



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

---

FACULTAD DE GEOGRAFÍA

**ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE CRECIMIENTO DE LA FRONTERA AGRÍCOLA  
MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
EN EL ESTADO DE TLAXCALA.**

**R E P O R T E F I N A L**

QUÉ PARA OBTENER EL GRADO DE  
**ESPECIALISTA EN CARTOGRAFÍA AUTOMATIZADA,  
TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

P R E S E N T A:

**LIC. GEOG. ALMA RITA DOMÍNGUEZ TEJEDA**

**ASESOR: DR. NOEL BONFILIO PINEDA JAIMES**



TOLUCA, MÉXICO

ENERO, 2016

## Índice General

<b>RESUMEN</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>Planteamiento del Problema</b> .....	<b>6</b>
<b>Justificación</b> .....	<b>7</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>8</b>
<b>Capítulo I. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
1.1 Antecedentes de los Sistemas de Información Geográfica .....	10
1.2 Desarrollo y Funciones de un SIG .....	12
1.3 Antecedentes tema de estudio.....	13
1.4 Cobertura del uso de suelo.....	15
1.5 Escenarios o modelo potencial.....	16
1.6 Modelo Cadenas Markov .....	16
<b>Capítulo II. CARACTERIZACIÓN</b> .....	<b>18</b>
2.1 Localización .....	19
2.2 Clima .....	20
2.3 Fisiografía .....	20
2.4 Edafología .....	21
2.5 Hidrología.....	21
2.6 Uso de suelo y vegetación .....	21
2.7 Vegetación .....	22
2.8 Uso de suelo.....	22
2.9 Uso potencial del suelo.....	23
2. 10 Uso potencial agrícola.....	23
2. 11 Uso potencial forestal .....	24
<b>Capitulo III. METODOLOGÍA</b> .....	<b>26</b>
3.1 Diseño Gráfico Metodológico .....	27
3.1 Etapa I .....	28
3.2 Etapa II .....	31

<b>Capítulo IV. RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
4.1 Homogenización de categorías.....	34
4.2 Cambio de uso de suelo .....	38
4.3 Análisis de Cambios .....	39
4.3.1 Matriz de cambios y modelación cartográfica.....	39
4.3.2. Pérdidas y Ganancias.....	42
4.3.3 Cambio Neto.....	47
4.3.4. Mapa de transición a agricultura 2002 – 2012 Tlaxcala .....	50
4.4 Predicción del Crecimiento de la Frontera Agrícola .....	52
4.4.1 Distancia a Matorral y Pastizal. ....	52
4.4.2 Distancia a Ríos.....	54
4.4.3 Distancia a vías de comunicación.....	55
4.4.4 Distancia a Centros Urbanos .....	56
4.4.5 Pendiente .....	57
4.5 Probabilidad de cambio .....	58
4.6 Mapas de transición potencial.....	58
4.7 Predicción de Crecimiento Agrícola.....	60
<b>CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>69</b>

### Índice de Figuras

Figura 3.1 Modelador de cambio de cobertura .....	29
Figura 4.12 Distancia a ríos.....	54
Figura 4.13 Fuzzy a ríos.....	55
Figura 4.14 Distancia a vías de comunicación .....	55
Figura 4.15 Fuzzy a vías de comunicación .....	56
Figura 4.16 Distancia a Centros Urbanos .....	57
Figura 4.17 Fuzzy Pendiente.....	57
Figura 4.18 Probabilidad de Cambio .....	58
Figura 4.19 Sub-Modelo de Transición.....	59

## RESUMEN

El uso de suelo agrícola es una de las coberturas de suma importancia principalmente para las actividades económicas y de consumo, pero a su vez trae repercusiones paisajísticas y ambientales debido a la mala planificación de este uso de suelo y ocasionando una transformación del territorio.

El estado de Tlaxcala está situado en la región centro-oriental de la República Mexicana sobre la Meseta de Anáhuac, por lo que geográficamente tiene las características primordiales para el desarrollo de las actividades agrícolas, es por ello que el trabajo que se presenta tiene como por objetivo Identificar y analizar el cambio de uso de suelo entre los años 2002 - 2012 y predecir la tendencia de crecimiento de la cobertura agrícola al año 2020 para el estado de Tlaxcala mediante herramientas SIG.

A su vez el trabajo se realizó con información de las series de uso de suelo y vegetación III y V de INEGI, el cual se establecieron dos objetivos particulares, los cuales consistieron en realizar un análisis de cambio de uso de suelo para el estado de Tlaxcala con énfasis en la cobertura agrícola en base a la metodología realizada por Pontius y para efectuar una predicción y modelización cartográfica del crecimiento de la frontera agrícola se realizó mediante el módulo de cadenas de Markov en IDRISI.

Obteniendo como resultado la predicción de crecimiento de uso de suelo 2020 para el sector agrícola.

## INTRODUCCIÓN

Las distintas actividades económicas realizadas dentro un territorio traen consigo repercusiones en el uso de suelo y por consecuencia transforman el paisaje, conllevando así un cambio de uso de suelo debido al crecimiento de población.

Entre 1950 y el 2010 Tlaxcala incrementó su población 4.1 veces, el patrón de ocupación del territorio paso de una estructura eminentemente rural a una mayoritariamente urbana, sobre todo en el centro y sur del Estado, todo lo anterior, es consecuencia de la falta de vigencia en la planeación urbana, lo que ha generado que la expansión de la mancha urbana, generando desorden, irregularidad, pero sobre todo deterioro ambiental. La dinámica nacional en nuestro país, ha sido originada por los acelerados ritmos de crecimiento poblacional, el estado de Tlaxcala, como parte de la Región Centro del país, se ha visto influenciado por las zonas metropolitanas que constituyen el ámbito regional, determinado por la intensa relación de ésta con las zonas metropolitanas, lo que se ha visto reflejado en los promedios de crecimiento que la entidad presentaba en décadas anteriores.

El poder calcular las tendencias de cambio pueden ser de utilidad para una adecuada planeación del territorio, por esto el objetivo de este trabajo fue Identificar y analizar el cambio de uso de suelo entre los años 2002 - 2012 y predecir la tendencia de crecimiento de la cobertura agrícola para el estado de Tlaxcala mediante herramientas SIG, a partir de las series de vegetación de INEGI correspondientes a la serie 3 y serie 5 para tener una amplia comparación de vegetación de estos dos series.

En este sentido este trabajo de investigación propone un análisis y predicción del crecimiento de la frontera agrícola de Tlaxcala, en estos periodos donde se apliquen técnicas de análisis y sistemas de información geográfica y hacer una aproximación futura permita indagar sobre los posibles cambios en este territorio.

## **Planteamiento del Problema**

No existe modelo predictivo que permita conocer las dimensiones, ni áreas que serán impactadas por los cambio de uso de suelo negativo permitiendo que los gobiernos y dependencias puedan impactar en medidas preventivas.

Si bien uno de los principales factores que interviene en el deterioro ambiental sin lugar a duda es la mala planeación hacia el suelo a nivel mundial, teniendo como resultado efectos negativos hacia la naturaleza como son las variaciones climáticas, procesos ecológicos, geomorfológicos y antropogénicos.

El crecimiento agrícola se ha venido dando de manera acelerada siendo un problema presente en el país y a nivel mundial, pues con el paso de los años y las distintas actividades dentro del territorio han transformado cada vez más rápido los paisajes naturales, en la actualidad esta actividad agrícola es ubicada sin considerar las restricciones hacia áreas de protección no aptas para este esta actividad debido a este desenfrenada expansión se han ocupado espacios destinadas a otras actividades y han sido desplazados por estas prácticas agrícolas.

Es evidente entonces que los efectos negativos del crecimiento agrícola se deben a la mala planeación y ordenamiento y sobre todo a la poca información de las consecuencias que conllevan por inadecuado uso de suelo destinado hacia la agricultura y cómo repercute en el equilibrio ecológico.

Si bien es cierto el crecimiento acelerado de la población son el factor principal de que ocurra un desenfreno de la agricultura, derivado a la demanda de alimentos y espacios para la producción de los mismos lo que conlleva a la deforestación, degradación de los suelos, al efecto invernadero.

El estado de Tlaxcala no ha estado exento de estos cambios territoriales, ya que la fuerte dinámica nacional y del centro del país ha repercutido en los ritmos de crecimiento a través de los últimos años, derivado del crecimiento poblacional que ha originado desequilibrios y transformaciones territoriales, provocando que el aprovechamiento del territorio, su ocupación y protección del entorno natural no sea la óptima

Finalmente es de suma importancia considerar este cambio, con el propósito de analizar las principales acusas y consecuencias que ha sufrido el territorio así como una estimación de tendencia futura del crecimiento agrícola.

### **Justificación**

La pérdida de los recursos naturales es uno de los principales problemas ecológicos a nivel mundial ya que la falta de una planeación hace que se pierda y favorezca el crecimiento agrícola junto con el crecimiento urbano, creando un desequilibrio ecológico, ambiental, y una profunda explotación del suelo.

El crecimiento de la población crea la necesidad de una mayor demanda de recursos naturales para su supervivencia conllevando la expansión de áreas agrícolas sobre áreas naturales sin considerar el impacto negativo que pueda ocasionar.

En relación con este último por su ubicación geográfica el Estado de Tlaxcala tiene cercanía con el Estado de México y además es una estado con actividades industriales lo que lo hace receptor de población debido a la generación de empleos y crecimiento de las ciudades por esta razón las zonas destinadas al sector agrícola van ocupando territorios inadecuados y apropiando se de áreas naturales protegidas el cual ocasiona un factor negativo para estos espacios naturales.

Por esta razón es necesario analizar hacia donde serán destinadas las áreas dedicadas a la agricultura y estimar el crecimiento de la frontera agrícola y por medio de esta estimación predecir el comportamiento de crecimiento y sus posibles afectaciones que puedan ocurrir.

## **Objetivos**

Identificar y analizar el cambio de uso de suelo entre los años 2002 - 2012 y predecir la tendencia de crecimiento de la cobertura agrícola para el estado de Tlaxcala mediante herramientas SIG.

### **Objetivos particulares**

- Realizar un análisis de cambio de uso de suelo para el estado de Tlaxcala con énfasis en la cobertura agrícola.
- Efectuar una predicción y modelización cartográfica del crecimiento de la frontera agrícola del estado de Tlaxcala mediante el módulo de cadenas de Markov en IDRISI.



# CAPÍTULO I.

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Antecedentes de los Sistemas de Información Geográfica

Durante las décadas, los Sistemas de Información Geográfica se han aplicado a problemas de gestión territorial y de recursos naturales, a cuestiones relacionadas con el medio ambiente la logística militar o en contextos directamente vinculados con las ciencias de la Tierra, como la geografía, la geología etc. Solo recientemente se han empezado a considerar el uso potencial de los SIG para otros campos y otras disciplinas relativamente inéditos y en particular con las ciencias Humanas y Sociales.

Los SIG han supuesto un camino paradigmático tecnológico e intelectual fundamentalmente en el ámbito de las geo ciencias y de la cartografía, este paradigma debe ser entendido como un conjunto de procedimientos técnicos y metodológicos que permiten por un lado tratar la especialidad de los datos y por otro favorecer el estudio de la realidad desde enfoques multidimensionales e integrados en el tiempo, el espacio y las personas que interactúan con el territorio (Del Bosque et. al. 2012).

Esta definición puede ser completada por Moldes quien afirma que, además de ser un conjunto de programas informáticos que permiten la gestión de datos referenciados espacialmente y organizados en bases de datos, pueden ser visualizados mediante mapas (MOLDES, 1995).

Lo que caracteriza y diferencia a esta nueva herramienta de trabajo es su innovadora capacidad en generar información a partir de la colección de una serie de datos. La aplicación y utilización de los sistemas de información ha incrementado el conocimiento en aquellos ámbitos o áreas de investigación en los que se vienen aplicando, en virtud a su habilidad para recibir, almacenar y, sobre todo, relacionar y operar sobre distintas bases de datos informatizadas (internas o externas, cuantitativas o cualitativas, monotemáticas o multitemáticas) generando información imposible de obtener por otros cauces que no deriven de la aplicación de estos programas y aplicaciones informáticas. Esta es, también, la característica intrínseca a los sistemas de información geográfica y así lo manifiesta Chuvieco al afirmar que de las siglas SIG la más importante es la de Información, que el

término Geográfica no es más que un calificativo de ésta, y el de Sistema puede aplicarse a otras muchas aplicaciones informáticas (CHUVIECO, 1996).

Los SIG son susceptibles de ser usados en cualquier aplicación cuyo objetivo principal sea gestionar algún tipo de información geográfica, referida a los elementos o fenómenos que tiene lugar en la superficie de nuestro planeta.

Los Sistemas de Información Geográfica es una herramienta compuesta por cinco elementos los cuales son Software, Hardware, Dato Análisis, y Recursos Humanos que actúa coordinada y sistemáticamente información, recolectando, almacenado, validando, actualizando, manipulando integrado, analizando, extrayendo y desplegando una serie de datos georreferenciado, con el fin de solucionar problemas complejos para la toma de decisiones en planificación y gestión (Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado, 1993).

En concreto, para la investigación social, las posibilidades de estos sistemas no se limitan a la gestión de bases de datos vinculadas o relacionadas y al estudio de los fenómenos sociales con incidencia en el espacio. Los SIG son, además, potentes herramientas de trabajo especialmente diseñadas para simular futuras situaciones, facilitando, de este modo, la toma de decisiones.

Los SIG pueden trabajar con cualquier tipo de datos (urbanos, demográficos, ambientales, catastrales), únicamente se les exige que tengan un componente espacial o geográfico, los SIG están especialmente concebidos para el tratamiento, gestión y toma de decisiones en torno a ellos.

Como definición es una colección organizada de hardware, software e información geográfica diseñados para la eficiente captura, almacenamiento integración, actualización, modificación, análisis espacial y despliegue de todo tipo de información geográficamente referenciada.

Es un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar, coordinada y lógicamente en la captura de almacenamiento análisis, transformación y presentación de información geográfica con sus atributos a fin de satisfacer múltiples propósitos.

En general esas definiciones indican que la importancia de los SIG radican en que para dar soluciones a un problema planteado se requería el acceso a varios tipos de información con el componente espacial, y de esta manera contribuir a tomar mejores decisiones (ESRI, 1993).

### **1.2 Desarrollo y Funciones de un SIG**

La razón fundamental para emplear un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que podrías obtener de laguna otra forma, se entiende por topología a las relaciones espaciales entre los diferentes elementos gráficos y su posición en el mapa.

Estas relaciones que para el ser humano podrá ser obvias a simple vista, el software las establece mediante un lenguaje y unas reglas de geometría matemática.

Entre las funciones principales que destaca un sistema de información geográfica se encuentran las siguientes:

**Entrada de datos:** un SIG debe tener la capacidad para recibir datos como es la digitalización directa, entrada de coordinación, procedimiento de teledetección.

**Salida de datos:** pareciera una función no muy importante en un SIG pero es lo contrario, el eficiente despliegue de la información en medios análogos y digitales, resulta imprescindible la correcta y representación de la información geográfica.

**Manipulación de los datos:** es necesario la manipulación de los datos para hacer compatibles las necesidades, por lo que cualquier SIG debe proveer herramientas para el manejo de la información. Algunas de ellas son funciones para transformar matemáticamente de coordenadas, reformateo, integración, generalización, depuración, importación y exportación de datos.

**Análisis espacial:** Estas funciones se podrían considerar como las más importantes dentro de un SIG dado que usa información disponible para producir nueva algunas de las funciones son las siguientes:

**Selección:** se basa en búsqueda simple o compleja tanto espacial como en la base de datos.

**Proximidad:** esto permite determinar qué cosas están cerca de otras, basado en distancias u algún atributo determinado.

**Superposición cartográfica:** también se conoce como algebra de mapas y se considera una de las funciones más poderosas ya que permite extraer, sobreponer e interpretar información cartográfica.

**Rutas óptimas:** esto es usado para determinar aquella ruta con menor distancia posible.

Para Buzai (2008) los sistemas de información geográfica son instrumentos que permiten un análisis geográfico integral que junto con la estadística nos permitirá entender, desarrollar e interpretar los modelos y poder representar los factores, cuya potencialidad está fundada en su capacidad para superponer capas de información de diferentes disciplinas, estos sistemas incluyen funciones para el mateo de datos espaciales, como almacenamiento, visualización, consultas , análisis de datos y modelización, y se apoyan en diferentes software a fin de lograr la integración más eficaz para el tratamiento automatizado de los datos geográficos (Buzai, 1999 en Hernandez, 2014).

### 1.3 Antecedentes tema de estudio

El análisis de la especialización agrícola es un tema de interés por al menos dos motivos: Permite determinar las ventajas comparativas agrícolas. La teoría de las ventajas comparativas, formulada por David Ricardo en 1817 en sus Principios de Economía, plantea que es posible ampliar los disfrutes de la humanidad mediante una mejor distribución del trabajo, para lo cual cada país producirá los artículos que, debido a su clima y de más ventajas natura es o artificiales, le sean propios, y los intercambiará a través del comercio mundial, logrando de esta forma que todos los países se beneficien de la división internacional del trabajo.

Puede ayudar a entender cómo la especialización agrícola está asociada a la evolución histórica de un territorio. Existen varios estudios que tratan de explicar la dinámica de uso y ocupación del suelo, así como también los factores que inciden en los procesos de crecimiento urbano.

Pineda (2010), argumenta que a partir de la revolución industrial el cambio de uso de suelo se ha venido incrementando de manera importante, cabe señalar que el cambio de la cobertura de uso de suelo siempre ha existido, puesto que el territorio ha estado en constante transformación, pero ha sido mayor a partir de esta época actual en la que vivimos, puesto que la demanda de alimentos, y hoy en día de biocombustibles ha desencadenado que áreas que anteriormente eran zonas forestales se convirtieran en zonas agrícolas y estas zonas agrícolas al pasar de los años han perdido su productividad y por ende son zonas con alta susceptibilidad a procesos erosivos. Así mismo zonas cubiertas por vegetación han sido alteradas por seres humanos que las convierten en zonas habitacionales.

El análisis de la sostenibilidad conduce a considerar multitud de temas y problemas, pero uno de los más estudiados es, el concerniente a la variación de las actividades desarrolladas en cada punto del territorio a lo largo del tiempo, es decir, al cambio en los usos y ocupación del suelo y el aumento desmesurado de la superficie artificial (Plata, 2010).

Dado que la urbanización es una tendencia global, que seguirá persistiendo en las próximas décadas, en la medida que va aumentando la población. Es necesario desarrollar nuevos modelos urbanos que ayuden a las ciudades adaptarse, si bien las zonas urbanas ocupan hoy en día el 2 por ciento de las superficies de la tierra, sus efectos en la alteración del medio son importantísimos a escala local, regional y global (Plata, 2010).

Como señala Pineda et al., 2009 realiza un Análisis de cambio del uso de suelo en el Estado de México mediante un sistema de información geográfica y técnicas de regresión multivariante realizando una aproximación a los procesos de deforestación a la que

describe los cambios en la cobertura y el uso de suelo sucedidos principalmente del uso forestal en el Estado de México en el periodo de 1993-2002, se calcularon los cambios, intercambios y transiciones sistemáticas que afectaron la pérdida de la cobertura forestal empleando métodos de regresión multivariante que permitieron explicar las posibles causas que provocan el proceso de deforestación regional dentro del Estado de México.

#### **1.4 Cobertura del uso de suelo**

La cobertura de suelo está compuesta por muchos atributos de la superficie de suelo de la Tierra y su inmediata sub-superficie, la cual incluye la biota, suelo, topografía, superficie y agua subterránea así como las estructuras antropogénicas. Es así, que al haber una conversión de la cubierta terrestre se constituye por el reemplazo de otro tipo de cobertura, es decir de una categoría a otra, como en el caso de la expansión agrícola, la deforestación o el cambio en la extensión urbana que hoy en día debido a la gran densidad de población esta expansión es muy común (Henríquez, 2012).

La cobertura del suelo y sus cambios son fuentes importantes para la mayoría de los materiales y los flujos de energía que sostienen la vida, es así como los cambios en la cobertura del suelo son generados principalmente por la actividad humana utilizados para satisfacer necesidades o requerimientos individuales o de la sociedad como lo es la agricultura (Henríquez, 2012).

Los cambios sobre uso y cobertura de suelo ayudan a proporcionar las bases para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Velázquez et. al 2002).

Los cambios en la cobertura de uso de suelo son el resultado de las distintas combinaciones que se han dado en diversas escalas espacio-temporales incluyendo una serie de factores distintos como los cambios naturales a corto y largo plazo debido a distintas variaciones de clima, procesos ecológicos y geomorfológicos como la erosión y la sucesión vegetal a la variedad climática interanual que afecta principalmente a áreas

naturales protegidas, coberturas agrícolas, alteraciones antropogénicas de la cobertura vegetal aunado el paisaje trayendo consigo la deforestación y la degradación de los suelos, así como el efecto invernadero causado por las actividades humanas, si bien las causas mencionadas la que mayor influencia tiene al cambio de uso de suelo es el antropogénico pues es el principal agente de cambio (Zúñiga et. al. 2013).

### **1.5 Escenarios o modelo potencial**

Escenario o modelo tendencial un modelo de predicción o tendencial es un esquema teórico que se presenta generalmente en forma matemática de la realidad el cual tiene como principal función el facilitar su comprensión y su comportamiento (Aguilera, 2006).

Un escenario tendencial presenta indicadores de las condiciones futuras de las variables, estos estudios son esenciales principalmente en situaciones críticas que generan problemas, los cuales deberán solucionar o corregir la planeación presente para prevenir contrariedades en el futuro. Estos escenarios se determinan mediante proyecciones del comportamiento a través del tiempo de la variable analizada, teniendo en cuenta otras variables o situaciones que están ligadas a la variable en cuestión (Henriquez, 2012).

### **1.6 Modelo Cadenas Markov**

En los últimos años, los SIG comerciales han ido incorporando como funciones de análisis aquellas destinadas a la modelización. Es el caso de la función CADENAS DE MARKOV, que ha sido incluida en la última versión del SIG IDRISI como módulo experimental, enriqueciendo el bloque dedicado al análisis de series temporales.

Una cadena de Markov recibe el nombre del matemático ruso Andrei Markov lo define como una serie de eventos en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inminente anterior. Las cadenas de este tipo recuerdan el último evento y eso condiciona las posibilidades de eventos futuros (Sánchez, M. 2012).



Esta función permite integrar la modelización temporal (basándose en una serie cronológica de usos del suelo) y la lógica basada en la evaluación multicriterio y multiobjetivo (mediante la puesta en relación de las categorías de usos del suelo y un conjunto de variables de diversa naturaleza que pueden explicar o describir su dinámica), es decir, complementa el análisis multitemporal con el análisis multivariable para obtener una modelización más ajustada a la dinámica real de los paisajes. Además de ello, un algoritmo de automatismo celular mide la contigüidad local e incrementa la probabilidad de pertenecer a una categoría por vecindad.

El módulo de las cadenas de Markov (MARKOV) simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes. Esto significa que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema, que, en nuestro caso, corresponde a la evolución de los usos del suelo. Se trata de un procedimiento discreto en un tiempo discreto, en donde el valor en el tiempo  $t_1$  depende de los valores en los tiempos  $t_0$  y  $t-1$  (cadena markoviana de segundo orden).

El algoritmo compara dos mapas de ocupación del suelo que se suceden cronológicamente, y estima y configura una matriz de probabilidad de transición. La predicción se materializa en una serie de mapas de ocupación del suelo (uno para cada categoría) para un tiempo futuro, en donde el nivel digital de cada píxel expresa la probabilidad de pertenecer a la categoría analizada. Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T. y Menor Toribio, J. (2003).

# CAPÍTULO II.

## CARACTERIZACIÓN

### 2.1 Localización

El estado de Tlaxcala está situado en la región centro-oriental de la República Mexicana sobre la Meseta de Anáhuac, entre los 2 200 y 4 400 m de altura sobre el nivel del mar (INEGI y Gobierno del Estado de Tlaxcala, 2003). Cuenta con una extensión territorial de 3,991 km<sup>2</sup>, colinda al Norte, Oriente y Sur con el estado de Puebla, al Noroeste con el estado de Hidalgo y al Oeste con el estado de México, para su administración está dividido en 60 municipios, en el censo del 2010 su población fue de 1169 936 individuos.

El estado de Tlaxcala está dividido en seis regiones: Norte (Tlaxco), Oriente (Huamantla), Poniente (Calpulalpan), Centro-Norte (Apizaco), Centro-Sur (Tlaxcala) y Sur (Zacatelco). (Ley de Desarrollo Rural Sustentable, 2001).

El estado de Tlaxcala se encuentra dividido en tres Distritos: el 163, con sede en Calpulalpan que cuenta con 11 municipios y concentra el 43% del área cultivable; el 164, situado en la ciudad de Tlaxcala, abarca 36 municipios y ocupa el 26.7% del área sembrada; y, el 165, ubicado en Huamantla que incluye 13 municipios y el 30.3% del área agrícola.

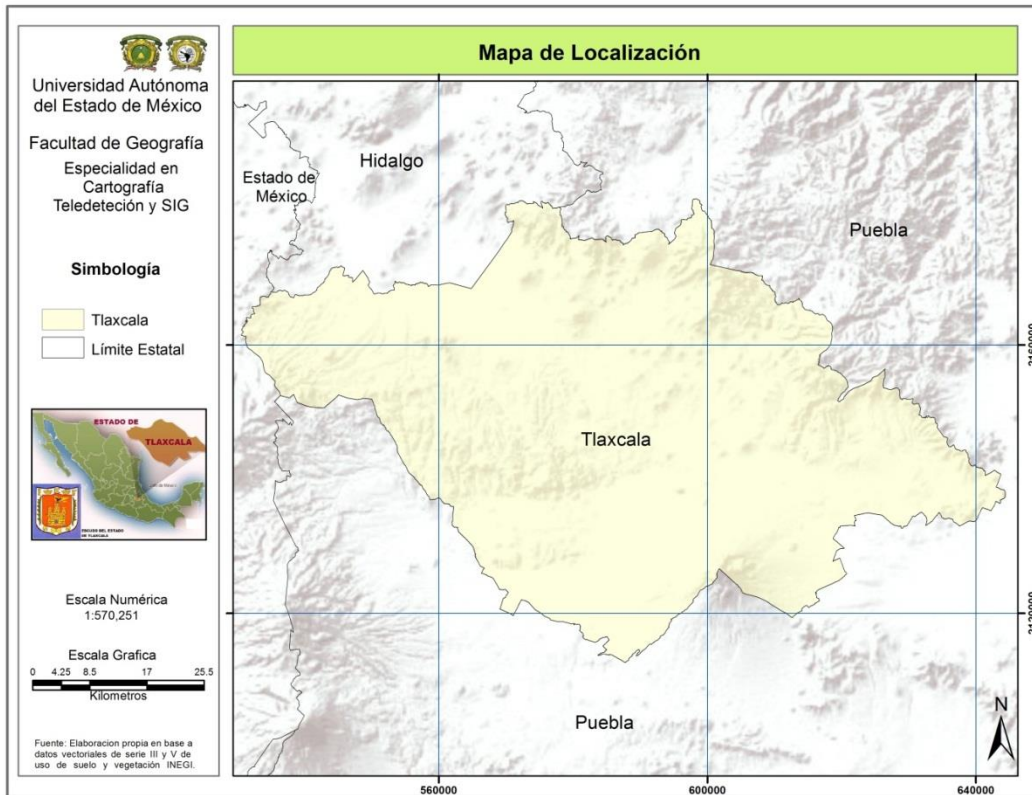


Figura 2.1 Mapa de localización

Fuente: Elaboración propia en base a datos vectoriales INEGI.

## 2.2 Clima

Predomina en el estado de Tlaxcala el clima C(w1)(w)-templado subhúmedo con lluvias en verano, su grado de humedad se considera intermedia, la precipitación invernal es menor al 5% respecto al total anual, mientras que el mes más seco presenta menos de 40 mm, la temperatura promedio oscila entre 12° y 18°C. Este tipo de clima se distribuye ampliamente en dirección Noroeste-Sureste, abarcando parte de las regiones del estado.

## 2.3 Fisiografía

El estado está ubicado dentro de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico y la subprovincia fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac la cual es la más extensa de las 14 que integran el Eje Neovolcánico. En el límite del estado de Tlaxcala se localiza el Matlacueye o Malinche, este pico domina el panorama del valle de Puebla-Tlaxcala, con sus 4 420 msnm. El Parque Nacional Malinche ubicado al Sur Oriente del estado de

Tlaxcala forma parte del Eje Neovolcánico, comprende una superficie de 45 852.45 hectáreas, de las cuales 31 418.638 hectáreas corresponden al Estado de Tlaxcala.

#### **2.4 Edafología**

El estado de Tlaxcala no cuenta diversidad edáfica debido al clima, son suelos originados principalmente de la caída de cenizas volcánicas y de rocas ígneas como andesitas, basaltos, brechas volcánicas, brechas sedimentarias, depósitos aluviales y limotitas - arenisca; se clasifican de acuerdo a su morfología, características físicas y químicas. (INEGI 2009).

#### **2.5 Hidrología**

El territorio del Estado forma parte de tres regiones hidrológicas: Balsas, Pánuco y Tuxpan-Nautla. La región hidrológica del Balsas se encuentra en prácticamente las seis regiones del estado, siendo su cobertura menor en la región Poniente (Calpulalpan) y Norte (Tlaxco). Dentro de esta región hidrológica se encuentra comprendida la cuenca del Río Atoyac, la cual coincide con la misma cobertura de la región hidrológica, ambas cubren el 74.46% de la superficie estatal no obstante, existen cuatro subcuencas dentro de esta delimitación la de mayor extensión corresponde al río Zahuapan, cubre gran parte de la región Norte (Tlaxco), Centro Norte (Apizaco), Centro Sur (Tlaxcala), Sur (Zacatelco), Poniente (Calpulalpan) y unas pequeñas porciones de Oriente (Huamantla).

#### **2.6 Uso de suelo y vegetación**

Uno de los temas más importantes para el análisis geográfico es sin duda el uso de suelo y el tipo de vegetación; por medio del primero se empieza a comprender e inferir la situación física, social y económica de la región que atañe, puesto que se identifica el sector de las actividades económicas que en ella se desenvuelven y que al mismo tiempo requieren cada vez más la presencia y abastecimiento de los recursos naturales presentes en el entorno.

## 2.7 Vegetación

Los tipos de vegetación existentes en el Estado, están estrechamente relacionados con el clima, suelo y relieve. Tlaxcala presenta paisajes florísticos de bosque de pino principalmente en los municipios de Tlaxco y Calpulalpan, en esta última se localiza una importante zona de variantes arbóreas y arbustivas, además de la zona ecológica Nanacamilpa. Al sur del estado entorno al volcán Malinche, se encuentra una gran densidad de bosque de pino. Una especie característica del territorio tlaxcalteca es el sabino- JuniperosdeppeanaStend- que ocupa grandes extensiones en la llanura central de la entidad entre Tlaxco-Apizaco-El Rosario.

El bosque de encino se encuentra en cinco de las seis regiones del estado de Tlaxcala, con mayor densidad en las regiones Calpulalpan y Tlaxcala, sin embargo el cubrimiento es disperso y en diferentes tamaños, al norte de la región Tlaxco y en el centro de las regiones de Apizaco y en la zona baja del volcán en la región Zacatelco. El bosque de oyamel se distribuye sobre la zona ecológica Nanacamilpa en la región Calpulalpan, también en las regiones Tlaxco, Huamantla y en la cercanía de la cima de la Malinche y finalmente el Bosque de táscate está localizado en la regiones de Tlaxcala, Tlaxco, Calpulalpan, Apizaco, Zacatelco y Huamantla, en esta última su presencia es escasa. Es evidente, que en el estado de Tlaxcala, aun se tienen grandes extensiones de bosques con vegetación primaria, aunque también grandes zonas de estos bosques ya transitan hacia vegetación secundaria, esto es porque tanto la vegetación actual como el uso de suelo han tenido fuertes transformaciones.

## 2.8 Uso de suelo

El uso de suelo muestra el tipo de actividad económica que se desarrolla en la entidad, su importancia para los habitantes y demás sectores económicos que se interrelacionan se pueden deducir a través de la identificación de la misma; se puede observar que hay varios tipos de uso: agrícola, bosques cultivados y localidades. En función del tipo de agricultura (temporal o riego), o de su temporalidad (anual, permanente o semipermanente).

Tabla 2.1 Tipo de uso de suelo

Clave	Tipo de uso	%
TA	Agricultura de temporal anual	40.53
TAP	Agricultura de temporal anual permanente	16.38
ZU	Zona urbana	14.27
RAS	Agricultura de riego anual semipermanente	3.17
RA	Agricultura de riego anual	1.17
H2O	Cuerpo de agua	0.36
RS	Agricultura de riego semipermanente	0.18
TP	Agricultura de temporal permanente	0.03
TAS	Agricultura de temporal anual semipermanente	0.02
BC	Bosque cultivado	0.02
AH	Asentamientos humanos	0.00
RP	Agricultura de riego permanente	0.00

Fuente. INEGI. Carta de uso de suelo y vegetación. Serie IV. Escala 1:250,000

## 2.9 Uso potencial del suelo

El uso potencial del suelo, es una representación interpretativa de las condiciones ambientales y en especial de las condiciones del suelo, en términos de su comportamiento como factores limitantes del uso agrícola, pecuario y/o forestal a que puede destinarse un determinado espacio geográfico.

## 2.10 Uso potencial agrícola

El uso potencial del suelo en Tlaxcala, indica que de las actividades Agrícolas, en el territorio Tlaxcalteca, se practica el 50% (200,281.87 hectáreas) por agricultura mecanizada continua, pudiendo ser de riego, en humedales o anuales. Como podemos ver la agricultura mecanizada continua, tiene un alto índice de presencia en todo el territorio tlaxcalteca, lo que indica la existencia de zonas de riego permanentes, por lo que puede ser considerado como un polo de desarrollo de zonas urbanas.

El área agrícola del estado es de cerca de 243 000 ha, 88.7% de temporal y 11.3% de riego, donde se siembran alrededor de 40 cultivos, siendo el más importante el maíz, ya que entre 1990-2003 el promedio anual sembrado fue de 136 513 ha.

## **2. 11 Uso potencial forestal**

Tenemos los terrenos no aptos para el aprovechamiento y explotación forestal, teniendo una superficie del 72% que es igual a (286,012.95 hectáreas), respecto a la calidad apta para explotación maderable y no maderable con orientación comercial y doméstica se tiene reportado el 1% y 2% lo equivalente a 2,723.6 hectáreas y 8,066.5 hectáreas respectivamente, dividido en cinco de las regiones más importantes del estado que son: región Poniente (Calpulalpan), región Norte (Tlaxco) y estas tres últimas que son, región sur, centro sur y oriente, tiene una zona en particular, el volcán La Malinche lo que implica un mayor control, otras de las categorías más de uso potencial, que corresponden a el uso apto maderable con orientación comercial y domestica con el 6% y 5% equivalente a 23213.3 hectáreas y 18167.18 hectáreas. INEGI, (2010).



# CAPÍTULO III.

### Capítulo III. METODOLOGÍA

Tradicionalmente la localización y cuantificación de los cambios de uso y ocupación del suelo se realizan a través de una sobre posición cartográfica y una tabulación cruzada, generando de esta manera mapas y tablas de cambio que permiten identificar la magnitud y distribución espacial de la dinámica del cambio Pineda (2010).

Se describe el análisis de cambio de uso de suelo y crecimiento de la frontera agrícola de distintos periodos por medio de las series geográficas de uso de suelo correspondiente a la serie III y serie V.

En la presente metodología se calculan las pérdidas, ganancias, cambios netos, intercambios y transiciones sistemáticas entre categorías aplicando los métodos desarrollados por (Pontius *et al.*, (2004) en Pineda 2010).

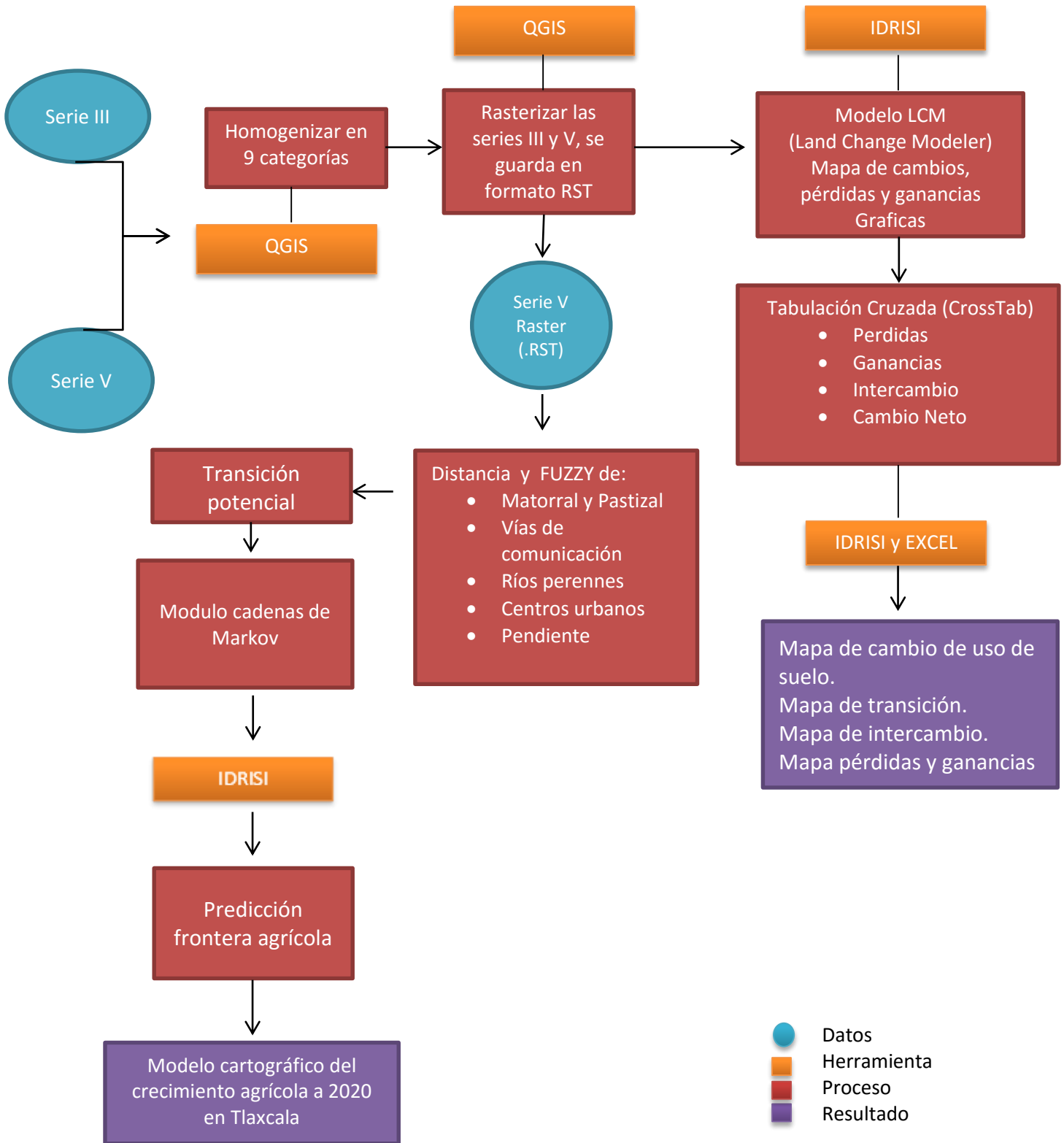
En la siguiente tabla se presentan las características de los insumos utilizados para la elaboración del análisis de cambio de uso de suelo y predicción del crecimiento agrícola.

Tabla 3.1 Insumos

Insumo	Fuente	Escala	Variable
<b>Estado de Tlaxcala</b>	División política estatal 1:250000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Aguascalientes, México.	1: 250 000	Limite Estatal
<b>Serie III de vegetación y uso de suelo.</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).	1: 250 000	Tipo vegetación
<b>Serie V de vegetación y uso de suelo.</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).	1: 250 000	Tipo vegetación

Fuente: Elaboración propia

### 3.1 Diseño Gráfico Metodológico



Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo y aplicación de algunos geoprocesos que conlleva este trabajo se utilizó software libre como es QUANTUM GIS (QGIS) puesto que es la tendencia de los Sistemas de Información Geográfica en la actualidad y principalmente porque la información es cada vez más georeferenciada y este software es capaz de satisfacer casi todas las funciones utilizadas en un SIG comercial o privado, además es gratis, es libre, está en constante desarrollo y es multiplataforma.

### **3.1 Etapa I**

Este trabajo se divide en dos etapas:

En la primera fase se realizó una selección de las series de Uso de Suelo y Vegetación otorgadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), donde se utilizaron los datos vectoriales escala 1: 250 000 de la Serie III del año 2002 y la Serie V del año 2012. Posteriormente se procedió al análisis de los atributos de cada una de las series III y V por medio del software QGIS con el objetivo de revisar la información de cada una de las capas.

Consecutivamente se realizó la homogenización de las categorías que trae las Series III y V por defecto, se cambiaron a 9 categorías principales que son:

- Agricultura
- Bosque de Coníferas
- Bosque de Encino
- Pastizal
- Asentamientos Humanos
- Cuerpo de agua
- Matorral
- Tular
- Sin vegetación

Posteriormente se llevó a cabo el proceso de rasterización en formato RST que es el formato nativo de IDRISI, para realizar el análisis de cambios de cada una de las series antes homogenizadas, durante este proceso en QGIS se rasterizó primero a formato TIFF, poniendo atención en el número de columnas, filas y el tamaño del pixel que corresponda

el mismo para ambas series, consecutivamente en QGIS se transforma el archivo a formato RST.

Continuando con la metodología, en el software de IDRISI se ejecutó la herramienta Land Change Modeler (LCM) para obtener los mapas de cambio y las gráficas de porcentajes con los indicadores de ganancias, pérdidas, intercambios, cambio total y cambio neto.

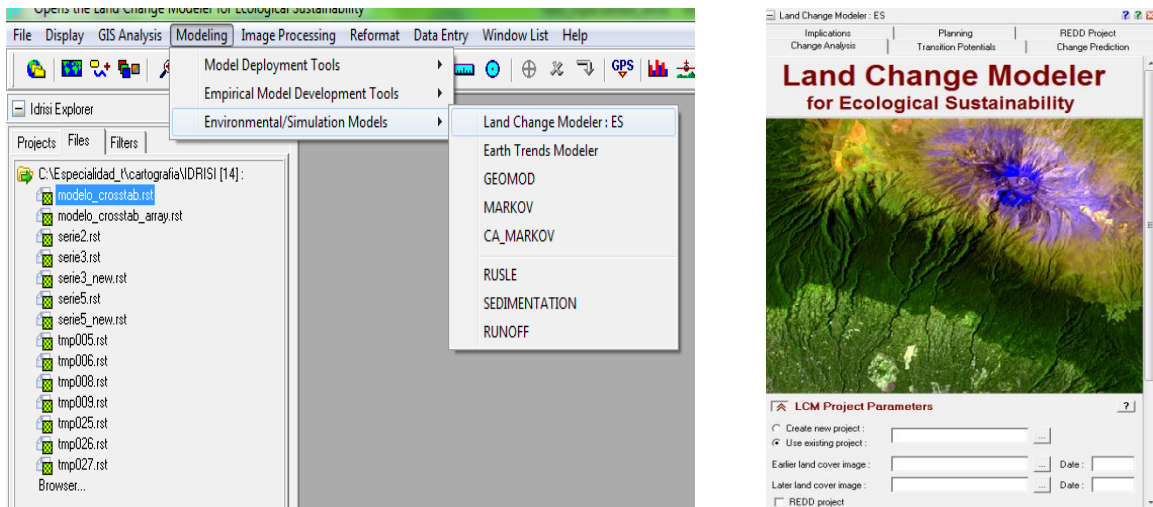


Figura 3.1 Modelador de cambio de cobertura

Siguiendo con el proceso se construyó la matriz de tabulación cruzada con los raster de las series siguiendo la metodología de Pontius que cuantifica en hectáreas y porcentajes las ganancias, perdidas, intercambio, cambio total, cambio neto. Esta matriz se realizó con el objetivo de comparar los resultados del módulo LCM.

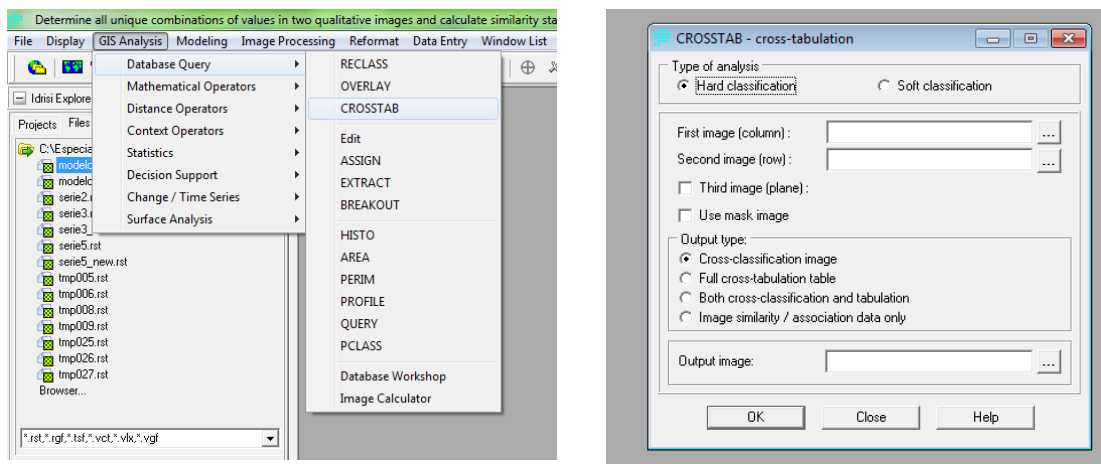


Figura 3.2 Tabulación cruzada

Los resultados que arrojó la herramienta de tabulación cruzada se exportaron a Excel, estos valores se encuentran en unidades de pixel el cual se convirtieron a hectáreas mediante la siguiente formula:

$$(\text{Resolución de la imagen en X}) * (\text{Resolución de la imagen en Y}) / 10\ 000$$

El resultado de la operación anterior se multiplica por los valores de cada una de las columnas de la tabulación cruzada y se obtiene los valores en hectáreas

Para realizar la metodología de Pontius es necesario trasladar los resultados de la tabulación cruzada a Excel para proceder a realizar los cálculos que sugiere esta metodología. Las operaciones que se necesitan realizar se presentan en la siguiente tabla y su respectiva formula.

Tabla 3.2 Parámetros Metodología Pontius

Parámetro	Descripción	Formula
Cambio total	Es la suma de la perdida y la ganancia, y nos indica el cambio total que experimento una cobertura.	Cambio total = (perdida + ganancia)
Perdida	Es la suma total por columnas de las categorías menos la persistencia (la diagonal de la matriz de tabulación cruzada), indica las pérdidas por cada categoría.	Perdida = suma total por columna – persistencia.
Ganancia	Es la suma total por filas de las categorías menos la persistencia (la diagonal de la matriz de tabulación cruzada), indica las ganancias por cada categoría.	Ganancia = Suma total por fila - persistencia
Cambio Neto	Es la resta de la perdida y la ganancia en valores absolutos, indica el total de lo que en realidad se perdió o gano en valores netos.	Cambio Neto = Valores absolutos (perdida – ganancia)
Intercambio	Dos veces el mínimo valor de las ganancias y las perdidas	Intercambio = 2 x min valor (perdida y ganancia).

Fuente: Elaboración propia

Los productos finales de esta primera fase son: la matriz de cambio de Pontius, mapa de cambio de uso de suelo, mapa de transición, mapa de ganancias y pérdidas y mapa de intercambio.

### 3.2 Etapa II

Para la segunda fase se procedió a la realización del modelo predictivo en el cual se utilizó el módulo de cadenas de Markov por medio de la herramienta de IDRISI Selva. Alcanzando previamente rasterizadas las series de uso de suelo III y V se generó el mapa de transición potencial de agricultura mediante la herramienta de Transition Potentials de IDRISI, para esto se utilizaron 6 variables que condicionan el avance de la frontera agrícola como son distancia matorral a pastizal, distancia a ríos, distancia a vías de comunicación, distancia a centros urbanos, pendientes de 0° a 30° y los cambios ocurridos de la agricultura entre serie III y serie V.

Según R. Miranda et. al (2011) las distancias que se utilizan para predecir los cambio en la cobertura agrícola se describen a continuación:

Tabla 3.3 Variables para predicción agrícola

Variable	Peso	Justificación
Distancia a Centros urbanos	0 – 20000 metros	Esta variable se utiliza porque la cobertura agrícola es probable que cambie si los centros urbanos se encuentran relativamente a una distancia menor debido a que es una distancia óptima para la comercialización de los productos agrícolas.
Distancia a Vías de comunicación	100 -300 metros	Esta variable se utiliza para determinar la distancia que existe de los campos agrícolas hacia las vías de comunicación ya que es primordial para los agricultores tener vías para el transporte del producto.
Distancia a Ríos perennes	10 – 100 metros	Esta variable es importante para el crecimiento de la agricultura pues es su recurso principal de abastecimiento y se establece por medio de canales a partir de ríos que son perennes.
Distancia a Matorral y Pastizal	0 – 200 metros	Esta variable se determinó a partir del análisis de cambio de uso de suelo entre las coberturas del 2002 al 2012 para conocer si esta variable determinara el crecimiento o decremento de la cobertura agrícola por su cercanía a estas áreas.
Pendiente	5° a 30°	Esta variable se determinó debido a que la agricultura crece en áreas que van de 0 a 30° de pendiente y es probable que en Tlaxcala se cumpla esta variable.

Fuente: Elaboración propia en base R. Miranda et. al (2011).

Las variables antes descritas se ponderaron para agregarles pesos específicos con la herramienta FUZZY.

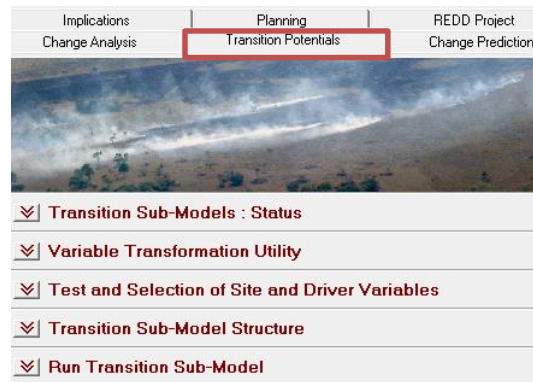


Figura 3.3 Transición potencial

Teniendo el mapa de transición potencial se procedió a realizar la predicción por medio de la herramienta Change Prediction, obteniendo como producto final el mapa de predicción de crecimiento de la frontera agrícola al 2020.

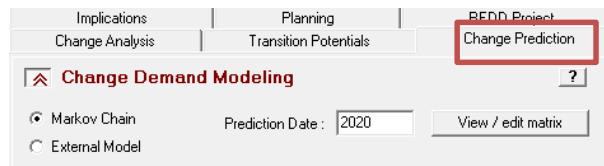


Figura 3.4 Predicción de cambios



# CAPÍTULO IV.

## RESULTADOS

### 4.1 HOMOGENIZACIÓN DE CATEGORÍAS

Se revisaron y compararon las tablas de atributos de cada una de las series de uso de suelo y vegetación, en ella se analizaron las categorías que contenían cada columna, posteriormente se precedió a homologar las categorías a solo una como se muestra en las siguiente tablas de acuerdo a las características comunes entre cada tipo de uso de suelo de cada serie.

Tabla 4.1 Categorías de la Serie III

Categorías	Nueva categoría	Categorías	Nueva categoría
Agricultura de temporal	<b>Agricultura</b>	Matorral Xerofilo	<b>Matorral</b>
Agricultura de riego		Matorral crasicaule	
Bosque encino	<b>Bosque encino</b>	Matorral desértico rosetofilo	
Bosque pino-encino		Asentamientos humanos	<b>Asentamientos humanos</b>
Bosque pino	<b>Bosque coníferas</b>	Zona urbana	
Bosque de oyamel		Cuerpo de agua	<b>Cuerpo de agua</b>
Bosque de táscate		Tular	<b>Tular</b>
Pastizal inducido		<b>Pastizal</b>	Sin vegetación
Pastizal halófilo			
Pradera de alta montaña			

Fuente: Elaboración propia

Para la serie III en su tabla de atributos existen 18 categorías (ver tabla 4.1) y para la serie V (ver tabla 4.2) existen 24 categorías, el cual para la realización de este trabajo se decidió hacer 9 categorías para ambas series, debido a que facilita el análisis de cambio de las series correspondientes.

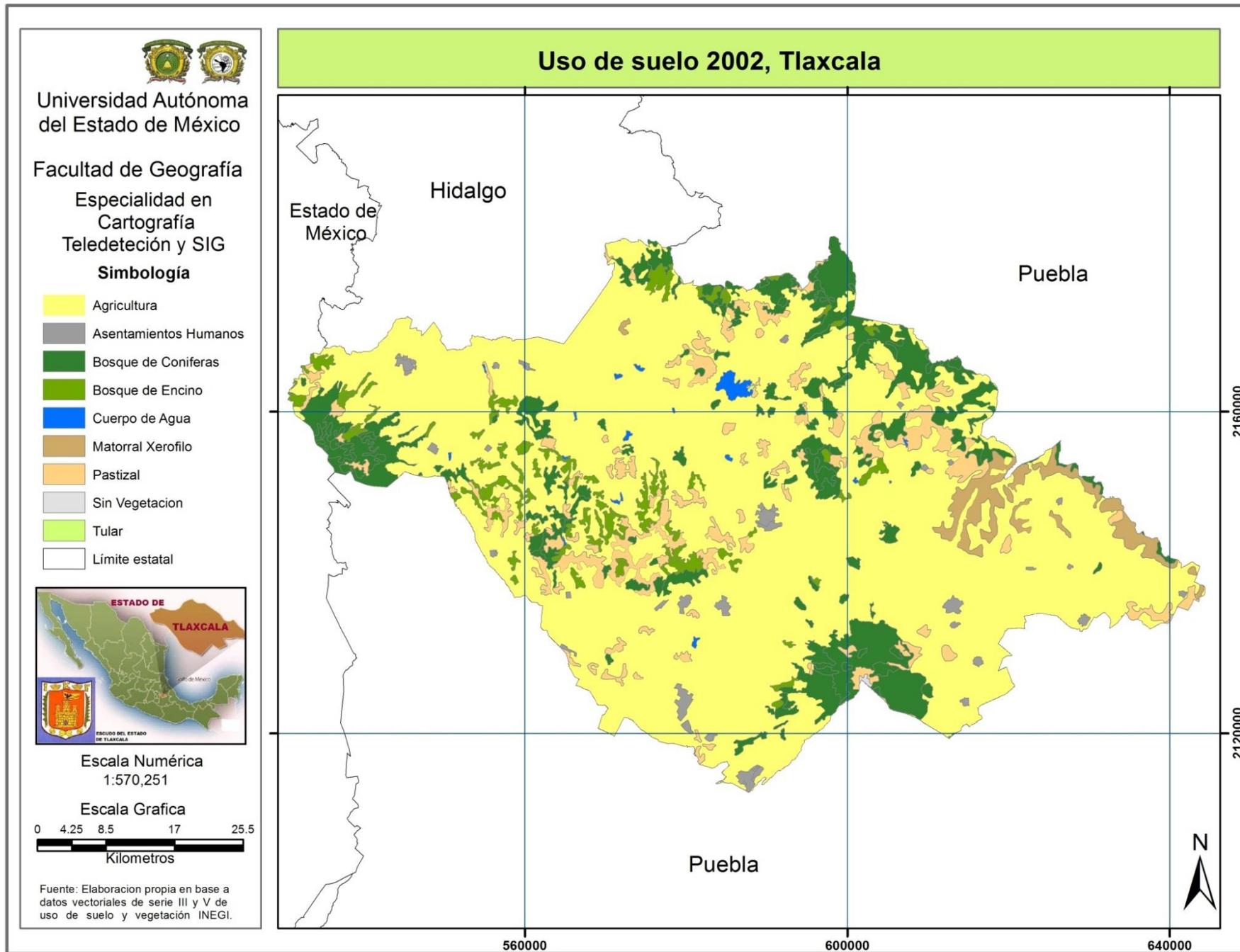


Figura 4.1 Mapa de Uso de Suelo 2002

Tabla 4.2 Categorías de la Serie V

Categorías	Nueva categoría	Categorías	Nueva categoría
Agricultura de temporal anual	<b>Agricultura</b>	Bosque pino	<b>Bosque coníferas</b>
Agricultura de temporal anual y semi permanente		Bosque de oyamel	
Agricultura de temporal permanente		Bosque de táscate	
Agricultura de riego anual		Vegetación secundaria de coníferas	
Agricultura de riego anual y semi permanente		Pastizal inducido	<b>Pastizal</b>
Agricultura de riego permanente		Pastizal halófilo	
Agricultura de riego semipermanente		Pradera de alta montaña	<b>Matorral</b>
Bosque encino		Matorral crasicaule	
Bosque pino-encino	<b>Bosque encino</b>	Matorral desértico rosetoñilo	<b>Asentamientos humanos</b>
Bosque encino-pino		Asentamientos humanos	<b>Cuerpo de agua</b>
Vegetación secundaria de encino		Cuerpo de agua	<b>Tular</b>
		Tular	<b>Sin vegetación</b>
		Sin vegetación	

Fuente: Elaboración propia

Subsiguientemente ya teniendo las nuevas categorías , se rasterizó la capa con los valores de la nueva columna creada en formato TIFF, posteriormente se transformó este nuevo archivo al formato que trabaja IDRISI que son archivos .RST para proceder al análisis de cambios de uso de suelo.

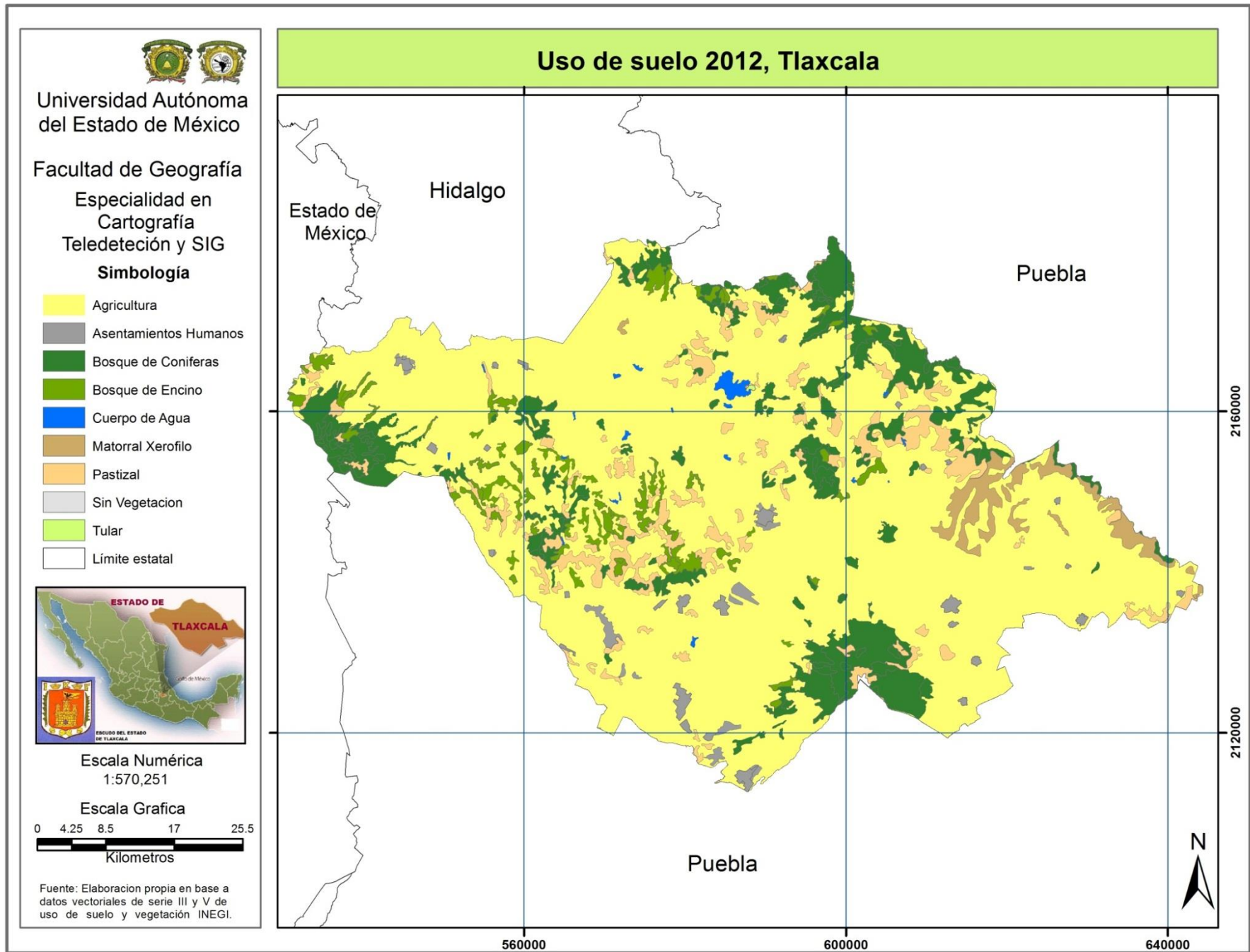


Figura 4.2 Mapa de Uso de Suelo 2012, Tlaxcala

## 4.2 CAMBIO DE USO DE SUELO

Para el análisis de cambio de uso de suelo se utilizó el software Idrisi donde se ejecutó la herramienta Land Change Modeler , en el cual se seleccionaron las series de vegetación III y V que previamente se habían guardado en formato .RST, se crea un nuevo modelo dentro de la herramienta, se agregan las series correspondientes y se coloca el año de creación de cada una de estas, para la serie III el año 2002 y la serie V el año 2012.

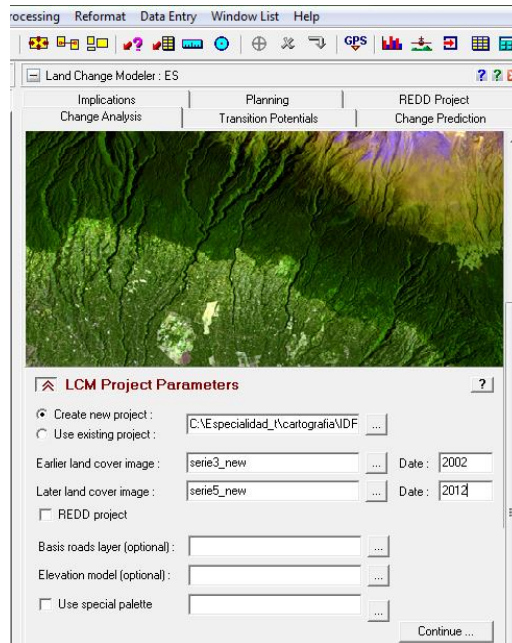


Figura 4.3 Herramienta LCM

Una vez ejecutada la herramienta aparece un menú con diferentes opciones de análisis de los cambios de las coberturas, en la parte superior aparece los análisis de cambios por categorías en diferentes unidades de medida acompañados de múltiples graficas que indican las pérdidas y ganancias entre las dos series de uso de suelo. En la parte inferior se encuentra el menú de mapas de cambios en el que podemos crear y visualizar diferentes mapas como son los mapas de cambios, persistencia, pérdidas y ganancias, mapa de transición entre diferentes categorías y mapa de intercambios, todos estos elementos mencionados son importantes para la realización de este proyecto.



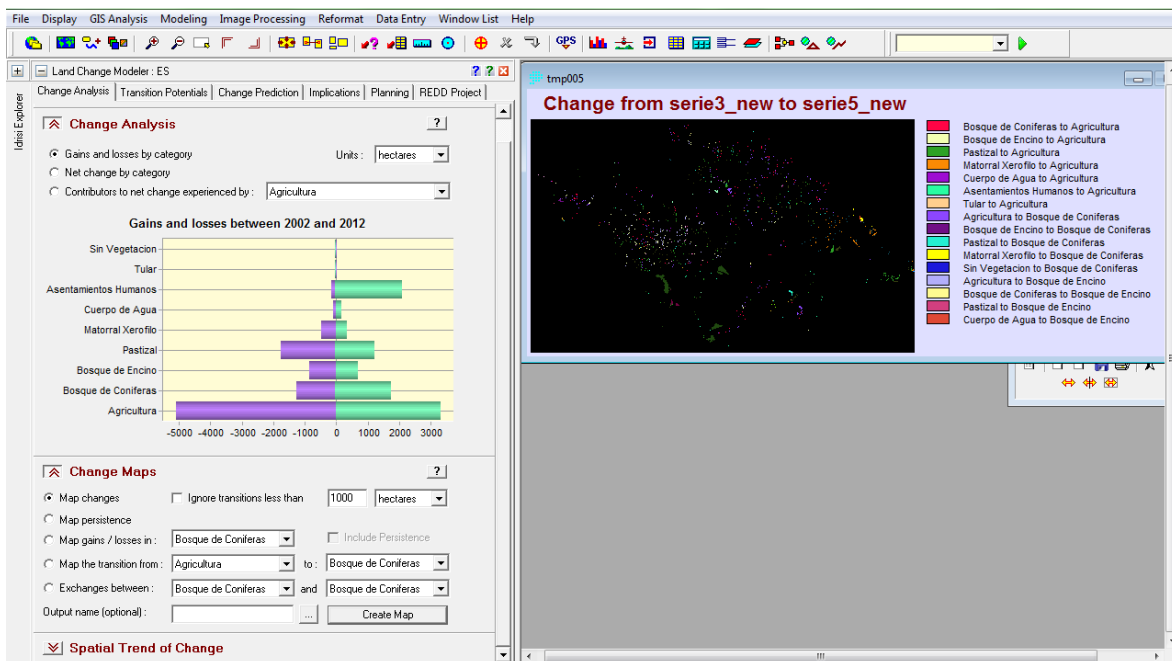


Figura 4.4 Resultado del LCM

### 4.3 ANÁLISIS DE CAMBIOS

#### 4.3.1 Matriz de cambios y modelación cartográfica

La siguiente tabla representa en hectáreas y porcentajes, las ganancias, pérdidas, cambio total, cambio neto e intercambio, se muestran los resultados obtenidos partir de la construcción de la matriz de tabulación cruzada de cada categoría del tiempo 1 y tiempo 2 que corresponde a las serie III y V de INEGI respectivamente.

Tabla 4.3 Tabulación Cruzada

	total 2002	%	total 2012	%	Perdida	%	Ganancia	%	cambio total	%	intercambio	%	cambio neto	%
Agricultura	293014.4	73.3	294787.7	73.8	5082.2	52.4	3308.9	34.1	8391.2	43.3	6617.8	46.5	1773.3	34.4
Bosque de Coniferas	51106.6	12.8	50598.1	12.7	1262.5	13.0	1771.0	18.3	3033.5	15.7	2525.0	17.7	508.5	9.9
Bosque de Encino	13228.5	3.3	13375.7	3.3	852.3	8.8	705.1	7.3	1557.4	8.0	1410.2	9.9	147.3	2.9
Pastizal	25203.3	6.3	25712.1	6.4	1763.1	18.2	1254.3	12.9	3017.3	15.6	2508.6	17.6	508.8	9.9
Matorral Xerofilo	8761.6	2.2	8905.8	2.2	477.1	4.9	333.0	3.4	810.1	4.2	665.9	4.7	144.2	2.8
Cuerpo de Agua	1575.8	0.4	1488.3	0.4	86.9	0.9	174.4	1.8	261.3	1.3	173.8	1.2	87.5	1.7
Asentamientos Humanos	6425.2	1.6	4467.2	1.1	157.9	1.6	2115.9	21.8	2273.9	11.7	315.9	2.2	1958.0	38.0
Tular	59.2	0.0	39.0	0.0	2.0	0.0	22.2	0.2	24.2	0.1	4.0	0.0	20.3	0.4
Sin Vegetacion	114.3	0.0	115.1	0.0	5.8	0.1	5.0	0.1	10.8	0.1	10.0	0.1	0.8	0.0
<b>Total</b>	<b>399488.9</b>	<b>100</b>	<b>399489</b>	<b>100</b>	<b>9689.8</b>	<b>100</b>	<b>9689.8</b>	<b>100</b>	<b>19379.7</b>	<b>100</b>	<b>14231.2</b>	<b>100</b>	<b>5148.53837</b>	<b>100</b>

Los resultados observados en la tabulación cruzada se destaca que el estado de Tlaxcala tuvo un cambio total de 5% (19 379.7 ha) respecto del total del estado que tiene una superficie de 399 484 ha, el cambio neto que presento fue de 1.3%, lo que conlleva a interpretar que el estado de Tlaxcala ha presentado algún tipo de cambio de uso de suelo.

En el siguiente mapa de cambios se representa a detalle los principales cambios del uso de suelo ocurridos en 10 años en los periodos del 2002 al 2012 en estado de Tlaxcala, principalmente se enfatizan las categorías que destacan un evidente cambio de uso de suelo. Entre estos cambios resalta la agricultura siendo la cobertura de más cambio representativo en el estado de Tlaxcala, el mapa muestra en la parte centro del estado, al Suroeste y en los límites del volcán Malinche las áreas que eran algún tipo de agricultura y fueron destinadas para asentamientos humanos en un periodo de 10 años.

Otra de las coberturas que representa cambios de uso de suelo es el pastizal como lo representa el mapa en tonos amarillos, son cambios que pasaron de la cobertura de pastizal a agricultura en un periodo de 10 años, estas áreas se ubican principalmente al Norte y al Este del estado cerca de los límites con el estado de Puebla.

Así mismo también en menor proporción destaca el cambio de agricultura a bosque de coníferas estos principalmente se localizan al Norte y Sureste del estado de Tlaxcala en tonalidades verdes. También se aprecia en el mapa en tonalidad de rojo el cambio de agricultura a pastizal este lo podemos observar al Norte y Este del estado.

Con lo expresado en los párrafos anteriores se puede concluir que en el estado de Tlaxcala los principales cambios en el uso de suelo son de agricultura que se convierten en asentamientos humanos o mancha urbana, este cambio es la realidad de la cobertura agrícola pues en la actualidad el desarrollo de los asentamientos humanos es a causa del abandono de tierras que antes eran de uso agrícola y por la venta de terrenos que ya no son productivos o que no generan algún tipo de ganancia a los propietarios.

Conociendo las coberturas con mayores cambios se procedió a analizar las pérdidas y ganancias de la agricultura y el pastizal debido a que son las coberturas con más cambio.



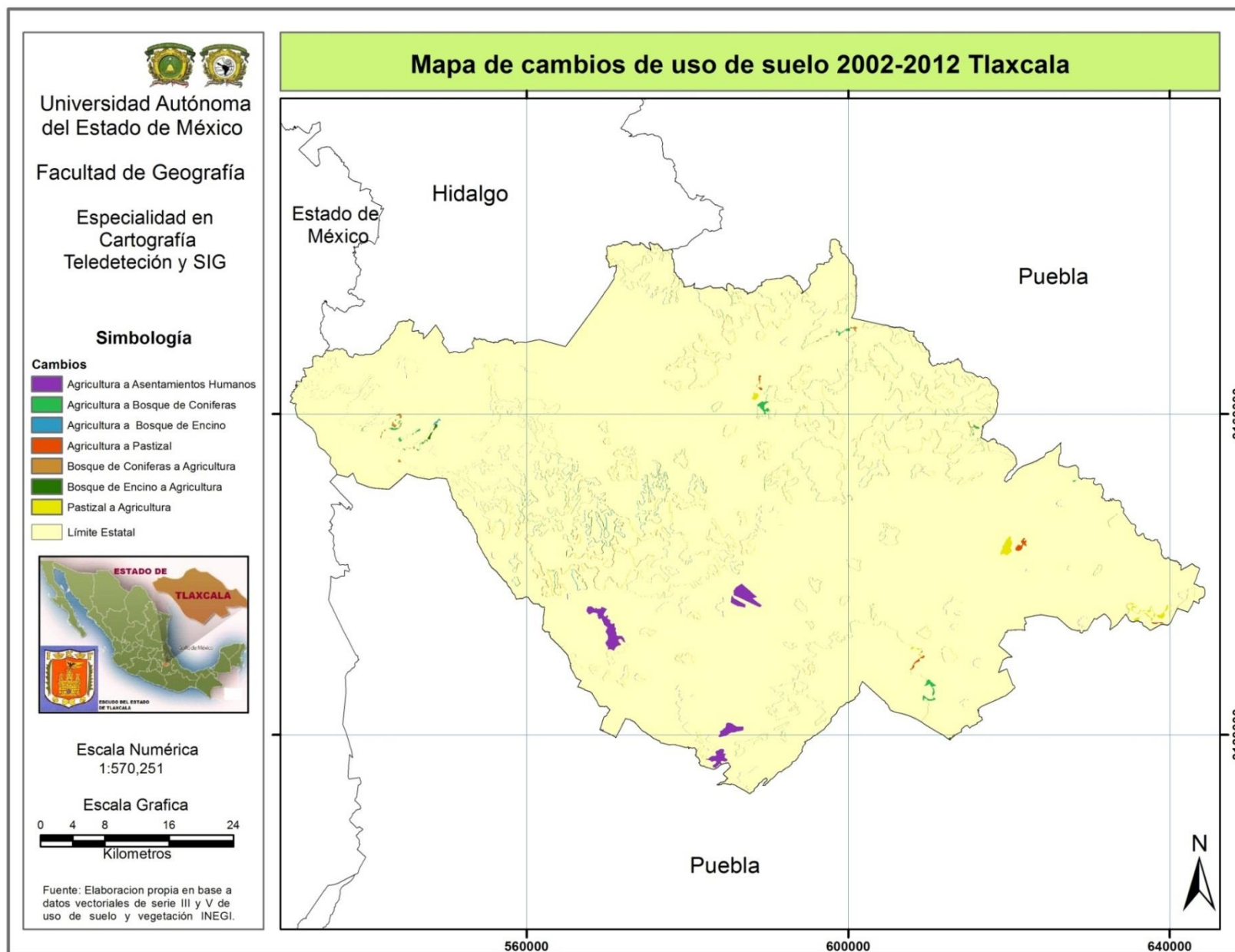
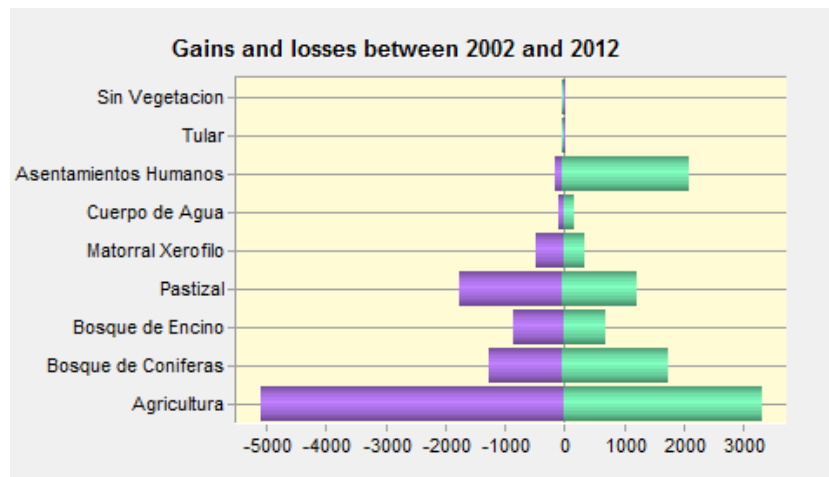


Figura 4.5 Mapa de Cambios de Uso de Suelo 2002-2012 Tlaxcala

### 4.3.2. Pérdidas y Ganancias

Los resultados obtenidos de la herramienta Land Change Modeler, arrojaron que la categoría que más ha sufrido cambios es la agricultura con un total de 8391 hectáreas de cobertura, de las cuales ha perdido 5082 hectáreas y ha ganado 3309 hectáreas, otra de las coberturas que presenta cambios importantes es el pastizal con un total de cambio de 3017 hectáreas donde se perdió 1763 y gano 1254 hectáreas.

Gráfica 4.1 Ganancias y Pérdidas entre 2002 y 2012



Por otra parte las coberturas que presentan cambios en menor medida es bosque de coníferas con un cambio total de 3033 hectáreas, las pérdidas de esta cobertura son de 1262 hectáreas y las ganancias de 1771 hectáreas, por último la cobertura de asentamientos humanos tiene un total de cambio 2273 hectáreas, las pérdidas de esta cobertura presentan 157 y las ganancias que se obtuvo fue 2115 hectáreas.

Los resultados anteriores expresaron que la cobertura que presenta una mayor pérdida corresponde a la agricultura con 5082 hectáreas que equivale al 52.4% del total de las pérdidas. De la misma forma la cobertura que presenta mayor ganancia corresponde a la agricultura con 3309 hectáreas que es equivalente 34.1% del total de las ganancias. Por otra parte otra cobertura que demuestra ganancias significativas es asentamientos humanos con un total de 2116 hectáreas que equivale al 21.8%.

En el siguiente mapa se observa a detalle las perdidas, ganancias y persistencia.



Universidad Autónoma  
del Estado de México

Facultad de Geografía

Especialidad en  
Cartografía  
Teledetección y SIG

### Simbología

-  Ganancias
-  Perdidas
-  Persistencia
-  Límite Estatal



Escala Numérica  
1:570,251

Escala Grafica



Fuente: Elaboración propia en base a  
datos vectoriales de serie III y V de  
uso de suelo y vegetación INEGI.

## Mapa de Ganancias y Perdidas en Agricultura

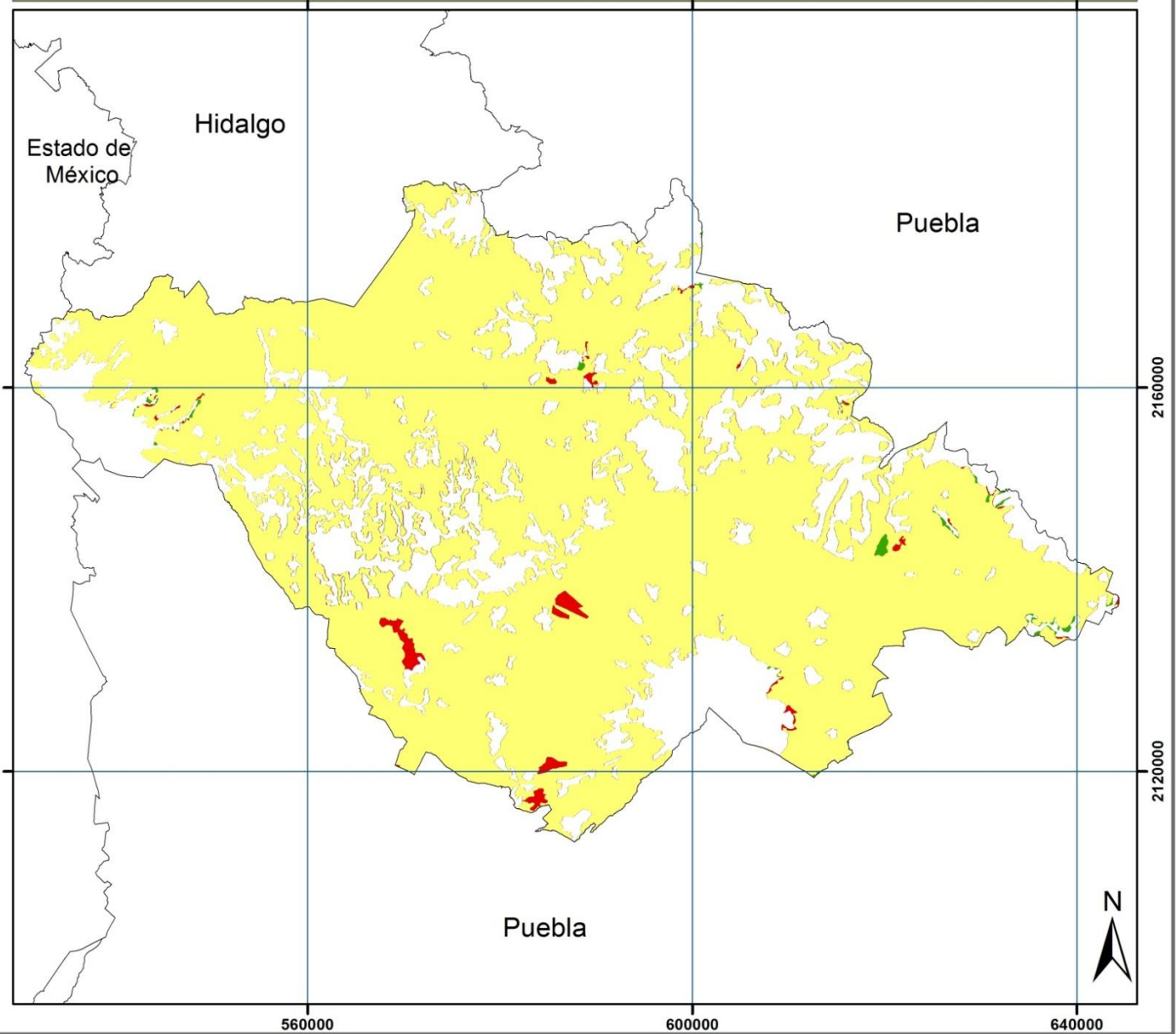


Figura 4.6 Mapa de Ganancias y Pérdidas en Agricultura

#### 4.3.2.1 Mapa de ganancias y pérdidas en la cobertura de agricultura

Este mapa representa las áreas que ganaron, perdieron o se mantuvieron sobre la cobertura agrícola, se visualizan las áreas donde se presentan cambios positivos y negativos en el estado de Tlaxcala.

En el mapa se observa que las ganancias representadas en tonos rojos se ubican principalmente al Centro, Sur y Suroeste del estado además son las de más representativas del mapa por ser las de mayor dimensión, son las áreas donde existe la pérdida de la cobertura agrícola entre el periodo 2002 y 2012.

Las ganancias dentro del mapa se encuentran en áreas de mayor tamaño al Este, mientras que la de menor tamaño se localiza la Norte del estado y se visualizan en tonos verdes, estas nos indican que son las áreas que pasaron de algún otro tipo de uso de suelo a cobertura agrícola.

Finalmente la persistencia se encuentra representada con una tonalidad amarilla el cual muestra que en estas áreas no existió ningún tipo de cambio de uso de suelo, que a su vez en el tiempo 1 eran agricultura y el tiempo 2 siguen siendo agricultura.

De acuerdo al mapa de pérdidas y ganancias en agricultura se concluye que se perdió más cobertura agrícola que la que se ganó, esto se debe esencialmente a que se utilizan las áreas agrícolas para distintos fines tales como uso urbano y pastizal, mientras que las ganancias provienen de los bosques de coníferas y encinos, en menor medida de pastizales.

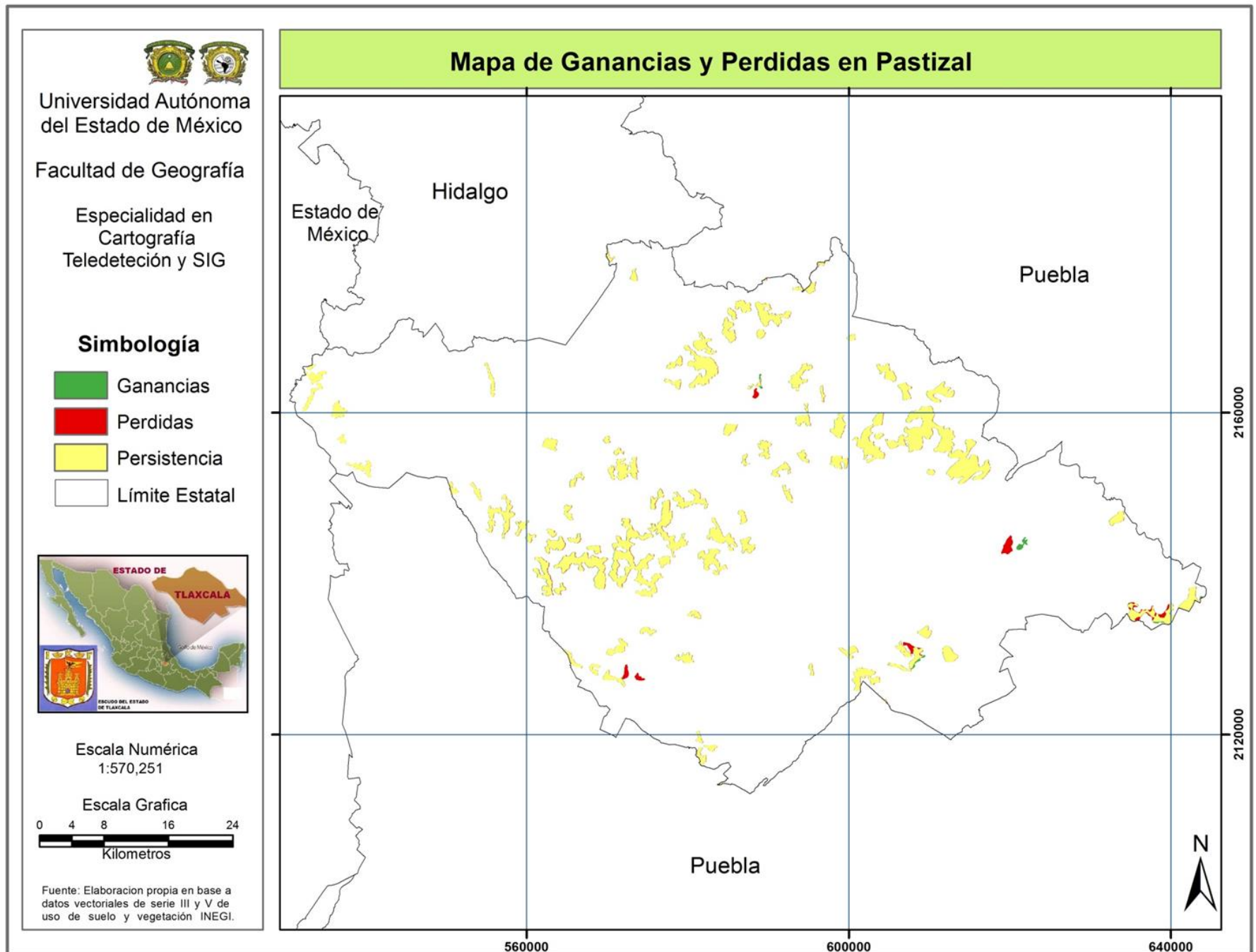


Figura 4.7 Mapa de Ganancias y Pérdidas en Pastizal

#### 4.3.2.2 Mapa de ganancias y pérdidas en Pastizal

Este mapa representa las áreas de uso de suelo pertenecientes a la cobertura pastizal que presentaron cambios de ganancias, pérdidas y las que se mantuvieron sin cambio en la superficie del estado de Tlaxcala.

Se describe a continuación las tonalidades que se encuentran representadas en el mapa:

En el mapa se representan en color rojo las áreas que perdieron uso de suelo de pastizal y se localizan al Norte, Sur y Este del estado, mientras que las ganancias se visualizan en color verde y se localizan al Norte y Este.

Finalmente en color amarillo se representan las áreas que corresponden a la persistencia, se encuentran distribuidas alrededor del estado pero concentrándose principalmente al Centro, estas indican que son las áreas que no presentaron ningún cambio entre los periodos de tiempo o en otras palabras son las que se mantuvieron a lo largo de 10 años.

De acuerdo al mapa se visualiza que las pérdidas son mayores que las ganancias, se puede observar que el área de mayor pérdida de pastizal se localiza al Este, mientras que la mayor ganancia está ubicada al Este, estas pérdidas se debe a que el uso de suelo de pastizal se está utilizando para uso agrícola y asentamientos humanos, por otra parte las ganancias se obtuvieron de los bosques de encino.

Una vez descritas las pérdidas y ganancias de las coberturas con mayor impacto de cambio se procede a calcular y analizar los cambios netos de todas las coberturas con el objetivo de puntualizar que usos de suelo tienen cambios reales o netos. De los resultados obtenidos se selecciona las coberturas con mayor cambio neto y se calcula las contribuciones hacia cada una de ellas así como su transformación hacia otras coberturas.

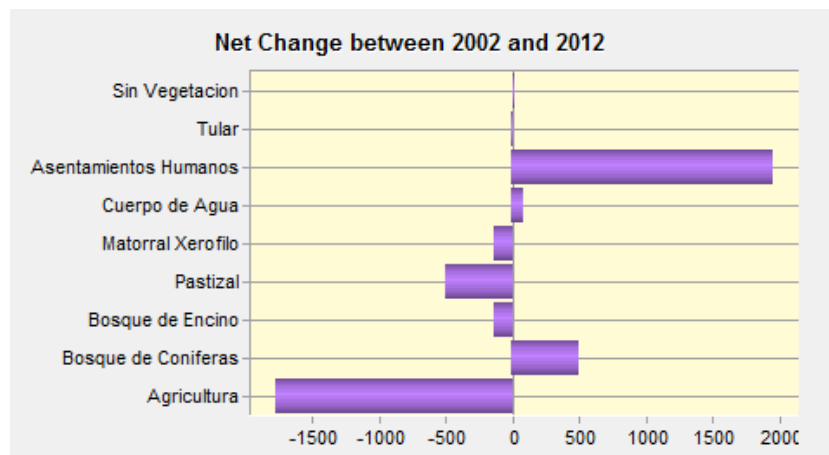


### 4.3.3 Cambio Neto

Los resultados de la siguiente grafica se obtuvieron restando los valores de las perdidas menos las ganancias y viceversa según corresponda a la cifra de mayor valor entre estas, los resultados generados de esta operación indican el valor perdido o ganado en productos absolutos, lo que se traduce al cambio real de las coberturas.

En la gráfica de cambios netos entre el periodo de 2002 y 2012 se observa que el uso que mostro mayor cambio corresponde al uso de suelo de asentamientos humanos con un total de 1958 hectáreas equivalente al 38% del total del cambio neto positivo, mientras que el uso de suelo de agricultura tuvo cambios netos negativos de 1773 hectáreas que corresponde al 34%.

Gráfica 4.2 Cambio neto entre 2002 y 2012



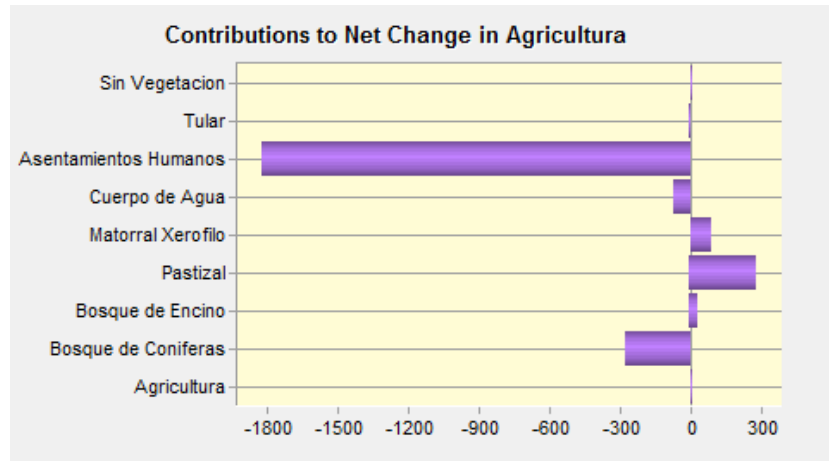
#### 4.3.3.1 Contribuciones al Cambio Neto

De acuerdo a la gráfica anterior de cambios netos los usos que tienen mayores cambios netos son los usos de agricultura, asentamientos humanos, bosque de coníferas y pastizal, se graficaron los intercambios entre estos y otras categorías, para conocer que uso de suelo está aportando a cada uno de los usos antes mencionados.

Los usos que contribuyen al decremento del cambio neto en agricultura son principalmente son los asentamientos humanos y los bosques de coníferas, mientras que el pastizal y en menor medida el matorral xerófilo aportan al crecimiento de la agricultura.

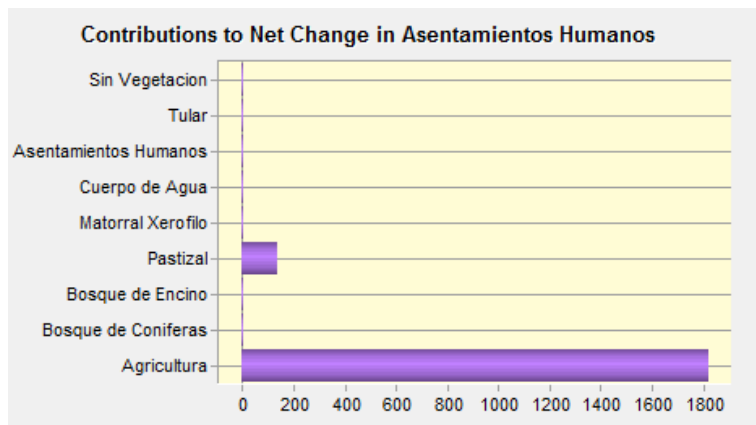
Estas contribuciones reflejan el sistema de cambio de usos de suelo a través del tiempo, en base al crecimiento de los asentamientos humanos y la necesidad del alto consumo de los recursos naturales, en la gráfica se observa que la agricultura está perdiendo terreno para convertirse en asentamientos humanos y a su vez gana terreno en favor del uso de suelo de pastizal.

Gráfica 4.3 Contribuciones al cambio neto en Agricultura



En la siguiente grafica se observan las contribuciones al uso de suelo de asentamientos humanos, el uso de suelo de agricultura es el principal contribuyente a los asentamientos humanos con 1820 hectáreas, seguida del pastizal con una aportación de 138 hectáreas, como se muestra la gráfica los asentamientos humanos no presentan perdidas por lo cual se mantienen.

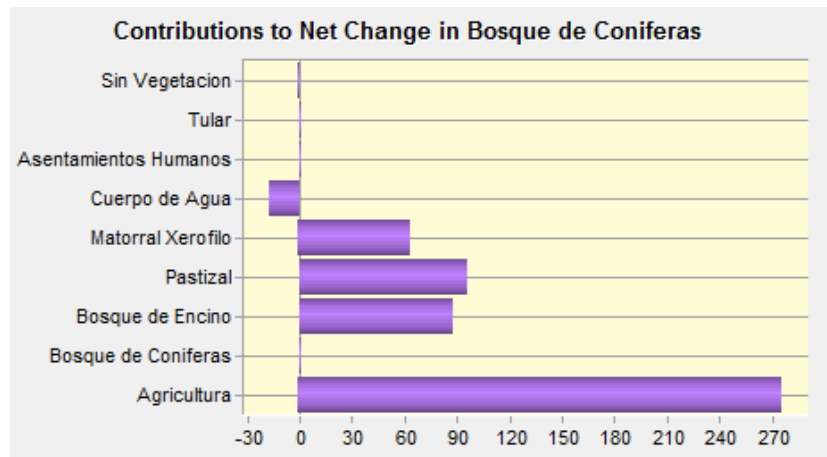
Gráfica 4.4 Contribuciones al cambio neto en asentamiento humanos





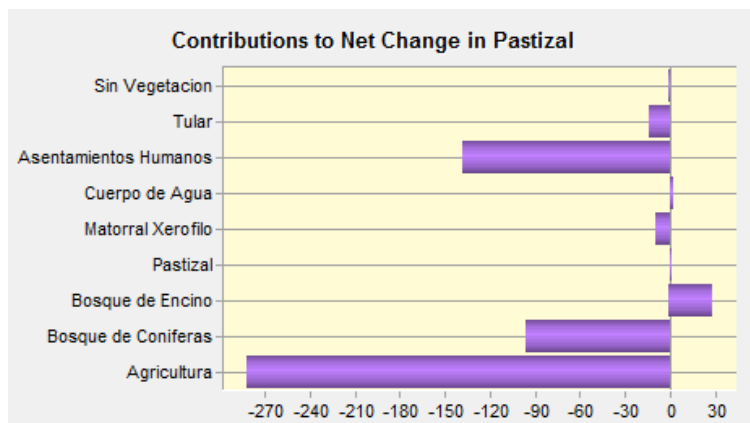
En la presente grafica se describen las contribuciones al uso de suelo de bosque de coníferas, en la cual interviene diversos tipos de uso de suelo como son agricultura principalmente con 276 hectáreas, seguida de pastizal con 96 hectáreas y por último el bosque de encino con 88 hectáreas, a su vez este uso de suelo no presenta pérdidas significativas por lo que sigue manteniéndose.

Gráfica 4.5 Contribuciones al cambio neto en bosque de coníferas



Siguiendo con el análisis de las gráficas las contribuciones para este tipo de uso de suelo de pastizal presenta su principal contribuyente el bosque de encino con 29 hectáreas, por otra parte las coberturas que están reemplazando al pastizal son en primer lugar la agricultura con 282 hectáreas, continuando por asentamientos humanos con 138 hectáreas y por ultimo bosque de coníferas con 96 hectáreas.

Gráfica 4.5 Contribuciones al cambio neto en pastizal



Posteriormente se realiza el mapa de transición con el objetivo de visualizar la transformación de las otras coberturas hacia el uso de suelo agrícola, esta se selecciona de acuerdo a la cobertura que mayores cambios presento en este caso es el uso de suelo agrícola.

#### **4.3.4. Mapa de transición a agricultura 2002 – 2012 Tlaxcala**

El mapa de transición a la cobertura agrícola entre el periodo 2002 a 2012 en el estado de Tlaxcala se observa en el siguiente mapa, en el cual se distingue que los usos de suelo que están cambiando a uso agrícola proviene de las coberturas de pastizal, matorral xerófilo y en menor medida bosques de coníferas y bosques de encinos.

Las áreas de pastizal a agrícola más representativas y de mayor extensión se localizan dentro del mapa en tonos verdes al Norte y Este del estado, las áreas de transición de matorral xerófilo a agricultura se ubican al Este del estado en color azul cerca de los límites con el estado de Puebla, otra de las coberturas que pasaron a uso de suelo agrícola es el bosque de coníferas y se localiza espacialmente al Norte y Oeste de Tlaxcala en color morado, finalmente la transición de la cobertura de bosque de encino a agricultura es la de menor extensión territorial y se representa en color rojo localizándose distribuida al Centro y Oeste del estado.

De acuerdo a la descripción anterior podemos deducir que las coberturas de pastizal y matorral son las de mayor contribución hacia la cobertura agrícola, estas transiciones son un fenómeno que ocurre de forma tradicional donde existen asentamientos humanos ya que estos aprovechan el uso de suelo de pastizal y matorral para convertirlos en uso agrícola por la demanda de recursos de estos asentamientos.

En este sentido y con la información presentada se ve cumplido el segundo objetivo, el cual se fundamenta en: Realizar un análisis de cambio de uso de suelo para el estado de Tlaxcala con énfasis en la cobertura agrícola.

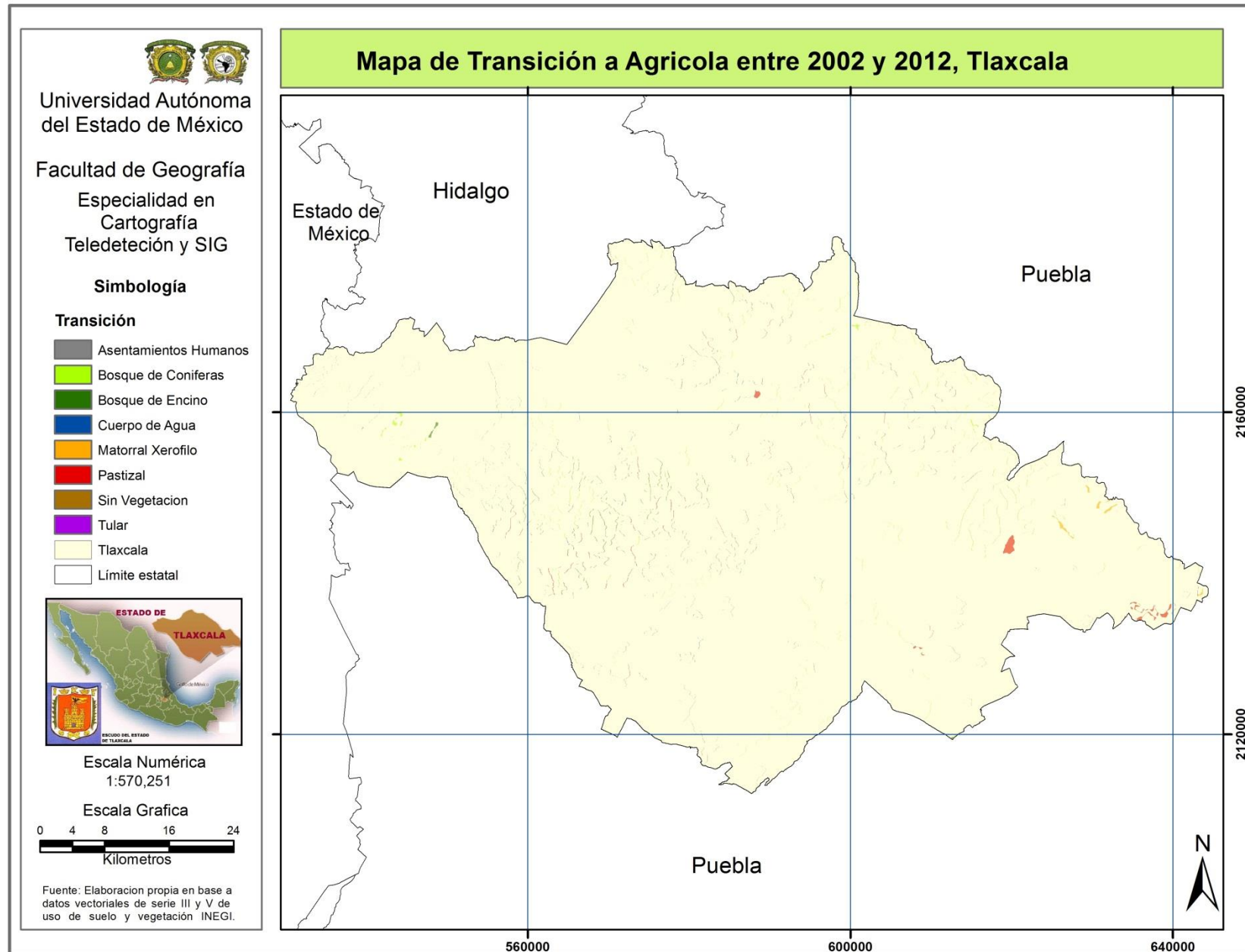


Figura 4.8 Mapa de Transición a Agricultura 2002 - 2012

#### 4.4 PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO DE LA FRONTERA AGRÍCOLA

Para realizar la predicción de crecimiento agrícola fue necesaria la utilización de 6 variables a las cuales se les asignaron pesos con la herramienta FUZZY el cual serán detonantes para condicionar el avance agrícola, estas variables se describen a continuación.

##### 4.4.1 Distancia a Matorral y Pastizal.

Para obtener la distancia del matorral y pastizal fue necesario primero reclasificar la cobertura del año 2012 con la herramienta RECLASS, el cual indicamos que nos asigne 3 nuevos valores donde 0 corresponde al fondo, el numero 1 corresponde al pastizal y finalmente el numero 2 pertenece al matorral. Tendremos como resultado de este proceso un mapa en el que solo tenemos el matorral y pastizal.

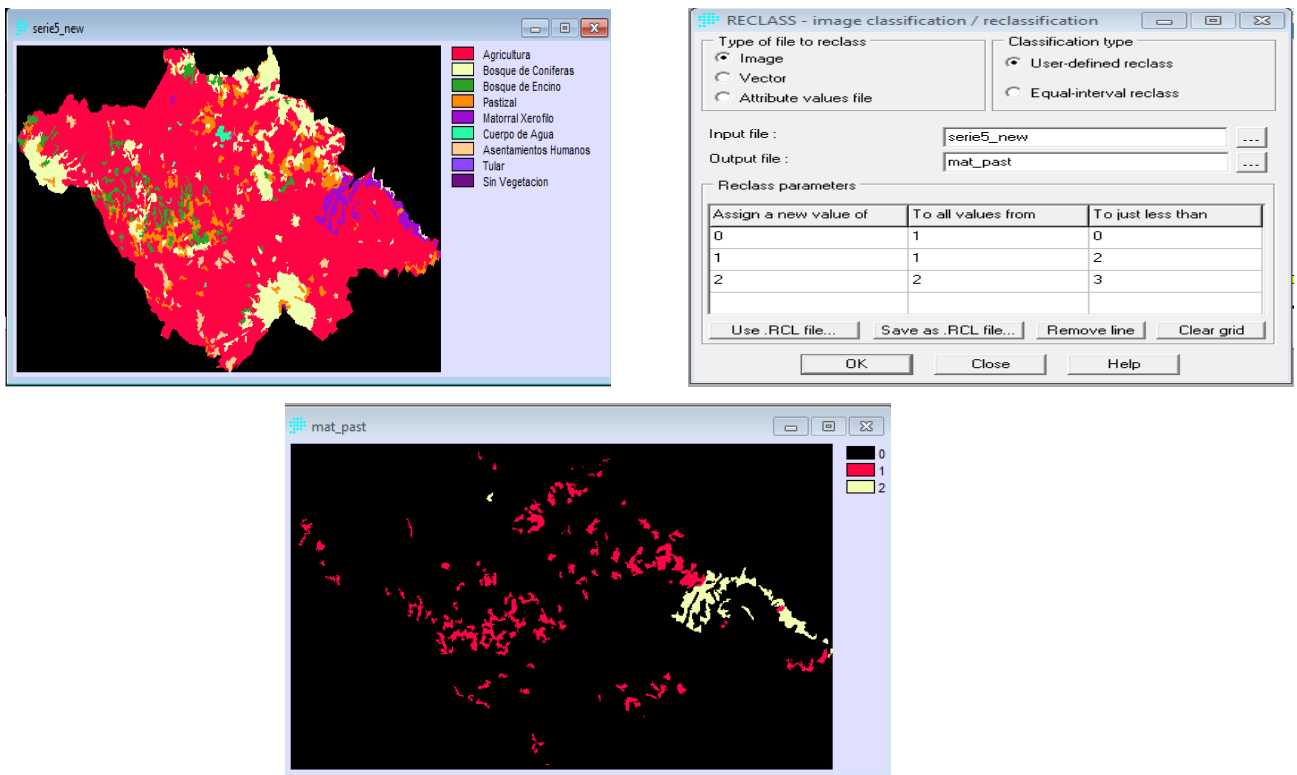


Figura 4.9 Reclasificación de Matorral y Pastizal

Posteriormente del mapa anterior se obtiene la distancia esto se realiza mediante DISTANCE de IDRISI y tendremos como resultado un nuevo mapa con las distancias del matorral y pastizal.

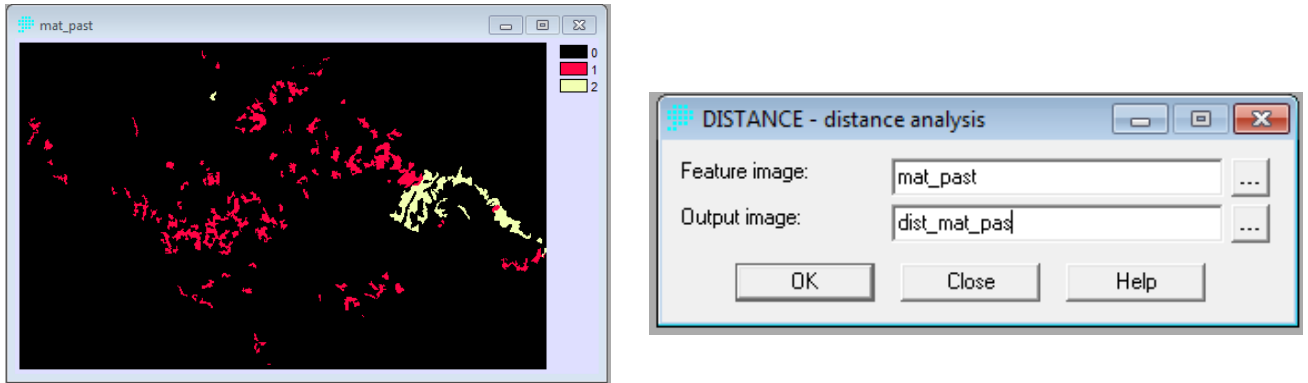


Figura 4.10 Distancia a Matorral y Pastizal

Consecutivamente el factor se normalizo con la función Sigmoidal Monotonically Decreasing de módulo FUZZY donde se requieren puntos de control C y D. El punto de control C es la distancia mínima y el punto de control D es la distancia máxima. La herramienta FUZZY sirve para agregar los pesos adecuados, para este caso fue de 0 a 200 m. que es la distancia mínima y máxima a la cual debe estar la cobertura de matorral y pastizal para ser considerada como un factor de crecimiento de la frontera agrícola.

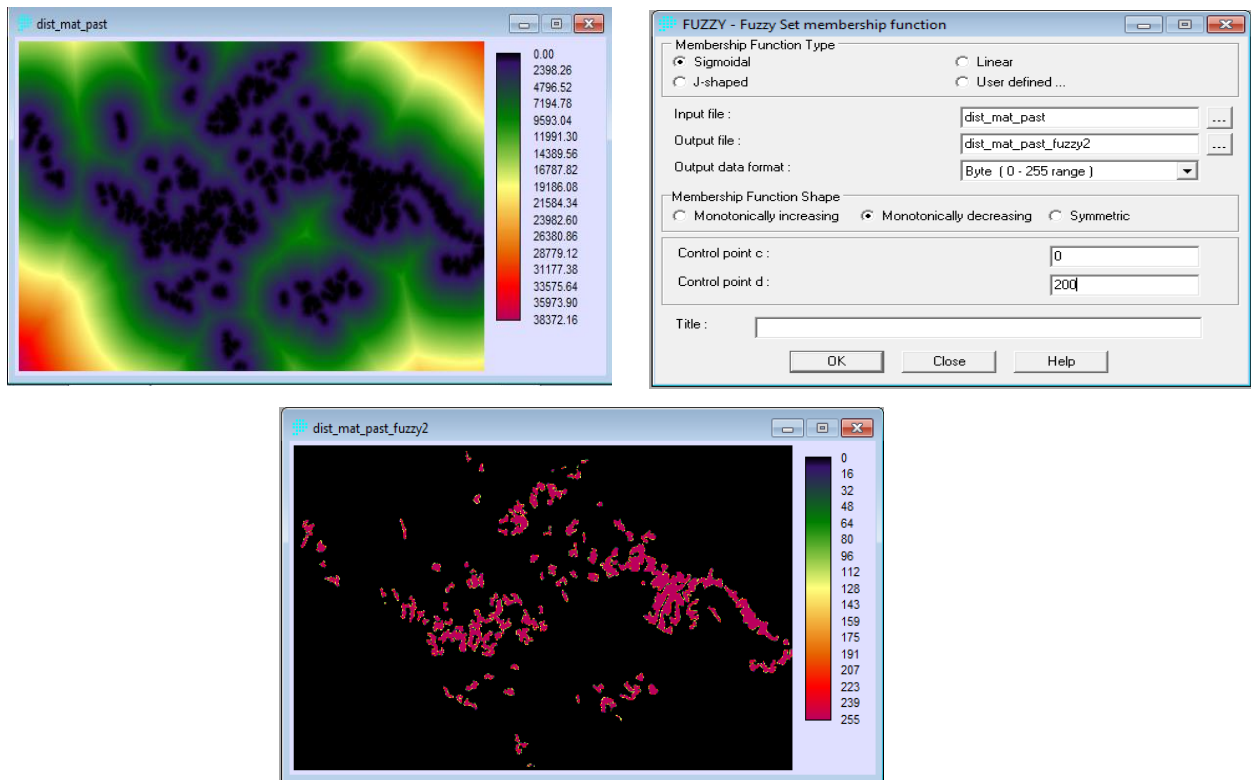


Figura 4.11 Fuzzy a Matorral y Pastizal

#### 4.4.2 Distancia a Ríos

Otro factor que determina el crecimiento de la expansión de la agricultura es la disponibilidad de agua para el riego de los cultivos, por tal motivo se consideró como factor para el modelo de predicción la distancia de este recurso hacia los que podría convertirse en agricultura en un momento dado.

Para crear el mapa de distancias de la red hidrológica para el estado de Tlaxcala, se utilizaron los ríos que son perennes y se discriminaron aquellos que son intermitentes. El proceso para obtener este mapa consiste en rasterizar desde vector los ríos que son perennes al formato de IDRISI, posteriormente se obtiene la distancia con la herramienta DISTANCE y obtenemos el siguiente mapa.

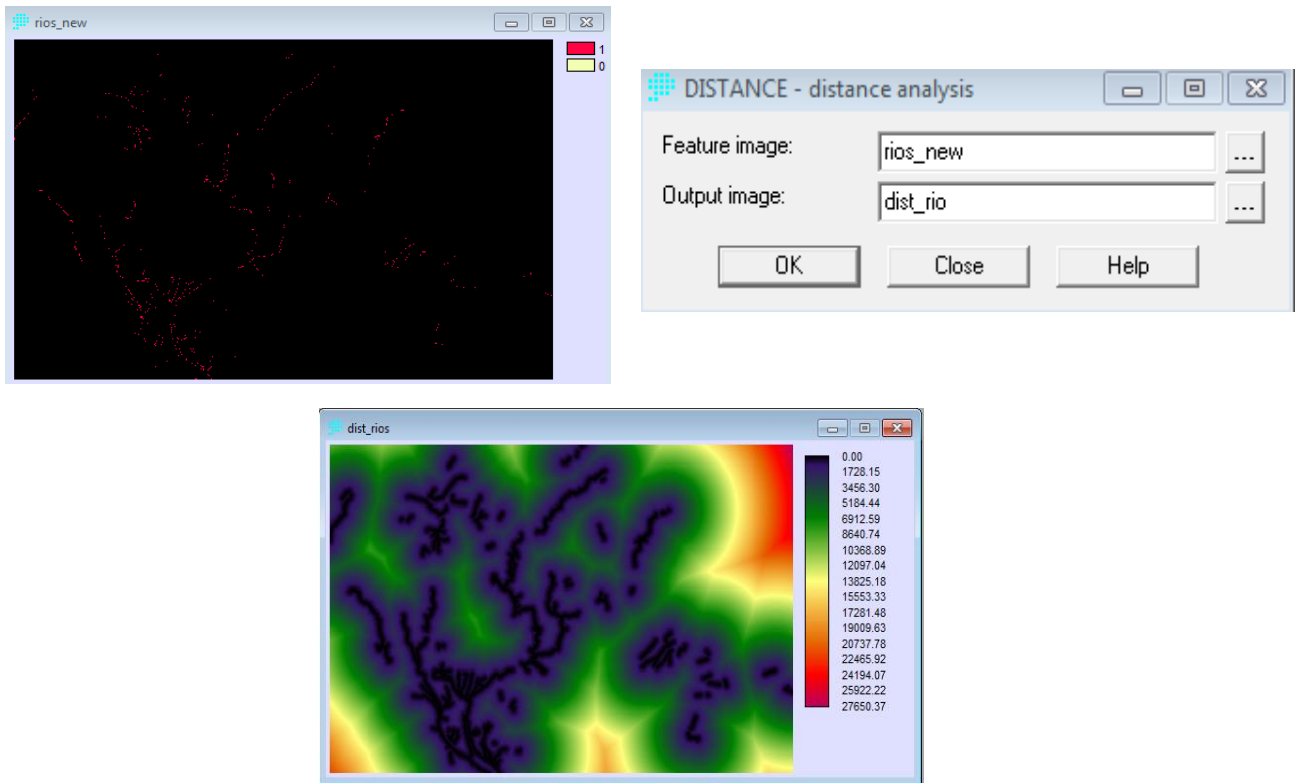


Figura 4.12 Distancia a ríos

Como resultado del proceso anterior tenemos un mapa de distancias en el cual la distancia mínima es la que se encuentra más cerca de los ríos, y se representa con la paleta de colores de rojo a azul.

De igual forma se utilizó la herramienta de FUZZY para normalizar y contar con un nivel de adecuación de 0 a 255. Se utilizó la función Sigmoidal con Monotonically Decreasing para agregar los pesos idóneos que corresponden a los valores de 0 a 100 m. y obtenemos como resultado el siguiente mapa de distancia de ríos normalizado.

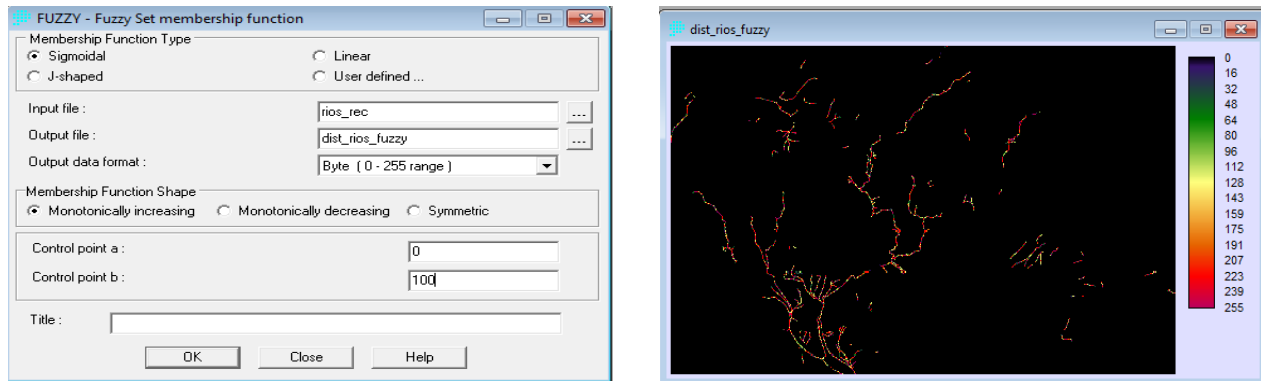


Figura 4.13 Fuzzy a ríos

#### 4.4.3 Distancia a vías de comunicación

Las vías de comunicación se consideraron como variable debido a que son un factor importante para la expansión agrícola porque entre más cercana se encuentre una vía de comunicación habrá mayor probabilidad que se establezca un cultivo y facilitar medios de comercialización.

Para crear el mapa de distancia de vías de comunicación, fue necesario utilizar las vías de comunicación del estado de Tlaxcala, exceptuando aquellas vías que se encuentren dentro de una zona urbana, a estas vías previamente rasterizadas se ejecutó la herramienta DISTANCE, se obtuvieron las distancias de las vías hacia la periferia y se representa en el siguiente mapa.

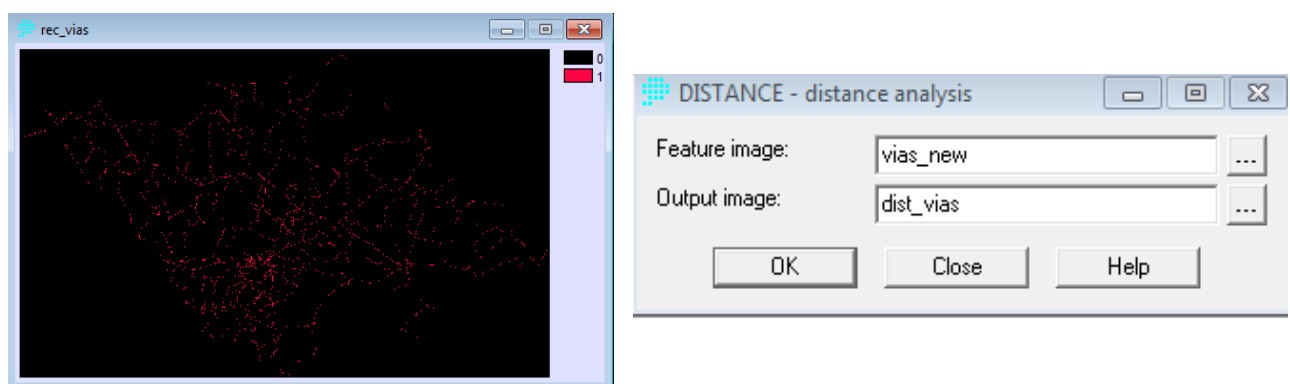
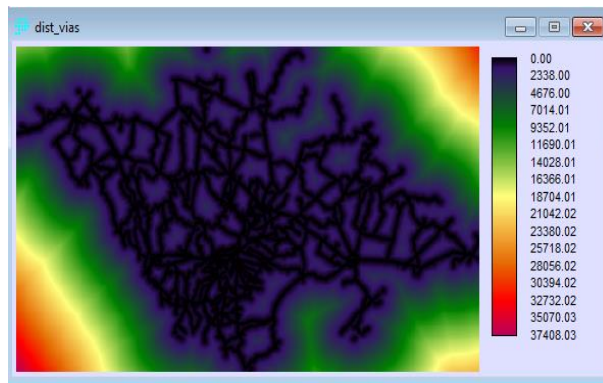


Figura 4.14 Distancia a vías de comunicación



Para normalizar y adecuar el mapa de distancias de vías de comunicación se utilizó la herramienta de FUZZY con la función Sigmoidal con Monotonically Decreasing y se agregaron los pesos óptimos que corresponde de 10 a 1000 m. y se obtiene como mapa resultante el mapa de distancia a vías de comunicación normalizado de 0 a 255.

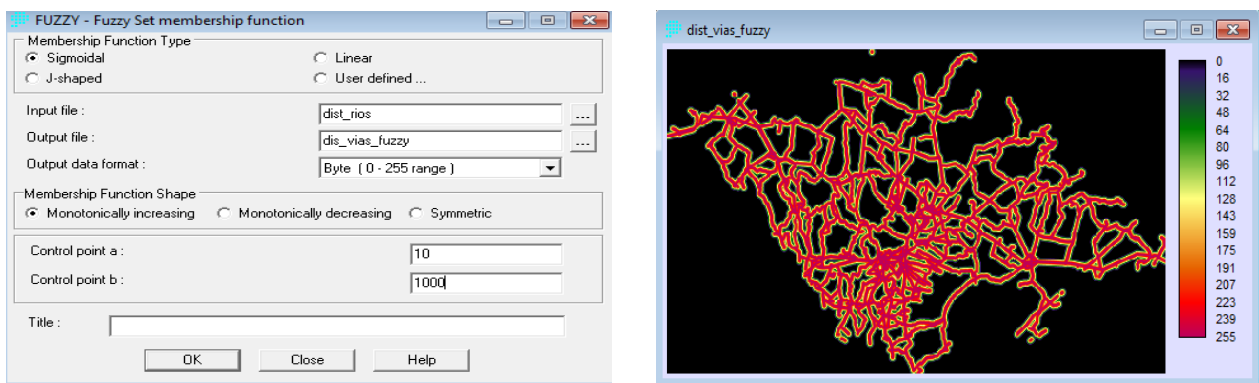


Figura 4.15 Fuzzy a vías de comunicación

#### 4.4.4 Distancia a Centros Urbanos

Los centros urbanos son de gran importancia para la expansión agrícola ya que son principalmente los lugares de distribución para consumo y comercialización de los productos agrícolas, por tal motivo se consideró la distancia de los centros urbanos para la predicción del crecimiento agrícola.

Para realizar este proceso se ejecutó la herramienta DISTANCE y al resultado del proceso nuevamente se aplicó la herramienta FUZZI con la función Sigmoidal con Monotonically Decreasing donde se le asignaron los pesos de 0 a 20000 m. y finalmente se obtiene el mapa de distancias normalizadas y adecuadas de 0 a 255 de vías de comunicación.



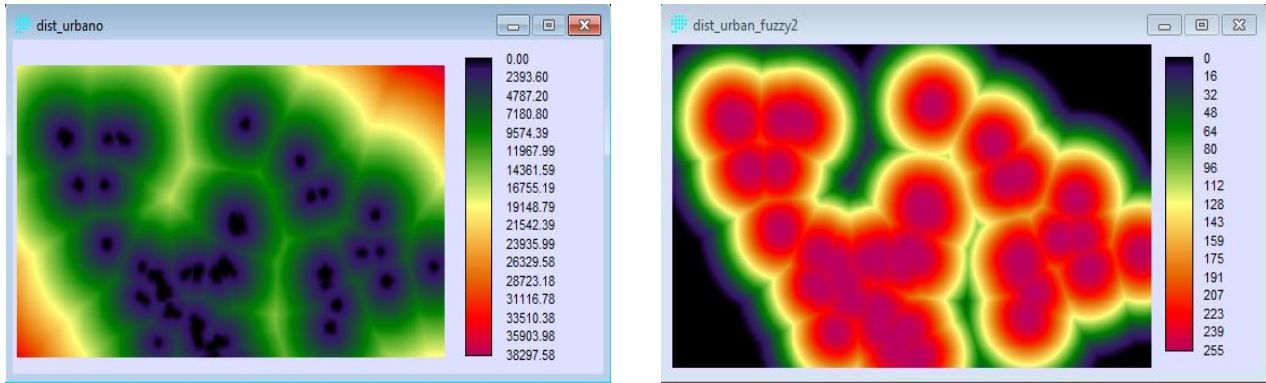


Figura 4.16 Distancia a Centros Urbanos

#### 4.4.5 Pendiente

Para este factor se utilizó el módulo Surface en el cual se obtuvo el mapa de pendiente en porcentaje, posteriormente se normalizo el archivo resultante en el modelo FUZZY con el fin de obtener un mapa en un rango de 0 a 255 y adecuarlo a una pendiente que va de 0° a 30°, para esto se ocupó la función Sigmoidal Symmetric, las herramientas y los resultados se observan en los mapas siguientes.

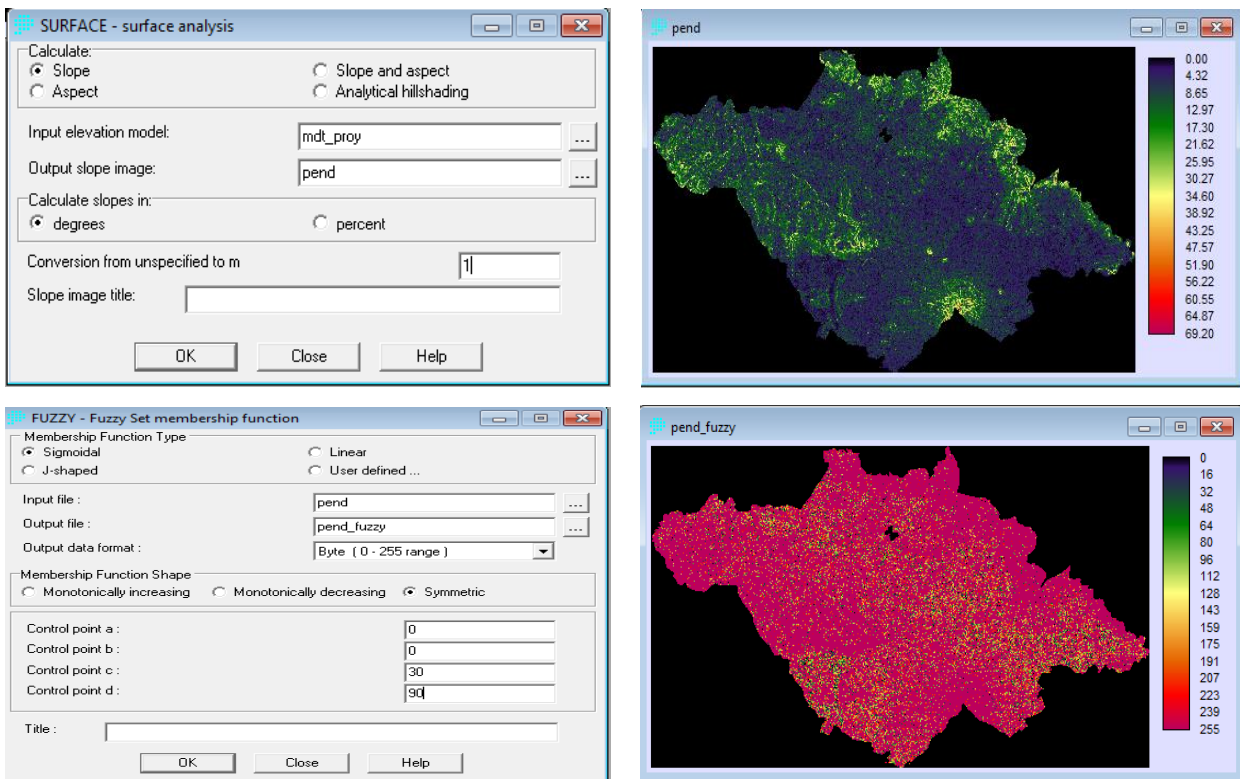


Figura 4.17 Fuzzy Pendiente

#### 4.5 Probabilidad de cambio

La última variable que se necesita para realizar la predicción de crecimiento agrícola es el mapa de probabilidad de cambio a agricultura, este se obtiene a partir del mapa de transiciones entre todas las coberturas hacia la cobertura agrícola y el mapa de la serie III de uso de suelo y vegetación con la herramienta Variable Transformation Utility en la opción de tipo de transformación Evidence Likelihood, esta se encuentra en la pestaña de Transition Potentials del simulador Land Change Modeler de IDRISI.

Tendremos como resultado el mapa de probabilidad de cambio a uso agrícola en el cual se observan las coberturas que tienen una tendencia a cambiar como es el caso de la cobertura de pastizal es la que presenta mayor probabilidad, por otro lado el cuerpo de agua es la que menor posibilidad de cambio tiene como se observa en el mapa siguiente.

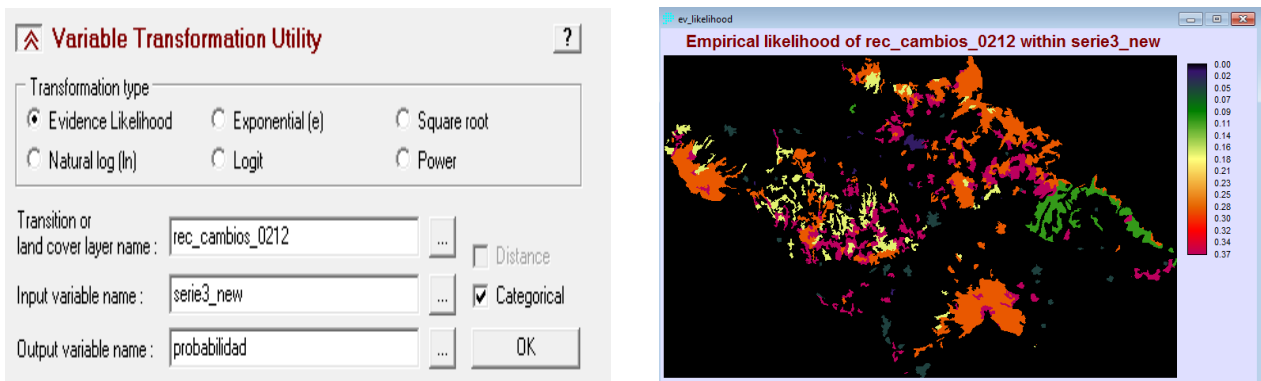


Figura 4.18 Probabilidad de Cambio

#### 4.6 Mapas de transición potencial

Estos mapas se realizaron a partir de las 6 variables antes descritas que se consideran como factores que determinan la transición potencial hacia el cambio de la agricultura, para la realización de estos mapas se integraron las variables al menú de Transition Sub-Model Structure, consecutivamente en el menú Run Transition Sub-Model se seleccionó correr el modelo por redes neuronales y se eligieron 10000 iteraciones, también que tuviera un error medio cuadrático (RMS) de 0.01, se ejecuta el modelo y se obtiene como

resultado una tasa de precisión de 76.6% lo cual nos indica que el resultado es aceptable para realizar la predicción por medio de Cadenas de Markov.

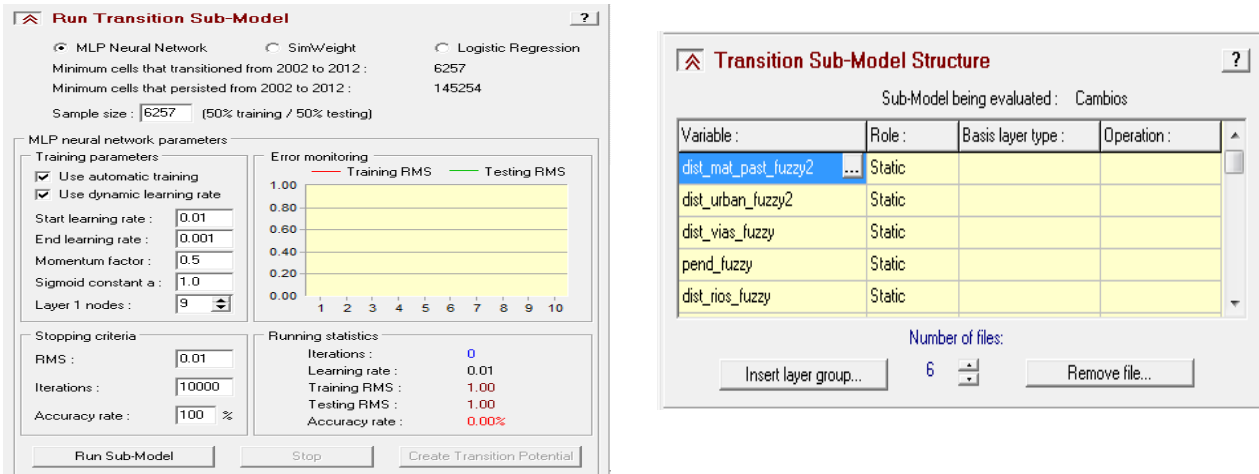


Figura 4.19 Sub-Modelo de Transición

Como resultado se lograron 4 mapas de transición potencial que se utilizaron para la predicción de cambio agrícola con el modelo de Cadenas de Markov.

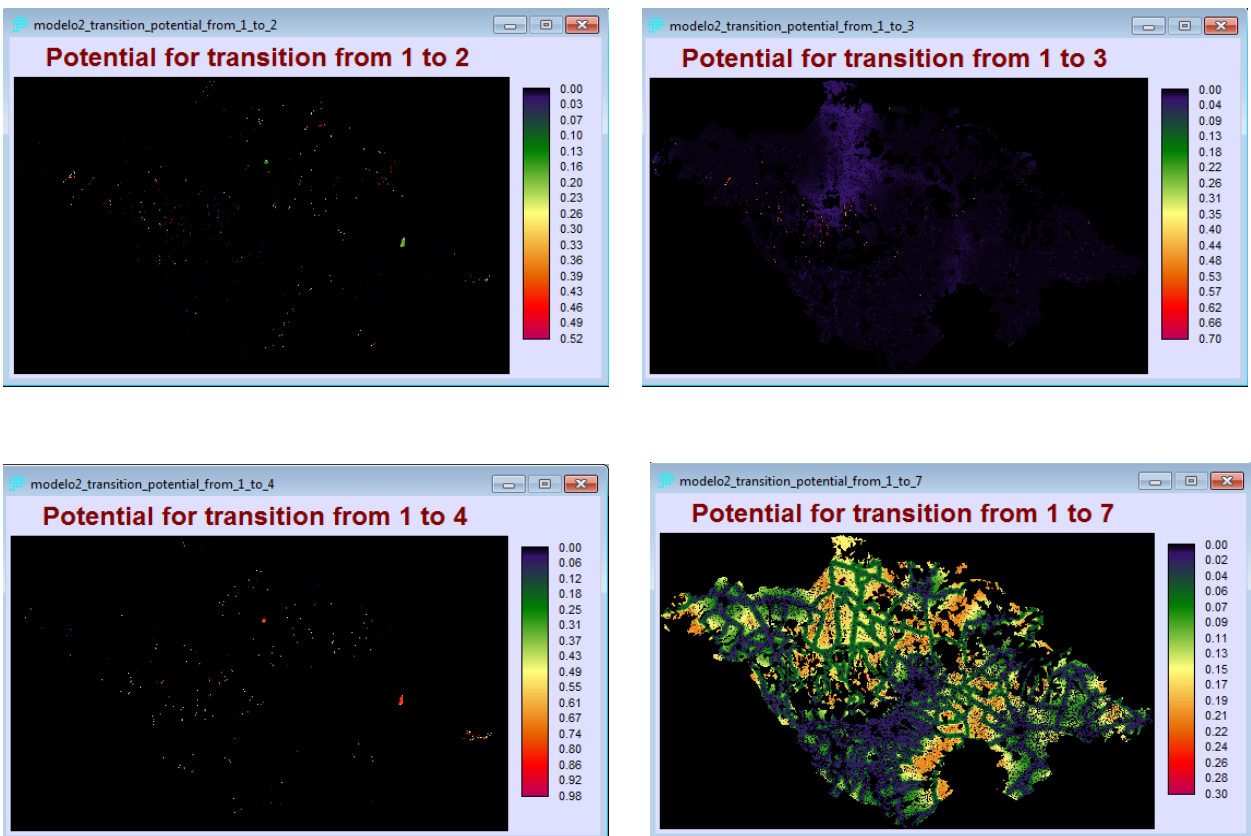


Figura 4.20 Transición Potencial

#### 4.7 Predicción de Crecimiento Agrícola

La predicción se ejecutó mediante el modelo de Cadenas de Markov que se encuentra en Land Change Modeler en la pestaña Change Prediction en el menú desplegable Change Demand Modeling, se seleccionó Markov Chain y se elige la fecha que se desea predecir para este trabajo se consideró la fecha al 2020.

Para finalizar el proceso en la opción de Change Allocation se opta por recalcularse en 2 etapas, se selecciona crear AVI video, se elige la opción una predicción suave y por último se corre el modelo. Como resultado obtendremos el mapa de predicción al año 2020 y un video de las transiciones entre las series III, V y el resultado de la predicción.

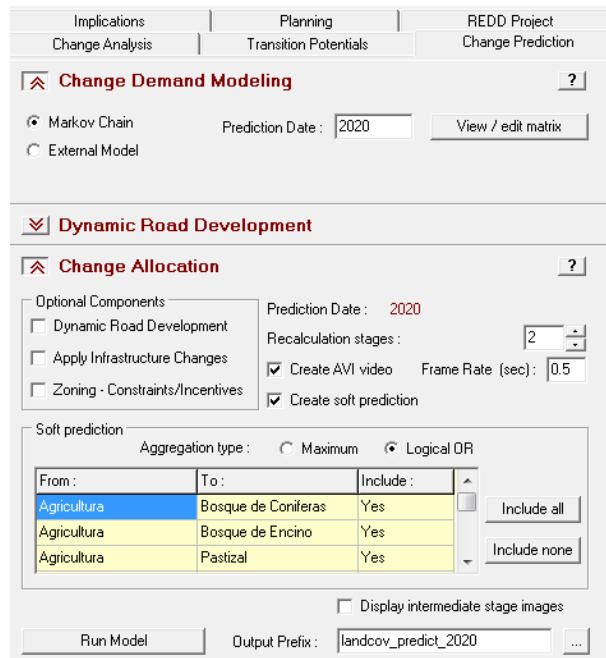


Figura 4.21 Cadenas de Markov

Esta predicción se realizó a un periodo de 8 años debido a que se obtendrá información más convincente sin distorsionar la información real, si bien las predicciones pueden realizarse a 10, 20, 30 y más años, pero se debe tener en consideración que la información corre el riesgo de tener variaciones y no ser confiables al predecir a muchos años.

A continuación se muestra el mapa de predicción al año 2020, se observa las coberturas de uso de suelo que son susceptibles a presentar un cambio, de forma particular la cobertura de agricultura presenta ganancias a partir de la cobertura de los pastizales, pero a su vez exhibe pérdidas a causa de la expansión de los asentamientos humanos, lo que demuestra que la expansión de la agricultura está incrementando, pero está perdiendo velozmente más superficie de lo que puede incrementar.

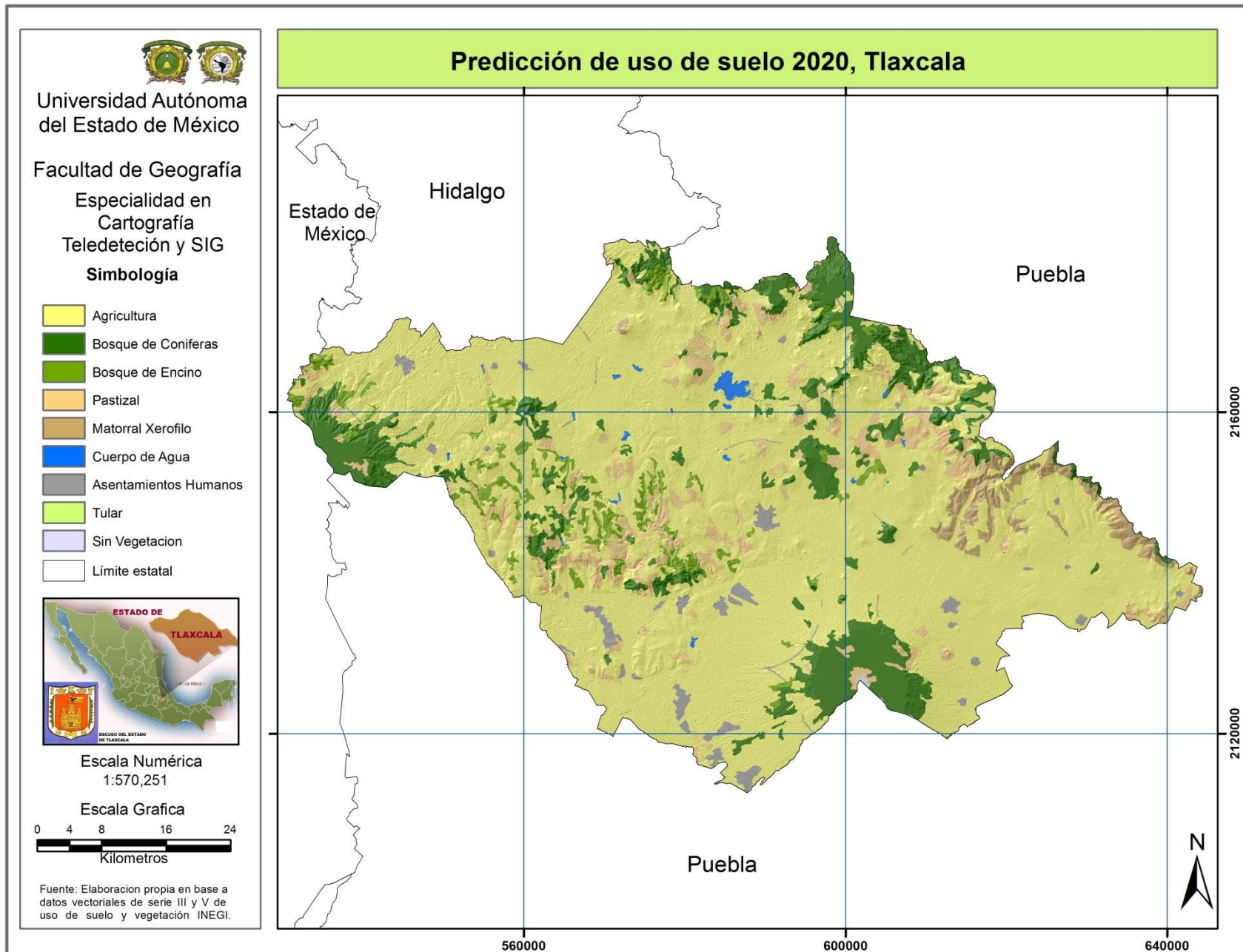
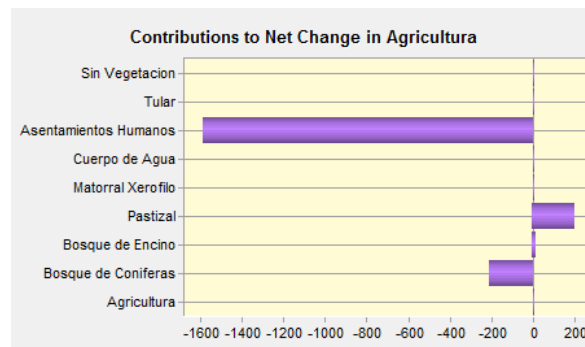


Figura 4.22 Cobertura de Predicción a 2020



En la gráfica se observa que para el año del 2020, la cobertura agricultura sigue la misma tendencia que en el 2012, la cobertura de pastizal es la principal aportadora del incremento de la agricultura, mientras que los asentamientos humanos y bosque de coníferas son las principales coberturas que la agricultura está proporcionando superficie a favor de ellas.

Gráfica 4.4 Contribuciones al cambio neto en agricultura



En el siguiente mapa de transición de los pastizales a agricultura se observa que la frontera agrícola está aumentando en mayor superficie hacia el Este y Suroeste del estado de Tlaxcala, mientras las zonas donde menos cambios presentan son Centro, Norte y Oeste del estado.

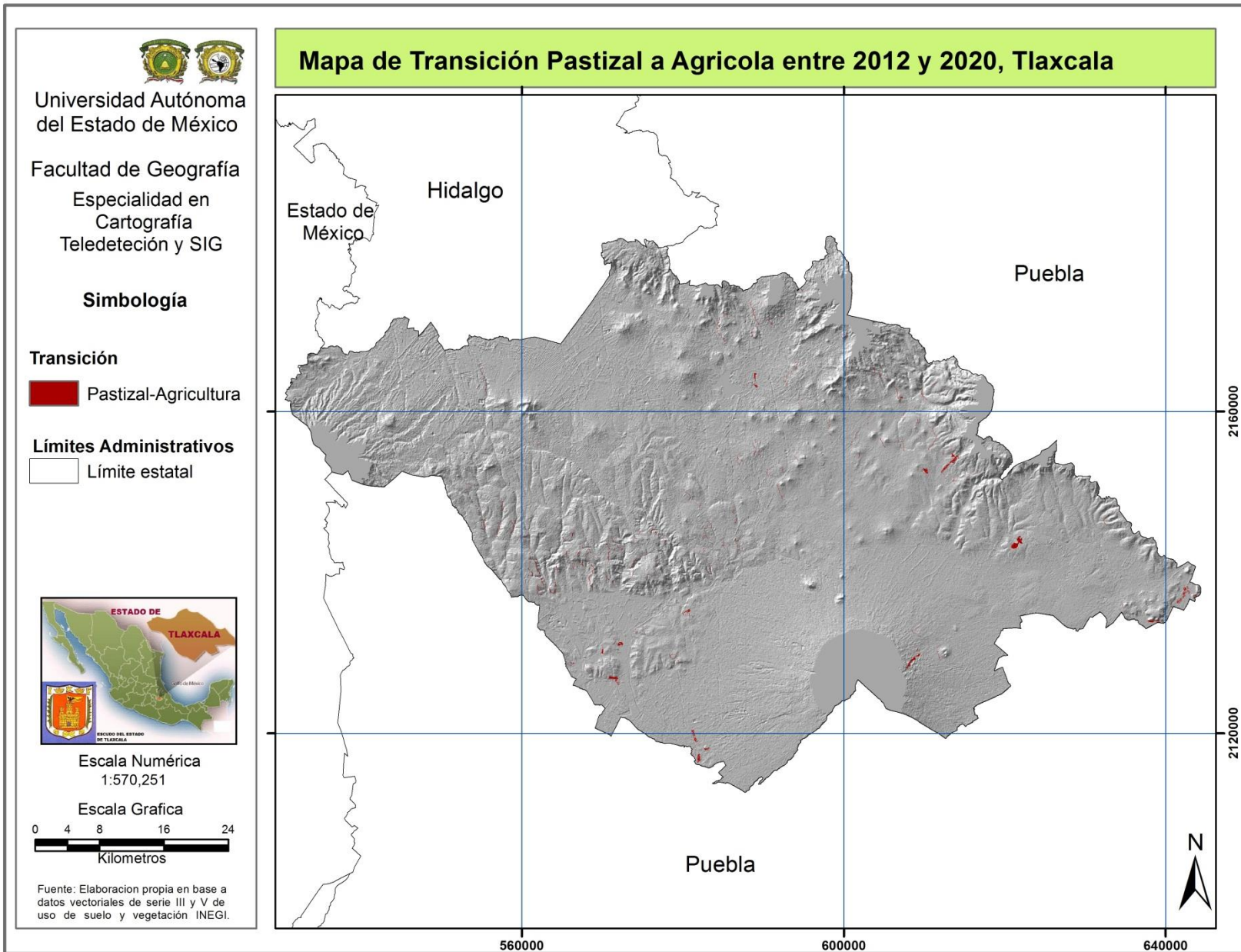
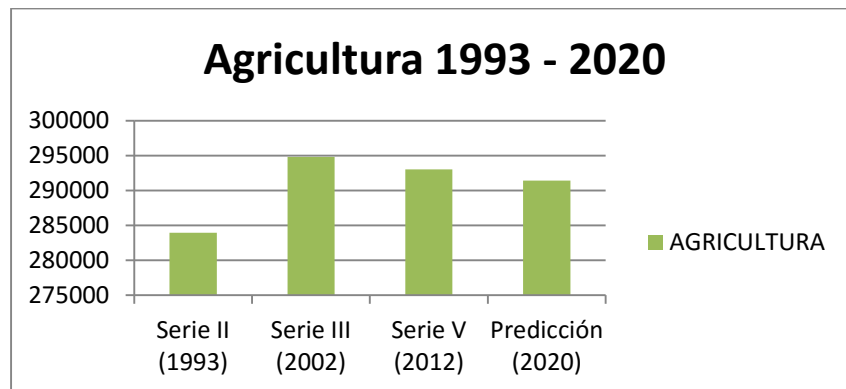


Figura 4.23 Transición de Pastizal entre Agricultura entre 2012 y 2020



Los cambios ocurridos entre las series a través del tiempo se presentan en la siguiente gráfica (4.5) y la tabla (4.5), donde se observa la superficie de la agricultura de la serie II (1993) a la serie III (2002) aumento de forma considerable de 283953 a 294787 hectáreas en un periodo de 9 años, mientras que para la serie V la cobertura disminuyó a 293014 y el resultado de la predicción arroja que para el año 2020 la superficie de la agricultura será de 291433.

Gráfica 4.5 Agricultura 1993-2020



Como se observa la tendencia de la agricultura es a disminuir a través del tiempo, esto no quiere decir que no avance la frontera agrícola si no que así como crece hacia los pastizales, la cobertura también está perdiendo superficie a causa del crecimiento de los asentamientos humanos.

Tabla 4.5 Superficie en hectáreas de uso de suelo de series y predicción

COBERTURA	Serie II (1993)	Serie III (2002)	Serie V (2012)	Predicción (2020)
BOSQUES CONÍFERAS	53389	50598	51106	51322
BOSQUE ENCINO	15158	13375	13228	13212
AGRICULTURA	283953	294787	293014	291433
ASENTAMIENTOS H.	3793	4467	6425	8007
PASTIZALES	32486	25712	25203	25002
MATORRAL XEROFILO	9020	8905	8761	8761
TULAR	37	38	59	59
SIN VEGETACIÓN	101	115	114	114
CUERPO DE AGUA	1547	1488	1575	1575

Fuente: Elaboración propia en base a las cartas de Uso de suelo y vegetación, serie II, III, V de INEGI y predicción a 2020.

El modelo de predicción de este trabajo demuestra la realidad de las coberturas en Tlaxcala, pues es bien sabido que los asentamientos humanos crecen a raíz de la agricultura y a su vez la agricultura incrementa su superficie por medio de las coberturas de pastizal y de los bosques, lo que refleja este modelo es precisamente eso la tendencia de cambios entre una cobertura y otra. Por tal motivo se puede indicar que el modelo y las variables que se utilizaron para la realización de este trabajo fueron las idóneas.

En este sentido y con la información presentada se ve cumplido el segundo objetivo, el cual se fundamenta en: Efectuar una predicción y modelización cartográfica del crecimiento de la frontera agrícola del estado de Tlaxcala mediante el módulo de Cadenas de Markov en IDRISI.

## CONCLUSIONES

Resumiendo los resultados se concluye que los cambios en el uso de suelo y vegetación del estado de Tlaxcala durante los años 2002 y 2012 marcan una tendencia a que la cobertura que mayor cambio presentó es la de agricultura 43.3% seguida del bosque de conífera con 15.7% y pastizal con 15.6% de cambio total. Las coberturas que pasaron de agricultura a asentamientos humanos y de pastizales a agricultura son las principales transiciones dentro de Tlaxcala.

Los resultados del análisis de los cambios de uso de suelo indican que las categorías de la agricultura y los pastizales perdieron superficie más que la que ganaron, mientras que los asentamientos humanos crecieron en extensión y no perdieron superficie.

Por otra parte, los resultados obtenidos mediante los modelos de Cadenas de Markov muestran que los factores de proximidad son los que manifiestan una mayor influencia en el crecimiento de la agricultura y asentamientos humanos.

En este sentido, las áreas agrícolas que están próximas a las vías de comunicación, centros urbanos, coberturas de pastizal o matorral y ríos tienen también alta probabilidad de tener un crecimiento agrícola con una tasa de precisión mayor a 70%.

El modelo de predicción de crecimiento agrícola por medio de Cadenas de Markov demostró que existe un decremento en esta superficie a través del tiempo, porque así como gana superficie de los pastizales y matorrales a su vez pierde rápidamente superficie por el crecimiento de los asentamientos urbanos.

Una de las limitantes fue que los resultados son muy generales ya que la información de las series de uso de suelo y vegetación de INEGI se encuentran a una escala 1:250000 lo que hace que la información sea general, aunque se trabajó un estado la escala sigue siendo pequeña, se tendría que realizar a una escala de trabajo más grande como

1:100000 para aproximarnos más a los factores que inciden en el crecimiento de la frontera agrícola.

Los resultados obtenidos muestran que los estudios de análisis de cambio de suelo y predicción pueden contribuir de forma eficaz e importante a la toma de decisiones, ya que la información generada puede ser útil a los planificadores del territorio para analizar y gestionar de forma sustentable los usos de suelo.

### **RECOMENDACIONES**

Este modelo de Cadenas de Markov puede aplicarse a diferentes áreas de estudio como son áreas urbanas, cuestiones forestales, degradación de suelo por factores antrópicos, etc. el cual puede analizar y proyectar la evolución de estos usos de suelo y determinar los cambios positivos y negativos.

Este modelo desarrollado en el presente trabajo podría mejorarse agregando más variables o factores que condicionen el crecimiento de la frontera agrícola y así tener una mejor precisión en la predicción.

Los resultados obtenidos muestran que este tipo de estudios pueden contribuir de manera importante al proceso de toma de decisiones ya que la información generada puede ser útil a los planificadores para analizar y gestionar de forma más óptima al uso de suelo y principalmente la cobertura agrícola.

Nota: La fuente de información utilizada para la realización de este trabajo pertenece a las series de vegetación y uso de suelo III y V de INEGI, en la cual puede presentar errores de exactitud temática con la superficie real del estado de Tlaxcala, debido a la escala de trabajo y que las series de INEGI nos son muy confiables para este trabajo. Convendría trabajar con imágenes de satélite para obtener mejores resultados.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, F. (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. Geofocus.

Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial. Rialp. Madrid.

Del Bosque I, Fernández C, Martín-Forero L y Pérez E. (2012). Los sistemas de información geográfica en la investigación en ciencias humanas y sociales. Apuntes de ciencias instrumentales y técnicas de investigación. Madrid.

Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaria Ejecutiva para asuntos económicos y sociales organización de Estados Americanos (2003). Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado. Washington D.C. fecha de consulta 30 Junio 2015. Disponible en <http://www.org/dsd/publications/Unit/oea65s/ch10.htm#1>. Aplicaciones del SIG a nivel nacional

Hernández, C.(2014).Aproximación a los factores explicativos del crecimiento urbano de la Zona Metropolitana de Toluca Estado de México, periodo 1980-2010, mediante Sistema de Información Geográfica y Técnicas de Regresión. Especialidad en cartografía automatizada, teledetección y sistemas de información geográfica .Toluca. México.

Henriquez, E. (2012). Escenarios futuros de uso de suelo para el análisis del efecto del cambio global en los recursos hídricos aplicado al acuífero de la macha oriental. Tesis de Maestría. Universidad Politecnica de Valencia. Valencia, España.

INEGI. Carta de uso de suelo y vegetación. Serie II, IV y V. Escala 1:250,000

INEGI. Uso Potencial del Suelo, INEGI, 2010.

Miranda, Ramiro, René Valdez, Francisco Moreno, Antonio González y Juan I. Valdez, (2011). Predicción Espacial de Cambios del Uso de Suelo en Texcoco, Estado de México. Centro de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. México.

Moldes, F. J (1995). Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica. Ra-ma. Madrid.

Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T. y Menor Toribio, J. (2003): "Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje", GeoFocus (Artículos), nº 3, 2003, p. 22-44

Pineda et. al., 2009. Análisis del cambio de uso de suelo en el Estado de México mediante un sistema de información geográfica y técnicas de regresión multivariante. Una aproximación a los proceso de deforestación.

Pineda, J. (2010). Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante tecnologías de la información geográfica. Tesis doctorado. Universidad de Alcalá, Departamento de Geografía, Madrid. España.

Plata, W. (2010). Descripción, análisis y simulación del crecimiento Urbano mediante tecnologías de la información geográfica. El caso de la comunidad de Madrid. Tesis doctoral, Alcalá de Henares, España.

Pompa, M. (2010).Apuntes de SIG, enfocados en ARCGIS. Consejo de ciencia y tecnología del Estado de Durango. Durango, Durango.

Programa De Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano para el Estado de Tlaxcala. Gobierno del Estado de Tlaxcala 2012-2016.

Sánchez E., Díaz Cervantes, R. Peña y B. Zúñiga (2012). 2Sistemas de monitoreo de la dinámica de uso de suelo MODUS en la regional binacional México-Estados Unidos”. Geofocus (artículos) no 12, p 115. ISSN: 1578-5157.

Zúñiga, B. (2012). Tendencia de cambio de uso de suelo por medio de regresión logística para el año 2020 utilizando sistemas de información geográfica, en el municipio de Nicolás Romero, Estado de México. Especialidad en cartografía automatizada, teledetección y sistemas de información geográfica. Toluca, México.

Carta de Edafología 1:250,000, 2009 y Síntesis Geográfica del Estado de Tlaxcala. INEGI.

Velázquez et. al. (2002). “Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México”. Redalyc (artículos), no 062, ISSN: 1405-2849.