas de suelo .....	39
7.5. Tipos de suelo .....	42
CAPÍTULO II: ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO	

	Página
(CCUS) .....	44
1. RESUMEN.....	44
2. INTRODUCCIÓN .....	45
3. METODOLOGÍA .....	46
3.1 Elección de las variables que propician el cambio de cobertura y uso de suelo .....	46
3.2. Construcción de variables poblacionales .....	47
3.2.1. Generación de superficies continuas de datos poblacionales .....	48
3.3 Variables de distancia y topográficas.....	48
3.4. Análisis de los cambios de cobertura y uso de suelo .....	49
3.5. Servicios ambientales perdidos en bosques templados .....	53
3.5.2. Potencial de infiltración de agua en las áreas boscosas .....	56
3.6. Correlación de las variables con cambios de cobertura y uso de suelo.....	57
3.6.1. Tablas de contingencia .....	57
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
4.1. Variables espacializadas.....	60
4.2. Análisis de cambio de uso de suelo .....	71
4.2.1. Imágenes utilizadas para la clasificación de coberturas.....	71
4.2.2. Mapas de las coberturas y uso de suelo de la cuenca para los años 2000 y 2014.....	71
4.2.3. Cambios de cobertura del año 2000 a 2014 .....	75
4.2.4. Tasa de cambio de cobertura y uso de suelo.....	77
4.3. Pérdida de servicios ambientales por reducción del bosque templado.....	78
4.3.1. Carbono emitido por la pérdida forestal. ....	78
4.3.2. Potencial de infiltración de agua en las áreas boscosas perdidas.....	80
4.4. Asociación entre las variables y los cambios de cobertura y uso de suelo .....	80
5. CONCLUSIONES .....	82
6. RECOMENDACIONES .....	83
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD ECOLÓGICA EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO .....	84
1. RESUMEN .....	84
2. INTRODUCCIÓN .....	85

	Página
3. METODOLOGÍA .....	86
3.1. Variables integradas a los modelos .....	86
3.2. Escenario de seguridad ecológica basado en la asociación de cambios de cobertura con las variables .....	87
3.2.1 Determinación del peso de las variables a partir del valor de asociación (V de Cramer) .....	87
3.2.2 Normalización de las variables y reglas de decisión .....	87
3.2.3. Evaluación multicriterio .....	90
3.2.4. Clasificación de la seguridad ecológica .....	90
3.3.1. Priorización de variables y juicio comparativo .....	91
3.3.2. Evaluación Multicriterio (síntesis de prioridades) .....	91
3.2.3. Clasificación del escenario de seguridad ecológica de la opinión de expertos.....	91
3.2.4 Evaluación de campo .....	92
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	94
4.1. Escenario de seguridad ecológica basado en la asociación de cambios de cobertura con las variables .....	94
4.2. Escenario de seguridad ecológica con opinión de expertos .....	97
4.3 Evaluación de campo.....	100
5. CONCLUSIONES .....	102
6. RECOMENDACIONES .....	104
LITERATURA CITADA.....	105
ANEXOS.....	110
Anexo fotografico de la verificacion de campo .....	116

## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Escala de puntos para las comparaciones por parejas (Alphonce, 1996) .....	28
Cuadro 2. Municipios que forman parte de la cuenca del Lago de Cuitzeo .....	38
Cuadro 3. Tipos de cobertura y uso de suelo en la cuenca .....	41
Cuadro 4. Conjunto de datos vectoriales utilizados .....	49
Cuadro 5. Imágenes Landsat utilizadas para la clasificación.....	50
Cuadro 6. Categorías utilizadas en el análisis de cambio de.....	52
Cuadro 7. Áreas naturales protegidas dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo .....	64
Cuadro 8. Coberturas y extensión (ha) del año 2000 .....	73
Cuadro 9. Coberturas de suelo y extensión (Ha) del año 2014 .....	74
Cuadro 10. Tabla de pérdidas y ganancias de las coberturas de la cuenca del Lago de Cuitzeo .....	75
Cuadro 11. Tasa de cambio de las coberturas de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	78
Cuadro 12. Tabla de asociación de variables con los cambios .....	81
Cuadro 13. Variables integradas al modelo.....	86
Cuadro 14. Función aplicada a las variables o criterios para la evaluación y estandarización .....	89
Cuadro 15. Clasificación de la seguridad ecológica, .....	90
Cuadro 16. Clasificación del escenario de seguridad ecológica a partir de la opinión de expertos .....	92
Cuadro 17. Valor de asociación y peso de las variables .....	94
Cuadro 18. Área de cada nivel de seguridad ecológica.....	97
Cuadro 19. Peso de las variables.....	97
Cuadro 20. Área de cada nivel de seguridad ecológica.....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Integración de variables en la evaluación de sistemas naturales (FAO, 2014a).....	21
Figura 2. Esquema general del análisis multicriterio.....	28
Figura 3. Localización de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	36
Figura 4. Hipsometría de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	37
Figura 5. Municipios presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	38
Figura 6. Cobertura y uso de suelo en la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	40
Figura 7. Tipo de suelo de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	43
Figura 8. Esquema metodológico del análisis de cambio de cobertura y uso de suelo.....	59
Figura 9. Localidades de la cuenca del Lago de Cuitzeo y con un búfer de 2.5 km...60	
Figura 10. Estimación de la densidad de población.....	61
Figura 11. Tasa de crecimiento poblacional, datos interpolados.....	62
Figura 12. Espacialización del grado de rezago social (GDRS).....	63
Figura 13. Localización de las áreas naturales protegidas.....	65
Figura 14. Vías de comunicación primarias.....	66
Figura 15. Vías de comunicaciones secundarias y terciarias.....	67
Figura 16. Áreas agrícolas y asentamientos humanos.....	68
Figura 17. Corrientes perennes y manantiales de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	69
Figura 18. Pendientes relativas.....	70
Figura 19. Compuestos en falso color rojo (A y B), y compuesto en color (C y D) del año 2014 y 2000.....	71
Figura 20. Coberturas de suelo del año 2000.....	72
Figura 21. Coberturas de suelo del año 2014.....	74
Figura 22. Grafica de pérdidas y ganancias de las coberturas de la.....	76
Figura 23. Transiciones de cobertura a partir del análisis de tablas cruzadas en ha.....	77
Figura 24. Concentración de CO <sub>2</sub> en t ha <sup>-1</sup> .....	79
Figura 25. Esquema metodológico de la seguridad ecológica.....	93
Figura 26. Primer escenario de seguridad ecológica.....	95

Figura 27. Localidad Las tablas municipio de Huiramba .....	96
Figura 28. Segundo escenario de seguridad ecológica .....	98
Figura 29. Municipio de Umécuaro.....	101



## **GLOSARIO**

AHP. Proceso analítico jerárquico

CCUS. Cambio de cobertura y uso de suelo

GDRS. Grado de rezago social

IDW. Inverse Distans to a Power

MCE. Multi-Criteria Evaluation

MDE. Modelo digital de elevaciones

NDVI. Índice de vegetación de diferencia normalizada.

SIG. Sistemas de información geográfica

Tc. Tasa de cambio

TCP. Tasa de crecimiento poblacional

USGS. United States Geological Survey

UTM. Universal Transversal de Mercator

WLC. Weighted Linear Combination

## ABSTRACT

Our main objective for the present study was to develop a methodology to spatialize the ecological security of the Cuitzeo Basin. This was achieved by applying an analytic hierarchy process (AHP) and multi-criteria analysis to study land use and vegetation coverage in the basin, since the main variables behind vegetation loss and land use change are those determining ecological security. To calculate the importance and weight of the variables affecting the ecological security of the Cuitzeo Basin, each variable was subjected to a multi-criteria analysis, generating an accurate scenario of present ecological security for the basin. At the same time, these variables were examined independently by a group of experts who carried out their own AHP analysis and produced a second scenario of the basin's ecological security.

After the analysis, changes on land use and vegetation coverage were fairly evident, with urbanization and agriculture being the most prominent alterations. Within a 14-year period, over 2000 ha (4942.1 acres) of dry forest and temperate forest were lost, as well as all ecological benefits associated with them, such as carbon and water capture. Both scenarios showed that the Cuitzeo basin has been highly modified from its natural state. The most important variation sources are agriculture and urban areas, followed by slope gradient and population density. In both scenarios, all areas with best ecological security, and therefore, those best preserved, correspond to the mountainous region surrounding the basin. Also, those areas located far away from any infrastructure and social dynamics manifest better ecological security than those closer to human environments.

**Keywords:** conservation ecological, geographic information system, Cuitzeo basin, land change, satellite images.

## RESUMEN

En este trabajo el objetivo general fue encontrar una metodología para espacializar la seguridad ecológica en la cuenca del lago de Cuitzeo, se hizo por medio de un análisis de cambio de cobertura y uso de suelo y a través del proceso analítico jerárquico (AHP) y análisis multicriterio. Se estableció que las variables que propician el cambio de cobertura y uso de suelo, son también las que determinan la seguridad ecológica. Se encontró la correlación que existe entre las variables que propician el cambio de cobertura y los cambios de cobertura (de un periodo de 14 años con imágenes satelitales del 2000 y 2014), se calculó el peso de cada variable y se introdujo a un análisis multicriterio y se generó un escenario de seguridad ecológica; paralelamente, las variables fueron evaluadas por expertos, se sometieron a un proceso AHP, nuevamente se utilizó el análisis multicriterio y fue generado un segundo escenario de seguridad ecológica.

Los cambios de cobertura de suelo fueron evidentes en el análisis, sobresalen las transiciones que involucran a los asentamientos humanos y a la agricultura, se perdieron más de 2000 hectáreas de bosque seco y bosque templado en un periodo de 14 años, también se perdieron beneficios ecológicos como la captura de carbono e infiltración de agua. Los escenarios de seguridad ecológica mostraron que la cuenca está altamente alterada. Las variables que más peso tienen en la determinación de la seguridad son las áreas agrícolas, asentamientos humanos, seguidos de las pendientes y densidad de población en ambos modelajes. Ambos escenarios concuerdan en que las áreas con mejor seguridad y por lo tanto mejor conservadas son las partes montañosas de la cuenca. Las áreas alejadas de la infraestructura y dinámica social que tienen pendientes pronunciadas son las que manifiestan mejor seguridad ecológica.

### PALABRAS CLAVE

Conservación ecológica, Sistemas de información geográfica, cuenca Cuitzeo, cambio de cobertura, imágenes satelitales.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad los cambios estructurales en los sistemas naturales son cada vez más evidentes, el cambio climático, la contaminación atmosférica, el mal uso de suelo y agua, la deforestación y el crecimiento demográfico son solo algunos de los problemas a los que se enfrenta la humanidad en todo el mundo.

Estos problemas no solo traen consecuencias en la conservación de los ecosistemas, sino también acarrearán peligros para el ser humano. El hombre se encuentra en un momento de la historia en donde la dependencia de los recursos locales es de suma importancia mundial, la economía se basa en los recursos que se logran extraer y transformar en bienes y servicios para la comodidad y estilo de vida del hombre.

Lamentablemente, para aquellas personas que solo se interesan en acumular riquezas, observan al ambiente como un proveedor de recursos ilimitado, pero la naturaleza ha demostrado que cada componente de un sistema es importante y que es un recurso que no se debe de ver como un insumo, que se puede explotar de manera constante.

En este trabajo se identificó la seguridad ecológica de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, zona de suma importancia ambiental para Michoacán. El reconocimiento de sus problemas y sus posibles soluciones repercuten en el rescate del lago, pero también impactan en el bienestar de los habitantes.

Conocer el patrimonio que nos rodea y su situación ante el estrés que el mismo ambiente y la sociedad moderna provoca es de gran importancia, porque esto indica si se está trabajando de manera sustentable en el ambiente, así como qué problemas se deben resolver antes de continuar explotando los recursos. A la tierra se le debe ver como fuente única de capital natural para la subsistencia humana, la tierra es fundamental para el desarrollo regional y uno de los activos vitales para miles de millones de personas de poblaciones rurales y urbanas (Su *et al.*, 2009)

A nivel mundial la identificación de la seguridad ecológica no ha sido muy estudiada, ya que aún existe una gran incertidumbre de lo que este concepto representa y sigue siendo un término que puede tener un significado variable, dependiendo de la escala

de evaluación. Según (Zhi *et al.*, 2005) la seguridad ecológica es el estado en el que los recursos, el medio ambiente y los ecosistemas mantienen el equilibrio con respecto de las actividades humanas, y se mantienen seguros.

# CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

## 1. SEGURIDAD ECOLÓGICA

### 1.1. Concepto

El término de seguridad ecológica se utilizó por primera vez en los Estados Unidos, y se definía como el estado de efecto perjudicial y amenazante no minimizado sobre el medio ambiente y, que es necesario para la vida y el desarrollo en una región particular (Zhou *et al.*, 2010). Este término pretende la evaluación del potencial del entorno ecológico para la satisfacción de las necesidades y del desarrollo sostenible para las comunidades humanas, sin destruir el propio entorno ecológico.

Por su parte, para (Zhi *et al.*, 2005) la evaluación de la seguridad ecológica se utiliza para controlar las tendencias en la condición con el tiempo, proporcionar una alerta temprana de la degradación de los recursos de la tierra, y recomendar medidas de prevención adecuadas para la explotación y la protección de los recursos de forma sostenible.

Mientras que para algunos otros investigadores la seguridad ecológica se trata de un concepto que involucra la diferenciación de las zonas que sufren algún tipo de disturbio severo en comparación con una zona vecina, que aunque se encuentra en una área en común no percibe los mismos peligros en su estructura ecosistémica (Zhi *et al.*, 2005).

Cualquiera que sea el caso o la definición, se trata de una acción encaminada para lograr el propósito de conservación, restauración y equilibrio entre las actividades encaminadas al desarrollo social, económico y ambiental (Gamboa, 2014).

Para este trabajo la seguridad ecológica se define como la situación en la que se encuentran los recursos naturales ante las actividades e infraestructura antropogénica, y su principal función es proporcionar una alerta temprana de la degradación de los recursos.

## 1.2. La seguridad ecológica y, el cambio de cobertura y uso de suelo

El deterioro de los recursos naturales, se relaciona con el cambio de cobertura y uso de suelo, con actividades que se llevan cerca al lugar y con todas aquellas acciones encaminadas a la protección del medio ambiente (Flamenco *et al.*, 2007).

A lo largo del territorio nacional se distribuye una gran diversidad de comunidades vegetales naturales como los bosques, selvas, matorrales y pastizales, junto con amplios terrenos dedicados a actividades agrícolas, ganaderas, acuícolas y zonas urbanas.

La SEMARNAT (2014) señala que, a las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal se les conoce como “uso del suelo”. En los lugares en donde no ha habido modificación o ésta ha sido ligera y el suelo sigue cubierto por la vegetación natural, se le considera como vegetación primaria; en contraste, si ha ocurrido alguna perturbación considerable y se ha removido parcial o totalmente la cubierta vegetal primaria, la vegetación que se recupera en esos sitios se conoce como vegetación secundaria y puede ser estructural y funcionalmente diferente a la original.

El caso extremo de transformación es cuando se elimina por completo la cubierta vegetal para dedicar el terreno a actividades agrícolas, pecuarias o zonas urbanas; éstas se conocen como coberturas antrópicas.

La superficie de México está cubierta por cuatro formaciones vegetales principales: bosques y selvas en los que predominan formas de vida arbórea; los bosques en general se localizan en regiones templadas y las selvas en zonas con clima tropical, también se les conoce como bosques tropicales y son mucho más ricas en especies. Otra cubierta vegetal muy extendida en el país son los matorrales que se localizan en zonas secas o semisecas y tienen como componente dominante a los arbustos. Por último, los pastizales que se caracterizan por estar dominados por plantas de porte herbáceo, en general los pastos se localizan sobre todo en el centro norte del país. Otros tipos de vegetación también presentes en el país aunque en menor proporción y restringidos frecuentemente a condiciones ambientales muy específicas son los manglares y la vegetación halófila y gipsófila.

Las principales transiciones de cobertura de suelo ocurren por una dinámica intrínseca que depende del tipo de cobertura vegetal, las interacciones ecosistémicas que se presentan en determinada área, el ambiente físico, las actividades socioeconómicas e incluso con aspectos culturales de la región (Flamenco, 2007). Son aspectos que se deben considerar para establecer la seguridad ecológica que se manifiesta en cada zona.

Por otro lado, el crecimiento exponencial que ha experimentado la población humana a nivel mundial en las últimas décadas, la demanda de recursos naturales para satisfacer las necesidades de supervivencia de esa población y las formas y mecanismos de apropiación de los recursos, con frecuencia ligados a fuerzas sociales, políticas y económicas, han presentado implicaciones estructurales y funcionales sobre los ecosistemas.

De acuerdo con la carta de uso actual del suelo y vegetación Serie III de INEGI, en el año 2002, 72.58% del país aún estaba cubierto por comunidades naturales en diferentes grados de conservación; el restante había sido convertido a terrenos agrícolas, ganaderos, urbanos y otras cubiertas antrópicas.

El hecho de que casi tres cuartas partes del territorio nacional en 2002 conservaran vegetación natural no significa que permanecieran inalteradas por el hombre o en buena situación de seguridad. Según esta misma evaluación, sólo 50.8% del territorio nacional (70% de la vegetación remanente) conservaba vegetación primaria (es decir, que no presenta perturbación importante), de acuerdo con el reporte más reciente sobre los recursos forestales del mundo, de los bosques existentes a nivel global, sólo 36% son bosques primarios (Mas *et al.*, 2009b).

Es evidente que los cambios en la estructura del paisaje afectan la estructura de los ecosistemas, que modifican los ciclos naturales de flujo y energía, pero ¿hasta dónde puede aguantar un ecosistema la explotación de sus recursos?



El principal motivo de preocupación mundial en torno a los cambios de cobertura y uso de suelo se refiere al calentamiento global y a la pérdida de los servicios ambientales que prestan los bosques y selvas.

Los bosques proporcionan servicios de gran importancia: forman y retienen los suelos en terrenos con declive evitando la erosión; favorecen la infiltración de agua al subsuelo alimentando los mantos freáticos y también purifican el agua y la atmósfera, son fuente de bienes de consumo tales como madera, leña, alimentos y otros “productos forestales no maderables”.

Las comunidades vegetales dominadas por formas de vida arbórea constituyen, además, grandes reservas de carbono en forma de materia orgánica. Estimaciones recientes muestran que los bosques del planeta almacenan unas 280 gigatoneladas de carbono en la biomasa de los árboles. Se dice que la suma total del carbono retenido en la biomasa forestal, en los árboles muertos, la hojarasca y el suelo, supera en alrededor de 50% la cantidad total de carbono contenido en la atmósfera.

En 1996 se estimó que las emisiones de bióxido de carbono asociadas al cambio de uso del suelo representaban alrededor del 30% de las emisiones totales de México. De acuerdo con la definición de la FAO (considera que una zona forestal es aquella que tiene al menos 10% de su superficie cubierta por árboles), durante la última década del siglo XX hubo una pérdida neta anual de 8.9 millones de hectáreas de bosques y selvas en el mundo (SEMARNAT, 2014).

No se debe olvidar que el desarrollo socio-económico de una región tiene relación estrecha con la gestión y potenciación de su territorio (AGER, 2014). Esto debido a que las actividades económicas utilizan el territorio para la producción y movimiento de bienes y servicios, por ejemplo, la agricultura, la silvicultura, la pesca, o bien a través de estructuras como carreteras, redes de distribución de energía o agua.

### **1.3. El estudio de las cuencas hidrológicas como base para el desarrollo**

Se empezará diciendo que el agua como ya se sabe, es esencial para la vida, tiene una importancia clave para la salud, el desarrollo y, por lo tanto, para la reducción de la pobreza. Sin embargo, para hablar de cuenca hidrográficas es necesario referirse a ésta, como el contorno o límite de una área que drena agua en un punto en común (Ordoñez, 2011).

La cuenca es una unidad natural hidrológica y geofísica, con límites definidos que facilitan la planificación y el aprovechamiento de sus recursos. Los límites de la cuenca dependen de su topografía y están determinados por la línea divisoria de un parte aguas (CEPES, 2014).

Las cuencas hidrográficas facilitan la percepción del efecto negativo de las acciones del hombre sobre su entorno, evidenciándolas en la contaminación y en la calidad del agua evacuada y el ambiente ecológico.

### **1.4. El desarrollo sustentable y la seguridad ecológica**

El desarrollo sustentable, un término muy utilizado pero que aún es utópico, es fundamental para que se mantenga el equilibrio entre el capital natural y el capital monetario, en su definición más simple, el desarrollo sustentable busca la satisfacción de las necesidades de las generaciones actuales, pero sin poner en riesgo la satisfacción las de generaciones futuras y el capital natural (Ramírez *et al.*, 2004).

Es importante tener en cuenta que la seguridad ecológica está acompañada de la identificación de este desarrollo como consecuencia directa, ya que involucra la diferenciación de las áreas que se encuentran en una situación de desarrollo negativo con respecto a la satisfacción de las necesidades, el desarrollo económico y el equilibrio ecológico.

Es evidente que las variables que están involucradas en el cambio de uso de suelo son también parte de la composición de factores que determinan la seguridad ecológica, es decir, los factores que propician el cambio y explotación de los recursos naturales son también los factores que ponen en riesgo al ambiente y su estabilidad que traducido a un lenguaje técnico se conoce como seguridad ecológica.

## 1.5. Integración de variables para la identificación de la seguridad ecológica

Uno de los problemas de la evaluación del estado de los ecosistemas para el logro de objetivos como el de la restauración y conservación, es que aún no se encuentran los métodos adecuados para la integración e identificación de todos aquellos actores que afectan de manera positiva y negativa al ambiente.

Existen muchas herramientas para describir y cuantificar al medio ambiente, las cuales se revisan y se adaptan constantemente a las necesidades de los diferentes usuarios. Se intentan establecer indicadores, mismos que ayuden a cuantificar y simplificar un fenómeno y permitan comprender realidades complejas (FAO, 2014b), pero que permitan entender el dinamismo de los cambios en un sistema.

El propósito de la evaluación no es solamente establecer si hay problemas medioambientales o si es probable que los haya en el futuro, también se debe ser capaz de interpretar que problemas medioambientales han ocurrido y qué se está haciendo al respecto.

Para la integración de variables en la seguridad ecológica, la evaluación debe examinar si el daño medioambiental puede ser un resultado del manejo de los sistemas humanos, más que de otros cambios (FAO, 2014a).

Esto último, crea un bucle hacia las actividades humanas de presión. En términos generales la integración de variables forma parte de un ciclo de políticas ambientales que incluyen la percepción del problema, la formulación de políticas, y el seguimiento y evaluación de las mismas.

La incorporación de las variables en la seguridad ecológica debe constar de tres tipos de indicadores (Wang *et al.*, 2010):

1.- Las variables que ejerzan presión sobre el ambiente, son indicadores que se clasifican en los grupos: presión directa y presión indirecta sobre el ambiente. El primer grupo corresponde a las externalidades creadas por las actividades humanas, por ejemplo, el volumen de residuos generados y la emisión de contaminantes atmosféricos; el segundo grupo son las actividades que crean externalidades ambientales, por ejemplo, las características de la agricultura y el crecimiento

demográfico. Estos indicadores de presión indirecta son importantes pues proporcionan elementos para pronosticar la evolución de la problemática.

2.- Variables que describen el estado en el que se encuentra el elemento a estudiar es decir, la calidad del medio ambiente, incorporando la calidad de los recursos naturales (flora, fauna, suelo, aire y agua), es decir, se refiere al estado en el cual han quedado los elementos del sistema una vez afectados o no afectados, esto es, la situación de la población, recursos naturales y funciones biológicas después de recibir presiones de ciertos agentes.

3.- Los factores que están encaminados a dar solución a los problemas medio ambientales, es decir, indicadores de los esfuerzos en términos de políticas ambientales y de recursos naturales, indicando una acción humana tendiente a solucionar o prevenir un impacto sobre algunos de los elementos vulnerables del sistema, es decir, describe los esfuerzos realizados por la sociedad o por las autoridades para reducir o mitigar la degradación del medio ambiente (UNAD, 2009).

En resumen, la integración de las variables, describe las actividades humanas que están causando los daños medioambientales (¿Por qué está pasando?), describe el estado ecológico/físico del medio ambiente y las políticas y acciones que afectan la forma en que las personas protegen y usan el medio ambiente (¿Qué se está haciendo al respecto?) (Figura 1).



Figura 1. Integración de variables en la evaluación de sistemas naturales (FAO, 2014a)

Toda la información implícita en la identificación de la seguridad ecológica y por ende la especialización y zonificación de una área determinada en las categorías de seguridad identificadas, está estrechamente relacionada con los Sistemas de Información Geográfica, componentes esenciales para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental.

## **1.6. Importancia de los Sistemas de Información Geográfica en la identificación de la seguridad ecológica**

Para justificar la importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el papel que estos juegan hoy en día, es habitual citar el hecho de que aproximadamente 70% de la información que se maneja en cualquier tipo de disciplina está georreferenciada.

Se trata de información a la cual puede asignarse una posición geográfica, y es por lo tanto, información que viene acompañada de otra información relativa a su localización. En la actualidad es más favorable para el desarrollo de herramientas que permitan la utilización de toda esa información al tiempo que se consideran los datos relativos a su posición en el espacio.

Dado que se trabaja con gran cantidad de información referenciada geográficamente, todos los días, es importante atender la importancia del poder de los SIG como herramientas en la toma de decisiones medioambientales.

Los SIG, son una plataforma de información territorial que trabaja con la espacialización de variables del territorio, que permite el análisis espacial a través de la sintaxis de información georreferenciada (Fagandini y Villanueva, 2012).

La capacidad ofrecida por los SIG de generar nueva información a partir de un conjunto de datos espaciales, ha revolucionado el manejo y análisis de la información geográfica (Martinez y Diaz, 2005), convirtiéndose en una herramienta altamente especializada para la gestión de información, lo cual se ve reflejado en la gran difusión de estos sistemas en diferentes sectores que manejan información espacial y temática asociada, principalmente para resolver problemas de tipo ambiental, social y económico.

Por lo tanto, en la medida que se conoce y se espacializa la información, se puede identificar cada uno de los factores que integran la seguridad ecológica y los riesgos a los que los sistemas naturales están expuestos.

Sin embargo, los SIG son en cierta medida sólo herramientas para la mejor gestión de la información disponible del territorio (Quiroz, 2010), por lo tanto, sigue estando a disponibilidad del sistema social y político la conservación de los recursos naturales.

La aplicación de los SIG en la identificación de la seguridad ecológica es de utilidad para la toma de decisiones en temas de planificación, ordenamiento y gestión territorial, ya que son una plataforma tecnológica de información monitoreable y dinámica que permite la simulación de escenarios futuros (Fagandini y Villanueva, 2012); pero de allí su importancia, ya que ayuda a representar el mundo real de forma clara y entendible para los demás (Dávila, 2014).

La geografía ha pasado de ser un ámbito particular con cierta relación con otros campos a ser un elemento fundamental incorporado a la mayor parte de las disciplinas, no sólo en el terreno científico, sino en el terreno mismo de la vida diaria, en donde toda esta información juega un papel de gran importancia (Olaya, 2011).

En definitiva los SIG son de suma importancia para la investigación científica, pero aun adquieren mucha más importancia porque nos permiten identificar la riqueza de territorios y los riesgos a los cuales están expuestos.

#### 1.6.1. La percepción remota como apoyo a los SIG para la identificación de la seguridad ecológica

A partir del lanzamiento de misiones espaciales no tripuladas y tripuladas, el estilo de vida humano ha evolucionado, comenzado por la dependencia de sistemas digitales que ayudan a hacer la vida más fácil (Martinez y Diaz, 2005). Aunque la tecnología que se usa cotidianamente tiene sus orígenes en el armamento militar, se ha aprendido a utilizarla cada vez más para propósitos científicos, usos domésticos e incluso para transportarnos de un lugar a otro.

Para hablar de teledetección o percepción remota es necesario en principio entender a qué se refiere, a lo que podemos referir como un sistema integral de captura de información territorial a partir de la radiación electromagnética, captada por un sensor que no está en contacto físico con el objeto observado (Teledet, 2014) para la captura

tanto de información temática (medioambiental), como de información topográfica como los modelos digitales de elevaciones (MDE) (Villar, 2014).

Quizás una de las herramientas que más ha fortalecido el desarrollo de los SIG ha sido la percepción remota, al ser una técnica o conjunto de técnicas que permite medir y registrar la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la Tierra, y relacionar tales mediciones con su naturaleza y distribución (SEMAR, 2014).

Los sistemas de percepción remota constan de tres elementos, una fuente de iluminación, un sensor y el objeto observado además de los usuarios y la interpretación y manejo de las imágenes. Dependiendo de la sensibilidad para la que han sido concebido los sensores, pueden medir la reflectancia de la energía de las partes visibles del espectro electromagnético, del infrarrojo cercano, medio y térmico y de microondas radáricas (Martinez y Díaz, 2005).

Estos aspectos han permitido que muchas de las coberturas de suelo sean seguidas con mejor regularidad a lo largo del tiempo, lo que permite la interpretación y cuantificación de los cambios ocurridos, y permite además la focalización en aquellas variables que posiblemente fomenten el cambio de la cobertura y que por lo tanto, integran la seguridad ecológica.

El software y el hardware utilizados para el manejo de la información contenida en las imágenes satelitales ha permitido una mejor comprensión y equipamiento para capturar, manejar, manipular, transformar, analizar y modelar datos geográficos, permitiendo representar los objetos del mundo real en términos, de problemas de gestión y planificación ambiental (Dávila, 2014).

Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos de gestión ambiental y seguridad ecológica, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) o la componente temática (el valor o el elemento en sí) y la generación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, entre otros (Olaya, 2011).

Por otro lado estos modelos son siempre representaciones de la realidad que integran múltiples variables y cuyo resultado son procesos en los cuales se comparan múltiples



variables que pueden ser medidas y aquellas que en si no se pueden capitalizar como factores medibles, deben ser procesados para la asignación de valores que permitan compararse entre sí, teniendo en cuenta que en este tipo de análisis la ponderación de variables es de suma importancia para su resolución.

### **1.7. Análisis multicriterio en la evaluación de la seguridad ecológica**

Se entiende que la sensación de seguridad que tienen los humanos se compone de diferentes factores que tienen diferente peso en cuanto a la sensación de seguridad que se percibe, en este contexto la seguridad ecológica al igual que esa sensación de seguridad se compone de múltiples factores, pero que en términos ecológicos provocan disturbios en la composición natural del paisaje en diferente proporción.

Por lo tanto, para la identificación de la seguridad ecológica, la evaluación multicriterio (y multiobjetivo) es de suma importancia, ya que este tipo de análisis involucra un conjunto de técnicas utilizadas en la decisión multidimensional y los modelos de evaluación que se integran dentro del campo para la toma de decisiones.

La toma de decisiones multicriterio debe ser entendida como un "mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos para auxiliar a los centros de decisión a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, en base a una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo con varios criterios (Bosque, 2014).

Dentro de estos análisis multicriterio se considera el proceso analítico jerárquico (AHP), el cual es un método de toma de decisiones desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty en la Wharton School de la Universidad de Pensilvania, que se basa en la habilidad humana innata de usar la información y la experiencia para estimar magnitudes relativas a través de comparaciones entre pares de variables.

#### **1.7.1 El proceso analítico jerárquico (AHP) en la identificación de la seguridad ecológica**

En resumen, el AHP es una técnica que permite la resolución de problemas multicriterio, multientorno y multiactores, incorporando en el modelo los aspectos

tangibles e intangibles, así como el subjetivismo y la incertidumbre inherente en el proceso de toma de decisiones.

Este proceso es muy importante cuando se requiere tomar decisiones sobre una base de información deficiente. Sin embargo, el AHP también tiene la capacidad de integrar información medida de manera objetivamente, cuando está disponible. El AHP es un método matemático usado para determinar las prioridades de diferentes alternativas de decisión, mediante comparaciones pareadas de elementos de decisión con respecto a un criterio común.

El enfoque de comparación pareada, ligado a un método de asignación de valores mediante una escala arbitraria, ha sido utilizado para descubrir la importancia relativa entre todos los criterios de decisión en ambientes de toma de decisión multicriterio (Ortega, 2003). Las etapas principales de AHP son:

1.- Descomponer el problema de decisión en una jerarquía de elementos interrelacionados, identificando: (a) la meta general, (b) los criterios ( $i=1,2, \dots, m$ ) y (c) las alternativas posibles ( $j=1,2, \dots, n$ ). Para cada uno de los "m" criterios repetir las etapas 2 a 5.

2.- Desarrollar la matriz de comparación por pares (MCP) de alternativas para cada uno de los criterios estableciendo el *rating* de importancia relativa entre ambas alternativas consideradas.

El rating se establece a partir de una escala (Cuadro 1) y pueden asignarse los valores intermedios 2, 4, 6 y 8. Un rating recíproco (aj.  $1/9, 1/7, 1/5, 1/3, \dots$ ) se aplica cuando la segunda alternativa es preferida a la primera. El valor 1 es siempre asignado a comparación de una alternativa en sí misma.

3.- Desarrollar la matriz normalizada dividiendo cada número de una columna de la matriz de comparación por pares por la suma total de la columna.

4.- Desarrollar el vector de prioridad para el criterio calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada. Este promedio por fila representa el vector de prioridad de la alternativa con respecto al criterio considerado.

5.- La consistencia de las opiniones utilizadas en la matriz de comparación por pares pueden ser determinadas a través del cociente de consistencia. Un índice de inconsistencia (Zavaleta *et al.*) inferior a 0.10 es considerado aceptable. Para aquellos casos en que  $CR > 0.10$ , las opiniones y juicios deberán ser reconsiderados.

6.- Luego de que la secuencia (2, 3, 4 y 5) se ha sido ejecutada para todos los criterios, los resultados obtenidos en (4) son resumidos en una matriz de prioridad (MP), listando las alternativas por fila y los criterios por columna.

7.- Desarrollar una matriz de comparación de criterios por pares de manera similar a lo que se hizo para las alternativas en (2, 3 y 4).

8.- Desarrollar un vector de prioridad global multiplicándolo (7) por la matriz de prioridad de las alternativas (6).

El esquema general del AHP se presenta de la siguiente manera: el objetivo general de la propuesta se encuentra en la parte superior de la jerarquía, y los criterios, sub-criterios o alternativas de decisión están descendiendo los niveles de esta jerarquía (Figura 2) (FCEA, 2005). En el caso de la seguridad ecológica las alternativas son interpretadas como aquellas variables que integran la seguridad y los criterios que son en términos generales, la importancia de cada una de las variables sobre la meta general.

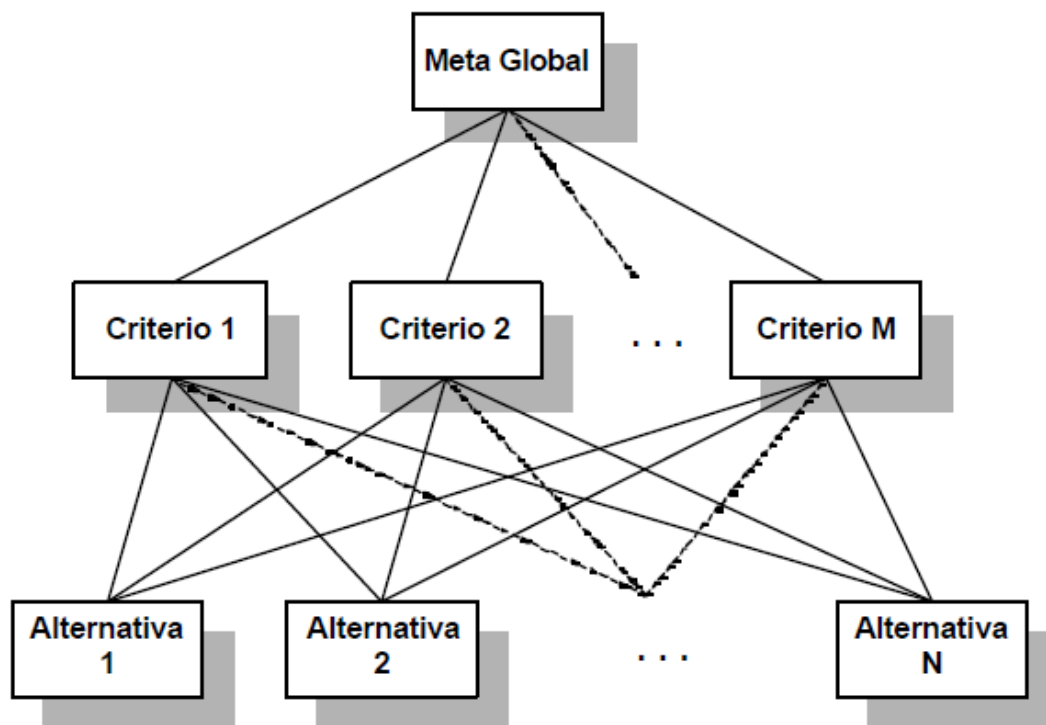


Figura 2. Esquema general del análisis multicriterio

Cuadro 1. Escala de puntos para las comparaciones por parejas (Alphonse, 1996)

Importancia	Definición	Explicación
1	Igualdad de importancia	Dos elementos contribuyen de forma idéntica al objetivo
3	dominancia débil	Experiencia o juicio favorece ligeramente un elemento sobre otro
5	dominancia fuerte	Experiencia o juicio favorece fuertemente un elemento sobre otro
7	dominancia demostrada	El dominio de un elemento se demuestra en la práctica
9	dominio absoluto	La evidencia a favor de un elemento sobre otro se afirma con el mayor orden posible
2,4,6,8	valores intermedios	Es necesaria una mayor subdivisión o compromiso

#### 1.7.1.1. Ventajas e inconvenientes del AHP

En todas las técnicas de decisión multicriterio se pueden encontrar aspectos positivos y negativos, bien desde un punto de vista teórico o bien desde la práctica. Algunas de las ventajas del método AHP son:

El AHP es una de las pocas técnicas multicriterio que ofrece una axiomática teórica, es una de las técnicas multicriterio que mejor comportamiento práctico tiene, proporciona un modelo único fácilmente comprensible, flexible, para una amplia gama de problemas estructurados, integra enfoques deductivos y de sistemas para resolver problemas complejos, refleja la tendencia natural de la mente a clasificar elementos de un sistema en diferentes niveles y agrupa elementos similares en cada nivel, proporciona una escala para medir imponderables y un método para esclarecer prioridades, conduce a una estimación completa de la conveniencia de cada alternativa, toma en consideración las prioridades relativas de los factores en un sistema y permite seleccionar la mejor alternativa en virtud de objetivos, no insiste en el consenso, pero sintetiza un resultado representativo de diversos juicios y permite que la gente afine su definición de un problema y mejore su juicio y comprensión mediante la repetición del proceso.

El método también presenta una serie de inconvenientes, como los siguientes:

La justificación de la independencia exigida en la modelización jerárquica, la emisión de juicios erróneos por los expertos pueden causar ruido, la forma de evaluar la consistencia de los juicios emitidos, sobre todo cuando se evalúan por separado los criterios, la interpretación de las prioridades totales obtenidas en el procedimiento y la introducción de una nueva alternativa, pueden hacer variar la estructura de preferencias del decisor o poner de manifiesto alguna inconsistencia.

### 1.7.1.2. Aplicaciones del AHP

El Proceso Analítico Jerárquico es una de las técnicas multicriterio con mayor implantación práctica en casi todos los ámbitos de la toma de decisiones. Sin entrar a estudiar con detalle cuáles son las causas que han motivado su gran aplicabilidad, mencionar que, entre éstas, cabe citar las mismas ideas que sugirieron su metodología, esto es: la flexibilidad de la técnica, la adecuación a numerosas situaciones reales referidas, fundamentalmente, a la selección multicriterio entre alternativas, su facilidad de uso, la posibilidad de aplicarla en decisión individual y en grupo y por último, la existencia de software amigable para su aplicación (Morales y Cooke, 2008). Esta metodología se ha utilizado en trabajos sobre: sociedad, ciencia, y educación, economía y transporte, localización y asignación de recursos, evaluación de alternativas, decisiones empresariales marketing, producción, aplicaciones ambientales, planificación urbana, sector público, sanidad, evaluación de sistemas, decisión en grupo y resolución de conflictos internacionales y nuevas tecnologías. En los últimos años se ha aplicado en priorización ambiental, selección de personal en sistemas de telecomunicación, administración de operaciones y evaluación de software.

## 2. ANTECEDENTES

De acuerdo con los estudios que se han realizado a lo largo del mundo en cuanto a la cobertura vegetal y a su transformación, han sido grandes las aportaciones al conocimiento y que han marcado la pauta para el término de seguridad ecológica, con lo que se busca identificar la situación de los ecosistemas y los peligros que acechan a su estructura y que a su vez representan una amenaza para el desarrollo económico y social de determinada región. Lamentablemente estos estudios han estado sujetos a determinados países, quienes se preocupan por el medio ambiente y buscan herramientas que ayuden al soporte de toma de decisiones en cuando a la protección ecológica, pero que también no repercuta en el desarrollo de sus actividades económicas.

La mayoría de los estudios encaminados a la identificación de la seguridad ecológica se encuentran reflejados en los países asiáticos, en donde se ha encontrado que la seguridad en su mayor proporción está determinada por los cambios de cobertura y las actividades antropogénicas que se llevan en el lugar.

Se zonificó la seguridad ecológica en la meseta tibetana a partir de las siguientes clases; muy baja y baja eco-seguridad compuestas 8.45% y 39.66% de la superficie total, destacando la situación eco-ambiental como vulnerable en zonas de alta elevación de la meseta tibetana. Las clases de eco-seguridad moderado y alto representaron 41.77% y 7.45%, respectivamente, mientras que la clase con muy alta seguridad se componía de sólo una pequeña proporción de 2.67% del territorio total estudiado, en este trabajo se acoplaron dos metodologías, la de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el modelo de Presión Estado Respuesta (REP) con la ayuda de ArcGIS (Wang *et al.*, 2010).

Su *et al.* (2009), se demostró que a partir de los indicadores de presión estado y respuesta, 50% del territorio de Xiaolangdi un embalse de China, se encontraba con baja seguridad ecológica, siendo las actividades humanas el factor que limitaba a los ecosistemas integrando una evaluación de análisis difusa (APS) y AHP integrados en un sistema de información geográfica. Esto demostraba que aun con las acciones

diligentes por proteger el medio ambiente de los gobiernos, los ecosistemas se veían perturbados.

En un estudio realizado para identificar la seguridad ecológica en provincia Jilin occidental, China, se utilizó el ArcGis para la observación de los cambios de uso y cobertura de suelo, y se encontró que las actividades humanas han alterado los ecosistemas, siendo el cambio de uso de suelo un problema grave, en donde la agricultura era el uso más cambiante y que consumía más terreno. Estos cambios reflejaban que el ecosistema con menos seguridad ecológica eran los humedales con una tasa de disminución del 82% en 70 años (Zhi *et al.*, 2005)

En el trabajo realizado por Wang y Wu (2007), se categorizó a la seguridad ecológica en zona de seguridad ecológica, zona más segura, zona de seguridad media, zona menos segura y zona de inseguridad mediante la integración de AHP y un SIG en donde todas tenían presencia en los condados que pertenecen a la rivera de West-Liaohe, y que por lo tanto ellos proponían la inversión de seguros para la protección de aquellas zonas que presentaban inseguridad prioritariamente.

Para el trabajo realizado en la Montaña Changbai en el sureste de China, se desarrolló un modelo llamado Presion Estado Impacto Respuesta basado en un SIG para observar los cambios de cobertura y uso de suelo, que revelan que la seguridad ecológica a lo largo de los años se ha modificado, en el periodo de 1990 a 2000 la seguridad en los ecosistemas aumentó pero que se redujo en el periodo 2000 a 2007. En el periodo de 1990 a 2007 las clases de seguridad media, media baja y baja ocuparon juntas más del 50% de territorio estudiado, todo esto con base a los cambios de cobertura relacionados con múltiples variables y ponderadas con el proceso analítico jerárquico (Xing *et al.*, 2014).

En un trabajo de Guangming *et al.* (2013) con el apoyo de ERDAS y ARCINFO, se investigó en la cuenca del río Hanjiang en China, que durante el periodo de 1995 a 2000 la seguridad en los ecosistemas estaba aumentando, pero a partir del año 2000 sus indicadores mostraban que la seguridad ecológica comenzaba a desvanecerse por la perturbación de las actividades antropogénicas.



Es importante resaltar que los trabajos mencionados, muestran una alta relación entre la percepción de la seguridad ecológica y el cambio en los patrones de cobertura del suelo y las actividades humanas.

Para este trabajo se estableció que la seguridad ecológica se entiende como la situación en la que se encuentran los ecosistemas debido a factores que limitan o propician su desarrollo natural, en general estos factores están relacionados con actividades e infraestructuras antropogénicas, pero también pueden deberse a procesos naturales, y su principal función es el de proporcionar una alerta temprana de la degradación de los recursos.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la actualidad el cambio de cobertura y uso del terreno ha provocado que diversos ecosistemas se encuentren en riesgo de desaparecer y con esto, muchas de las especies que ahí habitan. No se debe olvidar que en la mayoría de los casos el cambio de cobertura y uso de suelo se relaciona con las actividades antropogénicas, que en general tienen un impacto negativo en los sistemas naturales y que por el solo hecho de estar presentes, generan un grado de inseguridad para la permanencia y equilibrio de muchos ecosistemas.

Por otro lado, aunque se saben los efectos que algunas actividades humanas acarrearán sobre los ecosistemas, no se ha integrado un modelo que permita cuantificar cuáles variables pueden causar más efectos sobre la naturaleza.

Otro de los problemas a los que se enfrenta la humanidad es la de saber en dónde es primordial encaminar actividades para la solución de las problemáticas ambientales, ya que, los tomadores de decisiones por lo general, no cuentan con las herramientas necesarias para encaminar las acciones que satisfagan a la comunidad humana sin poner en riesgo el capital natural y su estructura.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

La creciente preocupación por la evaluación de los ecosistemas y su capacidad para la recuperación de recursos es cada vez más evidente. La incesante explotación de recursos, la sobre explotación de los suelos para la producción agropecuaria, la contaminación del agua y de suelo, y la constante extracción forestal legal e ilegal, forman parte de un conjunto de factores que representan peligros para la supervivencia de los ecosistemas y su equilibrio, por lo cual surge la necesidad de identificar la seguridad ecológica de cada sistema.

Es importante mencionar que las áreas naturales y su estabilidad son un motor que impulsa la seguridad social y el bienestar de los habitantes que forman parte del sistema, sin olvidar que el sector primario es de suma importancia para el desarrollo económico y estructural de la sociedad moderna, siendo la cuenca una unidad natural hidrológica y geofísica, con límites definidos que facilitan la planificación y el aprovechamiento de sus recursos.

Por lo cual surge una necesidad por evaluar la capacidad de los ecosistemas para soportar las presiones que las actividades humanas ejercen sobre ellos y con esto, generar índices que ayuden a proteger aquellas zonas con alta inestabilidad ante los cambios que se suscitan día con día.

## 5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿La seguridad ecológica de la cuenca está determinada por los mismos factores que gobiernan el cambio de uso del suelo?
2. ¿En qué proporción se han transformado las coberturas de suelo?
3. ¿Qué servicios ambientales se han perdido o han disminuido en el bosque templado?
4. ¿Cuáles son las áreas de la cuenca con menor nivel de seguridad ecológica?

## 6. OBJETIVOS

### 6.1 Objetivo general

Proponer una metodología para evaluar la seguridad ecológica en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

### 6.2 Objetivos específicos

- Identificar las variables que propician el cambio de cobertura
- Identificar los cambios de cobertura del área de estudio y su proporción
- Definir qué servicios ambientales se han perdido o disminuido en el bosque templado
- Categorizar la seguridad ecológica en la cuenca para su zonificación

## 7. ÁREA DE ESTUDIO

### 7.1 Localización de la cuenca

El trabajo presentado está encaminado a la zonificación de la seguridad ecológica en la cuenca del Lago de Cuitzeo, siendo este el segundo lago intermontano más grande de México, la cuenca se encuentra entre los 19°20' y 20°10' de latitud norte y 100°31' y 101°35' de longitud oeste, y abarca una superficie aproximada de 4000 km<sup>2</sup> (Figura 3), comprendida la mayor superficie en el Estado de Michoacán y una superficie menor compartida con Guanajuato y se encuentra a una altitud entre 1800 y 3400 m (Medina y Cabrera G., 2011) (Figura 4).

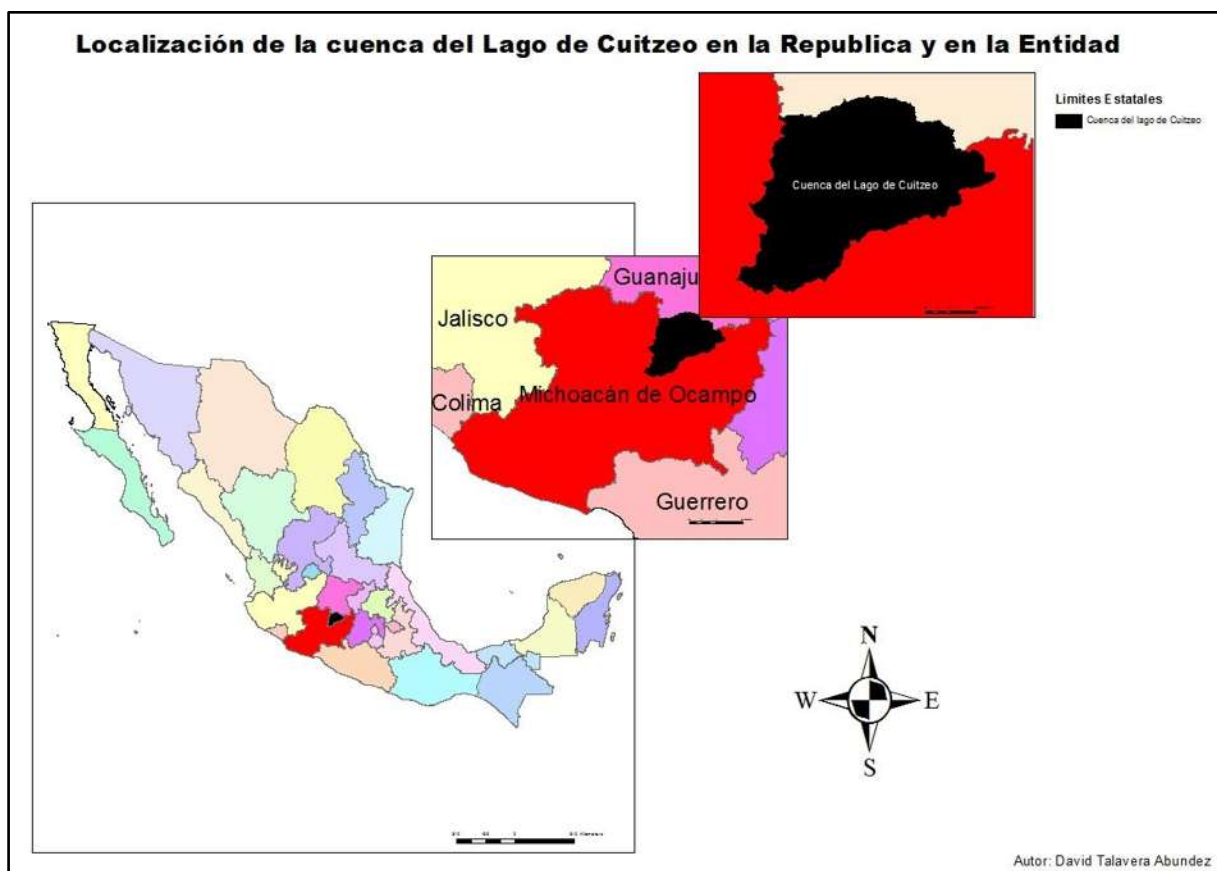


Figura 3. Localización de la cuenca del Lago de Cuitzeo  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez con datos de CONABIO (2014)

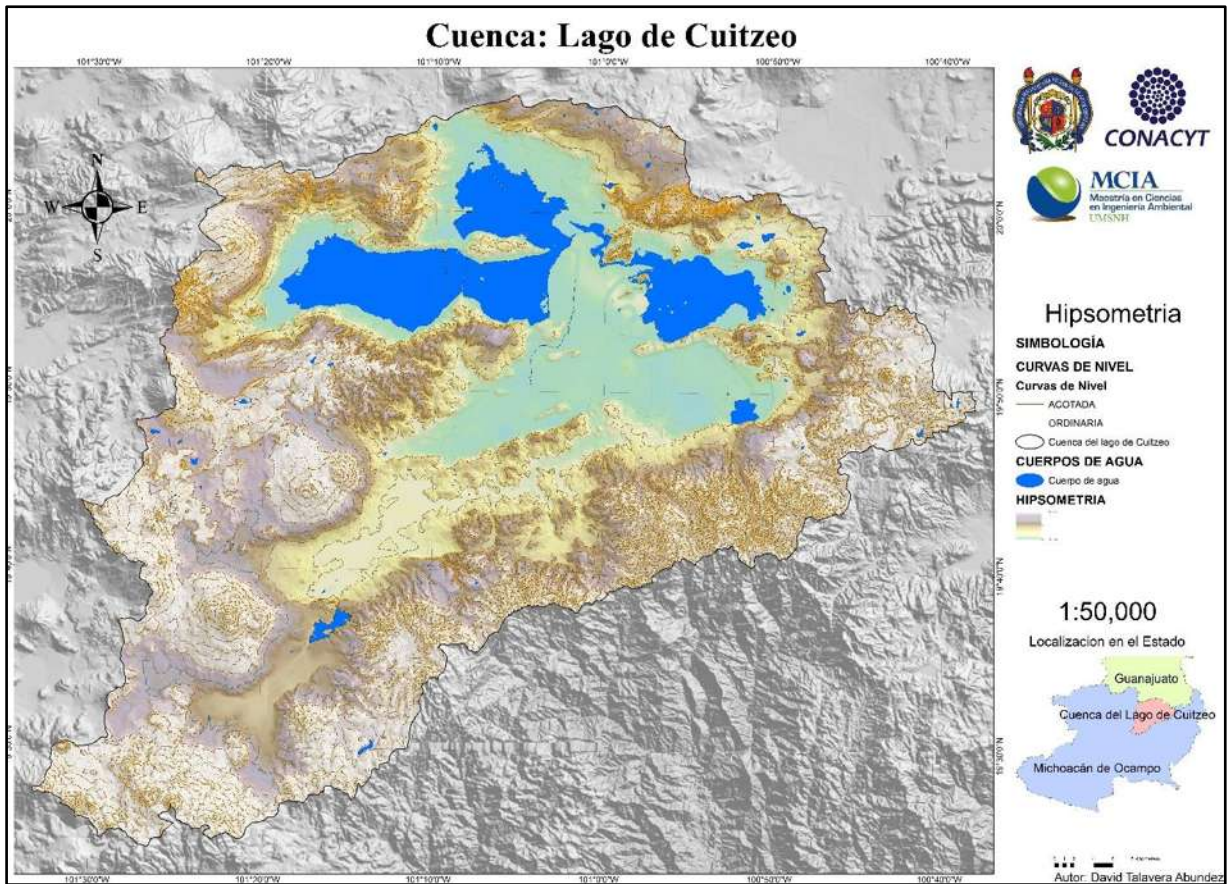


Figura 4. Hipsometría de la cuenca del Lago de Cuitzeo  
 Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez con datos de INEGI (2014)

## 7.2 Municipios y localidades

La cuenca comprende parte del territorio de 28 municipios en total, cinco municipios del estado de Guanajuato y 23 del estado de Michoacán (Cuadro 2), del primer estado mencionado se encuentran los municipios de Uriangato, Salvatierra, Yuriria, Acámbaro y Moroleón. Del estado de Michoacán se localizan los municipios de Tacámbaro, Madero, Acuitzio, Huiramba, Pátzcuaro, Lagunilla, Tzintzuntzan, Quiroga, Charo, Queréndaro, Morelia, Hidalgo, Indaparapeo, Tarímbaro, Zinapécuaro, Huaniqueo, Álvaro Obregón, Chucándiro, Copándaro, Huandacareo, Morelos, Cuitzeo y Santa Ana Maya (Figura 5). El área de la cuenca comprende 780 localidades que van desde un habitante hasta comunidades con más de 60 000 habitantes.



Cuadro 2. Municipios que forman parte de la cuenca del Lago de Cuitzeo

Municipio	Área ocupada en la cuenca		Municipio	Área ocupada en la cuenca	
	Km <sup>2</sup>	%		Km <sup>2</sup>	%
Tacámbaro	0.7	0.02	Huandacareo	95.6	2.4
Madero	4.1	0.1	Santa Ana Maya	104.1	2.6
Huaniqueo	5.9	0.2	Acuitzio	140.2	3.5
Tzintzuntzan	14.2	0.4	Acámbaro	146.1	3.7
Yuriria	15.8	0.4	Álvaro Obregón	159.6	4.0
Hidalgo	16.8	0.4	Queréndaro	162.4	4.1
Quiroga	26.7	0.7	Indaparapeo	167.7	4.2
Uriangato	29.6	0.7	Copándaro	173.4	4.3
Moroleón	31.7	0.8	Chucándiro	181.8	4.5
Morelos	43.9	1.1	Charo	201.5	5.0
Salvatierra	63.9	1.6	Cuitzeo	253.8	6.3
Huiramba	63.9	1.6	Tarímbaro	256.0	6.4
Lagunillas	72.7	1.8	Zinapécuaro	428.0	10.7
Pátzcuaro	81.0	2.0	Morelia	1060.9	26.5

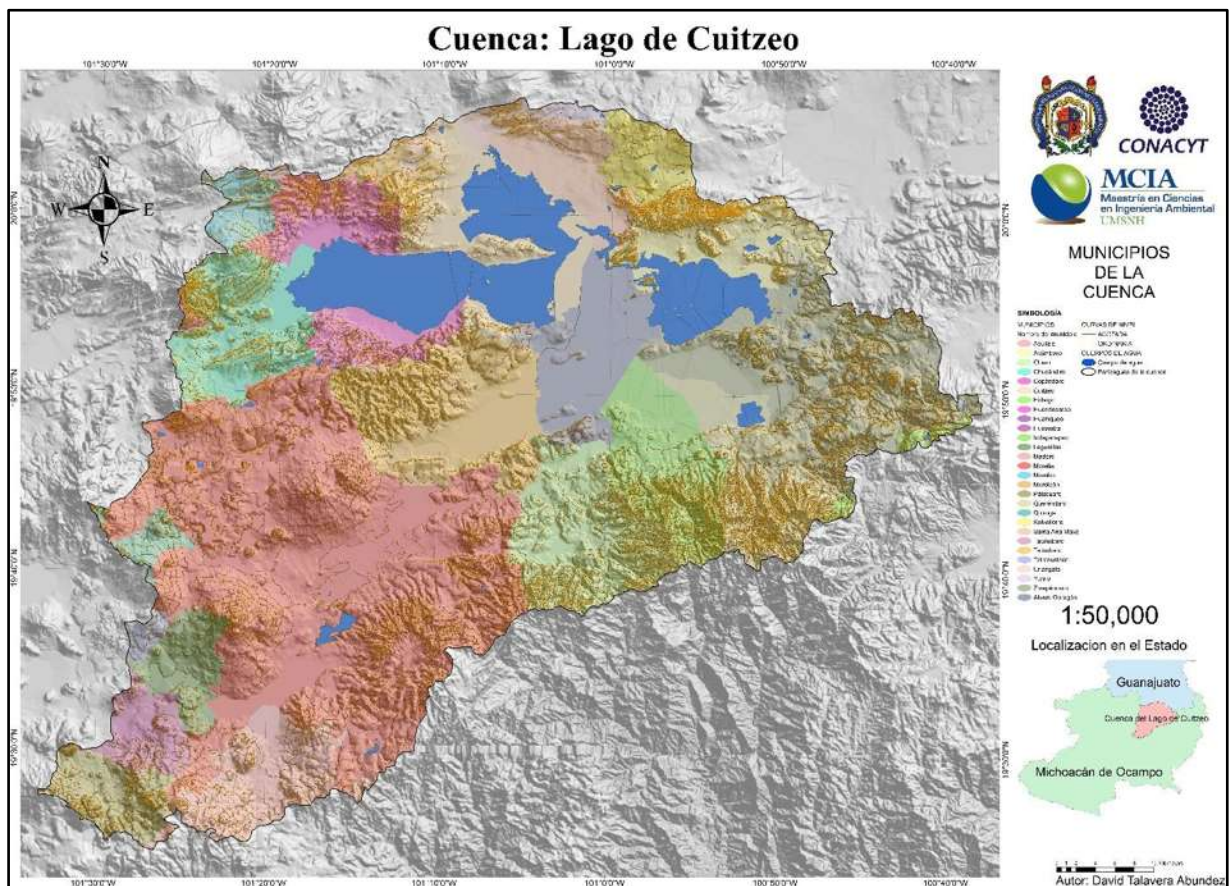


Figura 5. Municipios presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez con datos de INEGI (2014)

### 7.3. Climas

La cuenca del lago de Cuitzeo tiene un relieve específico con montañas y valles que le ofrece una variedad de climas, los cuales son descritos a continuación; el tipo de clima (A)C(wo) es semicalido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C; C(w1) Templado, subhúmedo, con temperaturas anuales de entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío de -3 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C; C(wo) Templado, subhúmedo, con temperaturas anuales entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío de -3 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C; C(w2) Templado, subhúmedo, con temperaturas entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío de -3 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22 °C y Cb'(w2) Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual de 8 °C , temperatura del mes más frío entre -3 °C, temperatura del mes más caliente de 22 °C. El relieve tiene gran importancia en la distribución de la lluvia. En la cuenca del lago de Cuitzeo predominan precipitaciones de 600 a 800 mm anuales. La lluvia aumenta sobre las sierras que rodean el lago. En la parte más baja se reciben de 800 a 1000 mm y a mayor altitud, la precipitación es superior a 1200 mm anuales (CONABIO, 2015).

### 7.4. Coberturas de suelo

Por otro lado las coberturas que se manifiestan en la cuenca del lago de Cuitzeo son: Asentamientos humanos, bosque de oyamel, bosque cultivado, bosque mesófilo de montaña, bosque de pino, bosque de pino encino, bosque de encino, bosque de encino pino, agricultura de humedad anual, pastizal cultivado, pastizal halófilo, pastizal inducido, agricultura de riego anual, agricultura anual y semipermanente, agricultura de temporal anual, agricultura de temporal anual y permanente, vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel, arbustiva de bosque de pino, arbustiva de bosque de pino encino, arbórea de bosque pino encino, arbustiva de bosque de encino, arbórea de bosque de encino, arbustiva de bosque de encino pino, arbustiva de selva baja caducifolia, arbórea de selva baja caducifolia, tular, zona urbana, cuerpos de agua y desprovisto de vegetación según la serie V de uso y cobertura del suelo (Figura 6)

(INEGI, 2015). De forma resumida las coberturas y su extensión se presentan en el cuadro 3.

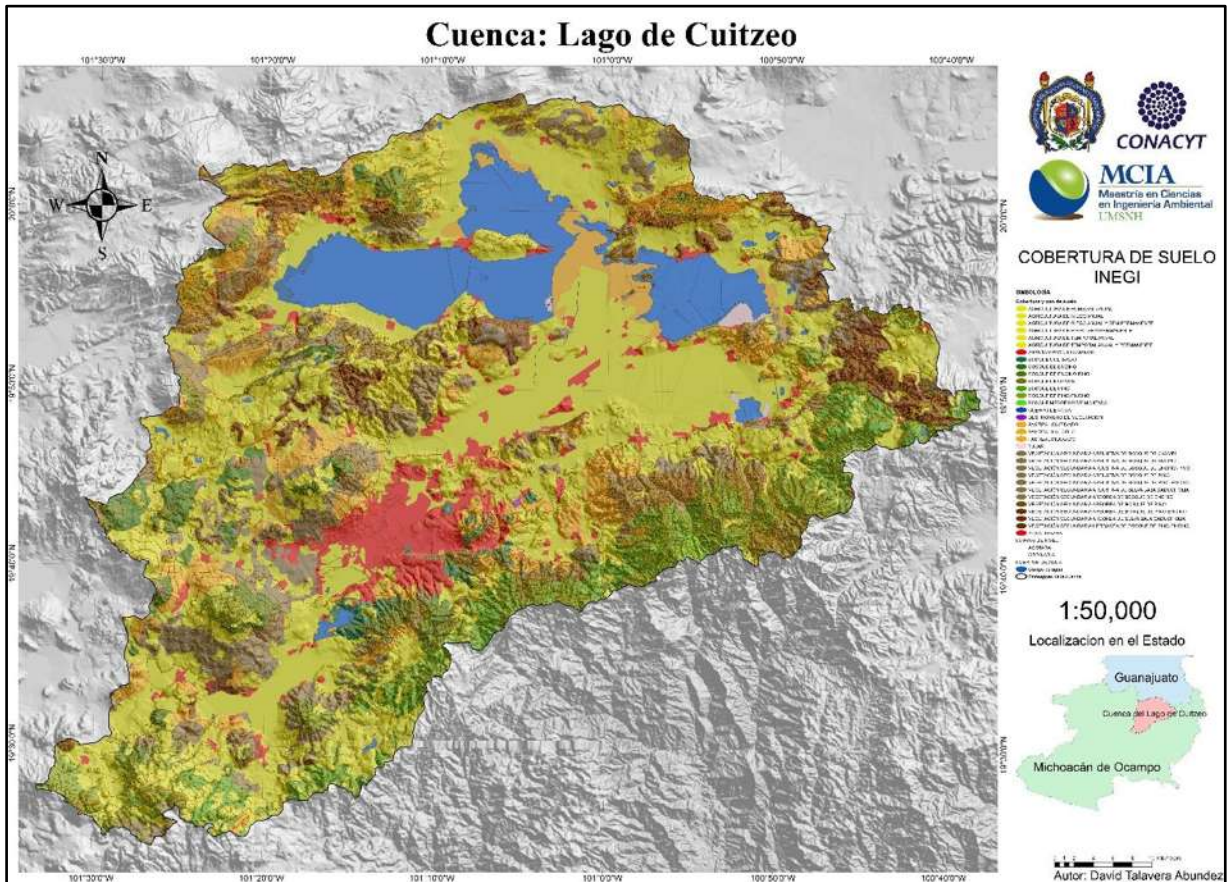


Figura 6. Cobertura y uso de suelo en la cuenca del Lago de Cuitzeo  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez con datos de INEGI (2014)



Cuadro 3. Tipos de cobertura y uso de suelo en la cuenca del lago de Cuitzeo (INEGI, 2015)

Tipo de Cobertura	Área ocupada en la cuenca	
	Km <sup>2</sup>	%
Agricultura	1681.6	42.02
Zona urbana	219.8	5.49
Bosque cultivado	32.1	0.80
Bosque de encino	151.3	3.78
Bosque de encino-pino	28.6	0.72
Bosque de oyamel	21.1	0.53
Bosque de pino	301.8	7.54
Bosque de pino-encino	88.3	2.21
Bosque mesófilo de montaña	10.3	0.26
Cuerpo de agua	334.5	8.36
Desprovisto de vegetación	0.7	0.02
Pastizal cultivado	1.5	0.04
Pastizal inducido	274.9	6.87
Pastizal halófilo	75.5	1.89
Tular	13.6	0.34
Vegetación secundaria	766.4	19.15

En el caso de los tipos de bosque solo reúnen 15.58% de la cobertura que existe en la cuenca, siendo de mayor proporción la cobertura de agricultura y vegetación secundaria con 42.02% y 19.15%, respectivamente.

## 7.5. Tipos de suelo

Los tipos de suelo reportados para en La cueca del Lago de Cuitzeo son los siguientes, Andosoles que se presentan en altitudes de 2,300 a 3,100 msnm sobre conos volcánicos, en ambientes húmedos con pendientes que varían de extremas a moderadas, cubiertos generalmente por los bosque templado aunque existe agricultura; los Acrisoles y Luvisoles se localizan en ambientes similares, pero a menor altitud (1,900 a 2,700 msnm), se caracterizan por ser ácidos y estar fuertemente meteorizados además de tener un porcentaje mayor de arcillas; Litosoles, se caracterizan por la poca profundidad que llega hasta los 10 cm por la limitante de rocas o tepetate con vegetación variable; a menor altitud (2,000 a 2,350 msnm) se encuentran los Feozems, de color oscuro y ricos en materia orgánica, con saturación de bases mayor a 50% en los primeros 100 cm, son buenas áreas agrícolas; los Vertisoles se localizan en depresiones y zonas planas entre los 1,900 y 2,300 m de altitud. Tienen un alto contenido de arcillas expandibles; Los Planosoles se ubican en zonas llanas o en depresiones inundables, se originan de depósitos de arcilla; Los Gleysoles se encuentran en zonas de inundación, posiciones bajas del paisaje y en particular en la ribera del lago; Los Solonchaks se localizan principalmente en la ribera del lago y en áreas donde el agua subterránea asciende, disolviendo y arrastrando sales; Los Cambisoles se caracterizan por la ausencia de cantidades apreciables de arcilla y materia orgánica, se localizan en terrenos llanos a montañosos con gran variedad de vegetación, constituyen buenas tierras agrícolas y se usan intensivamente; los suelo Ranker se caracterizan por ser ácidos, con alto contenido de materia orgánica generalmente están presentes en pendientes moderadas con cobertura forestal; los Regosoles son suelos con poco desarrollo por lo cual su fertilidad es limitada por la profundidad y por la pedregosidad (Figura 7) (Cabrera *et al.*, 2010; INEGI, 2016).

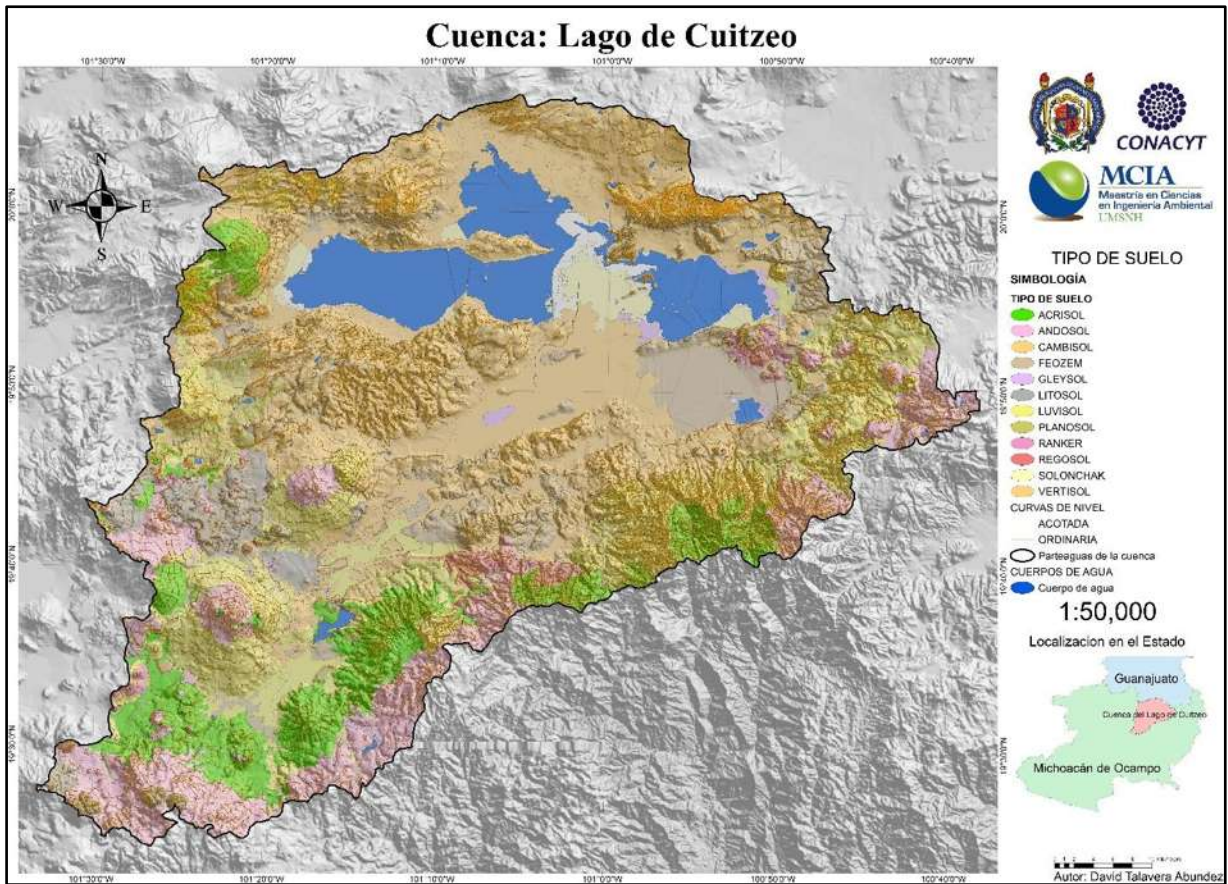


Figura 7. Tipo de suelo de la cuenca del Lago de Cuitzeo  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez con datos de INEGI (2014)

## **CAPÍTULO II: ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO (CCUS)**

### **1. RESUMEN**

El trabajo realizado en este capítulo estuvo enfocado a identificar el cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) de la cuenca del Lago de Cuitzeo en un periodo de 14 años, con el objetivo de observar las tendencias de cambio, y para cuantificar los servicios ambientales que se han perdido en el área de bosque templado, observar la relación que existe entre algunos factores que se cree propician el cambio de cobertura y uso de suelo, y los cambios reales que se dieron en el periodo analizado. Se definieron las variables a comparar así como su espacialización, posteriormente se definieron las coberturas de suelo a partir de dos imágenes satelitales (Landsat 7 y Landsat 8) de los años 2000 y 2014. Se hicieron dos mapas para encontrar los cambios de cobertura a través del Land Change Modeler (LCM) en el SIG Idrisi Selva. Los resultados muestran que los asentamientos humanos presentan un crecimiento desmedido en el área de estudio, con una tasa de cambio del 4% anual y la degradación de algunas áreas de bosques templados y de bosque seco a vegetación secundaria, así mismo de las variables escogidas, las áreas agrícolas y los asentamientos humanos son las variables que mejor explican los cambios que se presentaron, seguido de las pendientes del terreno y de la densidad de población con un valor de asociación (V Cramer) mayor de 0.23, valor aceptable para escenarios de cambio de cobertura.

Palabras clave: sistemas de información geográfica, compuesto en color, imágenes Landsat e interpolación.

## 2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las transiciones de cambios de cobertura y uso de suelo son muy evidentes y en algunos casos se dejan de lado como algo asociado a los procesos naturales de transformación de los ecosistemas. Es bien sabido que la transformación en nuestro territorio está asociado a las actividades antropogénicas mayoritariamente y en menor medida a algunos procesos naturales (Flamenco, 2007).

En este trabajo se encontró la relación entre los cambios de cobertura y uso de suelo con algunos factores antropogénicos y algunos factores propios de los ecosistemas, así mismo se hizo la aproximación de los servicios ambientales que se han perdido en la cuenca del lago de Cuitzeo.

Se escogieron aquellas variables que propician el cambio de cobertura y uso de suelo y que se mencionan en trabajos de este tipo y de seguridad ecológica. En este trabajo se utilizaron dos imágenes satelitales de Landsat 7 y 8 de los años 2000 y 2014, se hizo clasificación manual a través de la interpretación visual para la creación de mapas de coberturas para ambas fechas, se identificaron las transiciones ocurridas y se encontraron las zonas en donde existió algún cambio y finalmente se compararon las variables con los cambios de cobertura.

Los resultados obtenidos muestran que las coberturas definidas en este trabajo presentan cambios significativos, siendo los bosques templados y la agricultura uno de los ecosistemas más vulnerables al cambio. Otro aspecto importante se presenta en los asentamientos humanos que ganaron 10 092.4 ha, siendo la cobertura que más territorio absorbió y, la agricultura y el bosque templado los que más pérdidas de territorio registraron. Las variables que más explican los cambios son los asentamientos humanos, las pendientes y la densidad de población con valores de asociación arriba de lo recomendado para la creación de escenarios de cambio de cobertura y uso de suelo.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología que se empleó en este capítulo se enfocó a encontrar principalmente la asociación entre los cambios de cobertura de suelo y variables que propicien los cambios. También se hizo análisis del cambio de la cobertura de suelo, magnitud y dirección y finalmente se realizó una aproximación de los servicios ambientales perdidos por el cambio de los bosques templados (Figura 8).

#### **3.1 Elección de las variables que propician el cambio de cobertura y uso de suelo**

Se escogieron aquellas variables que expliquen los CCUS (Cambio de cobertura y uso de suelo) o que de manera directa o indirecta propicien los mismos y que por otro lado se pudiesen espacializar para el análisis a través de sistemas de información geográfica. Esta elección se hizo a través de una cuidadosa revisión bibliográfica sobre trabajos de cambio de uso de suelo y de seguridad ecológica.

Las variables o factores que se consideran promueven el cambio de cobertura y uso de suelo, son las siguientes:

- 1.- Vías de comunicación primarias. Abarcan carreteras federales y estatales pavimentadas, libre y de cuota, no solo involucradas al trabajo por el cambio que se provoca con su construcción, sino como un vector que propicia el CCUS de manera directa porque representa un acceso a lugares no perturbados o para el establecimiento de nuevas actividades antropogénicas.
- 2.- Vías de comunicación secundarias y terciarias. Estas incluyen a los caminos de terracería, brechas y veredas, debido a son factores que fomentan la extracción de bienes naturales.
- 3.- Localidades. Representan en general cambios por la propia dinámica de crecimiento de la población.
- 4.- Densidad de población. Es una de las variables que explica los cambios en lugares donde la población está más consentrada.

5.- La tasa de crecimiento poblacional (TCP). Esta variable explica que existen más cambios de cobertura donde las localidades crecen más.

6.- Grado de rezago social. Se incluyó con el propósito de observar si es un factor que pueda explicar los cambios de uso de suelo, debido a las características propias de las comunidades.

7.- Áreas agrícolas y asentamientos humanos. Que se entiende como uno de los principales motores del cambio, por su impacto en otras coberturas naturales.

8.- Pendiente del terreno. Por ser un factor que facilita o limita la extracción de recursos.

9.- Corrientes de agua perenes y manantiales. Se introdujeron al análisis como un vector que propicia el cambio por la necesidad del recurso hídrico.

10.- Áreas naturales protegidas. Para observar si son un motor que promueve el cuidado y estabilidad de los ecosistemas.

### **3.2. Construcción de variables poblacionales**

La construcción de estas variables se realizó a partir de los datos censales por localidad de los años 2000, 2005 y 2010. Para la densidad de población se utilizó únicamente el número de individuos por localidad del censo del 2010.

Para calcular la tasa de crecimiento por localidad se utilizaron los datos poblacionales de los años 2000, 2005 y 2010. Se aplicó la ecuación 1 para poblaciones con crecimiento poblacional exponencial por ser el modelo que más se asemeja a las poblaciones humanas (Torres, 2011).

$$r = \frac{\ln P^{t+n} - \ln P^t}{a}$$

Ecuación 1

Donde:

r = Tasa de crecimiento anual exponencial (TCP).

$P^{t+n}$  = Población al momento actual.

$P^t$  = Población al momento inicial o población base o población inicial.

$\alpha$  = La amplitud o distancia en tiempo entre las dos poblaciones de referencia.

$\ln$  = Logaritmo natural.

El grado de rezago social (GDRS) por localidad se extrajo directamente de los datos de la CONAPO. El GDRS es una medida en la que un solo índice agrega variables de educación, de acceso a servicios de salud, de servicios básicos en la vivienda, de calidad y espacios en la misma, y de activos en el hogar. Es decir, proporciona el resumen de carencias sociales de la medición de pobreza (CONEVAL, 2015). El rezago social en sus diferentes desagregaciones geográficas, se agrupa en cinco grados: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto (CONAPO, 2015).

### **3.2.1. Generación de superficies continuas de datos poblacionales**

Uno de los problemas que existen cuando se trabaja con sistemas de información geográfica es el que mucha de la información no está en el formato adecuado para su utilización.

Las variables de rezago social, densidad de poblacional y la tasa de crecimiento poblacional, son datos puntuales que fue necesario espacializar por medio de un algoritmo interpolador, distancia inversa ponderada (IDW por sus siglas en inglés), para obtener superficies continuas. Esto se realizó mediante el programa SURFER 11® (SURFER11, 2015).

### **3.3 Variables de distancia y topográficas**

Las vías de comunicación primarias, secundarias y terciarias, localidades, corrientes de agua perenes y manantiales fueron extraídas de los conjuntos de datos vectoriales de INEGI (2015) a escala 1:50,000 Serie III en sus actualizaciones del 2013 a 2018 (Cuadro 4). Las pendientes del terreno se clasificaron a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a resolución de 15 m de los datos de INEGI a través del módulo Slope en Idrisi Selva con una clasificación de pendientes relativas, así como las áreas naturales protegidas que se obtuvieron a través del portal de CONABIO de las áreas naturales protegidas Estatales y Federales.



Cuadro 4. Conjunto de datos vectoriales utilizados INEGI (2015)

ID	Carta	Nombre se la carta
1	E14A12	Coeneo de la Libertad
2	E14A13	Cuitzeo
3	E14A14	Zinapécuaro
4	E14A15	Maravatío
5	E14A22	Pátzcuaro
6	E14A23	Morelia
7	E14A24	Tzitzio
8	E14A32	Villa Escalante
9	E14A33	Villa madero
10	F14C82	Puruándiro
11	F14C83	Moroleón
12	F14C84	Acámbaro

ID = identificador

Para la presentación de las variables en mapas, se utilizó el sistema de información geográfica Arcmap del paquete de ArcGis 10.3.

### 3.4. Análisis de los cambios de cobertura y uso de suelo

Los análisis de CCUS cada vez son más utilizados para la planificación y aplicación de estrategias para el cuidado del ambiente, en la actualidad el uso de imágenes satelitales es muy utilizado, porque permite la interpretación del cambio de las coberturas de terreno mensual, anual o por periodos más largos.

#### 3.4.1. Análisis e interpretación de imágenes satelitales

El uso de imágenes satelitales fue la primera opción porque representa el alcance a la observación de cambios de dos fechas distantes y para el fin de este trabajo, un vistazo verídico al cambio que se suscita en la cuenca.

##### 3.4.1.1. Elección y adecuación de las imágenes

Las imágenes satelitales utilizadas fueron Landsat 7 ETM del año 2000 y Landsat 8 OLI del año 2014 obtenidas a través de Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), del periodo de enero a marzo para evitar la nubosidad en el área de estudio

(Cuadro 5). En total se utilizaron tres escenas diferentes por cada fecha, dado que la cuenca abarca parte de las tres imágenes, por lo que fue necesario hacer un mosaico para tener la cobertura completa.

Cuadro 5. Imágenes Landsat utilizadas para la clasificación de coberturas

Landsat 7 ETM del 2000				
Escena	Path	Row	SC	Datum
1	27	46	UTM	WGS84
2	27	47		
3	28	46		
Landsat 8 OLI del 2014				
1	27	46	UTM	WGS84
2	27	47		
3	28	46		

SC = Sistema de coordenadas; UTM = Universal Transversal de Mercator; WGS = World Geodetic System; Path y Row son identificadores para la ubicación de la escena en el planeta

Con el propósito de observar mejor las coberturas vegetales y antropogénicas que existen en la cuenca del Lago de Cuitzeo se realizaron compuestos en falso color rojo, así como compuestos en color en el rango del visible, utilizando el SIG. Adicionalmente, se hizo un mejoramiento de las imágenes con la técnica Pan sharpening, que permite combinar la banda pancromática de 15 m de resolución con las bandas multiespectrales de 30 m.

La clasificación de coberturas se basó en una leyenda de 10 categorías (Cuadro 6), las cuales se explican a continuación.

1. Agricultura. Son todas las áreas en las que se practica la agricultura y que están parceladas.
2. Asentamientos humanos. Esta área abarca todos aquellos lugares que tienen presencia de viviendas humanas, áreas de trabajo y de recreación humana.

3. Bosque Templado. Son áreas que conforman el bosque de encino, de encino pino, oyamel, de pino y de pino encino.
4. Bosque seco. En general engloban las áreas de selva baja caducifolia
5. Cuerpo de agua. Son áreas con contenido de agua considerables que engloban los jagüeyes, ollas de agua, lagos, lagunas presas y represas.
6. Desprovisto de vegetación. Son áreas que en la percepción no tienen ninguna cubierta vegetal
7. Pastizal. Engloba las áreas en donde predomina los pastos, ya sean naturales o inducidos.
8. Vegetación acuática. Involucra las áreas de tulares y la vegetación acuática conocida comúnmente como lirio.
9. Banco de materiales. Esta cobertura engloba las zonas de donde se extraen materiales para la construcción, tales como los bancos de arena, graba y roca.
10. Vegetación secundaria. En esta cobertura están incluidas las áreas en donde la vegetación original ha sufrido perturbación y empieza la recuperación con vegetación colonizadora y se alcanzan a observar algunos conjuntos de la vegetación original.

Cuadro 6. Categorías utilizadas en el análisis de cambio de cobertura y uso de suelo

Categoría	Leyenda	Abreviación
1	Agricultura	Ag
2	Asentamientos humanos	AsH
3	Bosque templado	Bt
4	Bosque seco	Bs
5	Cuerpo de agua	Cp
6	Desprovisto de vegetación	Dv
7	Pastizal	Pz
8	Vegetación acuática	Va
9	Banco de materiales	Bm
10	Vegetación secundaria	Vs

La digitalización de las categorías para los años 2000 y 2014, se realizó mediante el programa CartaLinx v1.2® y el diseño cartográfico se hizo con el programa Arcmap 10.3®. La delimitación de la cuenca se basó en la propuesta del lago de Cuitzeo de FIRCO.

#### 3.4.2. Cambio de cobertura y uso de suelo

El análisis de cambio de cobertura y uso de suelo, suele ser un excelente indicador de deterioro o en el mejor de los casos de la recuperación de áreas naturales en un área determinada.

Para este trabajo, el análisis de cambio de cobertura y uso de suelo se llevó a cabo mediante la herramienta Land Change Modeler, del SIG Idrisi Selva®, el cual permitió el análisis de los cambios de coberturas y la creación de escenarios de cambios. Además, se realizó un cruzamiento de las coberturas de ambas fechas mediante el SIG, para obtener una matriz de transición que permitió cuantificar los cambios.

### 3.4.3. Tasa de cambio de las coberturas y uso de suelo

La tasa de cambio es por una parte, un dato que permite conocer la magnitud del cambio y por otra permite observar la velocidad de este entre dos fechas. Para su cálculo se utilizó la Ecuación 2 de la FAO (Mas *et al.*, 2009a):

$$Tc = [(S_2 - S_1)^{1/N} - 1] \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

Tc = Tasa de cambios (%).

S<sub>1</sub> = Superficie (ha) de la clase en la fecha 1

S<sub>2</sub> = Superficie (ha) de la clase en la fecha 2

N = Diferencia de años entre una fecha y otra.

## 3.5. Servicios ambientales perdidos en bosques templados

Uno de los parámetros a considerar cuando se analiza el cambio de cobertura vegetal en un terreno, es la transformación que sufren las áreas y con esto, la pérdida de servicios ambientales ocasionados por el cambio (Challenger, 2009).

El análisis se enfocó principalmente en la pérdida de dos servicios fundamentales en la cuenca. El primero es la pérdida de captura de carbono (CO<sub>2</sub>) y el segundo, la pérdida de infiltración de agua, en las áreas de bosque templado. Es importante mencionar que los cálculos que se hicieron son sólo una aproximación.

### 3.5.1. Carbono perdido del año 2000 a 2014

El estado y la abundancia de la cobertura y la biomasa de la vegetación verde se calcularon mediante el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), para ambas fechas con las imágenes Landsat mencionadas con anterioridad. El NDVI se calcula de la siguiente manera (Ecuación 3).

$$NDVI = \frac{IRC-R}{IRC+R} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada.

IRC = Banda de infrarrojo cercano

R = Banda de rojo.

Posteriormente con la ecuación propuesta por (Pérez, 2015), se calculó la cantidad de carbono por hectárea contenido en la masa forestal de la cuenca del Lago de Cuitzeo (Ecuación 4).

$$CO_{2x} = -104.9 + 480.37 * NDVI \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

$CO_{2x}$  = cantidad de carbono contenido en la masa forestal ( $t \text{ ha}^{-1}$ )

-104.9 es la ordenada al origen y 480.37 la pendiente de la línea de regresión.

NDVI = índice de vegetación

El  $CO_2$  capturado en la masa forestal se obtuvo por medio de estadística zonal con el SIG, para los bosques templados de la cuenca. Dado que la reflectancia capturada por el sensor ETM era diferente del Sensor OLI se decidió mantener el promedio de  $CO_2$  contenido en el año 2014 para las áreas forestales del 2000.

Una vez obtenidos los mapas de  $CO_2$  en  $t \text{ ha}^{-1}$  contenido en la masa forestal se calculó la cantidad de carbono contenido en ambas fechas con la Ecuación 5.

$$CO_2 = (CO_{2x}) * (A) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$CO_2$  es la cantidad de carbono (t) contenido en el área de bosque templado

$CO_{2x}$  es el carbono contenido ( $t \text{ ha}^{-1}$ )

A es el área total (ha) de cobertura de bosque templado

Por consiguiente, se calculó la pérdida de carbono de los años 2000 al 2014 según la pérdida de masa forestal que se suscitó, por medio de la Ecuación 6.

$$CO_{2p} = CO_{2a} - CO_{2b} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$CO_{2p}$  = carbono perdido (t)

CO<sub>2a</sub> = carbono total (t) en la fecha inicial

CO<sub>2b</sub> = carbono total (t) en la fecha final

Finalmente para este análisis se aproximó la cantidad de árboles perdidos en el periodo analizado. Aproximadamente el CO<sub>2</sub> contenido en un árbol es el 50% de su biomasa total (FAO, 2010) citado en (Pérez, 2015), entonces:

$$\text{Biomatp} = \text{CO}_{2p}/0.5 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

Biomatp = biomasa total (t) en el área perdida

CO<sub>2p</sub> = carbono perdido (t)

0.5 = constante de concentración de biomasa

Lo que permitió estimar que la cantidad de árboles, al saber que el promedio de biomasa contenido por árbol en áreas de bosque templado tales como Abies, Alnus, Arbutus, Pinus, Quercus es de 0.0761696 t (Pérez, 2015), por lo cual:

$$\text{Narbp} = (\text{Biomatp})/(0.0761696) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

Narbp = número de árboles perdidos

Biomatp = biomasa total perdida

0.0761696 = constante de biomasa contenida por árbol en promedio

Finalmente para corroborar el número de árboles se calculó la densidad de árboles perdidos para observar si la especulación de pérdida arbórea no estaba sobreestimada. Se calculó de la siguiente manera

$$\text{DsArP} = \text{Narbp}/ \text{Ad} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

Dsarp = densidad de árboles perdido (t ha<sup>-1</sup>)

Narbp = número de árboles perdido

Ad = área deforestada (ha) para el periodo analizado

### 3.5.2. Potencial de infiltración de agua en las áreas boscosas

El agua en cualquier ecosistema es fundamental para el desarrollo de la vida, no obstante en la cuenca del Lago de Cuitzeo se ha observado que el déficit de agua es evidente, en donde la evaporación de aguas superficiales es mayor a la precipitación que se percibe. Se hizo una evaluación para calcular la aproximación de agua que se infiltraba en las zonas boscosas que se perdieron del año 2000 al año 2014. En un estudio realizado en una plantación (Zavaleta *et al.*, 2012) se descubrió que el potencial de agua a infiltrarse se podía calcular de la siguiente manera:

$$CAI = (PP - ART) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

CAI = cantidad de agua con potencial de infiltración

PP = precipitación total anual

ART = cantidad de agua retenida

Para fines prácticos, según el análisis mencionado, el agua retenida en el área boscosa era de 0.09120 Lts/m<sup>2</sup> (AR) haciendo una conversión de unidades para la aplicación en este trabajo, con lo que se calculó la retención total de agua en el área deforestada de la siguiente manera.

$$ART = (AR) * (UNAD) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde

ART = cantidad de agua (m<sup>3</sup>) absorbida en el área deforestada

AR = constante de absorción (L m<sup>-2</sup>)

Ad = área total (m<sup>2</sup>) deforestada

La precipitación se obtuvo a partir de una revisión bibliográfica, se menciona que en la zona boscosa al sur de la cuenca la precipitación total anual (PPT) es alrededor de 1100 a 1250 mm anuales (Manzanilla, 2016). Por lo que se tomó el promedio (1175 mm) de estos datos para hacer la aproximación de infiltración perdida. Dado que el ART está en m<sup>3</sup> se calculó la precipitación en m<sup>3</sup> de la siguiente manera:



$$PPM3 = PPT * Ad$$

Ecuación 12

Donde:

PPM3 = precipitación (m<sup>3</sup>) total anual

PPT = precipitación total (m) anual promedio

Ad = área total (m<sup>2</sup>) deforestada

Finalmente para concluir este capítulo se aplicó la ecuación de CAI para calcular el agua con potencial de infiltración que se perdió por causa de la pérdida forestal en la cuenca.

### **3.6. Correlación de las variables con cambios de cobertura y uso de suelo**

El cambio de cobertura y uso de suelo es el resultado de las actividades que son necesarias para el crecimiento económico de una región. Como ya se mencionó con anterioridad el principal objetivo de este apartado del trabajo, es conocer qué factores o actividades son los que propician el cambio de cobertura y uso de suelo.

#### **3.6.1. Tablas de contingencia**

El propósito de utilizar las tablas de contingencia para encontrar la asociación entre los cambios suscitados y las variables analizadas es simple, ya que una tabla de contingencia es una de las formas más comunes de resumir datos categóricos. En general, el interés se centra en estudiar si existe alguna asociación entre una variable fila y otra variable columna y/o calcular la intensidad de dicha asociación (UC3M, 2015).

Para buscar la correlación, se utilizó el LCM del SIG Idrisi Selva® el cual genera el estadístico V de Cramer, el cual es indicador de la correlación entre los cambios de cobertura y las variables. Una V Cramer  $\geq 0.15$  indica variables útiles para la proyección de escenarios, mientras que un valor de V Cramer mayor a 0.4 es una variable muy buena para el mismo propósito con un valor de *P* menor a 0.005 (Eastman, 2012).

Las variables de densidad de población y tasa de crecimiento poblacional se utilizaron directamente una vez interpoladas, la variable de rezago social siendo una variable categórica se tuvo que normalizar para la comparación en el submódulo Variable Transformation Utility. Es importante mencionar que se transformaron las variables restantes en mapas de distancias para poder hacer la asociación con los cambios identificados.

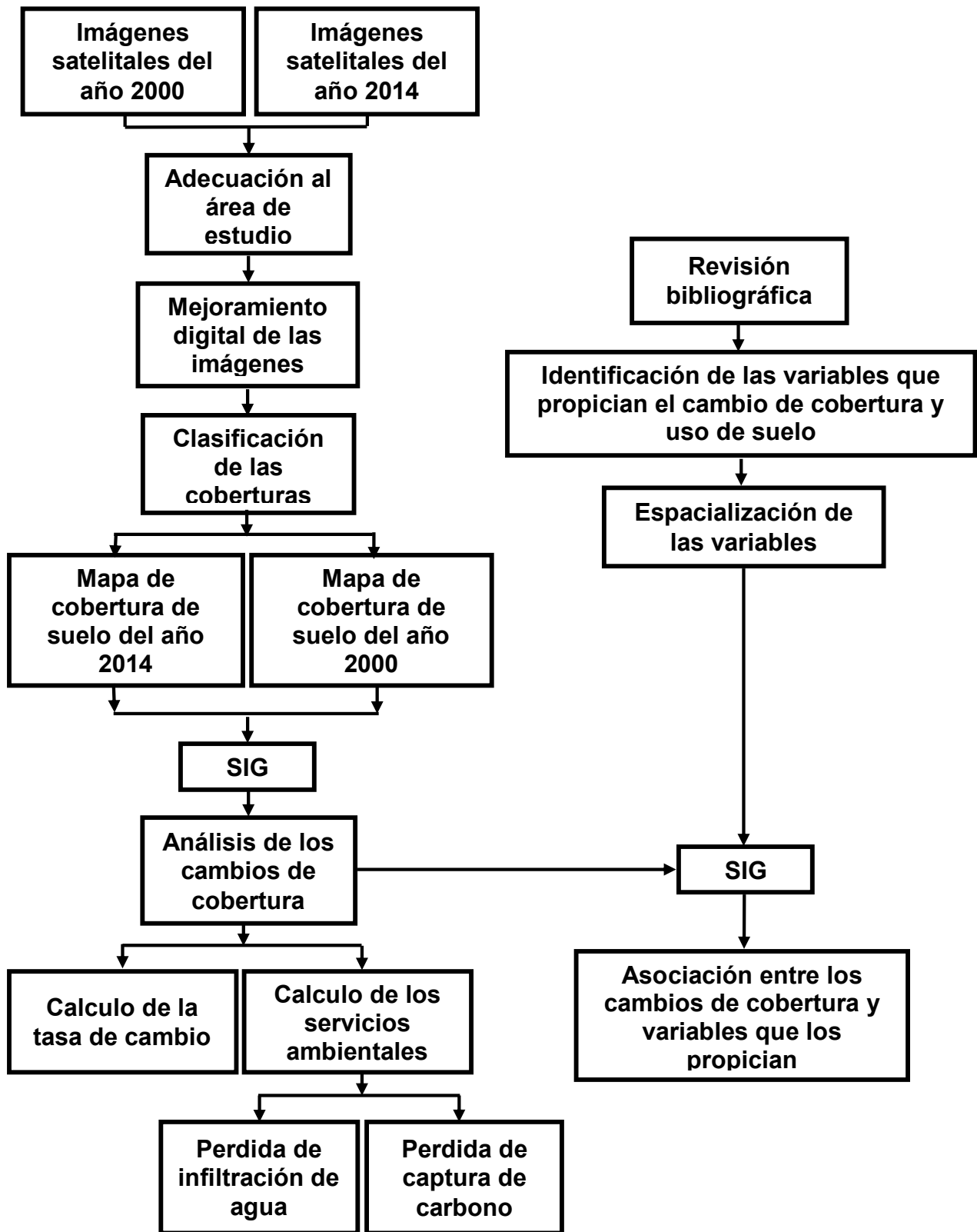


Figura 8. Esquema metodológico del análisis de cambio de cobertura y uso de suelo

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Variables espacializadas

Las localidades dentro de la cuenca son en total 749, sin embargo, como se mencionó en la metodología, fue necesario incluir algunas localidades que están fuera de la cuenca, por lo que el número de localidades aumentó a 919 (Figura 9).

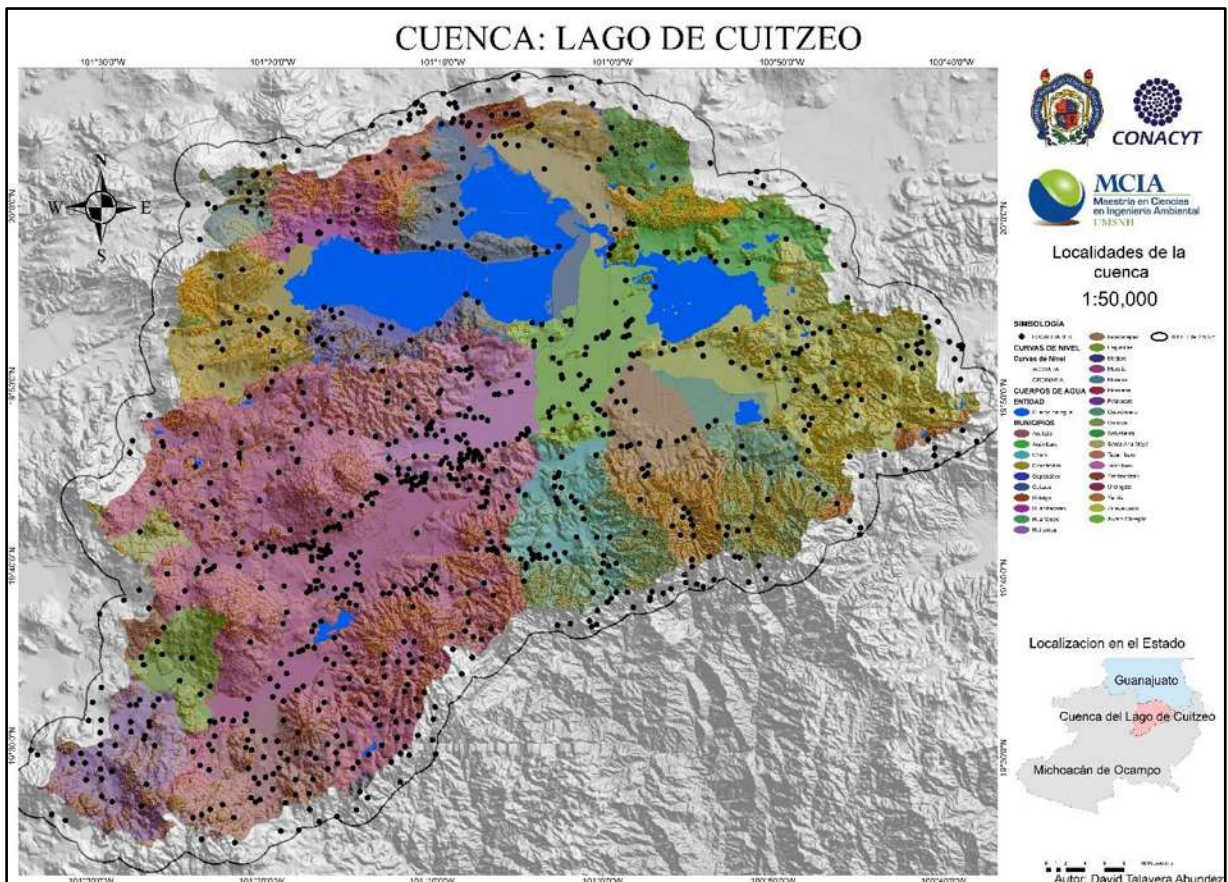


Figura 9. Localidades de la cuenca del Lago de Cuitzeo y con un búfer de 2.5 km  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez con datos de INEGI (2014)

En general, la densidad de población es baja, con excepción de las cabeceras municipales que es donde se concentra la población (Figura 10).

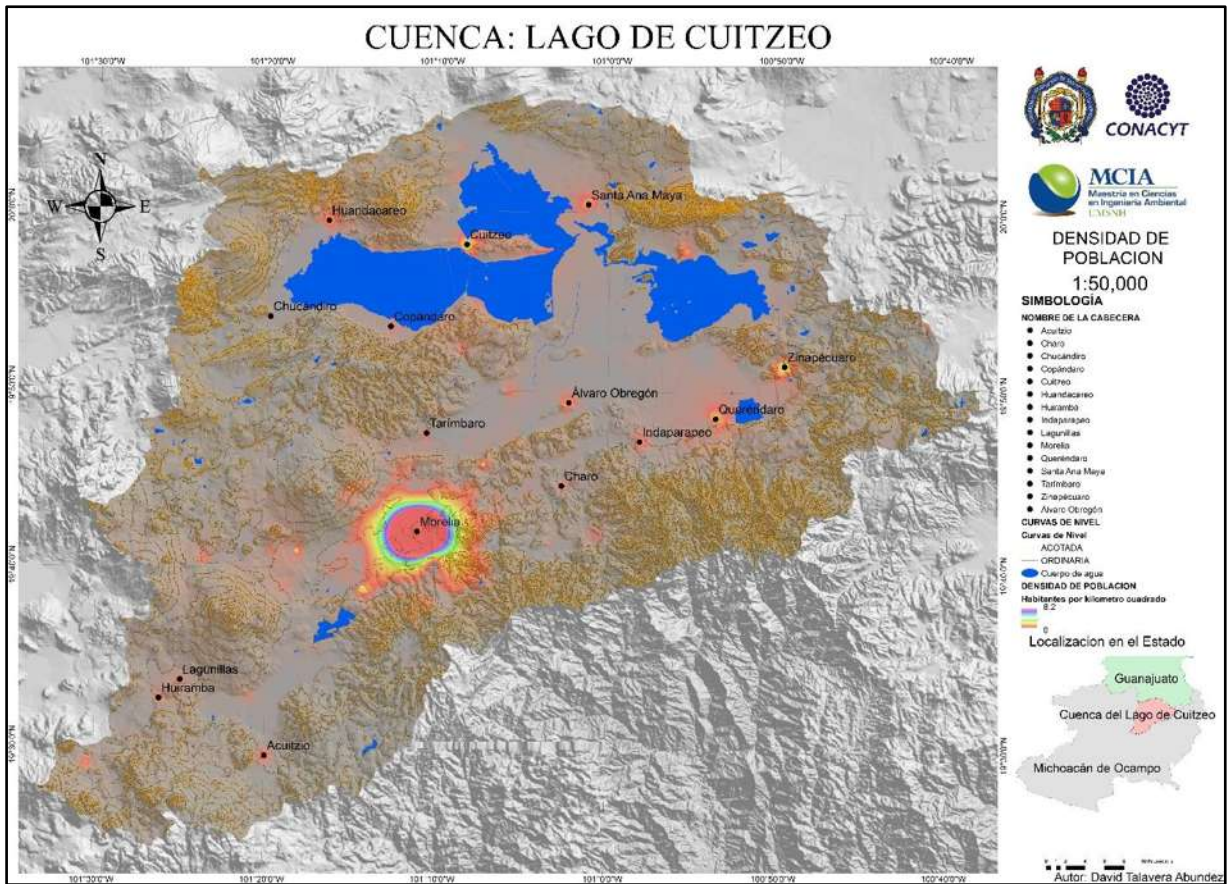


Figura 10. Estimación de la densidad de población  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez

Las tasas más altas de crecimiento poblacional, no se presentan en las cabeceras municipales, sino más bien en las localidades de reciente creación cercanas a la capital (Figura 11). El análisis de también mostró que las comunidades rurales están perdiendo habitantes, lo cual puede ser indicador de movimientos migratorios.



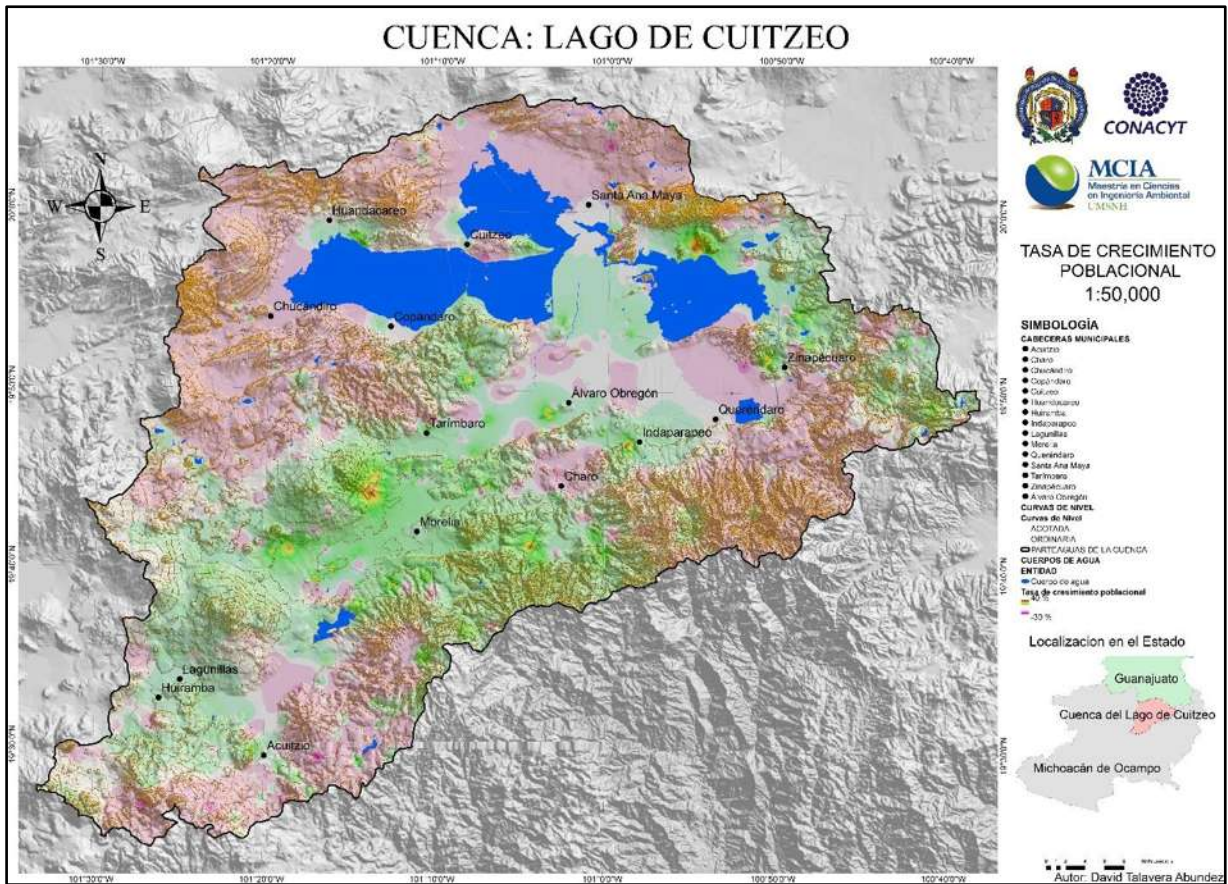


Figura 11. Tasa de crecimiento poblacional, datos interpolados  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez

Las localidades más cercanas a la capital son las que presentan un GDRS bajo que se puede deber a la posibilidad de acceder a las vías de comunicación, transporte y educación, mientras que las localidades más alejadas, en general en las zonas montañosas de la cuenca presentan un nivel de rezago más alto, esto seguramente por la falta de acceso a los beneficios que tienen las localidades cercanas a las cabeceras y a la capital del Estado (Figura 12). La distribución de las clases de rezago social entre las localidades de la cuenca indica que el 31.2% corresponde a la categoría de muy bajo, 39.9% y 22.7% son bajo y medio, respectivamente, 5.6% pertenece a la categoría alto y solo 0.2% está en muy alto rezago social.

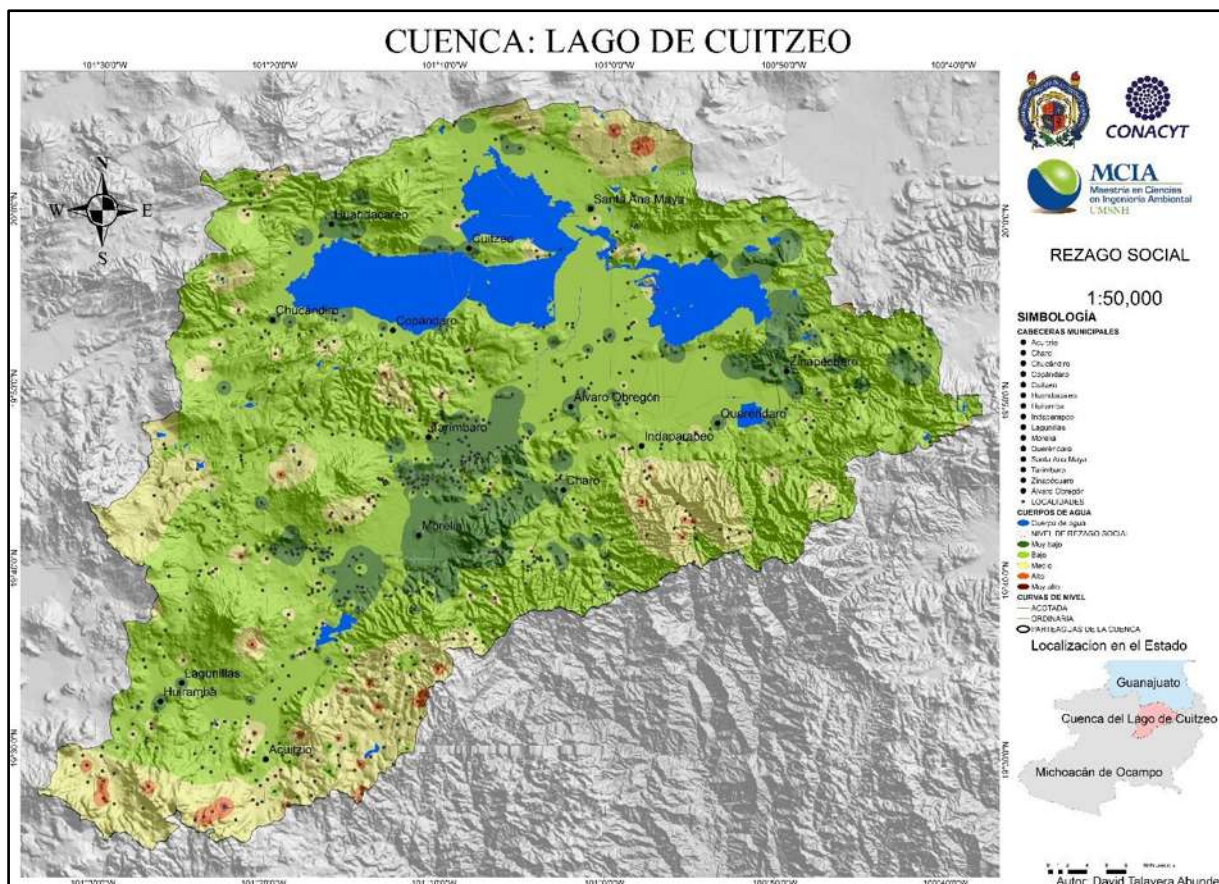


Figura 12. Espacialización del grado de rezago social (GDRS)  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez

Las áreas naturales protegidas localizadas en la cuenca en total son nueve (Cuadro 7). Estas unidades protegidas en total tiene una extensión de 1339 ha, lo cual sólo cubre 0.35% de la superficie total de la cuenca. Ocho de las áreas protegidas están alrededor de la ciudad de Morelia y quedan aisladas por el crecimiento de la mancha urbana; la novena zona está al noroeste de la cuenca siendo consumida por las áreas agrícolas (Figura 13).

Cuadro 7. Áreas naturales protegidas dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo

Nombre	Tipo	Categoría	Extensión
			ha
Cerro Punhuato	Estatal	Parque estatal	78
Cerro Punhuato (ampliación)	Estatal	Parque estatal	40
Ecológico del fideicomiso de la Cd. industrial de Morelia	Estatal	Parque urbano	88
Ex-escuela central agrícola de la Huerta	Estatal	Zona sujeta a preservación ecológica	269
Instituto Tec. Agropecuario No 7	Estatal	Parque urbano	7
Las tinajas de Huandacareo	Estatal	Zona sujeta a preservación ecológica	252
Loma de Santa María y depresiones aledañas	Estatal	Zona sujeta a conservación ecológica	231
Manantial la Mintzita y su zona de amortiguamiento	Estatal	Zona sujeta a preservación ecológica	415
Parque Francisco Zarco	Estatal	Parque urbano ecológico	18



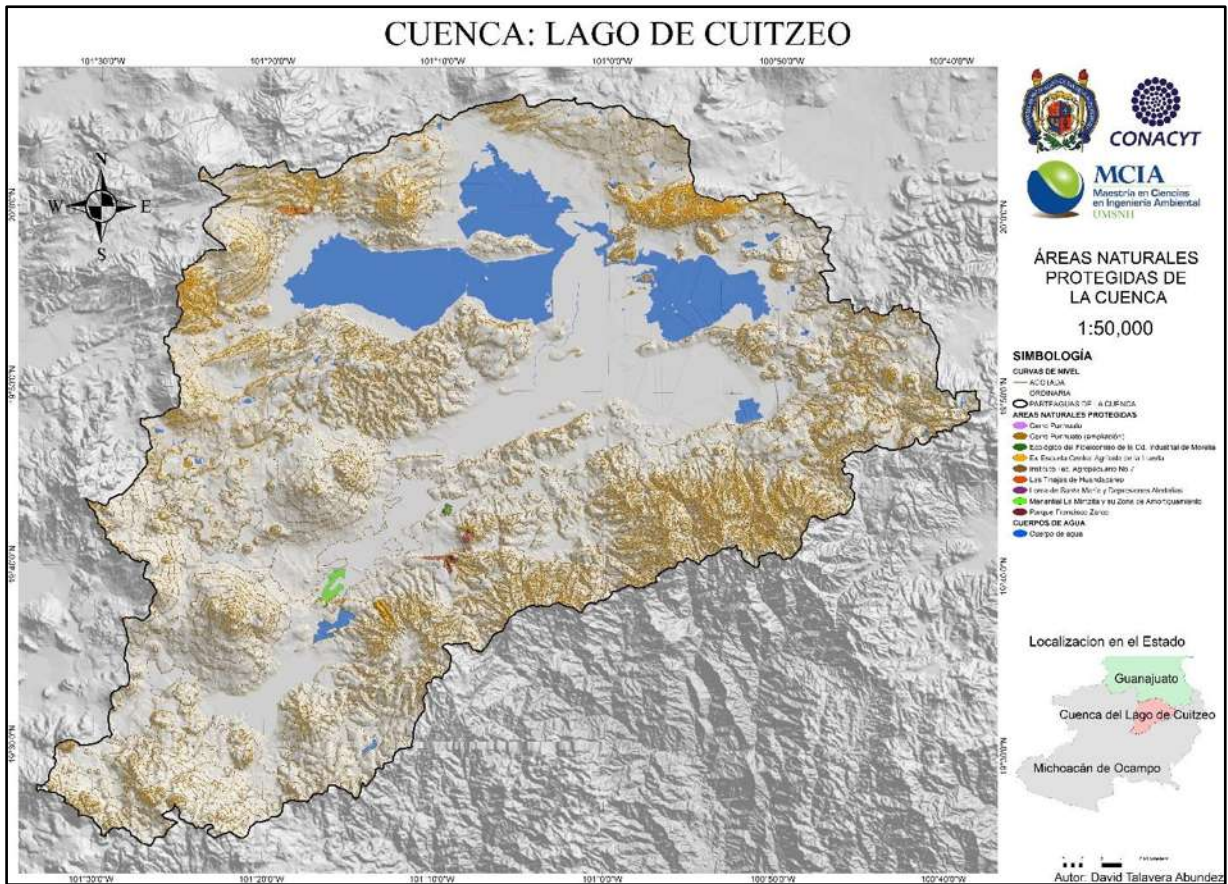


Figura 13. Localización de las áreas naturales protegidas  
 Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez con datos de INEGI (2014)

Las vías de comunicación primaria, secundaria y terciaria, muestran gran distribución en la cuenca dada la cantidad de localidades, con esto se puede mencionar que la cuenca cuenta con muchos accesos para la extracción de recursos naturales y para el establecimiento de nuevos usos de suelo (Figuras 14 y 15). En total, las vías de comunicación primarias recorren cerca de 1300 km y las secundarias y terciarias cubren 3324 km con una densidad de  $0.325 \text{ km km}^{-2}$  y  $0.831 \text{ km km}^{-2}$  respectivamente.





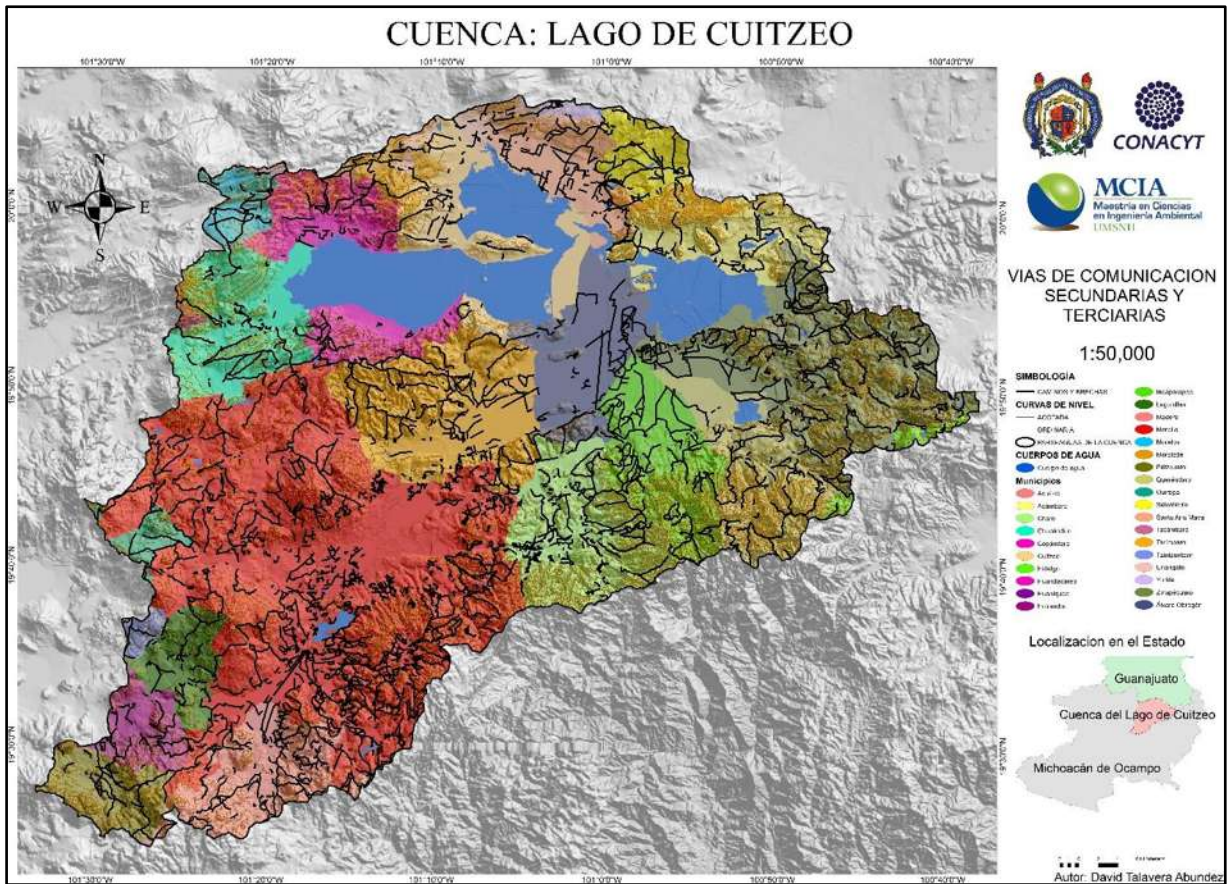


Figura 15. Vías de comunicaciones secundarias y terciarias  
 Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez con datos de INEGI (2014)

Las áreas agrícolas y asentamientos humanos, cubren un total de 178,966.9 ha en el año 2014 lo que representa cerca del 45% de la superficie total de la cuenca, y que no son necesariamente áreas que cumplen con las características idóneas para este tipo de uso de suelo (Figura 16).

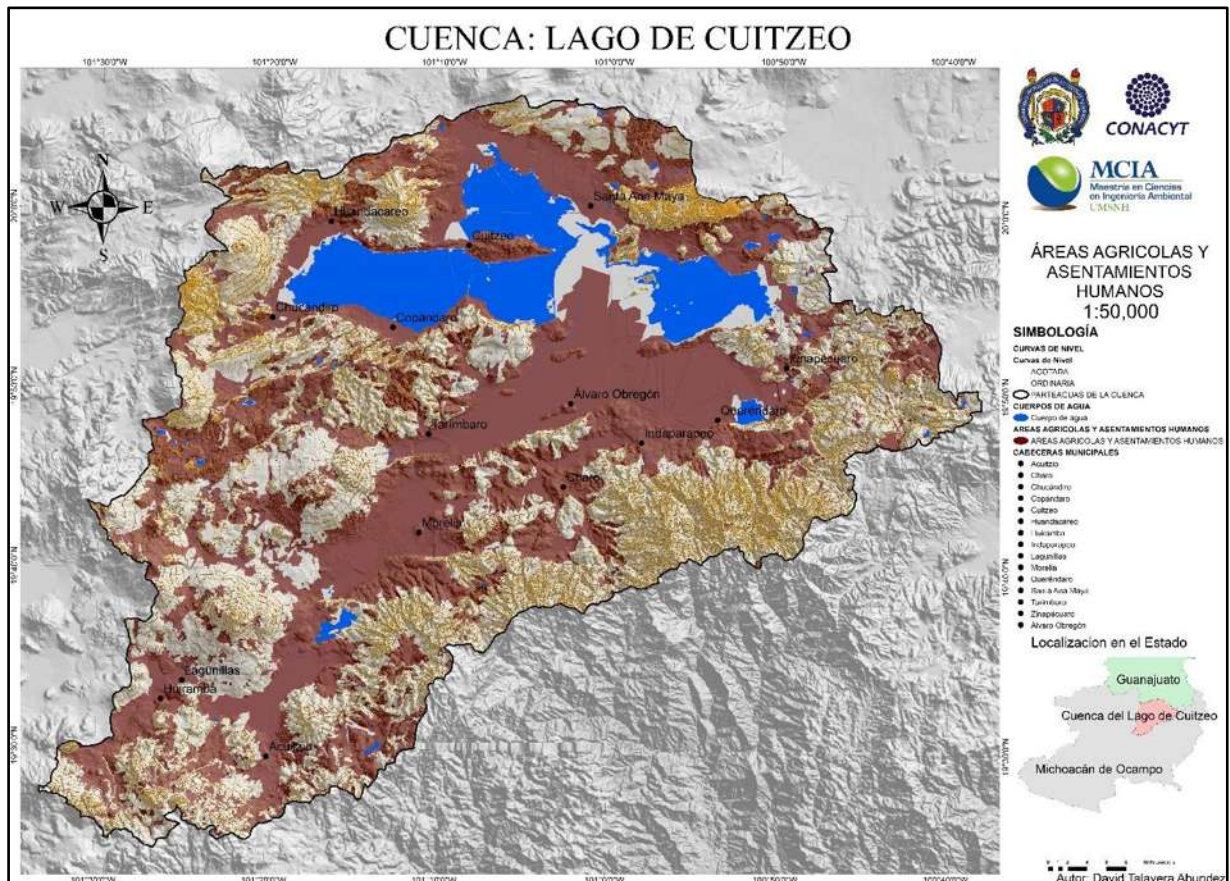


Figura 16. Áreas agrícolas y asentamientos humanos  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez





incluye montañas, mesetas, depresiones, planicies y valles distribuidas de manera irregular.

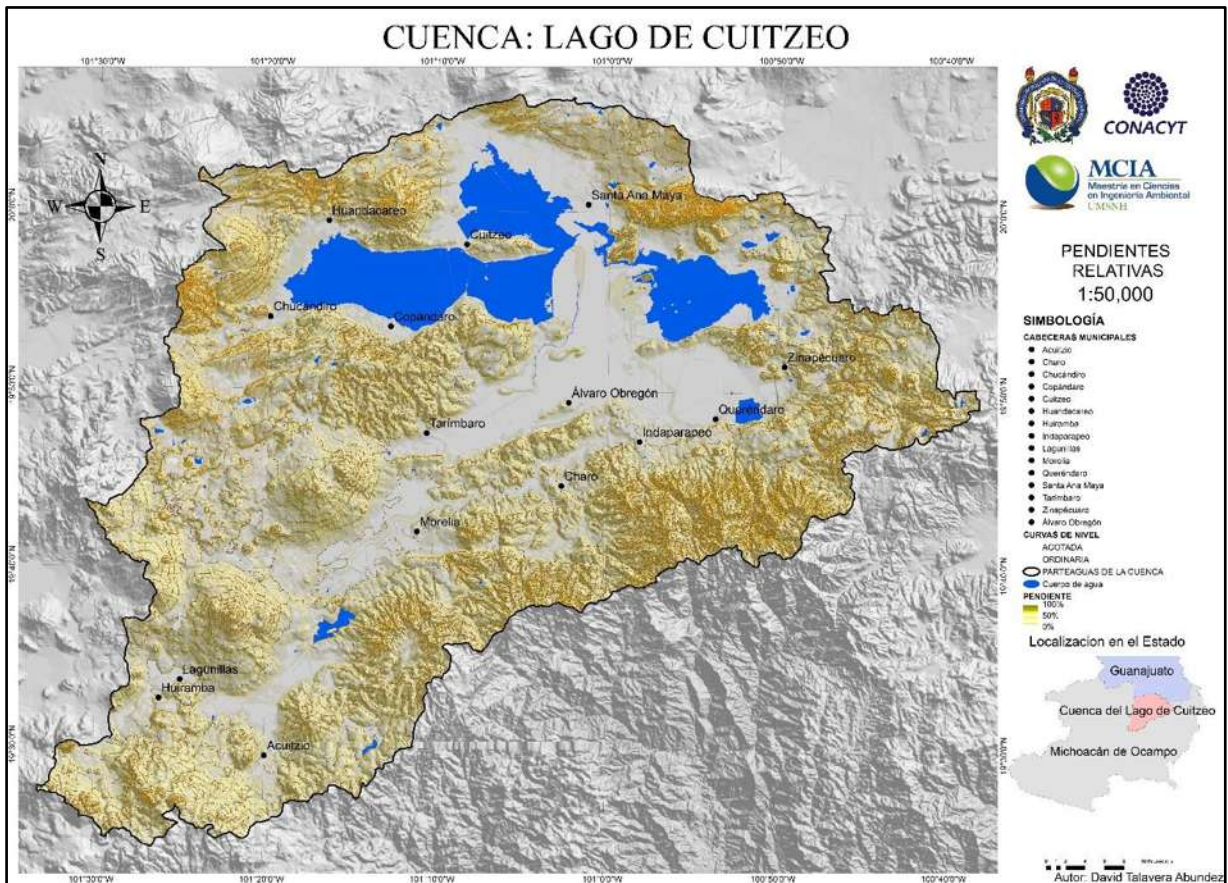


Figura 18. Pendientes relativas  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez



## 4.2. Análisis de cambio de uso de suelo

### 4.2.1. Imágenes utilizadas para la clasificación de coberturas

En este análisis, se trabajó con imágenes satelitales cuyos compuestos en color se muestran a continuación, los cuales se utilizaron para la clasificación de las coberturas (Figura 19).

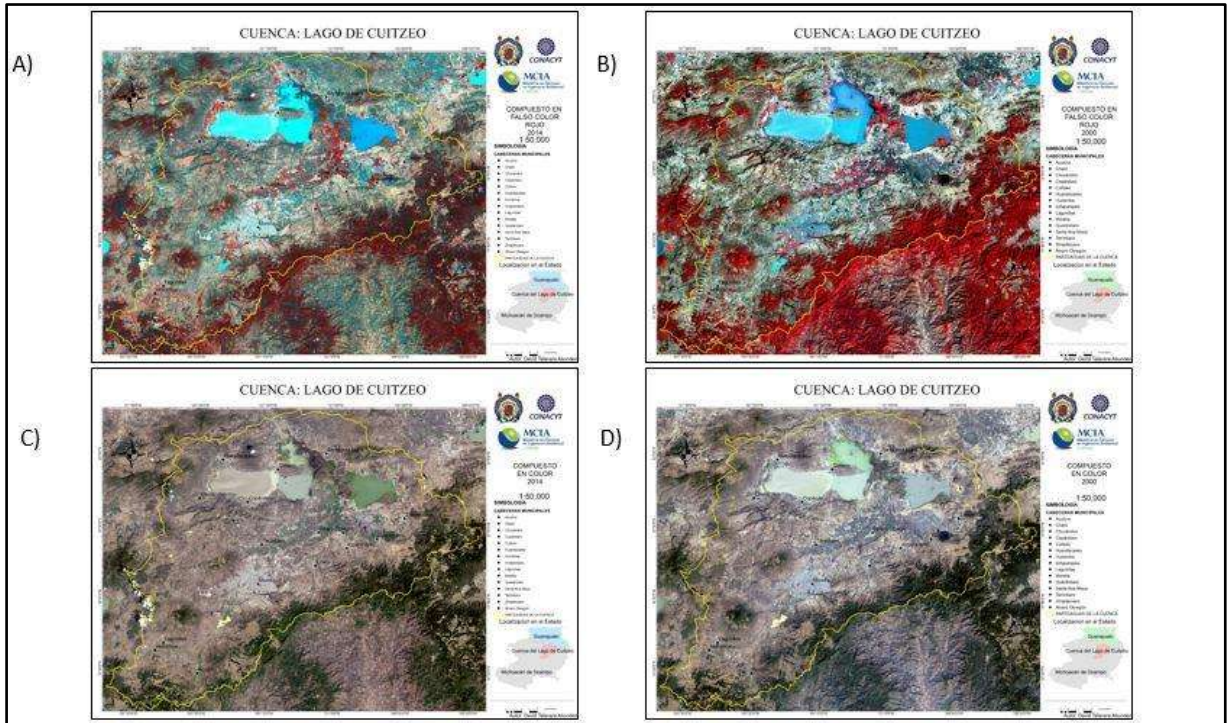


Figura 19. Compuestos en falso color rojo (A y B), y compuesto en color (C y D) del año 2014 y 2000.

Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez

### 4.2.2. Mapas de las coberturas y uso de suelo de la cuenca para los años 2000 y 2014

Dado que las coberturas y usos de suelo en la cuenca son tan variadas, se optó por definir las coberturas que englobaran todos los tipos de usos y coberturas vegetales, y que cumpliera con los objetivos del trabajo (Cuadro 6).

La clasificación de las coberturas y uso de suelo para el año 2000 (Figura 20), muestran en general que ya existía una gran extensión de las áreas agrícolas (160 831 ha), mientras que las áreas de asentamientos humanos solo ocupaban 13 235.2 ha.





Cuadro 8. Coberturas y extensión (ha) del año 2000

Id	Categoría	Área	
		(ha)	%
1	Agricultura	160 831	40.2
2	Asentamientos humanos	13 235	3.3
3	Bosque templado	82 358	20.6
4	Bosque seco	42 140	10.5
5	Cuerpo de agua	32 537	8.1
6	Desprovisto de vegetación	13	0.003
7	Pastizal	21 930	5.5
8	Vegetación acuática	6354	1.6
9	Banco de materiales	341	0.1
10	Vegetación secundaria	40 444	10.1
Total		400 183	

ID = Identificador categórico

La clasificación de áreas para el año 2014 (Figura 21) indica que el crecimiento de la mancha urbana es acelerado. Por otro lado, los pequeños asentamientos humanos rurales en la interpolación, mostró que decrece su población, sin embargo, la mancha de los asentamientos sigue aumentando en proporciones muy bajas. Las áreas cercanas a la ciudad de Morelia son las que están cambiando aceleradamente, de ser agricultura pasan a asentamientos humanos y que son también las zonas en donde se presenta una tasa de crecimiento de población más alta.

Para el año 2014 las coberturas predominantes no han sufrido grandes cambios porcentuales de cobertura, estas áreas siguen siendo la agricultura y los bosque templados, sin embargo los asentamientos humanos pasaron a cubrir de 3% a 5.6% del área total de la cuenca (Cuadro 9).

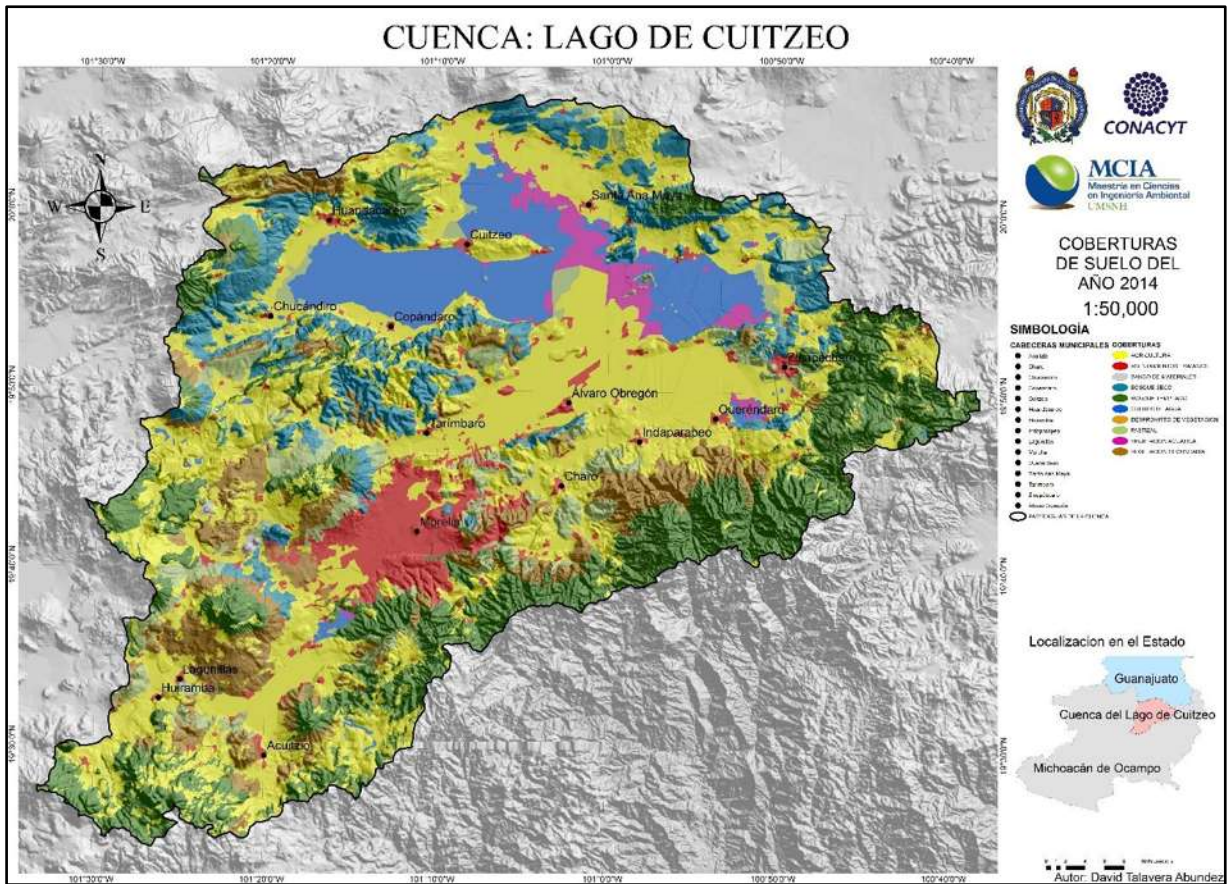


Figura 21. Coberturas de suelo del año 2014  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez

Cuadro 9. Coberturas de suelo y extensión (Ha) del año 2014

ID	Categoría	Área	
		(ha)	%
1	Agricultura	155 639	38.9
2	Asentamientos humanos	23 328	5.8
3	Bosque templado	78 191	19.5
4	Bosque seco	41 574	10.4
5	Cuerpo de agua	31 527	7.9
6	Desprovisto de vegetación	85	0.02
7	Pastizal	23 303	5.8
8	Vegetación acuática	7363	1.8
9	Banco de materiales	567	0.1
10	Vegetación secundaria	38 607	9.6
Total		400 183	

ID = Identificador categórico

#### 4.2.3. Cambios de cobertura del año 2000 a 2014

Las transiciones en la cuenca son muy variadas, es decir, pasaron de ser una cobertura a otra, que nada tiene que ver con la cobertura original, debido a que la cuenca tiene una alta influencia antrópica.

Se hizo un análisis de cambio para observar cuáles de las coberturas han perdido áreas y cuales han ganado. Se identifica que la agricultura, el bosque seco, el cuerpo de agua y la vegetación secundaria son coberturas que pierden área, mientras que las categorías restantes ganaron terreno, siendo los asentamientos humanos los que más cambiaron absorbiendo 10 092 ha en un periodo de 14 años (Cuadro 10).

Cuadro 10. Tabla de pérdidas y ganancias de las coberturas de la cuenca del Lago de Cuitzeo

ID	Categoría	Cobertura		Cambios	
		2000	2014		
		ha	ha	ha	
1	Agricultura	160 831	155 639	5191.7	p
2	Asentamientos humanos	13 235	23 328	10 092.4	g
3	Bosque templado	82 358	78 191	4167.3	p
4	Bosque seco	42 140	41 574	565.6	p
5	Cuerpo de agua	32 537	31 527	1010.2	p
6	Desprovisto de vegetación	13	85	71.4	g
7	Pastizal	21 930	23 303	1373.3	g
8	Vegetación acuática	6354	7363	1009.1	g
9	Banco de materiales	341	567	226.3	g
10	Vegetación secundaria	40 444	38 607	1837.6	p
TOTAL		400 183	400 183	25 544.9	

p = pérdida de terreno; g = ganancia de terreno

Los resultados obtenidos del análisis realizado en el SIG muestran que efectivamente las áreas urbanas son una de las coberturas que consumen más terreno, un poco más de 10 000 ha en un periodo de 14 años, en cambio, los bosques aunque en menor proporción, pierden terreno aunque presentan ligeras ganancias, debido a los programas de reforestación y algunas áreas agrícolas abandonadas y que ligeramente han recuperado su estado original.

Es importante mencionar que parte de los cambios presentes en los bosques templados y secos así como en las vegetaciones secundarias corresponden a corredores biológicos que se tenían entre estas coberturas y que ahora dejan aislados algunos manchones de éstas, siendo esto un factor para que especies animales dejen de estar comunicadas, y según la teoría insular se sabe que entre más pequeña sea el área desconectada de una zona determinada, menor será el número de individuos que sobrevivan en ese sistema (Pozo y Llorete, 2002).

Otro de los movimientos importantes son las áreas agrícolas que a pesar de ganar terreno han perdido cerca de 9000 ha. Aparentemente, los bosque secos pierden un poco más de lo que ganan, los pastizales a pesar de tener pérdidas de terreno han ganado un poco más de 2600 ha, los cuerpos de agua también pierden terreno mientras que la extracción de materiales para la construcción sigue aumentando dado que los bancos de materiales siguen ampliando su área de explotación al igual que las áreas sin vegetación, la vegetación secundaria a pesar de haber perdido más de 4900 ha ganó más de 3000 ha (Figura 22).

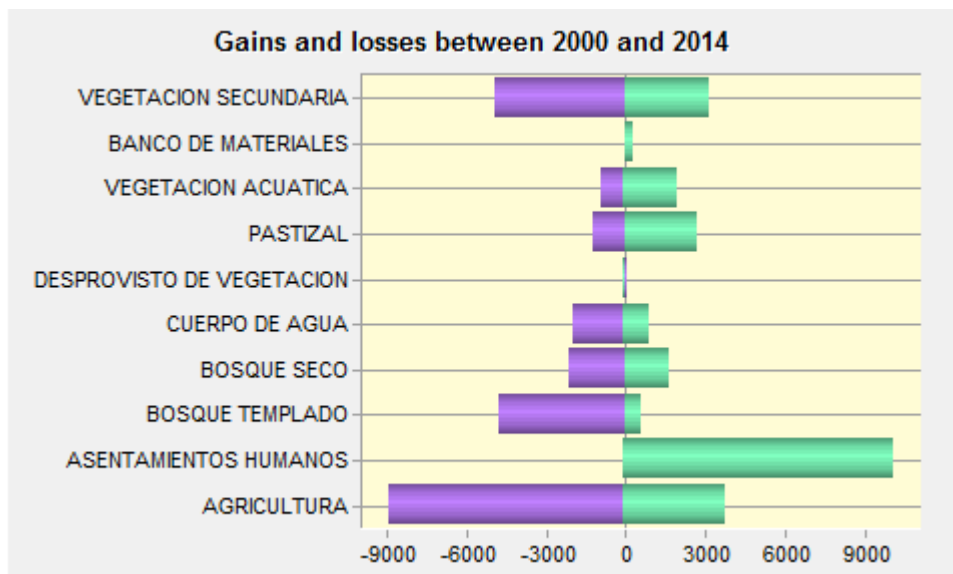


Figura 22. Grafica de pérdidas y ganancias de las coberturas de la cuenca del lago de Cuitzeo

Por otra parte, la comparación que se hizo entre las coberturas (Anexo 1), la cual proporciona una tabla de cruzamientos entre las dos fechas comparadas, mostró que

las principales transiciones de terreno con más de 1000 ha se presentan de agricultura a asentamientos humanos; de bosque templado a agricultura y vegetación secundaria; de vegetación secundaria a asentamientos humanos; a bosque seco y agricultura; y de cuerpos de agua a vegetación acuática que incluye a los humedales (que son sistemas muy dinámicos). Las transiciones restantes aunque en menor medida no dejan de ser significativas, la mayoría de ellas cediendo terreno a la agricultura, a los pastizales y a los asentamientos humanos (Figura 23).

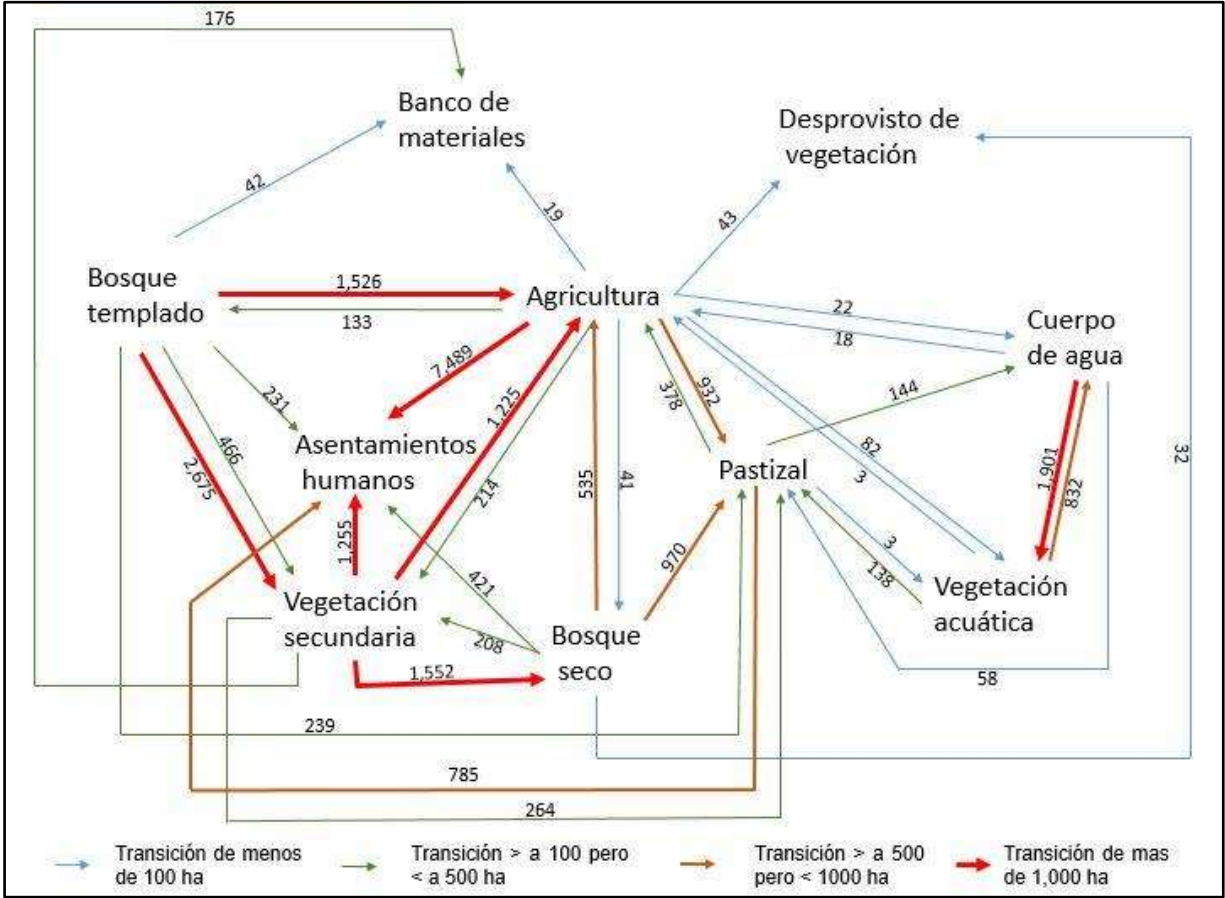


Figura 23. Transiciones de cobertura a partir del análisis de tablas cruzadas en ha Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez

4.2.4. Tasa de cambio de cobertura y uso de suelo

La tasa de cambio es un buen indicador de la magnitud y la dirección del cambio de cobertura, es por eso que se calculó para tener noción de lo que ocurre en la cuenca del lago de Cuitzeo. Este análisis mostró que la cobertura denominada como desprovisto de vegetación es la que tienen una tasa de cambio más alta con 14.2%

anual, esto debido a la pequeña cantidad que se observó en el año 2000 y la gran cantidad observada para el 2014. Después se encuentran los asentamientos humanos con una tasa de 4.1% anual, seguido de los banco de materiales, pastizal y vegetación acuática, todos ellos ganando terreno. La agricultura, bosque templado, bosque seco, cuerpo de agua y vegetación secundaria muestran una tasa negativa, lo cual indica que siguen cediendo territorio (Cuadro 11).

**Cuadro 11. Tasa de cambio de las coberturas de la cuenca del Lago de Cuitzeo**

ID	Categoría	Cobertura		Tasa de cambio anual
		2000	2014	%
		ha	ha	
1	Agricultura	160 831.0	155 639.3	-0.2
2	Asentamientos humanos	13 235.2	23 327.6	4.1
3	Bosque templado	82 358.2	78 190.9	-0.4
4	Bosque seco	42 139.7	41 574.1	-0.1
5	Cuerpo de agua	32 537.1	31 526.9	-0.2
6	Desprovisto de vegetación	13.1	84.5	14.2
7	Pastizal	21 929.9	23 303.1	0.4
8	Vegetación acuática	6353.6	7362.6	1.1
9	Banco de materiales	341.1	567.3	3.7
10	Vegetación secundaria	40 444.3	38 606.8	-0.3

#### **4.3. Pérdida de servicios ambientales por reducción del bosque templado**

Los servicios ambientales son de suma importancia para el bienestar y seguridad de las comunidades humanas, en la actualidad son fundamentales para la absorción y mitigación de muchos contaminantes que se emiten al mundo por parte de las actividades antropogénicas.

En este trabajo se estimó la pérdida de servicios ambientales de infiltración de agua y carbono capturado en las masas forestales perdidas.

##### **4.3.1. Carbono emitido por la pérdida forestal.**

El cálculo del CO<sub>2</sub> retenido mostró que la concentración de vegetación más sana se localiza en las zonas forestales y en algunos lugares de agricultura de temporal (Anexo 2).



Los resultados muestran que la concentración de CO<sub>2</sub> en algunos lugares es de más de 130 t ha<sup>-1</sup> (Figura 24).

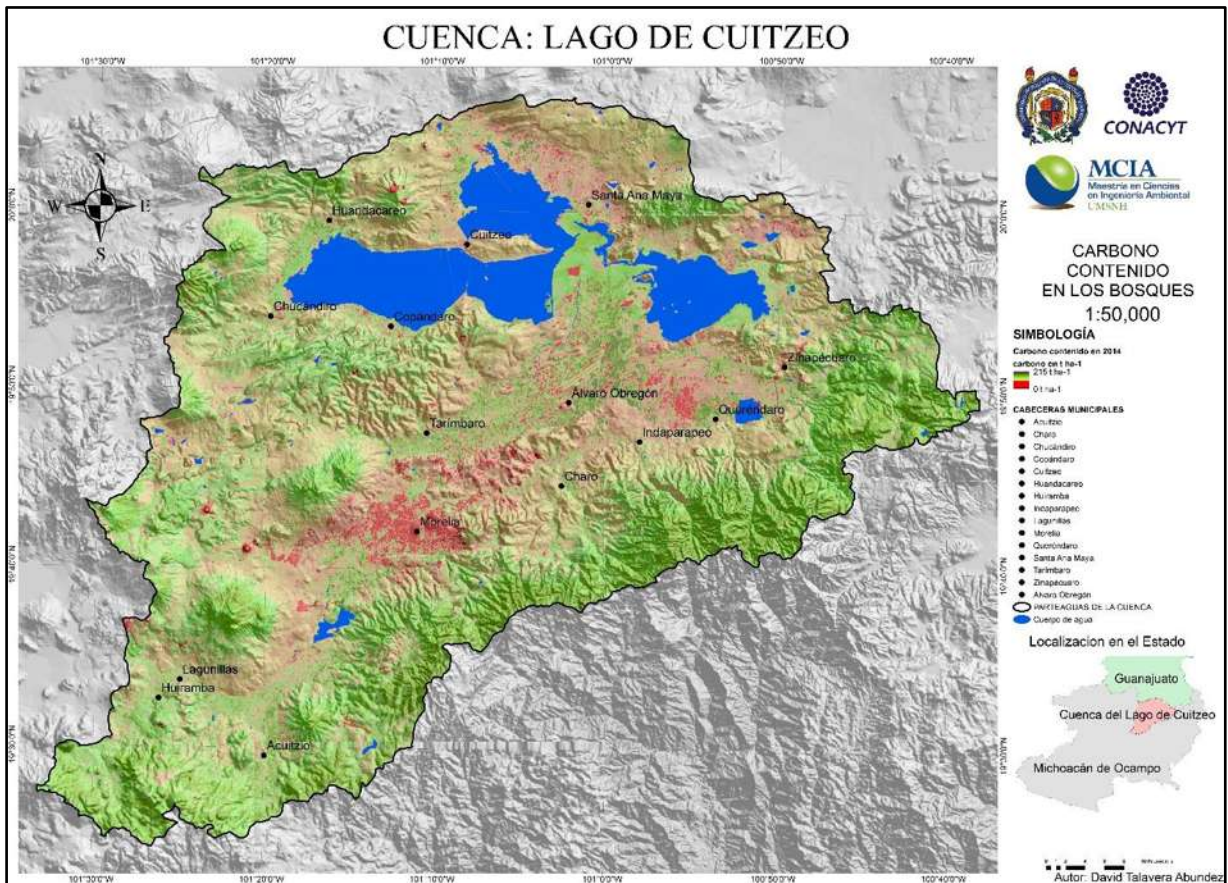


Figura 24. Concentración de CO<sub>2</sub> en t ha<sup>-1</sup>  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez

En la Figura 23 se observó que algunas áreas de cultivo tienen alta captura de CO<sub>2</sub>, esto es debido a que la ecuación utilizada (Pérez, 2015), no discrimina entre las zonas forestales y las agrícolas, a causa de que su comportamiento espectral es similar.

Dado que lo que interesaba en este análisis era calcular el potencial de CO<sub>2</sub> que se dejó de capturar por la pérdida de áreas forestales del año 2000 al 2014 y tomando en cuenta que el promedio resultante de la estadística zonal era de 40.58 t ha<sup>-1</sup> en las áreas de bosque templado, el resultado reveló que para el año 2000 el CO<sub>2</sub> que estaba capturado en el bosque, oscilaba alrededor 3 342 094.94 t y para el 2014 se redujo a 3 172 985.5 t, por lo que la diferencia de estas dos, revela que se liberaron al ambiente aproximadamente 169 109.44 ton de CO<sub>2</sub>, lo que representa una emisión de 12 079.2 t por año.

La cantidad de CO<sub>2</sub> perdido, equivale a la cantidad de 338 218.88 t de biomasa. Sabiendo que aproximadamente el CO<sub>2</sub> contenido en la masa forestal equivale 50% de la biomasa (FAO 2010), se pudo calcular el número de árboles con el promedio de biomasa que concentran las especies más grandes del bosque templado, cuya concentración promedio es de 0.076 t por árbol. Por lo que el número de individuos aproximadamente equivale a 4 440 339 árboles, con una densidad aproximada de 1065 árboles ha<sup>-1</sup>.

#### 4.3.2. Potencial de infiltración de agua en las áreas boscosas perdidas

La infiltración de agua es indispensable para el desarrollo de las comunidades, ya que esto representa la posible disponibilidad de agua que tengan en su entorno. Los resultados indican que con la pérdida de la masa forestal, potencialmente se habría perdido la infiltración de 48 962 119 m<sup>3</sup> de agua en un periodo de 14 años, aproximadamente un poco más de 3 millones de m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

Estos resultados muestran que las coberturas arbóreas o vegetales naturales y su conservación, son de suma importancia en los ecosistemas, ya que al dejar descubierto el suelo se pierde la posibilidad de infiltración de agua, aumenta el caudal o escurrimientos superficiales y se azolvan cuerpos de agua que estén aguas abajo, sin contar con un posible aumento en el riesgo de inundaciones (FAO, 2009).

#### 4.4. Asociación entre las variables y los cambios de cobertura y uso de suelo

Los resultados encontrados revelan que existe una asociación entre las variables que se escogieron y los cambios de cobertura suscitados. Las variables que más explican los cambios son las áreas agrícolas y asentamientos humanos, seguida de las pendientes, la densidad de población, las vías de comunicación primaria, secundaria y terciaria, así como las áreas naturales protegidas, con valores explicativos mayores de 0.2 con un valor de  $p < 0.005$ . Las otras variables muestran valores de asociación con los cambios cercanos a 0.15 valores aceptados para la creación de escenarios de cambio de cobertura y uso de suelo (Cuadro 12). La Variable que menos asociación mostró fue la de manantiales, aun cuando la hipótesis para agregarla al trabajo fue la necesidad de agua para la supervivencia humana, mostró que las transiciones de otras



coberturas a asentamientos humanos no son explicadas por esta variable (con un valor de asociación 0.0918), variable que se podría dejar fuera para la creación de escenarios de Seguridad ecológica, principal objetivo de este trabajo (Anexo 3).

Cuadro 12. Tabla de asociación de variables con los cambios de uso de suelo

Variable	V de Cramer
Áreas agrícolas y asentamientos humanos	0.3151
Pendiente	0.2539
Densidad de población	0.2341
Vías de comunicación secundarias y terciarias	0.2276
Áreas naturales protegidas	0.2062
Corrientes de agua perenes	0.1536
El grado de rezago social	0.1469
Vías de comunicación primarias	0.1452
La tasa de crecimiento poblacional	0.1402
Localidades	0.14
Manantiales	0.1185
V de Cramer = valor de asociación entre CCUS y variables	

## 5. CONCLUSIONES

Los cambios de cobertura presentes en la cuenca son evidentes sobre todo en torno a las áreas urbanas, ésta es una de las que presenta mayor tasa de cambio (>4% anual).

Los bosques en general son una fuente de servicios de suma importancia para el desarrollo humano y año tras año se reduce su cobertura. Se perdieron más 4000 ha en un periodo de 14 años, quedando aisladas algunas zonas de masa forestal susceptibles a plagas y enfermedades.

Los pastizales y bosque secos a pesar de que su cobertura se incrementó, son comunidades muy susceptibles a incendios, lo que puede ocasionar que se dejen al descubierto áreas de suelo que pueden sufrir erosión.

Se encontró una asociación entre las variables utilizadas en este trabajo con los cambios de cobertura registrados, por lo cual se considera que para evaluar la seguridad ecológica, es necesario incorporarlas.

La variable que muestra una mayor dinámica de cambio son los terrenos agrícolas. Por otro lado, la pendiente del terreno actúa como un factor de conservación de la cobertura en aquellas áreas con pendientes pronunciadas.

Los servicios ambientales en las zonas de bosque templado son de suma importancia, sobre todo para la ciudad de Morelia, debido a que en ellas se realiza captura de carbono y favorecen la infiltración del agua para mantenimiento de los mantos acuíferos. Este trabajo mostró una pérdida de más 1000 árboles por hectárea.

Entender la dinámica que existe entre los cambios de cobertura y las actividades humanas es de vital importancia para la sustentabilidad.

## 6. RECOMENDACIONES

La metodología empleada para el análisis de cambio de cobertura y uso de suelo mostró resultados prometedores, sin embargo, el uso de imágenes procedentes de sensores satelitales distintos dificulta la interpretación de las coberturas, debido a variaciones en la sensibilidad de los mismos. Sería ideal usar imágenes procedentes del mismo sensor, pero la disponibilidad de imágenes recientes está restringida al sensor OLI, el cual tiene características diferentes a las del sensor ETM de las imágenes más antiguas.

Es necesario encontrar otras variables que se asocien al cambio de uso de suelo, sin embargo, un problema importante es el que muchas de estas no se presentan en un contexto espacial o no existen.

Por otra parte, hace falta investigar sobre los servicios ambientales que otras coberturas de suelo proporcionan, por ejemplo, el matorral y el bosque seco.

## **CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD ECOLÓGICA EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO**

### **1. RESUMEN**

En este capítulo se hizo la modelación de la seguridad ecológica, bajo dos metodologías, una aplicando un análisis de asociación entre variables que propician el cambio de cobertura y uso de suelo y los cambios de cobertura de suelo que se manifestaron en un periodo de 14 años, la segunda metodológica aplicando la opinión de expertos y el proceso analítico jerárquico (AHP). Ambos modelos coinciden en que solo las partes altas de la cuenca alejadas de las localidades, vías de comunicación y con pendientes pronunciadas son las que se manifiestan como seguras, las demás áreas se observan altamente influenciadas hacia la perturbación por la infraestructura y las actividades humanas. De las variables que se utilizaron para la generación de los escenarios las que más peso o relevancia tiene son las áreas agrícolas y los asentamientos humanos, seguidas de las pendientes el rezago social y la densidad de población, estas son las que más propician la afectación de los ecosistemas, según los expertos y la correlación con los cambios.

Palabras clave: Seguridad ecológica, proceso analítico jerárquico, análisis multicriterio, cambio de cobertura y uso de suelo, opinión de expertos.

## 2. INTRODUCCIÓN

Cuando se generan modelos para la observación de múltiples variables en el medio siempre se presenta la interrogante ¿muestra en su totalidad lo que sucede en el entorno? Aunque en la actualidad se trabajan muchos modelos, no es necesariamente una actividad nueva, la generación de modelos se hace siempre en la vida diaria, para visualizar panoramas en los que el humano se verá involucrado. Como las actividades en los sistemas son sumamente complejas en el mundo real, es necesaria la construcción de modelos para simplificar las relaciones y poder así conceptualizarlas y entenderlas (Lugo y Morris G., 1982).

Para el trabajo que se realizó, el entendimiento de los cambios de cobertura y uso de suelo fue fundamental, así como la percepción que se tiene de algunas variables que propician el cambio, se generaron dos modelos de seguridad ecológica, uno en el que se analiza cómo la infraestructura y la dinámica social propician el cambio de cobertura. El otro escenario se generó con la percepción que se tiene de esas variables con el entorno y como se ven afectados o beneficiados los ecosistemas a través de la opinión de expertos.

Las variables que se utilizaron en ambos escenarios son las que a primera instancia se representan como vectores de perturbación en los ecosistemas, tales como las vías de comunicación, las cercanías a localidades, las pendientes y las actividades productivas (Flamenco, 2007).

Como se mencionó con anterioridad la seguridad ecológica es el estado o nivel de seguridad en el que se encuentra los ecosistemas ante la presencia de las actividades antropogénicas. En este trabajo se modelaron dos escenarios de la seguridad ecológica, en los que se observa que más del 40% de la superficie de la cuenca del Lago de Cuitzeo son áreas de alto subsidio, menos de 8% son áreas de alta y muy alta seguridad y que generalmente están en los lugares más apartados, alejados de la dinámica social y actividades productivas, en ambos escenarios la mayor parte del territorio tiene baja y muy baja seguridad, son áreas susceptibles a cambios de uso de suelo y en torno a las localidades susceptibles a incendios forestales, esto último debido tal vez a la delincuencia, a la quema y tira de residuos sólidos.

### 3. METODOLOGÍA

En la actualidad el deterioro de los recursos naturales, es visto como un problema que difícilmente se puede remediar. La ciencia muestra que es posible la recuperación de sistemas que se creían perdidos a través de diferentes métodos, la precepción remota y los sistemas de información geográfica ayudan a predecir donde y que factores son los que posiblemente causen los estragos, y por ende, frenando estos factores, recuperar una área perdida, sin embargo, en muchas ocasiones las políticas ambientales están muy lejos de seguir las recomendaciones de los investigadores.

En este capítulo, se plasman dos formas de evaluar la seguridad ecológica. Ambas integran factores estructurales tanto naturales como sociales (Figura 25), pero que se diferencian en la forma de ponderar la influencia de cada variable.

#### 3.1. Variables integradas a los modelos

Como se mencionó en el capítulo anterior, se buscó encontrar el nivel de asociación entre las variables, para poderlas integrar al modelo de seguridad ecológica, y se emplearon finalmente las siguientes variables (Cuadro 13).

Cuadro 13. Variables integradas al modelo

Id	Variable	S.C	Datum
1	Vías de comunicación primarias	UTM	WGS84
2	Vías de comunicación secundarias y terciarias	UTM	WGS84
3	Localidades	UTM	WGS84
4	Densidad de población	UTM	WGS84
5	La tasa de crecimiento poblacional	UTM	WGS84
6	El grado de rezago social	UTM	WGS84
7	Áreas agrícolas y asentamientos humanos	UTM	WGS84
8	Pendiente	UTM	WGS84
9	Áreas naturales protegidas	UTM	WGS84

Datum: Forma del elipsoide de referencia; S.C: sistema de coordenadas.

Se descartaron los manantiales y las corrientes de agua, ya que no tenían mucho sentido en la explicación del deterioro de los recursos, y en el caso de los manantiales

el nivel de asociación con los cambios que se presentaron no alcanzaba el umbral aceptado.

Para este trabajo se proyectaron dos escenarios de seguridad ecológica uno con base en la correlación que existe entre las variable planteadas con los cambios de cobertura y uso de suelo que se presentó en un periodo de 14 años; el segundo escenario se planteó a partir de la opinión de expertos con la finalidad de analizar si los juicios muestran la seguridad ecológica.

### **3.2. Escenario de seguridad ecológica basado en la asociación de cambios de cobertura con las variables**

#### 3.2.1 Determinación del peso de las variables a partir del valor de asociación (V de Cramer)

Con los resultados del capítulo anterior, sobre el nivel de asociación que se encontró (cuadro 12), se calculó el peso relativo de cada variable para ingresarlo al análisis multicriterio, esto se calculó con una ecuación que se formuló (Ecuación 13):

$$Pr = \frac{(x)}{\sum_{x=n}^x(x)} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

Pr = peso

x = valor de asociación entre las variables y los cambios

#### 3.2.2 Normalización de las variables y reglas de decisión

##### 3.2.2.1 Normalización de las variables

Dado que el sistema para hacer el análisis multicriterio, necesita que se estandaricen las variables se hizo una transformación de éstas. En este capítulo las variables se transformaron a una escala con valores de 0 a 255 con un SIG para poder ser trabajados. La estandarización de las variables permite definir el punto de inflexión para que el análisis multicriterio resuelva a partir de qué valor, la variable pierde influencia en la decisión o comienza a tomar importancia para la decisión de la aptitud,

esto es importante porque las variables están en diferentes unidades y la escala byte permite ponerlas en el mismo plano de comparación.

#### 3.2.2.2. Reglas de decisión.

Las reglas de decisión en SIG son utilizadas para definir la aptitud que permita el establecimiento de áreas óptimas para algún uso de suelo o aprovechamiento, mediante el uso de puntos de inflexión (Cuadro 14).

Los puntos de inflexión y función de pertenencia se definieron para cada variable, lo cual se determinó a partir de las medias de una regresión logística, realizada para observar la correlación entre todas las variables y los cambios de cobertura analizados. Y se utilizó una prueba ROC para verificar la confiabilidad de la correlación entre las variables y los cambios de cobertura.



Cuadro 14. Función aplicada a las variables o criterios para la evaluación y estandarización

Nombre de la Variable	Tipo	Regla de decisión	Tipo función*
Distancia a vías de comunicación primarias	Continua	Después de los 1000 m de distancia de las vías, la seguridad ecológica comienza a mejorar.	Sigmoidal creciente
Distancia a vías de comunicación secundarias y terciarias	Continua	Después de 600 m de distancia de este criterio o variable la seguridad aumenta	Sigmoidal creciente
Distancia a localidades	Continua	Después de 1500 m de distancia de este criterio la seguridad comienza a aumentar	Sigmoidal creciente
Densidad de población	Continua	Por arriba de 0,24 habitantes por kilómetro cuadrado la seguridad disminuye	Sigmoidal decreciente
Tasa de crecimiento poblacional	Continua	A medida que aumenta la TCP la seguridad ecológica disminuye. Después de 0.24 % la seguridad baja	Sigmoidal decreciente
Rezago social	Continua	A partir de 0.27 en la seguridad comienza a aumentar.	Sigmoidal creciente
Distancia a áreas agrícolas y asentamientos humanos	Continua	Después de 400 m de distancia de la variable la seguridad aumenta	Sigmoidal creciente
Pendiente relativa del terreno	Continua	Las áreas que sobrepasan el 15% de pendiente tienen mejor seguridad ecológica	Sigmoidal creciente
Distancia a áreas naturales protegidas	Continua	Estas áreas mantienen seguridad ecológica hasta los 18 200 m	Sigmoidal decreciente
Áreas agrícolas	Booleano		Restricción
Asentamientos humanos	Booleano	Área excluida de la evaluación	Restricción
Cuerpos de agua	Booleano		Restricción

Tipo de función: función para estandarizar y generar el mapa de aptitud

### 3.2.3. Evaluación multicriterio

En este análisis se utilizó el módulo MCE del SIG Idrisi Selva, con la combinación lineal ponderada (WLC). Los criterios continuos (factores o variables), que se estandarizaron previamente, fueron combinados y multiplicados por las restricciones establecidas. La ecuación que se muestra a continuación muestra el procedimiento seguido (Ecuación 14).

$$SE = (\sum_n^1 V) * (\prod_n^1 R) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

SE = Seguridad ecológica

V = Variables

w= Peso de las variables

R = Restricciones

### 3.2.4. Clasificación de la seguridad ecológica

Para clasificar el mapa de seguridad ecológica se utilizó un SIG y el método de rompimientos naturales de Jenks (Anexo 4), el cual permitió encontrar los puntos de separación entre las cinco clases en que fue clasificada la seguridad ecológica. Las cinco clases se muestran en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Clasificación de la seguridad ecológica, primer escenario

Id	Clase	Umbral
1	Muy baja seguridad	0 – 91
2	Baja seguridad	91 – 105
3	Seguridad media	105 – 116
4	Alta seguridad	116 – 135
5	Muy alta seguridad	153 – 190

### 3.3. Escenario de seguridad ecológica con opinión de expertos

Para este escenario se utilizaron las mismas variables y restricciones que se aplicaron al primero (Cuadro 14).

#### 3.3.1. Priorización de variables y juicio comparativo

El conocimiento de los expertos se incorporó mediante una matriz (Anexo 5), en la cual los juicios comparativos fueron valorados de acuerdo a la escala numérica propuesta por (Saaty, 1980) (Cuadro 1). A partir de ésta se obtuvieron los pesos de cada variable mediante el módulo Weight del SIG, el cual a través de operaciones matriciales, evalúa el eigenvector que representa el conjunto de valores de ponderación. Además, se calculó la razón de consistencia (Zavaleta *et al.*) (Ecuación 16), la cual nos da una medida de la congruencia en los juicios comparativos emitidos por los expertos en la etapa anterior del proceso. Saaty (1980), establece que  $CR \leq 10\%$  es aceptable.

#### 3.3.2. Evaluación Multicriterio (síntesis de prioridades)

Como en el escenario anterior para la combinación de los criterios o variables se trabajó con el MCE, solo que para este caso se incorporaron los pesos o eigenvectores obtenidos del AHP y la opinión de expertos, lógicamente para este escenario también se aplicaron las tres restricciones anteriores (Ecuación 14).

#### 3.2.3. Clasificación del escenario de seguridad ecológica de la opinión de expertos

Se realizó de la misma forma en que se clasificó el escenario anterior, la diferencia se presenta solo en los valores de los umbrales (Cuadro 17) (Anexo 6).

Cuadro 16. Clasificación del escenario de seguridad ecológica a partir de la opinión de expertos

Id	Clase	Umbral
1	Muy baja seguridad	0 - 98
2	Baja seguridad	98 – 121
3	Seguridad media	121 – 1134
4	Alta seguridad	134 – 150
5	Muy alta seguridad	150 - 200

### 3.2.4 Evaluación de campo

Finalmente, se hicieron dos recorridos por el área de estudio para corroborar que las coberturas definidas en el capítulo 1 fueran correctas. Con los datos obtenidos en campo se construyeron matrices de confusión para cada escenario, y se aplicó la prueba ROC (Receiver Operating Characteristic), para evaluar la precisión de la interpretación que se hizo de las coberturas a partir de las imágenes satelitales.

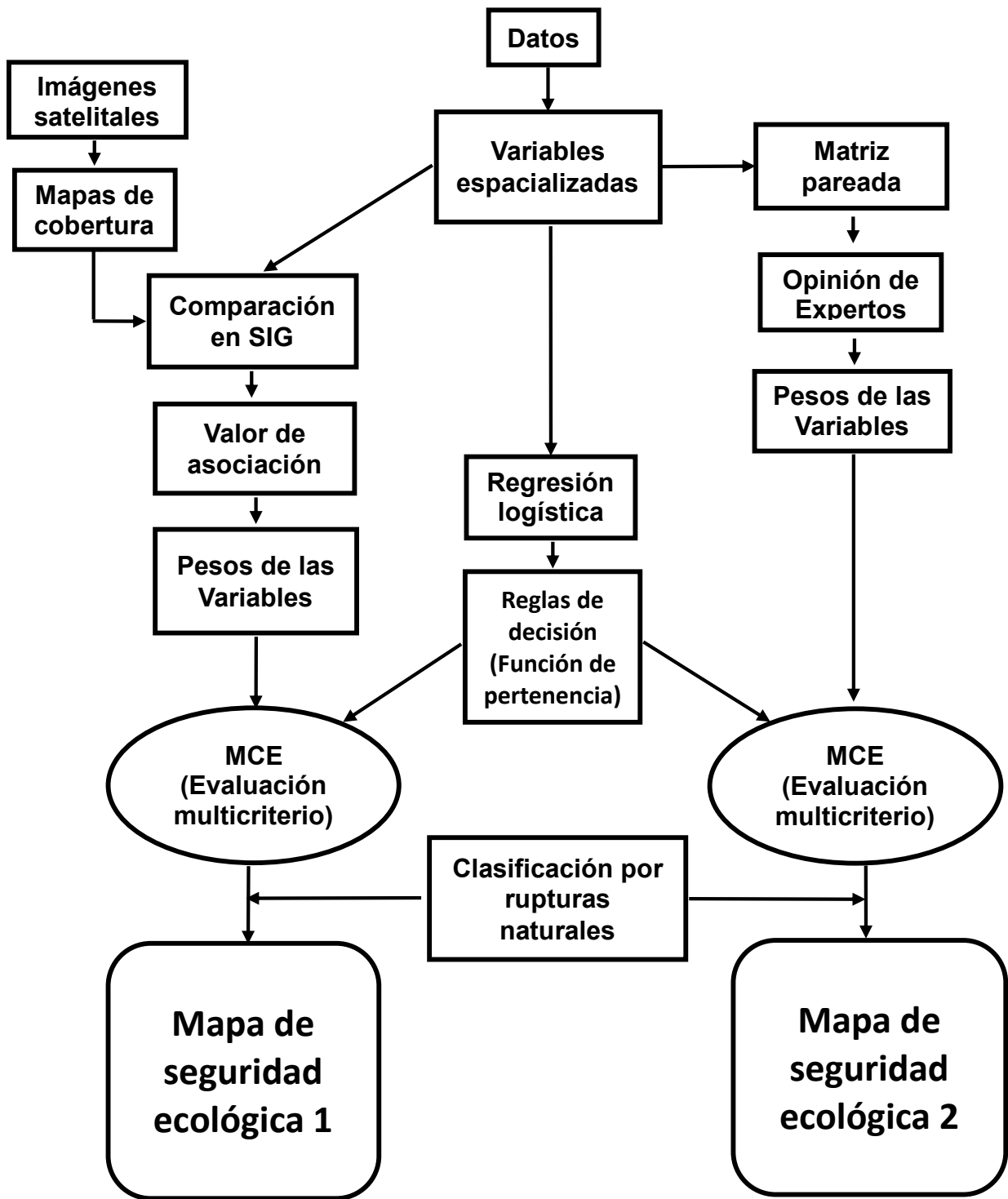


Figura 25. Esquema metodológico de la seguridad ecológica

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Escenario de seguridad ecológica basado en la asociación de cambios de cobertura con las variables

El resultado de la correlación entre CCUS y las variables se muestra en el cuadro 17. Destaca que las áreas agrícolas y los asentamientos humanos presentan el valor más alto de asociación lo cual puede deberse a que estos usos son los que más dinámica de cambio presentan, seguido por la pendientes, lo cual puede deberse a que las pendientes ligeras son predominantes en el área de estudio y finalmente el resto de las variables también con valores cercanos bajos pero aceptables. En cuanto a los pesos que se calcularon, se refleja el mismo sentido del valor de asociación, es decir, las variables con más asociación también son las que tienen más peso.

Cuadro 17. Valor de asociación y peso de las variables

Variable	V de Cramer	Peso
Áreas agrícolas y asentamientos humanos	0.32	0.174
Pendiente	0.25	0.140
Densidad de población	0.23	0.129
Vías de comunicación secundarias y terciarias	0.23	0.126
Áreas naturales protegidas	0.21	0.114
Grado de rezago social	0.15	0.081
Vías de comunicación primarias	0.15	0.080
Tasa de crecimiento poblacional	0.14	0.077
Localidades	0.14	0.077

La regresión logística mostró que existe correlación entre los cambios de cobertura y uso de suelo, la prueba ROC mostró 0.72 de asociación entre las variables y los cambios de cobertura y uso de suelo. Es evidente que la degradación de los recursos, según las medias de la regresión logística se encuentra en diferentes dimensiones, siendo la distancia a áreas agrícolas y vías de comunicación las que más explican la perturbación.

EL mapa arrojado por el análisis multicriterio mostró que las áreas con mejor seguridad ecológica, son algunas zonas montañosas, mientras que en las cercanías a los poblados la seguridad ecológica es baja.

El mapa reclasificado permite observar en qué nivel de seguridad ecológica se encuentra cada área (Figura 26). En la cuenca, en general se presenta un nivel bajo de seguridad ecológica, el cual puede explicarse porque el uso que se está dando al territorio no siempre coincide con la vocación del mismo.

Por ejemplo el establecimiento de cultivos en áreas forestales (Figura 27) y la susceptibilidad a incendios asociados a la cercanía a las áreas urbanas, los cuales pueden ser ocasionados por vandalismo ocasional o por intentos deliberados para forzar un cambio de uso de suelo con fines de lucro o de especulación de la tierra.

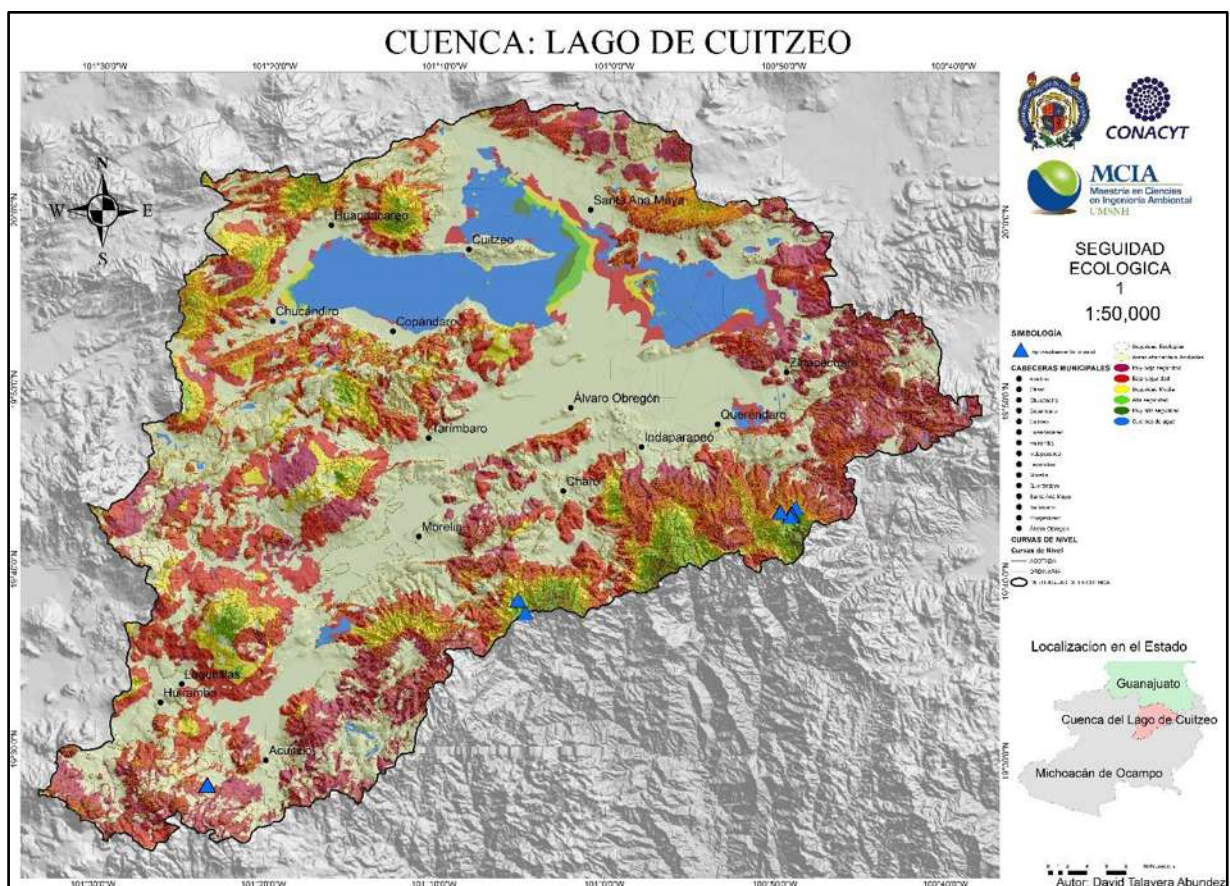


Figura 26. Primer escenario de seguridad ecológica  
Fuente: Elaborado por David Talavera Abundez



Figura 27. Localidad Las tablas municipio de Huiramba  
Fuente: Juan Manuel Ortega

Los sistemas altamente subsidiados, como los asentamientos humanos y la agricultura, ocupan el 44.7% de la cuenca, un estimado de más de 178 967 ha. Las áreas que tienen muy baja y baja seguridad ecológica ocupan el 16% y 18% respectivamente, las áreas que tienen seguridad media ocupan un poco más del 8% y las áreas con alta y muy alta seguridad no sobrepasan el 4% de cobertura (Cuadro 19).



Como se puede observar no se tomaron en cuenta los cuerpos de agua para el análisis de seguridad ya que estos están gobernados por otros factores.

Cuadro 18. Área de cada nivel de seguridad ecológica

Id	Grado de seguridad	ha	%
1	Áreas altamente subsidiadas	178 968	44.7
2	Muy baja	65 013	16.2
3	Baja	75 442	18.9
4	Media	33 682	8.4
5	Alta	12 113	3.0
6	Muy alta	3 439	0.9
7	Cuerpo de agua	31 527	7.9

#### 4.2. Escenario de seguridad ecológica con opinión de expertos

El resultado del proceso analítico jerárquico (AHP) mostro que los expertos asignan más importancia al grado de rezago social, seguido de las áreas agrícolas y asentamientos humanos, tasa de crecimiento y densidad de población, las demás variables tiene valores cercanos entre sí (Cuadro 20).

Cuadro 19. Peso de las variables

Variable	Peso
Grado de rezago social	0.18702
Aras agrícolas y asentamientos humanos	0.13868
Tasa de crecimiento poblacional	0.12510
Densidad de población	0.12008
Distancia a localidades	0.10732
Pendientes	0.10174
Vías de comunicación secundarias y terciarias	0.08614
Áreas naturales protegidas	0.08042
Vías de comunicación primarias	0.05344

La evaluación multicriterio mostró que las áreas con mayor seguridad ecológica, son las partes altas de la cuenca, lo que coincide con el escenario anterior, sin embargo, se observan discrepancias en algunas otras áreas, por ejemplo en la zona este de la cuenca cerca del municipio de Zinapécuaro donde se presentan áreas con muy baja seguridad para el escenario anterior, y para este, se observa niveles medios de seguridad.



Para este escenario se observa que muchas de las áreas que en el otro modelo se ven como de baja seguridad, cambian aun siendo de seguridad intermedia.

Cuadro 20. Área de cada nivel de seguridad ecológica

Id	Grado de seguridad	ha	%
1	Áreas altamente subsidiadas	178 968	44.7
2	Muy baja	51 824	13.0
3	Baja	20 762	5.2
4	Media	84 687	21.2
5	Alta	26 657	6.7
6	Muy alta	5759	1.4
7	Cuerpo de agua	31 527	7.9

Ambos escenarios muestran que las áreas con alta seguridad se encuentra en las partes altas de la cuenca, a pesar de que el peso de las variables es distinto, pero las áreas con alta seguridad están apartadas de localidades y vías de comunicación y tienen pendientes pronunciadas, es por esto que en ambos modelos estas áreas son consistentes.

Es importante mencionar que en algunas zonas de la cuenca, sobre todo al sur de los municipios de Acuitzio, Lagunillas, Huiramba, en Atécuaro y Umécuaro se observa que la seguridad ecológica es baja y muy baja en ambos escenarios, a pesar de que aún existen áreas conservadas, esto puede deberse a que las variables que se utilizaron y sobre todo aquellas que tienen más peso se combina en estos lugares, y muestran que estas áreas por mas conservadas que se encuentren son susceptibles al cambio de cobertura de uso de suelo.

Se observa también que las zonas aledañas a la ciudad de Morelia tienen baja y muy baja seguridad, sobre todo al oeste en la Salida a Quiroga y atrás del estadio donde en los últimos años el crecimiento de los asentamientos informales aumenta.

### **4.3 Evaluación de campo**

Como resultado del trabajo de verificación en campo, se obtuvo que el 95% de los sitios seleccionados fue clasificado correctamente. La prueba ROC mostró un nivel de confiabilidad en la clasificación del 97%.

El resultado de la matriz de confusión para cada escenario mostró que el primer escenario tiene un 82% de confiabilidad, mientras que el escenario generado a partir de la opinión de expertos solo alcanza el 78%.

A pesar de que existe discrepancia en los escenarios, estos muestran el estado de los ecosistemas, se observó que la mayoría de las condiciones de los ecosistema en cuanto a la estabilidad de la cobertura son congruentes con los escenarios, salvo un caso, en donde un sitio fue clasificado con muy baja seguridad y en campo se observó que tenía buenas condiciones, aunque en los alrededores se observó deforestación asociada a la introducción de cultivo de aguacate (Figura 29).



Figura 29. Municipio de Umécuaro  
Fuente: Juan Manuel Ortega

Nota: Se integra un CD con todos los mapas en forma de imagen jpg y anexos para la revisión detallada en un visor de imágenes, así como de las fotografías de los sitios visitados para la validación de escenarios y coberturas.

## 5. CONCLUSIONES

Los modelos en los que se busca encontrar la situación ecológica de algún territorio siempre brindan la oportunidad de tomar decisiones justificadas al momento de encaminar acciones de conservación.

Se comprobó que se puede zonificar la cuenca con base en la seguridad ecológica. Se observó que existen diferentes niveles de seguridad ecológica.

Las superficies con el nivel más bajo de seguridad se presenta en el escenario que parte de la correlación entre los cambios de cobertura y variables que propician el cambio. Se observó que las áreas con alta y muy alta seguridad solo cubren un poco menos del 4% de la superficie de la cuenca, las áreas con baja y muy baja seguridad ecológica superan el 35% del área de la cuenca, siendo este el escenario más pesimista.

El modelo de seguridad ecológica que involucró la opinión de expertos es un poco más optimista, mostro una cobertura de alta y muy alta seguridad de más del 8% y las áreas con baja y muy baja seguridad solo cubren el 15%, además de que el nivel intermedio de seguridad es el que cubre más terreno.

La seguridad ecológica es una situación que se puede percibir de manera intuitiva al observar el entorno, por ejemplo, en áreas conservadas que sufren alguna catástrofe o modificación antropogénica, como las áreas de bosque templado y matorral en donde se han establecido huertos de aguacate.

Las metodologías aplicadas en este trabajo mostraron ser coherentes en sus resultados, debido, a que ambas fueron consistentes con las condiciones observadas en la verificación de campo.

Para ambos modelos, las áreas naturales protegidas están dentro de zonas de muy baja y baja seguridad ecológica, esto se puede deber a que muchas de estas fueron decretadas hace 80 años y la ausencia de estrategias y políticas de conservación, las ha llevado a un estado de degradación consistente con los resultados de este trabajo.

Ambas metodologías son buenas, sin embargo, estas son perfectibles, pero, se debe ser minucioso al momento de elegir las variables a utilizar en los modelos, ya que las áreas delimitadas naturalmente como las cuencas tienen sus propios factores que propician la perturbación.

Los escenarios de seguridad no son mutuamente excluyentes, sin embargo, en el que se utilizó el conocimiento experto, uno de los posibles problemas, es el reunir un panel de expertos, mientras que la desventaja de partir de la evaluación de los cambios de cobertura, radica en el tiempo que toma generar la información necesaria.

Uno de los principales problemas en este tipo de trabajos, es la carencia de información espacializada, particularmente en lo referente a aspectos sociales y demográficos, sin embargo, estos factores son de suma importancia ya que dependerá de los habitantes y su cultura la conservación de su entorno.

## 6. RECOMENDACIONES

Ya que las metodologías en las que se modela la realidad siempre son perfectibles, se debe ser minucioso en la elección de las variables que se someterán a comparación, sobre todo en lo correspondiente a información económico-social.

Se deben de considerar variables de respuesta, es decir, aquellas áreas en donde se esté aplicando un proyecto de restauración, tales como áreas de conservación o reforestación.

Para este análisis se utilizaron interpolaciones para la espacialización de las variables sociales, cuyos resultados mostraron satisfactoriamente la situación de la cuenca, sin embargo, debe de buscarse algún otro método para espacializar información y que permita el análisis detallado de unidad estudiada.

La seguridad ecológica es un concepto que se puede analizar a diferentes escalas, pero siempre las unidades ecológicas delimitadas naturalmente, como las cuencas, brindan la oportunidad de ser más coherente en el momento de elección de las variables.



## LITERATURA CITADA

AGER I. 2014. Sistemas de información geográfica. URL: <http://www.ager.es/productos/gis/sig.pdf>.

Alphonse, B. C. 1996. Application of the Analytic Hierarchy Process in Agriculture in Developing Countries. Elsevier Science. 0308-521X/97 **53**:97-112

Bosque S., J. 2014. SIG y evaluación multicriterio. URL: <http://geogra.uah.es/joaquin/ppt/Evaluacion-multicriterio.pdf>.

Cabrera G., A., L. E. Medina O., M. Alcalá D.J., J. F. Sánchez E, y J. M. Ayala G. 2010. Características físicas, suelos. Pages 44-47 in U. M. d. S. N. d. Hidalgo, editor. Atlas de la cuenca del Lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental en Suelos.

CEPES. 2014. Marco conceptual: Cuenca hidrográfica. Centro peruano de estudios sociales, URL: [http://www.cepes.org.pe/pdf/OCR/Partidos/metodologia\\_planes\\_maestros/metodologia\\_planes\\_maestros1.pdf](http://www.cepes.org.pe/pdf/OCR/Partidos/metodologia_planes_maestros/metodologia_planes_maestros1.pdf).

CONABIO (Comisión Nacional de la Biodiversidad). 2015. Portal de geoinformación. URL: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.

CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2015. Índice de marginación por entidad federativa, 1990-2010. URL: <http://catalogo.datos.gob.mx/dataset/indice-de-marginacion-por-entidad-federativa-1990-2010>.

CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social). 2015. Índice de rezago social 2010 a nivel municipal y por localidad. URL: <http://www.coneval.gob.mx/Medicion/IRS/Paginas/%C3%8Dndice-de-Rezago-social-2010.aspx>.

Challenger, A. 2009. Introducción a los servicios ambientales. URL: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/con\\_eco/2009\\_sem\\_ser\\_amb\\_pres\\_01\\_achallenger.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/con_eco/2009_sem_ser_amb_pres_01_achallenger.pdf).

Dávila M., F. J. . 2014. Introducción a los sistemas de información geográfica. URL: [http://www.sge.org/fileadmin/contenidos/archivos/ibercarto/actividades/primer\\_reunion\\_sevilla/sig2.pdf](http://www.sge.org/fileadmin/contenidos/archivos/ibercarto/actividades/primer_reunion_sevilla/sig2.pdf).

Eastman J., R. 2012. Idrisi selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Clark University. URL: <https://clarklabs.org/downloads/spanish-manual/>.

Fagandini, F., y A. Villanueva. 2012. Los SIG y la economía ambiental, herramientas para la toma de decisiones territoriales. Caso de estudio fundo el Carmen, comuna de Quilpué, Chile. 0718 - 9877 URL: [http://www.rgv.ucv.cl/articulos/Articulo45\\_2.pdf](http://www.rgv.ucv.cl/articulos/Articulo45_2.pdf).

FAO. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 Informe principal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. URL: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>.

- FAO. 2014a. Indicador presión estado respuesta. URL: <http://www.fao.org/ag/againfo/programmes/es/lead/toolbox/Refer/PrStResp.htm#>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2009. Los bosques y el agua. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. URL: <http://www.fao.org/3/a-i0410s.pdf>.
- FAO. 2014b. Marco de Referencia e Indicadores Medioambientales de Presión - Estado - Respuesta. URL: <http://www.fao.org/ag/againfo/programmes/es/lead/toolbox/Refer/EnvIndi.htm#>.
- FCEA (Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas). 2005. Análisis multicriterio en la toma de decisiones. URL: <http://www.ccee.edu.uy/ensenian/catmetad/material/MdA-Scoring-AHP.pdf>.
- Flamenco S., A. F. 2007. Dinámica y escenarios de sobre los procesos de cambio de cobertura y uso del terreno en el sureste de México: El caso de la selva el Ocote, Chiapas. Universidad Nacional Autónoma de México, MÉXICO.
- Flamenco S., A. F., M. Martínez R., y O. Raúl M. 2007. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Science Direct*. 0006-3207 **138**:131 - 145
- Gamboa T., J. M. 2014. La "seguridad ecológica", instrumento efectivo para el bienestar y justicia social en México. **Volumen 4** URL: <http://biblio.juridicas.unam.mx/libros/4/1610/39.pdf>.
- Guangming, Y., Z. Shu, Y. Qiwu, F. Yong, Z. Qun, W. Lei, Z. RuiRui, N. Na, y Z. Pengjie. 2013. Assessing ecological security at the watershed scale based on RS/GIS: a case study from the Hanjiang River Basin. Springer-Verlag. 00477-013-0750-x
- INEGI. 2015. RECURSOS NATURALES. URL: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuarios/Default.aspx>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2016. Unidades y subunidades de suelo. México URL: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf>.
- Lugo A., E., y L. Morris G. 1982. Los sistemas ecológicos y la humanidad, Washington D.C.
- Manzanilla Q., U. 2016. Reconstrucción dendrocronológica de temperatura media y precipitación del Eje Neovolcánico Transmexicano. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
- Martínez, J., y A. Díaz. 2005. Percepción remota "fundamentos de teledetección espacial". URL: <http://sig.a.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledeteccion%20de%20espacial.PDF>.
- Martínez M., J., y P. Díaz, A. 2005. Percepción remota "fundamentos de teledetección espacial" Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). URL:

<http://siga.conagua.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>.

Mas, J. F., A. Velázquez, y S. Couturier. 2009a. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 1405-2849 1 23-39 URL: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/604/evaluacion.pdf>.

Mas J., F., A. Velázquez, y S. Couturier. 2009b. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. URL: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/604/evaluacion.pdf>.

Medina O., L. E., y A. Cabrera G. 2011. Revisión del mapa de suelos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo Michoacán, México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Laboratorio de Edafología de la Facultad de Biología, UMSNH. URL: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/2011\\_cnch2\\_cartel\\_lmedina1.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/2011_cnch2_cartel_lmedina1.pdf).

Morales, O., y R. Cooke, M. 2008. Introducción al modelo clásico de juicio estructurado de expertos: breve recuento del pasado y una aplicación reciente. Espacio del divulgador. URL: <http://ergosum.uaemex.mx/PDF%2016-3/13%20Oswaldo%20Napoles.pdf>.

Olaya, V. . 2011. Sistemas de Información Geográfica. Copyright. 1 URL: [ftp://ftp.ehu.es/cidira/profs/iipbaiza/Libro\\_SIG.pdf](ftp://ftp.ehu.es/cidira/profs/iipbaiza/Libro_SIG.pdf).

Ordoñez G., J. J. 2011. ¿Que es una cuenca hidrologica? Lima, Perú. URL: [http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm\\_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca\\_hidrologica.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf).

Ortega R., J. M. 2003. Evaluacion multicriterio y sistemas espaciales de toma de decisines aplicados a la planeación del uso de suelo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

Peréz J., G. 2015. Estimación de la captura de carbono empleando herramientas de análisis espacial en zonas forestales de la cuenca de Cuitzeo. Universodad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Pozo, C., y J. Llorete. 2002. La teoria del equilibrio insular en biogeografía y conservacion. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 0370-3908 26:321-339 URL: [http://www.accefyn.org.co/revista/Vol\\_26/100/321-339.pdf](http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_26/100/321-339.pdf).

Quiroz, O. Y. 2010. Los SIG como herramienta para la toma de decisiones en la solución de problemas ambientales y dentro de la formación profesional en ciencias ambientales. Universidad de la Sierra Juárez, México, URL: [http://www.utm.mx/edi\\_anteriores/temas41/2NOTAS\\_41\\_2.pdf](http://www.utm.mx/edi_anteriores/temas41/2NOTAS_41_2.pdf).

Ramírez, T. A., J. M. Sánchez N., y G. C. A. 2004. El Desarrollo Sustentable: Interpretación y Análisis. Redalyc. 1405-6690 6:55-59 URL: <http://www.redalyc.org/pdf/342/34202107.pdf>.

Saaty L., T. 1980. The Analytic Hierarchy Process. McGraw Hill International

SEMAR (Secretaría de marina). 2014. Percepción remota. URL: <http://www.semar.gob.mx/s/informacion-sector/ciencia/ermexs/percepcion-remota.html>.

SEMARNAT (Secretaría de medio ambiente y recursos naturales). 2014. Capítulo 2: vegetación y uso de suelo. MÉXICO URL: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_04/02\\_vegetacion/index\\_vegetacion.html#](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/02_vegetacion/index_vegetacion.html#).

Su, S., X. Chen, S. DeGloria, y J. Wu. 2009. Integrative fuzzy set pair model for land ecological security assessment: a case study of Xiaolangdi Reservoir Region, China. Springer-Verlag. 00477-009-0351-x **24**:639–647

SURFER11. 2015. Introduction to Gridding Methods.

Teledet. 2014. ¿qué es la percepción remota? URL: <http://www.teledet.com.uy/quees.htm>.

Torres D., A. 2011. Tasas de crecimiento poblacional (r): Una mirada desde el modelo matemático lineal, geométrico y exponencial. CIDE, Digital. 2150-6515 **2**:142-160 URL: <http://soph.md.rcm.upr.edu/demo/index.php/cide-digital/publicaciones>.

UC3M. 2015. Tema 2: Tablas de Contingencia. URL: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jimmarin/esp/Categor/Tema2Cate.pdf>.

UNAD (Universidad nacional abierta y a distancia). 2009. Lección 17. Modelo presión - estado - respuesta (PER). URL: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358024/contLinea/leccin\\_17\\_modelo\\_presin\\_estado\\_respuesta\\_per.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358024/contLinea/leccin_17_modelo_presin_estado_respuesta_per.html).

Villar A., A. 2014. Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes. URL: [http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/TEMA\\_11\\_FOTOGAMETRIA\\_Y\\_TELEDETECCION/Teledeteccion/microsoft-word-teledeteccion\\_y\\_sist\\_tratamiento\\_digital\\_imagenes.pdf](http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Teledeteccion/microsoft-word-teledeteccion_y_sist_tratamiento_digital_imagenes.pdf).

Wang, G., y W. Wu. 2007. Spatial distribution of ecological security status assessment of West-Liaohe River based on geographic information system. Higher Education Press y Springer-Verlag. 11783-007-0075-4 **1**: 471–476

Wang, X., X. Zhong, y P. Gao. 2010. A GIS-based decision support system for regional eco-security assessment and its application on the Tibetan Plateau. Journal of Environmental Management. 0301- 4797 **91**:1981-1990

Xing C., . L., Z. Ji Q., y L. Xiao Z. 2014. Geographical Information System-Based Assessment of Ecological Security in Changbai Mountain Region. Mountain Science. 11629-013-2293-5:12

Zavaleta H., E., H. Cruz J., y J. Márquez R. 2012. Potencial de infiltración de agua de lluvia a partir de la retención de una plantación forestal. Redalyc. 1405-7247 **14** URL: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49724122004>.

Zhi Q. W., B. Z., G. Y., W. Zong M., y Z. Shu Q. 2005. Responses of wetland eco-security to land use change in western Jilin province, China. CHINESE GEOGRAPHICAL SCIENCE. 1002-0063(2005)04-0330-07 15:330-336

Zhou, X., Z. Yang, y X. Linyu. 2010. Eco-security Monitoring Index System for Urban Development Zone. science direct. 1878-0296 2:1199-1205 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029610001635>.

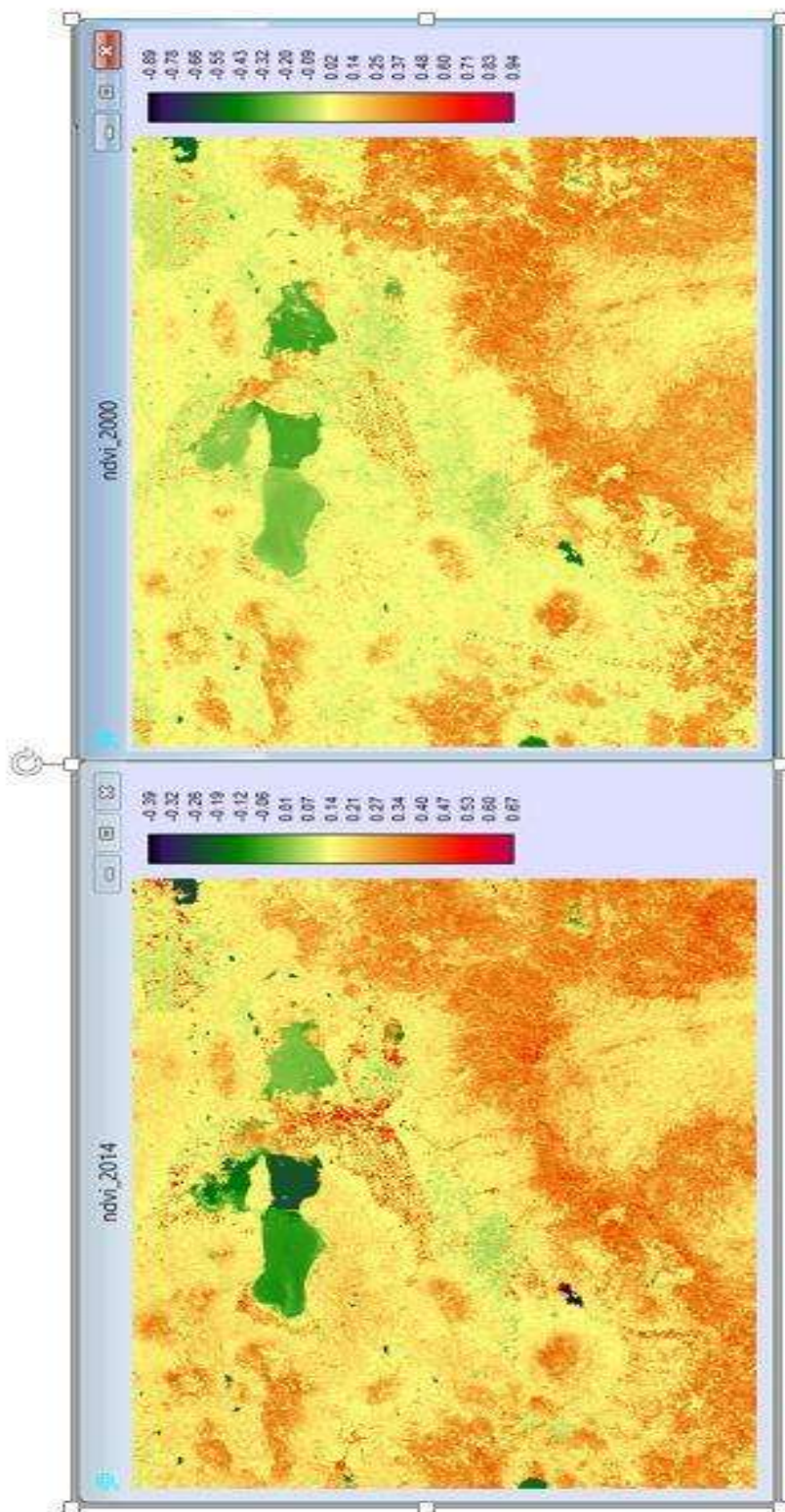
## ANEXOS

Anexo 1. Tabla cruzada de las coberturas del 2000 y 2014 (ha)

	Coberturas del 2000										
	Agricultura	Asentamientos humanos	Bosque templado	Bosque seco	Cuerpo de agua	Desprovisto de vegetación	Pastizal	Vegetación acuática	Banco de materiales	Vegetación secundaria	
<b>Coberturas del 2014</b>	151,856	0	1,526	535	18	0	378	3	0	1,225	
Agricultura	7,489	132,35	231	421	0	0	785	0	0	1,255	
Asentamientos humanos	133	0	77,591	0	0	0	0	0	0	466	
Bosque templado	41	0	0	39,974	0	4	0	0	0	1,552	
Bosque seco	22	0	0	0	30,559	0	114	832	0	0	
Cuerpo de agua	43	0	0	32	0	9	0	0	0	0	
Desprovisto de vegetación	932	0	293	970	58	0	20,648	138	0	264	
Pastizal	82	0	0	0	1,901	0	3	5,382	0	0	
Vegetación acuática	19	0	42	0	0	0	0	0	341	176	
Banco de materiales	214	0	2,675	208	0	0	2	0	0	35,508	total
Vegetación secundaria	160,831	13,235	82,358	42,140	32,537	13	21,980	6,354	341	40,444	400,183
<b>Total</b>											

Anexo 1. Tabla cruzada de las coberturas de los años 2000 y 2014

Anexo 2. NDVI para el 2000 y 2014, los tonos más rojizos presentan mayor índice de vegetación.



### Anexo 3. Tablas de asociación por variable y por cobertura (V Cramer)

Distancia a localidades	V de Cramer	Distancia a vías secundarias y terciarias	V de Cramer	Distancia a vías primarias	V de Cramer	Densidad de población	V de Cramer
Overall V	0.14	Overall V	0.2276	Overall V	0.1452	Overall V	0.2341
cuerpo de agua	0.2716	cuerpo de agua	0.6297	agricultura	0.342	asentamientos humanos	0.3876
agricultura	0.2373	agricultura	0.2937	cuerpo de agua	0.2335	cuerpo de agua	0.3091
asentamientos humanos	0.2354	vegetación acuática	0.141	bosque templado	0.2248	bosque templado	0.3574
bosque templado	0.1326	bosque templado	0.1098	vegetación acuática	0.1012	agricultura	0.1171
vegetación secundaria	0.0909	bosque seco	0.1014	vegetación secundaria	0.0763	vegetación acuática	0.1089
bosque seco	0.0874	vegetación secundaria	0.0802	bosque seco	0.0747	vegetación secundaria	0.0737
vegetación acuática	0.0799	asentamientos humanos	0.0558	pastizal	0.0533	bosque seco	0.0649
pastizal	0.0385	pastizal	0.0382	asentamientos humanos	0.0533	pastizal	0.0313
banco de materiales	0.0379	banco de materiales	0.0301	banco de materiales	0.0375	banco de materiales	0.0294
desprovisto de vegetación	0.0358	desprovisto de vegetación	0.0126	desprovisto de vegetación	0.0159	desprovisto de vegetación	0.0095

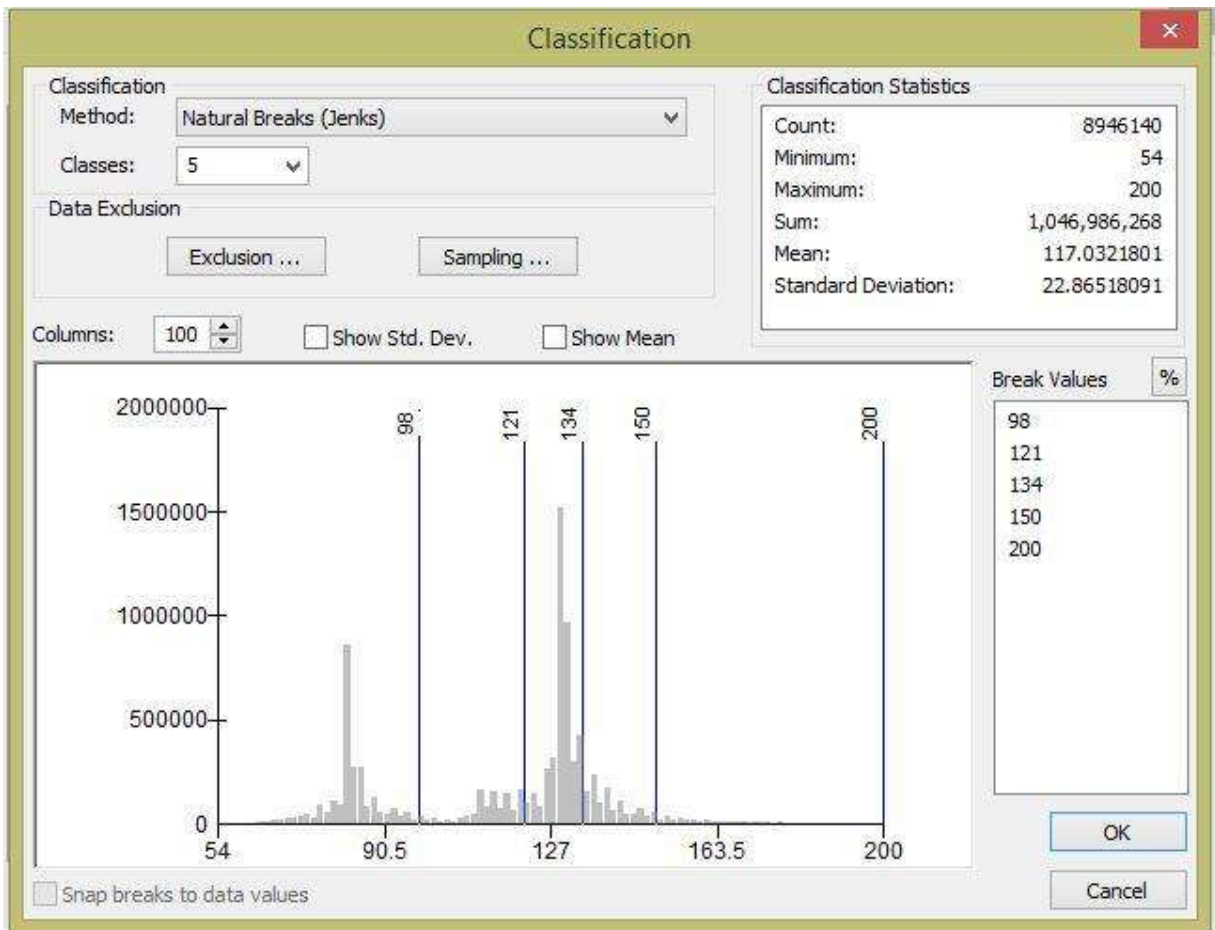
Tasa de crecimiento poblacional	V de Cramer	Grado de riesgo social	V de Cramer
Overall V	0.1402	Overall V	0.1469
asentamientos humanos	0.3701	asentamientos humanos	0.3487
bosque seco	0.3058	bosque templado	0.2936
bosque templado	0.3065	cuerpo de agua	0.1396
agricultura	0.0972	vegetación acuática	0.0761
cuerpo de agua	0.0909	bosque seco	0.0735
pastizal	0.0906	vegetación secundaria	0.0677
vegetación acuática	0.0671	agricultura	0.0537
vegetación secundaria	0.0559	pastizal	0.046
banco de materiales	0.0181	desprovisto de vegetación	0.0092
desprovisto de vegetación	0.0103	banco de materiales	0.0082

Agricultura y asentamientos h.	V de Cramer	Áreas naturales protegidas	V de Cramer
Overall V	0.1394	Overall V	0.2062
agricultura	0.7362	asentamientos humanos	0.3765
cuerpo de agua	0.4555	vegetación acuática	0.2946
bosque templado	0.8896	bosque templado	0.2494
bosque seco	0.2685	bosque seco	0.1819
vegetación secundaria	0.2481	vegetación secundaria	0.1815
asentamientos humanos	0.2296	asentamientos humanos	0.15
vegetación acuática	0.2185	vegetación acuática	0.153
asentamientos humanos	0.1545	banco de materiales	0.1346
pastizal	0.059	pastizal	0.0659
banco de materiales	0.0094	banco de materiales	0.0659
desprovisto de vegetación	0.0094	desprovisto de vegetación	0.0187

Corrientes de agua	V de Cramer	Manantiales	V de Cramer
Overall V	0.1536	Overall V	0.1185
cuerpo de agua	0.356	cuerpo de agua	0.2123
bosque templado	0.2269	bosque templado	0.1454
bosque seco	0.1364	bosque seco	0.1375
banco de materiales	0.1055	vegetación acuática	0.1176
agricultura	0.0686	banco de materiales	0.1122
asentamientos humanos	0.0693	agricultura	0.0952
pastizal	0.0619	asentamientos humanos	0.0918
vegetación acuática	0.0786	pastizal	0.0439
vegetación secundaria	0.0656	vegetación secundaria	0.0688
desprovisto de vegetación	0.0249	desprovisto de vegetación	0.0187

Penínsulas interiores	V de Cramer
Overall V	0.2539
bosque templado	0.5002
cuerpo de agua	0.4308
agricultura	0.3839
bosque seco	0.2315
vegetación secundaria	0.1843
vegetación acuática	0.1571
asentamientos humanos	0.1359
pastizal	0.0295
banco de materiales	0.0288
desprovisto de vegetación	0.0134





Anexo 4. Rupturas naturales para el escenario de seguridad ecológica que partió del análisis de cambio de cobertura



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

## Programa de maestría en ciencias en ingeniería ambiental

### Opinión de expertos para la determinación de la seguridad ecológica

VARIABLE	VCP	VCSyT	LOC	DSP	TCP	RES	AGAH	PEN	ANP
VCP	1								
VCSyT		1							
Loc			1						
DsP				1					
TCP					1				
ReS						1			
AgAH							1		
Pen								1	
ANP									1

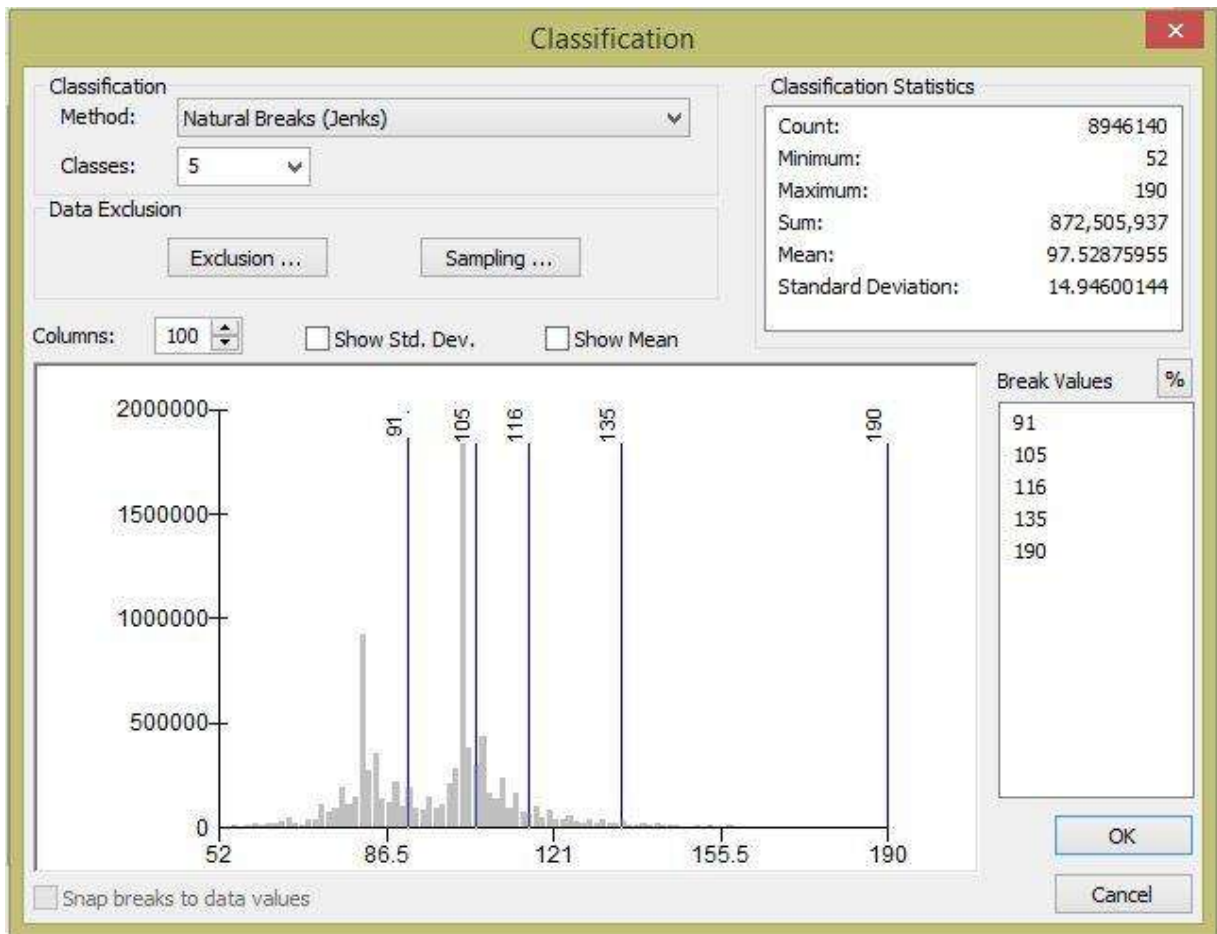
Escala de llenado en la comparación pareada

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
sumamente	muy fuertemente	fuertemente	moderadamente	igualmente	moderadamente	fuertemente	muy fuertemente	sumamente
	menos importante				más importante			

Variable:

- VCP: Vías de comunicación primarias
- VCSyT: Vías de comunicación secundarias y terciarias
- Loc: Localidades
- DsP: Densidad de población
- TCP: Tasa de crecimiento poblacional
- ReS: Rezago social
- AgAH: Áreas agrícolas y asentamientos humanos
- Pen: Pendientes
- CoA: Corrientes de agua perennes
- ANP: Áreas naturales protegidas

Anexo 5. Matriz de comparación pareada



Anexo 6. Rupturas naturales para el escenario de seguridad ecológica que partió de la opinión de expertos

## Anexo fotografico de la verificacion de campo



























DIRECTION 176 deg(T) 19.67258°N 101.07534°W ACCURACY 5 m DATUM WGS84



DIRECTION 235 deg(T) 19.62895°N 101.24379°W ACCURACY 5 m DATUM WGS84



DIRECTION 112 deg(T) 20.05965°N 101.00477°W ACCURACY 5 m DATUM WGS84



J.M. Ortega R. 2016-06-11 17:28:19-05:00



DIRECTION 75 deg(T) 19.94617°N 100.85536°W ACCURACY 5 m DATUM WGS84



DIRECTION 273 deg(T) 19.67258°N 101.07541°W ACCURACY 5 m DATUM WGS84

DIRECTION 205 deg(T) 19.48233°N 101.26638°W ACCURACY 5 m DATUM WGS84

**REGlamento INTERNO (BPA)**  
**PARA ACCESO DE TRABAJADORES Y VISITANTES**  
**CULTIVO: AGUACATE**  
**HUERTO: EL AUXILIO 4**

NO USAR ANILLOS, PINZAS, COLLARES, BOLSAS O EFECTOS PERSONALES AL MOMENTO DE COSECHAR.	EN CASO DE FALTO DE TIEMPO, DEBERÁ DESEGUIR EL TRÁFICO DE SEGURIDAD EN LA ZONA PARA NO INCURRIR.
PROHIBIDO A TRABAJAR: - LUNAS CORTAS - CABELLO CORTO	NO INTRODUCIR ANIALES AL HUERTO
LEVAR SIEMPRE LAMPARA, PANTUFLAS LARGAS, CAMISAS CON MANGA Y ZAPATOS CERRADOS.	USAR COMPUERTA DURANTE LA ESTADIA DEL HUERTO
CONSUMIR LOS ALIMENTOS EN AREA ASIGNADA	NO EXPORTAR PRODUCTOS DEL HUERTO SIN LA DEBIDA AUTORIZACION DE MANEJO
NO CONSUMIR ALIMENTOS, BEBIDAS, CIGARILLOS, CIGARRILLOS O EFECTOS EN EL AREA DE COSECHA.	COMER ALIMENTOS SIN AUTORIZACION DE MANEJO EN EL HUERTO. DEBERAN USAR CAMISAS Y ZAPATOS CERRADOS.
HAZER USO CORRECTO DE BAÑOS Y DE LAS INSTALACIONES	INFORMAR AL ENCARGADO CUANDO PRESENTEN SINTOMAS DE ALGUNA ENFERMEDAD O LESION.
MANTENER TODAS LAS ZONAS DE COSECHA SIN FUMOS Y CIGARRILLOS FUERA DE LOS BAÑOS. NO CONSUMIR EN EL BAÑO.	MANTENER LAS PUERTAS CERRADAS Y HACER BUEN USO DE LAS INSTALACIONES
NO PRESENTARSE A TRABAJAR BAJO LA INFLUENCIA DE ALCOHOL O ALGUNO MEDICAMENTO TOXICO.	NO INTRODUCIR OBJETOS DE PUNTA AL AREA ACTIVA DE COSECHA
PONER LA MASCARA EN SU LUGAR	<b>RECOMENDACIONES GENERALES</b> - Usar siempre el casco protector. - Mantener siempre el área de trabajo limpia y ordenada. - Evitar el uso de celulares y cámaras de video. - Evitar el consumo de alcohol y drogas. - Evitar el uso de medicamentos que puedan ser perjudiciales para la salud.

J.M. Ortega R. 2016-06-04 15:35:22-05:00

