



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN
EL ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO

TESIS DE INVESTIGACIÓN

Que como requisito parcial
para obtener el título de:

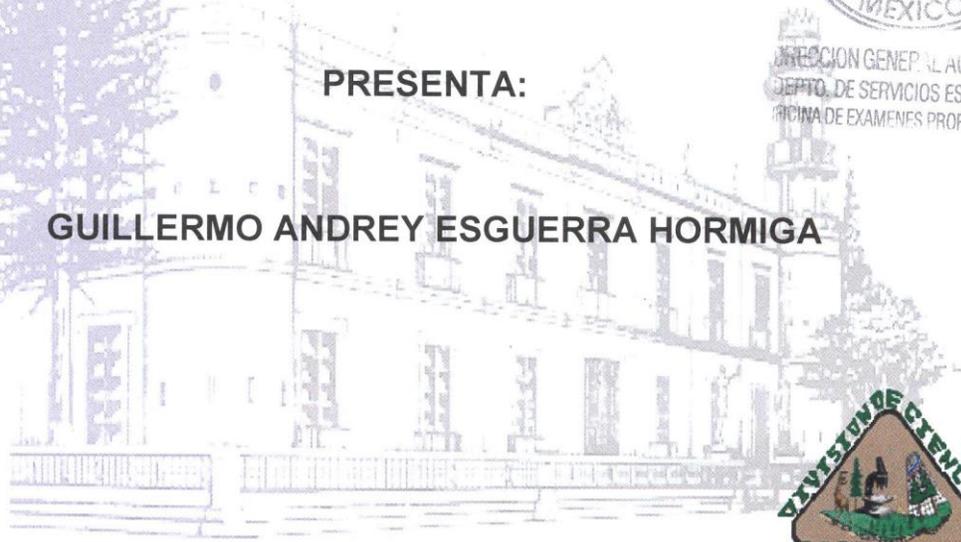
MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

GUILLERMO ANDREY ESGUERRA HORMIGA



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



Chapingo, México a Febrero de 2015

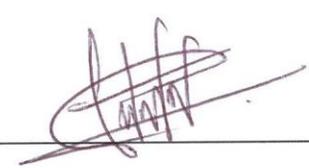
La presente tesis titulada "ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO" realizada por Guillermo Andrey Esguerra Hormiga, bajo la dirección del Dr. Francisco José Zamudio Sánchez. Ha sido revisada y aprobada por el siguiente Comité Revisor y Jurado del Examen Profesional, como requisito parcial para obtener el título de Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales

DIRECTOR



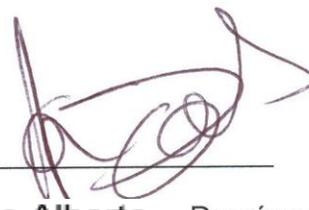
Dr. Francisco José Zamudio Sánchez

COORDIRECTOR



Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

ASESOR



M.C. **Francisco Alberto** Domínguez
Álvarez

Chapingo, México. Febrero de 2015

DEDICATORIA

Hoy primero quiero agradecer a Dios y dedicarle este nuevo logro en mi vida.

En Segundo lugar quiero dedicarlo a dos personas en especial, mi Madre mi Padre, porque todo lo que yo logre en esta vida es gracias a estos seres.

De igual manera va dedicado a esa nueva luz de mi vida que es Danna Isabella mi PRINCESA, que si un día llega a leer esto sepa que la AMO con todas las fuerzas de mi corazón y que todo lo que haga de hoy en adelante será pensando en ella.

Y finalmente a toda mi familia, mis hermanas Elena y Lina, mis sobrinos Sebastián, Emmanuel y los Alejitos, mis tíos y tías, primos y primas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar los estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, y especialmente al programa de Maestría y todos sus funcionarios, al Doctor Francisco Zamudio y profesores, por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios con ellos y un principal agradecimiento al Doctor Alejandro Monterroso quien sin sus saberes este trabajo no se hubiese podido realizar.

A mis compañeros de la maestría, quiero agradecer todos y cada uno de los buenos momentos que pase, fueron testigos de todo lo que viví en este país y fueron una guía muy importante para mi adaptación, ellos también hacen parte de este logro.

A mi tío Eulicer Cabezas, quien me brindaron todo el apoyo posible, en esta etapa de mi vida.

A todo México por haberme dado la oportunidad de poder realizar uno de mis mayores logros personales, por ser un país de brazos abiertos, de gente bella y alegre, de comidas espectaculares y paisajes extraterrestres.

QUE VIVA MÉXICO LINDO Y QUERIDO!!!!

DATOS BIOGRÁFICOS

Nacido el veinticuatro de febrero de 1988 en la ciudad de Ibagué, Departamento del Tolima, Colombia. El último de tres hijos. La madre Gilma Hormiga y el padre José Guillermo Esguerra Amaya, originarios de Tolima y Cundinamarca respectivamente.

Los estudios de primaria los terminó en la Escuela Séptima Etapa del Jordán en el año 1998, la educación secundaria con énfasis en biología y matemáticas la curso en el Colegio Nacional de San Simón concluyendo en 2004, ambas ubicadas en Ibagué, Tolima

En 2006 ingresa a la Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad del Tolima, graduándose como Ingeniero Forestal. Su examen de grado lo presento en abril del 2012 con la tesis “Evaluación y cuantificación de la lluvia de semillas a través de zoocoria en zonas degradadas de ecosistemas Alto Andinos” con una calificación meritoria.

Perteneció al grupo de investigación de bosques secos tropicales de la Universidad del Tolima, participo como interprete ambiental en la Corporación Ambiental Empresarial Filial de Cámara de comercio de Bogotá

Se ha desempeñado como Ingeniero Forestal en la formulación y evaluación de proyectos ambientales, ha realizado planes de manejo silviculturales de plantaciones comerciales de Teca.

En 2013 ingresa a la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo, México, de donde con el presente trabajo de tesis, se gradúa en febrero de 2015.

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	JUSTIFICACIÓN.....	3
III.	OBJETIVOS.....	5
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	5
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	5
IV.	HIPOTESIS.....	6
V.	ANTECEDENTES.....	7
VI.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
6.1	TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	10
6.1.1	Teledetección.....	10
6.1.2	Fundamentos de la Teledetección.....	11
6.1.3	Banda espectral.....	12
6.1.4	Tipo de sistemas de teledetección.....	15
6.1.5	Tipos de datos en imágenes de teledetección.....	15
6.1.6	Plataformas de Teledetección espacial.....	16
6.1.7	Plataformas orbitales de teledetección.....	17
6.1.8	Los sistemas de información geográfica (SIG).....	18
6.1.9	Tipos de organización de los datos en el ordenador.....	20
6.2	IMÁGENES DE SATÉLITE.....	22
6.3	CAMBIO DE USO DEL SUELO.....	23
6.3.1	Cambios de coberturas y usos del suelo en la historia.....	23
6.3.2	Cambios de coberturas y usos del suelo a escala global.....	25
6.3.3	Causas de los cambios de usos del suelo.....	27
6.3.4	Efectos de los cambios de usos del suelo.....	28
6.3.5	Tasa de Cambio de uso de suelo.....	29
6.3.6	Clasificación no supervisada.....	30
VII.	MATERIALES Y METODOS.....	31
7.1	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	31
7.2	ASPECTOS FÍSICOS.....	31
7.2.1	Localización.....	31

7.2.2	Superficie y relieve	32
7.2.3	Clima	33
7.2.4	Recursos hídricos.....	34
7.2.5	Suelos	36
7.3	ASPECTOS SOCIOECONOMICOS	39
7.3.1	Economía	40
7.4	TIPOS DE VEGETACIÓN DE PUEBLA.....	40
7.5	IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT-5 TM, LANDSAT-7 ETM+, LANDSAT-8 ETM+ 42	
7.6	BANDAS ESPECTRALES.....	44
7.7	CARACTERIZACIÓN Y COMBINACIÓN DE BANDAS ESPECTRALES DE IMÁGENES LANDSAT TM, ETM+, OLI/TIRS (ERDAS 10.1)	45
7.7.1	Mosaicos de bandas espectrales.....	45
7.7.2	Delimitación del área de interés (Estado de Puebla).....	46
7.7.3	Combinación de bandas espectrales	49
7.8	CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.....	52
VIII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
8.1	CLASIFICACIÓN DE USO DE SUELO.....	55
8.1.1	Bandas espectrales	55
8.1.2	Mosaicos de imágenes satelitales	57
8.1.3	Combinación de bandas	59
8.1.4	Clasificación No Supervisada	60
8.2	MAPAS DE COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO 1990-2000- Ha	62
8.2.1	Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990.....	62
8.2.2	Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2000.....	64
8.2.3	Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2012.....	67
8.3	ANÁLISIS DE LA DIRECCIÓN DE CAMBIO.....	69
8.3.1	Cambio absoluto del uso del suelo para los periodos de 1990/2001-2001/2012-1990/2012.....	69
8.3.2	Matriz cambio uso de suelo	71
8.4	TASAS DE CAMBIO.....	88
8.5	MATRIZ DE PROCESOS DE CAMBIO	91
8.6	MODELO DE LOS PROCESOS DE CAMBIO	95
8.7	PROYECCIONES DE USOS FUTUROS.....	96

IX. CONCLUSIONES	102
X. LITERATURA CITADA	105
XI ANEXOS	111

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Comparación entre tasas de deforestación de México. La fila izquierda incluye datos reportadas por académicos, mientras que la fila de la derecha contiene datos derivados de instancias de gobierno o de FAO (modificado de Velázquez 2008)	8
Cuadro 2. Tasa de deforestación derivadas de estudios regionales por tipo de cobertura y para cada periodo evaluado (tomado de Flamenco 2007). Todas las tasas reflejan pérdida a pesar de ser denotadas por números positivos.....	9
Cuadro 3. Variables biofísicas y potenciales sistemas de sensores para la obtención de información. Fuente Jensen, 1996.....	16
Cuadro 4. Características de la familia LANDSAT. Fuente NASA, 1999.....	18
Cuadro 5. Provincias fisiográficas del estado de Puebla. Fuente: CONABIO 2011	32
Cuadro 6. Tipos y subtipos de clima presentes en el estado de Puebla.	34
Cuadro 7. Unidades de Suelo, clave y superficie (INEGI, 2006).	36
Cuadro 8. Actividades económicas y % al PIB estatal.	40
Cuadro 9. Cambio absoluto del uso del suelo para los años 1990-2001-2012	69
Cuadro 10. Matriz de transición entre 1990-2001.....	73
Cuadro 11. Matriz de transición entre 2001-2012.....	77
Cuadro 12. Matriz de transición entre 1990-2012.....	81
Cuadro 13. Conservación y cambio en porcentaje para los periodos.....	87
Cuadro 14. Matriz de procesos de cambio para el periodo 1990-2001	92
Cuadro 15. Matriz de procesos de cambio para el periodo 2001-2012	93
Cuadro 16. Matriz de procesos de cambio para el periodo 1990-2012	94
Cuadro 17. Cambio de uso del suelo por indicador de cambio para los periodos de estudio.....	95
Cuadro 18 Proyecciones en superficie para el año 2050, para tres realidades respecto a cada una de las matrices.....	98
Cuadro 19. Proyección de coberturas hacia los años 2030 y 2050.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electro magnético	11
Figura 2. Rango de longitudes de onda en los que funciona cada sensor del satélite.....	13
Figura 3. Esquema de adquisición y generación de una imagen (Lillesmand et.al, 1987)	14
Figura 4. Ejemplo de SIG	19
Figura 5. Componentes de los SIG	20
Figura 6. Formatos de datos geográficos. (Peña 2006)	21
Figura 7. Imagen de satélite; recorte de la imagen de satélite a una matriz de 6x4	23
Figura 8. Procesos de cambio que han de ser considerados al estudiar el cambio global actual o futuro (extraído de Terradas, 2001).....	24
Figura 9. Cambios estimados en usos del suelo y población desde 1700 a 1990	26
Figura 10. Imágenes del satélite L-5 TM (1986), L-7 ETM+ (2000) y L-8 OLI/TIRS (2013).....	42
Figura 11. Sistema Path-Row de los Estados Unidos Mexicanos	44
Figura 12. Realización del mosaico de la Banda 1 (2000) mediante el software ERDAS 10.1	46
Figura 13. Proceso de obtención del mosaico de la Banda 1(2000) mediante el software ERDAS 10.1	46
Figura 14. Recorte del área de interés estado de Puebla	47
Figura 15. Recorte punteado del estado de Puebla área de interés.....	48
Figura 16. Corte final del estado de Puebla	49
Figura 17. Proceso de combinación ERDAS 10.1 de bandas 2-5-7 (2000).....	51
Figura 18. Imagen satelital a color verdadero.....	51
Figura 19. Diferentes bandas (1-8) de la misma imagen (Path 25 Row 46, 2001)	56
Figura 20. Mosaico de 2 imágenes de banda 5 (1990)	57
Figura 21. Mosaico de 5 imágenes de banda 1 (2001)	58
Figura 22. Mosaico de 5 imágenes de banda 7 (2012)	58
Figura 23. Imagen final de la combinación de las bandas 1-5-7 (2001)	59
Figura 24. Imagen final de la combinación de las bandas 2-4-5 (2012)	60
Figura 25. Imagen clasificación no supervisada (2001).....	61
Figura 26. Imagen clasificación no supervisada (2012).....	61
Figura 27. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990	62
Figura 28. Porcentaje de coberturas del estado de Puebla para el año 1990	64
Figura 29. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2001	65
Figura 30. Porcentaje de coberturas del estado de Puebla para el año 2001	66
Figura 31. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2012.....	67

Figura 32. Porcentaje de coberturas del estado de Puebla para el año 2012	68
Figura 33. Diagrama de Flujo para el periodo 1990-2001(Principales Coberturas)	74
Figura 34. Sumatoria total en superficie ganada para cada cobertura del periodo 1990-2001.....	76
Figura 35. Diagrama de Flujo para el periodo 1990-2001(Principales Coberturas)	78
Figura 36. Sumatoria total en superficie ganada para cada cobertura del periodo 2001-2012.....	80
Figura 37. Diagrama de Flujo para el periodo 1990-2012(Principales Coberturas)	82
Figura 38. Sumatoria total en superficie ganada para cada cobertura del periodo 1990-2012.....	85
Figura 39. Resumen y comparación de los tres periodos respecto a las pérdidas de superficie en los tipos de coberturas	86
Figura 40. Tasas de cambio anual para el periodo 1990-2001.....	89
Figura 41. Tasas de cambio anual para el periodo 2001-2012.....	90
Figura 42. Tasas de cambio anual para el periodo 1990-2012.....	91
Figura 43. Transición de.....	96
Figura 44. cantidad de	99
Figura 45. Superficie perdida o ganada.....	100

ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO

ANALYSIS AND PREDICTION OF CHANGE IN LAND USE IN THE STATE OF PUEBLA, MÉXICO

Guillermo Andrey Esguerra Hormiga¹; Dr. Francisco José Zamudio¹; Dr. Alejandro Ismael Monterrozo Rivas²

RESUMEN

En las últimas décadas el cambio del uso del suelo se ha constituido como un factor plenamente implicado en el cambio global, alterando procesos y ciclos. El trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar el uso actual del suelo y vegetación del estado de Puebla, a través del análisis e interpretación de imágenes de satélite e identificar las tasas de cambio para el periodo de tiempo de 1990- 2012. En primera instancia se llevó a cabo gracias a las imágenes satelitales Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, Landsat-8 ETM+ descargadas en la plataforma de internet de El Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS. Se obtuvieron mosaicos y una delimitación del estado de Puebla en el software ERDAS 10 en todas las bandas de cada imagen (1990, 2001, 2012), una vez clasificadas las bandas espectrales de las imágenes por número y año, mediante la identificación de la combinación idónea, sirvió para realizar una clasificación No Supervisada. Se hallaron doce coberturas seleccionadas mediante la utilización del software ArcGis 10.1, se interseccionaron los mapas de los tres periodos 1990-2001, 2001-2012, 1990-2012 y se generaron nuevos mapas, en estos últimos se manipularon las bases de datos en tablas dinámicas, dando origen a las matrices de cambio de uso del suelo. Del mismo modo se generaron tasas de cambio y un modelo de procesos de cambio. Se encontró que para el año 2050 la Agricultura, Zonas urbanas y Bosque Mesófilo aumentarían su superficie, perderían superficie el Bosque, Selva baja, matorral, y la pérdida total de la vegetación acuática.

Palabras clave: Coberturas, Revegetación, Deforestación, Teledetección.

ABSTRACT

Land-use change has been identified as a factor fully involved in global change, altering natural processes and cycles. The aim of this study is to determine current land use and vegetation in the state of Puebla, through the analysis and interpretation of satellite images, in order to identify the rates of change in the period between 1990 and 2012. In the first instance, spectral bands of Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 ETM+ satellite images, downloaded from the United States Geological Survey (USGS) platform for the years 1990, 2001 and 2012, were used. Mosaics were processed and obtained for the state of Puebla with ERDAS v.10 software for all spectral bands of each image, once the spectral bands of the images had been classified. Through an unsupervised classification and identification of a suitable combination, the dominant land uses were delineated. There were twelve uses or covers for each year and their maps were intersected in three periods: 1990-2001, 2001-2012 and 1990-2012. New maps showing change dynamics and their land-use change matrices were generated. Thus, historical change rates and a model of future change processes were generated. It was found that if the observed trend continues, by 2050 the agricultural, urban and cloud forest uses could increase their footprint. On the other hand, forest, lowland forest and scrubland will lose area, and there will be a total loss of aquatic vegetation in the state.

Keywords: Hedges, Revegetation, Deforestation, Remote Sensing.

¹ División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México- Texcoco, km. 38.5, C.P. 56230.

² Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México- Texcoco, km. 38.5, C.P. 56230.

I. INTRODUCCIÓN

Las coberturas terrestres o superficiales de la Tierra son el centro de un gran número de procesos biofísicos clave en el funcionamiento del sistema medioambiental global. Sus cambios de usos impactan directamente sobre la diversidad biológica mundial; contribuyen al cambio climático local y regional; son la principal fuente de degradación del suelo y afectan a la capacidad de los sistemas naturales de mantener las necesidades humanas. Los cambios en la cobertura del suelo también incluyen los cambios en la productividad primaria actual y potencial, calidad del suelo y tasas de escorrentía así como de sedimentación. Ante ciertos cambios significativos, hoy se sabe que las comunidades se reorganizan y su composición se modifica, a veces de modo sustancial (Terradas, 2001).

En las últimas décadas el cambio del uso del suelo se ha constituido como uno de los factores plenamente implicados en el cambio global, alterando procesos y ciclos. Lo anterior, se vuelve trascendental si se considera que es a través de estos cambios donde se materializa la relación entre el hombre y el medio ambiente (Lambin *et al.*, 1999).

Los tipos de uso de la tierra se distinguen como la conversión de la cobertura del suelo, es decir, la sustitución completa de un tipo de cobertura por otro, y la modificación de la cubierta terrestre. Estos cambios en la cobertura de suelos se dan especialmente cuando se altera y convierte un tipo específico de ecosistema, como los bosques y pastos, en una superficie para la agricultura o construcción de zonas urbanas. Estos cambios alteran los balances de energía local y la composición de las especies dominantes (Restrepo, 2005).

La degradación del suelo ocurre como una respuesta a múltiples factores ambientales y económicos. Las principales actividades humanas que inducen la degradación de suelos se encuentran las actividades agropecuarias, incluyendo la

deforestación, la administración inadecuada de los recursos forestales, el sobre pastoreo y los sistemas de producción agrícola (Cotler, 2003).

La intensificación del uso del suelo se encuentra asociada con sistemas agrícolas, agroforestales o de pastoreo. Una manipulación intensificada puede estar basada en técnicas de irrigación, utilización de fertilizantes, uso del fuego, prácticas de labranza o la integración de diferentes actividades de producción. Esta intensificación afecta la composición del ecosistema, el reciclaje de nutrientes y la distribución de la materia orgánica (Ojima *et al.*, 1994).

Otros factores que se asocian a la intensificación del uso del suelo es el consumo excesivo de recursos naturales así como el crecimiento acelerado de la población y son una de las muestras más claras de influencia de las sociedades sobre el territorio. Estos cambios tanto en la cobertura y uso del suelo también se asocian a los procesos de urbanización.

La predicción es una herramienta que contribuye a la toma de decisiones para planeación, en el caso de cambio de uso del suelo, se puede usar como una herramienta preventiva a través de la cual se generan estrategias de administración, que orientan un uso adecuado y racional de los recursos naturales, permitiendo así un reordenamiento de las actividades que se realizan, en función a los resultados obtenidos en el análisis de cambio y prognosis del mismo.

Varios autores afirman que ante la necesidad de realizar políticas ambientales efectivas se debe recurrir a todas las formas del conocimiento humano. Dentro de esta tendencia hacia la integración de ciencias y disciplinas, hay un interés creciente en la colaboración entre científicos de las áreas sociales, naturales y expertos en teledetección para tener un mejor conocimiento de las causas y los procesos que permitan una interpretación profunda de los patrones del cambio de cobertura y uso del suelo (Mertens *et al.*, 2000).

II. JUSTIFICACIÓN

Es innegable que durante los últimos 50 años se transformaron los ecosistemas en magnitudes inimaginables. Entre los cambios más destacados se enlista la pérdida de la mitad de la cubierta forestal mundial original y la devastación o perturbación irreversible de 30% de los ecosistemas. El incremento poblacional (de un billón a finales del siglo XIX a 6.5 billones a principios de siglo XXI) aunado a las tasas de consumo, son patrones asociados a estos procesos de degradación. ¿Dónde ocurren estos cambios, de qué magnitud son y cuáles serán los escenarios posibles? son preguntas recurrentes y relevantes para cada país. Esto es crucial para aquellos países donde, por un lado, se concentra la mayor riqueza natural y cultural así como las mayores tasas de pérdida y degradación de los ecosistemas (Los trópicos), en este orden de ideas se considera que buena parte de estas preguntas se cubren en un análisis del cambio en la cobertura y uso del suelo (ACCUS). (Lambin *et al* 2001).

Vitousek y colaboradores (1997), documentan que este tipo de análisis permite entender las causas y consecuencias de las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, disminución de la biodiversidad y en general, pérdida del capital natural y cultural. Así, desde una perspectiva puramente académica resulta obvia la relevancia de las bases de datos de cambio de cobertura y uso del suelo para documentar los procesos antes descritos. A partir de éstas, se deducen escenarios sobre la pérdida del capital natural o biodiversidad, se generan modelos sobre los posibles efectos del cambio global y se fundamentan las estrategias de planificación de uso del suelo.

México no escapa a las tendencias mundiales antes descritas ya que, dentro de sus casi dos millones de kilómetros cuadrados de superficie se observan una gran cantidad de cambios que en general están por arriba de la media mundial en cuanto a tasas de deforestación, incremento de las áreas de cultivo y pastoreo,

expansión urbana y muchos otros factores de cambio bien documentados (Sánchez-Colon *et al.* 2008).

El análisis de cambio de cobertura y uso del suelo (ACCUS), por lo tanto, se ha convertido en México en un insumo fundamental y las bases de datos tanto de los insumos como las derivadas del mismo análisis, no son perfectas. La evaluación de la calidad de la información es crucial y ocupa hoy día una posición central en las agendas de las instancias que deben su existencia a la generación de insumos propios para elaborar ACCUS. En México, como en la mayor parte del mundo, aún no existe la cultura de someter una base de datos cartográfica a una evaluación rigurosa. A la fecha son prácticamente nulas las experiencias que incluyen un diseño estadísticamente robusto (Couturier *et al.* 2009).

En el estado de Puebla un problema actual relacionado con la biodiversidad es el cambio de uso de suelo, cuyos procesos erosivos, que resultan de la deforestación erosión e inestabilidad de laderas, han originado situaciones de desastre con importantes desplazamientos de organismos (Alcántara 2005); esta problemática se origina por el aprovechamiento de recursos naturales sin criterios de sustentabilidad, lo que altera los ecosistemas. Las investigaciones realizadas han demostrado que las presiones biológicas ejercidas por factores del ambiente como lo son particularmente los elementos del clima tales como la temperatura y la precipitación, determinan tales desplazamientos y en el caso más grave su extinción (Anaya 1990).

III. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el uso actual del suelo y la vegetación del estado de Puebla, a través del análisis e interpretación de imágenes de satélite e identificar las tasas de cambio de uso del suelo y vegetación para el periodo de 1990 - 2012.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Describir el uso de suelo y vegetación a partir de imágenes de satélite Landsat en el periodo de datos 1990-2000-2012 por los sensores TM y ETM+, para la caracterización de las coberturas y usos del suelo en el estado de Puebla.
- ✓ Cuantificar las superficies transformadas a partir de matrices de transición, para obtener las tasas de cambio del uso de suelo y vegetación en el periodo 1990-2012.
- ✓ Generar un modelo de alteración espacial que describa las dinámicas y permanencias de las coberturas vegetales y usos del suelo en el periodo de 1990-2012.
- ✓ Proyectar, en escenarios posibles, los cambios y ocurrencia de uso de suelo y vegetación para el año 2050, utilizando las tasas de cambio del periodo estudiado.

IV. HIPOTESIS

Las áreas más vulnerables al cambio de uso serán las coberturas vegetales naturales y se mantendrá una tendencia al aumento de superficies ocupadas por las actividades agrícolas y ganaderas, particularmente de agricultura de temporal.

V. ANTECEDENTES

El número de investigaciones de cambio de cobertura y uso del suelo basados en imágenes de satélite ha crecido exponencialmente en los últimos años, pero, aunque la teledetección es reconocida como un instrumento práctico para el monitoreo ambiental y la valoración de los recursos naturales, enfrenta obstáculos como la dificultad de interpretar consistentemente las características espectrales de la superficie bajo un amplio tipo de condiciones ambientales (Mas *et al.*, 2004).

Otras investigaciones han señalado que las acciones más importantes en el cambio de uso del suelo son las relacionadas con la deforestación y en ese sentido, Pineda *et al.*, (2009) calculan los cambios, intercambios y transiciones sistemáticas que afectan la pérdida de la cobertura forestal en el Estado de México; a través de métodos de regresión multivariada explican las causas que provocan el proceso de deforestación regional. El estudio reporta una pérdida significativa de bosque en los últimos 9 años; estos cambios los atribuyen a diversos factores, entre ellos, la población humana. Así como las pérdidas de vegetación, mismas que se dan en áreas boscosas más próximas a las zonas agrícolas, lo que de alguna manera confirma el fenómeno de la expansión agrícola. Lo anterior revela que la pérdida de bosque se presenta en áreas con alta fragilidad ecológica. Pineda *et al.*, (2009) sugieren que el uso de los SIGs sirven para conocer y explicar de manera holística la pérdida de la masa forestal, intentando aproximarse un poco más a la realidad geográfica de este tipo de procesos, donde la interrelación de factores físicos y humanos se presenta de manera conjunta.

Otra importante contribución es la de Rosete *et al.*,(2009), que analizan los principales procesos de cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, en particular, aquellos asociados con los cambios en el matorral xerófilo, el uso agropecuario y el crecimiento de la mancha urbana. Cabe mencionar que a lo largo de 22 años se dan cambios en 7.7 % del territorio peninsular. Los principales procesos de cambio registrados, originados por la

actividad humana, son la conversión del matorral xerófilo a áreas agrícolas (desmatorralización), la conversión de matorral xerófilo y pastizales a zonas urbanas (expansión de manchas urbanas), así como la recuperación de la vegetación en zonas agrícolas y de pastizales abandonadas. Es evidente que los procesos de desmatorralización para actividades agropecuarias y la expansión urbana influyen sobre los cambios en el uso de suelo. Además, el incremento de las zonas urbanas y la mala planeación favorece, en muchas ocasiones, el crecimiento de la mancha urbana sobre zonas no aptas para el establecimiento de viviendas (como las laderas inclinadas y los cauces de los ríos) provocando un deterioro del ecosistema, que sin duda es de muy difícil recuperar cuando existe una extracción intensiva de los recursos naturales.

La mejor evidencia de lo antes descrito se muestra en la diversidad de tendencias de cambio de uso publicadas, en especial sobre tasas de deforestación (Cuadro 1). Con base en Velázquez (2008), se observó que al menos existen 16 fuentes diferentes de tasas de deforestación para el país, que hay enormes inconsistencias entre cada una de las estimaciones y que las fuentes de error antes descritas no se han atendido de manera profunda.

Cuadro 1. Comparación entre tasas de deforestación de México. La columna izquierda incluye datos reportadas por académicos, mientras que la columna de la derecha contiene datos derivados de instancias de gobierno o de la FAO (modificado de Velázquez 2008).

Fuentes académicas		Fuentes oficiales	
Fuente	Tasa (ha/año)	Fuente	Tasa (ha/año)
Repetto, 1988	460,000	CONAFOR, 2004	260,000
Masetta et al., 1997	668,000	SEMARNAT, 2006	365,000
Velázquez et al., 2002	550,000	SARH, 1992	365,000
Myers, 1989	700,000	FAO, 1997	508,000
Toledo, 1989	1,500,000	FAO, 1988	615,000
Grainger, 1984	1,600,000	FAO, 1995	678,000
Sánchez et al., 2008	484,000	FAO (Torres), 2004	775,800
Media	838,500	media	492,100
Desviación estándar	451,417	Desviación estándar	181,851

El Cuadro 2 muestra las tasas de deforestación según estudios regionales, para tipos de coberturas vegetales como Selvas y Bosques, con periodos entre 1967-1976, hasta periodos más recientes como 1970-1993

Cuadro 2. Tasa de deforestación derivadas de estudios regionales por tipo de cobertura y para cada periodo evaluado (tomado de Flamenco, 2007). Todas las tasas reflejan pérdida a pesar de ser denotadas por números positivos

FUENTE	COBERTURA	TASA
SELVAS		
Mass <i>et al.</i> , 1996	Selva alta y mediana	8.7 (1982-1992)
Mass <i>et al.</i> , 1996	Selva baja	10.4 (1982-1992)
Trejo y Dirzo, 2000	Selva caducifolia (escala local)	1.4 (1973-1989)
Bococo <i>et al.</i> , 2001	Selva baja caducifolia	1.0 (1975-1993)
Cuaron, 1991		7.7 (1974-1986)
Dirzo y García, 1992		4.2 (1967-1976)
	Selva tropical húmeda	4.3 (1976-1986)
		8.15 (1974-1984)
Mendoza y Dirzo, 1999		7.9 (1984-1991)
Cortina <i>et al.</i> , 1998	Selva, sabana y vegetación secundaria	0.24 (1975-1984)
		0.04 (1984-1990)
BOSQUES		
Bococo <i>et al.</i> , 2001	Bosque templado	1.8 (1975-1983)
Mass <i>et al.</i> , 1996	Bosque de pino	2 (1982-1992)
Mass <i>et al.</i> , 1996	Bosque de pino encino	2 (1982-1992)
Mass <i>et al.</i> , 1996	Bosque de encino	3.4 (1982-1992)
Mass <i>et al.</i> , 1996	Oyamel	2.4 (1982-1992)
Mass <i>et al.</i> , 1996	Bosque de táscate	10.1 (1982-1992)
Mass <i>et al.</i> , 1996	Mesofilo	10.1 (1982-1992)
OTRAS TRANSFORMACIONES		
Ramírez-García <i>et al.</i> , 1998	Manglar	1.74 (1970-1993)
	Agricultura mecanizada	5.22 (1975-1984)
		1.39 (1984-1990)
Cortina <i>et al.</i> , 1998	Agricultura manual	1.38 (1975-1984)
		0.99 (1984-1990)

VI. REVISIÓN DE LITERATURA

6.1 TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

La Teledetección y los SIG surgen en principio como técnicas independientes. La teledetección se concibió como una herramienta para la obtención de información medioambiental, sin interés por su integración con otras capas de información, debido probablemente a las deficiencias técnicas del momento. Fue hasta los años setenta, con la difusión de las primeras imágenes de los satélites Landsat que se considera la posibilidad de integrar información cartográfica con imágenes de satélite. El aumento de la resolución aumentó la capacidad para diferenciar objetos y clases permitiendo la obtención de mapas de usos del suelo. En los años 80's del siglo pasado se empezó a considerar a la Teledetección como una fuente de información para un SIG, especialmente útil para su actualización (Sarria 2006).

La afinidad entre los SIG y la Teledetección es cada vez mayor, ya que ambas se aplican en entornos de trabajo parecidos, además de que requieren hardware y software similares. En conclusión, ambas trabajan con información espacial georreferenciada de la cual se espera obtener resultados relevantes desde un punto de vista ambiental y de planificación.

6.1.1 Teledetección

Se le llama Teledetección al procedimiento a través del cual se obtiene información sin tener contacto directo con el objeto de estudio. Aplicado en el análisis geográfico y espacial se refiere específicamente a la obtención, procesamiento e interpretación de imágenes satelitales (Pérez *et al.* 2006).

6.1.2 Fundamentos de la Teledetección

La Teledetección es posible debido a la variación existente en la reflexión de la radiación electromagnética solar por parte de los elementos que se encuentran sobre la superficie terrestre. La energía reflejada por estos objetos atraviesa la atmósfera y es recibida por sensores óptico-electrónicos; en este caso, por satélites espaciales. Estos a su vez envían la información a la Tierra como una señal digital, que una vez recibida, es procesada corrigiendo errores de diverso origen, para posteriormente ser distribuida a los usuarios finales (Pérez *et al.* 2006).

A las diferentes radiaciones emitidas por las coberturas terrestres existentes se les conoce como “firmas espectrales”, ya que cada una posee una curva específica de reflectividad espectral, definidas principalmente por su frecuencia y longitud de onda (Sobrino *et al.* 2000). Las longitudes de onda posibles varían entre 10^{-12} hasta los 100 metros, mientras que las frecuencias alrededor de los 10¹⁴ y 10²⁰ megahertz. A la gama de radiaciones existentes se le llama espectro electromagnético (Figura 1).

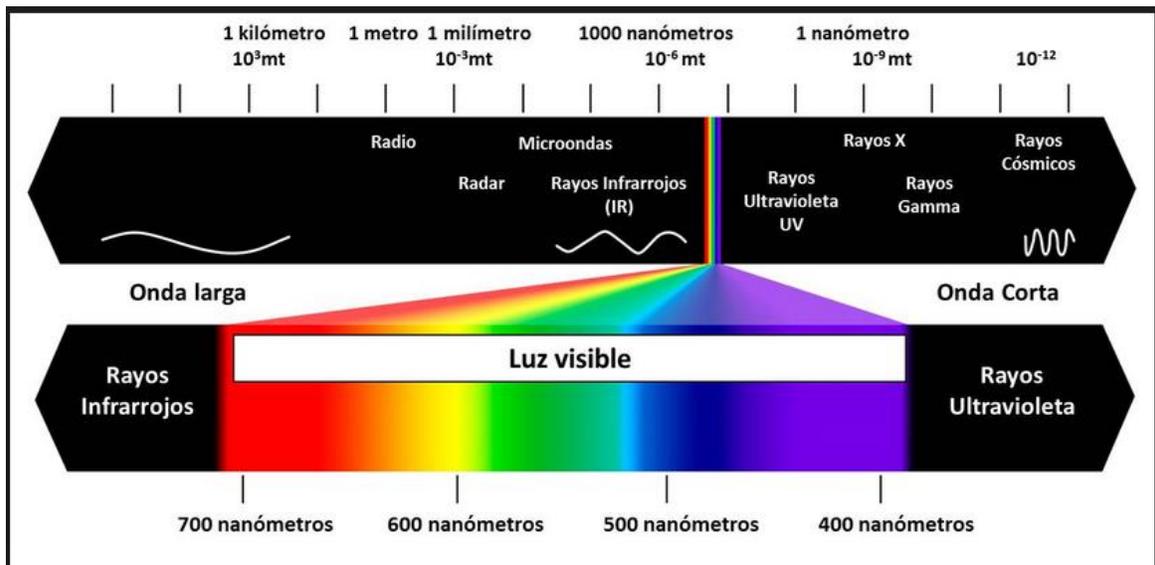


Figura 1. Espectro electro magnético

Un sistema de teledetección espacial se conforma de los siguientes elementos (Chuvienco, 1990):

- i. Fuente de Energía, que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor.
- ii. Cubierta terrestre, formado por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía.
- iii. Sistema sensor, compuesto por el sensor y la plataforma que la sostiene.
- iv. Sistema de recepción – comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma y se graba en un formato apropiado.
- v. Intérprete, canaliza esta información convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa orientada a facilitar la evaluación del problema en el estudio.
- vi. Usuario final, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación

6.1.3 Banda espectral

Los sensores de los satélites cada uno de ellos captura la energía que se refleja en un rango diferente del espectro electromagnético. En la Figura 4 se muestra y distinguen los rangos en los que trabaja cada uno de los sensores de un satélite Landsat, cada uno de esos rangos se denomina banda espectral. En un caso específico, la banda 4 corresponde al rango de longitudes de onda en el cual el sensor 4 es capaz de captar la energía refleja en la superficie terrestre a 0.8 micrómetros.

Las 7 primeras bandas abarcan un rango espectral de 0.450-12.50 μm (banda 1: 0.450-0.515 μm , azul; banda 2: 0.525-0.605 μm , verde; banda 3: 0.630-0.690 μm , rojo; banda 4: 0.775-0.900, infrarrojo próximo; banda 5: 1.550-1.750 μm , infrarrojo lejano; banda 6: 10.40-12.50 μm , térmico lejano; banda 7: 2.090-2.35, térmico cercano). La banda 8 abarca de 0.520-0.900 μm , es decir, desde el verde

hasta el infrarrojo próximo con una resolución en el terreno de 15 m. Las demás bandas tienen una resolución de 30 m; excepto la 6 que es de 60 m.

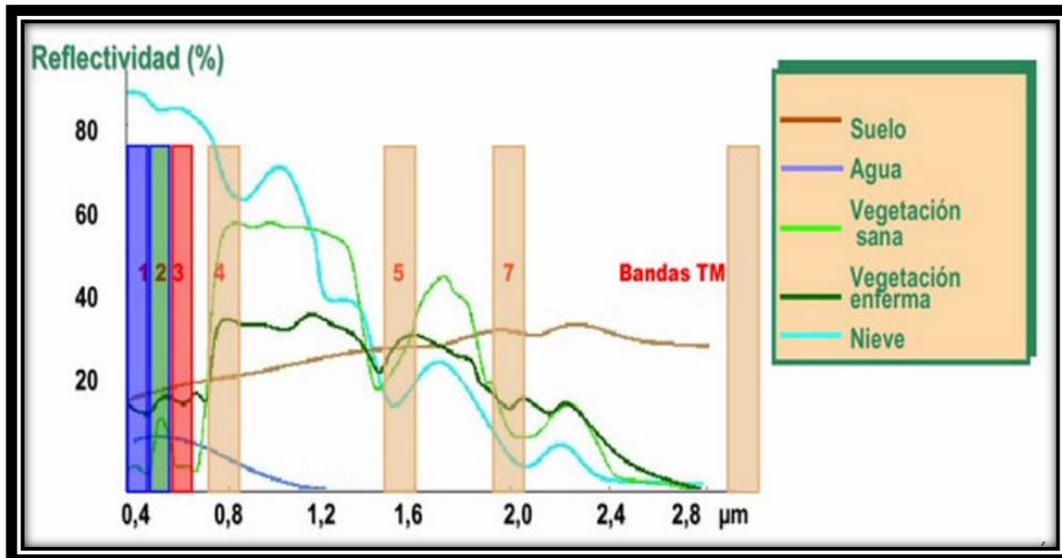


Figura 2. Rango de longitudes de onda en los que funciona cada sensor del satélite.

En consecuencia, cada uno de los sensores captará distintos valores de energía para el mismo píxel en cuestión, generando una imagen distinta del mismo lugar geográfico, pero en cada imagen resaltando valores diferentes, dependiendo de su reflectividad.

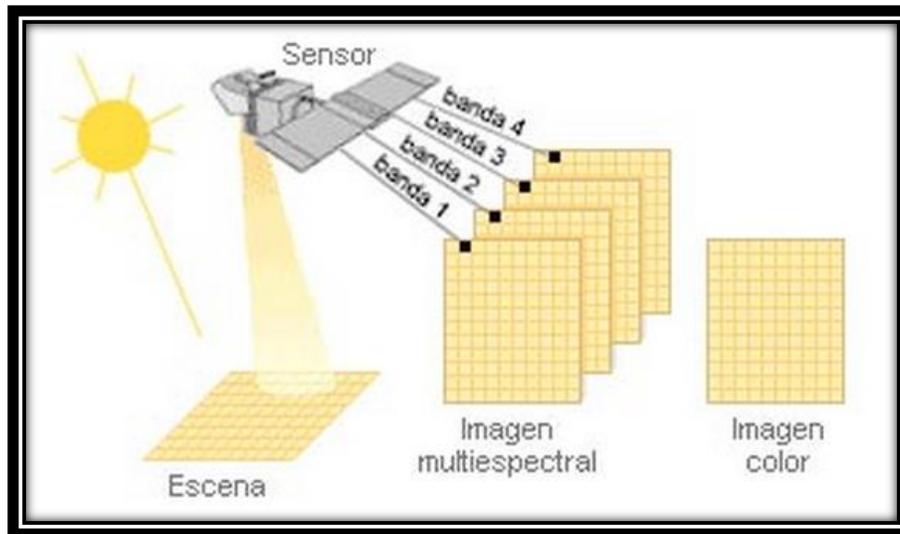


Figura 3. Esquema de adquisición y generación de una imagen (Lillesmand *et. al*, 1987)

A continuación se describe brevemente el significado de cada una de las bandas (Lillesmand *et. al*, 1987):

Banda 1 (Azul): Usada para el mapeo de aguas costeras, diferenciando entresuelo y vegetación; mapeo de tipo de forestación o agricultura, y detecta centros poblacionales.

Banda 2 (Verde): Corresponde a la reflectancia del verde de la vegetación vigorosa o saludable. También es usada para la identificación de centros de población.

Banda 3 (Rojo): Es usada para la discriminación de especies de plantas, la determinación de límites de suelos y delineaciones geológicas así como modelos culturales.

Banda 4 (Infrarrojo Reflectivo): Determina la cantidad de biomasa presente en un área, enfatiza el contraste de zonas de agua-tierra, suelo-vegetación.

Banda 5 (Infrarrojo Medio): Es sensible a la cantidad de agua en las plantas. Usada en análisis de las mismas, tanto en época de sequía como cuando es saludable. También pueden ser usadas para la discriminación de nubes, nieve.

Banda 6 (Termal): Para la vegetación y detección de la vegetación que se encuentra enferma, intensidad de calor, aplicaciones de insecticidas, para localizar la polución termal, ubicar la actividad geotermal, actividad volcánica, etc.

Banda 7 (Infrarrojo medio): Es importante para la discriminación de tipos de rocas y suelos, así como el contenido de humedad entresuelo y vegetación.

Banda 8 (Pancromático): Ayuda a diferenciar los diferentes lineamientos estructurales.

6.1.4 Tipo de sistemas de teledetección

Entre las varias formas de clasificar los sensores remotos, una de las habituales considera su procedimiento de recibir la energía procedente de las distintas cubiertas, dividiéndolo o clasificándolo en dos tipos de sensores (Chuvienco, 1990):

i. Pasivos: cuando se limita a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, de acuerdo con esto, puede hablarse de sensores fotográficos, óptico-electrónicos y de antena, se basan en las técnicas aplicadas de la fotografía convencional. Otros tipos de pasivos son los tubos de vidicón en televisión comercial, equipos scanners en exploración médica y radiométrica de microondas en radifusión.

ii. Activos: cuando son capaces de emitir su propio haz de energía que posteriormente recogen tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar, el equipo más utilizado es el radar, bastante utilizado en aplicaciones militares así como en control del tráfico aéreo. El radar trabaja en la región de las microondas.

6.1.5 Tipos de datos en imágenes de teledetección

Según Iturrate (1998), el modelo multibanda, puede almacenar una imagen digital completa (con todas las bandas) de tres formas diferentes, en función del ordenamiento de los píxeles:

- **BSQ (Band Sequential):** Se guardan las bandas en orden consecutivo. Idóneo para procesamiento espacial, ya que toda la información de una banda es fácilmente accesible al encontrarse junta y consecutiva.
- **BIP (Bands Interleaved by Píxel):** todas las bandas de un determinado píxel son almacenadas de forma consecutiva. Idóneo para procesamiento espectral, por encontrarse seguida de la información de cada píxel.
- **BIL (Bands Interleaved by Line):** todas las bandas de una determinada línea son almacenadas de forma consecutiva.

6.1.6 Plataformas de Teledetección espacial

Los sistemas satelitales que operan dentro del espectro óptico, el cual se extiende desde aproximadamente 0.3 hasta 14 μm y que tienen un rango que incluye la longitud de onda de rayos ultravioleta, visible e infrarrojo cercano, medio y térmico, son los sensores remotos más representativos del espacio actualmente: Landsat, Spot, y NOAH (Lilliesand, 1994).

Cuadro 3. Variables biofísicas y potenciales sistemas de sensores para la obtención de información. Fuente Jensen, 1996.

VARIABLE BIOFISICA	SISTEMA SENSOR REMOTO POTENCIAL
Información geográfica (x, y)	Fotografías aéreas TM, SPOT, RADARSAT, MODIS, IKONOS, QUICK, BIRD, CBERS
Vegetación	
Concentración de clorofila	Fotografías aéreas TM, SPOT, RADARSAT, ASTER, MODIS, CBERS
Biomasa (verde y seca)	Fotografías aéreas TM, SPOT, ERS-1 microondas, MODIS, CBERS
Contenido de agua en las hojas	ERS-1 microondas, TM, Infrarrojo medio, RADARSAT
APAR (radiación fotosintéticamente activa absorbida)	MODIS
fitoplancton	MODIS, seawifs
Temperatura de la superficie	AVHRR, TM, ERS-1 Microondas, RADARSAT, ASTER
Humedad del suelo	ALMAZ, TM, ERS-1 MICROONDAS, RADARSAT, ASTER
Rugosidad de la superficie	Fotografías aéreas, ALMAZ, ERS-1 Microondas, RADARSAT, ASTER
Evapotranspiración	AVHRR, TM, SPOT, CASI, MODIS, CBERS
Alta atmosfera (composición, temperatura, velocidad y dirección del viento, energía)	UARS, MODIS
BRDF (función bidireccional de distribución de la reflectancia)	MODIS
Oceano (color, fitoplancton, bioquímica, nivel)	POSEIDON, MODIS, SeaWIFS
Nieve y glaciales marinos (extensión y características)	Fotografías aéreas TM, SPOT, RADARSAT, MODIS, CBERS

6.1.7 Plataformas orbitales de teledetección

El primer satélite de teledetección de recursos terrestres no tripulado que se puso en órbita fue el “*Earth resources technology satellite 1*” (ERTS-1), que en 1975, paso a llamarse LANDSAT. Este satélite se construyó a partir de una modificación del satélite meteorológico NIMBUS y llevaba a bordo dos sensores: un sistema de barrido multiespectral, conocido como MSS (*Multispectral Scanner Subsystem*) y un sistema de barrido constituido de tres cámaras de televisión (*Return Beam Vidicon*), conocido como RBV.

Los satélites Landsat de segunda generación (4 y 5) mantienen el sensor MMS, pero eliminan las cámaras RVS e incorporan un nuevo sensor denominado TM (*Thematic Mapper*) diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica (Sobrino *et al.*, 2000). (1) el Tm registra radiación en 7 bandas, tres de ellas están en el rango espectral del MSS pero incorpora una banda azul, dos del infrarrojo medio, y una en el térmico. Las bandas verde, roja e infrarrojo cercano son más estrechas que sus equivalentes del MSS lo que mejora su sensibilidad a los cambios espectrales que resultan de fenómenos agrícolas, (2) la resolución espacial sobre el terreno es de 30 m para todas las bandas excepto en la banda del térmico con 120 m; (3) la radiación recibida se registra en 225 niveles de intensidad en lugar de 64 o 128, lo que permite la observación de cambios más pequeños en las magnitudes radiométricas para cada banda (se pasa de 6 a 8 bits) y (4) aumenta el número de detectores, 16 detectores por banda, excepto la banda térmica 4, realiza 16 líneas de barrido.

Landsat 6, desarrolló en colaboración con la iniciativa privada, se lanzó en 1993 pero fallos de comunicación con la plataforma terrestre de control no se situó en la órbita precisa y se perdió. Este fracaso hizo que el proyecto Landsat 7 pasase a la administración de los EEUU. El 15 de abril de 1999 se lanzó Landsat 7, que incluye la versión mejorada del sensor TM, el ETM (Enhanced Thematic Mapper) que incorpora una banda panorámica (500-900 nm) con la resolución espacial

15m. En Mayo del 2003 se detectaron problemas con la recepción de líneas de pixeles de las imágenes Landsat 7.

Cuadro 4. Características de la familia LANDSAT. Fuente NASA, 1999.

CARACTERÍSTICA	FAMILIA LANDSAT					
	1	2	3	4	5	7
Lanzamiento	23/07/72	22/01/75	05/03/78	16/07/82	01/03/84	15/04/99
Fin de servicio	06/01/78	25/02/82	31/03/83	1983	En activo	En activo
Altitud (km)	917	917	917	705	705	705
Periodicidad (días)	18	18	18	16	16	16
Sensor	RBV,MSS	RBV,MSS	RBV,MSS	MSS,TM	MSS,TM	ETM
Bandas: intervalo espectral (μm)						
RBV (1)	0,48-0,57	0,48-0,57	0,50-0,75			
RBV (2)	0,58-0,68	0,58-0,68				
RBV (3)	0,70-0,83	0,70-0,83				
RBV (4)	0,50-0,60	0,50-0,60	0,50-0,60	0,50-0,60	0,50-0,60	
RBV (5)	0,60-0,70	0,60-0,70	0,60-0,70	0,60-0,70	0,60-0,70	
RBV (6)	0,70-0,80	0,70-0,80	0,70-0,80	0,70-0,80	0,70-0,80	
RBV (7)	0,80-1,10	0,80-1,10	0,80-1,10	0,80-1,10	0,80-1,10	
RBV (8)			10,4-12,6			
TM, EMT (1)				0,45-0,52	0,45-0,52	0,45-0,52
TM, EMT (2)				0,52-0,60	0,52-0,60	0,52-0,60
TM, EMT (3)				0,63-0,69	0,63-0,69	0,63-0,69
TM, EMT (4)				0,76-0,90	0,76-0,90	0,76-0,90
TM, EMT (5)				1,55-1,75	1,55-1,75	1,55-1,75
TM, EMT (6)				10,4-12,5	10,4-12,5	10,4-12,5
TM, EMT (7)				2,08-2,35	2,08-2,35	2,08-2,35
						0,50-0,90
Resolución espacial (m)	RBV=80 MSS=79	RBV=80 MSS=79	RBV=40 MSS ¹ =79 ¹ (8)=240	MSS=82 TM ² =30 ² (6)=120	MSS=82 TM ³ =30 ³ (6)=120	ETM ⁴ =30 ⁴ (6)=120 PAN=15

6.1.8 Los sistemas de información geográfica (SIG)

Los SIG son una nueva tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial, y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.

Como “*Sistema de Información*” se entiende la unión de la información y herramientas informáticas (programas o software) para su análisis con unos objetivos concretos. Por otra parte, al incluir el término “Geográfica” se asume que

la información es espacialmente explícita, es decir, incluye la posición en el espacio (Goodchild, 1994).

La base de un SIG es, por tanto, una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables (formato ráster), o bien capas que representan objetos (formato vectorial) a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada (Chrisman, 1997). Esta estructura permite combinar en un mismo sistema, información con orígenes y formatos muy diversos, incrementando la complejidad del sistema (Figura 4).

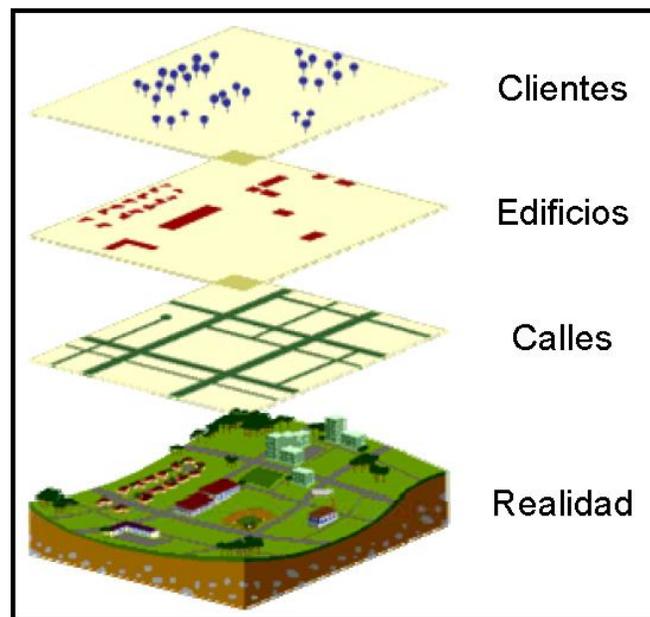


Figura 4. Ejemplo de un SIG

Mediante los SIG se pueden realizar operaciones entre las capas, y así obtener resultados en formato imagen o en tablas. Todos estos resultados pueden utilizarse para la elaboración de análisis y modelos. Por lo tanto, no hay que considerar a los SIG como una herramienta sólo de captura, almacenamiento, manejo y presentación de mapas (Courboules *et al.*, 1988).

Los componentes necesarios para llevar a cabo las tareas de un SIG aparecen en la Figura 1-10. De estos componentes, el hardware (ordenador), el software

(programas del ordenador) y un contexto apropiado de organización, que incluye personal capacitado, son fundamentales. Los usuarios pueden superar con frecuencia los obstáculos de los otros componentes del SIG, pero no a la inversa. El mejor software y hardware del mundo no pueden compensar la incompetencia de quien los maneja.

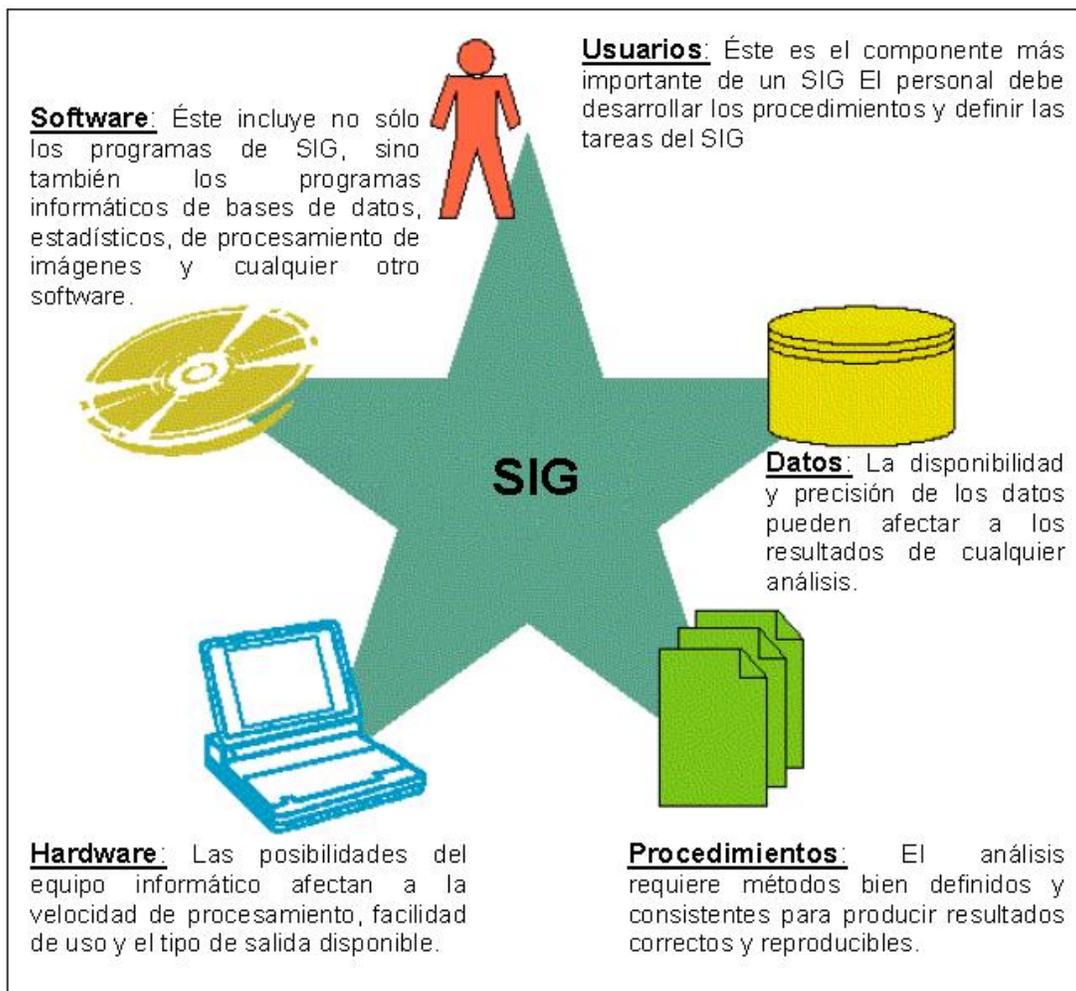


Figura 5. Componentes de los SIG

6.1.9 Tipos de organización de los datos en el ordenador.

Uno de los problemas fundamentales en el desarrollo de un proyecto de SIG es adaptar una realidad compleja y continua, para representarla de forma simplificada y en elementos discretos (Burrough y McDonnell, 2000). Es inevitable que, para una correcta codificación de los datos espaciales en un ordenador, se tenga que

utilizar el propio código informático, cuyas instrucciones están basadas en series de interruptores, que están en 1 de 2 estados (“on” u “off”, “verdadero” o “falso”, “sí” o “no”, etc.). Estos estados están codificados por los números 1 y 0 respectivamente y el sistema binario de base 2 es la base fundamental del código de computación.

Por tanto, los datos geográficos necesitan ser convertidos en registros discretos en el ordenador utilizando estos interruptores para representar la localización, presencia o ausencia, tipo, etc., de la información espacial. El desarrollo de una base de datos espacial conlleva una simplificación de la realidad para adaptarla a un modelo de datos. Tal como se muestra en la Figura 6, existen dos formatos de datos: vectorial y ráster (Peña, 2006).

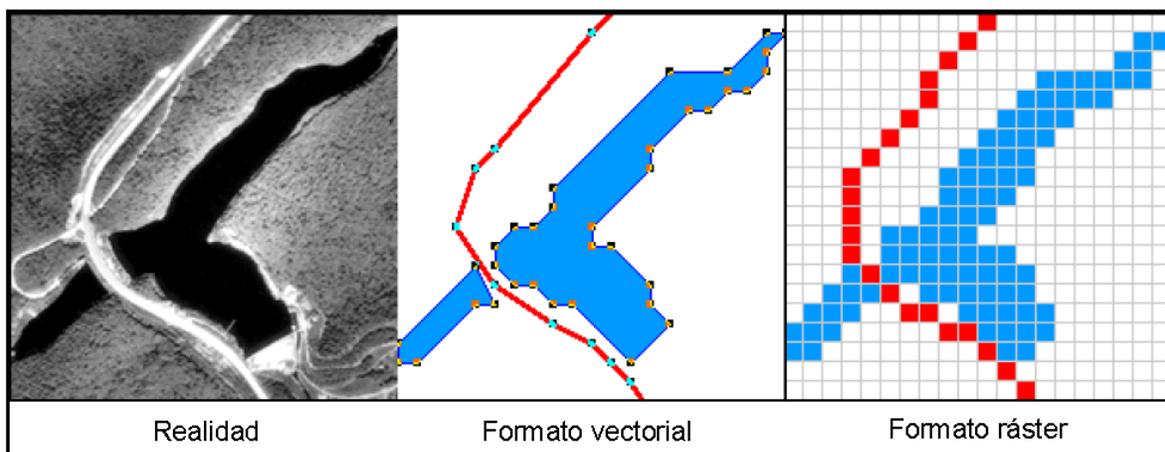


Figura 6. Formatos de datos geográficos. (Peña 2006)

En el modelo vectorial se considera que la realidad está dividida en una serie de objetos discretos (puntos, líneas, polígonos) a los que se puede asignar diversas propiedades, cualitativas o cuantitativas. Estos objetos se codifican por su posición en el espacio (puntos y líneas) o por la posición de sus límites (polígonos). Los cambios de escala van a suponer en muchos casos que los objetos cambien de un tipo a otro.

En el modelo ráster por el contrario se considera la realidad como un continuo basado en la variación continua y en el que las fronteras son la excepción. La representación se realiza dividiendo ese continuo en una serie de celdillas o

píxeles, y asignándole a cada una un valor para cada una de las variables consideradas. Los cambios de escala van a reflejarse en el tamaño de estas celdillas.

La representación de la realidad que se haga en la base de datos espacial es una de las cuestiones fundamentales, ya que condiciona enormemente la estructura de la misma y los modos de trabajo posteriores. Las ventajas e inconvenientes de uno u otro dependen en gran medida de la aplicación o análisis que se quiera llevar a cabo y de los resultados que se quieran obtener. Hoy en día, sin embargo, se tiende a compaginar al máximo ambos modelos para conseguir una mayor versatilidad.

6.2 IMÁGENES DE SATÉLITE

Desde el ámbito de las ciencias de la tierra, la teledetección tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales, tomadas desde satélites artificiales, de la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. El espectro electromagnético generalmente empleado en teledetección abarca desde el ultravioleta hasta las microondas.

Las imágenes son matrices de celdas llamadas píxeles, formadas por un determinado número de filas y columnas. Cada una de esas celdas representa un área geográfica invisible, determinando así, el detalle espacial mínimo que se puede distinguir dentro de la imagen. El tamaño de la superficie que puede ser representada (tamaño del píxel), varía dependiendo del satélite y de los sensores que tomen la imagen. Cada píxel contiene un valor numérico, que representa en promedio la cantidad de energía solar que esa superficie refleja. Como energía que se refleja depende de lo que haya sobre ella (cultivo, bosque, suelo desnudo o asentamientos humanos), los sensores ubicados en los satélites captan distintos niveles y calidades de energía, que luego pasan a ser distintos colores de una imagen ya formada (Figura 7).



Figura 7. Imagen de satélite; recorte de la imagen de satélite a una matriz de 6x4

6.3 CAMBIO DE USO DEL SUELO

Para el trabajo de investigación el análisis del cambio de uso del suelo es de vital importancia en un estudio multitemporal. A continuación se describen algunas reseñas y maneras de hacer un estudio de cambio de uso del suelo.

6.3.1 Cambios de coberturas y usos del suelo en la historia

El cambio, visto como proceso de variación en las condiciones ambientales y en la composición, estructura y funcionamiento de las comunidades, no ha sido la excepción, sino la regla en la historia de la naturaleza (Figura 8). La paleontología aporta información sobre la historia antigua del planeta, indicando que la vida ha cambiado mucho, en su constante evolución. Las eras geológicas se describen a partir de los cambios florísticos y faunísticos en los registros fósiles.

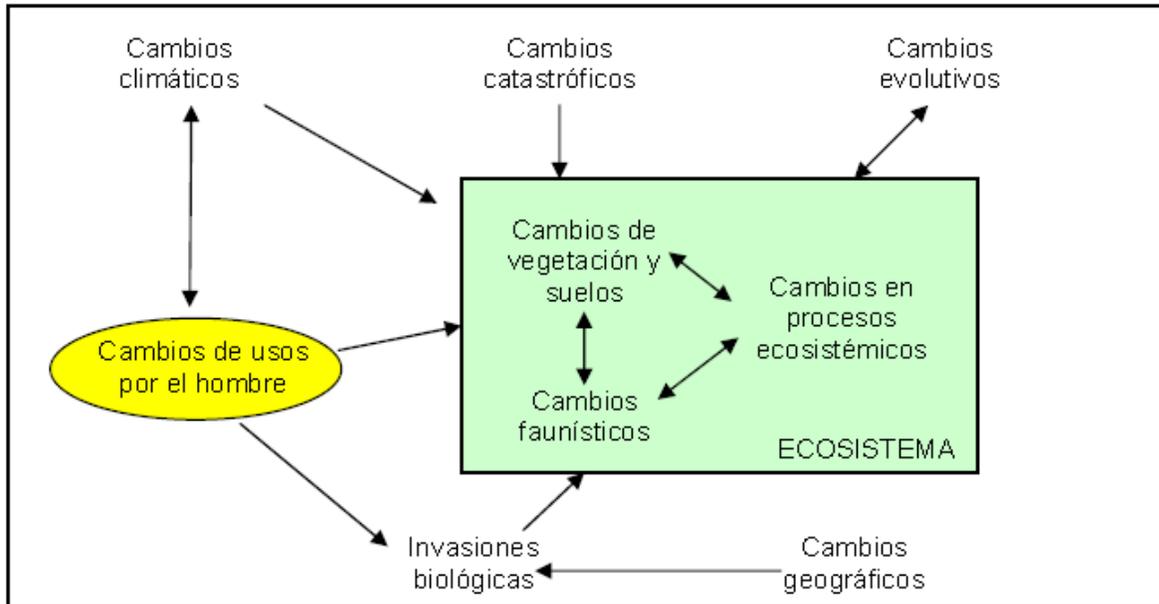


Figura 8. Procesos de cambio que han de ser considerados al estudiar el cambio global actual o futuro (extraído de Terradas, 2001).

La Tierra tiene una historia que podemos considerar agitada, y la vida ha evolucionado constantemente. Se podría argumentar que todo esto ha sucedido a lo largo de muchos millones de años, y que no tiene demasiada importancia a la hora de pensar en las comunidades concretas. Aunque, se traten de estudiar algunos aspectos de los tiempos relativamente recientes, el clima ha estado, por lo que sabemos, en permanente evolución, y los paisajes también (Terradas, 2001).

Las coberturas del suelo pueden ser cambiadas por procesos naturales. Las variaciones climáticas afectan a los ecosistemas terrestres globalmente, mientras que erupciones volcánicas y cambios en los niveles de ríos y mares son impactos más localizados. Cambios de estos tipos están siempre operando y en algunos casos son difíciles de distinguir de las influencias humanas. Sin tener en cuenta estos, los cambios de coberturas del suelo a nivel mundial en el presente y el pasado reciente son abrumadoramente el resultado de los propósitos de producción y en menor medida, asentamientos humanos. Estas actividades constituyen los usos del suelo.

La humanidad ha alterado los ecosistemas terrestres desde el uso del fuego para la caza y el advenimiento de la domesticación de plantas y animales (Thomas,

1956). El mosaico que hoy se percibe en los paisajes europeos ha sido, esencialmente, creado por el hombre. Desplazados los grandes mamíferos, la organización básica se hace en campos, bosques, pastos y poblaciones (Terradas, 2001).

Los cambios más importantes han surgido principalmente a lo largo de la fase agrícola de la historia (Wolman y Fournier, 1987), y más notablemente en la deforestación y el desplazamiento de especies transoceánico (Crosby, 1986; Turner *et al.*, 1994). Estos cambios tuvieron importantes consecuencias, pero en escala espacial, magnitud y ritmo no son comparables con los que se están produciendo en la sociedad moderna industrial.

6.3.2 Cambios de coberturas y usos del suelo a escala global

El ritmo, magnitud y alcance espacial de las alteraciones humanas en la superficie de la Tierra no tiene precedentes. Actualmente, los distintos tipos de cambios de cobertura del suelo son globales en escala y magnitud espacial y de ritmo rápido (Meyer y Turner II, 1992). Los cambios en coberturas del suelo (atributos biofísicos de la superficie de la Tierra) y usos del suelo (propósito humano a estos atributos) están dentro de los más importantes (Lambin *et al.*, 1999).

A escala global, los cambios de coberturas y usos más importantes son las altas tasas de deforestación tropical y su desplazamiento a cultivos en el caso de países en desarrollo como en África Central y América de Sur, especialmente en la Amazonia; las modificaciones de los ecosistemas áridos y semiáridos con tendencia a la degradación y desertificación; la intensificación agrícola definida como altos niveles de entradas y aumento de salidas (en cantidad y valor) de productos cultivados o criados por unidad de área y tiempo; y la urbanización en forma de construcción o pavimentación de áreas para usos humanos.

Las demandas de producción-consumo de la sociedad moderna no pueden concebirse sin una mayor modificación y conversión de las coberturas del suelo para varios usos. La mayor parte de los usos recae dentro de pocas categorías:

cultivo, producción ganadera, usos para recreación, asentamientos o infraestructura, etc.

Todas las categorías principales de usos del suelo se han expandido significativamente a través de la historia humana y particularmente a partir de la Revolución Industrial. Actualmente, la agricultura y la producción ganadera han hecho lenta su expansión global, mientras que la expansión de asentamientos humanos está creciendo (Berry, 1990). Durante la próxima década y siglo, de acuerdo a muchos expertos (por ejemplo: Ruttan, 1994), la agricultura desplazará su expansión hacia la intensificación, mientras que las áreas urbanas seguirán creciendo.

Estas transformaciones están ligadas al aumento de la población humana, que ha pasado de 425 millones en 1500 a 600 millones en 1700, 1.200 millones en 1850, 2.000 millones en 1920 y 4.430 millones en 1980 (Richards, 1990). El crecimiento de la población, así como las transformaciones tecnológicas, han conducido y conducirán siempre de forma acelerada a profundas transformaciones en la ocupación y el uso de los suelos en el Planeta (Figura 9).

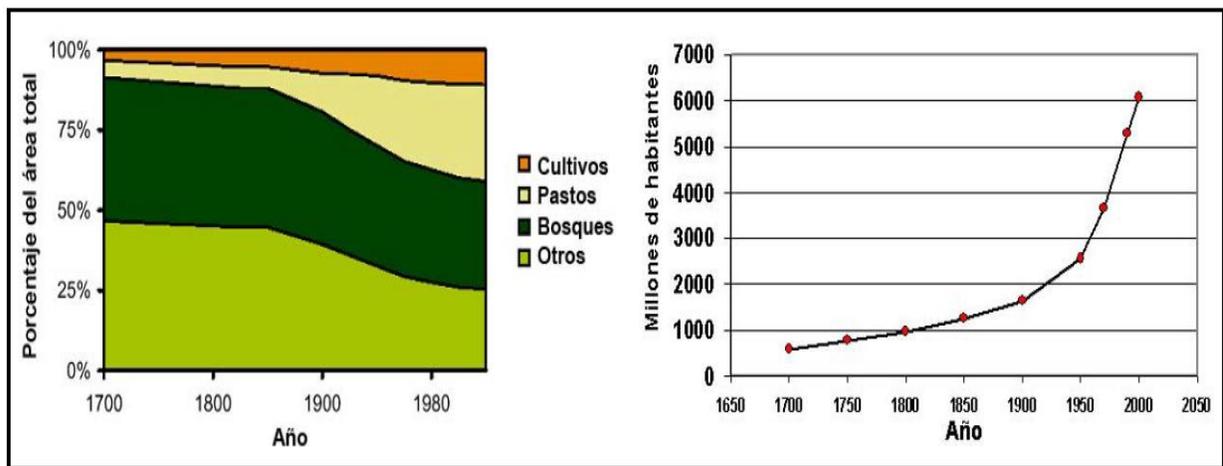


Figura 9. Cambios estimados en usos del suelo y población desde 1700 a 1990

El retroceso de las formaciones forestales es general. Actualmente, se cuentan menos de 1.2 miles de millones de hectáreas, o sea, el 19% de la superficie estimada en 1700. El crecimiento de las formaciones herbáceas para pastos

también es importante (560 millones de hectáreas). Por contra, los cultivos han experimentado una fuerte expansión, más de 1200 millones de hectáreas. Es importante resaltar que esta expansión se está produciendo de forma acelerada; las tierras cultivadas han aumentado más de 331 millones de hectáreas desde la segunda guerra mundial, mientras que el aumento sólo ha sido de 272 millones de hectáreas entre el comienzo del siglo XIX y 1945 (Richards, 1990).

6.3.3 Causas de los cambios de usos del suelo

Los paisajes pueden cambiar debido a muchos factores, ya sean naturales o inducidos por el hombre (Forman, 1997). Las perturbaciones naturales como inundaciones y tormentas tienen una profunda influencia en la evolución histórica de los paisajes, pero generalmente la influencia humana arrolla y enmascara estos procesos naturales debido a su mayor frecuencia e intensidad de ocurrencia (Luque et al., 1994).

Los desencadenantes antrópicos del cambio de uso del suelo son:

- ✓ Factores demográficos, como el tamaño de la población o densidad.
- ✓ Tecnología.
- ✓ Estructuras políticas.
- ✓ Factores económicos como los sistemas de cambio o la propiedad.
- ✓ Actitudes y valores.

Los procesos de cambio directamente relacionados con la actividad humana son: intensificación agrícola, abandono agrícola, incendios, deforestación, aprovechamiento ganadero y desarrollo humano (Farina, 1998).

La especificidad de causas que median los cambios es difícil de lograr más allá del futuro inmediato, sin embargo, a causa de que los usos del suelo están manejados por las dinámicas cambiantes de producción-consumo, están sujetos a las extravagancias y complejidades de los factores social, político, económico, e incluso cultural y religioso.

6.3.4 Efectos de los cambios de usos del suelo

Los cambios de usos y coberturas del suelo tienen implicaciones medioambientales significativas, como los impactos directos de la degradación del suelo, alteración de la escorrentía superficial o la disminución de agua del subsuelo. Estos tipos de cambios, así como sus impactos asociados están íntimamente conectados con el cambio global medioambiental. Por ejemplo: la eliminación de nutrientes del suelo tiene impactos inmediatos en la producción de la tierra, cambios en la vegetación y erosión del suelo, impactos a medio término en la fragmentación del paisaje y la productividad de la tierra, y posibles impactos a largo plazo en el cambio climático.

La transformación histórica de sistemas naturales a la agricultura y otros usos humanos del suelo ha resultado en una liberación neta de dióxido de carbono a la atmósfera (Houghton y Skole, 1990), aproximada a la liberación desde combustibles fósiles quemados en los últimos 150 años, aunque la liberación actual de dióxido de carbono de la conversión de coberturas del suelo es aproximadamente el 30% de la combustión de gasóleos fósiles. La conversión de coberturas del suelo puede tener una importante influencia en la climatología e hidrología regional (Murillo y Castaño, 2003).

Los cambios de coberturas del suelo tienen una importante influencia en el balance de agua y energía. Las coberturas del suelo determinan la aspereza superficial, el albedo, y el flujo de calor latente y sensible. Por lo tanto, los cambios en la distribución de las coberturas del suelo altera el balance regional y posiblemente global de estos flujos. Estos cambios son parámetros importantes para los modelos de circulación general. El flujo de calor latente, por ejemplo, está mediado por la evapotranspiración. La Evapotranspiración Real (ETR) es función del tipo de cobertura del suelo, de la humedad del suelo y el clima.

Los cambios en cobertura vegetal, que median el balance hídrico, también influyen en la ETR. La ETR es una función de toda la planta y los potenciales hídricos del xilema, área foliar y cierre de los estomas, profundidad de las raíces, y

la estructura del dosel a lo largo del continuo suelo-planta-atmósfera, el uso del agua y la ETR varían especialmente a lo largo de diferentes ecosistemas y temporalmente cuando una cobertura del suelo se convierte en otra. Éstos también varían en función de la estacionalidad. En estos términos, los datos de coberturas del suelo actuales geográficamente referenciados con un componente estacional son importantes para la modelización del clima más allá de su simple utilización como medida de parametrizar el flujo de calor sensible, debido a que el balance hídrico y los controles fisiológicos en flujo de calor latente mediado por la vegetación ocurren estacionalmente y a escalas finas.

6.3.5 Tasa de Cambio de uso de suelo

La evaluación de este fenómeno es necesaria como medio para conocer la dinámica y magnitud del mismo, así como sus efectos ocasionados (Lambin *et al.* 2001, citado por Velázquez *et al.* 2002) para posibilitar la toma de decisiones acertadas.

La mejor forma de cuantificar este proceso es mediante el análisis de la dinámica de la cubierta vegetal relacionándola con el espacio y el tiempo (Berry *et al.* 1996, citado por Velázquez *et al.* 2002).

La tasa de cambio es un indicador de presión que permite conocer la magnitud y velocidad con que se está presentando este proceso. La FAO (1996) citada por Velázquez *et al.* (2002) propone la siguiente ecuación que expresa el cambio en porcentaje de la superficie del año inicial:

$$tc = [(S_2 / S_1)^{1/n} - 1] \times 100$$

Dónde:

tc = tasa de cambio

S₁ = superficie de esa clase de uso en la fecha 1 en ha

S₂ = superficie de esa clase de uso en la fecha 2 en ha

n = diferencia de años entre una fecha y otra

Para ello se requiere contar con información referente a diversos períodos de tiempo y con tipos de uso de suelo correspondientes. Estas bases de datos son escasas y no siempre compatibles. De modo que esta información debe ser generada, una herramienta útil es la Teledetección.

6.3.6 Clasificación no supervisada

La clasificación es una forma de aprendizaje, un proceso que acumula y concentra experiencias dentro de modificaciones internas de un sistema; no razona para deducir un resultado o tomar decisiones. Por lo tanto, la clasificación se limita a agrupar conjuntos de objetos en clases a través del uso de técnicas de inteligencia artificial o estadísticas, principalmente en aquella del tipo digital. Este modelo deberá generar imágenes que, por su diferenciación espectral, garantice un proceso de segmentación confiable. (Arango *et al.*, 2005)

La *clasificación no supervisada* son aquellas en las que el algoritmo clasificador no necesita de más información que la escena a clasificar (imagen satelital) y algunos parámetros que limiten el número de clases. Estos mecanismos de clasificación basan su efecto en la búsqueda de clases con suficiente separabilidad espectral (matices de colores en la imagen) como para conseguir diferenciar unos elementos de otros.

VII. MATERIALES Y METODOS

En el presente apartado se describirán los materiales y métodos utilizados en el estudio multitemporal de las coberturas y usos del suelo del estado de Puebla.

7.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estado de Puebla se ubica en la parte centro–este de México; tiene una superficie de 34 290 km², que representa el 1.7 % del espacio total nacional. Se caracteriza por una amplia heterogeneidad topográfica pues alberga cuatro grandes provincias biogeográficas: la Sierra Madre Oriental, la Llanura Costera del Golfo Norte, el Eje Neovolcánico, y la Sierra Madre del Sur.

Esta diversidad geomorfológica ocasiona marcados cambios de altitud que dan lugar a una amplia diversidad de climas, dominando los climas templados que cubren la mayor parte del territorio, seguidos de los cálidos y los semicálidos; la heterogeneidad climática se debe, en parte, a que conforme aumenta la altitud disminuye la temperatura y el territorio poblano está dominado por topografía montañosa y de lomeríos (65 %).

Este territorio se caracteriza por contar con pocos afluentes superficiales de gran importancia, lo que provoca que la economía del campo se centre fundamentalmente en el agua subterránea.

7.2 ASPECTOS FÍSICOS

7.2.1 Localización

El estado de Puebla tiene una superficie de 34 290 km² (1.7% del espacio total nacional). Su contorno semeja un triángulo isósceles, cuyo vértice apunta hacia el norte y la base hacia el sur. Sus coordenadas geográficas extremas son: al norte 20° 50', al sur 17° 52', al este 96° 43' y al oeste 99° 04'. Colinda con los estados

de Hidalgo y Veracruz al norte, al este con Veracruz y Oaxaca, al sur con éste último y Guerrero, y al oeste con este estado, Morelos, México, Tlaxcala e Hidalgo (CONABIO 2011).

7.2.2 Superficie y relieve

En Puebla se encuentran cuatro de las catorce provincias fisiográficas de México: Sierra Madre Oriental, Llanura Costera del Golfo norte, Eje neovolcánico y Sierra Madre del Sur (Cuadro 5), constituidas a su vez por diez subprovincias fisiográficas, que observan características distintivas en cuanto a geología, altitud, hidrología, clima, precipitación pluvial, suelos y vegetación (CONABIO 2011).

Cuadro 5. Provincias fisiográficas del estado de Puebla. Fuente: CONABIO 2011

Clave	Suelo principal
Sierra Madre Oriental	Se extiende paralelamente a la costa del Golfo de México; es un conjunto de sierras con altitudes entre los 2 000 y 3 000 msnm. Está representada por la subprovincia Carso Huasteco, compuesta principalmente por la topoforma de sierras altas, con grandes valles, mesetas y lomeríos escarpados que cubren prácticamente toda esta zona.
Llanura Costera del Golfo Norte	Se extiende sobre las costas del Golfo de México. Está representada por la subprovincia Llanuras y Lomeríos, presenta un sistema de topoformas con lomeríos, valles y mesetas cerca de la Sierra Madre Oriental.
Eje Neovolcánico	Se caracteriza por una cadena de sierras y lomeríos, constituida por la acumulación de lavas, brechas y cenizas volcánicas. La conforman las subprovincias Lagos y Volcanes de Anáhuac, Chicanquiaco y Sur de Puebla.
Sierra Madre del Sur	Limita al norte con la provincia del Eje Neovolcánico, al este con las provincias Llanura Costera del Golfo Sur y Cordillera Centroamericana y al sur y oeste con el Océano Pacífico. Está representada por cinco Subprovincias: Cordillera Costera del Sur, Mixteca Alta, Sierras y Valles Guerrerenses, Sierras Centrales de Oaxaca y Sierras Orientales.

7.2.3 Clima

El estado posee gran diversidad de climas, principalmente por los marcados cambios de altitud de su relieve: los climas templados son los que cubren la mayor parte del territorio, en segunda instancia los cálidos y en tercer lugar los semicálidos; el restante corresponde a los semisecos, secos, semifríos y fríos (INEGI 2000).

La temperatura media anual del estado es de 17.5°C, la temperatura máxima promedio es de 28.5°C durante los meses de abril y mayo, y la temperatura mínima promedio es de 6.5°C presente en el mes de enero, sin embargo, como se observa en la Figura 2. En el estado hay, al menos, 13 tipos de climas (CONABIO 2011). Los vientos alisios producen altas precipitaciones en el noreste, este y sureste de la entidad debido al alto contenido de humedad que llevan a su paso por el Golfo de México, sin embargo, dejan una menor cantidad de lluvia en el resto del territorio debido al efecto conocido como “sombra pluviométrica” u “orográfica”. Respecto a la precipitación, en la parte norte se registran isoyetas con valores medios anuales de 4 250, 3 750, 3 250, 2 750, 2 250 y 1 750 mm, en el centro de 1 750, 1 250, 1 100, 900 y 750 mm y hacia el sur de 650, 550, 450 y 350 mm (CONABIO 2011).

En el norte, los climas cálidos de la vertiente oriental han propiciado el desarrollo de una comunidad vegetal exuberante como la selva alta perennifolia, la cual contrasta con los bosques de coníferas de las laderas occidentales de la sierra. En la zona centro, en las faldas de las elevaciones se distribuyen los bosques de coníferas; en la porción austral se encuentran la selva mediana subperennifolia y baja caducifolia, esta última es la de mayor distribución, además de los matorrales y chaparrales que se adaptan a las condiciones de menor humedad ambiental (García, 1988). Lo anterior se presenta debido a que es posible identificar la presencia de los siguientes 25 tipos de climas (Cuadro 6) de acuerdo a la clasificación de Köppen (McKnight y Hess, 2000).

Cuadro 6. Tipos y subtipos de clima presentes en el estado de Puebla.

Clave	Tipos y Subtipos climáticos
Af(m)	Cálido húmedo con lluvias todo el año
Am(f)	Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano
Aw2	Subtipo de mayor humedad dentro de los cálidos subhúmedos
Aw0(w)	Subtipo de menor humedad dentro de los cálidos subhúmedos
A(C)w1(w)	Subtipo de media humedad dentro de los semicálidos subhúmedos
A(C)w0(w)	Subtipo de menor humedad dentro de los semicálidos subhúmedos
(A)C(fm)	Semicálido húmedo con lluvias todo el año
C(fm)	Templado húmedo con lluvias todo el año
C(m) y C(m)(w)	Templados húmedos con abundantes lluvias en verano
C(w2)(w) y C(w2)	Subtipos de mayor humedad dentro de los templados subhúmedos
C(w1)(w)	Subtipos de humedad media dentro de los templados subhúmedos
C(w0)(w)	Subtipos de menor humedad dentro de los templados subhúmedos
C(E)(w2)(w) y C(E)(w2)	Subtipos de mayor humedad dentro de los semifríos subhúmedos
C(E)(w1)(w) y C(E)(w1)	Subtipos de media humedad dentro de los templados subhúmedos
BS1(h)w(w)	Subtipo semiseco muy cálido
BS1hw(w)	Subtipo semiseco semicálido
Bskw(w) y BS1k'w	Subtipos semisecos templados
BS0(h')w(w)	Subtipo seco muy cálido
E(T)H	Frío
Af(m)	Cálido húmedo con lluvias todo el año
Am(f)	Tipo cálido húmedo con abundantes lluvias en verano
Aw2	Subtipo de mayor humedad dentro de los cálidos subhúmedos
Aw0(w)	Subtipo de menor humedad dentro de los cálidos subhúmedos
A(C)w1(w)	Subtipo de media humedad dentro de los semicálidos subhúmedos
A(C)w0(w)	Subtipo de menor humedad dentro de los semicálidos subhúmedos

7.2.4 Recursos hídricos

Puebla posee recursos hidrológicos superficiales y subterráneos, con un aporte anual de alrededor de 5 000 mm de agua, que al igual que en el resto del país, no se encuentran distribuidos uniformemente (CNA, 2003). En su territorio convergen cuatro grandes Regiones Hidrológicas (RH): La RH 18 (Río Balsas), que cubre todo el suroeste y la parte centro; la RH 28 (Río Papaloapan), que riega la zona

sureste; la RH 27 (Río Tuxpan-Nautla), que cubre en su totalidad la zona norte y la RH 26 (Río Pánuco).

El estado cuenta con 22 ríos (Atoyac, Nexapa, Pantepec, San Marcos, Necaxa, Ajajalpan, Apulco, Salado, Zempoala, Tilapa, Mixteco, Acatlán, Zapoteco, Coyolapa, Alseseca, Atila, La Huertilla, Axuxuca, El Chivo, Tizáac, Texcapa y Hondo), seis lagos cráter (Alchichica, Quechulac, Atexcac, La Preciosa, Aljojuca y Tecuitlapa) y dos lagunas temporales (Totolcingo y el Salado). Tiene once presas almacenadoras e infraestructura con una capacidad total de almacenamiento de 643 millones de metros cúbicos (CONABIO, 2011). Entre las más representativas se encuentran la Presa Manuel Ávila Camacho (nombrada Parque Estatal Humedal de Valsequillo en 2012), Necaxa, Tenango, Nexapa, La Soledad, Boqueroncito y San Felipe.

Con relación al agua subterránea, el estado se divide en cinco zonas geohidrológicas: 1) Valle de Puebla, 2) Cuenca de Oriental, 3) Tecamachalco, 4) Atlixco-Izúcar de Matamoros y 5) Tehuacán (CNA, 2003). También existen aguas termales que alcanzan temperaturas que van de los 36° a los 90° C, como en los manantiales de los Humeros, Chignahuapan e Izúcar de Matamoros (CONABIO, 2011).

La extracción de agua es a través de pozos, norias, galerías filtrantes y manantiales; el agua extraída se destina en aproximadamente 80% a la agricultura, el 15% a los servicios públicos urbanos y domésticos, el 3.5% a la industria y el 1.5% restante para fines pecuarios.

Algunos acuíferos como el de la Cuenca Oriental o la parte noroccidental del Valle de Puebla tienen suficiente disponibilidad de agua, mientras que los de las zonas de Palmar del Bravo, Tehuacán y Tecamachalco están sobreexplotados (CNA, 2003).

La sobreexplotación de acuíferos, la deforestación y otras actividades humanas como la descarga de aguas negras a los cuerpos de agua sin un tratamiento previo, han dado como resultado: a) una disminución en la calidad del agua, b) la

eutrofización de cuerpos de agua, c) la pérdida del caudal de ríos y arroyos, y d) el azolvamientos de drenajes naturales. Estos impactos que no sólo afectan a las actividades humanas, sino también a las comunidades de plantas y animales que se abastecen del vital líquido (CNA 2003).

7.2.5 Suelos

Las condiciones ecológicas contrastantes en el estado han favorecido un mosaico edáfico variado con una diversidad de 22 unidades de suelos (Cuadro 7).

Cuadro 7. Unidades de Suelo, clave y superficie (INEGI, 2006).

Clave	Suelo principal	km2	%
LP	Leptosoles	11 629	33.97
RG	Regosoles	5 410	15.80
PH	Phaeozems	3 602	10.52
AN	Andosoles	3 006	8.78
LV	Luvisoles	2 373	6.93
VR	Vertisoles	1 910	5.58
AR	Arenosoles	1 345	3.93
CM	Cambisoles	1 081	3.16
FL	Fluvisoles	543	1.59
CL	Calcisoles	520	1.52
DU	Durisoles	492	1.44
ZU	Zona Urbana	480	1.40
CH	Chernozems	441	1.29
SC	Solonchaks	354	1.03
AC	Acrisoles	277	0.81
UM	Umbrisoles	270	0.79
NT	Nitisoles	163	0.48
GY	Gipsisoles	125	0.37
KS	Kastañozems	118	0.34
PL	Planosoles	24	0.07
SN	Solonetz	20	0.06
GL	Gleysoles	5	0.01
H2O	Cuerpo de Agua	48	0.14

Su formación se debe a la acción combinada de diversos factores: clima, material parental, relieve, organismos y el tiempo. Considerando que estos factores influyen en la génesis de los suelos, se tienen en consecuencia diversos procesos de formación, entre los que sobresale: la meteorización, lixiviación, óxido-reducción, mezcla del suelo, calcificación y salinización (Sánchez, 1980).

La clase textural media predomina con un 65 %, que corresponde a 2 227 245 ha, distribuidas a lo largo de todo el territorio; le sigue la textura gruesa que ocupa el 20.5 %, con 700 989 ha, las cuales se distribuyen sobre todo en el centro y por último la textura fina con el 12.9 % correspondiendo a 442 608 ha., distribuidas en partes del norte y sur del territorio poblano. Los suelos arcillosos presentan drenaje interno bajo, en tanto que los de textura media poseen drenaje moderado y los de textura gruesa se consideran bien drenados.

Desde el punto de vista orgánico, la fertilidad de los suelos agrícolas varía de media a baja; el manejo al que han sido sujetos los ha empobrecido. En general hay disponibilidad de elementos esenciales, pero en el caso de Andosoles existe una retención del fósforo aprovechable por las plantas. Actualmente la mayor parte de los suelos agrícolas del estado son continuamente fertilizados en favor de obtener cosechas de forma regular (Werner 1978).

Los tipos de suelo más abundantes son los Leptosoles, Regosoles, Phaeozems y Andosoles (WRB, 2000), que en conjunto ocupan el 69.1 % del territorio poblano, el 24.2 % es ocupado por los Luvisoles, Vertisoles, Arenosoles, Cambisoles, Fluvisoles, Calcisoles y Durisoles y el restante 5.3 % por unidades poco representativas en extensión como Chernozems, Solonchaks, Acrisoles, Umbrisoles, Nitisoles, Gipsisoles, Kastañozems, Planosoles, Solonetz y Gleysoles; el 1.5 % restante lo conforman Zonas Urbanas y Cuerpos de Agua para sumar el 100 % de la superficie estatal (Cuadro 5).

A continuación se describe la distribución de los cuatro tipos de suelos más abundantes en área ocupada dentro del estado (INEGI 2000).

Leptosoles - Se localizan en sierras y lomeríos de la Sierra Madre Oriental hacia Huehuetla e Ixtacamaxtitlán, en la Sierra Madre del Sur hacia Santa María del Monte y Caltepec.

Regosoles - Suelos poco evolucionados en su perfil, que constituyen la etapa inicial de formación de un gran número de ellos. Se localizan en extensas zonas de la Sierra Madre del Sur hacia Chiautla de Tapia, en el Eje Neovolcánico hacia Zacatepec y en la Llanura Costera del Golfo Norte hacia Metlaltoyuca y Tenampulco (Buol *et al.* 1983). La vocación actual de estos suelos es variada y está relacionada con la diversidad ecológica que se presenta; algunos sustentan pastizales cultivados e inducidos, agricultura de temporal y en algunas zonas, bosques de pino y vegetación secundaria de selva baja caducifolia (Figura 1.7).

Phaeozems - Su distribución es muy amplia, encontrándose en la Llanura Costera del Golfo Norte hacia Jalpan, en el Eje Neovolcánico hacia Chignahuapan Oriental, Santa María del Monte y Cholula, y en sitios muy localizados de la Sierra Madre del Sur. Estos suelos están influidos en su formación por las características climáticas, mismas que determinan la cobertura vegetal que favorece los procesos de formación de humus. Tienen una fertilidad natural elevada y producen buenas cosechas, las que pueden aumentarse si se realizan estudios más detallados al respecto. Tradicionalmente son dedicados a la agricultura de temporal, aunque también en ellos se ubican pastizales cultivados y algunos tipos de vegetación secundaria.

Andosoles - Suelos formados a partir de cenizas volcánicas que se distribuyen en extensas zonas donde ha habido una actividad volcánica reciente como lo es el Eje Neovolcánico, especialmente hacia los grandes volcanes que colindan la entidad, tales como el Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Citlaltépetl y La Malinche; también en algunas partes de la Sierra Madre del Sur que han sido cubiertas por cenizas volcánicas como en las cercanías de Cuetzalan.

Desde el punto de vista químico, estos suelos presentan el problema de la retención o fijación de fósforo, lo que dificulta la absorción de este elemento por las plantas y en consecuencia problemas en su desarrollo (Valera 1993).

7.3 ASPECTOS SOCIOECONOMICOS

La sociedad y su organización política son factores de presión para la biodiversidad. En Puebla la excesiva división política en 217 municipios se ha convertido en un impedimento para la instrumentación de políticas públicas integrales para el manejo de su capital natural.

Además, es la quinta entidad más poblada del país con 5 779 829 habitantes, cifra que representa el 5.2% del total nacional, de los cuales 51.4% son mujeres y 48.6% hombres (INEGI, 2010). Para el año 2010, 78% de la población vivía en localidades urbanas y el 22% en rurales, lo que se refleja también en un patrón similar de concentración de la vivienda (INEGI, 2010).

La población de la entidad alcanza un grado promedio de escolaridad de 7.4 años, que se ubica por debajo del nacional de 8.1 años (INEGI, 2010). Con relación a la salud, de 2005 2008 se observó una tasa bruta de mortalidad de 4.82%, que indica que anualmente fallecían 4.82 personas por cada mil habitantes, cifra similar al promedio nacional. Puebla presenta un alto grado de marginación ocupando el quinto lugar nacional; el 46% de los 217 municipios están clasificados como de alta y muy alta marginación. El desarrollo desigual ha provocado la concentración de recursos en una pequeña parte del territorio estatal, y la heterogeneidad de su estructura productiva en el resto de la entidad, siendo evidente que el rezago social se concentra en las zonas rurales, en las que la educación, la salud y el acceso a una vida digna son temas lejanos a la realidad cotidiana. Esto se ve reflejado en su índice de desarrollo humano (IDH) de 0.76, que en el 2004 ubicó a la entidad en el lugar 26 a nivel nacional (ONU, 2007).

7.3.1 Economía

Existe tal desigualdad en el nivel de desarrollo, distribución y actividades económicas de la población que ocasiona también disparidades en el bienestar económico por la elevada concentración de la riqueza y la inequitativa distribución del ingreso, manteniéndose una situación social donde la pobreza y sus situaciones extremas se generalizan en la realidad poblana (Ornelas-Delgado, 2004).

Puebla aporta el 3.3% del PIB (Producto Interno Bruto) nacional. En el Cuadro 8 se muestra el desglose del PIB estatal por sector de actividad económica (primaria, secundaria y terciaria) y el porcentaje correspondiente. Se puede observar que las actividades con mayor aporte son la industria manufacturera (25.14%) y las actividades terciarias con un 63.18%.

Cuadro 8. Actividades económicas y % al PIB estatal.

SECTOR DE ACTIVIDAD ECONÓMICA		% de aporte al PIB estatal
Actividades Primarias	Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza.	4.93
Actividades Secundarias	Industrias manufactureras, construcción y electricidad, agua, gas y minería	31.89
Actividades Terciarias	Comercio, transporte e información en medios masivos, servicios financieros e inmobiliarios, educativos, de salud y asistencia social, profesional, científica y técnica, entre otros.	63.18
Total		100

7.4 TIPOS DE VEGETACIÓN DE PUEBLA

Los tipos de vegetación en el estado de Puebla se encuentran distribuidos principalmente en tres grupos: bosques, selvas y matorrales; el resto se agrupa en vegetación inducida, hidrófila y en las grandes zonas agrícolas que cubren el resto

del estado. En orden de importancia los tipos de vegetación más representativos son: el bosque de coníferas que ocupa una superficie de 327 428.83 ha, el bosque de encino con 165 216.79 ha, el matorral, 278 724.5 ha y la selva perennifolia con 50 131 ha.

En cuanto a los bosques, en Puebla se encuentran el de coníferas, de encino y mesófilo de montaña. El bosque de coníferas se encuentra principalmente en la Sierra norte de Puebla y abarca aproximadamente 9.7% de la superficie del estado. El bosque de encino que abarca 4.89% del territorio, se distribuye a lo largo de la franja climática norte-sur, en las laderas occidentales de la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico y en pequeñas laderas y lomeríos de la Sierra Madre del Sur. El bosque mesófilo de montaña ocupa el 2.9% de la superficie y se encuentra principalmente en la sierra volcánica del Pico de Orizaba y en las laderas orientales de la Sierra Mazateca (CONABIO, 2011).

El matorral se desarrolla en climas cálidos y muy cálidos, en regiones áridas y semiáridas. Se presenta al occidente, en el Valle de Tehuacán y en la Sierra Negra, ocupando un 8.26% de la superficie del estado. Este tipo de vegetación ha sufrido fuertes alteraciones en algunos lugares debido al pastoreo desordenado, principalmente de ganado caprino. Por otra parte, en el estado se tienen selvas de tipo caducifolia, perennifolia y subcaducifolia que se desarrollan en climas cálido, húmedo, subhúmedo y semiseco.

La selva caducifolia se encuentra sobre laderas abruptas de la Sierra Madre Sur (zona semiárida y subhúmeda de la Mixteca Alta), abarcando el 15.68% de la superficie del estado. La selva perennifolia se encuentra al norte (a lo largo de la vertiente del Golfo norte y sobre las laderas del Casco Huasteco) y sureste del estado (al oriente de la Sierra Madre del Sur, en la sierra Zongolica y noreste de la Sierra Negra) abarcando el 1.48% del estado (CONABIO, 2011).

Desafortunadamente muchos de los ecosistemas que se encuentran en el estado están perturbados o fuertemente degradados, lo que representa una pérdida irreparable para la región y el país. Como fuente de riqueza natural, los

ecosistemas de Puebla deben ser restaurados, administrados y conservados apropiadamente en beneficio de generaciones futuras (CONABIO, 2011).

7.5 IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT-5 TM, LANDSAT-7 ETM+, LANDSAT-8 ETM+

Las imágenes satelitales utilizadas para este estudio fueron descargadas por El Servicio Geológico de los Estados Unidos **USGS**, (por sus siglas en inglés, United States Geological Survey) directamente en su plataforma en internet llamada Earth Explorer de manera gratuita y abierta al público de interés, para ello se incurrió a crear una cuenta o perfil de ingreso el cual había que especificar para que fines tenía el acceso a estas imágenes y llevar un control de los usuarios.

Las imágenes correspondieron al periodo de tiempo entre 1990 y 2012, las imágenes se descargaron en tres grandes grupos, para el periodo que correspondía al año 1990, así como el año 2001 y finalmente para el año 2012. Las imágenes pertenecen a los satélites LANDSAT-5 TM para las imágenes de los años 1990, LANDSAT-7 ETM+ para las imágenes del año 2001 y finalmente LANDSAT-8 ETM+ para las imágenes del año 2012. Para el año 2012 se descargaron imágenes en la temporada de altas precipitaciones y las otras en temporada seca (Figura 10).

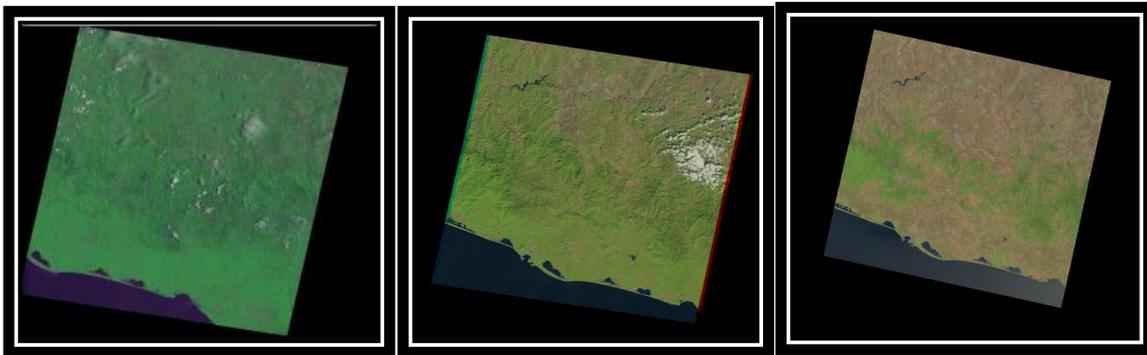


Figura 10. Imágenes del satélite L-5 TM (1990), L-7 ETM+ (2001) y L-8 OLI/TIRS (2012)

Con relación a la cobertura temporal, Landsat tarda 16 días para la obtención de imágenes del mismo punto de la tierra por lo que en un año se pueden tomar

hasta 23 imágenes con una anchura de barrido de 185 Km. Los satélites Landsat en sus recorridos en todo el globo terráqueo, tiene una forma sistemática de realizar los barridos de las imágenes a nivel mundial el cual se le ha denominado de forma "Path-Row". Este sistema está compuesto por dos números (fila y columna) estos sirven para conocer la ubicación de una imagen satelital otorgándole un "nombre" en dos números, así el planeta está dividido en una malla, y de esta manera realizar los barridos de las imágenes satelitales obtenidas por el Programa Landast.

De esta manera, los Path-Row utilizados en el estudio para cubrir el área total del estado de Puebla fueron: 25-46; 25-47; 25-48; 26-47; 26-48 (Figura 11); estas fajas de imágenes del estado de Puebla se descargaron para los tres periodos, y de esta manera realizar el estudio multitemporal a (1990,2001 y 2012). Para el año 1990 solo se trabajó con solo tres imágenes Path-Row (25-46; 25-47; 25-48) debido a que la imágenes en la plataforma no estaban disponibles al público y las imágenes que se podían descargar eran muy defectuosa por nubosidades en más del 80% de la imagen, pero aun las tres imágenes disponibles son aptas para el estudio, debido a un recubrimiento del área total del estado en un 97%, lo que la hace apta para ser tomada en cuenta en el estudio multitemporal.

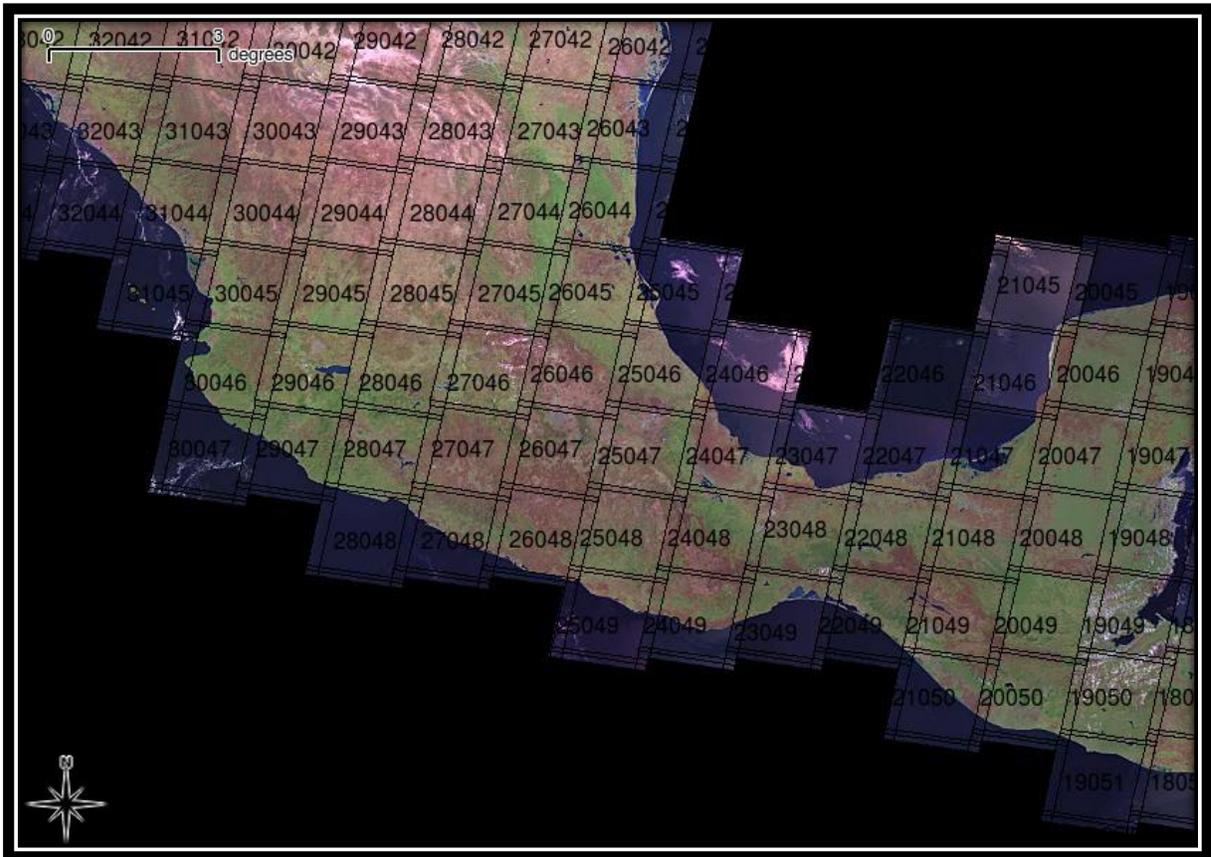


Figura 11. Sistema Path-Row de los Estados Unidos Mexicanos

7.6 BANDAS ESPECTRALES

El satélite LANDSAT-7 viene equipado con los sensores ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) y TM (Thematic Mapper) que permiten obtener imágenes de la superficie terrestre que pueden ser usadas en una gran diversidad de aplicaciones en el ámbito agrícola, forestal, de suelos, hidrológico, recursos costeros y monitorización medioambiental. El sensor ETM+ dispone de lectura en 8 canales o bandas situadas en distintas zonas del espectro electromagnético mientras que el TM sólo dispone de 7 bandas.

Para el satélite LANDSAT-8 OLI/TIRS a diferencia de los demás y siendo lo más reciente en la tecnología en el programa Landsat, contiene 4 bandas más que el anterior L-7 ETM+, ósea cada imagen tomada contiene un total de 12 bandas espectrales.

Para la investigación se organizaron todas las bandas de cada una de las imágenes satelitales, estas se clasificaron según el satélite el año y su fecha respectivamente, según el número de banda obtenidas para cada imagen de satélite (TM 7 bandas, ETM+ 8 bandas y OLI/TIRS 11 bandas), las cuales se tomaron en cuenta solo las primeras siete bandas para todas las imágenes satelitales, para la siguiente etapa de combinación de las mismas.

7.7 CARACTERIZACIÓN Y COMBINACIÓN DE BANDAS ESPECTRALES DE IMÁGENES LANDSAT TM, ETM+, OLI/TIRS (ERDAS 10.1)

A continuación se describirá el proceso de caracterización y combinación de las bandas espectrales a través de las imágenes satelitales para los años de 1990-2001-2012.

7.7.1 Mosaicos de bandas espectrales

Para realizar estos mosaicos las imágenes se manipularon con el paquete de software ERDAS 10.1, este es un programa básico y fundamental que permite con herramientas de geoprocésamiento una gran variedad de aplicaciones entre ellas trabajar herramientas de mapeo, visualización, realce, geocorrección, georreferencia, acceso a metadatos de imágenes, clasificación No supervisada entre otras.

Para realizar los mosaicos se utilizó la herramienta llamada "*Data Preparation*" en el icono subíndice "*Mosaic Image*" (ver Figura 12), al desplegar la ventana de mosaicos se dirige a "*Eddt/ Add images*", en este icono se recurre a adicionar las imágenes de las bandas respectivamente por números y fechas. Una vez adicionadas las imágenes (ver Figura 13) se especifica el modo de entrada, en el cual se elige "*Average*" con el objetivo de obtener mosaicos en el que los valores de las zonas intersectadas se promedien y lo plasme en el mosaico, y finalmente se corre el proceso para obtener el mosaico.

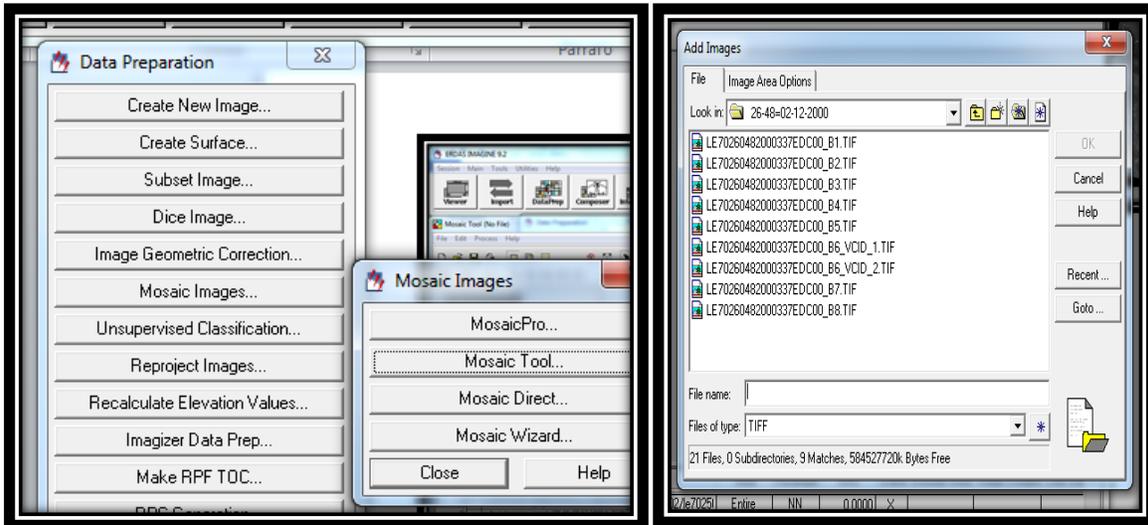


Figura 12. Realización del mosaico de la Banda 1 (2001) mediante el software ERDAS 10.1

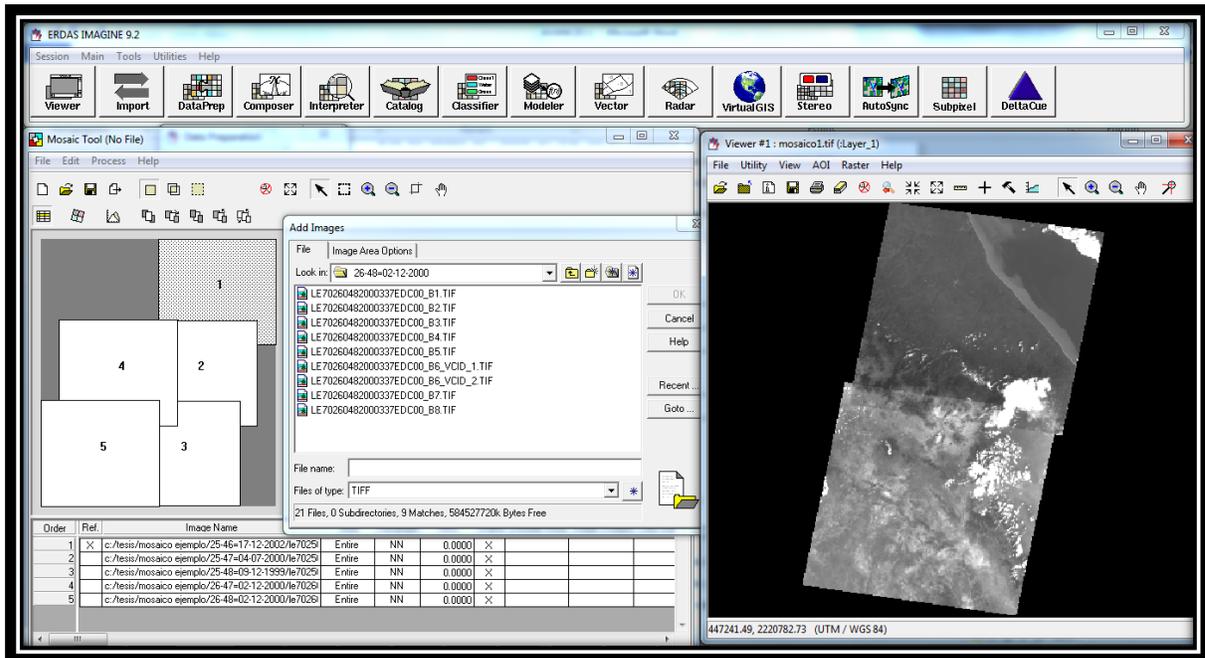


Figura 13. Proceso de obtención del mosaico de la Banda 1(2001) mediante el software ERDAS 10.1

7.7.2 Delimitación del área de interés: estado de Puebla)

Los part-row descargados tienen una cobertura de 185 km de longitud, toda esta área que se fusiona en los mosaicos de 5 imágenes, esta área supera ampliamente la superficie que va ser objeto de estudio, por consecuencia debe ser

delimitada mediante el corte del área de influencia, estrictamente hablando del Estado de Puebla. Este procedimiento se implementó para los 26 mosaicos.

Para este proceso se requirió de un mapa del estado de Puebla con coordenadas UTM y tipo de formato “.shape” e importarlo al software ERDAS 10.1, se tuvieron que desplegar al mismo tiempo en la barra de menú “Viewer” el mosaico al que se iría a recortar y el mapa del estado de Puebla (ver Figura 14).

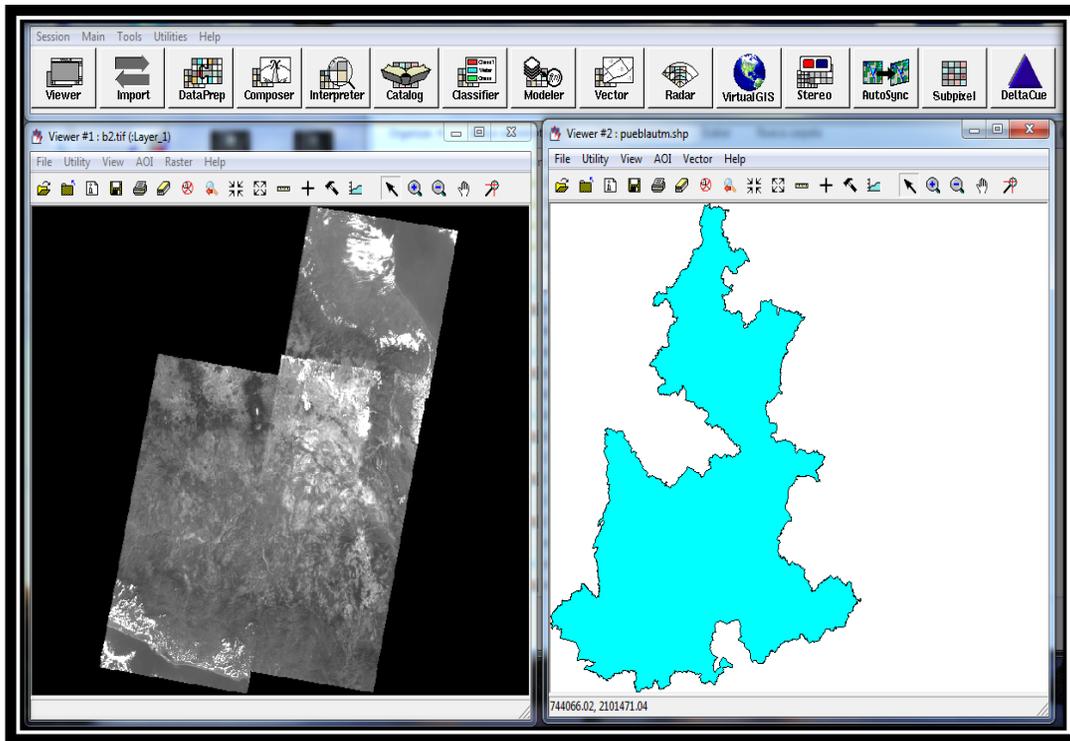


Figura 14. Recorte del área de interés estado de Puebla

Posteriormente, para el recorte se selecciona la herramienta “Copy selection to AOI” la cual seleccionara el área a recortar en el mosaico, aparece el estado de Puebla punteado (ver Figura 15) finalmente, con la herramienta “Subset Image” extraerá la imagen punteada en el mosaico, y le otorgara una entrada que sería el mosaico y una salida que sería el nuevo archivo recortado.

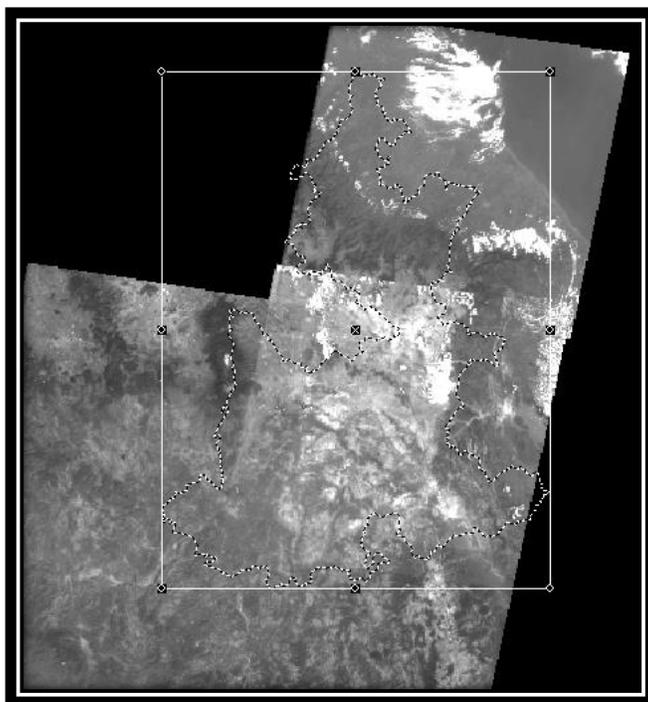


Figura 15. Recorte punteado del área de interés del estado de Puebla

En la Figura 16 se observa el recorte final del estado de Puebla, de esta manera se realizaron 26 recortes para todas las bandas espectrales de los años 1990-2001-2012, y de esta manera poder trabajar solo con el área de interés, y no abarcar toda la extensión de los mosaicos.

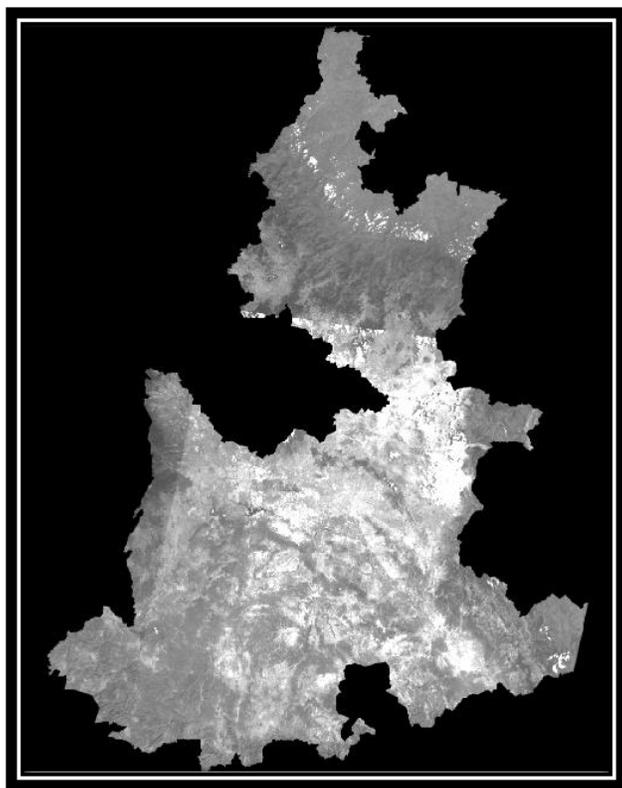


Figura 16. Corte final del estado de Puebla

7.7.3 Combinación de bandas espectrales

Mediante el estudio en cada banda, y la combinación de ellas, es posible resaltar variaciones de color, tonalidad, textura de las rocas, coberturas vegetales etc., que en algunos casos pueden reflejar zonas de alteración hidrotermal, y por tanto, de interés para detectar y delimitar áreas o targets para posterior reconocimiento forestal detallado. También, pueden ser aplicadas en la interpretación estructural y permitir la detección de áreas de interés petrolero, problemas de geodinámica externa, así como también áreas de interés agrícola, medioambiente (Lillesmand *et. al*, 1987).

Los colores rojo, verde y azul se refieren a la aplicación de color del monitor de la computadora. (Estas aplican luz roja, verde y azul a cada pixel con intensidades específicas). Los canales (usualmente llamados bandas) se refieren a las bandas de luz reflejadas, captadas en la imagen por el satélite desde los objetos en la imagen. La banda 1 se refleja como una luz azul, la banda 2 como una luz verde y

la banda 3 como una luz roja. El rojo, el verde y el azul son colores primarios de energía visible. Cuando los disparadores aplican diferentes intensidades de luz roja, verde y azul al mismo pixel en la pantalla, se obtienen diferentes matices (sombras) de color. Por ejemplo, iguales intensidades de luz roja y verde producen amarillo; iguales intensidades de luz azul y verde producen el cian; e, iguales intensidades de luz azul y roja producen el color magenta (rojo violáceo). Las bandas 4 y 5 reciben reflejo de energía infrarroja cercana e infrarroja media, respectivamente. Con el objeto de obtener una percepción para diferentes combinaciones de canales (bandas) utilizaremos el siguiente canal de montajes rojo, verde y azul (RGB).

Rojo 3 (la banda visible roja)

Verde 2 (la banda visible verde)

Azul 1 (la banda visible azul)

La combinación se realizó gracias al software ERDAS 10.1 con la herramienta de “three layers Arrangement” una vez abierta la ventana se tiene que especificar el tipo de archivo (.TIFF) se seleccionan los mosaicos de las respectivas tres bandas a combinar, se debe especificar que se quiere generar una imagen de color verdadero, especificando el orden del color por bandas. Se corre el proceso y el resultado final es una imagen con diferentes tonalidades resaltando en este caso las coberturas vegetales (Figura 17).

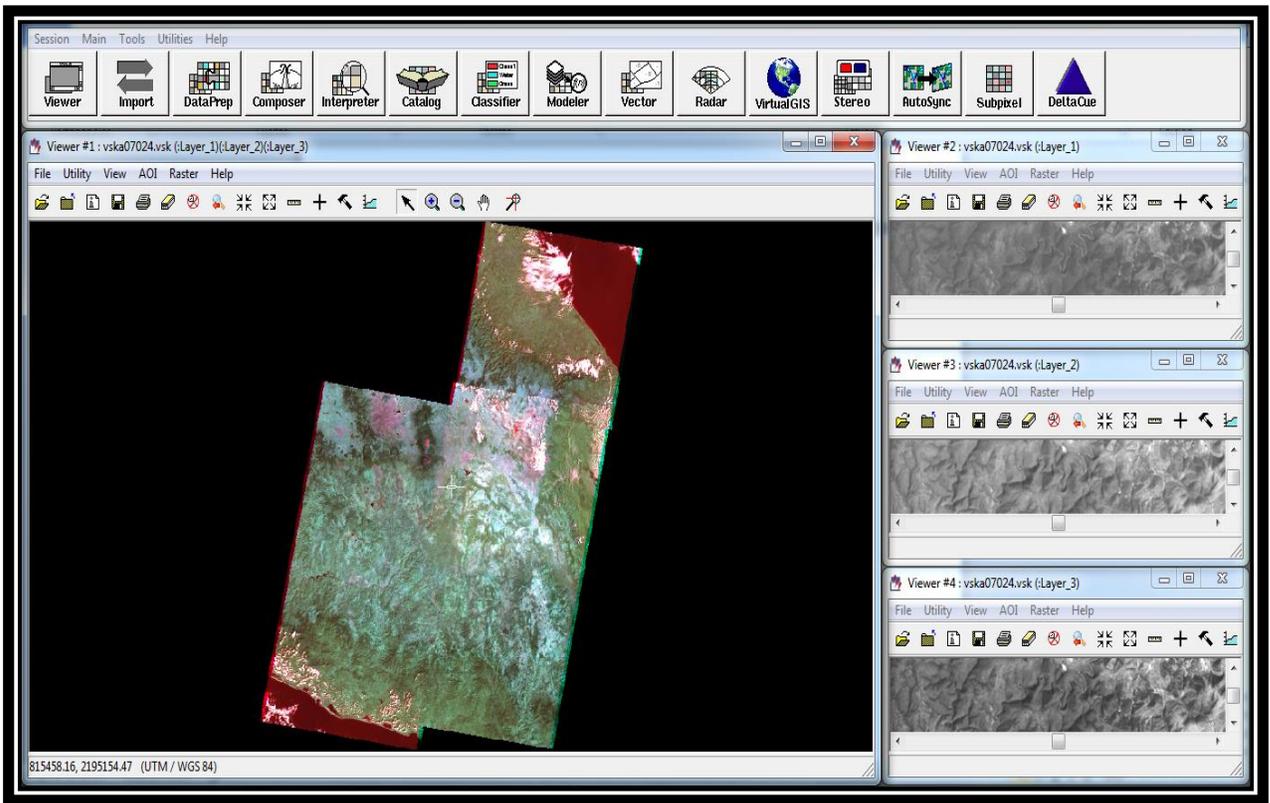


Figura 17. Proceso de combinación ERDAS 10.1 de bandas 2-5-7 (2001)

Las Imágenes de color verdadero es la combinación de bandas presenta una imagen tal y como aparecería al ojo humano, mirando desde el espacio. (Figura 18)

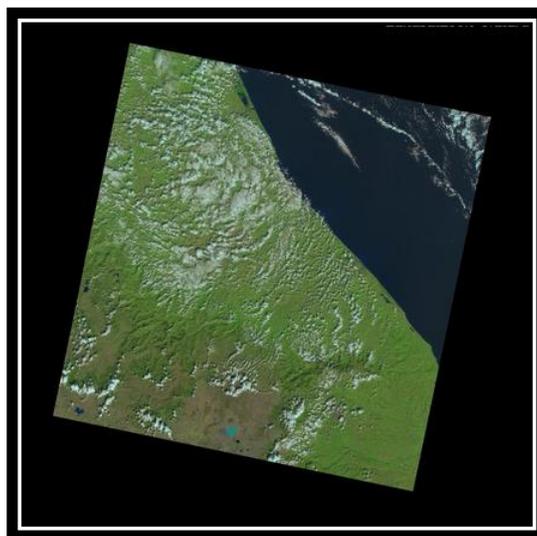


Figura 18. Imagen satelital a color verdadero

7.8 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

En el trabajo se utilizaron como parámetros de coberturas existentes en el área de estudio (estado de Puebla), para esto se requiere del software ArcMap 10.1 para visualizar en un mapa del estado de Puebla las diferentes coberturas vegetales, de esta manera se seleccionaron 12 coberturas de las cuales pertenecían a más del 98% del territorio, las cuales serán el número de clases por clasificar la imagen. Una vez seleccionados las clases, con el software ERDAS 10.1 en la herramienta “*Unsupervised Classification Isodata*” se da entrada del archivo .TIFF que se clasificara.

7.9 ANÁLISIS DE CAMBIO DE USO DE SUELO PARA EL PERIODO 1990-2001-2012

A partir de las imágenes clasificadas con sus doce coberturas y usos del suelo, se generan tres mapas de coberturas 1990-2001-2012, que se confrontaron en el programa ArcGis 10.1 y se realizaron intersecciones, de las cuales dio como resultado una matriz de transición. Esta matriz está conformada por las superficies que han cambiado su cobertura y las que permanecieron de 1990-2012. La intersección de los mapas permitió generar los polígonos de cambio, su ubicación espacial o su posterior designación del proceso de cambio.

Para analizar la dinámica de cambio de coberturas y uso de suelo detalladamente, es necesaria la matriz de transición, se realizaron tres matrices considerando tres periodos diferentes 1990-2001, 2001-2012 y finalmente se realizó un periodo que abarca los 22 años 1990-2012.

Las matrices se describen como tablas con arreglos simétricos que contienen en uno de los ejes los tipos de vegetación y usos del suelo en el año base y el otro eje estos mismos tipos de vegetación en el segundo año. Siendo así, cada una de las celdas de la diagonal principal, representará en Ha, de cada una de las coberturas, la superficie que permaneció en la misma categoría en el periodo de tiempo considerado, mientras que el resto de las celdas estiman la superficie de una determinada cobertura o tipo de uso que pasó a otra categoría.

Seguido a ello, con los valores de los cambios en hectáreas de los polígonos de cambio que ocupaban cada cobertura y uso de suelo en las dos diferentes fechas (1990-20012; 2001-2012; 1990-2012), se calcularon las tasas de cambio de cada una, mediante la fórmula propuesta por FAO (1996).

7.10 IDENTIFICACIÓN PROCESOS DE CAMBIO

Así mismo se identificaron los indicadores de procesos de uso del suelo que se compone de los siguientes puntos especificados por Palacio, *et al.* (2004):

- Área Conservada: Mide el porcentaje de superficie que no ha sufrido cambio en el periodo de estudio (la cobertura vegetal se mantiene)
- Área Deforestada: Mide la cantidad de superficie que cambio su uso del suelo de formas de vida arbórea a zonas de cultivo, a pastizales inducidos y cultivados o a otro uso como el urbano.
- Área Revegetada: Mide la cantidad de superficie donde anteriormente se llevaba alguna actividad agropecuaria y actualmente se encuentra ocupada por bosque, selva, matorral, vegetación hidrófila o pastizales naturales.
- Área Degradada: Mide la cantidad de superficie que presento cambio en el uso del suelo, perdida de la cobertura vegetal no arbórea, por pastizales inducidos y cultivados, cultivos y otras coberturas.
- Cambio por actividad productiva: Mide la cantidad de superficie donde anteriormente se presentaba una cobertura de origen antropogénico: pastizales inducidos y cultivados o presenta algún uso del suelo urbano, o bien formaba parte de un cuerpo de agua, pero que actualmente ha cambiado de actividad productiva.
- Área sin cambio: Mide la cantidad de superficie de las zonas donde el uso del suelo correspondía a cultivos, pastizales inducidos y cultivados y otros usos y que actualmente se mantienen con el mismo tipo de uso.
- Urbanización: Mide la cantidad de superficie de coberturas vegetales o usos productivos el cual tuvieron un cambio hacia nuevas coberturas de asentamientos humanos.

7.11 MODELOS DE PROCESOS DE CAMBIO

En el análisis de cambio se identificaron los procesos de transformación que han sufrido las coberturas en el periodo de 22 años, así como de aquellas que han permanecido sin modificación.

El modelo de procesos de cambio representa las interacciones y dinámicas que se presentaron en las diferentes doce coberturas, cuando estas cambiaron a otra o se mantuvieron durante el tiempo del análisis de cambio, cada una de las flechas en el grafico representa el sentido de cambio y el color de las líneas representó los diferentes procesos que se identificaron al realizar el análisis de cambio

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 CLASIFICACIÓN DE USO DE SUELO

La finalidad de la clasificación del uso del suelo fue generar finalmente, los mapas de coberturas y usos de suelo para los diferentes años 1990-2001-2012, y a partir de estos realizar el estudio multitemporal de las dinámicas de los usos del suelo en el estado de Puebla.

8.1.1 Bandas espectrales

En el estudio multitemporal los tres periodos se clasificaron de la banda 1 hasta la 8 las cuales se tomaron en cuenta para la siguiente etapa de trabajo, el total de 174 bandas clasificadas por número, Path-Row y fecha. La siguiente figura muestra las diferentes 8 bandas tomadas desde un satélite L-7 ETM+ en una misma toma de imagen, es evidente en algunas bandas como la 5 y 7 son bandas indispensables para la identificación de zonas boscosas, en otros aspectos como el hídrico es de notar en la banda 4-5-7 su contraste oscuro el cual lo hace diferenciar de manera rápida.

Las bandas del 9 hasta la banda 12 que se obtienen en el satélite LANDSAT-8 OLI no se tomaron en cuenta para el trabajo de investigación, debido a que son campos espectrales que se consideran que no ayudan para identificación de coberturas vegetales (Figura 19).

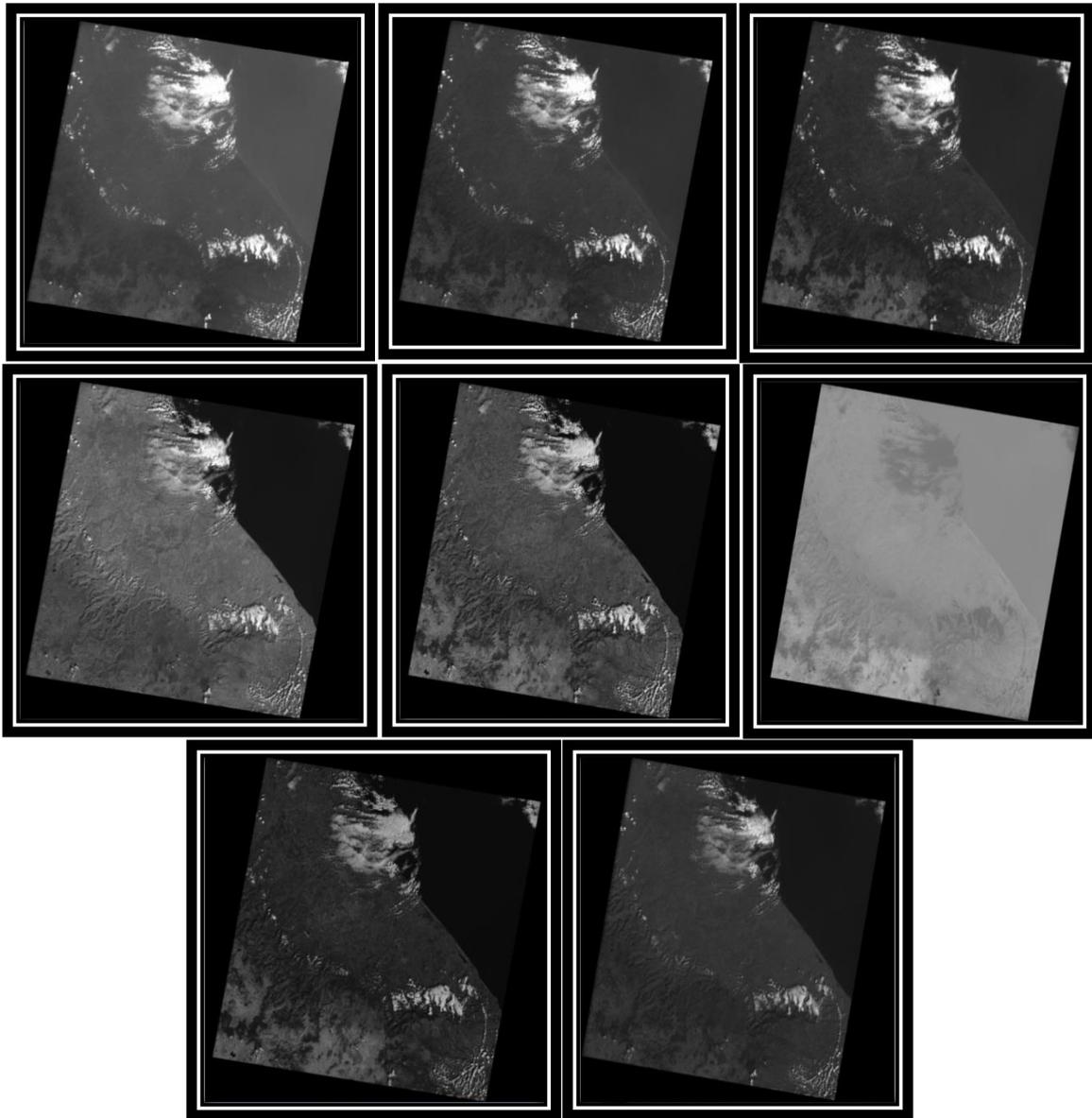


Figura 19. Diferentes bandas (1-8) de la misma imagen (Path 25 Row 46, 2001)

8.1.2 Mosaicos de imágenes satelitales

Se obtuvieron mosaicos de todas las bandas en cada una de las imágenes (1990, 2001, 2012) para poder trabajar en una sola escena, una sola imagen de satélite. De esta manera se obtuvo una escena propia de cada banda del 1 al 11, para todos los cinco Path-Row dependiendo del número de bandas según el satélite, la unión de las cinco imágenes que conformarían y abarcarían la totalidad del área del estado de Puebla. En total fueron realizados 26 mosaicos, 11 mosaicos para las bandas del satélite L-8 OLI/TIRS (2012), 8 mosaicos para las bandas del satélite L-7 ETM+ (2001) y finalmente 7 mosaicos para el satélite L-5 TM (1990).

Los part-.row descargados tienen una cobertura de 185 km de longitud, toda esta área se fusionan en los mosaicos de 5 imágenes, esta área supera ampliamente la superficie que va ser objeto de estudio, por consecuencia debe ser delimitada mediante el corte del área de influencia, estrictamente hablando del estado de Puebla. Este procedimiento se implementó para los 26 mosaicos (Figuras 20,21 y 22).

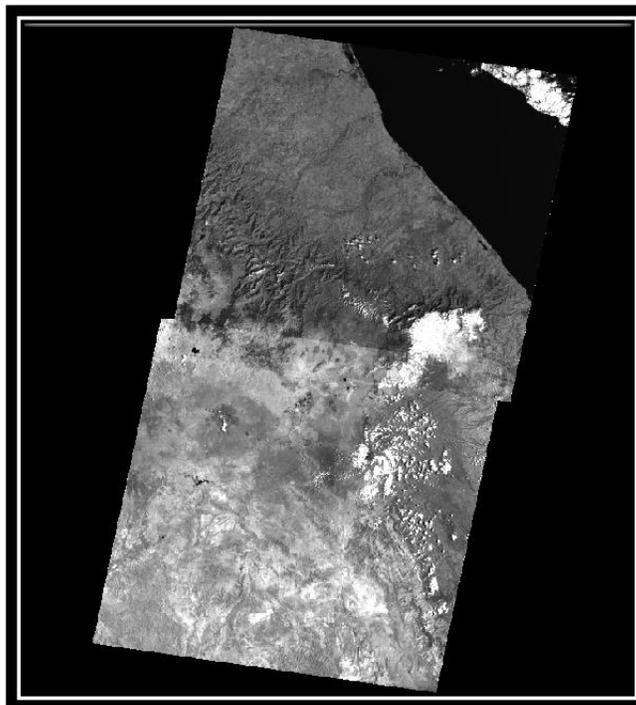


Figura 20. Mosaico de 2 imágenes de banda 5 (1990)

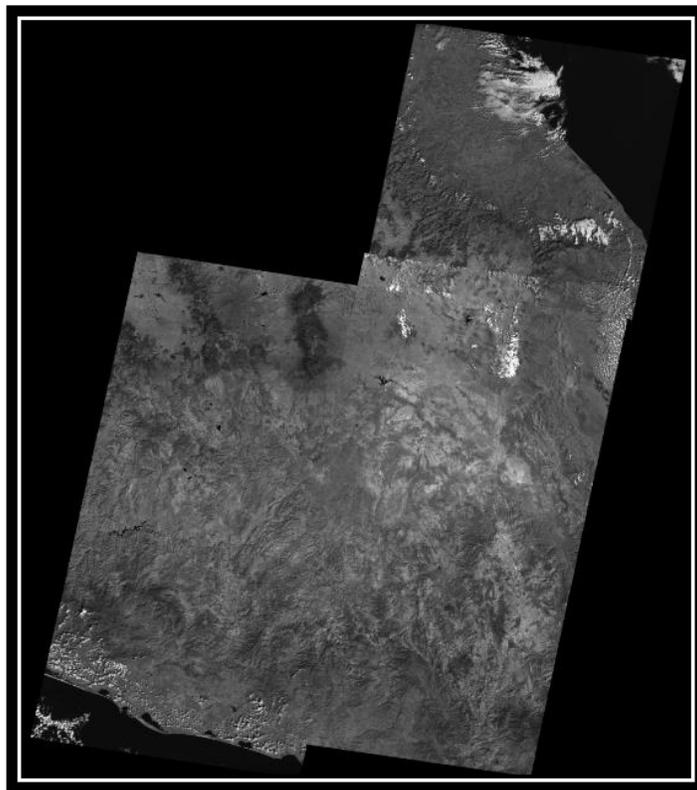


Figura 21. Mosaico de 5 imágenes de banda 1 (2001)

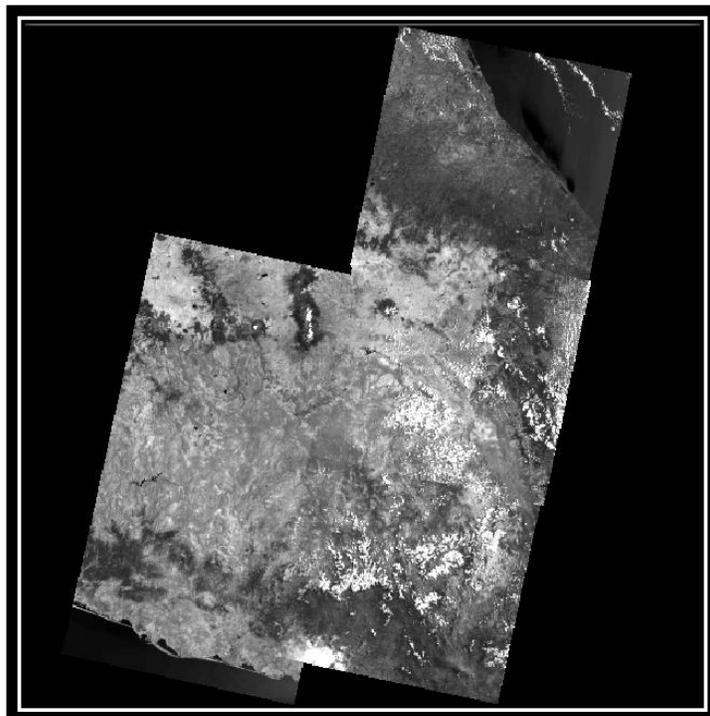


Figura 22. Mosaico de 5 imágenes de banda 7 (2012)

8.1.3 Combinación de bandas

Las combinaciones recomendadas en la literatura para la clasificación de coberturas que es a lo que finalmente se requiere en esta parte de la investigación, son cuatro principalmente (157, 257, 245, 247), se realizó cuatro combinaciones para cada uno de los periodos de tiempo establecidos para el estudio multitemporal (1990, 20010, 2012), en total fueron 12 combinaciones de mosaicos (Figuras 23 y 24).

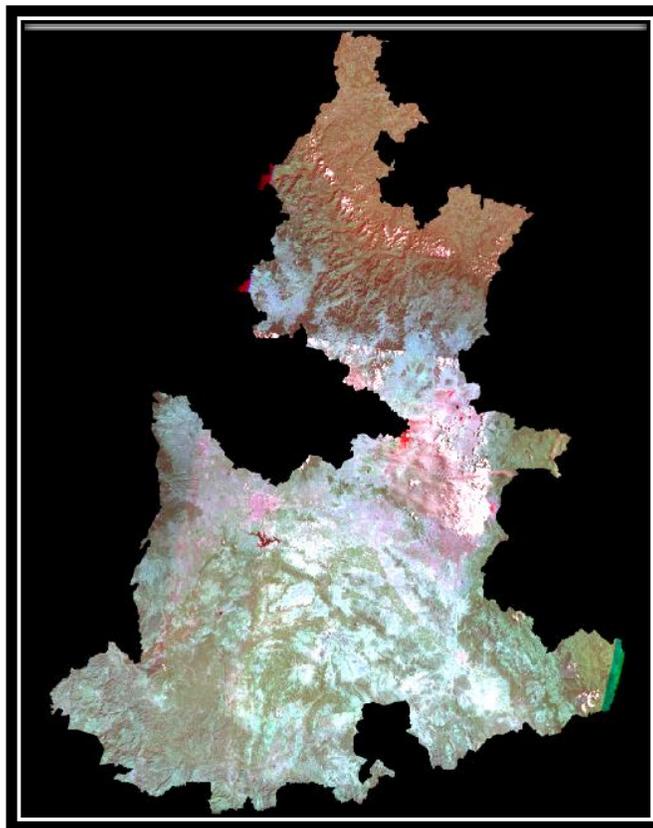


Figura 23. Imagen final de la combinación de las bandas 1-5-7 (2001)

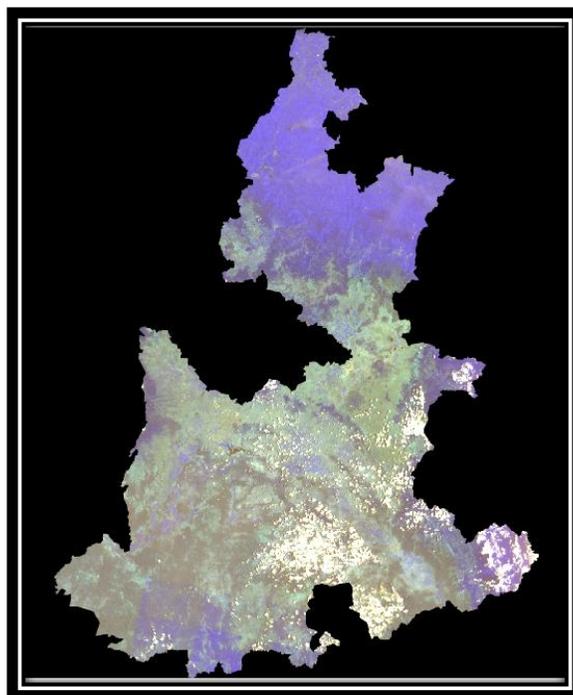


Figura 24. Imagen final de la combinación de las bandas 2-4-5 (2012)

8.1.4 Clasificación No Supervisada

Se clasificaron las combinaciones de las bandas (157, 257, 245, 247) en cada año (1990, 2001, 2012) la salida del archivo nuevo que se creara, y finalmente se le otorga un nombre a cada clase creada, en este caso se asignaron 12 clases las cuales fueron:

- a) Agricultura
- b) Bosque
- c) Bosque Mesófilo de Montaña
- d) Cuerpos de Agua
- e) Matorral
- f) Palmar
- g) Pastizal Cultivado
- h) Pastizal natural
- i) Selva Alta
- j) Selva baja
- k) Vegetación Acuática
- l) Zona Urbana

Para poder identificar las coberturas reales, se extrajo un punto de coordenadas geográficas real de cada una de las 8 coberturas, y fué identificado en la nueva imagen clasificada de manera no supervisada y de esta manera poder cuantificar las áreas existentes de cada una de las coberturas en la imagen (Figuras 25 y 26).

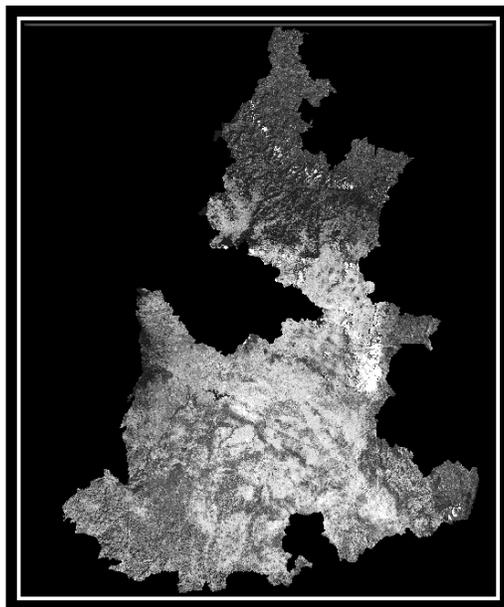


Figura 25. Imagen clasificación no supervisada (2001)

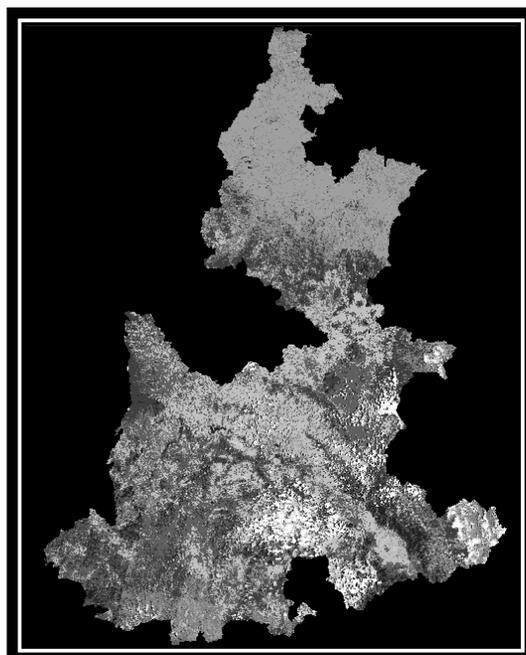


Figura 26. Imagen clasificación no supervisada (2012)

8.2 MAPAS DE COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO 1990-2000- Ha

Para realizar el mapa de uso de suelo se seleccionaron una imagen de las cuatro combinaciones realizadas para cada uno de los periodos, lo que permitiera diferenciar de la mejor manera las coberturas. Se realizaron gracias al software ArcGIS 10.1 como se puede observar en la Figura 27, 28 y 29.

8.2.1 Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990

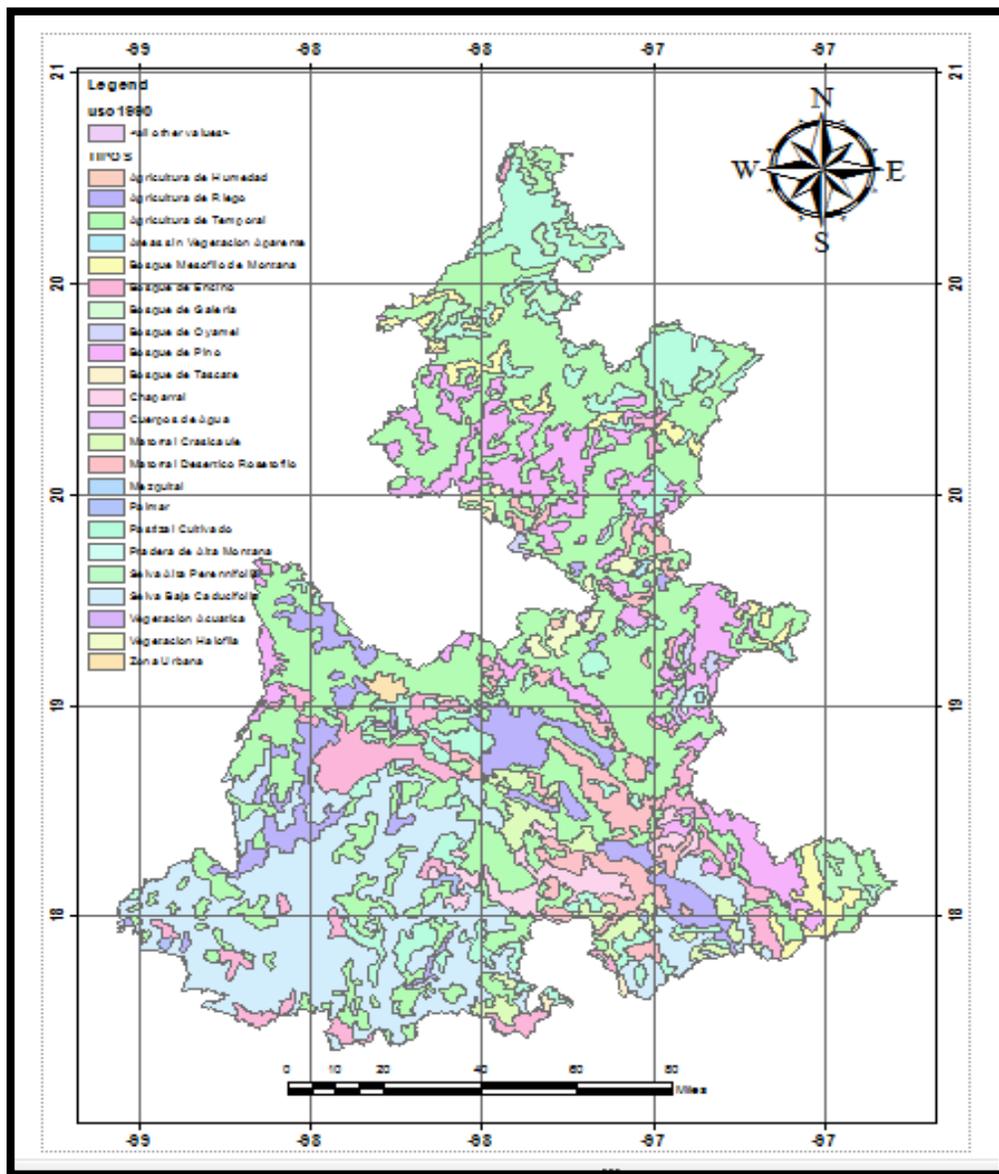


Figura 27. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990

Las coberturas de usos del suelo para el año 1990 se encontraban ampliamente dominadas por la Agricultura con un 43% (1,455,389 Ha.) el cual muestra las tendencias futuras a su ampliación debido a una óptima aptitud para la implantación de la producción agrícola en el estado de Puebla. Otros usos que podrían llamarse antropogénicos y toman un gran protagonismo son los pastizales cultivados para ganadería y otros, ocupaban también una importante superficie con el 9.5% (325,466 Ha.) y finalmente la zona urbana que ocupaba apenas un 0.3% (11,468 Ha.) (Figura 28),

Las coberturas vegetales naturales predominantes en este año fueron la Selva Baja con un 18.2% (619,225 Ha.), con la mayor extensión en lo que se refiere a cobertura vegetal seguida de los Bosques con un 15.1% (515,479 Ha.) y para terminar las tres grandes extensiones de coberturas naturales, los Matorrales con 8.9% (304,696 Ha.).

Para finalizar, las coberturas vegetales con menos cobertura pero no menos importantes, poseen todas juntas un 5.6% (179,489 Ha.), la cual se encuentra distribuida de esta manera; el Bosque Mesófilo fue una cobertura que se separó del uso *Bosques* debido a la importancia de estos bosques ya que están en peligro de desaparecer, su superficie abarcada fue un 2.6% (81,097 Ha.), la selva alta con 1.6% (55,712 Ha.), la vegetación acuática con 0.8% (27,203 Ha.), pastizal natural con 0.2% (6,071 Ha.), palmar con 0.2% (6,071 Ha.) y cuerpos de agua con 0.1% (3,814 Ha.) (Figura 28).

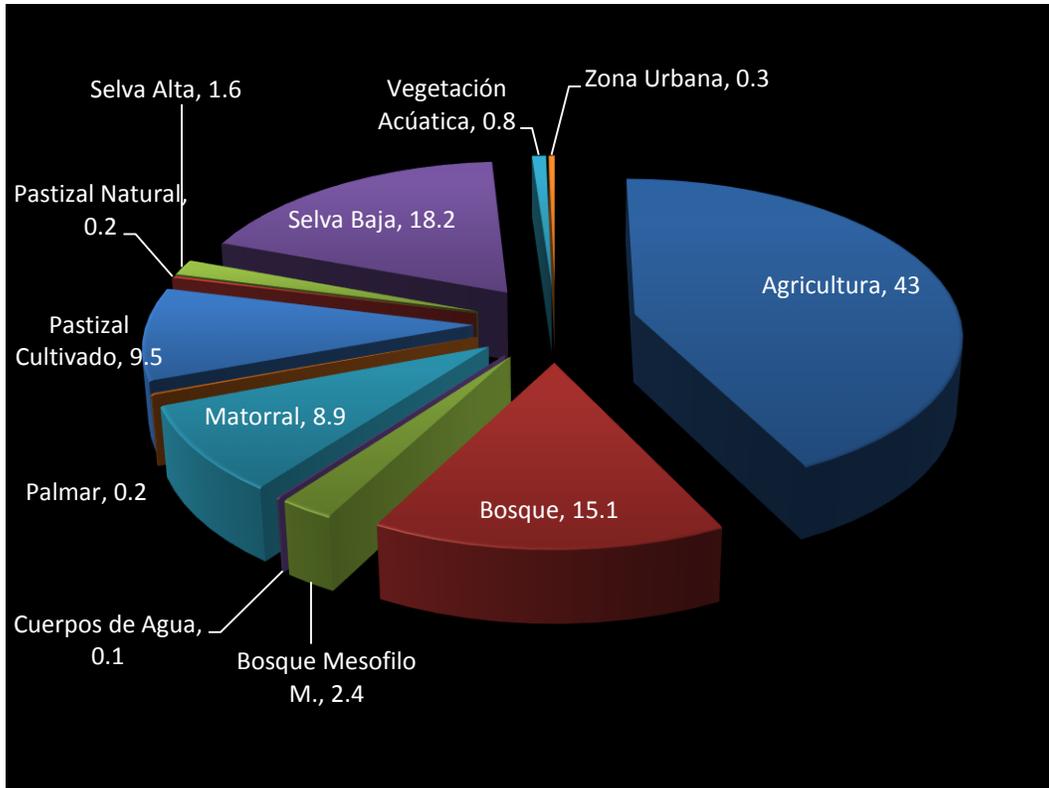


Figura 28. Porcentaje de coberturas del estado de Puebla para el año 1990

8.2.2 Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2001

Las coberturas de usos del suelo para el año 2001 se encontraban ampliamente dominadas por la agricultura con un 45.9% (1, 566, 607 Ha.) el cual muestra las tendencias futuras a su ampliación debido a una óptima aptitud para la implantación de la producción agrícola en el estado de Puebla. Otros usos que podrían llamarse antropogénicos y toman un gran protagonismo son los pastizales cultivados para ganadería y otros, ocupaban también una importante superficie con el 11% (176,137Ha.) y finalmente la zona urbana que ocupaba apenas un 1.4% (48,882 Ha.).(Figuras 30 y 31).

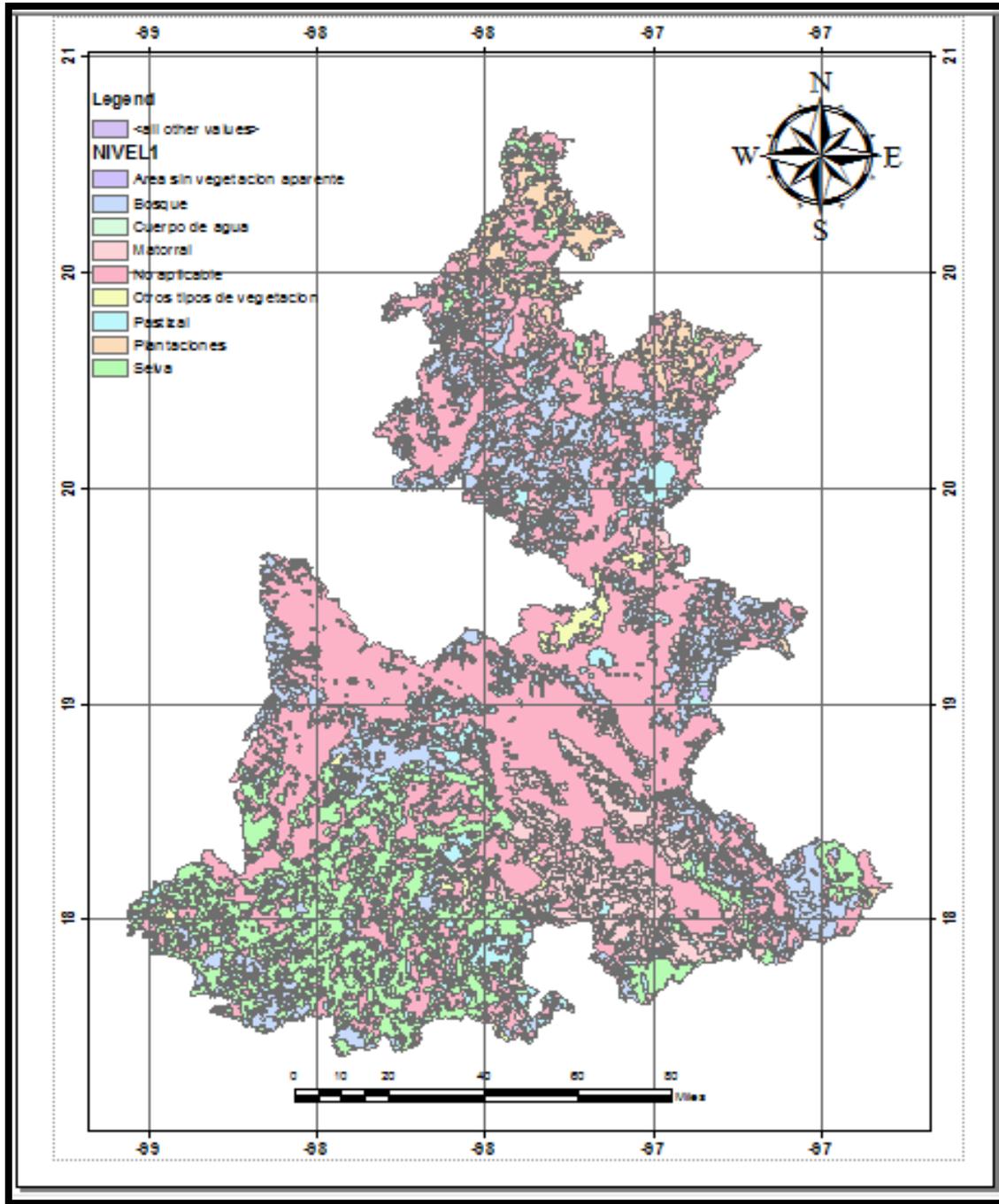


Figura 29. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2001

Las coberturas vegetales naturales predominantes en este año fueron la Selva Baja con un 14.5% (494,991 Ha.) con la mayor extensión a lo que refiere cobertura vegetal seguida de los Bosques con un 13.6% (465,173 Ha.) y para terminar las tres grandes extensiones de coberturas naturales los Matorrales con 7.9% (268,849 Ha.). Para finalizar, las coberturas vegetales con menos cobertura pero no menos importantes, poseen todas juntas un 7.9% (268,560 Ha.), la cual se encuentra distribuida de esta manera; el Bosque Mesófilo fue una cobertura que se separó del uso Bosques debido a la importancia de estos bosque ya que están en peligro de desaparecer, su superficie abarcada fue un 2.8% (95,757 Ha.), pastizal natural con 2.6% (87,628Ha.) la selva alta con 1.2% (40,230 Ha.), la vegetación acuática con 0.6% (19,699 Ha.), palmar con 0.4% (15,322Ha.) y cuerpos de agua con 0.3% (9,922Ha.) (Figura 30).

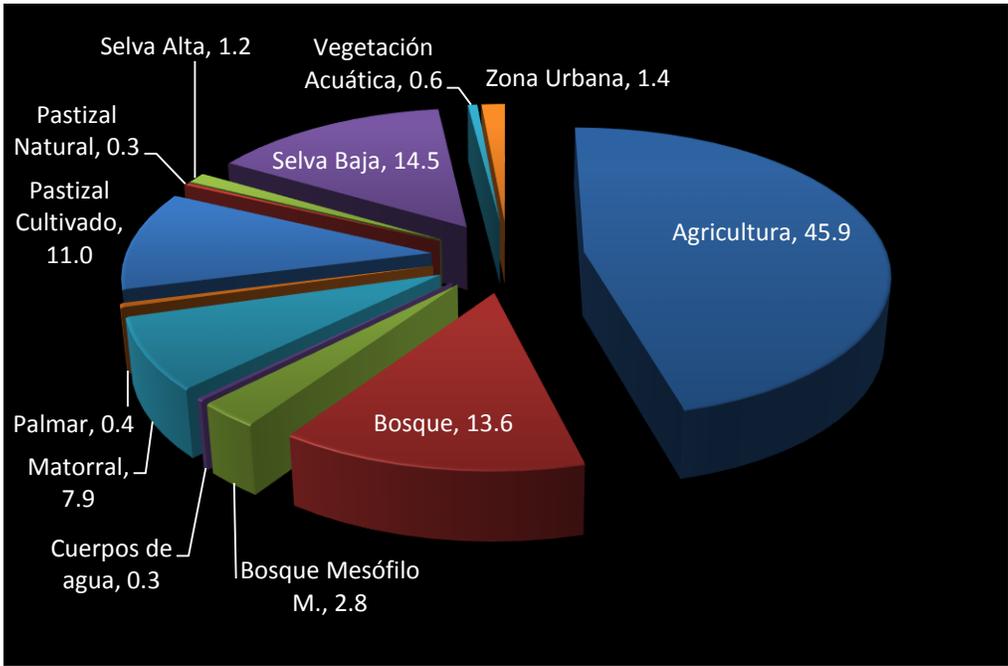


Figura 30. Porcentaje de coberturas del estado de Puebla para el año 2001

8.2.3 Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2012

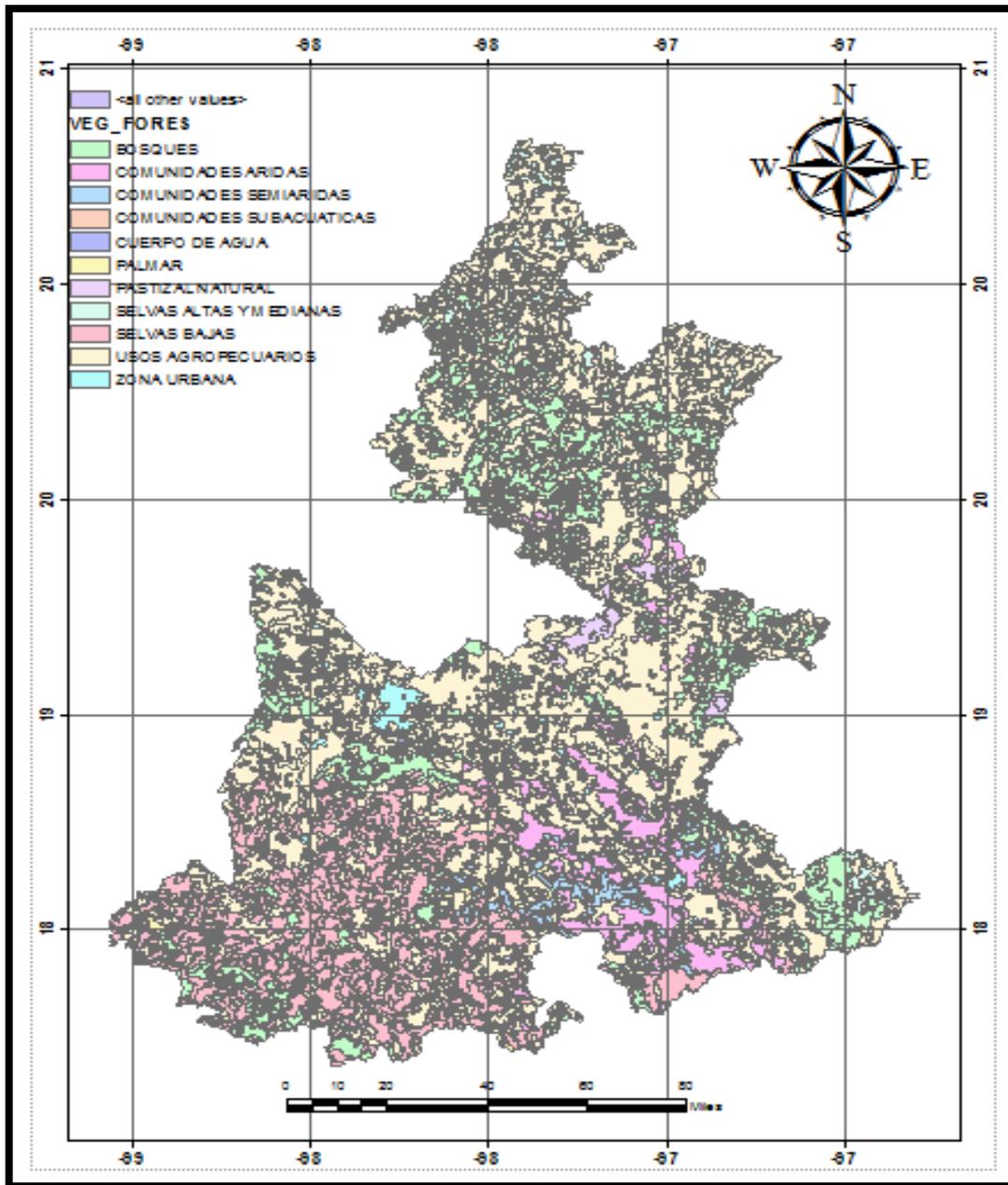


Figura 31. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2012

Como era de esperar para la actualidad el principal uso del suelo en el estado de Puebla es la agricultura de humedad, riego y temporal con 48.4% (1, 651, 209 Ha.). Otros usos que podrían llamarse antropogénicos y toman un gran

protagonismo son los pastizales cultivados utilizados para ganadería y otros, con una superficie del 6.3% (216,096 Ha.) y finalmente la zona urbana con una gran evolución en 1.7% (56,870Ha.). (Figura 31)

Las coberturas vegetales naturales predominantes son la Selva baja con un 16% (544,324Ha.) con la mayor extensión a lo que refiere cobertura vegetal, seguida de los Bosques con un 13.6% (465,133 Ha.) y para terminar las tres grandes extensiones de coberturas naturales los Matorrales con 8% (272,202 Ha.). Para finalizar las coberturas vegetales con menos cobertura pero no menos importantes, poseen todas juntas un 6.1% (205,377Ha.), la cual se encuentra distribuida de esta manera; el bosque Mesófilo fue una cobertura que se separó del uso Bosques debido a la importancia de estos bosque ya que están en peligro de desaparecer, su superficie abarcada fue un 2.9% (98,653 Ha.), la selva alta con 1.6% (53,412 Ha.) pastizal natural con 1% (33,234 Ha.), palmar con 0.5% (15,388 Ha.), cuerpos de agua con 0.1% (4,543 Ha.) y la vegetación acuática con 0.004% (144 Ha.). (Figura 32)

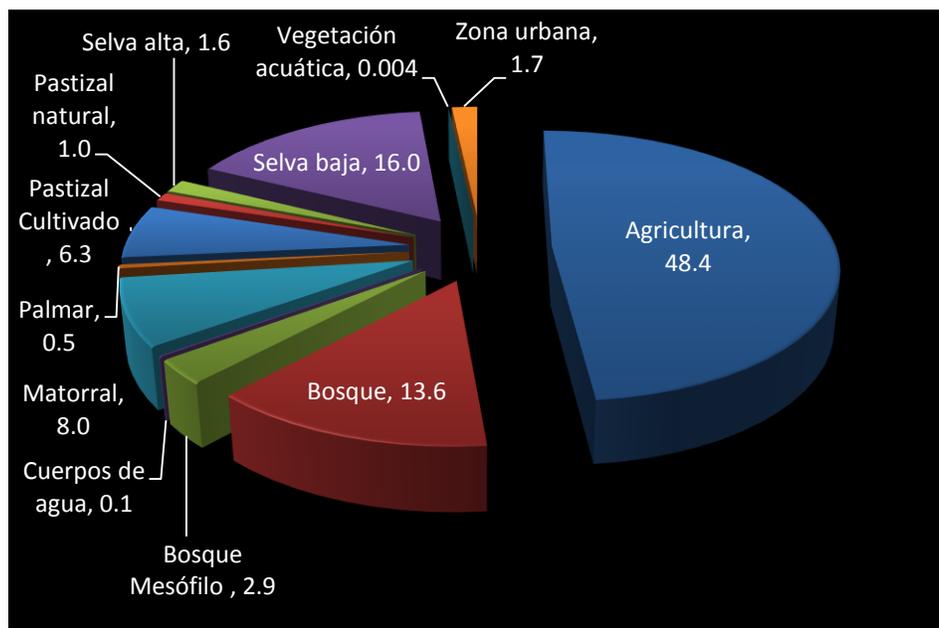


Figura 32. Porcentaje de coberturas del estado de Puebla para el año 2012

8.3 ANÁLISIS DE LA DIRECCIÓN DE CAMBIO

8.3.1 Cambio absoluto del uso del suelo

Para el análisis de cambio de uso de suelo para los periodos de 1990/2001-2001/2012-1990/2012, en primera instancia se hallara el cambio absoluto de las superficies para cada uno de los periodos, seguido a esto se realizará la matriz de transición de igual manera para los tres periodos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Cambio absoluto del uso del suelo para los años 1990-2001-2012

COBERTURAS	Superficie 1990	% 1990	Superficie 2001	% 2001	Superficie 2012	% 2012	Cambio 90/01 Ha.	Cambio 01/12 Ha.	Cambio 90/12 Ha.
Agricultura	1,455,389	42.7	1,566,607	45.9	1,651,210	48.4	111,218	84,602	196,189
Bosque	515,479	15.1	465,560	13.6	465,134	13.6	-49,919	-426	-50,143
Bosque Mesófilo M.	81,097	2.4	95,757	2.8	98,653	2.9	14,660	2,896	17,521
Cuerpos de Agua	3,814	0.1	9,922	0.3	4,544	0.1	6,108	-5,378	1,838
Matorral	304,696	8.9	268,876	7.9	272,203	8.0	-35,820	3,326	-32,472
Palmar	5,591	0.2	15,259	0.4	15,388	0.5	9,668	129	9,803
Pastizal Cultivado	325,466	9.5	376,065	11.0	216,096	6.3	50,599	-159,969	-109,358
Pastizal Natural	6,071	0.2	9,351	0.3	33,234	1.0	3,280	23,883	25,073
Selva Alta	55,712	1.6	40,230	1.2	53,413	1.6	-15,482	13,183	-2,285
Selva Baja	619,225	18.2	494,800	14.5	544,324	16.0	-124,425	49,524	-74,976
Vegetación Acuática	27,203	0.8	19,841	0.6	144	0.0	-7,362	-19,697	-26,635
Zona Urbana	11,468	0.3	48,943	1.4	56,870	1.7	37,475	7,927	45,443

8.3.1.1 Cambio absoluto para el periodo 1990-2001

Según los resultado esperados las coberturas de usos del suelo antropogénicos en este periodo, todas obtuvieron una ganancia de superficie con un total de 199,292 Ha distribuidas en: Agricultura (111,218 Ha), Pastizal cultivado (50,599 Ha) y Zona urbana (37,475 Ha). En cuanto a las coberturas naturales que obtuvieron un cambio absoluto positivo, con un total de 33,716 Ha y se encuentran distribuidas en: Bosque Mesófilo M. (14,660 Ha.), Palmar 9,668 Ha, finalmente Cuerpos de agua (6,108 Ha) y Pastizal natural (3,280 Ha), las coberturas naturales que obtuvieron un cambio negativo se encuentran la Selva baja (-124,425 Ha), Bosques (-49,919 Ha), Matorral (-35,820 Ha), Selva alta (-15,482 Ha) y Vegetación Acuática (-7,362 Ha)(Cuadro 9).

8.3.1.2 Cambio absoluto para el periodo 2001-2012

A diferencia del periodo pasado no todas las coberturas de uso de suelo antropogénicas obtuvieron una ganancia, en este periodo la excepción fue el Pastizal Cultivado su cambio fue negativo perdiendo una superficie de -159,969 Ha, a diferencia de la Agricultura (84,602 Ha) y Zona urbana (7,927 Ha) que mantuvieron la ganancia en superficie. Las coberturas naturales obtuvieron un cambio absoluto positivo mayor comparado al periodo anterior, con un total de 92,941 Ha y se encuentran distribuidas en: Selva Baja (49,524 Ha), Pastizal Natural (23,883 Ha), Selva Alta (13,183 Ha), Matorral (3,326 Ha) Bosque Mesófilo de Montaña (2,896 Ha.), Palmar (129 Ha), entre las coberturas naturales que obtuvieron un cambio negativo se encuentran la Vegetación Acuática (-19,697Ha) Cuerpos de agua (-5,378Ha), Bosques (-426 Ha) (Cuadro 9).

8.3.1.3 Cambio absoluto para el periodo 1990-2012

Este periodo es la muestra global de los cambios absolutos ocurridos durante todo el periodo de tiempo estudiado de 22 años, como era de esperarse la Agricultura fue el uso de suelo antropogénico que más superficie gano en el transcurso de este periodo con 196,189 Ha, seguido de la Zona urbana con 45,443 Ha, a diferencia de los últimos el Pastizal cultivado perdió un total de superficie de -109,358 Ha. En cuanto a las coberturas naturales que obtuvieron un cambio absoluto positivo, con un total de 54,235 Ha y se encuentran distribuidas en: Pastizal Natural (25,073 Ha), Bosque Mesófilo M. (17,521 Ha.), Palmar (9,803Ha), finalmente Cuerpos de agua (1,838 Ha), las coberturas naturales que obtuvieron un cambio negativo se encuentran el Pastizal Cultivado (-109,358 Ha) Selva Baja -74,976 Ha), Bosques (-50,143 Ha), Matorral (-32,472Ha), Vegetación Acuática (-26,635Ha) y Selva alta (-2,285Ha) (Cuadro 9).

8.3.2 Matriz cambio uso de suelo

Los requisitos de las Matrices de transición es necesario tener presente ciertas consideraciones mínimas para asegurar un correcto procesado de los datos:

- Como mínimo se deben tener dos épocas de una misma área de estudio de igual superficie. Se pueden tener más épocas, pero los análisis de Matrices de transición utilizan pares de periodos. Por ejemplo: para las épocas que se ha caracterizado del estado de Puebla (1990, 2001 y 2012); y para hacer su análisis de cambio se puede trabajar con los pares de periodos 1990-2001, 2001-2012 o 1990-2012, pero en ningún caso 1956-1978-2000.
- Los mapas a comparar requieren tener el mismo número y tipo de categorías de usos o coberturas del suelo. Este número puede oscilar de 2 a infinito número de clases de usos del suelo. Así, no se pueden admitir mapas que contengan diferentes leyendas, ya que impedirían que la matriz de transición fuera cuadrada (mismo número de filas y columnas).

La primera fase a realizar, es el cálculo de los tránsitos entre los distintos usos por medio de la intersección de los mapas de uso de suelo. En los Cuadros 10,11 y 12 quedan reflejados para cada combinación de mapas de usos del suelo de fechas consecutivas 1990-2001 y 2001-2012 y también se ha realizado para la combinación entre los mapas de usos de 1990 a 2012. Los datos contenidos en el interior de las celdas se expresan en hectáreas y corresponden a cada combinación posible que pasan a formar parte de otro uso o cobertura. La información expuesta se leería de filas a columnas. Por ejemplo, en el Cuadro 10, la Agricultura se transformarían 117,900 Ha. a Bosque entre 1990 y 2001 (Figura 33).

8.3.2.1 Matriz de transición entre 1990-2001

En el siguiente cuadro se aprecia las dinámicas de cambio de usos de suelo y el paso de coberturas vegetales, para el periodo 1990-2001, bien sea a superficies productivas, a coberturas vegetales diferentes o simplemente la conservación de las mismas que se encuentran reflejadas en la diagonal de la matriz.

Cuadro 10. Matriz de transición entre 1990-2001

Coberturas 1990/2001	Agricultura	Bosque	Bosque Mesófilo M.	Cuerpos de agua	Matorral	Palmar	Pastizal Cultivado	Pastizal natural	Selva alta	Selva baja	Vegetación acuática	Zona urbana	Total general
<i>Agricultura</i>	995,222	117,900	34,003	2,389	46,783	4,118	121,405		13,193	79,708	9,347	31,321	1,455,389
<i>Bosque</i>	168,941	265,473	5,950	265	10,220	2,296	34,975	2,053	128	24,346		833	515,479
<i>Bosque Mesófilo M.</i>	18,560	11,929	43,562				5,028		1,843			176	81,097
<i>Cuerpos de Agua</i>	312	108		2,718			185				492		3,814
<i>Matorral</i>	84,779	9,256			174,710	3,974	18,169			10,847	336	2,626	304,696
<i>Palmar</i>	1,888	442			443	1,398	324			1,096			5,591
<i>Pastizal Cultivado</i>	120,990	15,389	6,338	654	15,295	119	134,565		5,241	21,758		5,115	325,466
<i>Pastizal natural</i>		1,853						4,218					6,071
<i>Selva Alta</i>	12,523	223	5,684				17,417		19,825			39	55,712
<i>Selva baja</i>	150,573	43,817		111	21,417	3,352	41,713			357,044	14	1,183	619,225
<i>Vegetación Acuática</i>	11,137	142		3,785	125		1,853				10,029	131	27,203
<i>Zona Urbana</i>	3,205	13	219		82		451					7,499	11,468
<i>Total general</i>	<i>1,568,131</i>	<i>466,544</i>	<i>95,757</i>	<i>9,922</i>	<i>269,074</i>	<i>15,258</i>	<i>376,086</i>	<i>6,271</i>	<i>40,230</i>	<i>494,799</i>	<i>20,218</i>	<i>48,922</i>	<i>3,411,213</i>

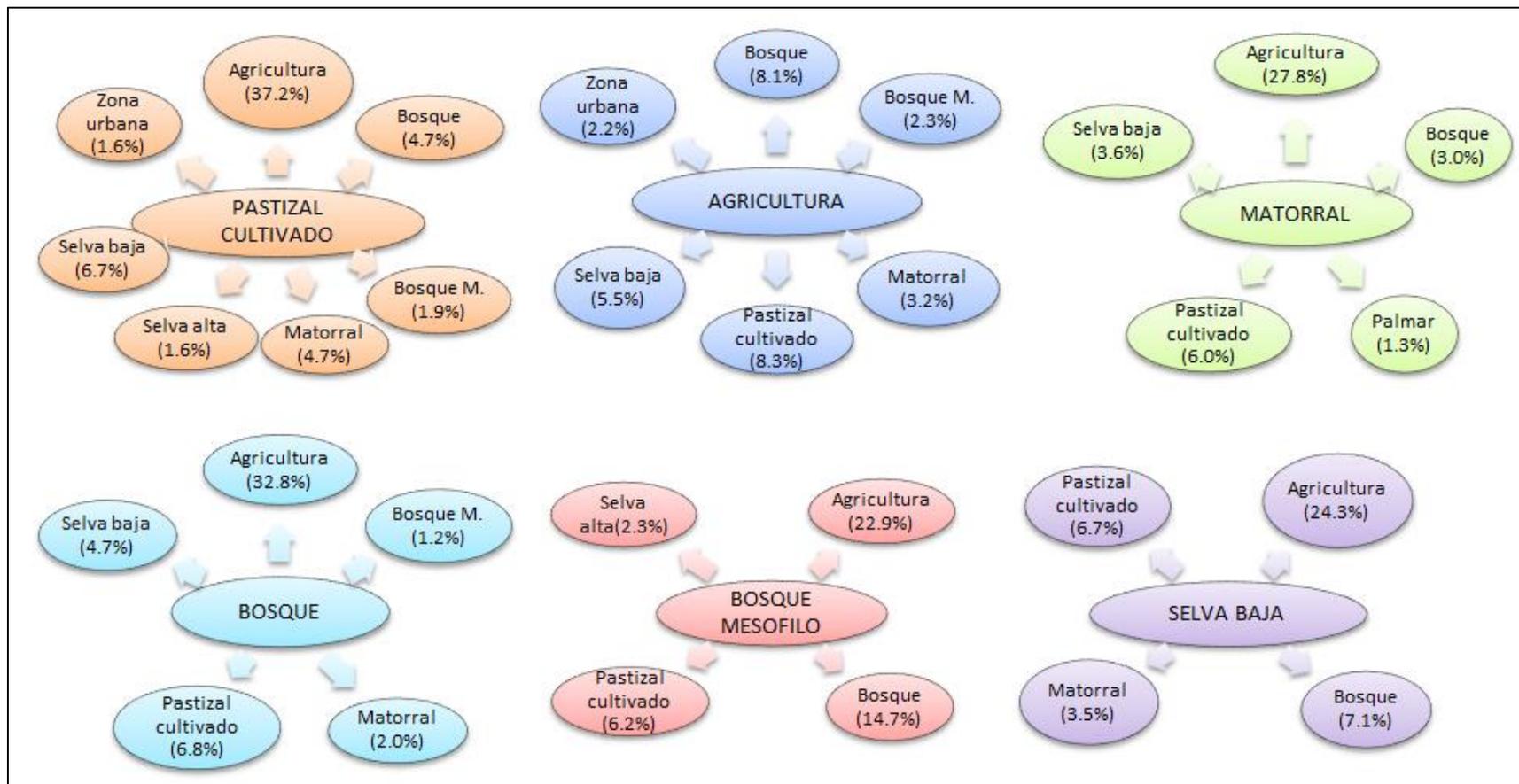


Figura 33. Diagrama de Flujo para el periodo 1990-2001 (Principales Coberturas)

A continuación se realizara un análisis de los resultados de las matrices de transición entre los periodos (1990-2001/2001-2012/1990-2012), se dispondrá para seis coberturas (las principales) las cuales abarcan aproximadamente un 95% (3,247,619 Ha), las cuales son (Agricultura, Bosque, Bosque Mesófilo de Montaña, Matorral, Pastizal Cultivado, Selva Baja), con estas coberturas expuestas se especificara los cambios que sufrieron en cada uno de los periodos (Cuadros 10,12,13).

La agricultura para el periodo 1990-2001 como se muestra en la Figura 33 sufrió seis cambios sobresalientes, disminuyo su superficie en otros tipos de producción humana como el pastizal cultivado en 8.3% (121,405 Ha), otro uso antropogénico al cual cambio fue Zona Urbana con 2.2% (31,321 Ha), y finalmente paso a convertirse en coberturas naturales como Bosque 8.1% (117,900 Ha), Selva Baja 5.5% (79,708 Ha), Matorral 3.2% (46,783 Ha) y Bosque Mesófilo de Montaña 2.3% (34,003 Ha).

Los bosques para este periodo sufrieron un cambio significativo de su superficie para coberturas de uso agrícola 32.8% (168,941 Ha), seguido de coberturas para producción de Pastizales Inducidos 6.8% (34,975 Ha), y finalmente paso a convertirse en coberturas naturales como Selva Baja 4.7% (24,346 Ha), Matorral 2% (10,220 Ha) y Bosque Mesófilo de Montaña 1.2% (5,950 Ha). Por otro lado, el Bosque Mesófilo de Montaña sufrió cuatro cambios significativos, nuevamente la agricultura quien más gano al bosque Mesófilo, con 22.9% (18,560 Ha), paso a ser cobertura Bosque en un 14.7% (11,929 Ha), Pastizal Cultivado 6.2% (5,028 Ha) y finalmente Selva Alta 2.3% (1,843 Ha) (Figura 33).

Otra de las principales coberturas es el Matorral el cual sufrió cuatro cambios relevantes, siendo los usos productivos los que más ganaron superficie en los matorrales, Agricultura 27.8% (84,779 Ha), Pastizales cultivados 6% (18,169 Ha) siendo la Selva baja 3.6% (10,847 Ha) y el Bosque 3% (9,256 Ha) (Figura 33).

La selva baja es una de las principales coberturas, sus principales cambio se dieron nuevamente en la Agricultura con 24.3% (150,573 Ha), Pastizal Cultivado

6.7% (41,713 Ha) y finalmente Matorral 3.5% (21,417 Ha) (Figura 33). Para terminar las principales coberturas, hablando específicamente de cantidad de superficie los Pastizales cultivados, los cuales tuvieron cambio y paso a coberturas naturales como en Selva Baja 6.7% (21,758 Ha), el Bosque 4.7 % (15,389 Ha), Matorral 4.7% (15,295 Ha) y Bosque Mesófilo de Montaña 1.9% (6,338 Ha) (Figura 33).

En la Figura 34 se observa la suma de las superficies ganadas para cada una de las coberturas en el periodo 1990-2001, mostrando claramente una tendencia del dominio y la ampliación de la frontera agrícola con (572,909 Ha), de igual manera, otro uso del suelo para la producción en segunda posición con el Pastizal Cultivado (241,521 Ha), por otro lado las coberturas naturales que se regeneraron fueron Bosque (201,071 Ha), Selva Baja (120,866 Ha), Matorral (94,365 Ha) y Bosque Mesófilo M. (52,195 Ha). Esto nos muestra una tendencia de la dirección del cambio de uso del suelo del estado de Puebla para este periodo, la ganancia de superficie de las zonas de producción están duplicando las ganancias de superficie de las coberturas vegetales naturales (Figura 34).

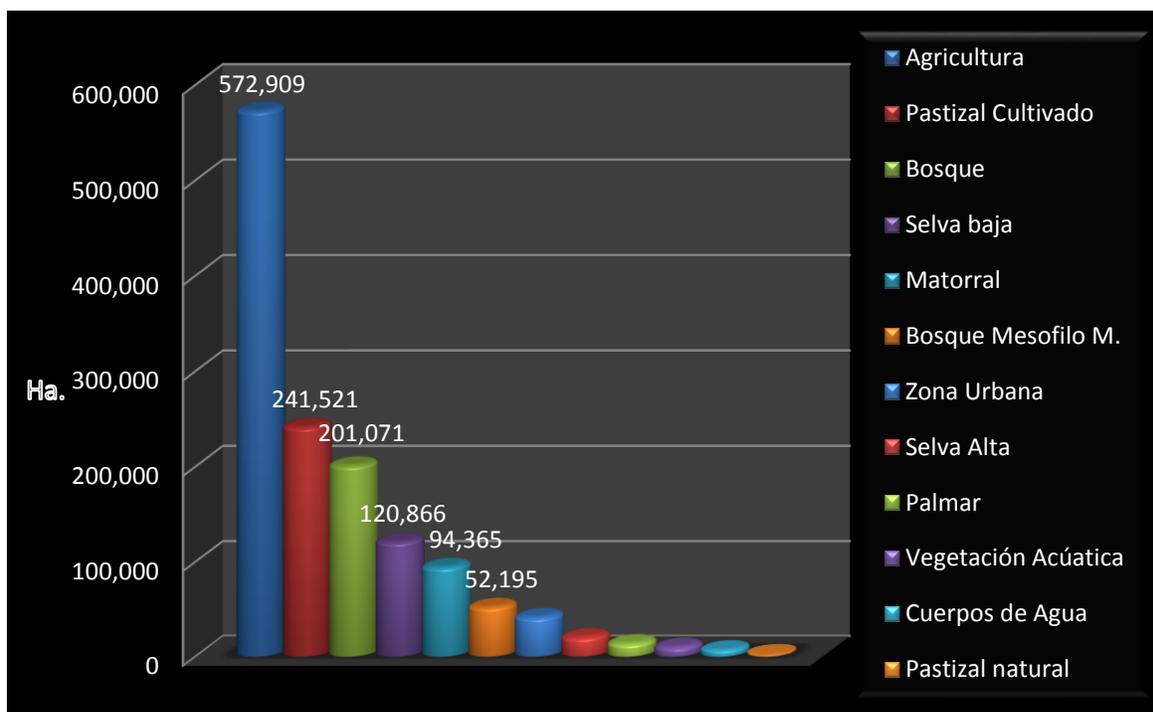


Figura 34. Sumatoria total en superficie ganada para cada cobertura del periodo 1990-2001.

8.3.2.2 Matriz de transición entre 2001-2012

En el siguiente cuadro podremos apreciar las dinámicas de cambio de usos de suelo y el paso de coberturas vegetales, para el periodo 2001-2012, bien sea a superficies productivas, a coberturas vegetales diferentes o simplemente la conservación de las mismas que se encuentran reflejadas en la diagonal de la matriz (Cuadro 11).

Cuadro 11. Matriz de transición entre 2001-2012

COBERTURAS 2001/2012	<i>Agricultura</i>	<i>Bosque</i>	<i>Bosque Mesófilo</i>	<i>Cuerpos de agua</i>	<i>Matorral</i>	<i>Palmar</i>	<i>Pastizal Cultivado</i>	<i>Pastizal natural</i>	<i>Selva alta</i>	<i>Selva baja</i>	<i>Vegetación acuática</i>	<i>Zona urbana</i>	<i>Total general</i>
<i>Agricultura</i>	1,377,005	39,921	6,066	1,027	15,483	2,313	38,626	1,043	10,498	63,266	47	11,311	1,566,607
<i>Bosque</i>	41,753	397,674	723	50	1,834	136	12,583	294	13	10,416		84	465,560
<i>Bosque Mesófilo M</i>	7,561	912	85,748	1			1,373		162				95,757
<i>Cuerpos de agua</i>	351	50	1	3,332	3		153	5,991		31	9	2	9,922
<i>Matorral</i>	14,280	1,523		52	248,186	327	3,433	9		1,010		56	268,876
<i>Palmar</i>	1,378	603			374	12,093	262	39		510			15,259
<i>Pastizal cultivado</i>	168,149	14,752	2,532	69	4,952	69	146,827	2,222	16,495	19,010		987	376,065
<i>Pastizal natural</i>		1,045						8,306					9,351
<i>Selva alta</i>	10,392	13	3,583				4		26,237			2	40,230
<i>Selva baja</i>	21,931	8,471		3	1,132	451	12,527	124		450,009	6	147	494,800
<i>Vegetación acuática</i>	4,446			4	94		0	15,198		8	83	8	19,841
<i>Zona urbana</i>	3,964	170		5	144		306	9	8	63		44,273	48,943
<i>Total general</i>	1,651,210	465,134	98,653	4,544	272,203	15,388	216,096	33,234	53,413	544,324	144	56,870	3,411,213

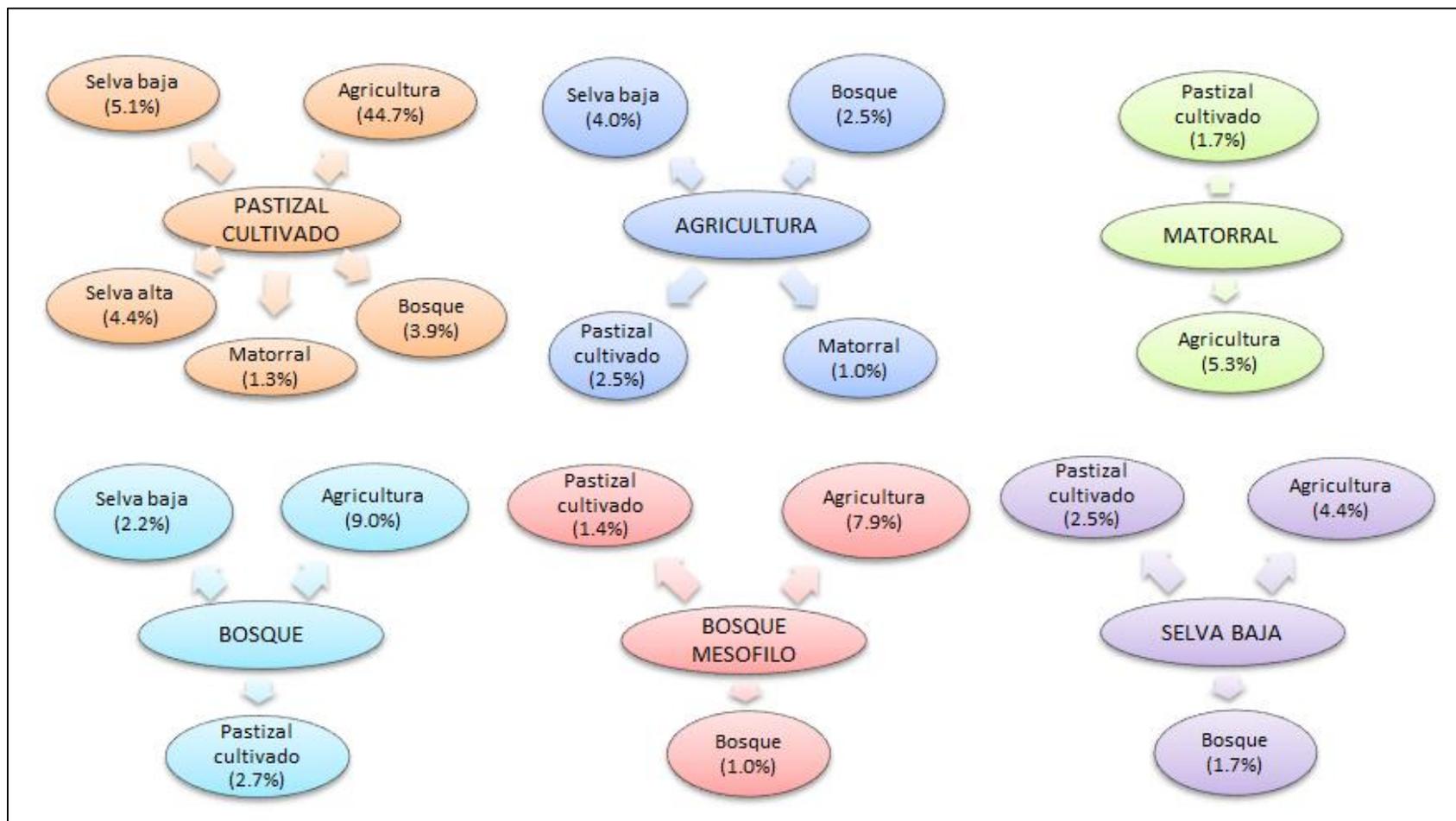


Figura 35. Diagrama de Flujo para el periodo 1990-2001(Principales Coberturas)

La agricultura para el periodo 20001-2012 como se muestra en la figura 35 sufrió cuatro cambios sobresalientes, para este periodo solo disminuyo a una cobertura de tipo productiva Pastizal Cultivado 2.5% (38,626 Ha), las otras tres coberturas fueron de tipo natural, siendo la Selva Baja en este oportunidad la que más gano superficie respecto a la agricultura con 4% (63,266 Ha), Bosque 2.5% (39,921 Ha) y Matorral 1% (15,483 Ha).

Los bosque para este periodo sufrió un cambio significativo de su superficie para coberturas de uso agrícola 9% (168,941 Ha) pero aclarando que fue mucho menor que el periodo pasado, seguido de coberturas para producción de Pastizales Inducidos 2.7% (12,583 Ha) de igual manera mucho menor que el periodo pasado, y finalmente paso a convertirse en coberturas naturales como Selva baja 2.2% (10,416 Ha) (Figura 35).

Otra de las principales coberturas es el Matorral el cual sufrió solamente un par de cambios significativos y estuvieron ligados única y exclusivamente a cobertura de tipo productivo como la Agricultura 5.3% (14,280 Ha) seguido de los Pastizales cultivados con 1.7% (3,433 Ha), para enfatizar en esta cobertura fue un resultado positivo, en este periodo debido a que las pérdidas por degradación a otras coberturas productivas fueron menores que el periodo anterior (Figura 35).

Siendo la Selva Baja la segunda cobertura más extensa en el estado de Puebla los cambios se dieron nuevamente en la agricultura con la mayor extensión cedida con 4.4% (21,931Ha), Pastizal Cultivado 2.5% (12,527 Ha) y finalmente a una cobertura natural Bosque con 1.7% (8,471 Ha) (Figura 35).

Las prioridades de producción en el estado de Puebla se ven claramente marcadas en el cambio drástico de los Pastizales cultivados a las distintas tipos de agriculturas, se ve plasmada en la dirección de cambio del uso, con una pérdida de estos pastizales a la agricultura con un 47% (168,149 Ha), del mismo modo las coberturas vegetales sacaron también buena partida de los cambios de superficie de los pastizales cultivados, siendo la Selva Baja 5.1% (19,010 Ha) la más beneficiada con el abandono de esta actividad productiva, seguida por Selva Alta 4.4% (16,495 Ha), Bosque 3.9% (14,752 Ha) y finalmente el Matorral con 1.3%

(4,952 Ha). Gracias a estos cambios los pastizales cultivados fueron la cobertura que más sufrió cambio en este periodo expuesto (Figura 35).

El periodo de 2001-2012 se caracterizó por una tendencia de dirección de cambios moderada, comparándola al periodo 1990-2001 el cual obtuvo cambio de superficie de 1,378,060 Ha entre coberturas, mientras que el periodo de 2001-2012 tan solo obtuvo cambios entre coberturas de tan solo 608,686 Ha, menos de la mitad, esto muestra una disminución de la dinámica que ejerce el ser humano, y tal vez los controles y políticas de protección al medio ambiente, y control de la ampliación de la frontera agrícola y ganadera.

En la Figura 36 se observa la suma de las superficies ganadas para cada una de las coberturas en el periodo 2001-2012, mostrando claramente una tendencia del dominio y la ampliación de la frontera agrícola con (270,240 Ha), también para este periodo el Pastizal Cultivado gano una superficie de 69,269 Ha en un tercer lugar. Por otro lado, las coberturas naturales que se regeneraron en segunda posición la Selva Baja (94,315 Ha), Bosque (67,460 Ha) en un cuarto puesto. Esto muestra una tendencia de la dirección del cambio de uso del suelo del estado de Puebla para este periodo, la ganancia de superficie de las zonas de producción están duplicando las ganancias de superficie de las coberturas vegetales naturales.

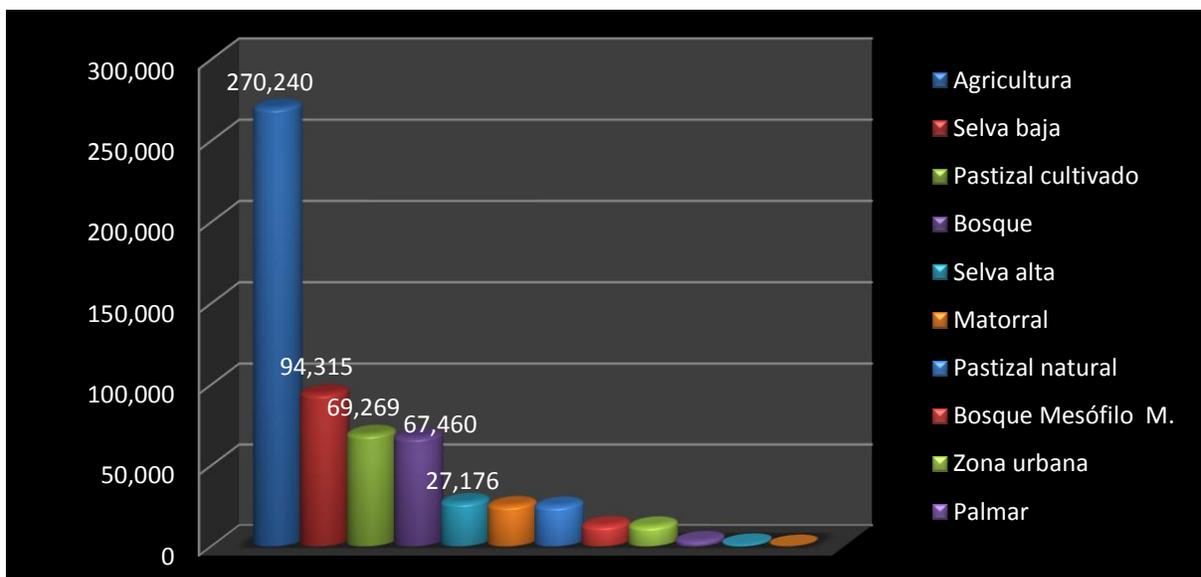


Figura 36. Sumatoria total en superficie ganada para cada cobertura del periodo 2001-2012.

8.3.2.3 Matriz de transición entre 1990 y 2012

En el siguiente cuadro se aprecia las dinámicas de cambio de usos de suelo y el paso de coberturas vegetales, para el periodo 1990-2012, bien sea a superficies productivas, a coberturas vegetales diferentes o simplemente la conservación de las mismas que se encuentran reflejadas en la diagonal de la matriz (Cuadro 12).

Cuadro 12. Matriz de transición entre 1990-2012

COBERTURAS 1990/2012	Agricultura	Bosque	Bosque Mesófilo M	Cuerpos de Agua	Matorral	Palmar	Pastizal Inducido	Pastizal natural	Selva alta	Selva baja	Vegetación acuática	Zona urbana	Total general
Agricultura	1,025,381	122,430	35,177	2,158	48,420	4,077	66,439	9,700	16,260	89,104	100	37,461	1,456,707
Bosque	171,490	259,731	5,618	379	10,775	1,945	33,091	2,656	522	28,823		1,074	516,103
Bosque Mesófilo M.	22,733	11,425	43,820				2,212		895	7		189	81,281
Cuerpos de agua	190			583			408	1,530					2,711
Matorral	86,948	8,375		36	176,062	4,707	13,784	532		11,894		2,498	304,837
Palmar	1,874	461			617	1,422	34			1,200			5,608
Pastizal Inducido	184,979	15,245	6,979	730	14,092		55,785	454	15,525	25,969		5,911	325,669
Pastizal natural	2	2,565						5,645					8,212
Selva alta	28,071	281	6,981				117		20,339			36	55,825
Selva baja	115,837	45,266		105	21,855	3,261	43,438	0		387,755	44	2,168	619,728
Vegetación Acuática	11,826	65		559	479		946	12,768				137	26,779
Zona urbana	3,566	115	226		65		59					7,438	11,469
Total general	1,652,897	465,959	98,802	4,549	272,365	15,411	216,312	33,285	53,540	544,752	144	56,912	3,414,929

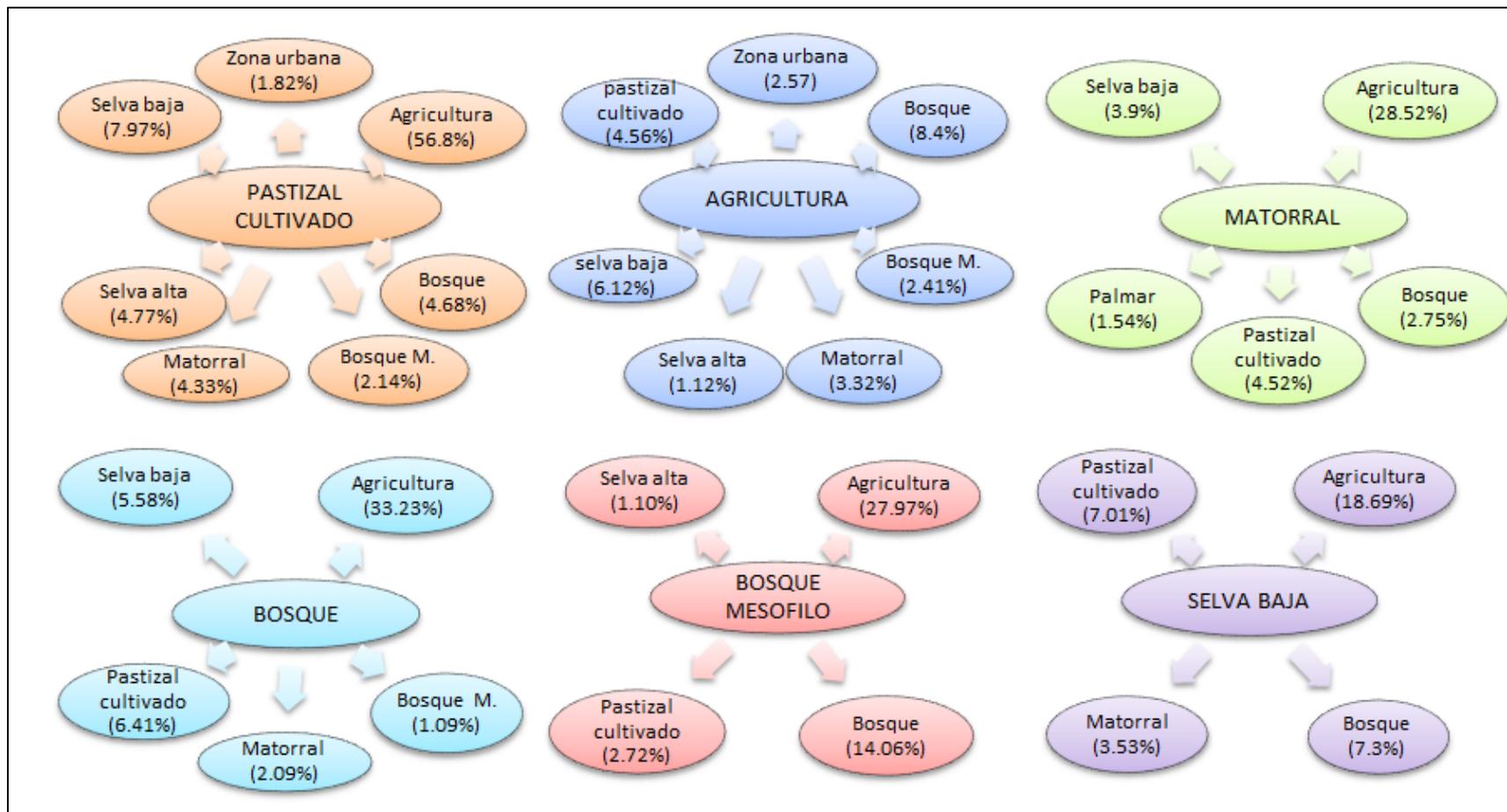


Figura 37. Diagrama de Flujo para el periodo 1990-2012(Principales Coberturas)

El periodo de 1990-2012 es una manera de englobar todo los cambios netos que se presentaron en todas las coberturas vegetales y usos de suelos identificados y agrupados (Cuadro 12).

La agricultura para el periodo 1990-2012 como se muestra en la Figura 37 sufrió siete cambios sobresalientes, disminuyendo su superficie en otros tipos de producción humana como el pastizal cultivado en 4.6% (66,439Ha), otro uso antropogénico al cual cambio fue Zona Urbana con 2.6% (37,461Ha), y finalmente paso a convertirse en coberturas naturales como Bosque 8.4% (122,430 Ha), selva baja 6.2% (89,104 Ha), Matorral 3.3% (48,420 Ha), Bosque Mesófilo de Montaña 2.4% (35,177 Ha) y Finalmente la Selva Alta 1.1% (16,260 Ha).

Los Bosques para este periodo sufrió un cambio significativo de su superficie para coberturas de uso agrícola 33.2% (171,490 Ha), seguido de coberturas para producción de Pastizales Inducidos 6.4% (33,091 Ha), y finalmente paso a convertirse en coberturas naturales como Selva Baja 5.6% (28,823 Ha), Matorral 2% (28,823 Ha) y Bosque Mesófilo de Montaña 1% (5,618 Ha). Por otro lado, el Bosque Mesófilo de Montaña sufrió cuatro cambios significativos, nuevamente la agricultura quien más gano al bosque Mesófilo, con 27.7% (22,733 Ha), paso a ser cobertura Bosque en un 14% (22,733 Ha), Pastizal Cultivado 2.7% (2,212 Ha) y finalmente Selva Alta 1.1% (2,212 Ha) (Figura 37).

Otra de las principales coberturas es el Matorral el cual sufrió cuatro cambios relevantes, siendo los usos productivos los que más ganaron superficie en los matorrales, Agricultura 28.5% (86,948 Ha), Pastizales Cultivados 4.5% (13,784 Ha) siendo la Selva Baja 3.9% (11,894 Ha), Bosque 2.7% (8,375 Ha) las dos coberturas vegetales que más obtuvieron superficie (Figura 37).

Siendo la Selva Baja una de las principales coberturas sus principales cambio se dieron nuevamente en la Agricultura con 18.6% (115,837 Ha), y el Pastizal Cultivado 7% (43,438 Ha), y las coberturas naturales beneficiadas fueron el Bosque 7.3% (45,266 Ha) y el Matorral 3.5% (45,266 Ha) (Figura 37).

Las prioridades de producción en el estado de Puebla se ven claramente marcadas en el cambio drástico de los Pastizales cultivados a las distintas tipos de agriculturas, es plasmada en la dirección de cambio del uso, con una pérdida de estos pastizales a la agricultura con un 56.8% (184,979 Ha), del mismo modo, las coberturas vegetales sacaron también buena partida de los cambios de superficie de los pastizales cultivados, siendo la Selva Baja 7.9% (25,969 Ha) la más beneficiada con el abandono de esta actividad productiva, seguida por Selva Alta 4.7% (15,525 Ha), Bosque 4.6% (15,245 Ha), Matorral con 4.3% (14,092 Ha), Bosque Mesófilo de Montaña 2.1% (6,979 Ha) y la última beneficiada las Zonas Urbanas 1.9% (5,911 Ha). Gracias a estos cambios los pastizales cultivados fueron la cobertura que más sufrió cambio significativo en este periodo expuesto (Figura 37).

En la Figura 38 se observa la suma de las superficies ganadas para cada una de las coberturas en el periodo 2001-2012, mostrando claramente una tendencia del dominio y la ampliación de la frontera agrícola con (627,516 Ha), también para este periodo el Pastizal Cultivado gano una superficie de 206,228 Ha en un tercer lugar. Por otro lado las coberturas naturales que se regeneraron en segunda posición la Bosque (160,527 Ha), Selva baja (156,997 Ha) en un cuarto puesto. Está claro que en el transcurso de este periodo de 22 años el crecimiento impetuoso de la agricultura, triplicando el valor de las superficies obtenidas por el Bosque que se ubicó en la segunda posición, un caso interesante y cabe resaltarlo es el proceso de urbanización, el cual obtuvo una ampliación en superficie de 49,474 Ha (Figura 38).

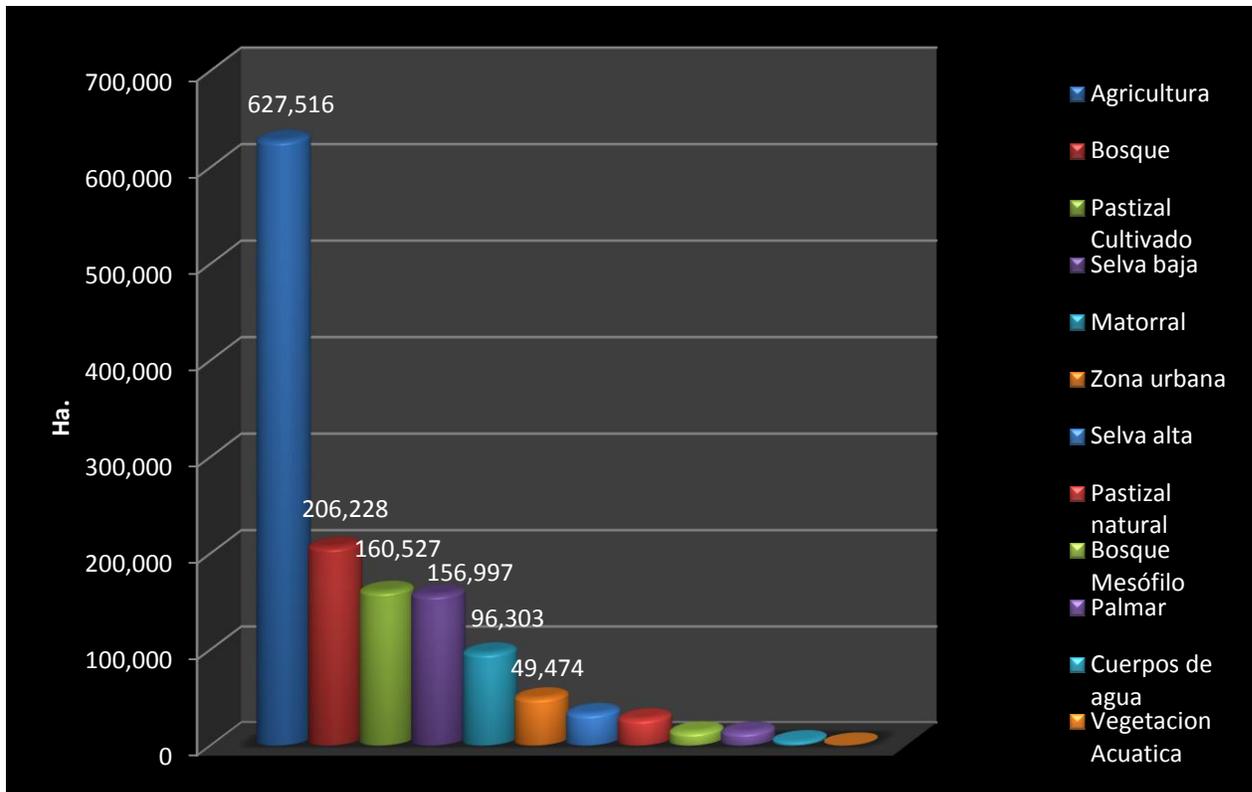


Figura 38. Sumatoria total en superficie ganada para cada cobertura del periodo 1990-2012.

Se aprecia en la Figura 39 los diferentes doce tipos de coberturas en su dinámica de cambio o pérdida de superficie, para cada uno de los tres periodos objeto de estudio, en esta Figura podemos apreciar con detalle que los periodos 1990-2001 y 1990-2012 presentan un flujo de cobertura mucho más marcado, que en el periodo 2001-2012 el cual es conservador en las pérdidas de coberturas respecto a los dos anteriormente nombrados, nuevamente los cuatro grandes usos y coberturas (Agricultura, Bosque, Selva baja, Matorral) se destacan por las grandes extensiones de superficie las cuales cambian a otras, principalmente a las de usos productivos, de igual modo en estas coberturas un dato interesante en esta Figura 39 se encuentra en el contraste del periodo 1990-2001/2001-2012, debido a que el flujo del primero siempre duplica y en ocasiones en más respecto al segundo en las cuatro grandes coberturas, esto indica que hubo control hacia la deforestación de zonas de bosques y selvas, y al mismo tiempo se evitó la extensión de la frontera agrícola y ganadera.

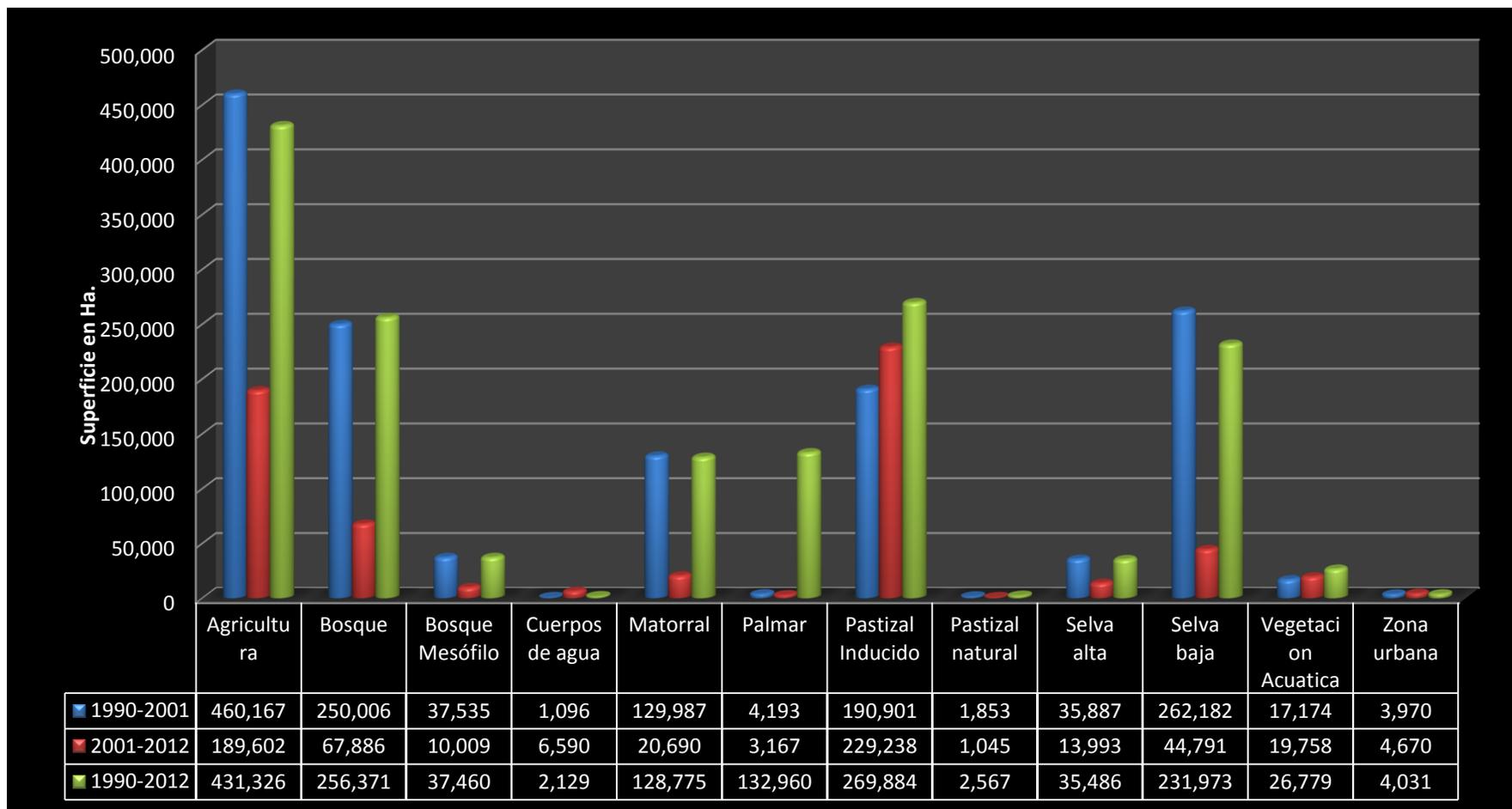


Figura 39. Resumen y comparación de los tres periodos respecto a las pérdidas de superficie en los tipos de coberturas

Para poder apreciar de una mejor forma los flujos y dinámicas entre los tres periodos es importante apreciar de manera global cuanta es la superficie que se conservó y cuál fue la cantidad que cambio a otras coberturas, en el Cuadro 13 se observa el porcentaje conservado y cambiado para cada tipo de cobertura, también se puede apreciar para cada uno de los tres periodos. En primera instancia, la matriz del periodo 2001-2012 es la más estable en cuanto a la cantidad de coberturas conservadas con un máximo conservado de la Selva Baja 90% con un promedio de conservación de todas las coberturas de un 70%, seguido de la matriz del periodo 1990-2012 con un máximo conservado de la Agricultura 70% con un promedio de conservación de todas las coberturas de un 56% y no muy lejos la matriz del periodo 2001-2012 con un promedio de conservación de 53%.

Un caso interesante y que debe ser tomado en cuenta es la cobertura de Vegetación Acuática el cual en el periodo 2001-2012 se desapareció casi en un 100%, la cual paso de tener 27,203 Ha en el año 1990, a tan solo quedar en el año 2012 con 144 Ha, pasando principalmente a ser parte de la Agricultura y Pastizales Cultivados.

Cuadro 13. Conservación y cambio en porcentaje para los periodos

COBERTURAS	Matriz 1990-2001		Matriz 2001-2012		Matriz 1990-2012	
	%	%	%	%	%	%
	Conservación	Cambio	Conservación	Cambio	Conservación	Cambio
Agricultura	68.4	31.6	87.90	12.10	70.4	29.6
Bosque	51.5	48.5	85.42	14.58	50.3	49.7
Bosque Mesófilo	53.7	46.3	89.55	10.45	53.9	46.1
Cuerpos de agua	71.3	28.7	33.58	66.42	21.5	78.5
Matorral	57.3	42.7	92.30	7.7	57.8	42.2
Palmar	25.0	75	79.25	20.75	25.4	74.6
Pastizal Inducido	41.3	58.7	39.04	60.96	17.1	82.9
Pastizal natural	69.5	30.5	88.82	11.18	68.7	31.3
Selva alta	35.6	64.4	65.22	34.78	36.4	63.6
Selva baja	57.7	42.3	90.95	9.05	62.6	37.4
Vegetación Acuática	36.9	63.1	0.00	100	0.0	100
Zona urbana	65.4	34.6	90.46	9.54	64.9	35.1

8.4 TASAS DE CAMBIO

En las Figuras 40, 41, 42 se representa cada una de las coberturas presentes en los tres periodos de estudio, las tasas de cambio para cada transición, estas tasas de cambio fueron calculadas según la ecuación propuesta por la FAO (1996). Las tasas de cambio expresan el cambio en porcentaje de la supervisión al inicio de cada año.

Estas tasas representan el porcentaje de la superficie total de cada cobertura que aumenta o disminuye en cada uno de los periodos de estudio, en este caso un ejemplo para el primer periodo 1990-2001, la Selva Baja obtiene una tasa de cambio del -2% el cual significa que durante cada año de este periodo esta cobertura cedió un 2% del área que ocupaba un año anterior.

Las tasas de cambio para el periodo 1990-2001 tienen como protagonista a la cobertura de las Zonas Urbanas, quien fue la que obtuvo una tasa de cambio con mayor ganancia positiva 14%, seguido de los Palmares que tuvieron una revegetación interesante con una tasa del 9%, siendo elevada para ser una cobertura vegetal natural, un caso interesante de igual manera es el Bosque Mesófilo de Montaña con una tasa positiva del 1.5%, los que siguen tendencias normales son la Agricultura 0.7% y finalmente las tasas negativas de las coberturas vegetales naturales (Bosque, Matorral, Selva baja, Vegetación Acuática).

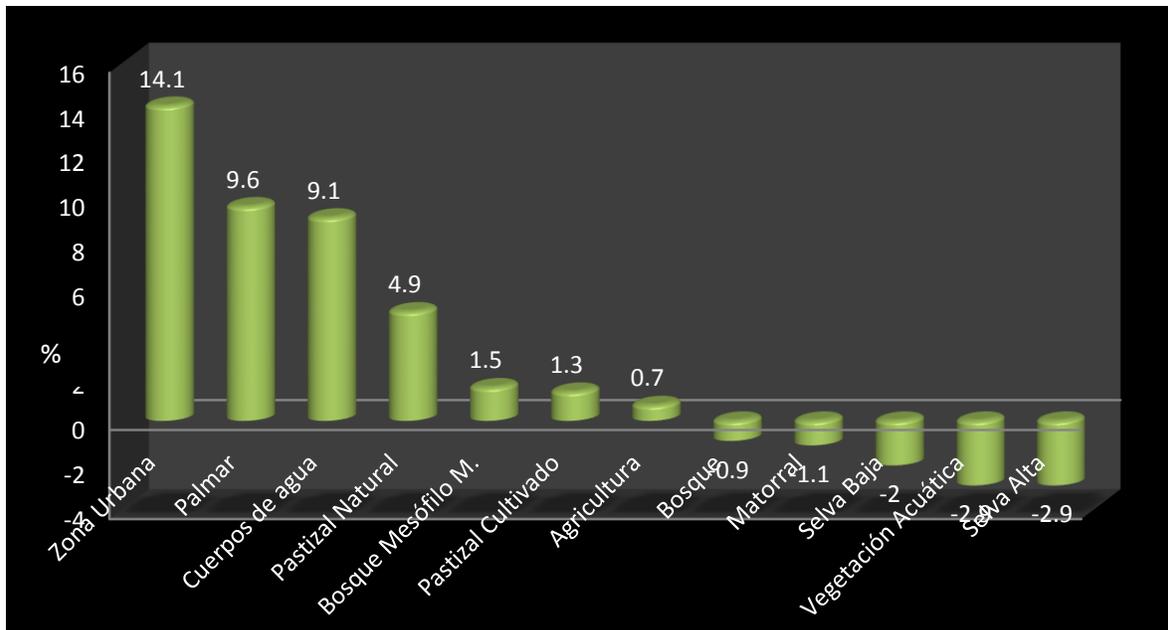


Figura 40. Tasas de cambio anual para el periodo 1990-2001

Para el periodo 2001-2012 que según los análisis anteriores fue un periodo sin cambios abruptos siendo mas estable en la dinamica de los cambios entre coberturas, las Figura 41 muestra dos eventos muy notorios y contrastantes por un lado con una tasa positiva muy elevada el pastizal natural 23% el cual se puede atribuir a el abandono de zonas agropecuarias, y por otro lado con ua tasa negativa -36% la vegetacion acuatica que marca casi en definitiva la extincion de estas zonas en el estado de Puebla. Cabe resaltar otras tasas positivas e interesantes, son las coberturas vegetales naturales que obtuvieron tasas positivas lo contrario al periodo pasado que fueron negativas, estas fueron Selva Baja, Selva Alta, Matorral y al mismo tiempo el bosque Mesófilo de Montaña y el Palmar mantuvieron sus tasas positivas al igual que el periodo pasado. El Bosque en este periodo se mantuvo con una tasa de cambio de 0%, el cual nos indica que los cambios que ocurrieron fueron equilibrados, tanto como en ganancia de coberturas como en perdidas de la misma.

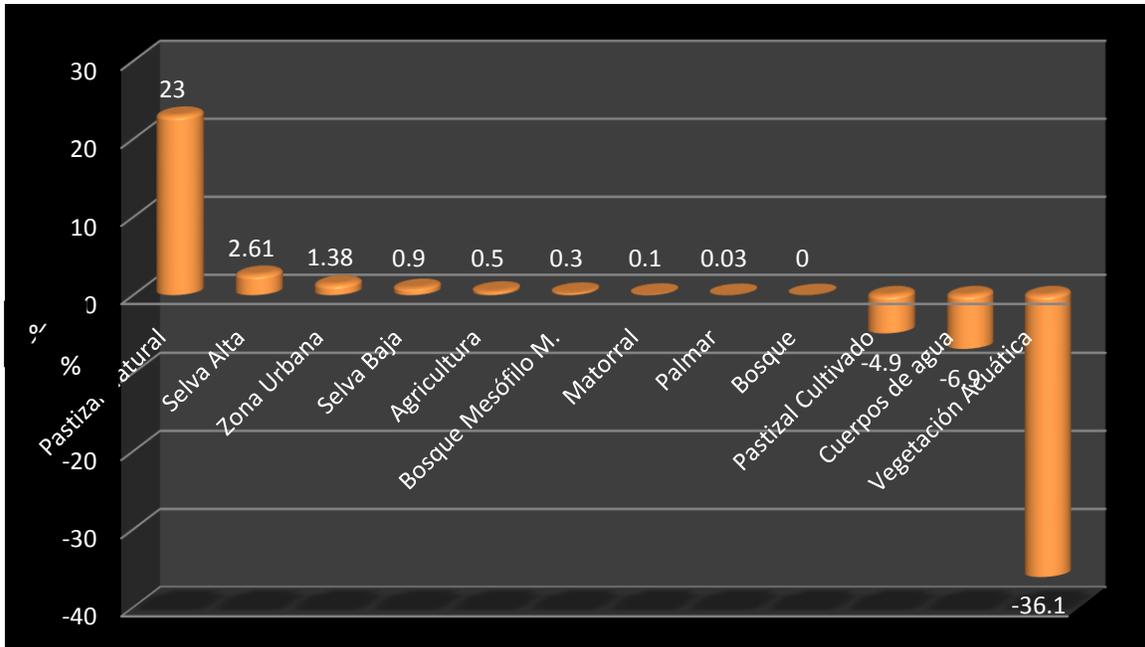


Figura 41. Tasas de cambio anual para el periodo 2001-2012

El periodo 1990-2012 nos muestra una tendencia global de las tendencias de los cambios de uso de suelo del estado de Puebla, en la Figura 42 podemos observar que las tasas positivas, la protagonista fueron los Pastizales Naturales 16.7% el cual se puede atribuir al abandono de pastizales cultivados con una tasa negativa del 3.7% y extensiones de agriculturas abandonadas y permitió la recuperación de estas superficies a grandes extensiones de pastizales naturales o praderas, al igual las Zonas Urbanas obtuvieron una gran ganancia con una tasa de 15.7%, el Palmar es una gran sorpresa ubicándose en el tercer lugar con una tasa de 9.6% al igual que el Bosque Mesófilo de Montaña con una tasa moderada pero positiva del 1.8% esto es muy positivo para un ecosistema tan vulnerable como este, el restante de coberturas se encuentran en condiciones normales las cuales se esperaban que estuviera así, este es el caso de la agricultura con una tasa de 1.2%, y finalmente las coberturas vegetales naturales con tasas negativas (Bosque, Selva Alta, Selva Baja y Matorrales), la cobertura que en definitiva es una pérdida absoluta es la Vegetación Acuática con una tasa de -38%.

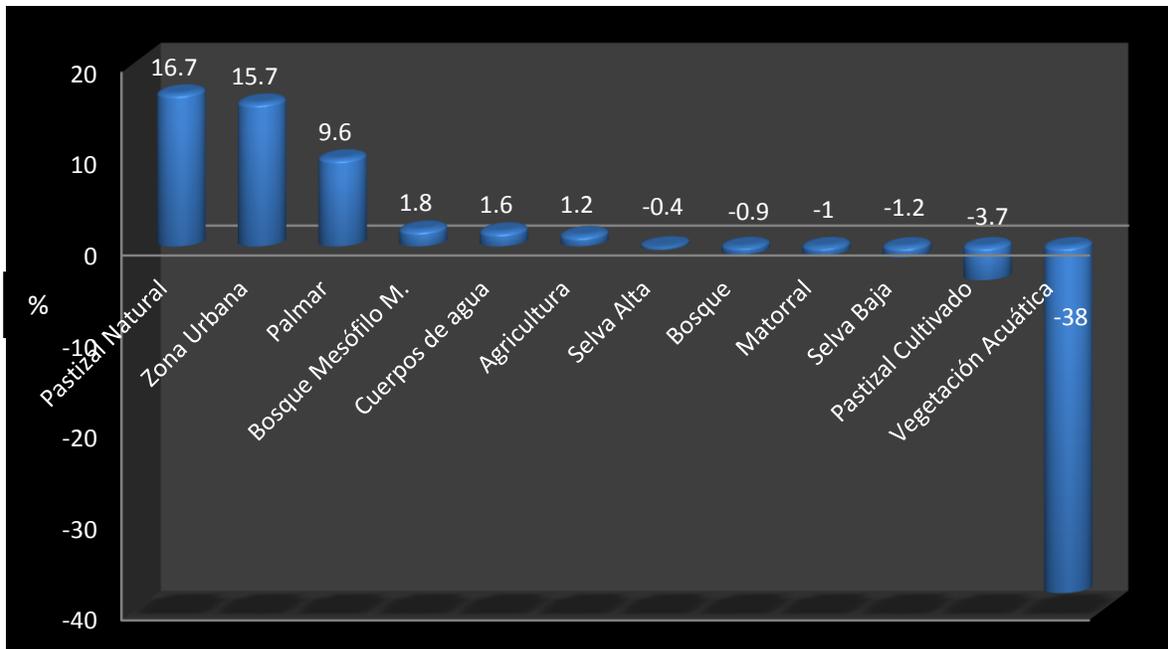


Figura 42. Tasas de cambio anual para el periodo 1990-2012

8.5 MATRIZ DE PROCESOS DE CAMBIO

En el análisis del cambio de cobertura vegetal y uso de suelo, en estos cambios se puede reconocer siete procesos de cambio, (Sin cambio, Conservado, Revegetación, Deforestación, Degradado, Actividad productiva y urbanización). Como se mencionó en el apartado de metodología, el indicador de conservación significa que la cobertura vegetal se mantiene; deforestada es que cambio su uso del suelo de formas de vida arbórea a zonas agropecuarias o urbanas; degradada aquella perdida de la cobertura vegetal no arbórea, por pastizales y cultivos; por actividad productiva es decir que ha cambiado de actividad productiva; revegetada es donde anteriormente se llevaba alguna actividad agropecuaria y actualmente se encuentra ocupada por bosque, selva, matorral, vegetación hidrófila o pastizales naturales. Y sin cambio significa que anteriormente se tenía alguna actividad productiva y actualmente se mantienen con el mismo tipo de uso (Cuadro 14).

Cuadro 14. Matriz de procesos de cambio para el periodo 1990-2001

Coberturas 1990-2001	Agricultura	Bosque	Bosque Mesófilo M.	Cuerpos de agua	Matorral	Palmar	Pastizal Cultivado	Pastizal natural	Selva alta	Selva baja	Vegetación acuática	Zona urbana
Agricultura	S/C	REV	REV		REV	REV	A/P		REV	REV	REV	URB
Bosque	DEF	CON	DEG		DEF	DEF	DEF	DEF		DEF		URB
Bosque Mesófilo M.	DEF	REV	CON				DEF		DEG			URB
Cuerpos de Agua	A/P	REV		CON			A/P				REV	
Matorral	DEG	REV			CON	DEG	DEG			REV		URB
Palmar	DEG	REV			REV	CON	DEF			REV		
Pastizal Cultivado	A/P	REV	REV		REV		S/C		REV	REV		URB
Pastizal natural		REV						CON				
Selva Alta	DEF		REV				DEF		CON			
Selva baja	DEF	REV			DEG		DEF			CON		URB
Vegetación Acuática	DEG			DEG			DEG				CON	URB
Zona Urbana												CON

En el Cuadro 14 se observan los procesos de cambio para el periodo 1990-2001, el proceso que abarco mayor cantidad de superficie fue el denominado Sin Cambio, es decir se mantuvieron las actividades productivas como agricultura, pastizales cultivados con 33% (1,129,787 Ha) , la Conservación es el segundo proceso con más territorio con un total de 26.1 %(886,476 Ha), seguido del proceso de Degradación con 14.4% (488,969 Ha), la Revegetación con 13.4% (455,040 Ha), Deforestación con 7.1% (242,892 Ha), presento un cambio de Actividad Productiva en 4.6% (154,795 Ha) y finalmente el último lugar en superficie la Urbanización con 1.2% (41,424 Ha.)

En el Cuadro 15 se observan los procesos de cambio para el periodo 2001-2012, el proceso que abarco mayor cantidad de superficie fue el denominado Sin Cambio, es decir, se mantuvieron las actividades productivas como agricultura, pastizales cultivados con 44.8% (1,523,832 Ha), este indicador comparado con el

periodo anterior aumento significativamente, de la misma manera el indicador Conservado 37.5% (1,275,941 Ha) que aplica para las coberturas vegetales naturales, aumento respecto al periodo anterior, es decir las deforestaciones disminuyeron, para la Revegetación ocurrió lo contrario, para este periodo disminuyo este proceso con 6.4% (219,130 Ha),

El cambio de Actividades Productivas obtuvo 6.1% (207,279 Ha), seguido del proceso de Deforestación que afortunadamente para las coberturas vegetales disminuyo a la mitad respecto al periodo anterior, abarcando para este periodo una superficie de 3.6% (120,926 Ha), el proceso de la Degradación es el cambio más interesante para este periodo, esto se debe a que tuvo un cambio drástico, debido a que tan solo en este periodo se presentó en una superficie de 1.2% (39,867 Ha) comparado al periodo anterior con 488,969 Ha. un cambio sustancial, de la misma manera la Urbanización obtuvo menos superficie 0.4%(12,585 Ha) (Cuadro 15).

Cuadro 15. Matriz de procesos de cambio para el periodo 2001-2012

COBERTURAS 2001/2012	Agricultura	Bosque	Bosque Mesófilo	Cuerpos de agua	Matorral	Palmar	Pastizal Cultivado	Pastizal natural	Selva alta	Selva baja	Vegetación acuática	Zona urbana
Agricultura	S/C	REV	REV		REV	REV	A/P	REV	REV	REV		
Bosque	DEF	CON			DEF		DEF	DEF		DEF		
Bosque Mesófilo M.	DEF		CON				DEF					
Cuerpos de agua	A/P			CON			A/P	REV				
Matorral	DEG				CON		DEG					
Palmar	DEG	REV			REV	CON	DEF			REV		
Pastizal cultivado	A/P	REV	REV		REV		S/C	REV	REV	REV		
Pastizal natural		REV						CON				
Selva alta	DEF		REV						CON			
Selva baja	DEF	REV			DEG		DEF			CON		
Vegetación acuática	DEG							DEG			CON	
Zona urbana												CON

La matriz de procesos de cambio es el resumen de todo el periodo de estudio 1990-2012. En el Cuadro 16 se observan los procesos de cambio para el periodo 1990-2012, el proceso que abarco mayor cantidad de superficie fue el

denominado Sin Cambio, es decir se mantuvieron las actividades productivas como agricultura, pastizales cultivados con 31.8% (1,081,166 Ha) ,la Conservación es el segundo proceso con más territorio con un total de 26.6% (902,795 Ha), la Revegetación 14.4% (493,746 Ha), seguido del el proceso de Deforestación 13.6% (460,180 Ha), Actividad productiva en 7.4% (252,016 Ha), Degradación 4.6%(155,619 Ha) y por ultimo Urbanización 1.5% (49,474 Ha).

Cuadro 16. Matriz de procesos de cambio para el periodo 1990-2012

COBERTURAS 1990/2012	Agricultura	Bosque	Bosque Mesófilo	Cuerpos de Agua	Matorral	Palmar	Pastizal cultivado	Pastizal natural	Selva alta	Selva baja	Vegetación acuática	Zona urbana
Agricultura	S/C	REV	REV		REV	REV	A/P	REV	REV	REV		URB
Bosque	DEF	CON	DEG		DEF		DEF	DEF		DEF		
Bosque Mesófilo M.	DEF	REV	CON				DEF					
Cuerpos de agua	A/P			CON			A/P	REV				
Matorral	DEG	REV			CON	DEG	DEG	DEF		REV		
Palmar	DEG	REV			REV	CON				REV		
Pastizal cultivado	A/P	REV	REV		REV		S/C	REV	REV	REV		URB
Pastizal natural		REV						CON				
Selva alta	DEF		REV						CON			
Selva baja	DEF	REV			DEG		DEF			CON		
Vegetación Acuática	DEG						DEG	DEG			CON	
Zona urbana												CON

De acuerdo a los indicadores podemos apreciar en el Cuadro 17 la cantidad de superficie en el cual se efectuó el proceso, también se puede observar el resumen de los tres periodos, además del porcentaje que representa en el total de la superficie del estado de Puebla.

En primera instancia se observa en el Cuadro 17 que los procesos Sin Cambio y Conservado, en los tres periodos se encuentran con la mayor cantidad de superficie, sumando los porcentajes de estos dos en los tres periodos 59%, 82% y 58% respectivamente.

Cuadro 17. Cambio de uso del suelo por indicador de cambio para los periodos de estudio.

INDICADOR	SUPERFICIE EN HA.		
	1990/2001	2001/2012	1990/2012
SIN CAMBIO	1,129,787	1,523,832	1,081,166
%	33.2	44.8	31.8
CONSERVADO	886,476	1,275,941	902,795
%	26.1	37.5	26.6
REVEGETACIÓN	455,040	219,130	493,746
%	13.4	6.4	14.5
DEFORESTACIÓN	242,892	120,926	460,180
%	7.1	3.6	13.6
DEGRADADO	488,969	39,867	155,619
%	14.4	1.2	4.6
ACT. PRODUCTIVA	154,795	207,279	252,016
%	4.6	6.1	7.4
URBANIZACIÓN	41,424	12,585	49,474
%	1.2	0.4	1.5

8.6 MODELO DE LOS PROCESOS DE CAMBIO

El modelo que se muestra en la Figura 43, se encuentra la dinámica del estado de Puebla solo para periodo 1990-2012 debido a que resumen todos los procesos ocurridos en todo el periodo de tiempo estudiado, en este modelo se contrasta las relaciones existentes entre las coberturas y los diversos procesos acontecidos en cada cobertura y usos del suelo, además solo se tomó en cuenta las cuatro principales coberturas existentes en el estado de Puebla, siendo estas las que abarcan aproximadamente el 90% del territorio.

La agricultura presento nueve cambios de los cuales seis fueron Revegetación, uno Urbanización y otro cambio de Actividad Productiva, la Selva Baja presento cuatro cambios de los cuales dos de Deforestación, uno de Revegetación y otro de Degradación, el Bosque presento seis cambios de los cuales cinco fueron Deforestación y uno de Degradación y por último el Matorral con seis cambios tres de Degradación, dos de Revegetación y uno de Deforestación.

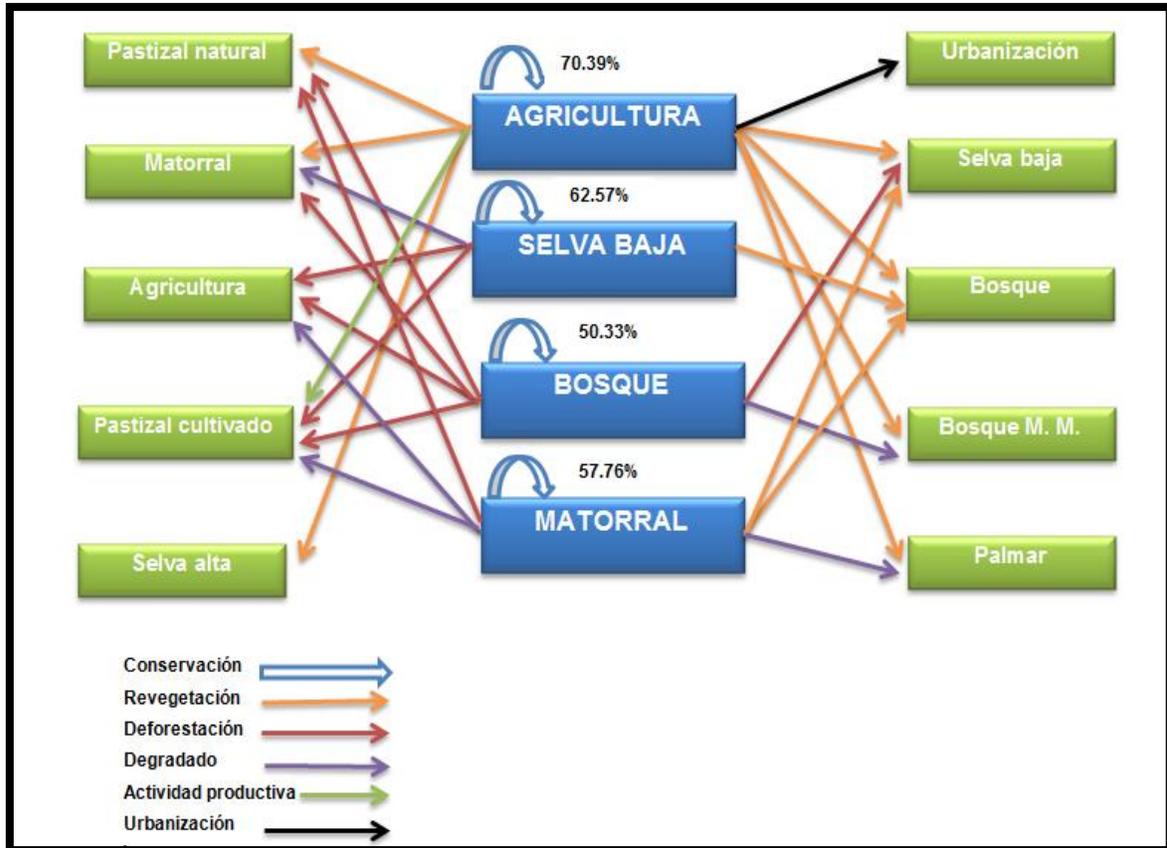


Figura 43. Modelo de procesos de cambio para el periodo 1990-2012

8.7 PROYECCIONES DE USOS FUTUROS

Los trabajos de investigación de cambio de uso de suelo, tienen como finalidad dar a conocer y cuantificar las coberturas y los usos existentes en las diferentes áreas de estudio. Realizar estudios multitemporales dan una visión de los cambios y dinámicas de lo que ha ocurrido desde tiempos pasados hasta llegar a los actuales, en todo este proceso de cuantificar y cualificar los cambios a los diferentes usos del suelo, finalmente al identificar las tendencias del pasado hacia el presente, podemos dar tentativas de ocurrencias de procesos de degradación o restauración de los ecosistemas, si se siguen los mismos patrones de productividad o conservación de las coberturas vegetales.

En el Cuadro 18 se muestran las diferentes proyecciones al año 2030, siguiendo una tendencia futura para cada matriz de transición realizada, es decir, mostrara una ocurrencia de tres superficies para cada cobertura y usos del suelo.

Las tres matrices coinciden con superficies muy cercanas, en el aumento de la Agricultura, Zonas Urbanas y Bosque Mesófilo de Montaña, coinciden en la disminución de los Bosques y la pérdida total de la Vegetación Acuática. De igual manera, presentan desacuerdos en función de las tasas de cambio de cada una de ellas. Un ejemplo claro son las Selvas Bajas y Altas, ya que en la matriz 2001-2012 presentan una ganancia de superficie, esto fue una tendencia de ese periodo, pero una realidad clara son las tendencias reflejadas en la matriz 1990-2012, que da una tendencia de deforestación y esto debido a las dinámicas de la extensión de la frontera agrícola.

Para los Pastizales Cultivados las opiniones están divididas puesto que las matrices 2001-2012 y 1990-2012 indican que estos desaparecerán, y las matrices 1990-2001 muestran un aumento, se apega a una realidad cercana la matriz 1990-2012 las cuales presenta una pérdida de estos pero de una manera más controlada, debido al cambio de actividades de esta índole.

De igual manera, las opiniones están divididas para los matorrales, puesto que el la matriz 2001-2012 difiere de las otras dos que dan como una disminución de las coberturas de matorral, podríamos asegurar que para el periodo 2001-2012 el resultado es positivo porque tuvo procesos de revegetación, lo contrario en los otros dos periodos con procesos de degradación, pero se acoge a una realidad más cercana la proyección de la matriz 1990-2012, el cual marca una pérdida de matorrales pero de una manera controlada (Cuadro 18).

Cuadro 18 Proyecciones en superficie para el año 2050, para tres realidades respecto a cada una de las matrices

COBERTURAS Y USOS	PROYECCIÓN DE SUPERFICIE A 2050 Ha.			
	Superficie 2012	Proyección Matriz 90-01	Proyección Matriz 01-12	Proyección Matriz 90-12
Agricultura	1,651,210	2,035,417	1,943,473	1,989,445
Bosque	465,134	292,687	463,660	378,174
Bosque Mesófilo M.	98,653	149,297	108,658	128,977
Cuerpos de agua	4,544	25,644	0	5,804
Matorral	272,203	148,461	283,693	216,077
Palmar	15,388	48,785	15,833	32,309
Pastizal Cultivado	216,096	390,893	0	27,184
Pastizal Natural	33,234	44,566	115,740	80,153
Selva Alta	53,413	0	98,954	49,442
Selva Baja	544,324	114,491	715,408	414,949
Vegetación Acuática	144	0	0	0
Zona Urbana	56,870	186,330	84,254	135,292

En el Cuadro 18 se realizó una proyección de 38 años a partir del año 2012, esta proyección se realizó gracias al promedio de las tasas de cambio de los tres periodos de estudio, con las tasas promedio de cada cobertura y usos de suelo se calculó las posibles existencias en superficie de cada una de ellas a los años 2030 y 2050.

Cuadro 19. Proyección de coberturas hacia los años 2030 y 2050

<i>Coberturas</i>	<i>Superficie 2012</i>	<i>Superficie 2030</i>	<i>Superficie 2050</i>
<i>Agricultura</i>	1,651,210	1,854,897	2,081,217
<i>Bosque</i>	465,134	424,745	379,868
<i>Bosque Mesófilo M.</i>	98,653	113,008	128,957
<i>Cuerpos de agua</i>	4,544	5,443	6,442
<i>Matorral</i>	272,203	245,746	216,348
<i>Palmar</i>	15,388	23,370	32,238
<i>Pastizal cultivado</i>	216,096	126,587	27,133
<i>Pastizal natural</i>	33,234	10,512	0
<i>Selva alta</i>	53,413	51,536	49,450
<i>Selva baja</i>	544,324	482,916	414,685
<i>Vegetación acuática</i>	144	0	0
<i>Zona urbana</i>	56,870	94,050	135,361

En la Figura 44 se tienen graficados los posibles porcentajes en superficies de las coberturas y los usos que tendrían para el año 2050. Las tendencias obtenidas son esperadas en algunas coberturas y usos como los son el aumento de la Agricultura, las Zonas Urbanas, y las disminuciones en coberturas como el Bosque, Matorral, Pastizal Natural, Selva Alta, Selva Baja y Vegetación Acuática. Pero también ocurrieron prospectivas a futuro que no se esperaban que aumentaran debido a la dinámica actual, estas son el caso del Bosque Mesófilo de Montaña, Cuerpos de Agua y los Palmares, de la misma manera se espera la disminución de los Pastizales Cultivados.

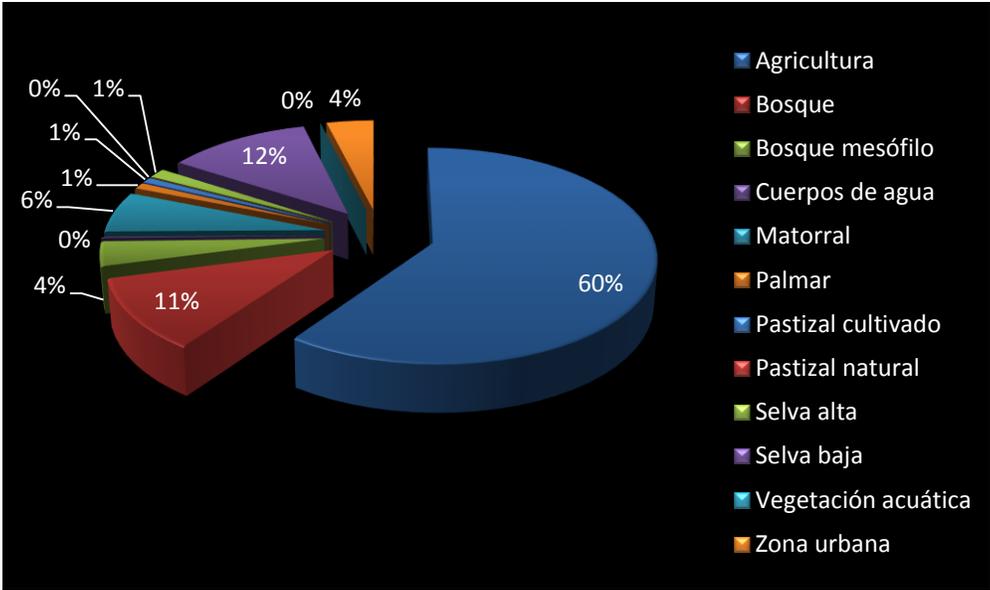


Figura 44. Porcentajes de posible ocurrencia para el año 2050

Las posibles ocurrencias de las coberturas al año 2050 se ven reflejadas en la Figura 45, en donde se plasma el porcentaje positivo o negativo de las coberturas en base a las coberturas actuales del año 2012 y dependiendo de la dinámica que se observó del año 1990-2012. Fueron cinco las coberturas y usos del suelo que se asume que aumentarían para el año 2050 respecto a las superficies del año 2012, Zona urbana 136% esto indica que aumentaría más del doble para el año 2050, Palmar 110%, Cuerpos de Agua 42%, Bosque Mesófilo de Montaña 31% y finalmente la Agricultura que se espera un aumento del 26%.

En cuanto a las coberturas que perderán superficie, se tiene que resaltar los Pastizales Naturales y la Vegetación Acuática el cual se espera que para el año 2050 haya perdido el total de sus superficies, igualmente el Pastizal Cultivado se espera que pierda un 87% de su superficie, este último depende totalmente del mercado y las oportunidades para el campo de la ganadería. Finalmente, las tres grandes coberturas vegetales (Bosque 18, Matorral 21, Selva Baja 24 y Selva Alta 7%), estos porcentajes de pérdidas de coberturas de igual manera son muy altos por la cantidad de hectáreas que posee cada uno de ellos en el estado de Puebla, siendo una pérdida total entre estas cuatro una extensión de 274,722 Ha. de las cuales se presumen que se perderán para el año 2050 (Figura 45).

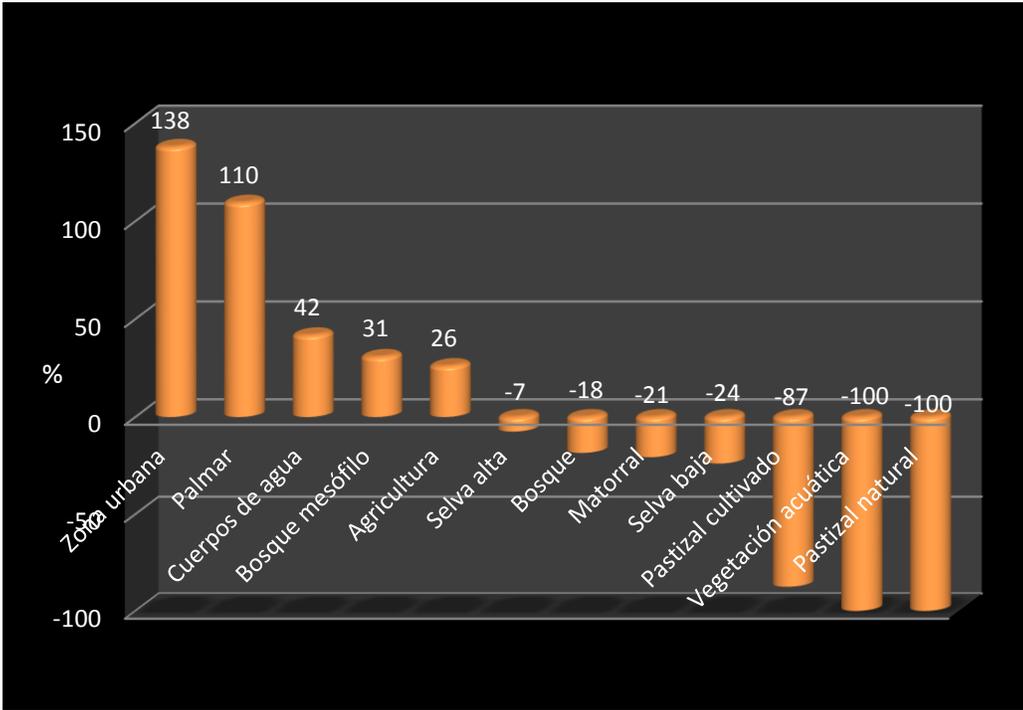


Figura 45. Porcentaje en pérdida o ganancia de las coberturas y usos de suelo para el año 2050

8.8 , MANDATOS OFICIALES DEL CAMBIO DE USO DE SUELO PARA EL ESTADO DE PUEBLA (SEMARNAT)

Para realizar una comparación y verificar al mismo tiempo el trabajo de investigación, en el Anexo 2, se visualiza una matriz de cambio de uso de suelo, para el periodo de 1976-2000. Estos datos oficiales muestran las tendencias del cambio de uso para cada una de las coberturas y usos de suelo para el estado de Puebla. Los datos registrado por SEMARNAT deducen una tasa de cambio con las mismas tendencias registradas en el trabajo de investigación, las tendencias que siguen el mismo régimen de cambio son: Agricultura, Pastizal Natural y Cultivado, Bosque y Bosque Mesófilo de Montaña, Cuerpos de Agua, Matorral y Zonas Urbanas.

IX. CONCLUSIONES

- Se realizó una clasificación de doce coberturas y usos del suelo en el estado de Puebla, de las cuales para el año 1990 cinco coberturas ocuparon el 94% (Agricultura 43%, Selva Baja 18.2%, Bosque 15.1%, Pastizal Cultivado 9.5% y Matorral 8.9%). Para el año 2001 igualmente fueron cinco coberturas que ocuparon el 90.6% (Agricultura 45.9%, Selva Baja 14.5%, Bosque 13.6%, Pastizal Cultivado 11% y Matorral 7.9%), y para el año 2012 sin ningún cambio alguno, las coberturas que dominaron el 92.3% de la superficie del estado de Puebla se mantuvieron (Agricultura 48.4%, Selva Baja 16%, Bosque 13.6%, Pastizal Cultivado 6.3% y Matorral 8%).
- El cambio absoluto del uso del suelo y vegetación permite distinguir los procesos de cambio de cobertura de una manera analítica y cuantitativa. Para los tres periodos la Agricultura fue el uso de suelo que mayor ganancia de superficie obtuvo (111,218 Ha, 84,602 Ha, 159,969 Ha), por el contrario la cobertura con mayor pérdida en superficie en el periodo 1990 fue la Selva Baja con -124,425 Ha, y en los otros dos periodos 2001-2012/1990-2012 sorpresivamente los Pastizales Cultivados registraron pérdidas de superficie (-159,969 Ha, -109,358 Ha)
- La matriz de transición nos permitió identificar las dinámicas y flujos de unas coberturas a otras, en las tres matrices para los periodos 1990-2001/2001-2012/1990-2012, todas y cada una de las coberturas su mayor porcentaje de pérdida fue con la Agricultura. En los tres periodos estudiados las coberturas con mayor ganancia en superficie fueron La Agricultura, Bosques, Pastizales Cultivados, Selva Baja. Pero de igual modo fueron las de mayor cambio hacia otras coberturas principalmente a usos productivos como Agricultura y Pastizales Cultivados.

- La matriz que mostro mayor estabilidad en dinámicas de cambios fue la del periodo 2001-2012, esto se puede adjudicar a la disminución de las deforestaciones a las grandes coberturas vegetales como los Bosques y la Selva Baja, la disminución de la ampliación de la frontera agrícola, y algunas políticas de protección a ecosistemas boscosos. Lo anteriormente expuesto se refleja en el periodo 2001-2012 por que fue el periodo con un promedio de áreas conservadas en un 70%, a diferencia de 1990-2001 con un promedio de 53% de superficies conservadas y 1990-2012 con un promedio de 44%.
- Las tasas de cambio para las coberturas y usos del suelo, permitieron cuantificar la cantidad de hectáreas que cambio o gano una cobertura en superficie, el promedio de las tasas obtenidas en los tres periodos indican que la mayor tasa de cambio 16% corresponde al Pastizal Natural, es decir aumento un 16% cada año durante 22 años, la tasa negativa más importante -25% la Vegetación Acuática prácticamente se extinguió estos 22 años, para las grandes coberturas vegetales naturales las tasas de igual manera fueron negativas, Bosques -0.6%, Selva Baja -0.8%, Matorral -0.7%, Selva Alta -0.2%, y las únicas vegetación natural con tasas positivas fueron Palmar 6%, Bosque Mesófilo de Montaña 1.2%, y finalmente las coberturas antropogénicas con tasas positivas Zonas Urbanas 10.4% y Agricultura 0.8%.
- El modelo de los procesos de cambio permitió identificar la cantidad de superficie por cada indicador y la dinámica entre coberturas. Los promedios para los tres periodos de los procesos de cambio, arrojó como resultado que el indicador Sin Cambio (entre usos productivos) con 1,244,928 Ha es el de mayor ocurrencia con un 37% en todo el territorio del estado de Puebla, el indicador Conservado ocupo un segundo lugar con 1,021,737 Ha (30%), la Revegetación en tercer lugar con 389,305 Ha (11%), seguido de la Deforestación con 274,666 Ha (8%) fueron los indicadores de mayor ocurrencia.

- En las tendencias a proyecciones para el año 2050, las tres matrices coinciden con superficies muy cercanas, en el aumento de la Agricultura (2,081,217 Ha año 2050), Zonas urbanas y Bosque Mesófilo de Montaña (128,977 Ha año 2050), coinciden en la disminución de los Bosques (378,174 Ha año 2050), Selva Baja (414,949 Ha año 2050), Matorral (216,077 Ha año 2050), y la pérdida total de la Vegetación Acuática (0 Ha año 2050).

X. LITERATURA CITADA

Arango M., Branch J., y Botero V. 2005, Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: "landsat – etm+" En: Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín.Vol.58, No.1.p.2611-2634.2005.

Alcántara, G. D. A. 2005. Deforestación-erosión-inestabilidad de laderas: Un enfoque de modelación geomorfológica. Tesis de Doctorado en Geografía UNAM.

Anaya, G. M., 1990. La desertificación, sus causas y consecuencias: medidas preventivas y correctivas para su control, Terra, Vol. 8: 1, 102-112 pp.

Berry, B.J.L. 1990. Urbanization. En: Meyer W.B. and Turner II B.L. (Eds.) Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 103-120.

Buol, W. S., Hole, D. F., McCracken, J. R., 1983. Génesis y Clasificación de Suelos, Edit. Trillas, México, 417 pp.

Burrough, P. y McDonnell, R. 2000. Principles of Geographical Information Systems Ed. Oxford.

Chrisman, N.R. 1997. Exploring Geographic Information Systems, John Wiley and Sons, New York.

CNA. 2003. Estadísticas del Agua en México, primera edición.

CONABIO. 2011. La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado. México. CONABIO, Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 440 pp.

Cotler, A. 2003. Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña. 153-161. En: Sánchez, O., Vega, E., Peters, E. y Monroy-Vilchis Editores. 2003.

Courboules, J., Manière, R. y Bouchon, C. 1988. Systèmes d'informations géocodées et télédetection à haute résolution. Exemple d'application aux côtes jordaniennes. *Oceanologie Acta* 11: 337-351.

Couturier S. y J.F. Mas. 2009. ¿Qué tan confiable es una tasa de deforestación? Cómo evaluar nuestros mapas con rigor estadístico. *Investigación ambiental* 1(2).

Crosby, A.W. 1986. *Ecological Imperialism: The Biological Expansion of Europe, 900-1900*. Cambridge University Press, Cambridge.

Farina, A. (1998). *Principles and methods in landscape ecology*. Chapman & Hall, London.

Forman, R.T.T. y Collinge, S.K. 1997. Nature conserved in changing landscapes with and without spatial planning. *Landscape and Urban Planning*. 37. [1]. 129-135.

Goodchild, M.F. (1994). Integrating GIS and Remote Sensing for Vegetation and Analysis and Modeling - Methodological Issues. *J. Veg. Sci.* 5. [5]. 615-626.

Jensen, J.R. 1996. *Introductory Digital image processing: a remote sensing perspective*. New Jersey: Prentice hall Series in Geographic Information Science. 2° Ed. 305 p.

Houghton, R.A. y Skole, D.L. (1990). Carbon. En: W.B. Meyer and B.L. Turner II, (Eds.) *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 393-408.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2000. *Síntesis Geográfica, Nomenclátor y Anexo Cartográfico del estado de Puebla*.

INEGI. 2006. *Continuo Nacional de Suelos. WRB2000*.

INEGI. 2010. Población del estado de Puebla. En: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/poblacion/distribucion.aspx?tema=me&e=21>, última consulta: enero 2012.

Isaac-Márquez, De Jong y Ochoa-Gaona. 2005. Estrategias productivas campesinas: Un análisis de los factores condicionantes del uso del suelo en el oriente de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*. 2142: 56-72

Iturrate, E. 1998. Curso básico de teledetección con ENVI, ESTUDIO ATLAS S.L.

Teledetección (En línea). Consultado 20 de mayo 2006

Lambin, E.F., Baulies, X., Bockstael, N., Fischer, G., Krug, T., Leemans, R., Moran, E., Rindfuss, R.R., Sato, Y., Skole, D.L., Turner II, B.L., y Vogel, C. (1999). Land Use and Land-cover Change (LUCC): Implementation strategy, Rep. No. 48 and IHDP Report No. 10, Stockholm.

Lambin, E. F., B. L. Turner II, H. Geist, S. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruce, O. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. F. Moran, M. Mortimore, P. S. Ramakrishnan, J. F. Richards, H. Skånes, W. Stffen, G. D. Stone, U. Svedin, T. Veldkamp, C. Vogel y J. Xu. 2001. The Causes of Land-Use and -Cover Change: Moving beyond the Myths. *Global Environmental Change* 11: 261-269.

Lillesland, Thomas M. & Kiefer, Ralph W. 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons. P. 567.

Lilliesand, M.T.; Kiefer, W.R. 1994 *Remoting sensing and image interpretation*, third edition, by John Wiley and Sons. Wisconsin, EUA. 750 pag.

Luque, S.S., Lathrop, R.G. y Bogнар, J.A. 1994. Temporal and Spatial Changes in an Area of the New Jersey Pine Barrens Landscape. *Landscape. Ecol.* 9. [4]. 287-300.

Mas J.F. y S. Couturier, en prensa, Evaluación de bases de datos cartográficas, en *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*, INE-UNAM, México.

McKnight, T.L., Hess, D. 2000. *Climate Zones and Types: The Köppen System*. *Physical Geography: A Landscape Appreciation*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, pp 200.

Mertens, B., W. D. Sunderlin, O. Ndoye and E. Lambin. 2000. "Impact of macroeconomic change on deforestation in South Cameroon: integration of household survey and remotely-sensed data", *World Development*, 28, 6, pp. 983-999.

Meyer, W.B. y Turner II B.L. (1992). Human Population Growth and Global Land-Use/Cover Change. *Annual Reviews in Ecology and Systematics* 23: 39-61.

Murillo, J.M. y Castaño, S. (2003). Gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas en un sistema de explotación costero. Aplicación a la Marina Baja de Alicante. Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos. IGME. Madrid. pp. 477-487

Pérez G., C. y Muñoz L., A. 2006. Teledetección: Nociones y Aplicaciones. Eds. Los autores. 3 ed. España, Universidad de Salamanca. 359 p.

Ojima, D. S., Galvin, K. y Turner II, B. L. 1994. The global impact of land use changell. Bioscience. 44 5: 300-304.

ONU. 2007. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe sobre Desarrollo Humano 2006-2007. Mundi Prensa. México. 216 pp.

Ornelas-Delgado, J. 2004. Una aproximación a la economía poblana. Pp. 9-38. En: Ornelas-Delgado, J. (Coordinador). Visión de Puebla. Colección Pensamiento Económico. BUAP. México.

Palacio, et. Al. 2004. Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio. Indicadores del subsistema natural. UNAM, SEDESOL, SEMARNAT, INE. Primera Edición México.

Peña, J. (2006). Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Gestión del Territorio. Entrada, manejo, análisis y salida de datos espaciales. Teoría general y práctica para ESRI ArcGIS 9. Editorial Club Universitario. Alicante. 310 pp.

Pineda, J. J. B. Sendra, M. Gómez y W. Plata. 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestaciónII. Investigaciones Geográficas. 69: 33-52

Restrepo, A. 2005. Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental. Fondo Editorial Universidad EAFIT. 267 pp.

Richards, J.F. (1990). Land transformation. En: Turner II B.L., Clark W.C., Kates R.W., Richards J.F., Mathews J.T. and Meyer W. (Eds.) The earth as transformed by human action. Cambridge University Press. Cambridge: 163-178.

Sarria, F. A. 2006. SIG y Teledetección (en línea). Consultado el 2 de Oct. de 2009. Disponible en <http://ceagi.org/portal/files/recursos/tema04.pdf>

Rosete, F., J. L., Pérez y G. Bocco. 2009. Contribución al análisis del cambio de uso del suelo y vegetación 1978-2000 en la Península de Baja California, México. *Investigación ambiental*. 11: 70-82

Ruttan, V. (1994). *Agriculture, Environment and Health: Towards Sustainable Development Into the 21st Century*. University of Minnesota Press, Minneapolis.

Sánchez Colón, S., A. Flores Martínez, I. A. Cruz-Leyva y A. Velázquez. 2008. Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. II Estudio de país. CONABIO, México

Sánchez, S. 1980. Estudios edafológicos de suelos cafetaleros en la zona volcánica del municipio de Hueytamalco, estado de Puebla. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM.

Sobrino, J. A.; Raissouni, N. y Kerr, N. 2000. *Teledetección*. Ed. JA Sobrino. Ed. Ilustrada. España, Universidad de Valencia. 468 p.

Terradas, J. (2001). *Ecología de la vegetación. De la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes*. Ediciones Omega, Barcelona.

Valera, M. A. 1993. *Fisicoquímica y Mineralogía de Andosoles de la región de Teziutlán, estado de Puebla*. Tesis de Maestría en Edafología, UNAM.

Velázquez, A. 2008. La dinámica de la cubierta forestal de México. Página de la Sociedad Mexicana de Física (<http://www.smf.mx/C-Global/webCubFor.htm>).

Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco y J.M. Melillo 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277: 494-499.

Werner, G. (Ed). 1978. *Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores*. Fundación Alemana para la Investigación Científica, México (Complemento Comunicaciones Proyectos Puebla-Tlaxcala 6).

Wolman, M.G. y Fournier, F.G.A. (1987). Land Transformation in Agriculture. Wiley, Chichester.

WRB, 2000. Base Referencial Mundial del recurso Suelo. Manual de Clasificación de Suelos.

XI ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica de una imagen satelital Landsat Pat 25 – Row 46

Data Set Attribute	Attribute Value	Data Set Attribute	Attribute Value	Data Set Attribute	Attribute Value	Data Set Attribute	Attribute Value
Landsat Scene Identifier	LT5025046 1986027AA A10	Quality Band 7	9	Corner LR Latitude Product	19.28514 (19°17'06.50"N)	Center Latitude	20°14'18.35 "N
Spacecraft Identifier	LANDSAT_5	Cloud Cover Quad Lower Right	10	Reflective Lines	6891	Center Longitude	97°15'54.97 "W
Sensor Mode	N/A	Sun Elevation	38.1041095	Reflective Samples	7701	NW Corner Lat	21°09'28.69 "N
Station Identifier	AAA	Sun Azimuth	135.796237	Thermal Lines	6891	NW Corner Long	97°57'36.14 "W
Day/Night	DAY	Browse Exists	Yes	Thermal Samples	7701	NE Corner Lat	20°54'08.14 "N
WRS Path	25	Data Category	NOMINAL	Ground Control Points Model	104	NE Corner Long	96°12'04.86 "W
WRS Row	46	Map Projection LORa	NA	Geometric RMSE Model	5.082	SE Corner Lat	19°18'56.20 "N
WRS Type	2	Data Type LORp	TMR_LORP	Geometric RMSE Model X	3.875	SE Corner Long	96°34'45.23 "W
Date Acquired	27/01/1986	Data Type Level 1	PROCESSING REQUIRED	Geometric RMSE Model Y	3.288	SW Corner Lat	19°34'07.72 "N
Start Time	1986:027:16:20:19.55881	Elevation Source	GLS2000	Ground Control Points Verify	1615	SW Corner Long	98°19'14.41 "W
Stop Time	1986:027:16:20:46.19244	Output Format	GEOTIFF	Geometric RMSE Verify	0.295	Center Latitude dec	20.23843
Sensor Anomalies	N	Ephemeris Type	DEFINITIVE	Map Projection Level 1	UTM	Center Longitude dec	-97.26527
Acquisition Quality	9	Corner UL Latitude Product	21.17366 (21°10'25.18"N)	Datum	WGS84	NW Corner Lat dec	21.15797
Quality Band 1	9	Corner UL Longitude Product	-98.36326 (98°21'47.74"S)	Ellipsoid	WGS84	NW Corner Long dec	-97.96004
Quality Band 2	9	Corner UR Latitude Product	21.15067 (21°09'02.41"N)	UTM Zone	14	NE Corner Lat dec	20.90226
Quality Band 3	9	Corner UR Longitude Product	-96.13932 (96°08'21.55"S)	Grid Cell Size Reflective	30	NE Corner Long dec	-96.20135
Quality Band 4	9	Corner LR Longitude Product	-96.17325 (96°10'23.70"S)	Grid Cell Size Thermal	30	SE Corner Lat dec	19.31561
Quality Band 5	9	Corner LL Latitude Product	19.30594 (19°18'21.38"N)	Orientation	NORTH_UP	SE Corner Long dec	-96.57923
Quality Band 6	9	Corner LL Longitude Product	-98.37082 (98°22'14.95"W)	Resampling Option	CUBIC_CONVOLUTION	SW Corner Lat dec	19.56881

Anexo 2. Cambio porcentual de la vegetación y uso del suelo 1976-2000, nacional y estatal.

Disminución Equilibrio Aumento

Estado	Superficie total (km ²)	Bosque				Selva		Mezquital	Matorral xerófilo	Vegetación hidrófila	Otros tipos de vegetación	Área sin vegetación aparente	Pastizal		Agricultura		Plantación forestal	Asentamiento humano	Cuerpo de agua	Sin información
		De coníferas	De coníferas y latifoliadas	De latifoliadas	Meσόfίlo de montaña	Perennifolia y subperennifolia	Caducifolia y subcaducifolia						Natural	Inducido y cultivado	De temporal	De riego y humedad				
Nacional	1,950,764	-0.32	-0.33	-0.47	-0.06	-1.41	-2.23	-0.38	-2.19	-0.11	0.26	0.13	-1.00	4.19	2.10	1.19	-0.01	0.52	-0.52	0.53
Aguascalientes	5,569	-0.36	-0.04	-1.42	0.00	0.00	-0.41	-0.05	-2.21	0.00	0.00	0.00	-1.73	4.16	-1.15	1.54	0.00	1.46	0.20	0.00
Baja California	71,895	0.00	0.24	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.93	-0.05	0.15	0.46	0.01	0.29	0.56	0.20	0.00	0.60	0.24	-0.04
Baja California Sur	73,308	0.00	0.02	0.69	0.00	0.00	-0.83	0.58	-1.20	-0.05	-0.36	-0.16	0.00	0.30	-0.03	0.61	0.00	0.17	-2.88	3.24
Campeche	57,478	0.00	0.00	0.00	0.00	-10.51	1.86	0.00	0.00	-0.86	0.11	0.09	-0.03	6.15	1.37	1.50	0.00	0.22	-3.40	3.49
Coahuila	150,527	0.10	0.22	0.10	0.00	0.00	0.00	-0.17	-3.76	-0.01	0.66	0.26	-0.46	2.06	0.53	0.17	0.00	0.27	0.03	-0.02
Colima	5,600	0.01	-0.56	-0.46	0.05	0.00	-7.52	0.00	0.00	-1.09	-0.55	0.10	0.02	3.64	0.13	4.48	0.00	1.39	0.37	0.00
Chiapas	73,983	-0.65	-1.12	-0.53	-0.61	-7.89	-2.49	0.00	-0.02	-0.22	0.03	0.07	0.00	5.96	5.57	0.63	0.00	0.36	-0.14	0.83
Chihuahua	247,049	-0.71	-1.42	-0.27	0.00	0.00	-0.15	-0.02	-1.89	-0.02	1.75	0.12	-4.16	4.66	0.57	1.07	0.00	0.26	0.22	-0.02
Distrito Federal	1,477	0.28	0.70	-1.59	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.59	0.00	0.17	-0.09	0.28	-6.57	-5.92	1.28	-0.99	12.90	0.15	0.00
Durango	122,131	-1.61	-0.97	-0.28	0.00	0.00	-0.44	-0.09	-0.96	-0.03	0.17	0.14	-2.99	5.49	0.92	0.44	0.00	0.21	-0.02	0.00
Guanajuato	30,351	-0.29	0.08	-0.57	0.00	0.00	-0.52	-0.56	0.08	-0.02	-0.03	0.03	-1.25	3.01	-3.55	2.34	-0.01	0.97	0.28	0.00
Guerrero	63,586	-0.42	-0.97	-1.23	-0.09	0.00	-9.27	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.02	0.00	6.77	4.01	0.72	0.00	0.33	0.12	0.06
Hidalgo	20,689	-2.16	0.08	-2.24	-1.67	-2.18	-0.10	-0.05	-6.35	0.00	0.00	0.01	0.00	2.93	8.22	2.40	0.00	0.80	0.31	0.00
Jalisco	77,998	-0.01	-0.42	-2.68	-0.08	0.00	-4.21	-0.03	-0.02	-0.02	0.04	0.03	-1.97	3.94	3.21	1.79	0.00	0.75	-0.21	-0.02
México	22,210	-0.56	-0.74	-2.23	-0.05	0.00	-1.02	0.00	-0.35	-0.21	-0.15	0.03	-0.06	-1.50	2.72	1.28	-0.08	2.86	0.05	0.00
Michoacán	58,371	-1.76	-0.26	-1.34	0.00	0.00	-5.27	0.00	-0.01	-0.03	-0.09	-0.01	0.03	3.76	2.52	1.51	-0.02	0.79	0.17	0.02
Morelos	4,875	0.08	0.05	-0.83	-0.05	0.00	-6.23	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.05	-2.52	3.20	3.16	0.00	3.17	0.03	0.00
Nayarit	27,586	-0.04	-1.73	-2.66	0.08	0.00	-5.32	0.00	0.00	-0.16	-0.35	0.00	-0.02	3.96	2.50	3.10	0.00	0.51	-0.42	0.55
Nuevo León	63,605	0.48	0.07	-0.13	0.00	0.00	0.00	-2.84	-11.98	-0.04	-0.41	0.01	-0.06	10.30	3.19	0.55	0.02	0.70	0.14	0.00
Oaxaca	93,543	-0.76	0.88	-1.15	-0.17	-1.45	-2.30	0.01	-0.12	-0.02	-0.05	0.11	0.18	1.52	2.53	0.16	0.00	0.41	-0.92	-1.14
Puebla	34,095	-0.37	-0.30	-0.54	0.44	-0.78	-2.17	-0.03	-0.71	-0.01	-0.37	0.06	-0.02	-0.69	3.07	1.03	-0.01	1.18	0.21	0.00
Querétaro	11,559	-0.61	-0.14	-0.83	-0.08	-0.25	-4.74	-0.01	-0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	3.50	1.07	0.02	1.17	0.18	0.00
Quintana Roo	42,787	0.00	0.00	0.00	0.00	-13.35	1.47	0.00	0.00	0.80	0.25	0.11	0.00	6.50	2.56	1.21	0.00	0.46	-0.29	0.30
San Luis Potosí	60,528	0.01	0.07	-0.11	0.00	-2.19	-1.71	-0.27	-4.02	-0.05	0.44	0.01	0.03	3.53	2.50	1.06	-0.06	0.58	0.18	0.00
Sinaloa	55,769	-0.01	0.19	-0.46	0.00	0.00	-5.25	-0.10	-1.46	-0.03	-0.52	0.23	0.00	1.06	2.40	3.26	0.01	0.80	-2.57	2.41
Sonora	179,765	0.05	-0.10	-0.27	0.00	0.00	-1.75	-1.87	-2.82	0.02	0.00	0.63	-0.47	5.19	0.37	0.81	-0.02	0.27	-0.21	0.19
Tabasco	24,713	0.00	0.00	-0.18	0.00	-7.06	-0.01	0.00	0.00	-2.81	-0.04	0.03	0.00	4.75	4.27	0.49	0.00	0.52	-2.61	2.64
Tamaulipas	79,333	0.03	0.01	0.04	0.01	-0.01	-7.07	-2.23	-7.71	-0.06	0.01	-0.16	-0.02	9.06	1.19	6.47	0.00	0.74	-3.16	2.86
Tlaxcala	3,971	-0.58	-0.36	-1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.31	-0.01	0.02	-0.07	0.00	0.48	1.07	1.08	-0.06	0.93	0.06	0.00
Veracruz	71,493	0.01	-0.04	-0.56	-0.27	-6.97	-2.10	0.00	-0.01	-0.53	0.02	0.03	-0.01	2.61	5.59	1.04	0.00	0.83	-1.47	1.82
Yucatán	39,336	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	-22.91	0.00	0.00	-0.63	0.11	-0.17	0.00	10.66	11.08	0.53	-0.01	0.90	-0.07	0.12
Zacatecas	74,618	0.28	-0.54	-0.15	0.00	0.00	-0.30	-0.14	-5.55	0.00	0.29	0.02	-3.02	3.86	4.02	0.80	0.00	0.37	0.07	0.00