



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

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

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**Estimación de la captura de carbono empleando herramientas de análisis espacial
en las zonas forestales de la cuenca de Cuitzeo**

TESIS

Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Presenta el:

Ing. Gabriel Pérez Juárez

Director de Tesis:

Dr. Juan Manuel Ortega Rodríguez

Codirector de Tesis:

Dr. José Arnulfo Blanco García

Morelia, Michoacán, Febrero del 2016

AGRADECIMIENTOS.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por permitir mediante la beca proporcionada, continuar con mi desarrollo profesional.

Al Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Al Dr. Juan Manuel Ortega Rodríguez por su amistad y apoyo brindado, así como sus consejos, confianza y paciencia.

Al Dr. José Arnulfo Blanco García por su apoyo, comentarios y sugerencias para la elaboración del presente trabajo.

A los Doctores Julio César Orantes Ávalos, Alfredo Amador García y al M. en C. Juan Carlos González Cortés por su ayuda y orientación para la elaboración del presente trabajo.

Al laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la Facultad de Biología de la UMSNH.

A la Gerencia de Inventario Forestal y Geomática de la CONAFOR, así como al Departamento de Inventario y Cartografía de la COFOM, por su apoyo con información y asesoría para la elaboración del presente trabajo.

A todos mis compañeros por su amistad y apoyo.

DEDICATORIA.

A Dios por haberme concedido tantas vivencias y aprendizajes.

A todos los integrantes de mi familia, en especial a:

Mi madre Ma. de Lourdes Juárez Mercado,

Mi padre Roberto Pérez Medrano,

Mis hermanos Atzimba Pérez Juárez,

León Roberto Pérez Juárez y

José Francisco Pérez Juárez

...realmente los quiero y admiro.

A todas las personas que me han regalado palabras de aliento y que confían en mí.

A las incondicionales amistades que he cultivado, por tantas alegrías y sinsabores.

Con mucho aprecio, Gabriel.

ÍNDICE.

	Pág.
ÍNDICE	1
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE CUADROS	7
NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS	9
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN GENERAL	14
CAPÍTULO I. ANÁLISIS DE CAMBIO DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN EN LA CUENCA DE CUITZEO DURANTE EL PERIODO 2001-2014	16
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. OBJETIVOS.....	19
1.1.1. General.....	19
1.1.2. Particulares.....	19
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	20
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1. Cambio de uso del suelo y vegetación.....	21
2.1.1. Tasa de cambio de uso de suelo.....	21
2.2. Impactos ambientales derivados del proceso de deforestación y cambio de uso de suelo en los recursos forestales.....	22
2.3. Empleo de la percepción remota y SIG en el estudio de cambio de uso y vegetación.....	24
2.3.1. La escala en los sistemas de información geográfica.....	26
2.4. Imágenes de satélite.....	27
2.4.1. Imágenes Landsat.....	28
2.5. Interpretación de uso del suelo y cobertura de la tierra.....	29
2.6. Interpretación visual.....	30
2.6.1. Criterios visuales para la interpretación visual.....	31
2.6.2. Elementos del análisis visual.....	34
2.7. Validación de la clasificación de imágenes.....	35
2.7.1. Matriz de confusión.....	35
2.8. Aplicación de la Teledetección y SIG para analizar cambios sucesionales.....	36
2.8.1. Cadenas de Markov.....	36

3. ANTECEDENTES	37
4. METODOLOGÍA	41
4.1. Descripción del área de estudio.....	41
4.1.1. Localización geográfica.....	41
4.1.2. Fisiografía.....	43
4.1.3. Geología.....	44
4.1.4. Clima.....	46
4.1.5. Suelos.....	46
4.1.6. Hidrología.....	49
4.1.7. Vegetación.....	49
4.1.8. Áreas naturales protegidas.....	52
4.2. Características socioeconómicas.....	53
4.2.1. Población.....	53
4.2.2. Actividades económicas.....	54
4.3. Imágenes satelitales empleadas.....	54
4.3.1. Delimitación del área de estudio.....	55
4.4. Procesamiento de las imágenes satelitales Landsat.....	55
4.4.1. Conversión al formato compatible con Idrisi.....	55
4.4.2. Generación de mosaicos.....	56
4.4.3. Generación de compuestos en falso color y mejoramiento de la resolución.....	56
4.4.4. Recorte de imágenes.....	56
4.5. Proceso del análisis de cambio de uso del suelo y vegetación.....	57
4.5.1. Identificación y digitalización de usos del suelo y vegetación de las imágenes del 2014.....	57
4.5.2. Descripción de usos del suelo y vegetación identificados.....	58
4.5.2.1. Usos del suelo.....	58
4.5.2.2. Vegetación.....	59
4.5.3. Validación de la clasificación del año 2014.....	62
4.5.4. Interpretación visual y digitalización de uso del suelo y vegetación de las imágenes del 2001.....	63
4.5.5. Análisis de cambio de uso de suelo y vegetación mediante SIG....	63
4.5.6. Determinación de la tasa de cambio anual.....	63
4.6. Análisis de probabilidad de transición.....	64
5. RESULTADOS	65
5.1. Clasificación y validación de la imagen satelital del año 2014.....	65
5.2. Clasificación de la imagen satelital del 2001.....	67

5.3. Cambios netos durante el periodo 2001-2014.....	71
5.4. Tasa de cambio durante el periodo 2001-2014.....	72
5.4.1. Persistencias y contribuciones de cambio.....	72
5.4.2. Tasa de cambio anual.....	74
5.5. Matriz de probabilidad de cambio.....	77
6. CONCLUSIONES.....	80

CAPÍTULO II. ESTIMACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO EMPLEANDO HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESPACIAL EN LAS ÁREAS FORESTALES DE LA CUENCA DE CUITZEO..... 81

1. INTRODUCCIÓN..... 82

1.1. OBJETIVOS..... 84

 1.1.1 General..... 84

 1.1.2. Particulares..... 84

1.2. HIPÓTESIS..... 85

1.3. JUSTIFICACIÓN..... 86

2. MARCO TEÓRICO..... 87

2.1. Ciclo del carbono..... 87

 2.1.1. Flujos de carbono..... 87

2.2. El efecto invernadero..... 89

 2.2.1. Descripción del efecto invernadero..... 89

 2.2.2. Gases de efecto invernadero (GEI)..... 90

2.3. El dióxido de carbono en la atmosfera..... 91

2.4. Fijación del carbono por medio de la fotosíntesis..... 93

2.5. Sumideros de carbono en áreas forestales..... 93

2.6. Metodologías para la estimación de biomasa y captura de carbono... 95

 2.6.1. Metodologías para estimar la biomasa..... 95

 2.6.1.1. Uso de modelos de biomasa por especie..... 95

 2.6.1.2. Uso de modelos generales..... 96

 2.6.1.3. Construcción de modelos o tablas por especie..... 96

 2.6.1.4. Uso de tablas de rendimiento estándar..... 96

 2.6.1.5. La técnica del árbol promedio..... 97

 2.6.1.6. Método de modelado con SIG..... 97

 2.6.2. Metodologías para estimar la captura de carbono..... 98

 2.6.2.1. Estimación de carbono basado en un inventario forestal..... 98

 2.6.2.2. El modelo de fijación de carbono CO2FIX..... 99

 2.6.2.3. Técnicas de mapeo de carbono..... 99

2.7. Alometría.....	100
3. ANTECEDENTES.....	101
4. METODOLOGÍA.....	105
4.1. Información de campo.....	106
4.2. Determinación del volumen de los árboles.....	108
4.3. Determinación de la biomasa y carbono arbóreo aéreo.....	108
4.4. Determinación de ecuaciones alométricas.....	109
4.5. Obtención de modelos de correlación y mapas de captura de carbono.....	110
4.5.1. Imágenes satelitales empleadas.....	110
4.5.2. Obtención de los índices de vegetación (NDVI y SAVI).....	110
4.5.3. Modelos de regresión.....	111
4.5.4. Generación de mapas de captura de carbono.....	113
4.5.4.1. Determinación de clases de los mapas de captura de carbono.....	113
5. RESULTADOS.....	114
5.1. Información dasométrica del área de estudio.....	114
5.2. Ecuaciones alométricas.....	119
5.2.1. Volumen, biomasa y contenido de carbono por género.....	119
5.2.2. Comparativo de modelos.....	120
5.3. Mapas de captura de carbono.....	123
5.3.1. Volumen, biomasa y contenido de carbono en conglomerados....	123
5.3.2. Índices de vegetación NDVI y SAVI.....	125
5.3.3. Información espectral en los conglomerados de muestreo.....	128
5.3.4. Modelos de regresión.....	128
5.3.5. Mapas de captura de carbono.....	133
6. CONCLUSIONES.....	139
RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL.....	140
CONCLUSIONES GENERALES.....	147
REFERENCIAS.....	148
ANEXOS.....	i
Anexo 1. Fórmulas para calcular estadísticos de la matriz de confusión....	i
Anexo 2. Modelos alométricos para calcular volúmenes.....	i
Anexo 3. Densidad de especies de maderas.....	ii
Anexo 4. Ubicación geográfica de los conglomerados de muestreo.....	iii

ÍNDICE DE FIGURAS.

	Pág.
Figura 1. Tipos de vegetación de México.....	23
Figura 2. Rangos del espectro electromagnético empleadas en percepción remota.....	25
Figura 3. Localización geográfica de la cuenca de Cuitzeo.....	42
Figura 4. Geología de la cuenca de Cuitzeo.....	45
Figura 5. Tipos de clima de la cuenca de Cuitzeo.....	47
Figura 6. Tipos de suelo de la cuenca de Cuitzeo.....	48
Figura 7. Hidrología de la cuenca de Cuitzeo.....	50
Figura 8. Uso de suelo y vegetación de la cuenca de Cuitzeo.....	51
Figura 9. Porcentajes de superficies en la clasificación del año 2014.....	66
Figura 10. Porcentajes de superficies en la clasificación del año 2001.....	68
Figura 11. Usos del suelo y vegetación del año 2014.....	69
Figura 12. Usos del suelo y vegetación del año 2001.....	70
Figura 13. Comparativo de superficies en el periodo 2001-2014.....	72
Figura 14. Tasa de cambio por categoría (%) en el periodo 2001-2014.....	74
Figura 15. Ciclo del carbono.....	88
Figura 16. Efecto invernadero.....	90
Figura 17. Porcentaje de emisiones de los GEI.....	91
Figura 18. Variación en la concentración de CO ₂ atmosférico.....	92
Figura 19. Reservorios de carbono que conforman un bosque.....	94
Figura 20. Diagrama de flujo de la metodología empleada.....	106
Figura 21. Diseños de los conglomerados de muestreo.....	107
Figura 22. Conglomerados y sitios dentro de la cuenca de Cuitzeo.....	115
Figura 23. Categorías diamétricas de 5 géneros de la cuenca de Cuitzeo..	118
Figura 24. Curvas de ajuste para estimar el contenido de carbono en 4 géneros mediante el modelo alométrico de potencia.....	120
Figura 25. Diagrama de caja del contenido de carbono en los conglomerados.....	124
Figura 26. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de la cuenca de Cuitzeo.....	126
Figura 27. Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) de la cuenca de Cuitzeo.....	127

Figura 28. Gráfica de regresión lineal del NDVI.....	130
Figura 29. Gráficas de residuos del modelo de regresión con NDVI.....	130
Figura 30. Gráfica de regresión lineal del SAVI.....	132
Figura 31. Gráficas de residuos del modelo de regresión con SAVI.....	132
Figura 32. Mapa de captura de carbono empleando el NDVI.....	134
Figura 33. Mapa de captura de carbono empleando el SAVI.....	135
Figura 34. Clasificación del mapa de carbono empleando NDVI.....	136
Figura 35. Clasificación del mapa de carbono empleando SAVI.....	136
Figura 36. Mapa de captura de carbono hecho con NDVI y tipos de vegetación.....	141
Figura 37. Mapa de captura de carbono hecho con SAVI y tipos de vegetación.....	142

ÍNDICE DE CUADROS.

	Pág.
Cuadro 1. Resolución de algunos sensores remotos.....	27
Cuadro 2. Características técnicas de imágenes Landsat 7 y 8.....	29
Cuadro 3. Superficie de los Municipios que conforman la cuenca de Cuitzeo.....	43
Cuadro 4. Áreas naturales protegidas estatales de la cuenca de Cuitzeo.....	53
Cuadro 5. Información de las imágenes satelitales empleadas.....	55
Cuadro 6. Clasificación de uso de suelo y vegetación del año 2014.....	58
Cuadro 7. Matriz de confusión.....	67
Cuadro 8. Cambios netos en la cuenca de Cuitzeo periodo 2001-2014.....	71
Cuadro 9. Matriz de cambio de uso de suelo y vegetación periodo 2001-2014.....	73
Cuadro 10. Tasa de cambio anual por categoría.....	75
Cuadro 11. Comparación de resultados con otros estudios.....	77
Cuadro 12. Probabilidad de transición por categoría.....	79
Cuadro 13. Modelos alométricos empleados.....	110
Cuadro 14. Especies inventariadas en el re-muestreo 2012 en la cuenca de Cuitzeo.....	116
Cuadro 15. Información dasométrica de los géneros forestales inventariados en la cuenca de Cuitzeo.....	117
Cuadro 16. Categorías diamétricas y número de árboles de los géneros forestales representativos en la cuenca de Cuitzeo.....	118
Cuadro 17. Volumen, biomasa y contenido de carbono en los géneros forestales inventariados en la cuenca de Cuitzeo.....	119
Cuadro 18. Comparativo de los 4 modelos alométricos.....	121
Cuadro 19. Coeficiente de determinación (R^2) y modelos alométricos de potencia para la estimación del contenido de carbono en árboles individuales por género en la cuenca de Cuitzeo.....	122
Cuadro 20. Volumen, biomasa y contenido de carbono en los conglomerados de muestreo de la cuenca de Cuitzeo.....	123
Cuadro 21. Resumen de estadísticas de contenido de carbono en los conglomerados.....	125
Cuadro 22. Resumen de estadísticas de reflectancia del NDVI y SAVI en los conglomerados.....	128
Cuadro 23. Indicadores de validación de los modelos de regresión.....	133
Cuadro 24. Estimación de carbono arbóreo aéreo promedio por tipo de vegetación en la cuenca de Cuitzeo.....	143

Cuadro 25. Estimación de carbono arbóreo aéreo perdido por tipo de vegetación en la cuenca de Cuitzeo en el periodo 2001-2014.....	145
Cuadro 26. Comparativo del potencial de captura de carbono arbóreo aéreo con otros estudios.....	146

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS.

Abreviatura	Significado	Unidades
A	Agricultura	
AC	Altura comercial	(m)
AD	Área descubierta	
ANP	Área Natural Protegida	
ASNM	Altura sobre el nivel del mar	(m)
AT	Altura total	(m)
AU	Área urbana	
b	Ordenada al origen	
BA	Bosque de oyamel	
BC	Bosque cultivado	
BM	Bosque mesófilo de montaña	
BP	Bosque de pino	
BPQ	Bosque de pino-encino	
BQ	Bosque de encino	
B _{ta}	Biomasa aérea total	(t árbol ⁻¹)
C	Contenido de carbono	(t)
C ₆ H ₁₂ O ₆	Glucosa	
CA	Cuerpo de agua	
CH ₄	Metano	
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	
CO ₂	Dióxido de carbono	
COFOM	Comisión Forestal del Estado de Michoacán	
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal	
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas	
DAP	Diámetro a la altura del pecho	(m)
DC	Diámetro de copa	(m)
ERTS	Earth Resources Technology Satellites	
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus	
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación	
FEB	Factor de expansión de biomasa	
FOMEX	Forestaciones operativas de México	
GE	Gravedad específica o densidad de la madera	(kg m ⁻³)
GEI	Gases de efecto invernadero	
H ₂ O	Agua	
ha	Hectárea	

INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía	
INFyS	Inventario Nacional Forestal y de Suelos	
IRC	Banda de infrarrojo cercano	
k ó a	Pendiente de la línea de regresión	
k-nn	Kaésimo vecino más cercano	
L	Factor de ajuste al suelo	
Landsat	Serie de satélites construidos y puestos en órbita por USA, para la observación en alta resolución de la superficie terrestre	
<i>m</i>	Biomasa del árbol	(kg)
MSS	Multispectral Scanner Sensor	
N	Diferencia de años entre una fecha y otra	
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de USA	
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada	
NO ₂	Óxido nitroso	
P	Pastizal	
PICC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático	
PNB	Producción neta del bioma	(PgC año ⁻¹)
PNE	Producción neta del ecosistema	(PgC año ⁻¹)
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente	
PPB	Producción primaria bruta	(PgC año ⁻¹)
PPN	Producción primaria neta	(PgC año ⁻¹)
R	Banda de rojo	
R ²	Coeficiente de determinación	
Ra	Respiración autotrófica	
REDD+	Reducción de Emisiones derivadas de la Deforestación y Degradación de los bosques	
Rh	Respiración heterótrofa	
RMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio	
SAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo	
SBC	Selva baja caducifolia	
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales	
SIG	Sistema de Información Geográfica	
SUMA	Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente	
S ₁	Superficie de la clase en la fecha 1	(ha)
S ₂	Superficie de la clase en la fecha 2	(ha)
t	Tonelada	
t ha ⁻¹	Tonelada por hectárea	

T _c	Tasa de cambio anual	(%)
TM	Thematic Mapper	
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México	
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos	
UTM	Sistema de coordenadas "universal transversal de Mercator"	
V	Volumen de la madera	(m ³)
VA	Vegetación acuática	
V _f	Volumen del fuste	(m ³)
VTA	Volumen total árbol	(m ³)
ρ	Densidad de la madera	(kg m ⁻³)
°C	Grado centígrado	

RESUMEN.

En las últimas décadas en México se ha observado un acelerado incremento demográfico, el cual ha provocado un deterioro significativo de la cobertura vegetal y los servicios ambientales que ésta proporciona. Para poder planificar el uso de los recursos como base para el desarrollo regional es necesario su monitoreo, para lo cual la percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG) son una excelente herramienta. En el presente trabajo, se realizó un proceso de interpretación visual para determinar el uso de suelo y vegetación en la cuenca de Cuitzeo, empleando imágenes de los años 2001 y 2014, con éstas imágenes se realizó un análisis cambio de uso y cobertura bitemporal con ayuda de un SIG. Por otro lado, se generaron mapas de captura de carbono arbóreo aéreo, el cual fue estimado por medio de regresiones lineales simples, correlacionando los datos espectrales de los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y ajustado al suelo (SAVI) con el carbono arbóreo aéreo que se obtuvo a partir de la información del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFiS). Lo anterior, con la finalidad de estimar los reservorios de carbono arbóreo aéreo en los diferentes tipos de vegetación y su pérdida durante este periodo. Primeramente, se encontró que las coberturas de bosque de encino, selva baja caducifolia y bosque cultivado fueron deforestadas a una tasa de -0.48%, -0.43% y -0.46% por año respectivamente, con menor grado de deforestación está el bosque de pino, bosque de pino-encino y el bosque de oyamel con -0.09%, -0.08% y -0.02% por año respectivamente. En cuanto a las regresiones lineales, se obtuvieron dos modelos de correlación, para el NDVI fue $C = -104.9 + 480.37NDVI$, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.70 y una raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) de 14.8, para el caso de SAVI el modelo fue $C = -74.23 + 663.04SAVI$ con un R^2 de 0.71 y un RMSE de 13.78, lo cual indica una alta correlación en ambos casos, aunque el modelo que genera mayor certeza estadística al momento de generar los mapas es SAVI. Por último, en cuanto a los contenidos de carbono promedio, se obtuvo que el bosque de oyamel tiene un promedio de carbono de 53.9 t ha^{-1} y 49.05 t ha^{-1} , el bosque de pino 54.6 t ha^{-1} y 52.47 t ha^{-1} , el bosque de encino 29.08 t ha^{-1} y 27.95 t ha^{-1} , el bosque de pino-encino 43.19 t ha^{-1} y 42.68 t ha^{-1} , el bosque mesófilo 58.3 t ha^{-1} y 54.87 t ha^{-1} , el bosque cultivado 24.39 t ha^{-1} y 22.92 t ha^{-1} y la selva baja caducifolia de 11.05 t ha^{-1} y 11.11 t ha^{-1} para NDVI y SAVI respectivamente.

Palabras clave: Servicios ambientales, percepción remota, interpretación visual, cambio de uso del suelo, índices de vegetación, captura de carbono.

ABSTRACT.

In recent decades Mexico has seen a rapid population increase, which has caused significant deterioration of its vegetation cover and has hampered the environmental services that vegetation provides. Therefore, regional development requires a better planning and monitoring of plant resources, a task for which remote sensing techniques and geographic information systems (GIS) are excellent tools. For the present research, a process of visual interpretation to determine land use changes and vegetation cover loss was performed in the Cuitzeo Lake basin, using Landsat 7 and 8 images from years 2001 and 2014. With these images, an analysis of land usage changes and reduction of vegetation cover was performed using the Idrisi Software. Moreover, maps of aerial CO₂ capture were generated by means of simple linear regression, correlating the spectral data from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) with data of aerial CO₂ volumes obtained from the Forest Inventory Information (INFyS) in order to estimate aerial CO₂ reservoirs of different types of vegetation and their subsequent loss during this period. Results showed that oak forests, deciduous forests and cultivated forests in the region were deforested at a rate per year of -0.48%, -0.43% and -0.46% respectively. Pine forest, pine-oak forest and fir forest show a lower degree of degradation, with rates per year of -0.09% -0.08% and -0.02 respectively. As for the linear regression analysis, two correlation models were obtained: for NDVI was $C = -104.9 + 480.37 \text{ NDVI}$, with a coefficient of determination (R^2) of 0.70 and a root-mean-square error (RMSE) of 14.8. For SAVI, correlation values were of $C = -74.23 + 663.04 \text{ SAVI}$ with a R^2 of 0.71 and a RMSE of 13.78, which indicates a high correlation value in both cases, although the model with greater statistical certainty for map modeling corresponds to SAVI. Finally, it was found that the average carbon contents by vegetation type (for NDVI and SAVI, respectively) were as follows: in fir forest carbon has an average of 53.9 t ha⁻¹ and 49.05 t ha⁻¹, pine forest = 54.6 t ha⁻¹ and 52.47 t ha⁻¹, oak forest = 29.08 t ha⁻¹ and 27.95 t ha⁻¹, pine-oak forest = 43.19 t ha⁻¹ and 42.68 t ha⁻¹, cloud forest = 58.3 t ha⁻¹ and 54.87 t ha⁻¹, cultivated forest = 24.39 t ha⁻¹ and 22.92 t ha⁻¹, and deciduous forest = 11.05 t ha⁻¹ and 11.11 t ha⁻¹.

Keywords: Environmental services, remote sensing, visual interpretation, analysis of change land use and vegetation, vegetation index, carbon capture.

INTRODUCCIÓN GENERAL.

En la actualidad, de los diferentes procesos que determinan el cambio en el uso del suelo algunos han recibido especial atención, tal es el caso de la deforestación, que es el cambio de una cubierta dominada por árboles hacia una que carece de ellos. La alteración o también llamada degradación implica una modificación inducida por el hombre en la vegetación natural, pero no un reemplazo total de la misma, como en el caso de la deforestación. Según el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en México cada año se pierden 500 mil hectáreas de bosques y selvas, por tal motivo la principal preocupación a nivel mundial en torno a la deforestación se refiere al calentamiento global y a la pérdida de los servicios ambientales que prestan los bosques y selvas. Los bosques proporcionan servicios de gran importancia: forman y retienen los suelos en terrenos con declive evitando la erosión; favorecen la infiltración de agua al subsuelo alimentando los mantos freáticos y también purifican el agua y la atmósfera, además de capturar el dióxido de carbono (CO₂) por medio de la fotosíntesis, lo cual ayuda a mitigar el cambio climático.

En 1996 se estimó que las emisiones de CO₂ asociadas al cambio de uso del suelo representaban alrededor del 30% de las emisiones totales del país, según el inventario nacional de gases de efecto invernadero de 1996, que es el único en el que se han hecho estimaciones para el componente de cambio de uso del suelo. En el sentido inverso, como se mencionó anteriormente la vegetación secuestra carbono de la atmósfera, proceso que se reduce fuertemente cuando se retira la vegetación. El factor que más contribuye al fuerte “déficit ecológico” en la *Huella Ecológica* calculada para México es la carencia de superficie forestal suficiente para absorber nuestras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que pone de manifiesto la importancia de la cobertura vegetal para el desarrollo sustentable. Ante dicha problemática, en lo que respecta al sector forestal, actualmente en México se está implementando el mecanismo de mitigación del cambio climático desarrollado bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) denominado “Reducción de Emisiones derivadas de la Deforestación y Degradación de

los bosques" (REDD+), que busca reconocer y proveer incentivos positivos a los países en vías de desarrollo para proteger sus recursos forestales, mejorar su gestión y utilizarlos de manera sostenible con el fin de contribuir a la lucha global contra el cambio climático (SEMARNAT, 2010), lo cual pone de manifiesto la importancia de cuantificar los reservorios de carbono existentes en las zonas forestales para poderlos administrar como un servicio ambiental.

La cuenca de Cuitzeo actualmente es considerada como una de las cuencas prioritarias del país según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), esto principalmente por la concentración y el crecimiento urbano que se ha dado en las últimas décadas lo que ha generado una mayor demanda de servicios y recursos, lo que a su vez ha ocasionado notables procesos de degradación ambiental. Si bien dentro de la cuenca de Cuitzeo las áreas forestales no tienen mucha importancia por su grado de cobertura, si se diseñan adecuadamente opciones de mitigación de CO₂ en el sector forestal pueden ser elementos importantes en el desarrollo sustentable del área.

En el presente estudio se realizó un análisis de cambio de uso del suelo y vegetación para el periodo 2001–2014 y se desarrolló una metodología para la estimación de la captura de carbono en la biomasa arbórea aérea de las áreas forestales de la cuenca de Cuitzeo, mediante el empleo de imágenes satelitales Landsat y herramientas de teledetección, lo que permitió observar el grado de deterioro que se ha tenido en los bosques y selvas que se encuentran dentro de la cuenca, así como determinar el potencial de captura de carbono en la biomasa arbórea aérea de los diferentes tipos de vegetación y determinar la pérdida de éstos reservorios durante el periodo de análisis, cuya información es importante para proyectos relacionados con el cambio climático. Teniendo en cuenta lo anterior, el presente estudio pretende ser instrumento de planeación que permita mejorar la información sobre el área, que contribuya en el desarrollo futuro en materia ambiental y que sirva como marco de referencia para los diferentes proyectos de mitigación de carbono que se desarrollen en la cuenca.

CAPÍTULO I

**"ANÁLISIS DE CAMBIO DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN EN LA CUENCA DE
CUIZEO, PERIODO 2001-2014"**

1. INTRODUCCIÓN.

Los estudios sobre los procesos de cambio en la cobertura y uso del suelo se encuentran en el centro de la atención de la investigación ambiental actual y es un tema de interés para los gobiernos, comunidad científica y la población en general. La mayor parte de los cambios ocurridos en los ecosistemas terrestres se deben principalmente a: I) conversión en la cobertura del terreno; II) degradación del terreno; e III) intensificación en el uso del terreno (Lambin, 1997). Estos procesos, usualmente englobados en lo que se conoce como deforestación o degradación forestal, se asocian a impactos ecológicos importantes en prácticamente todas las escalas. Localmente inducen la pérdida y degradación de suelos, cambios en el microclima y pérdida en la diversidad de especies; regionalmente afectan el funcionamiento de cuencas hidrográficas y la provisión de servicios ambientales para asentamientos humanos, a nivel global, coadyuvan a las emisiones de GEI que dan por resultado el problema del cambio climático global.

Por otra parte, el crecimiento exponencial que ha experimentado la población humana a nivel mundial en las últimas décadas, la demanda de recursos naturales para satisfacer las necesidades de supervivencia de dicha población y las formas y mecanismos de apropiación de los recursos, con frecuencia ligados a fuerzas sociales, políticas y económicas, han presentado implicaciones estructurales y funcionales sobre los ecosistemas. Estas relaciones hombre-ambiente o entre el ambiente y los procesos ligados a la economía social, se manifiestan o materializan como cambios en la cobertura y uso del suelo y han sido reconocidos desde hace más de dos décadas como causa importante de cambios en el ambiente local, regional y por lo tanto, generando un impacto global (Turner 1989). Se trata de un problema de escala mundial, que representó una disminución anual de 8.9 millones de hectáreas de bosques y selvas durante la última década del siglo XX (FAO, 2005). Al 2010 la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima la existencia de bosques en el mundo en cuatro mil millones de hectáreas, con una tasa de deforestación de 13 millones de ha año⁻¹.

La deforestación y el cambio en la cobertura y uso del suelo en México es un problema que se ha presentado desde tiempos precolombinos, sin embargo, durante las últimas cinco décadas este proceso se ha incrementado dramáticamente, con un panorama poco alentador, las 52 millones de hectáreas de bosques y selvas con que contaba el país en el año 2000, presentaron una tasa de deforestación promedio de 631 mil ha año⁻¹ (FAO, 2010). Esta cifra puede diferir con la reportada por otras instituciones o investigaciones; sin embargo se ubica entre los rangos extremos reportados para México por la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en el año 2005 de entre 316-800 mil ha año⁻¹.

Lo anterior, ha situado a los procesos de cambio en la cobertura y uso del suelo en el centro de investigación ambiental actual y representan un punto de referencia en los ámbitos gubernamental, académico y social, donde el análisis de cambio en la cobertura y uso del suelo representan un medio para entender los mecanismos de este proceso de deterioro y constituye una guía útil para la toma razonable de decisiones sobre el uso del territorio (Chen y Yang 2008).

En el presente Capítulo se realizó un análisis de cambio de suelo y vegetación en la cuenca de Cuitzeo durante el periodo 2001-2014, mediante la interpretación visual y digitalización bitemporal empleando imágenes satelitales Landsat 8 para el caso del año 2014 y Landsat 7 para el año 2001, además de utilizar la herramienta "*Land Change Modeler*" incluida en el Sistema de Información Geográfica (SIG) Idrisi v 17.0 Selva, la cual está diseñada para la realización de este tipo de estudios y ha generado buenos resultados, para de ésta manera identificar y cuantificar los cambios de uso del suelo y cobertura en el área de estudio. Lo anterior con la finalidad de generar información en cuanto a la dinámica de cambios en el uso del suelo y los impactos en la vegetación y los servicios ambientales que generan, además de mostrar las implicaciones entre los distintos sectores, de tal manera que aporte información que permita tener una mejor planeación en materia ambiental dentro de la cuenca de Cuitzeo.

1.1. OBJETIVOS.

1.1.1. General.

- Analizar el cambio de uso del suelo y vegetación de la cuenca de Cuitzeo para el periodo 2001-2014.

1.1.2. Particulares.

- Realizar una interpretación visual de imágenes satelitales de los años 2001 y 2014.
- Verificar la interpretación visual de las imágenes satelitales, por medio de trabajo de campo.
- Cuantificar la superficie transformada y la tasa de cambio del uso de suelo y vegetación para el periodo 2001-2014.
- Predecir la probabilidad de cambio de uso del suelo y vegetación para el año 2027.

1.2. JUSTIFICACIÓN.

En la actualidad los estudios con propósitos de planeación y gestión ambiental se han realizado utilizando como unidad de estudio la cuenca hidrológica, esto se debe a que permite darle integralidad al manejo de los recursos naturales es decir, considerar los diversos recursos naturales en su conjunto, con sus diferencias y manejarlos de manera sustentable. Se ha elegido la cuenca y no otra zonificación por la importancia del agua como elemento vital, interrelacionado con todos los demás recursos como el bosque, suelo y fauna, ya que desde las partes altas hasta los ríos interacciona con estos elementos.

Por otro lado, los procesos de cambio en la vegetación y uso del suelo se han situado en el centro de investigación ambiental ya que representan un punto importante para definir estrategias de planeación en materia ambiental, es por esta razón que el desarrollar análisis de cambio en la cobertura y uso del suelo representan un medio para entender los mecanismos de este proceso de deterioro y constituye una guía útil para la toma razonable de decisiones sobre el uso del territorio, estos estudios también han sido aplicados por diferentes investigadores con fines de monitoreo de hábitat, monitoreo de áreas de protección o como se citó anteriormente, como información base para instrumentos de planeación como el ordenamiento ecológico, impacto ambiental sectorial y de manera más reciente relacionadas con el cambio climático (Nájera *et al.*, 2000; Márquez, 2008). En el sector forestal en particular, estos estudios son de gran importancia ya que permiten conocer la dinámica de cambio en la vegetación, lo que permite cuantificar el grado de deforestación en los diferentes tipos de vegetación y sus impactos directos e indirectos en la planeación para el manejo, conservación y protección de las áreas de bosques y selvas así como en los servicios ambientales que generan.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Cambio de uso del suelo y vegetación.

Se le llama “*uso del suelo*” a la forma en la que se emplea un terreno y su cubierta vegetal; y a la modificación de su uso o cobertura se le conoce como “*cambio de uso del suelo*” (Velázquez *et al.*, 2002).

En los últimos 50 años los seres humanos han modificado los ecosistemas del mundo más rápida y extensamente que en ningún otro período de la historia. Estas aceleradas e intensas transformaciones han impactado procesos ambientales locales, regionales y globales, acelerando la pérdida de la biodiversidad, reduciendo la disponibilidad del agua, contaminando el aire y los suelos y emitiendo una gran cantidad de GEI hacia la atmósfera (SEMARNAT, 2009a). Este factor es considerado como de gran relevancia en cuanto a la degradación de los ecosistemas terrestres se refiere. Las principales actividades que provocan este fenómeno son: La actividad agrícola y pecuaria y la urbanización, citadas en orden de importancia (SEMARNAT, 2005).

2.1.1. Tasa de cambio de uso del suelo.

La evaluación de este fenómeno es necesaria como medio para conocer la dinámica y magnitud del mismo, así como sus efectos ocasionados, para de esta manera 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 (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) propone la siguiente fórmula que expresa el cambio en porcentaje de la superficie del año inicial (Velázquez *et al.*, 2002):

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

Dónde:

Tc = Tasa de cambio anual (%).

S₁ = Superficie de la clase en la fecha 1 (ha).

S₂ = Superficie de la clase en la fecha 2 (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, por medio de una herramienta tan útil como es la Teledetección.

2.2. Impactos ambientales derivados del proceso de deforestación y cambio de uso de suelo en los recursos forestales.

México es uno de los países con más recursos forestales a nivel mundial. Sus bosques, selvas y otras áreas con vegetación natural ocupan aproximadamente 74 por ciento del territorio nacional (1 millón 461 mil km² aprox.). De éstos, 700 mil corresponden a bosques y selvas, 575 mil a matorrales y 186 mil a otros tipos de vegetación (Figura 1).

Los ecosistemas forestales son de importancia estratégica debido a la gran diversidad de especies que albergan; así como por los servicios ambientales que ofrecen (la estabilización de los suelos y su potencial de captura de carbono, la regulación del ciclo hídrico, el clima, etc.).



Figura 1. Tipos de vegetación de México (INEGI, 2005).

A pesar de la importancia ecológica y económica de los ecosistemas forestales, no existe un sistema de monitoreo de los cambios de uso de suelo, sus causas, explicación y predicción. No obstante que existen escasos estudios sobre las tasas de deforestación de los principales ecosistemas forestales a nivel nacional, diversas fuentes reconocen que estas tasas no han sido constantes ni homogéneas en el espacio ni en el tiempo, como consecuencia de la heterogeneidad espacial de las características físicas, políticas, sociales, culturales y climáticas. Debido a lo anterior, es indispensable realizar estudios de las causas, consecuencias y variación espacial y temporal de la deforestación, así como de los cambios de uso del suelo en el país, que nos permitan una mejor planeación para conservar, restaurar y manejar nuestros diversos y abundantes recursos forestales.

La deforestación y otros cambios de uso de suelo son las principales causas de pérdida de los recursos forestales y degradación ambiental en escalas locales, regionales y globales. Estos procesos son causados por factores tecnológicos, económicos, políticos, sociales y culturales. La pérdida de la vegetación natural influye directamente en la pérdida de hábitat y de especies, la pérdida de valores culturales y estéticos, la reducción de los recursos forestales, el incremento en la erosión y la pérdida de la fertilidad del suelo. Además, contribuye a las emisiones de GEI (CO₂, NO₂, CH₄). De hecho, se ha considerado que los cambios de uso del suelo influyen indirectamente en la desertificación, las emisiones de CO₂ a la atmósfera y el cambio climático.

Por ejemplo, la deforestación de los trópicos contribuye con el 35% aproximadamente de las emisiones de CO₂ a la atmósfera (1.6 petagramos (pg) al año) a escala global. Así mismo, la pérdida de la cobertura forestal reduce la capacidad de almacenar una gran cantidad de carbono en su biomasa (550 pg de carbono al año).

Por lo tanto, el conocimiento de los efectos de las actividades del ser humano en los diferentes ecosistemas es básico para entender los desequilibrios y los acelerados procesos de degradación que aquejan a muchos tipos de ecosistemas naturales.

2.3. Empleo de la Teledetección y SIG en el estudio de las dinámicas de cambio del uso del suelo y vegetación.

El origen de la teledetección y/o percepción remota es muy discutido a nivel mundial, pero se condiciona a nivel general con el surgimiento de los sensores fotográficos y se define textualmente como:

“La tecnología que permite la adquisición de información de objetos, sin tener un contacto físico con ellos (Novo, 2002) ”

En el estudio de la cobertura vegetal y el uso de la tierra, los sensores remotos juegan un papel importante en términos de la adquisición de datos, por la capacidad

que ofrecen para entregar información multi-temporal, determinada por la frecuencia de toma de datos, que posibilita la cuantificación y el seguimiento de los cambios que ocurren en las coberturas objeto de estudio (Etter *et al.*, 2006). Además, en el análisis de la información a través del análisis de la respuesta espectral de los objetos (Figura 2), siendo posible discriminar elementos que, en el pasado, no podían ser detectados por el ojo humano.

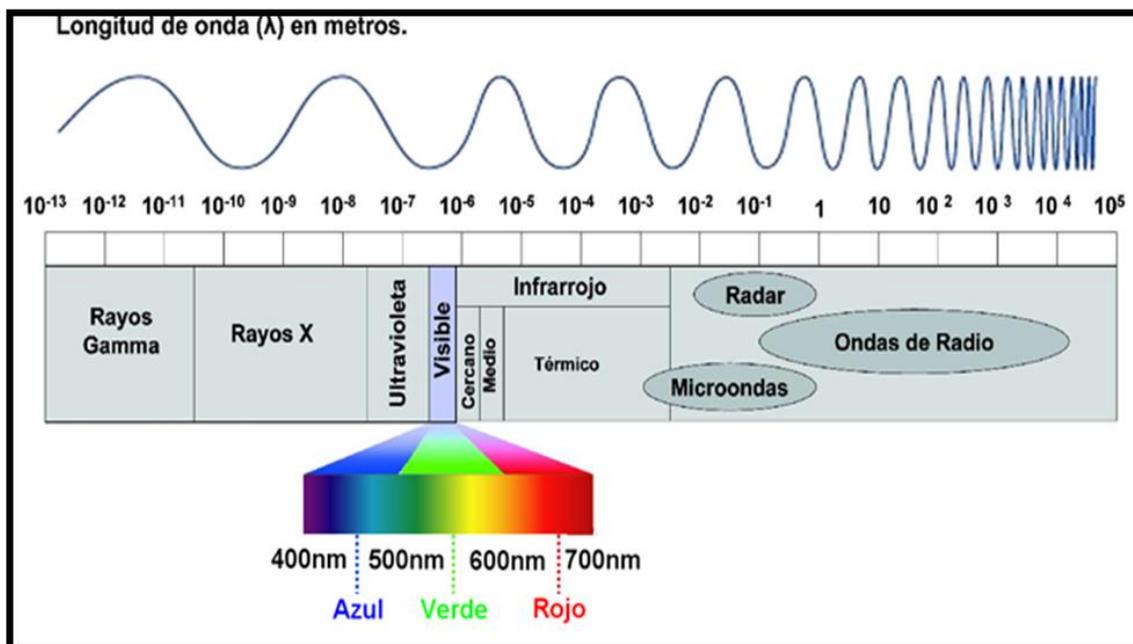


Figura 2. Rangos del espectro electromagnético utilizadas para la identificación de objetos en percepción remota.

La diversidad de los sensores remotos en cuanto a la resolución espacial y temporal es uno de los cuestionamientos que priman en el momento de generar un análisis espacial, es por esta razón que las imágenes de satélite del sensor **Landsat** han sido las más utilizadas para mapear las coberturas del suelo, siendo un recurso ideal para investigaciones de observación y monitoreo de la tierra, enfocado a los recursos naturales, esto debido a la alta frecuencia en la toma de datos a nivel mundial y por su periodo de permanencia en el espacio durante las últimas cuatro décadas, sin descartar como complemento la utilización de las fotografías aéreas, a causa de la alta resolución espacial.

2.3.1. La escala en los sistemas de información geográfica.

La definición de "escala" depende del contexto y la disciplina en el cual se está investigando. Para este trabajo se adoptó el término de escala cartográfica como:

"Aquella que establece una relación directa entre el tamaño de un objeto caracterizado en un sistema de coordenadas, respecto su tamaño en el terreno real (Castilla, 2003) "

Debido a los avances tecnológicos y a la introducción de los SIG, para el manejo de la información espacial, es necesario definir la escala, como punto de partida para el análisis en una investigación. Es común, referirse a las escalas numéricas enteras en los mapas análogos, fotografías e impresiones, para facilitar la conversión de medidas respecto al terreno real; en tanto que los sistemas indican la escala digital y las conversiones son automáticamente suministradas por él. Los SIG, involucran un término reciente denominado: *multi-escala*, que hace referencia a la interacción de diferentes escalas, en un entorno digital y sistematizado (Behrens *et al.*, 2010). En el contexto de las imágenes de sensores remotos, la multi-escala soporta dos conceptos: resolución espacial y extensión espacial, utilizados para los SIG y la telemática.

La resolución espacial, se refiere al tamaño máximo de un objeto capturado por un sensor, almacenado en un píxel y se define textualmente como:

"La medida de la mínima distancia entre dos objetos, que pueden ser diferenciados, uno del otro, en una imagen en función de la altitud del sensor, tamaño del detector, tamaño focal y la configuración del sistema (Weng, 2009)"

En síntesis la resolución espacial define el nivel de detalle espacial de un objeto respecto a la superficie de la tierra. A mayor número de píxeles en un área determinada, mayor es el detalle de los objetos a distinguir. Este concepto es único para cada sensor remoto, y de ello depende en gran parte el tamaño de la información

obtenida y el costo de adquisición de la imagen satelital. La extensión espacial, representa la cantidad de información del proyecto a trabajar, en una unidad de medida de área determinada, el cual también depende de cada sensor remoto. Así mismo la resolución espacial y temporal, se distinguen en tres rangos: alta, media y baja resolución, independiente del tipo de sensor (Cuadro 1).

Cuadro 1. Resolución de algunos sensores remotos.

Rango de sensor	Sensor	Extensión espacial (km ²)	Resolución espacial
Baja resolución	NOAA 17 (AVHRR)	2940	1100
	SPOT 4 (VGT)	2250	1000
	Terra (MODIS)	2330	500
Media resolución	LANDSAT 5 (TM)	185	30
	LANDSAT 7 (ETM+)	185	30 (MS/SWIR); 15 (pan)
	SPOT 2 (HRV)	60	20 (MS); 10 (pan)
	SPOT 4 (HRVIR)	60	20
	SPOT 5 (HRG)	60	10 (MS); 20 (SWIR)
	IRS (Resource Sat-1)	141	23.5
	Terra (ASTER)	60	15
	CBERS 1 y 2	120	20
	EO-1 (Hyperion)	37	30
Alta resolución	Orbview-S	8	4 (MS); 1 (pan)
	Quickbird-2	16.5	2.44 (MS); 0.6 (pan)
	IKONOS	13.8	4 (MS); 1 (pan)

2.4. Imágenes de satélite.

Las imágenes espaciales son capturadas a bordo de satélites artificiales. Éstas son matrices de celdas llamadas píxeles, formadas por un determinado número de filas y columnas. Cada una de esas celdas representa un área geográfica indivisible, determinando así el detalle espacial mínimo que se puede distinguir dentro de la imagen.

El tamaño de la superficie que puede ser representada, varía dependiendo del satélite y de los sensores que tomen la imagen. Cada píxel contiene un valor numérico, que representa la cantidad de energía solar que esa superficie refleja (Chuvienco, 1996).

Como la energía que se refleja depende de lo que haya sobre ella, los sensores ubicados en los satélites captan distintas cantidades y tipos de energía (longitud de onda), que en una imagen ya formada se aprecia en la diversidad de colores.

2.4.1. Imágenes Landsat.

La constelación de satélites Landsat (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron Earth Resources Technology Satellites (ERTS), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 misiones de satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA), en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Los satélites Landsat llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido del Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros.

Las imágenes Landsat están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color incrementando notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático

y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120 metros (USGS, 2014). Son de utilidad para el monitoreo de la vegetación, aplicaciones geológicas, en el estudio de los recursos naturales y de cultivos. Se tiene que hacer una mención especial al satélite **Landsat 8**, lanzado al espacio en agosto de 2012, por sus 11 bandas y amplias posibilidades de combinación lo que permitirá un mayor aprovechamiento para el monitoreo de la vegetación para el presente caso de estudio (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características técnicas de las imágenes Landsat 7 y 8 (USGS, 2014).

Atributo	Landsat 8	Landsat 7
Sensor	OLI TIRS	ETM+
Formato de imagen	Archivo GeoTIFF	Archivo GeoTIFF
Espaciamiento de pixel	15 metros (Pancromático) 30 metros (Multiespectral)	15 metros (Pancromático) 30 metros (Multiespectral)
Tamaño de producto	185 x 185 Kilómetros	185 x 185 Kilómetros
Datum horizontal	WGS84	WGS84
Proyección cartográfica	UTM	UTM
Bandas espectrales	<i>11 Bandas:</i> Aerosol costero 430–450 nm Azul 450–510 nm Verde 530–590 nm Rojo 640–670 nm Infrarrojo cercano 850–880 nm SWIR 1 1570–1650 nm SWIR 2 2110–2290 nm Pancromático 500–680 nm Cirrus 1360–1380 nm Infrarrojo térmico 10600–11190 nm Infrarrojo térmico 1500–12510 nm	<i>8 Bandas:</i> Azul 450–520 nm Verde 520–600 nm Rojo 630–900 nm Infrarrojo cercano 760–900 nm Infrarrojo medio 1550–1750 nm Infrarrojo termal 10400–12500 nm Infrarrojo medio 2 2080–2350 nm Pancromático 520–900 nm
Resolución radiométrica	12 bits	8 bits

2.5. Interpretación de uso del suelo y cobertura de la tierra.

Los sistemas ecológicos, están constituidos por una parte visible, estructura y composición, llamado "fenosistema"; y por otra parte no visible, denominada "criptosistema". La identificación, delimitación y caracterización general de los diferentes tipos de ecosistemas se realiza a través de los aspectos constituyentes del fenosistema, que hace referencia a la morfología de la superficie terrestre, geoforma y su recubrimiento, cobertura terrestre (agua, suelo desnudo, hielo, cobertura vegetal), siendo éste último, en lo que se enfoca la investigación del presente estudio.

La cobertura terrestre se reconoce mediante dos términos: cobertura y uso del suelo. El primero, hace referencia a los aspectos presentes de la superficie de la tierra, independiente de su origen (natural o antrópico) involucra la fisonomía y composición de la cobertura vegetal, que son modelados espacialmente de forma continua (gradientes) o discreta (mosaico), representados a partir de mapas temáticos donde ilustran la variación de la superficie de acuerdo a un nivel de abstracción. El segundo término, se aplica a los tipos de ocupación o utilización que de una cobertura hace el hombre, de forma temporal o permanente (Etter, 2001).

2.6. Interpretación visual.

La fotointerpretación, junto con la Fotogrametría, constituye 2 técnicas básicas de la percepción remota, una cualitativa y la otra cuantitativa, a través de las cuales se han logrado extraer grandes cantidades de información geográfica, cuya utilidad se extiende hoy en día no solo a la geografía, sino al conjunto de las ciencias de la tierra.

A lo largo del siglo XX la mayoría de los países del mundo lograron efectuar el inventario de sus recursos naturales, así como la producción de su cartografía básica, proporcionando los insumos para la planeación y gestión del territorio, como componentes principales del desarrollo humano, así como para estudios similares al presente relacionados con el impacto ambiental y la degradación de los ecosistemas. La técnica de interpretación visual provee las bases metodológicas y operativas necesarias para el análisis e interpretación de imágenes aerofotográficas y/o de satélite.

Es importante destacar que, no obstante los enormes avances en el procesamiento digital de la información geográfica, la técnica de interpretación visual tiene plena vigencia y su aplicación se complementa con el análisis digital de imágenes satelitales y aerofotográficas, los SIG, la fotogrametría y el análisis e interpretación de mapas.

2.6.1. Criterios visuales para la interpretación visual.

Una de las principales ventajas del análisis visual sobre el digital es su capacidad para incorporar a la interpretación de la imagen criterios complejos, el análisis visual permite utilizar elementos tales como el tono, textura, estructura, emplazamiento o disposición, los cuales son muy difíciles de definir en términos digitales (Chuvieco, 1996). Estos criterios nos permiten discriminar categorías con un comportamiento espectral parejo, aunque con un significado temático distinto. Por ejemplo, algunos cultivos de regadío suelen ofrecer una respuesta espectral muy parecida a los parques urbanos debido a que ambas cubiertas están formadas por las mismas o similares especies vegetales; por lo que su significado temático es claramente distinto y así debe reflejarse en la cartografía final.

a) Tono.

Hace referencia a la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. En un producto fotográfico los píxeles con tonos oscuros indican aquellas áreas sobre las que el sensor detectó una señal baja, mientras las zonas claras son testigo de altos valores de radiancia. Una superficie ocupada por vegetación vigorosa ofrece tonos oscuros en las bandas visibles del espectro, especialmente en el azul y rojo, como consecuencia de la alta absorción de los pigmentos de la hoja en esa longitud de onda.

b) Color.

Como se sabe el color que aprecian nuestros sentidos es fruto de la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de onda. Aquellas superficies con alta reflectividad en longitudes de onda cortas, y baja en el resto, aparecen con color azul, mientras ofrecen un tinte rojo si absorben las longitudes cortas y reflejan las largas. Nuestro ojo solo percibe las longitudes de onda comprendidas entre 0.4 y 0.7 milímetros, separando la energía recibida en 3 componentes de acuerdo a nuestra

sensibilidad espectral de nuestras células sensoras, estos 3 componentes son los denominados colores primarios: *azul, verde y rojo*, con los cuales se pueden formar los demás colores.

c) Textura.

Se refiere a la aparente rugosidad o suavidad de una región de la imagen; en definitiva, al contraste espacial entre los elementos que la componen. La textura de la imagen procede de la relación entre el tamaño de los objetos y la resolución del sensor. De esta forma en función del tamaño de los objetos se distingue:

1. Textura Gruesa: cuando los objetos están comprendidos entre 1 y 0.25 mm² a la escala de la imagen.
2. Textura media: cuando los objetos están comprendidos entre 0.25 y 0.04 mm².
3. Textura fina: objetos inferiores a 0.04 mm².

Además del tamaño de los objetos, la textura también está influida por el ángulo de observación e iluminación. Estos elementos son importantes en superficies rugosas, como es el caso del bosque natural, que ofrece una textura muy variada a lo largo del año.

d) Situación espacial.

Por situación o contexto espacial se refiere a la localización de las cubiertas de interés, así como su relación con elementos vecinos de la imagen.

e) Periodo de adquisición.

Los especialistas están de acuerdo en que la observación sistemática de la superficie terrestre es una de las principales ventajas de la teledetección desde el

espacio. Las características orbitales del satélite permiten que las imágenes sean adquiridas periódicamente y en condiciones similares de observación, facilitándose así cualquier estudio que requiera una dimensión temporal. El análisis multi-temporal se ha abordado con una doble orientación:

- Detectar cambios entre 2 fechas de referencia, deduciendo de ahí la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre los ecosistemas.
- Perfeccionar la interpretación de la imagen, gracias a incorporar información sobre el ciclo estacional de las cubiertas vegetales.

f) Otros criterios de análisis.

Es conveniente enriquecer la interpretación visual apoyándose con otros aspectos secundarios como son:

- Sombras: dependientes de la fecha de adquisición de la imagen y del relieve local, permiten realizar la interpretación de los rasgos geomorfológicos, y de la textura de la imagen, especialmente en terrenos forestales.
- Patrón espacial: Indica una organización peculiar de individuos dentro de la imagen, como es el caso de las zonas urbanas.
- Contorno: Facilita el conocimiento de algunos rasgos particulares, como en el caso de las carreteras frente al ferrocarril
- Formas: Permite reconocer elementos individuales en la imagen, como es el caso de complejos industriales o aeropuertos
- Visión estereoscópica: Importante para el reconocimiento geomorfológico y de cubiertas del suelo, ya que aporta una visión tridimensional del espacio observado.

2.6.2. Elementos de análisis visual.

Al ver los criterios sobre los que se basa la interpretación visual de imágenes, también existen una serie de elementos a considerar para cualquier trabajo práctico a partir de este tipo de información.

- Características geométricas de una imagen espacial: Una imagen adquirida desde el espacio presenta menos errores que una fotografía aérea, como consecuencia de la mayor estabilidad y altura de vuelo de la plataforma. Esto no quiere decir que estas imágenes estén libres de errores geométricos, y que puedan superponerse directamente sobre la cartografía clásica. Cabe mencionar que estos desajustes son originados principalmente por; I. errores en la adquisición de la imagen, II. Deformación propia que cualquier mapa implica de la superficie terrestre y III. Errores debido a la generalización cartográfica en el mapa elegido como referencia.
- Efecto de la resolución espacial en el análisis visual: La resolución espacial tiene una repercusión importante sobre la interpretabilidad de la escena. Por ejemplo aquellos elementos por debajo del tamaño del pixel no serán discriminables en la imagen, lo que supone un elemento fundamental en la selección del sensor más conveniente. Mientras mayor sea la resolución, mejor podrá definirse un pixel, ya que será más susceptible de albergar una sola cubierta y viceversa.
- Efecto de la resolución espectral en el análisis visual: El carácter multi-espectral de las imágenes resulta básico de cara a su interpretación. La posibilidad de observar un fenómeno en diversas bandas del espectro amplía notablemente nuestra capacidad de reconocerlo. Como ya se vio anteriormente cada cubierta tiene un comportamiento espectral distinto que se denomina *signatura espectral*, la cual se ve afectado por una serie de factores externos al sistema cubierta-sensor. Por lo tanto, el conocimiento de esos rasgos espectrales resulta interesante para proceder a una interpretación más razonada de la imagen.

- Interpretación de composiciones en color: Se debe tener en cuenta que el proceso aditivo que los pixeles tendrán tanta más intensidad de un determinado color cuanto más blancos aparezcan en la banda a la que se le aplique ese color. Por ejemplo en una composición en falso color, un pixel aparecerá rojo cuanto mayor intensidad presente en la 4 (rojo) y menor en las 2 restantes. Este es el caso de las zonas cubiertas por especies caducifolias, que ofrecen un tono claro en la banda 4, oscuro en la 3 (verde) y medio en la 2 (azul), por lo que tienden a teñirse de un color rojo o rojo-magenta.

2.7. Validación de la clasificación de imágenes.

Para la validación de métodos de clasificación, se sugieren realizar el análisis de la exactitud o aciertos de las clasificaciones, comparándola con otra que el investigador declare como absoluta, proceso realizado utilizando una "Matriz de Confusión".

2.7.1. Matriz de confusión.

La matriz de confusión o contingencia, permite comparar dos clasificaciones: una definida por el usuario como base y la otra, la que se desea evaluar. Se construye una comparación matricial de clases realizadas de la clasificación, ubicada generalmente en diferentes sectores o en la totalidad del mapa, confrontando las clases de cada clasificación, con la matriz de confusión se generan tres tipos de exactitud: exactitud global, exactitud del usuario, exactitud del productor (Pérez y Muñoz, 2006).

Las medidas de exactitud mencionadas, solo se basan en resultados parciales de la matriz, por lo tanto no aprovechan todos los datos en su totalidad, a su vez se toman resultados aleatorios, que pueden llevar a interpretaciones sesgadas del método. Para corregir los tipos de exactitud, se utiliza el Coeficiente Kappa.

2.8. Aplicación de la Teledetección y SIG para analizar cambios sucesionales.

La creciente preocupación por los cambios inducidos en la cobertura terrestre ha llevado a conjuntar diversas disciplinas con el fin de identificar y cuantificar este proceso. A partir de la clasificación realizada de una imagen satelital es posible obtener las clases de uso de suelo presentes en el área de estudio. Al comparar esta clasificación con otra realizada mediante el mismo procedimiento y de la misma zona geográfica, pero de un año diferente será posible determinar los cambios que se presentaron en la zona en ese intervalo de estudio. A ello se le conoce como análisis espacio-temporal (Danilo 2002). A partir de los patrones de cambio identificados en el análisis espacio-temporal es posible realizar una proyección a través del tiempo. Los software de Teledetección y SIG proporcionan herramientas para realizar este tipo de proyecciones.

2.8.1. Cadenas de Markov.

Las cadenas de Markov recibe su nombre del matemático ruso Andrei Markov, es una serie de eventos, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior. Se utilizan para analizar el comportamiento de determinados tipos de procesos estocásticos. Una cadena de Markov, por tanto representa un sistema que varía su estado a lo largo del tiempo siendo cada cambio una transición del sistema. Los cambios no están predeterminados pero si la probabilidad del próximo estado posible en función de los estados anteriores, siendo esta probabilidad constante a lo largo del tiempo (Mesa 2007).

3. ANTECEDENTES.

El estudio de los cambios en la cobertura de los bosques y el uso del suelo se ha remontado desde los años 1950 y 1960, en donde se utilizaban principalmente fotografías aéreas y ortofotos para su realización. Actualmente la disponibilidad de tecnología para el manejo y análisis de bases de información geográfica digitalizadas ha permitido la realización, en un lapso de 20 años, de estudios muy detallados acerca de los cambios del uso del suelo y las causas de la deforestación ya sea a nivel local, regional e inclusive nacional.

Han sido muy variadas las fuentes de información utilizadas y los métodos y procedimientos seguidos para la clasificación y/o interpretación de las imágenes y el análisis de la fragmentación. Las causas del cambio de uso del suelo y la cobertura forestal que se han identificado son diversas y permiten, al menos, plantear de manera general que hay cierta heterogeneidad en los patrones y los procesos, tanto en términos espaciales como temporales. Así, se han podido distinguir desde procesos de deforestación asociados a autorizaciones de aprovechamiento forestal, la tala inmoderada y los incendios forestales, así como patrones sucesionales derivados de la agricultura y pastoreo tradicional y el crecimiento descontrolado de las áreas urbanas.

En el año 2000 Masera y Flamenco, realizaron un trabajo denominado "Dinámica de cambio de uso de suelo y emisiones de carbono en el trópico húmedo de México", en el cual pusieron énfasis en las zonas de incidencia de incendios forestales y áreas que han sido susceptibles a procesos de cambio de uso de suelo rápidos. Además se estimaron las emisiones de CO₂ relacionados a los cambios observados y se relacionaron los cambios de uso de suelo a factores socio-económicos de densidad poblacional y cercanía de caminos. Con base en un modelo de crecimiento poblacional y red de camino existente se estimaron las emisiones futuras de 2000 a 2020. Dentro de los resultados sobre cambio de uso de suelo y la evaluación de la densidad de CO₂ en las diferentes categorías, se destaca el hecho de que buena parte del cambio se ha dirigido al establecimiento de pastizales, además de las implicaciones ecológicas y

económicas relacionadas con el cambio de uso de suelo a pastizal, la importante emisión de CO₂ y las escasa capacidad de capturarlo en el futuro, impera en buscar opciones de manejo para este sistema. Otro aspecto a considerar es la transformación de bosques y selvas a áreas forestales degradadas, lo cual conlleva pérdidas en cuanto a captura de carbono, afectaciones a la biodiversidad y los servicios ambientales.

Cabe mencionar el trabajo realizado por el Instituto de Geografía de la UNAM en el año 2001, sobre la dinámica de cambio del uso del suelo en Michoacán el cual tenía como objetivo el contribuir a mejorar la comprensión de los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo en el tiempo a nivel regional. El enfoque que se propone se verifica mediante un estudio para el estado de Michoacán durante el periodo de la década de los años setenta-noventa empleando una escala de 1:250,000. Los resultados obtenidos indican que, en un lapso de 18 años en el Estado se perdieron 523,644 ha de bosques templados y 308,292 ha de selvas, correspondiendo a una tasa de deforestación del 1.8% y 1% anual respectivamente. Así mismo reporta que el 20% de la superficie de bosques sufrió algún proceso de degradación. Además concluye que los cambios más importantes tanto en los bosques como en las selvas ocurren en zonas relativamente remotas, con baja presión demográfica y con poco desarrollo de actividades productivas.

El Instituto de Geografía de la UNAM en el año 2009, desarrolló un análisis de cambio de uso del suelo en el Estado de México mediante SIG y técnicas de regresión multivariante, en este trabajo se tenía como objetivo el describir los cambios en la cobertura y uso del suelo sucedidos en dicho periodo, para ello se aplicaron métodos de regresión lineal multivariantes para explicar las posibles causas que provocan este proceso de deforestación y/o pérdida de cobertura forestal a nivel regional, en este trabajo arrojo que las diferentes categorías de bosque tienen cambios netos bajos pero valores de intercambio altos. Por otro lado las transiciones sistemáticas entre categorías revelaron una dinámica de perturbación-recuperación forestal. Como resultado los modelos de regresión múltiple señalaron que los factores demográficos a nivel municipal son los que más inciden en la pérdida del bosque, a nivel de pixel los

modelos de regresión logística explican que la mayor pérdida ocurre en zonas boscosas más próximas a las zonas agrícolas, también concluye que las áreas con mayor fragilidad ecológica son las más propensas a ser deforestadas.

En el año 2011 la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) realizó un estudio sobre la tasa de cambio de uso de suelo en el Parque Nacional Pico de Orizaba, Veracruz, México en el periodo 2003-2011, en el cual se realizó un análisis multi-temporal del uso de suelo y vegetación con la finalidad de detectar cambios y estimar la tasa de transformación durante el periodo antes citado, se emplearon escenas SPOT multiespectrales de los años 2003, 2007 y 2011. La escena más reciente fue clasificada con el método interdependiente y a partir de dicha clasificación se clasificaron las escenas 2003 y 2007. Los cambios detectados en el periodo completo (2003–2011) comprendieron una superficie de 750 ha aprox. En este periodo se perdieron 679.2 ha de bosque de pino y bosque de pino secundario, que fueron transformadas a pastizal y áreas agrícolas, y 73.1 ha fueron áreas incendiadas. En el periodo 2003–2007 se perdieron 190.4 ha de vegetación forestal (bosque de pino y pino secundario) que fueron transformadas a pastizal y áreas agrícolas. En el periodo 2007–2011 se transformaron 73.0 ha de pino como efecto de incendios, y se perdieron 607.6 ha de bosque de pino y pino secundario. Las tasas de transformación anuales para el PNPO fueron de 0.1%, 1.3% y 0.7% para los periodos 2003–2007, 2007–2011 y 2003–2011, respectivamente. Derivado de lo anterior indica que las tasas de transformación relativamente bajas estimadas para el parque, coinciden con tasas estimadas para otras áreas naturales protegidas.

Importante mencionar el trabajo realizado por Zenil en el año 2009, la cual utilizó imágenes satelitales de dos años diferentes (1985-2004) para analizarlas mediante la técnica de clasificación supervisada empleando el clasificador de máxima probabilidad, se calcularon las superficies de cada clase identificada y con ellas, la tasa de cambio que se presentó en ese periodo de tiempo. Se realizó una proyección para los próximos 20 años mediante el análisis de cadenas de Markov. Como resultado arrojó que en el período de tiempo estudiado las coberturas naturales Bosque de *Pinus*, Bosque de

Juniperus y Matorral xerófilo fueron reducidas a una tasa de 2.0%, -4.9% y -1%, respectivamente. Por el contrario, las zonas de uso antrópico aumentaron su superficie: agricultura de riego (tasa de 1.3%) y las zonas urbanas (tasa de 6.3%). De igual modo ocurrió con las áreas con vegetación perturbada (tasa de 2.3%) y las erosionadas (tasa de 1.3%).

En el contexto internacional es importante mencionar el trabajo realizado por Rodríguez en el año 2011, el cual desarrolló una metodología para detectar los cambios en el uso de tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos en el Municipio de Villavicencio, Colombia, en donde empleó los principios de la "clasificación orientada a objetos", para determinar, cuantificar y visualizar, los cambios ocurridos en las coberturas y usos de la tierra en un lapso de 17 años, en el piedemonte depositacional del Municipio de Villavicencio en el departamento del Meta. La metodología empleada se aplicó para las imágenes del sensor Landsat, para los años 1986 y 2003. Con la clasificación utilizada fue posible delimitar las áreas de tres coberturas: bosques (9.304, 5 ha – 1986 y 2.083,8 ha – 2003), bosques de galería (3.581,5 ha – 1986 y 2.597 ha – 2003) y palma africana (110, 39 -1986 y 218,88 – 2003), con el cambio de uso (bosques: -77.6% y bosques de galería en -27,5 %), a partir de una imagen satelital con resolución espacial media. Los resultados de la validación de la clasificación en la imagen del año 2003, indicaron que fueron aceptables (Coeficiente Kappa = 0.365). De acuerdo a los resultados de esta investigación, la clasificación orientada a objetos, puede ser una alternativa eficiente y precisa a implementar para clasificar imágenes de sensores remotos, cuando se requiere delimitar una cobertura específica.

4. METODOLOGÍA.

4.1. Descripción del área de estudio.

4.1.1. Localización geográfica.

La cuenca Cuitzeo se localiza en las coordenadas geográficas 19° 30' a 20° 05' de latitud norte y 100° 35' a 101° 30' de longitud oeste, a una altura sobre el nivel del mar (ASNM) que va desde 1,830 hasta 3,420, la cuenca pertenece a la región hidrológica no. 12 conocida como Lerma-Santiago, la superficie que presenta es de aprox. 365,393.40 ha (Figura 3).

Se encuentra ubicada en los límites del Estado de Michoacán y Guanajuato; en lo que respecta al Estado de Michoacán abarca en su totalidad los municipios de Álvaro Obregón, Copándaro de Galeana, Cuitzeo, Huandacareo, Tarímbaro y Santa Ana Maya y parte de los municipios de Acuitzio, Charo, Chucándiro, Huiramba, Indaparapeo, Lagunillas, Morelia, Queréndaro, Zinapécuaro, Hidalgo, Huaniqueo, Madero, Morelos, Pátzcuaro y Quiroga; por parte del Estado de Guanajuato abarca parte de los municipios de Acambaro, Moroleón, Salvatierra, Uriangato y Yuriria (Cuadro 3).

En esta cuenca se encuentra el Lago de Cuitzeo, segundo cuerpo de agua más grande del país, el cual presenta grandes periodos de desecación y ha sido considerado dentro de los humedales prioritarios para la conservación de especies migratorias.

La cuenca de Cuitzeo ha estado en el punto de atención de diferentes investigadores de distintas disciplinas, debido a la importancia social, económica y ambiental que genera, así como por la degradación de sus ecosistemas naturales y la alteración de su ciclo hidrológico provocado principalmente por la actividad humana en las últimas décadas, teniendo como consecuencia un desequilibrio ecológico y afectando el desarrollo sustentable de las actividades productivas.

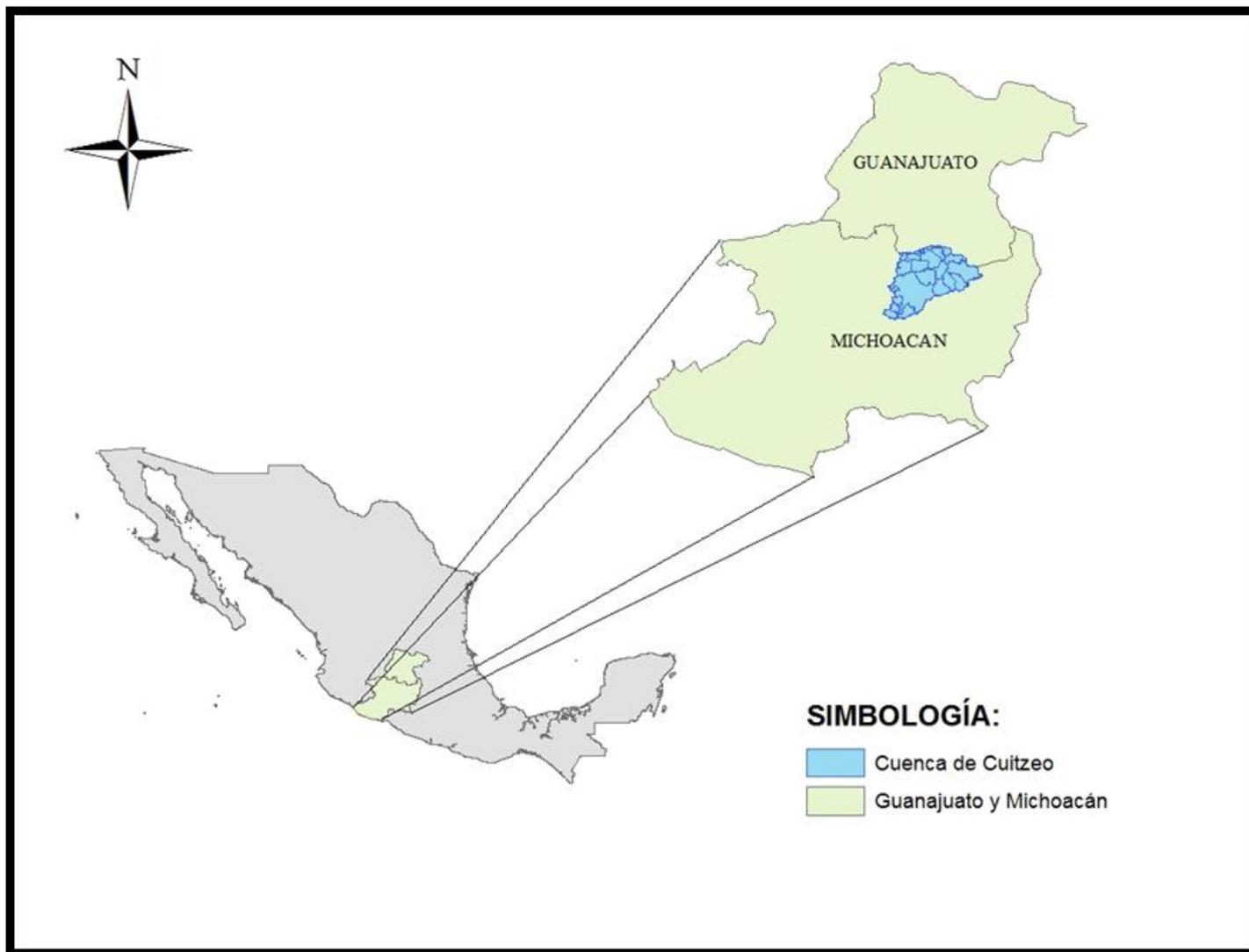


Figura 3. Localización geográfica de la cuenca de Cuitzeo.

Cuadro 3. Superficie de los Municipios que conforman la cuenca Cuitzeo.

Estado	Municipio	Superficie en la cuenca (ha)	% cuenca
Michoacán	Acuitzio	14,057.16	3.83
	Álvaro Obregón	15,694.99	4.27
	Charo	20,005.09	5.45
	Chucándiro	18,313.27	4.99
	Copándaro	17,552.31	4.78
	Cuitzeo	25,591.30	6.97
	Huandacareo	9,077.29	2.47
	Indaparapeo	16,781.06	4.57
	Morelia	105,743.04	28.80
	Queréndaro	15,923.95	4.34
	Santa Ana Maya	10,366.50	2.82
	Tarímbaro	26,237.45	7.15
	Zinapécuaro	42,836.94	11.67
Guanajuato	Acambaro	14,634.02	3.99
	Moroleón	3,213.84	0.88
	Salvatierra	6,420.26	1.75
	Uriangato	2,944.93	0.80
	Yuriria	1,755.74	0.48
Total		365,393.40	100

Fuente: Ortega, 2003.

4.1.2. Fisiografía.

Al sur de la cuenca Cuitzeo se localiza la Sierra de Mil Cumbres, representada por una secuencia de rocas volcánicas donde se observan grandes estructuras de estrato volcanes formados de andesitas, dacitas y riolitas que dieron origen a estructuras caldéricas, que a su vez conformaron las mesas de flujos piroclásticos ríolíticos de la cantera de Morelia. Hacia el norte de la falla "La Paloma" se distinguen diferentes morfologías como los lomeríos bajos que están integrados por bloques basculados compuestos de andesitas de ignimbritas de la sierra de Mil Cumbres del Mioceno medio superior.

Los valles y planicies ocupadas por secuencias lacustres y fluviolacustres de hasta 100 m de espesor, existen más de 500 m de depósitos terrígenos de este tipo. Al

oeste y norte del lago y al oeste de Morelia aflora el vulcanismo, destacan los volcanes semiescudo del Águila y Quinceo - Las Tetillas, conformado por un ciclo eruptivo compuesto de alternancias de productos efusivos y explosivos.

La fisiografía de la cuenca la conforman principalmente Edificios Volcánicos y Lavas, los cuales cubren un 70% aproximadamente; las Planicies acumulativas, un 15% y los Sistemas de Pie de Monte, cubren el 15% de la superficie de la cuenca (INEGI, 2013).

4.1.3. Geología.

La cuenca de Cuitzeo, junto con la depresión de Chapala conforma la depresión lacustre Cuitzeo-Chapala, la cual se caracteriza por su geometría y estilo de fallamiento. El borde sur de la depresión se ubica en el Estado de Michoacán y el norte de Guanajuato. El lago esta tectónicamente delimitado por semigrabens constituidos principalmente por rocas volcánicas y productos fluvio-lacustres cuaternarios (Israde-Álcantara y Garduño, 1999).

Dentro de la cuenca se pueden distinguir una serie de lomeríos alargados, limitados por fallas este-oeste que corresponden a bloques de rocas volcánicas muy fracturadas. La depresión de Cuitzeo presenta cuatro estilos bien definidos: 1) Al Oriente forma un graben casi simétrico. 2) Al poniente un estilo semigraben con bloques basculados al sur, inclinándose de 5° a 10° en Morelia y de hasta 30° en Cuitzeo. 3) El graben y semigraben están separados por la falla de dirección noroeste-sureste denominada Tzitzio-Valle de Santiago, que en la cuenca produce el alargamiento del lago de Cuitzeo. 4) Finalmente las estructuras más evidentes son aquellas este-oeste y forman parte del sistema de fallas Morelia-Acambay, que produce desniveles en rocas tanto del Mio-Pliocuartenario como del Holoceno (Garduño *et al.*, 2001). En la cuenca existen principalmente rocas volcánicas de andesitas, dacitas y riolitas, rocas ígneas, depósitos volcánicos y depósitos terrígenos (INEGI, 2013) (Figura 4).

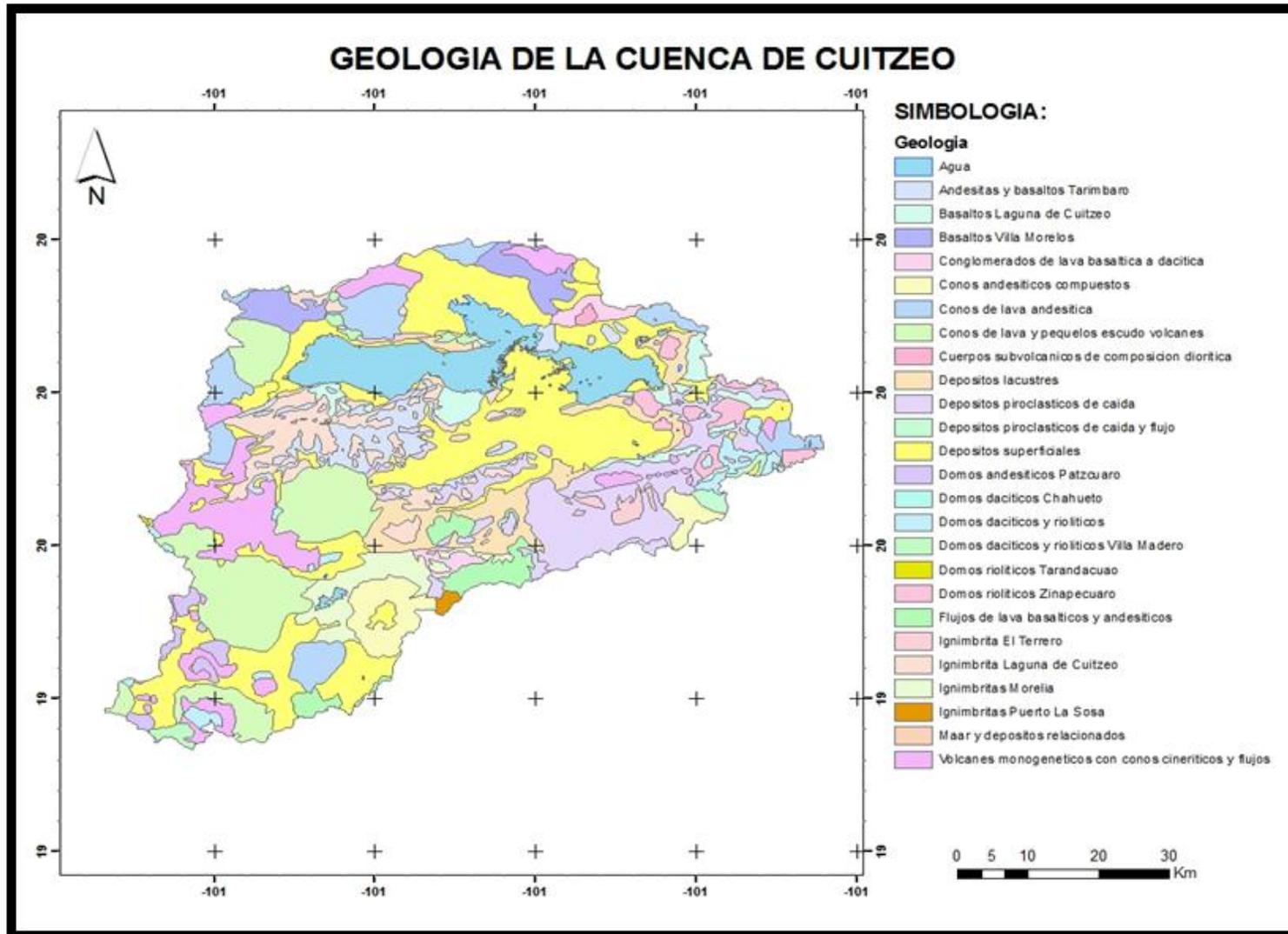


Figura 4. Geología de la cuenca de Cuitzeo.

4.1.4. Clima.

Las diversas altitudes que se encuentran en la cuenca, los vientos dominantes y el valor de las temperaturas, originan que en una región se encuentren distintos grados de temperatura y humedad, lo que se traduce en una gran variedad de climas. Predominan los climas templados subhúmedos con lluvias en verano Cwo y Cw1, hacia el norte del lago en el Bajío, las temperaturas son más altas, los climas son semicálidos subhúmedos, con régimen de lluvias en verano y menos del 5% de lluvias en invierno, hacia el sur en la ciudad de Morelia, el clima es un poco más lluvioso, semicálido, subhúmedo, también con escasa lluvia invernal y un verano fresco. Las temperaturas medias anuales comprendidas entre 18 y 22 °C, consideradas semicálidas. El relieve tiene gran importancia en la distribución de la lluvia, las precipitaciones predominantes van de 600 a 800 mm anuales. Las lluvias aumentan sobre las sierras que rodean el lago. En la parte más baja de la cuenca va de 800 a 1,000 mm y a mayor altitud, la precipitación es mayor a 1,200 mm anuales (INEGI, 2013) (Figura 5). La temporada de lluvia abarca el verano y parte del otoño (mayo-octubre), en el resto del año la temporada es de sequía (noviembre-abril), (Vidal, 2005).

4.1.5. Suelos.

En la zona montañosa se presentan tres unidades de suelo de composición ácida: andosoles en las zonas más altas de la cuenca, seguidas por Acrisoles y Luvisoles. A medida que las pendientes disminuyen, se presentan los Feozems y en las partes bajas sobre terrenos planos en donde convergen los escurrimientos, se encuentran los Vertisoles. También están los Leptosoles y los Cambisoles en áreas con fuerte pendiente y en lechos de lava; los Planosoles y Gleysoles en sitios saturados y lugares fangosos en donde el agua freática alcanza la superficie; los Solonchaks en las orillas del lago o en donde el riego es inadecuado. Los suelos que predominan en la cuenca de Cuitzeo son Vertisoles en 25.2%, Luvisoles con un 17.9%, Leptosoles 17.3%, Andosoles 11.9%, Acrisoles 13.4%, Feozem 2.3% y el 12% restante lo incluyen Planosoles, Gleysoles, Solonchaks y Cambisoles (INEGI, 2013) (Figura 6).

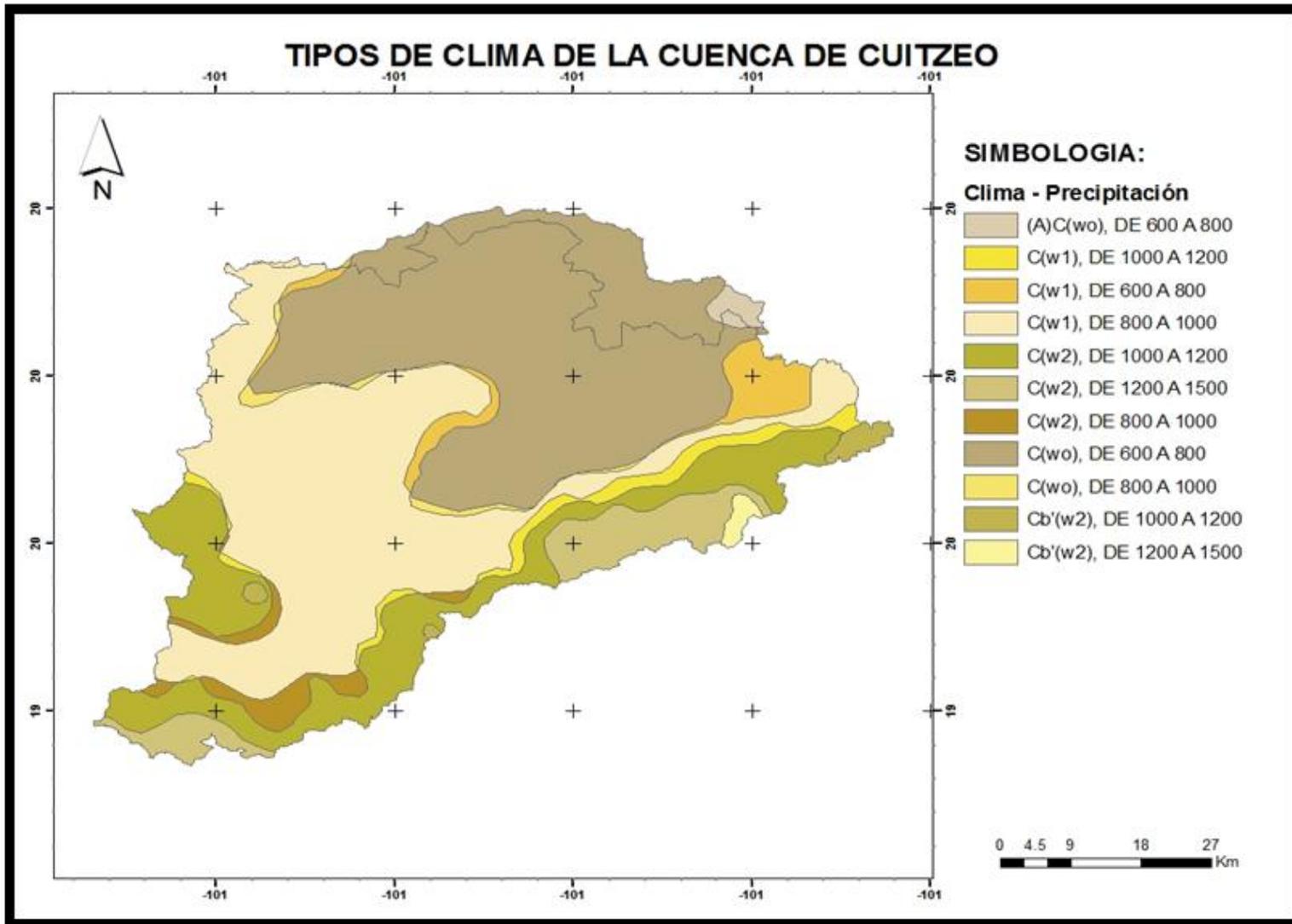


Figura 5. Tipos de clima de la cuenca de Cuitzeo.

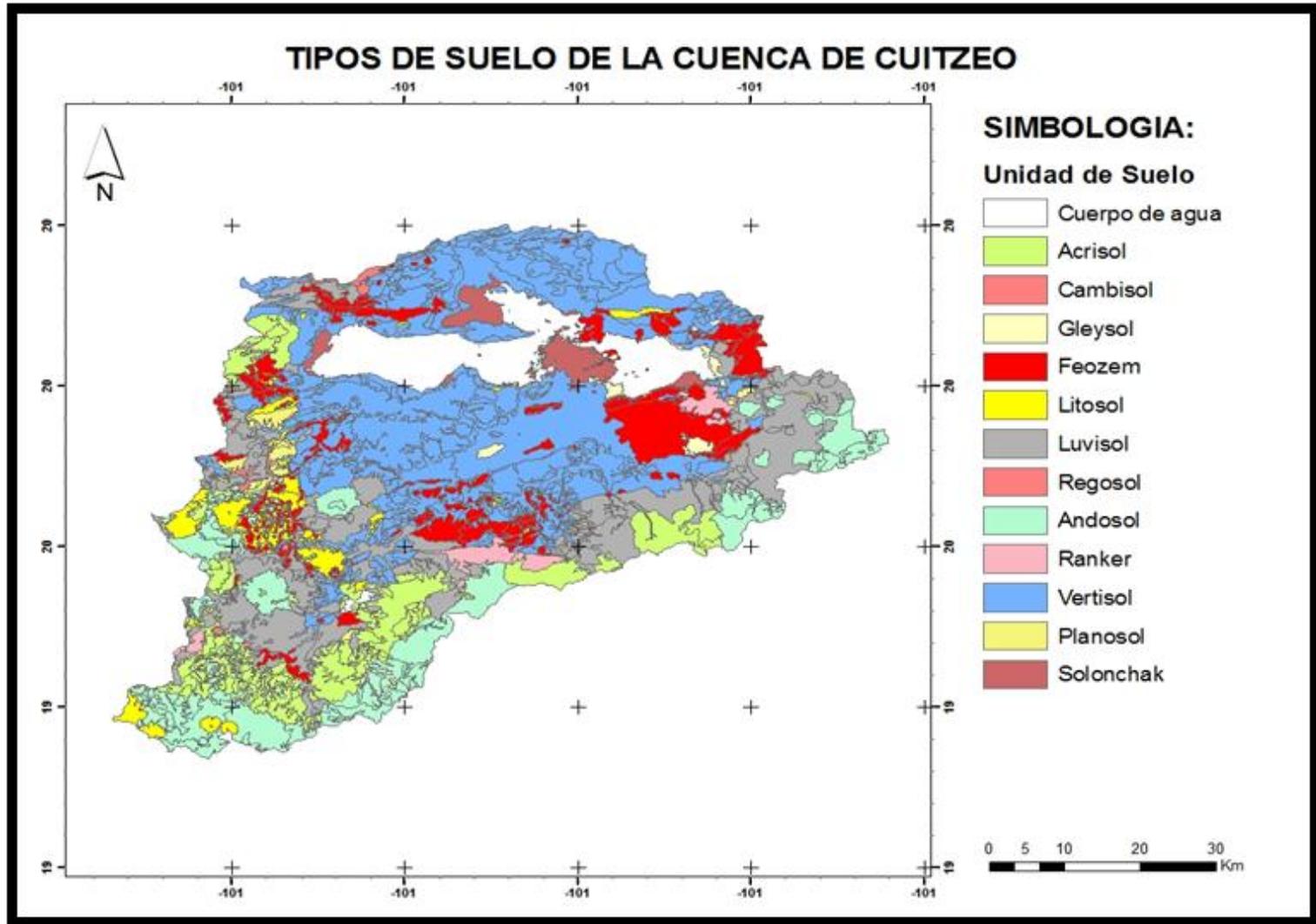


Figura 6. Tipos de suelo de la cuenca de Cuitzeo.

4.1.6. Hidrología.

La cuenca de Cuitzeo originalmente formó parte de la cuenca fluvial del río Lerma junto con los lagos de Pátzcuaro y Zirahuén, los cuales se separaron durante el Plioceno y el Pleistoceno al levantarse diversas barreras geográficas para quedar tal como lo conocemos hoy en día (De Buen, 1940). La hidrología se caracteriza por el predominio de corrientes intermitentes y la presencia de unas cuantas permanentes o perennes, entre las que sobresalen los ríos Grande de Morelia y Zinapécuaro; ambos drenan el 45% de la superficie de la cuenca (INEGI, 2013). La corriente principal que alimenta el lago es el Río Grande de Morelia, el cual fluye de suroeste a noreste; durante su recorrido alimenta la presa Cointzio y recibe aguas abajo, el caudal del Río Chiquito, su principal afluente, el de los manantiales de la Mintzita, Itzicuaró y La Quemada y las aguas negras de la ciudad de Morelia. Los escurrimientos se aprovechan totalmente en el regadío de los valles de Charo, Álvaro Obregón y Tarímbaro, dando origen a una serie de canales de riego que cruzan la zona conocida como "El Bordo" y alcanzan el lago al sur en una zona de humedal. El lago de Cuitzeo cuenta además con las aportaciones de numerosos arroyos de temporal y cuerpos termales que se localizan en la parte baja de la cuenca (Figura 7).

4.1.7. Vegetación.

No existe un inventario integral de la flora de la Cuenca Cuitzeo, sin embargo se han elaborado cuantiosos trabajos tendientes al conocimiento de las plantas vasculares de algunas áreas parciales, existen registros desde el año 1877 con Tena y López presentando calendarios botánicos, hasta los más recientes con el conocimiento de cactáceas en la Cuenca. Se estima que se alberga una flora vascular espontánea del orden de 2,000 a 2,200 especies, cantidad que supera substancialmente a la tercera parte de la que se calcula para todo el Estado de Michoacán (Rzedowski, 1987). Hay presencia de: Selva baja caducifolia, bosque de encino, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de oyamel, bosque mesófilo de montaña, vegetación halófila e hidrófila y pastizales (INEGI, 2013) (Figura 8).

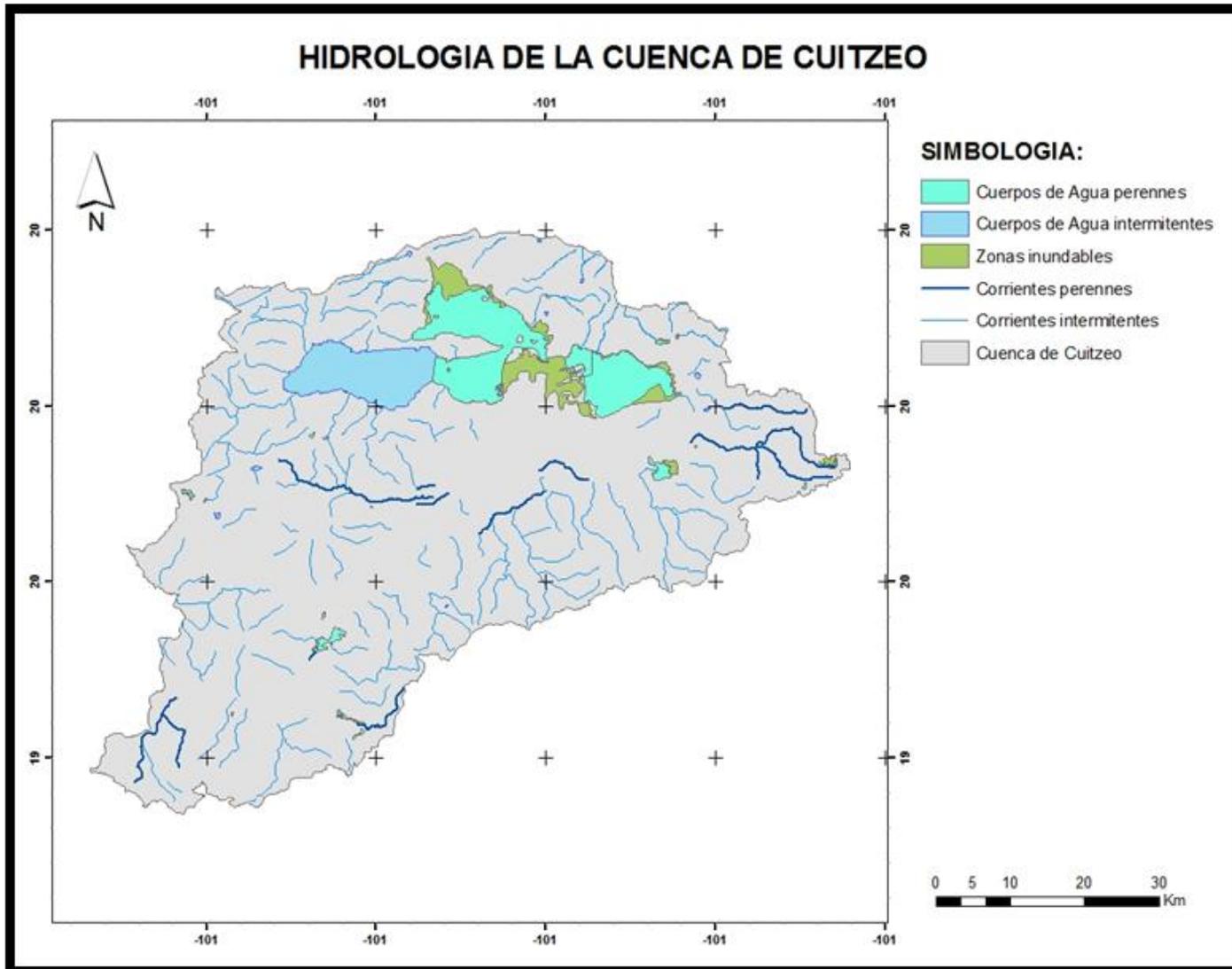


Figura 7. Hidrología de la cuenca de Cuitzeo.

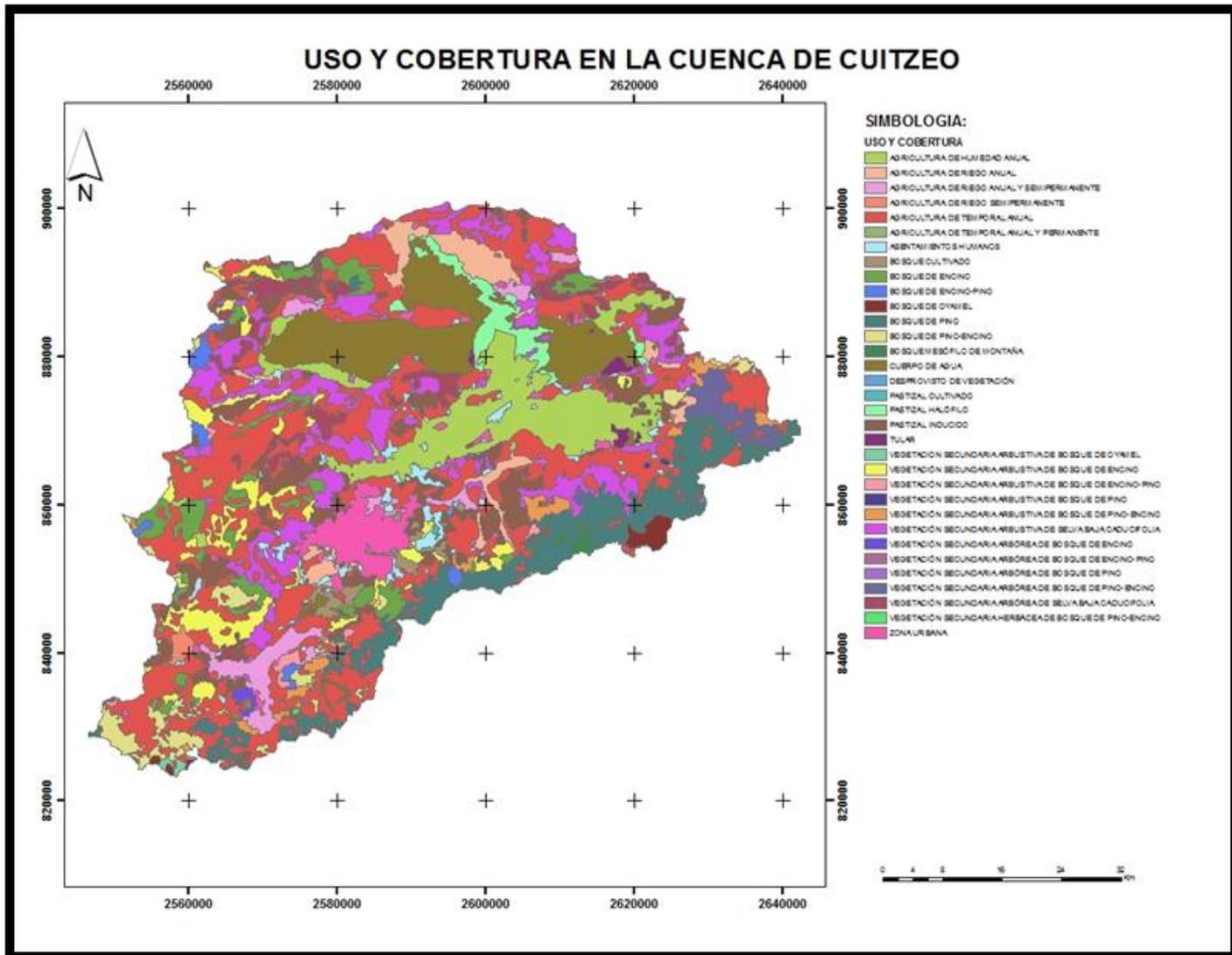


Figura 8. Uso del suelo y vegetación de la cuenca de Cuitzeo.

4.1.8. Áreas naturales protegidas.

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP), son aquellas zonas del territorio, terrestres o acuáticas, donde se producen beneficios ecológicos y económicos para las regiones que han quedado sujetas al régimen de protección para preservar ambientes naturales, salvaguardar la diversidad genética de las especies silvestres y están protegidas por mandato gubernamental estatal a través de su decreto, plan o programa de manejo, ordenamiento del territorio y por la Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Michoacán de Ocampo, publicada el 17 de mayo de 2004 en el Periódico Oficial del Estado.

El establecimiento de áreas naturales protegidas de la cuenca ha permitido preservar los ambientes naturales representativos de las diferentes regiones biogeográficas y ecológicas de Michoacán, que es uno de los estados más importantes del país en esos temas.

Actualmente se localizan ocho ANP's de jurisdicción estatal que ocupan una superficie de 1,471 ha. La mayoría de ellas se encuentran en el municipio de Morelia, una en Tarímbaro y otra en Huandacareo, las categorías con las que fueron decretadas corresponden a zona sujetas a preservación ecológica y parques urbanos ecológicos (Cuadro 4).

Las Áreas Naturales Protegidas decretadas para la cuenca se consideran pequeñas y un poco aisladas, se ubican prácticamente en los alrededores de la ciudad de Morelia, lo que ocasiona que los ambientes se encuentren cada día más deteriorados por las acciones de tipo antrópico, como es el caso del crecimiento urbano y la ausencia de un manejo adecuado.

Cuadro 4. Áreas naturales protegidas estatales de la cuenca de Cuitzeo.

ANP	Municipio	Categoría	Decreto	Superficie (Ha)
Las tinajas de Huandacareo	Huandacareo	Zona de preservación ecológica	26 de Enero del 2005	254.3
Cerro Punhuato	Morelia	Zona de preservación ecológica	26 de Enero del 2005	118
Ex escuela agrícola denominada la Huerta	Morelia	Zona de preservación ecológica	31 de Enero del 2005	271.5
Manantial la Mintzita	Morelia	Zona de preservación ecológica	31 de Enero del 2005	419.6
Fideicomiso de la ciudad industrial de Morelia	Morelia	Parques urbanos ecológicos	10 de Julio de 1995	89.11
Instituto tecnológico agropecuario ITA no. 7	Tarímbaro	Parques urbanos ecológicos	4 de Junio de 1998	16.95
Francisco Zarco	Morelia	Parques urbanos ecológicos	15 de Febrero del 2008	17.8
Loma de Santa María y depresiones aledañas	Morelia	Zona de preservación ecológica	31 de Diciembre del 2009	232.8

Fuente: SUMA, 2013.

4.2. Características socioeconómicas.

4.2.1. Población.

En el año 2005, la población total de la cuenca era de 918 mil 357 personas y para 2010, ascendió a 1 millón 4 mil 723 personas, de las cuales 481 mil 288 corresponden a hombres y 523 mil 435 a mujeres, con un porcentaje del 47.65% para hombres y 52.35% para mujeres (INEGI, 2010a).

Así mismo, el municipio más poblado de la cuenca es Morelia con 729,279 habitantes y el menos poblado corresponde respectivamente al municipio de Chucándiro con 5,166 habitantes, se observa también que de los 18 municipios el único municipio donde predominan los hombres es en Charo, mientras que en el resto de los municipios en su mayoría son las mujeres (INEGI, 2010a).

4.2.2. Actividades económicas.

Para la cuenca el sector primario está representado por la pesca, agricultura, ganadería y forestal, siendo de mayor peso el pesquero para los municipios cercanos a la ribera del lago, el municipio de Charo, Lagunillas e Indaparapeo, Acuitzio, Álvaro Obregón, Chucándiro, Huandacareo, Huiramba, Queréndaro y Santa Ana Maya se ubican en este sector, Cuitzeo se encuentra en el sector secundario por la fabricación de telas y Tarímbaro, en el sector terciario se ubica a Zinapécuaro, Copándaro y Morelia por actividades de comercio, transportes, correos, servicios financieros, inmobiliarios y de seguros, etc.

Los Municipios de la cuenca con mayor superficie sembrada en hectáreas son: Morelia con 17,668 ha, Zinapécuaro 12,028 ha, Álvaro Obregón 10,925 ha y la superficie total sembrada por tipos de cultivo en la cuenca fue de 86,280 ha, de las cuales 63,533 ha corresponden a maíz, 6,370 ha de sorgo, 2,287 ha de avena, 2,114 ha de trigo, 2,071 ha de alfalfa, 406 ha de frijol, 192 ha de tomate rojo, 179 ha de pastos, 167 ha de chile verde, 102 ha de tomate rojo y 8,859 ha de otros cultivos (INEGI, 2010b).

4.3. Imágenes satelitales empleadas.

Las imágenes satelitales empleadas para el presente trabajo de investigación se obtuvieron del portal de internet del USGS (www.earthexplorer.com). Para las imágenes de satélite del año 2014 se descargaron 3 escenas Landsat 8 para cubrir la totalidad de la superficie del área de estudio, se buscaron imágenes lo más recientes posibles para generar información actualizada, además se buscaron imágenes que tuvieran gran calidad de nitidez y que tuvieran poca presencia de nubes y cualquier otro defecto generado por el propio sensor, esto para evitar al máximo problemas en los resultados al momento de su procesamiento, en lo que respecta a las imágenes del año 2001, se utilizaron escenas de satélite Landsat 7, aplicando los criterios de selección antes mencionados (Cuadro 5).

Cuadro 5. Información de las escenas satelitales empleadas.

Path	Row	Fecha	Descripción	
			Sensor	Sistema de coordenadas
Año 2014 (Landsat 8)				
27	46	11 de Marzo del 2014	"OLI_TIRS"	Universal transversal de mercator (UTM)
27	47	11 de Marzo del 2014		
28	46	14 de Marzo del 2014		
Año 2001 (Landsat 7)				
27	46	26 de Noviembre del 2001	"ETM+"	Universal transversal de mercator (UTM)
27	47	31 de Abril del 2001		
28	46	27 de Octubre del 2001		

Fuente: USGS, 2014

4.3.1. Delimitación del área de estudio.

El archivo shape del parteaguas utilizado para delimitar la superficie que comprende la cuenca de Cuitzeo fue el utilizado en el trabajo de investigación denominado: *"evaluación multicriterio y sistemas espaciales de toma de decisiones aplicados a la planeación del uso de suelo en la cuenca de Cuitzeo"* (Ortega, 2003).

4.4. Procesamiento de las imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8.

4.4.1. Conversión al formato compatible con Idrisi.

El SIG empleado para el análisis de cambio de uso del suelo y vegetación fue **Idrisi v.17.0 Selva**, para ello, lo que se realizó primeramente fue convertir las imágenes satelitales en formato geotiff, obtenidas del sitio web antes mencionado al formato compatible con Idrisi. Para el caso del archivo shape de la cuenca de Cuitzeo también se importó a idrisi utilizando el comando *"Shapeidr"* y se rasterizó la imagen por medio de *"Rastervector"*.

4.4.2. Generación de mosaicos.

Como se mencionó anteriormente, para poder cubrir la totalidad de la superficie de la cuenca de Cuitzeo se utilizaron 3 escenas para ambas anualidades (Cuadro 5), las cuales se tuvieron que unir en Idrisi por medio de la herramienta "*Mosaic*", esto se realizó con todas las bandas que las componen; B1 a B7 para el año 2001 y B1 a B9 para el año 2014, dando como resultado la conformación de las imágenes de todas las bandas que cubren la totalidad de la superficie del área de estudio.

4.4.3. Generación de compuestos en falso color y mejoramiento de la resolución.

Con la finalidad de incrementar el detalle espacial sin perder la información multi-espectral de las imágenes Landsat 7 y 8, se generó un "*falso color rojo*" mediante la combinación de las bandas verde, rojo e infrarrojo cercano, bandas 3, 4 y 5 de las imágenes Landsat 8 y bandas 2, 3 y 4 de las imágenes Landsat 7, así como el empleo de la banda pancromática para los años del periodo en cuestión utilizando la herramienta "*Pansharpen*" implementado en Idrisi.

La eficiencia de éste método para preservar los atributos multi-espectrales (menor resolución espacial) una vez fusionados con la banda pancromática (mayor resolución espacial) ha sido comprobada estadísticamente en otros estudios y para su uso en la cartografía de la cubierta vegetal.

4.4.4. Recorte de imágenes.

Ya conformados los mosaicos, éstos se recortaron enmarcando el parteaguas de la cuenca, mediante el comando "*Window*" de Idrisi, con el fin de trabajar con archivos de menor tamaño de almacenamiento. Esto se realizó con cada una de las bandas de las imágenes de satélite de los dos años por analizar (2001-2014).

4.5. Proceso del análisis de uso del suelo y vegetación.

Una parte medular para realizar un análisis de cambio de uso del suelo y vegetación es la realización del proceso de clasificación y/o interpretación, que para este caso la metodología incluyó lo siguiente:

4.5.1. Identificación y digitalización de usos del suelo y vegetación de las imágenes del 2014.

En base al proceso de interpretación visual, así como a la revisión bibliográfica y la consulta del material cartográfico se identificaron 4 tipos de uso de suelo y 9 tipos de vegetación, sumando un total de 13 clases identificadas en la cuenca de Cuitzeo (Cuadro 6).

Para lo anterior, se utilizaron como insumos de apoyo 2 mapas digitales de uso del suelo y vegetación escala 1: 250000 correspondiente a la serie V del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) disponible en 2012, así como el elaborado por la COFOM con escala 1:250000 elaborado en 2010, además de apoyarse del programa "*Google earth pro*", que fue de gran ayuda al momento de delimitar los polígonos de las diferentes clases debido a la resolución que tienen sus imágenes.

Para la definición de las clases y/o categorías se apoyó de la nomenclatura de los mapas citados anteriormente, los cuales a su vez, se han apoyado en estudios realizados principalmente por Rzedowski (1987), para el caso de los tipos de vegetación. Lo anterior se realizó con la finalidad de homogenizar las categorías para fines prácticos, aunque a diferencia de la carta de uso del suelo y vegetación serie V de INEGI, en el presente trabajo se agruparon todas las subcategorías.

En lo que respecta al proceso de análisis e interpretación de las imágenes de satélite, así como la digitalización de los polígonos, se realizaron con el apoyo del software de digitalización y creación de bases de datos espaciales "**Carta Linx**".

Cuadro 6. Clasificación de uso del suelo y vegetación del año 2014.

Uso del suelo y vegetación	ID
Bosque de pino	BP
Bosque de encino	BQ
Bosque de pino-encino	BPQ
Bosque de oyamel	BA
Selva baja caducifolia	SBC
Bosque mesófilo de montaña	BM
Bosque cultivado	BC
Agricultura	A
Área urbana	AU
Pastizal	P
Cuerpo de agua	CA
Vegetación acuática	VA
Área descubierta	AD

4.5.2. Descripción de usos del suelo y vegetación identificados.

4.5.2.1. Usos de suelo.

Agricultura: Existen 2 tipos de agricultura, por un lado está la *agricultura de riego*, el cual es un sistema manejado por el hombre en el que se emplea el agua como auxiliar para los cultivos establecidos. El riego puede ser aplicado de diversas formas: por aspersión, goteo, entre otros y el agua puede provenir de cuerpos de agua artificiales (presas, pozos, etc.) o naturales (ríos, lagos, lagunas, manantiales, etc.). En cuanto a la *agricultura de temporal*, ésta tiene la misma finalidad que el de agricultura de riego, con la diferencia de que éste tipo de agricultura dependen de la precipitación. Aquí se incluyen cultivos independientemente de su duración (perenne o anual) (INEGI, 2009). En lo que respecta a la cuenca de Cuitzeo, considerando tanto la agricultura de riego como la agricultura de temporal, actualmente abarcan un poco más de la tercera parte de su superficie total.

Cuerpos de agua: Un cuerpo de agua se define como cualquier acumulación de agua. Pueden ser artificiales como las presas, o naturales como los océanos, lagos o ríos. Como ya se comentó anteriormente la cuenca de Cuitzeo es muy importante por la presencia del lago de Cuitzeo, el segundo más grande de México y actualmente considerado prioritario para su conservación por el INECC.

Zona urbana: Son los asentamientos humanos, en este caso se incluyeron aquéllas que cuentan con una superficie mayor a 5 ha y son áreas urbanas y semiurbanas que cuentan con todos los servicios básicos como la luz, el agua potable y el drenaje. En el caso de la cuenca de Cuitzeo el área urbana más importante es la ciudad de Morelia, seguido por Cuitzeo, Queréndaro, Zinapécuaro y Acuitzio principalmente.

Áreas descubiertas: En esta clase se consideran las zonas que han sido desprovistas de vegetación y que por lo tanto experimentan el fenómeno de la erosión que es la degradación y pérdida del suelo (INEGI, 2009).

4.5.2.2. Vegetación.

Bosque de Pino: Este tipo de vegetación se presenta de manera discontinua en altitudes que van de los 2100 hasta los 2700 msnm, a lo largo de la porción montañosa que corre desde la zona de Los Azufres, en el extremo noreste de la cuenca, siguiendo una dirección NE-SW, hasta la región suroeste de la cuenca, donde se encuentran los cerros El Burro, El Frijol y La Nieve. El bosque de pino es siempre verde con alturas que varían de 8 a 25 m, alcanzando en ocasiones los 30 m. Las especies de pino de más amplia distribución en el área son: *Pinus leiophylla*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus michoacana*, seguidos de *Pinus lawsonii* y *Pinus teocote* (Ortega, 2003).

Bosque de Encino: Esta es una comunidad característica de las zonas montañosas junto con los pinares, con los cuales guarda relaciones muy complejas,

compartiendo afinidades ecológicas generales, por lo que es frecuente encontrar bosques mixtos de *Quercus* y *Pinus*, aunque los bosques de encino también guardan relación con los de *Abies* y con el bosque mesófilo de montaña. En general, los encinares son una comunidad muy perturbada en la cuenca de Cuitzeo debido a las actividades del hombre. Las especies más comunes son *Quercus castanea*, *Quercus crassipes*, *Quercus candicans*, *Quercus magnoliifolia* y *Quercus rugosa* (Ortega, 2003).

Bosque de Oyamel: Esta comunidad tiene como especie dominante a *Abies religiosa*, la cual se localiza generalmente entre los 3000 y 3300 msnm. Crece sobre suelos arenosos profundos con abundante materia orgánica, en laderas de pendiente pronunciada y clima templado húmedo. Cuando presenta poca perturbación estos bosques son bastante densos, impidiendo que la luz llegue al sotobosque, el cual generalmente está poco desarrollado. Dentro de la cuenca esta comunidad ocupa una superficie pequeña, restringida a las partes altas de cerros como El Tzirate, El Burro, La Nieve y El Fríjol en la porción suroeste y en la región de Los Azufres, al noreste (Ortega, 2003).

Selva baja caducifolia: Esta es una comunidad arbórea de 6 a 8 m de alto, aunque en ocasiones puede alcanzar los 12 m; con troncos mayores de 10 cm de diámetro. Existe la presencia de ésta al oeste de la ciudad de Morelia, entre los 1900 y los 2000 msnm, también es posible observar pequeñas áreas con este tipo de vegetación al norte del Lago de Cuitzeo, aunque lo reportando en el presente estudio podrían ser fases sucesionales avanzadas del matorral subtropical. Una característica de esta vegetación es que la mayoría de las especies del estrato arbóreo pierde el follaje de 6 a 9 meses. Entre las especies que lo conforman tenemos a *Bursera bipinnata*, *Bursera fagaroides*, *Ceiba aesculifolia* en el estrato arbóreo, mientras que en el arbustivo es común encontrar *Acacia farnesiana*, *Desmodium pringlei*, y *Opuntia spp.* (Ortega, 2003).

Bosque cultivado: Este bosque se obtiene mediante siembra o plantación de especies maderables nativas y/o exóticas adaptadas ecológicamente al sitio. Estas

plantaciones tienen fines de conservación y/o restauración o para fines comerciales. Se realizan en tierras que, por sus condiciones naturales, ubicación y aptitud, son susceptibles de forestación o reforestación. En el caso de la cuenca se encuentran principalmente alrededor de la ciudad de Morelia, donde se han establecido principalmente plantaciones de Eucalipto, Pino y Cedro blanco.

Bosque mesófilo de montaña: Éste bosque se caracteriza principalmente por la presencia frecuente o persistente de nubes a nivel de la vegetación. Esta definición basada en el clima refleja la importancia de las nubes o niebla para la ecología de este ecosistema. Son un grupo de comunidades distribuidas en las montañas, las cuales poseen estructura, afinidad florística y composición de especies diversas. Se puede decir que se caracteriza por presentar en su dosel una composición de especies donde predominan especies de clima templado, por ejemplo algunas especies de encino y pino. En la cuenca de Cuitzeo se encuentra localizado al sur del municipio de Indaparapeo y sureste del municipio de Charo, en partes montañosas y más altas (CONANP, 2011).

Pastizal: Es un conjunto de biocenosis diversas, tanto en composición florística como en condiciones ecológicas. En la cuenca, se localiza frecuentemente en zonas planas o de topografía ligeramente ondulada, con menos frecuencia sobre declives pronunciados. El pastizal forma un mosaico complejo con el matorral subtropical y los bosques de pino y encino. En muchos casos esta comunidad es el resultado de la modificación de la vegetación original por factores humanos (CONANP, 2011).

Vegetación acuática: También llamada hidrófila, se desarrolla en zonas acuáticas o húmedas como lagos, estanques, pantanos y orillas de los ríos. Consiste en plantas que crecen enraizadas en el fondo con hojas grandes que sobresalen del agua cubriendo grandes áreas, como el manglar, popal, tular, carrizal, vegetación flotante, sumergida y subacuática. En la cuenca se encuentra principalmente en el lago de Cuitzeo y lago de Queréndaro. Existe presencia principalmente de tular, carrizal y

vegetación flotante, esta última en la actualidad está siendo de alto riesgo para los cuerpos de agua por su propagación exponencial (CONANP, 2011).

4.5.3. Validación de la clasificación del año 2014.

Consistió en seleccionar mediante un procedimiento aleatorio, puntos con colores típicos y atípicos en la imagen de satélite clasificada del 2014 que representan diferentes tipos de vegetación, e ir al campo para comprobar si en efecto el color y la clasificación corresponde a la vegetación señalada. A partir de estas observaciones, se hacen los ajustes que haya lugar en la interpretación cartográfica de la imagen satelital antes citada. Para este caso de estudio se realizaron 5 recorridos de verificación de campo, durante los cuales se levantaron 89 sitios de verificación, estos recorridos se llevaron a cabo en el periodo de septiembre-noviembre del año 2014. Con la información anterior se elaboró una *matriz de confusión* para obtener la exactitud de la clasificación realizada.

Al contar con la imagen clasificada (año 2014) y la información de los puntos de verificación de campo antes mencionados, se generó la “*matriz de confusión*”, ya que recoge los conflictos presentes entre categorías. En esta matriz las columnas suelen indicar las clases de referencia y las filas las categorías deducidas de la clasificación. Ambas tendrán el mismo número y significado, por lo tanto, se trata de una matriz cuadrada $n \times n$, donde n es el número de categorías. Cada elemento de la matriz está ocupado por un número que representa la cantidad de unidades de la muestra que, asignadas a la categoría que marca su fila, realmente la verificación ha demostrado pertenencia a la clase que indica su columna. La diagonal de la matriz expresa el número de puntos de verificación donde se produce un acuerdo entre las dos fuentes (imagen y realidad), mientras que los elementos fuera de la diagonal suponen errores de clasificación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa. Los residuales en columnas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa, mientras los residuales en filas implican

cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad. En definitiva, representan los errores de omisión y de comisión respectivamente (Anexo 1).

4.5.4. Interpretación visual y digitalización del uso del suelo y vegetación de las imágenes del 2001.

Los polígonos de uso de suelo y vegetación obtenidos de la clasificación de la imagen satelital del año 2014 fueron sobrepuestos a la imagen satelital del 2001, posteriormente mediante análisis visual e interpretación de estas imágenes se modificaron los polígonos en los que se detectaron cambios de acuerdo al método citado anteriormente, de esta forma se obtuvo el mapa de uso del suelo y vegetación para el año 2001.

4.5.5. Análisis de cambio de uso de suelo y vegetación mediante SIG.

Para realizar el análisis de los cambios de uso de suelo y vegetación, se utilizó el módulo de Idrisi llamado "*Land Change Modeler for ecological sustainability*", el cual fue desarrollado específicamente como una aplicación orientada al análisis de cambio de uso del suelo y vegetación.

Para realizar este análisis, Idrisi requiere 4 insumos en formato raster; las clasificaciones digitales de los 2 periodos (2001 y 2014) las cuales deben contener el mismo número de categorías, así como un modelo digital de elevación y un mapa de caminos y carreteras del área de estudio, es importante mencionar que éstos insumos deben tener el mismo tamaño y la misma resolución.

4.5.6. Determinación de la tasa de cambio anual.

Al contar con la información generada con la herramienta del SIG Idrisi, se procede a calcular la tasa de cambio anual de uso del suelo y vegetación utilizando la fórmula descrita en el Marco Teórico.

4.6. Análisis de las probabilidades de transición.

Con los mismos archivos utilizados para la elaboración del análisis de cambio de uso del uso y vegetación de los años 2001 y 2014, se procedió a realizar el análisis de probabilidades de transición en el SIG Idrisi, mediante su herramienta de análisis temporal "*Markov*"; la cual genera una proyección a través del tiempo; arrojando como resultado una matriz de probabilidad de cambio, misma que sirve para analizar y cuantificar los cambios que podrían presentarse en los próximos 13 años (2014-2027) en el área de estudio, bajo las mismas condiciones que se presentaron durante los años analizados.

5. RESULTADOS.

5.1. Clasificación y validación de la imagen satelital del año 2014.

En el mapa que se obtuvo derivado del análisis, interpretación y digitalización realizada para el año 2014 se pueden identificar principalmente las áreas agrícolas, las cuales cubren un 38 % aprox. (152254 ha) de la superficie total de la cuenca de Cuitzeo, seguido por las áreas boscosas de Pino, Encino y sus asociaciones las cuales cubren el 24 % aprox. (98661 ha) y la selva baja caducifolia con un 12.8 % aprox. (51381 ha) (Figura 11), seguidos por los cuerpos de agua con un 7.9 % (31582 ha), los pastizales y las áreas urbanas que cubren el 7.1% (28662 ha) y 5.7% (22807 ha) respectivamente.

En lo que respecta a las otras asociaciones vegetales se encuentran los bosques de oyamel y mesófilo de montaña los cuales cubren aprox. el 0.1% (3753 ha), y el bosque cultivado que cubre el 0.8 % (3271 ha). Finalmente se encuentra las áreas con vegetación acuática que cubren un 1.9 % aprox. (7402 ha), es importante mencionar que gran parte de esta vegetación acuática es superficial, por último están las áreas descubiertas con un 0.1 % aprox. (455 ha) de la superficie total de la cuenca de Cuitzeo (Figura 9).

La fiabilidad global de la clasificación de la imagen más reciente (2014) fue del 91.1%, esta fiabilidad es considerada aceptable y se encuentra dentro del rango de fiabilidad reportada en diversos estudios que emplean criterios espectrales y visuales para la clasificación.

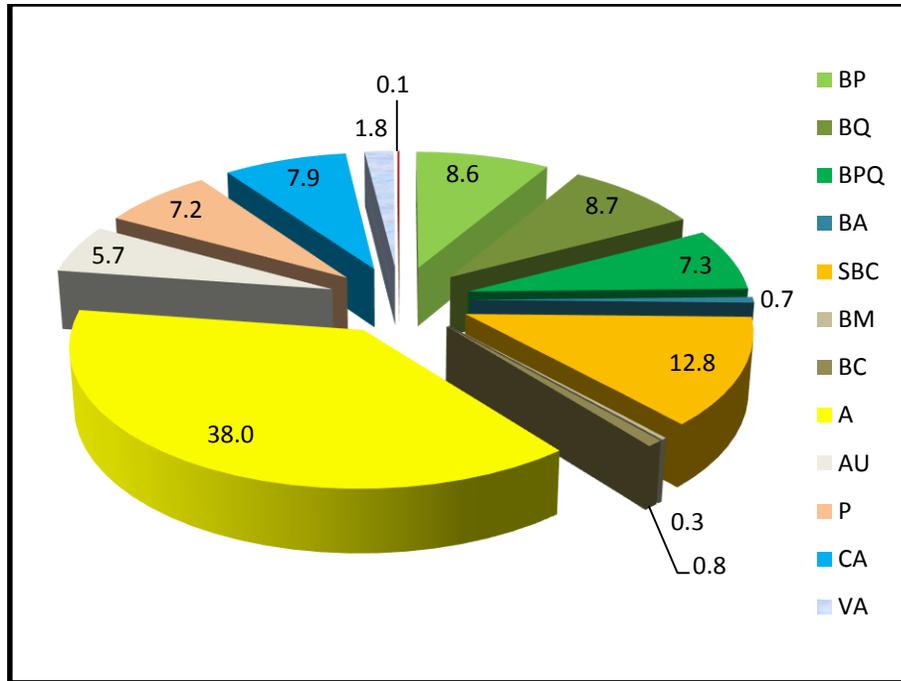


Figura 9. Porcentaje de superficies en la clasificación del año 2014.

El error de omisión indica las áreas que perteneciendo a una categoría, no fueron incluidos en ella. Los errores de omisión más altos (Cuadro 7) fueron para las categorías de Pastizal con un 16.67%, que fue confundido con lo clasificado como selva baja caducifolia, que para éste caso en particular, son áreas de matorral subtropical con cierto grado de perturbación que fueron incluidas dentro de dicha clase, el error de omisión de la selva baja caducifolia fue de 14.29%, lo cual se debió a que en algunas áreas se confundió con pastizales.

En lo que respecta a las áreas agrícolas el error de omisión fue de 11.2%, ya que hubo un punto de verificación donde se confundió con pastizal, por último están las categorías de bosque de encino el cual tiene un error de omisión del 10% al confundirse con la selva baja caducifolia, siendo estas áreas principalmente de transición y el bosque de pino-encino que resultó con un error del 8.7% al confundirse con el bosque de Pino.

El error por comisión, por el contrario al de omisión, representa las áreas que se incluyeron en una categoría perteneciendo realmente a otra (Cuadro 7). Los errores de comisión más altos fueron para las áreas de pastizal con un 44.46%, que se confundieron con áreas agrícolas y la selva baja caducifolia, sobre todo en zonas arbustivas degradadas o perturbadas. La selva baja caducifolia tuvo un error de comisión de 14.29%, esta categoría se confundió tanto con bosque de encino como con áreas de pastizal. Por último se encuentra el bosque de pino con 22.2% al confundirse principalmente con bosques de pino-encino sobre todo en zonas de transición o bien en áreas donde existe vegetación secundaria. Para el caso de la clasificación presentada, se obtuvo una fiabilidad del productor global de 92.4%, y fiabilidades del productor entre 83 y 100% para todas las categorías. Es importante mencionar, que se produjo un alto error de comisión, lo que implica que la probabilidad de que una zona clasificada en el mapa como tal categoría lo sea realmente mediana o baja. Esto supone cierto riesgo para el usuario, aun así la fiabilidad del usuario fue de 89.89%, y a nivel de categorías fue entre 77 y 100% para la mayoría, excepto las áreas de pastizal que tuvieron un error de comisión del 44.46%.

Cuadro 7. Matriz de confusión.

Tipo de vegetación	BP	BQ	BPQ	BA	SBC	BC	A	P	Fiabilidad del productor (%)		Error de omisión (%)
BP	7								100		0
BQ		18			2				90.0		10.0
BPQ	2		21						91.3		8.7
BA				2					100		0
SBC					18			3	85.71		14.29
BC						1			100		0
A							8	1	88.88		11.12
P					1			5	83.33		16.67
Fiabilidad del usuario (%)	77.8	100	100	100	85.71	100	100	55.55	89.89	92.4	7.6
Error de comisión (%)	22.2	0	0	0	14.29	0	0	44.45	10.11		Fiabilidad global 91.1

5.2. Clasificación de la imagen satelital del 2001.

De los polígonos obtenidos en la clasificación del 2014, se le sobrepuso la imagen del 2001, por medio de análisis e interpretación visual se fueron modificando los

polígonos en donde se detectaba algún cambio en los patrones del uso del suelo y tipos de vegetación (Figura 12). Como resultado se observó un patrón similar en la distribución espacial y superficie de los tipos de uso del suelo y vegetación obtenido para el año 2014, aunque debido al tamaño del área de estudio al momento del análisis de las dinámicas de cambio, si se observaron cambios significativos.

Para el año 2001 se identificaron igualmente que en 2014 principalmente las áreas agrícolas, que cubrían un 37.4% aprox. (149506 ha) de la superficie total de la cuenca de Cuitzeo, las áreas boscosas de Pino, Encino y sus asociaciones las cuales cubrían el 25.4% aprox. (101615 ha) y la selva baja caducifolia con un 13.6 % aprox. (54340), seguidos por los cuerpos de agua con un 8.7% aprox. (34670 ha), los pastizales y las áreas urbanas que cubrían el 7.2% (28842 ha) y 4.7% (18637 ha) respectivamente. Para las otras áreas forestales dio como resultado para el caso del bosque de oyamel y el bosque mesófilo de montaña el 0.1% aprox. (3760 ha), y el bosque cultivado que cubría el 0.9 % (3471 ha). Finalmente se encuentra las áreas con vegetación acuática que cubría un 1.3 % aprox. (5107 ha), finalmente están las áreas descubiertas con un 0.1 % aprox. (273 ha) de la superficie total de la cuenca de Cuitzeo (Figura 10).

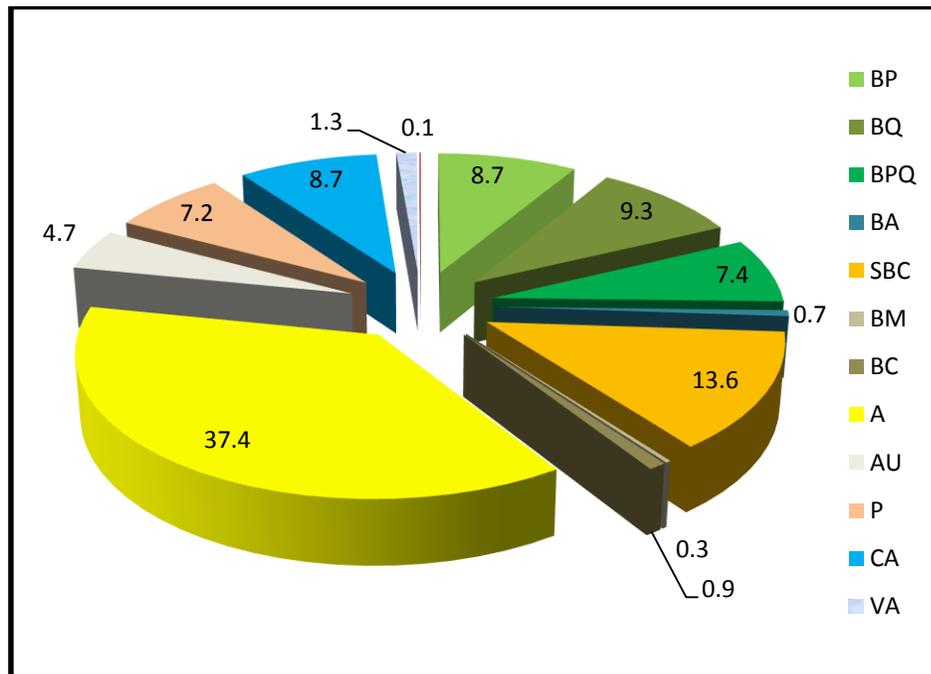


Figura 10. Porcentaje de superficies en la clasificación del año 2001.

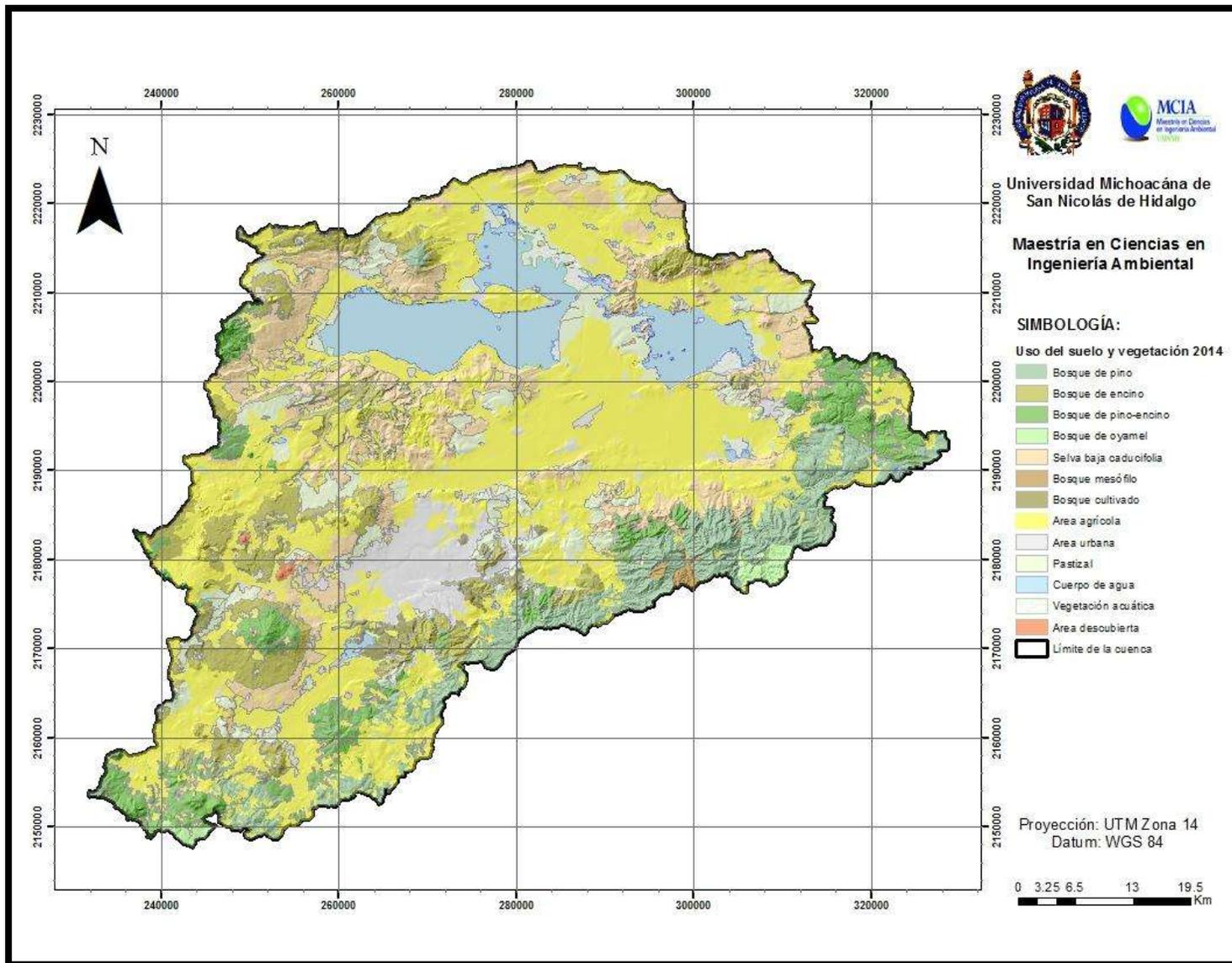


Figura 11. Usos del suelo y vegetación del año 2014.

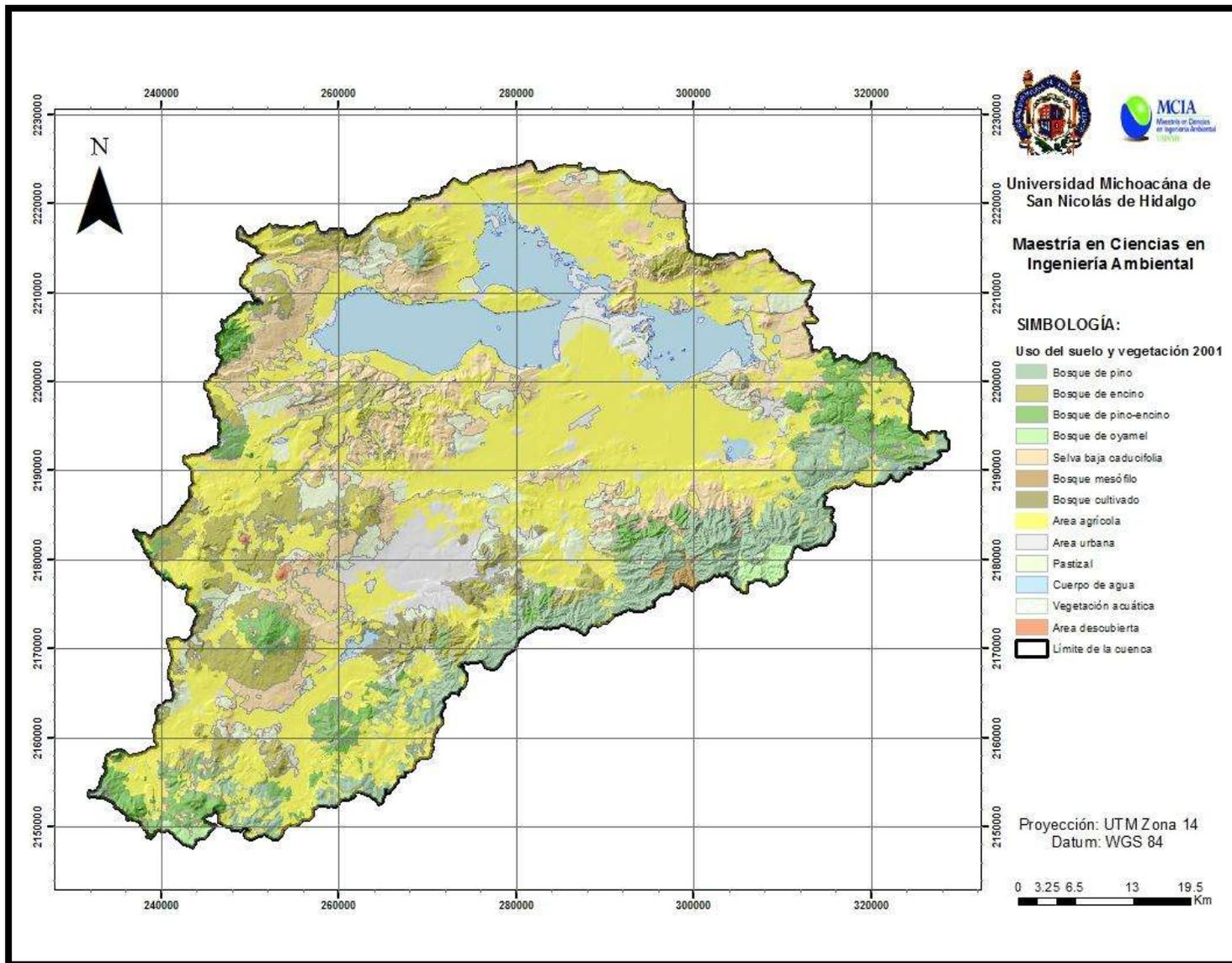


Figura 12. Usos del suelo y vegetación del año 2001.

5.3. Cambios netos durante el periodo 2001-2014.

En cuanto a los cambios netos durante el periodo 2001-2014 se observaron cambios significativos en el bosque de encino el cual perdió una superficie de 2236 ha aprox., otro ecosistema natural afectado notablemente fue la selva baja caducifolia la cual perdió 2959 ha aprox., también los que han sufrido una notable pérdida son los cuerpos de agua con 3088 ha. aprox., como se mencionó anteriormente causado principalmente por la invasión de vegetación acuática superficial principalmente como es el caso del lirio; en cuanto a superficie ganada se destacan las áreas urbanas con 4171 ha, las áreas agrícolas con 2748 ha., siendo éstas clases las que han contribuido principalmente a la pérdida y fragmentación de los ecosistemas boscosos y por último citar la vegetación acuática con 2295 ha la cual está directamente relacionada con la pérdida de superficie de los cuerpos de agua. Si bien, las pérdidas que se tuvieron en áreas boscosas como el bosque de pino y el bosque de pino-encino no son tan notorias de igual manera se vieron afectadas lo cual implica un impacto directo sobre el medio ambiente y los servicios ambientales que generan (Cuadro 8).

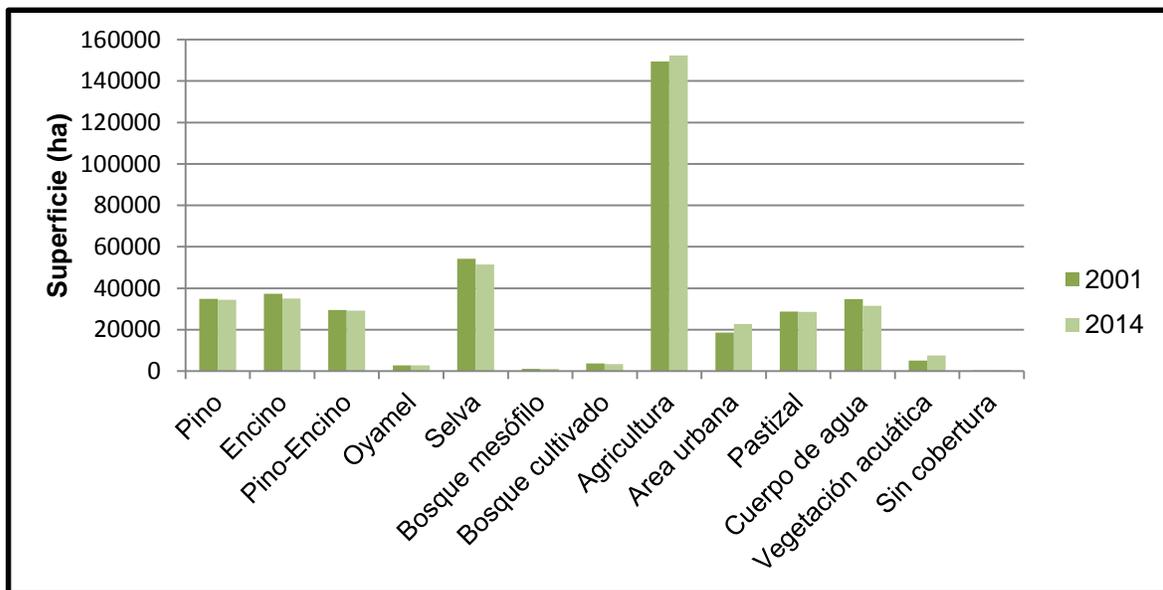
Cuadro 8. Cambios netos en la cuenca de Cuitzeo periodo 2001-2014.

Clase	Superficie (ha)				Cambio (ha)
	Año 2001	%	Año 2014	%	
Bosque de Pino	34663.13	8.7	34249.24	8.6	-414
Bosque de Encino	37250.61	9.3	35014.86	8.7	-2236
Bosque de Pino-Encino	29700.60	7.4	29397.04	7.3	-304
Bosque de Oyamel	2720.58	0.7	2713.51	0.7	-7
Selva baja caducifolia	54339.81	13.6	51380.95	12.8	-2959
Bosque Mesófilo de Montaña	1038.53	0.3	1038.69	0.3	0
Bosque cultivado	3474.01	0.9	3270.51	0.8	-204
Agricultura	149506.25	37.4	152254.39	38.0	2748
Área urbana	18636.65	4.7	22807.99	5.7	4171
Pastizal	28841.84	7.2	28662.32	7.1	-180
Cuerpo de Agua	34670.39	8.7	31582.41	7.9	-3088
Vegetación acuática	5107.41	1.3	7402.28	1.9	2295
Área descubierta	273.47	0.1	454.49	0.1	181

Nota: (-) Pérdida de superficie, (+) Ganancia de superficie.

En la figura 13 se puede observar un comparativo de la cuenca de Cuitzeo sobre el uso de suelo y los tipos de vegetación durante el periodo de análisis (2001-2014).

Figura 13. Comparativo de superficies en el periodo 2001-2014.



5.4. Tasa de cambio durante el periodo 2001-2014.

5.4.1. Persistencias y contribuciones de cambio.

Los cambios detectados durante este periodo, en lo que respecta a los tipos de vegetación fueron para el bosque de pino 414 ha aprox. pasaron a ser áreas agrícolas, para el bosque de encino 59 ha pasaron a ser selva baja caducifolia, que se trata de áreas de transición donde existía vegetación secundaria de encino, así mismo 23 ha pasaron a ser bosque cultivado, 970 ha a agricultura, 630 a áreas urbanas, 514 a pastizales y 38 ha a áreas desprovistas de vegetación, siendo esta categoría de las más afectadas junto con la selva baja caducifolia en donde 2147 pasaron a ser áreas agrícolas, 472 se convirtieron en áreas urbanas y 299 ha en pastizales. Para el caso del bosque de pino-encino 295 ha pasaron a ser 295 ha de áreas agrícolas y 9 ha de pastizal, en lo que respecta a los bosques de oyamel y mesófilo no se tuvieron cambios significativos por tratarse de zonas poco accesibles y bajo esquemas de conservación. Caso especial es el bosque cultivado el cual se vio afectado por el crecimiento de las

áreas urbanas con 143 ha y la agricultura con 143 ha y mínimamente se convirtieron a pastizales (Cuadro 9).

En lo que respecta a los cuerpos de agua 570 ha aprox. pasaron a ser pastizales, 213 ha a áreas agrícolas y más de 2000 ha se vieron cubiertas por vegetación acuática, para este caso en particular, no significa que se hayan perdido los cuerpos de agua como tal, sino que hubo un incremento sustancial de la vegetación acuática superficial sobre ellos. Para las áreas agrícolas 2009 ha se vieron afectadas por las áreas urbanas, en lo que respecta a los pastizales 919 ha se transformaron en áreas urbanas, 638 ha a agricultura y 23 ha han quedado desprovistas de vegetación.

En el cuadro 9 se puede observar en las celdas donde se cruzan las mismas categorías lo que corresponde a las áreas que se conservaron (persistencias), por otra parte se puede observar como la agricultura, las áreas urbanas y las áreas desprovistas de vegetación son las categorías que más han contribuido al cambio y por tal motivo son las que más han afectado los diferentes tipos de vegetación que existen dentro de la cuenca de Cuitzeo, sobre todo para el caso de las selvas bajas caducifolias y el bosque de encino por tratarse de estratos que se encuentran colindantes tanto con las áreas de agricultura como con las zonas urbanas.

Cuadro 9. Matriz de cambio de uso de suelo y vegetación periodo 2001-2014.

Sup (ha)	2014													Total
	BP	BE	BPQ	BO	SBC	BM	BC	A	AU	P	CA	VA	AD	
2001														
BP	34249							414						34663
BQ		35016			59		23	970	630	514			38	37250
BPQ			29397					295		9				29701
BA				2714				7						2721
SBC					51320			2147	472	299			105	54340
BM						1039								1039
BC							3247	76	143	8				3474
A								147483	2009				14	149506
AU									18636					18636
P								638	919	27262			23	28842
CA								213		570	31583	2304		34670
VA								9				5098		5107
SC													274	274
Total	34249	35016	29397	2714	51380	1039	3270	152254	22808	28662	31583	7402	454	

En la Figura 14 se muestran las tasas de cambio (%) durante el periodo de estudio (2001-2014) dentro de la cuenca de Cuitzeo, en donde cada barra corresponde a los tipos de vegetación y usos del suelo que en 2001 se encontraban bajo un mismo uso y las proporciones indicadas en cada barra muestran el porcentaje que cambio de clase y/o categoría.

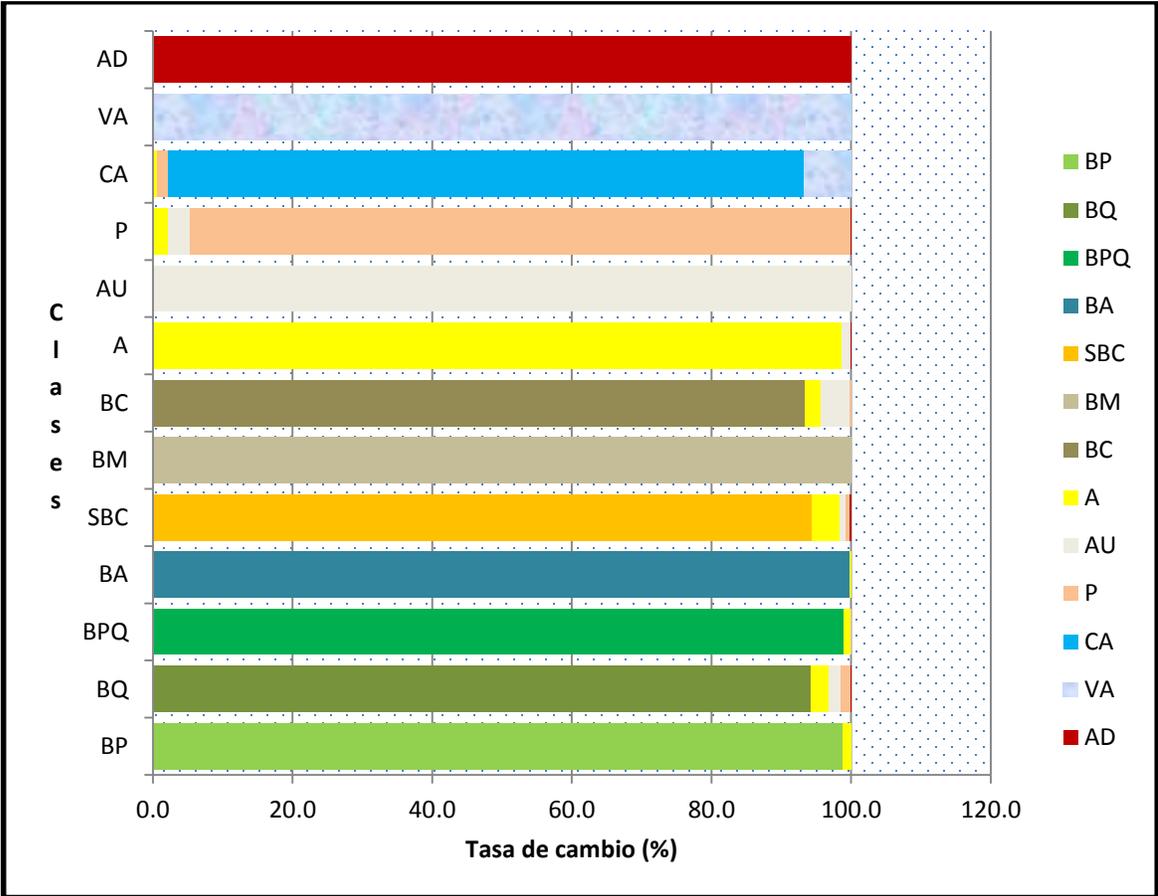


Figura 14. Tasa de cambio por categoría (%) en el periodo 2001-2014.

5.4.2. Tasa de cambio anual.

Las tasas de cambio obtenidas se expresan en porcentaje; negativa si la cobertura disminuyó y positiva si aumentó. La mayoría de las tasas de cambio anual obtenidas van desde 0.1 hasta 3.9%, para el caso de las áreas forestales todas las tasas fueron negativas destacando los bosques de encino y la selva baja caducifolia con -0.48% y -0.43% de pérdidas respectivamente, algo particular sucedió con los

cuerpos de agua y en especial con el lago de Cuitzeo el cual está siendo invadido por vegetación acuática superficial reflejado en la tasa que arrojó un -0.72% de pérdidas anuales. En lo que respecta a las tasas anuales positivas se destaca la zona urbana con el 1.57% de ganancia anual, le siguieron la vegetación acuática y las áreas descubiertas con un 2.9% y 3.99% de ganancia anual respectivamente (Cuadro 10).

Cuadro 10. Tasa de cambio anual por categoría.

Tipo de vegetación	Superficie 2001	Superficie 2014	Cambio (ha)	Años	Tasa de cambio	Tasa de cambio (%)	Ha/año
Bosque de pino	34663.13	34249.24	-414	13	0.00092	-0.09	-31.85
Bosque de encino	37250.61	35014.86	-2236	13	0.00475	-0.48	-172.00
Bosque de Pino-Encino	29700.60	29397.04	-304	13	0.00079	-0.08	-23.38
Bosque de Oyamel	2720.58	2713.51	-7	13	0.00020	-0.02	-0.54
Selva baja caducifolia	54339.81	51380.95	-2959	13	0.0043	-0.43	-227.62
Bosque mesófilo	1038.53	1038.69	0	13	0	0	0
Bosque cultivado	3474.01	3270.51	-204	13	0.00463	-0.46	-15.69
Agricultura	149506.25	152254.39	2748	13	0.00140	0.14	211.38
Área urbana	18636.65	22807.99	4171	13	0.01566	1.57	320.85
Pastizal	28841.84	28662.32	-180	13	0.00048	-0.05	-13.85
Cuerpo de agua	34670.39	31582.41	-3088	13	0.00715	-0.72	-237.54
Vegetación acuática	5107.41	7402.28	2295	13	0.02896	2.90	176.54
Área descubierta	273.47	454.49	181	13	0.03985	3.99	13.92

En el Cuadro 11 se muestra la gran variación en los resultados obtenidos en diversos estudios realizados a diferentes niveles de precisión. Aunque no es adecuado realizar comparaciones ya que los resultados que se obtienen en los diferentes estudios dependen de muchas variables como son: el tipo y resolución de las imágenes satelitales, métodos de interpretación y/o clasificación empleados, el área de estudio, el periodo de estudio, etc., para el presente estudio se escogieron reportes nacionales de periodos de tiempo similares al que se contempló el presente trabajo para que puedan servir de referencia, es importante mencionar que se tuvieron dificultades para hacer la

comparación, ya que existen algunas discrepancias con el presente estudio sobre todo en las clases utilizadas, ya que en los estudios a nivel nacional los bosques se engloban en una sola categoría a diferencia del presente trabajo en donde se separaron los diferentes tipos de vegetación, además de que en dichos estudios no se contempla la vegetación acuática y las áreas descubiertas.

Teniendo en cuenta lo anterior, de acuerdo con los datos reportados a nivel nacional se aprecia que los diferentes tipos de vegetación también presentan tasas de cambio negativas, aunque son más altas que lo reportado en el presente estudio, a excepción del estudio realizado por INEGI; para el caso de la cuenca de Cuitzeo se puede observar que existe una mayor diferencia con lo reportado en los otros estudios para los bosques de oyamel y mesófilo de montaña, esto debido a que tienen menor presencia dentro de la cuenca y se encuentran ubicadas en zonas mejor conservadas y con menor accesibilidad, caso contrario, el bosque de pino, el bosque de encino y el bosque cultivado, cuyas tasas de cambio se asemejan más con los otros estudios, esto se debe a que tienen mayor presencia dentro de la cuenca y se encuentran en zonas limítrofes, tanto con áreas agrícolas como con las manchas urbanas. Para el caso de la selva baja caducifolia a nivel nacional, se reportan tasas de cambio más altas, destacando la similitud con los resultados del estudio realizado por INEGI.

De igual modo es notable que la tendencia del aumento en las superficies de uso antrópico como lo son la agricultura y las áreas urbanas es constante en todas las fuentes consultadas, al igual que las tasas de cambio negativas que se están suscitando en los pastizales.

Un caso particular, es la diferencia que resultó en el presente estudio en lo que respecta a los cuerpos de agua con lo reportado por SEMARNAT (2009b), en donde se reporta una tasa de cambio positiva de 0.7, esto se debe principalmente a 2 aspectos; en el presente estudio se descontó superficie a los cuerpos de agua derivado de la presencia de la vegetación acuática que se ha incrementado notablemente en el periodo de estudio, lo cual no significa precisamente que ya no existan los cuerpos de

agua y por otra parte, también es posible asociarlo a la fecha de las imágenes que se emplearon para el caso del año 2014, ya que son de marzo y corresponde a la época seca lo que deriva en la disminución de la superficie de los cuerpos de agua.

Cuadro 11. Comparación de resultados con otros estudios.

Fuente	Presente estudio	SEMARNAT	INEGI	UNAM
Nivel	Cuenca	Nacional	Nacional	Nacional
Periodo	2001-2014	1981-1996	1976-1993	1993-2000
Bosque de pino	-0.09	-0.3	-0.09	-0.79
Bosque de encino	-0.48			
Bosque Pino-Encino	-0.08			
Bosque de Oyamel	-0.02			
Bosque mesófilo	0			
Bosque cultivado	-0.46			
Selva baja caducifolia	-0.43	-1.0	-0.57	-1.58
Agricultura	0.14	3.4	0.81	1.16
Área urbana	1.57	4.6	9.64	1.48
Pastizal	-0.05	-1.6	-0.15	-2.58
Cuerpo de agua	-0.72	0.7	-	-
Vegetación acuática	2.90	-	-	-
Área descubierta	3.99	-	-	-

5.5. Matriz de probabilidad de cambio.

La proyección realizada a través del tiempo con la aplicación de la herramienta "Markov" de Idrisi selva 17.0, arroja también resultados interesantes (Cuadro 12), al expresar la probabilidad de que una determinada clase (indicada en la columna) sea cambiada por cualquier otra o bien continúe siendo la misma (indicadas en la fila).

Dicho lo anterior, los resultados arrojaron que la probabilidad que el bosque de pino permanezca dentro de 13 años (2027) es de 88.7%, mientras que existe el 11.0% de probabilidad de que cambien por áreas agrícolas.

La probabilidad de que el Bosque de Encino permanezca es de 84.4% y de que pase a ser área agrícola es de 6%, 4% a área urbana y 3% a pastizal, en el caso del Bosque de pino-encino la probabilidad de que permanezca es de 88.96% y de que pase a ser área agrícola es del 10%, para el bosque de oyamel permanecerá el 89.77% y pasaría a ser agricultura el 9.9%, algo importante es lo proyectado para la selva baja caducifolia cuya probabilidad de permanecer es de 84.5% y de que pase a ser área agrícola es del 11.16%, 2.3% de cambiar a área urbana y solamente 1.5% de que pase a pastizal, en el caso del bosque mesófilo existen pocas probabilidades de cambio según la proyección, la probabilidad de permanecer para el caso del bosque cultivado es de 83.1% y de que pase a ser área agrícola es 7.1% y de 9.1 que pase a ser área urbana.

Por otro lado, la probabilidad de que las áreas agrícolas permanezca dentro de 13 años es de 88%, mientras que existe el 8.3% de probabilidad de que cambien por áreas urbanas y el 1.7% a pastizales. La probabilidad de que los pastizales permanezcan es de 83.3% y de que pase a ser área agrícola es de 8.7% y 7.3% a área urbana, para el caso de los cuerpos de agua la probabilidad de que permanezca es de 81.8% y de que pase a ser vegetación acuática es de 13.4%, 3.9% que pase a pastizal y solamente el 1.3% para que pase a área agrícola, caso particular el resultado que arrojó la vegetación acuática cuya probabilidad de permanecer es de 27.1% y de que pase a ser pastizal el 67.6% de probabilidad, por último esta la categoría de área descubierta cuya probabilidad de permanencia es de 89.9% y de que pase a ser agricultura es de 6.7% y que pase a bosque de encino el 3.3%.

A partir de estos resultados se encontró que la clase con mayor probabilidad de cambio es la vegetación acuática con 72.86%, seguida por los cuerpos de agua con 18.72%, la que tiene menor probabilidad de transformación es el bosque mesófilo con

0.1%, el resto de las clases se encuentran con la probabilidad entre el 11% y 16%. Las clases que tienen mayor probabilidad de que otras formen parte de ella es el pastizal con el 80.5%, la agricultura con el 85.2%, seguida por las áreas urbanas con el 32.19%. La que menos probabilidad tiene de ganar terreno respecto a las demás es el bosque mesófilo con el 0%, lo cual tiene lógica ya que estas zonas son características precisamente por sus características agroecológicas, además de que son áreas con poca accesibilidad y protegidas.

Cuadro 12. Probabilidad de transición por categoría.

	BP	BQ	BPQ	BA	SBC	BM	BC	A	AU	P	CA	VA	AD	PROB. TOTAL CAMBIO
BP	0.8874	0.0008	0.001	0	0	0	0	0.1107	0	0	0	0	0	0.1126
BQ	0.0003	0.8438	0	0	0.0051	0	0.0015	0.0694	0.0424	0.0349	0	0	0.0026	0.1562
BPQ	0.0024	0.0001	0.8896	0.0001	0.0005	0	0	0.1043	0.0002	0.0028	0	0	0	0.1104
BA	0	0	0.0026	0.8977	0	0	0	0.0997	0	0	0	0	0	0.1023
SBC	0	0.0008	0	0	0.8453	0	0	0.1116	0.0226	0.0147	0	0	0.0049	0.1547
BM	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083	0.9	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083	0.1
BC	0	0.0003	0	0	0	0	0.8314	0.0713	0.091	0.004	0.0017	0.0004	0	0.1686
A	0.0022	0.0023	0.0013	0	0.0088	0	0.0013	0.8804	0.0833	0.0177	0.0009	0.0012	0.0005	0.1196
AU	0	0.0002	0	0	0.0044	0	0	0.0011	0.8858	0.0073	0.0008	0.0002	0	0.1142
P	0	0.0004	0	0	0.0011	0	0.0002	0.0872	0.0732	0.8333	0.0018	0.001	0.0018	0.1667
CA	0	0	0	0	0.0001	0	0	0.0129	0.0009	0.0394	0.8128	0.134	0	0.1872
VA	0	0	0	0	0	0	0	0.0086	0	0.6764	0.0436	0.2714	0	0.7286
AD	0	0.0336	0	0	0	0	0	0.0673	0	0	0	0	0.8991	0.1009
PROB. TOTAL CAMBIO	0.0132	0.0468	0.0132	0.0084	0.0283	0	0.0113	0.8524	0.3219	0.8055	0.0571	0.1451	0.0181	

6. CONCLUSIONES.

Las imágenes obtenidas por los satélites Landsat 7 y 8 y la interpretación visual, son herramientas confiables para la identificación de los usos del suelo y vegetación y para determinar la tasa de cambio anual. Así mismo, la herramienta "*Land Change Modeler*" de Idrisi permite realizar un análisis confiable del cambio de uso de suelo y vegetación bitemporal.

La mayoría de las clases y/o categorías identificadas presentaron un cambio, en general 8 de los 9 tipos de vegetación identificados presentaron tasas de cambio anual negativas, destacándose por el grado de deforestación el bosque de encino (-0.475%) y la selva baja caducifolia (-0.43%), seguido por el bosque de pino (-0.092%) y el bosque de pino-encino (-0.079%) provocado principalmente por el incremento de las áreas urbanas y la agricultura. También destacar la conservación del bosque de oyamel (-0.02%) y el bosque mesófilo de montaña (0.0%).

En lo que respecta a los usos antrópicos, presentaron tasas de cambio anual positivas, destacando el incremento sustancial de las áreas agrícolas (0.14%) y urbanas (1.566%). Para el caso de los cuerpos de agua se presentó una tasa de cambio negativa provocada principalmente por la proliferación de vegetación acuática superficial.

Conocer las dinámicas cambio de uso del suelo en la cuenca de Cuitzeo durante el periodo de estudio, es una herramienta importante para la planeación ambiental, ya que permite observar el impacto ambiental derivado del proceso de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales, provocado principalmente por el incremento poblacional. Lo anterior, permite establecer estrategias que permitan sentar las bases para el desarrollo sustentable de una determinada región.

CAPÍTULO II

"ESTIMACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO EMPLEANDO HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESPACIAL EN LAS ÁREAS FORESTALES DE LA CUENCA DE CUITZEO"

1. INTRODUCCIÓN.

El cambio climático es un fenómeno que ha recibido mucha atención por la comunidad científica a nivel internacional. Otros actores sociales tales como los tomadores de decisiones, empresarios y miembros de organizaciones no gubernamentales también han enfocado su atención hacia este fenómeno. El inicio de esta problemática se relaciona con la revolución industrial, que comenzó hace aproximadamente 200 años con el incremento de la emisión de los GEI en países europeos como Inglaterra y Francia (INECC, 2006). La evidencia más clara del efecto de los GEI en la atmósfera es el hecho de que en la última década cada año se reporta como el más caluroso del milenio. La década de los noventa resultó ser la más calurosa en mucho tiempo. El año 1998 fue el más caliente del siglo XX, pero el 2001 lo superó. Otras evidencias como el aumento en el nivel del mar (tasa global de incremento de 1 a 2 mm anuales en el siglo XX), el deshielo de los glaciares o los potenciales impactos en la salud, generan preocupación en la población mundial (Chanton, 2002). Las variaciones en el clima son producto de la variabilidad interna dentro del sistema climático y de factores externos tanto naturales como antropogénicos. La influencia de factores externos en el clima permite ampliar comparaciones mediante el concepto de forzamiento radiativo. Un forzamiento radiativo positivo, se produce por las crecientes concentraciones de GEI, calentando la superficie. El forzamiento radiativo negativo, es consecuencia del aumento de ciertos tipos de aerosoles y tiende a enfriar la superficie (PICC, 2001). El CO₂ es el gas al que se le ha dado mayor importancia de los GEI por su abundancia y representa el 60% del total de los cambios en las concentraciones de todos ellos. El ritmo de incremento en la concentración de este gas fue de 1.5 ppmv por año en los últimos dos decenios del siglo XX; en los años noventa la tasa de incremento anual varió de 0.9 a 2.8 ppmv, la concentración de este gas en 2005 fue de 379 ppmv (PICC, 2005). La consecuencia de la concentración de gases con efecto invernadero a ciertos niveles en la atmósfera está ocasionando el "cambio climático" en el planeta tierra, lo que generará amplias, variadas y complejas consecuencias para el desarrollo del hombre y en todas las formas de vida hasta ahora conocidas.

Los bosques como ecosistemas terrestres contribuyen de manera importante a la mitigación del cambio climático gracias a su influencia en el ciclo global del carbono, ya que constituyen almacenes de grandes cantidades de este elemento por medio de la producción de biomasa y en el suelo por medio de la incorporación de materia orgánica, intercambian carbono por oxígeno con la atmósfera a través de la fotosíntesis y respiración; pero se convierten en fuente de carbono atmosférico cuando sufren alguna perturbación (Brown, 1997a).

El hecho de determinar de manera adecuada la biomasa presente en un bosque representa la base para conocer los montos de carbono presente en sus componentes (Locatelli y Leonard, 2001). La información generada en este tipo de estudios adquiere doble importancia, debido a que con ello se conoce numéricamente la cantidad de CO₂ almacenado en los bosques naturales existentes, pero también permite conocer el potencial de fijación de las plantaciones comerciales y no comerciales y establecer las bases para expresarlo y administrarlo como servicio ambiental (Schelegel *et al.*, 2000).

Con el empleo de la información dasométrica del re-muestreo 2012 realizado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), transformado en carbono arbóreo aéreo, en el presente trabajo se desarrollaron modelos alométricos que permitirán estimar la captura de carbono de los árboles. Para obtener resultados satisfactorios, se generaron éstos modelos por género. La ventaja de los antes citados radica en que ya no es necesario derribar árboles para estimar el contenido de carbono. Así mismo en el presente trabajo, además de generar modelos alométricos, se aprovecharon y utilizaron herramientas de la teledetección, mediante el empleo de imágenes multiespectrales de mediana resolución Landsat 8 y con ayuda de un SIG se generaron mapas de carbono arbóreo aéreo de las zonas forestales de la cuenca de Cuitzeo, apoyados de técnicas matemáticas como es la regresión lineal, la cual permitió desarrollar un modelo de correlación, resultante de la relación entre el contenido de carbono arbóreo aéreo de los conglomerados de muestreo y los valores de reflectancia de los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y ajustado al suelo (SAVI).

1.1. OBJETIVOS.

1.1.1. General.

- Desarrollar una metodología mediante el empleo de imágenes satelitales, para la estimación de la captura de carbono arbóreo aéreo de zonas forestales de la cuenca de Cuitzeo.

1.1.2. Particulares.

- Obtener ecuaciones alométricas para determinar la captura de carbono en la biomasa arbórea aérea de los diferentes géneros forestales.
- Analizar si existe una correlación entre el carbono arbóreo aéreo y los índices de vegetación obtenidos con imágenes satelitales, a través de un análisis de regresión lineal.
- Generar mapas de captura de carbono arbóreo aéreo de las zonas forestales de la cuenca de Cuitzeo.

1.2. HIPÓTESIS.

- Mediante el empleo de índices de vegetación obtenidos con las imágenes satelitales, es factible desarrollar una metodología para la estimación confiable de la captura de carbono arbóreo aéreo de zonas forestales.

1.3. JUSTIFICACIÓN.

La deforestación y la degradación de ecosistemas forestales son temas que en la actualidad han adquirido una gran relevancia por las repercusiones que implican en la alteración de los ciclos hidrológicos, el cambio climático y el calentamiento global entre otros.

Los bosques y selvas han adquirido mayor relevancia por mitigar el CO₂, ya que constituyen almacenes de grandes cantidades de este elemento por medio de la producción de biomasa, intercambian carbono por oxígeno con la atmósfera a través de la fotosíntesis y respiración; pero además, se convierten en fuente de carbono atmosférico cuando sufren alguna perturbación. Ante este panorama, los servicios ambientales representan dentro de las políticas ambientales implementadas en México, una de las prioridades para mejorar las condiciones del medio ambiente.

Actualmente en México las metodologías utilizadas para la cuantificación de los reservorios de carbono en la biomasa arbórea aérea de las masas forestales, en su mayoría consisten en métodos destructivos y semidestructivos, los cuales requieren de muchos recursos tanto naturales debido al derribo del arbolado, como de recursos económicos y humanos. Por esta razón es importante el desarrollar una metodología aprovechando tecnología de punta como es el caso del empleo de imágenes satelitales y las herramientas de teledetección para realizar una estimación confiable de los reservorios de carbono que proporcionan los bosques y selvas, aportando información que permitirá coadyuvar para sentar las bases de una buena planeación ambiental para una determinada región en lo referente a los servicios ambientales.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Ciclo del Carbono.

El carbono es un componente básico de todos los compuestos orgánicos y se relaciona con la fijación de energía por medio de la fotosíntesis. El carbono y el flujo de energía están estrechamente relacionados. De hecho, la productividad de los ecosistemas se expresa en gramos de carbono fijado por metro cuadrado por año. La forma química de todo el carbono presente en los seres vivos y en los depósitos fósiles es el CO₂ atmosférico y el disuelto en los océanos de aguas de la Tierra (Smith y Smith, 2001). El análisis del ciclo del carbono muestra que en la atmósfera se encuentran cantidades muy pequeñas, pero sumamente activas y vulnerables ante las perturbaciones ocasionadas por el hombre, las cuales modifican el clima y los patrones climáticos, afectando directamente la vida sobre la tierra (Odum y Barret, 2008). Los almacenes de carbono se encuentran en los océanos, los suelos, reservas fósiles, los lechos de rocas, la atmósfera y la biomasa vegetal.

El ciclo del carbono se define como el flujo de éste, en sus distintas formas, entre la superficie terrestre, su interior y la atmósfera. La fotosíntesis, respiración y oxidación son los principales procesos de intercambio; este intercambio sucede entre seres vivos, la atmósfera, el suelo y el agua. Los cuatro depósitos de carbono son: la atmósfera, la biosfera terrestre (incluye los sistemas de agua fresca), los océanos y los sedimentos (incluye combustibles fósiles). Éstos están interconectados e intercambian carbono, siendo así, fuentes o sumideros (Figura 15). Los sumideros absorben carbono, mientras que las fuentes lo emiten. Por ejemplo, las plantas absorben carbono y se consideran sumideros; en cambio, los complejos industriales, así como el uso de combustibles fósiles, lo liberan, actuando como fuentes (Ciesla, 1996).

2.1.1. Flujos de Carbono.

Las plantas adquieren CO₂ atmosférico por difusión a través de sus estomas, y este gas es transportado a sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis. Cierta cantidad

regresa a la atmósfera, pero la cantidad fijada y convertida en carbohidratos en la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta (PPB). La mitad de la PPB se incorpora en los tejidos vegetales (hojas, tallo, raíces y tejido leñoso) y la otra mitad ingresa a la atmósfera como CO₂ a causa de la respiración autotrófica (Ra). 31 Pg = 1X10¹⁵ g y 2.12 Pg de carbono equivalen a 1 ppm en la concentración atmosférica de CO₂. La producción primaria neta (PPN) a nivel global se ha estimado en 60 Pg C año⁻¹. Casi todo el carbono fijado por vía de la PPN regresa por medio de dos procesos: la respiración heterótrofa (Rh) y la combustión por causas naturales o antropogénicas. La necromasa se incorpora al detritus y a la materia orgánica del suelo, donde se producen almacenes de carbono que regresan a la atmósfera en diferentes periodos. La producción neta del ecosistema (PNE) es la diferencia entre la fijación de carbono por la PPN y las pérdidas por la Rh, en ausencia de perturbaciones como fuego, cosecha, transporte por los ríos a los océanos y erosión. Cuando se toma en cuenta la pérdida por éstas perturbaciones, lo que queda es el carbono acumulado en la biósfera a nivel global, conocido como producción neta del bioma (PNB) (Jaramillo, 2005).

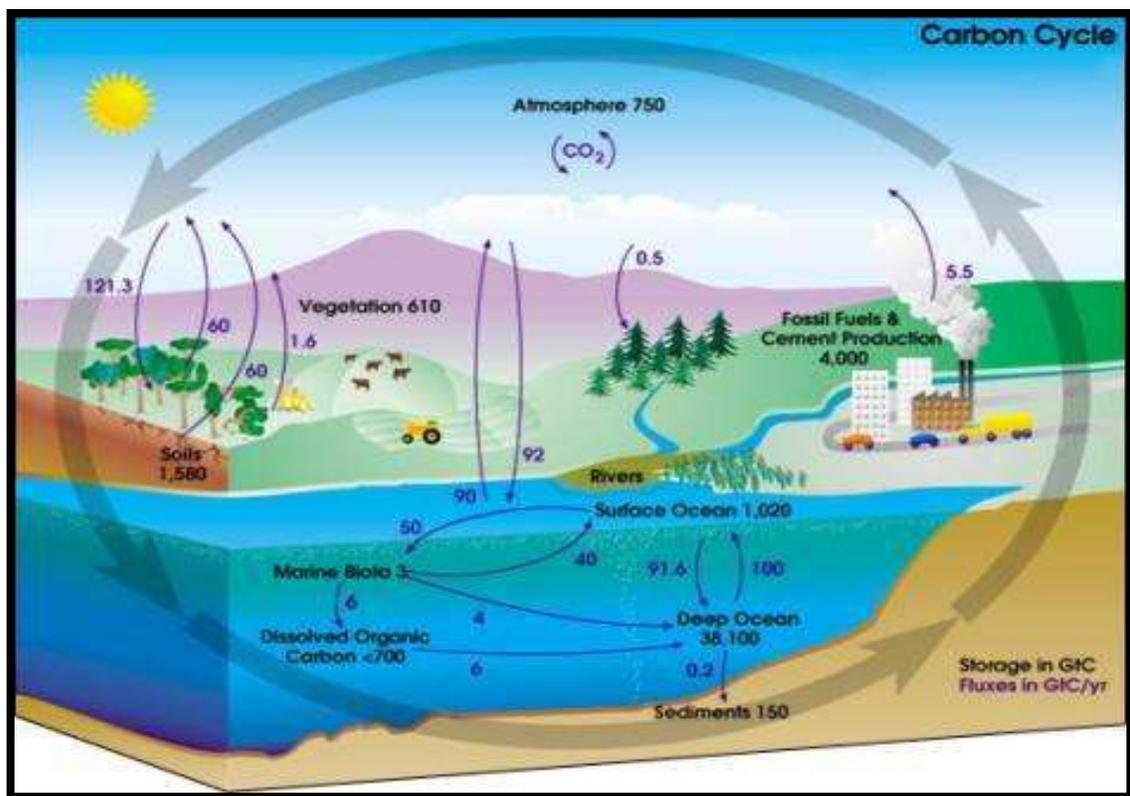


Figura 15. Ciclo del carbono (PICC, 2009).

2.2. El efecto invernadero.

2.2.1. Descripción del efecto invernadero.

A largo plazo, la tierra tiene que liberar la misma cantidad de energía que absorbe del sol. La energía solar entra al planeta como radiación de onda corta visible (240 Watt m^{-2}), una fracción de ella es reflejada por la superficie terrestre y la atmósfera (103 Watt m^{-2}). Una proporción significativa atraviesa la atmósfera y calienta la superficie (168 Watt m^{-2}). Ésta absorbe cierta porción y la otra es reenviada a la atmósfera en forma de radiación infrarroja (PNUMA, 1999).

El vapor de agua, CO_2 y otros "GEI" presentes en la atmósfera absorben gran parte de la radiación infrarroja enviada por la Tierra e impiden que pase directamente al espacio exterior. Simultáneamente, procesos naturales (radiación, corrientes de aire, evaporación, formación de las nubes y lluvias) transportan la energía a altas esferas de la atmósfera, la liberan al espacio y una parte retorna a la superficie terrestre. Debido a que estos procesos son más lentos e indirectos el planeta no puede irradiar libremente energía, de lo contrario, sería un lugar frío y sin vida, desolado y estéril como Marte (PNUMA, 1999).

Existen tres factores que influyen directamente en el balance de energía de la Tierra: afluencia total de energía, depende de la distancia de la tierra del sol y la misma actividad solar; la composición química de la atmósfera; y el albedo, definido como la capacidad de la superficie de la tierra para reflejar luz. El factor que ha variado significativamente en los últimos años es la composición química de la atmósfera (PICC, 2001).

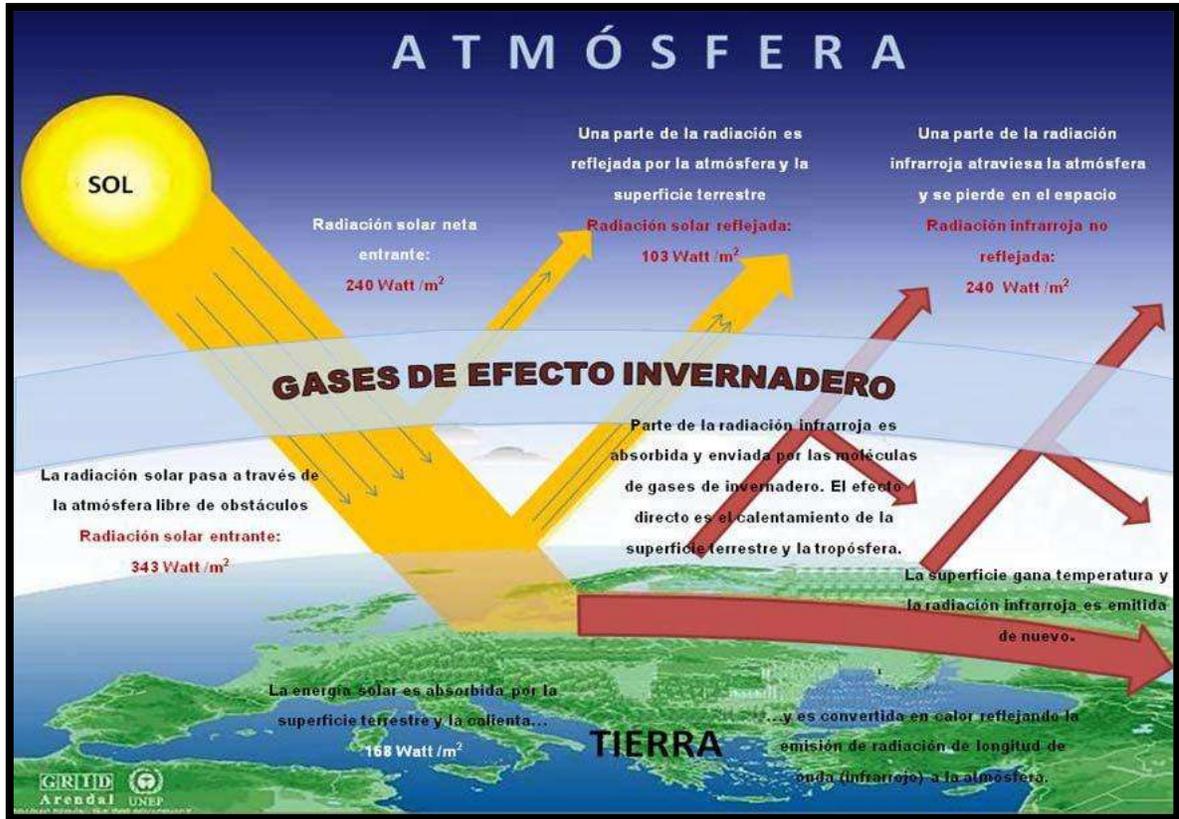


Figura 16. Efecto invernadero (IPCC, 2001).

Si las concentraciones de GEI se mantuvieran constantes, la temperatura del planeta se mantendría en equilibrio. Se sabe que el clima de la tierra está en función del balance radiativo de la atmósfera y este depende de la entrada de la radiación solar, actividad radiativa, concentración o abundancia de GEI, nubes y aerosoles (Ordoñez, 1999).

2.2.2. Gases de efecto invernadero (GEI).

Son aquellos gases presentes en la atmósfera, de origen natural o antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie terrestre, la tierra y las nubes. Los gases de efecto invernadero se dividen en dos tipos, los de efecto directo e indirecto. Los de efecto indirecto son aquellos que influyen en la concentración de otros

gases, por ejemplo, el ozono, que además de su atributo oxidante en la atmósfera baja, tienen la capacidad de atrapar la radiación infrarroja y filtrar radiación ultravioleta, tal como lo hacen los de “efecto directo” (PICC, 1995).

A partir de la revolución industrial (desde 1750 aprox.), la concentración de los gases de efecto invernadero se ha incrementado y ha perturbado el balance energético del sistema tierra-atmósfera. Las tendencias de aumento de concentraciones se le atribuyen en gran parte a las actividades humanas, principalmente al uso de combustibles fósiles, a la industrialización, al cambio en el ordenamiento de las tierras y a la agricultura (PICC, 1995).

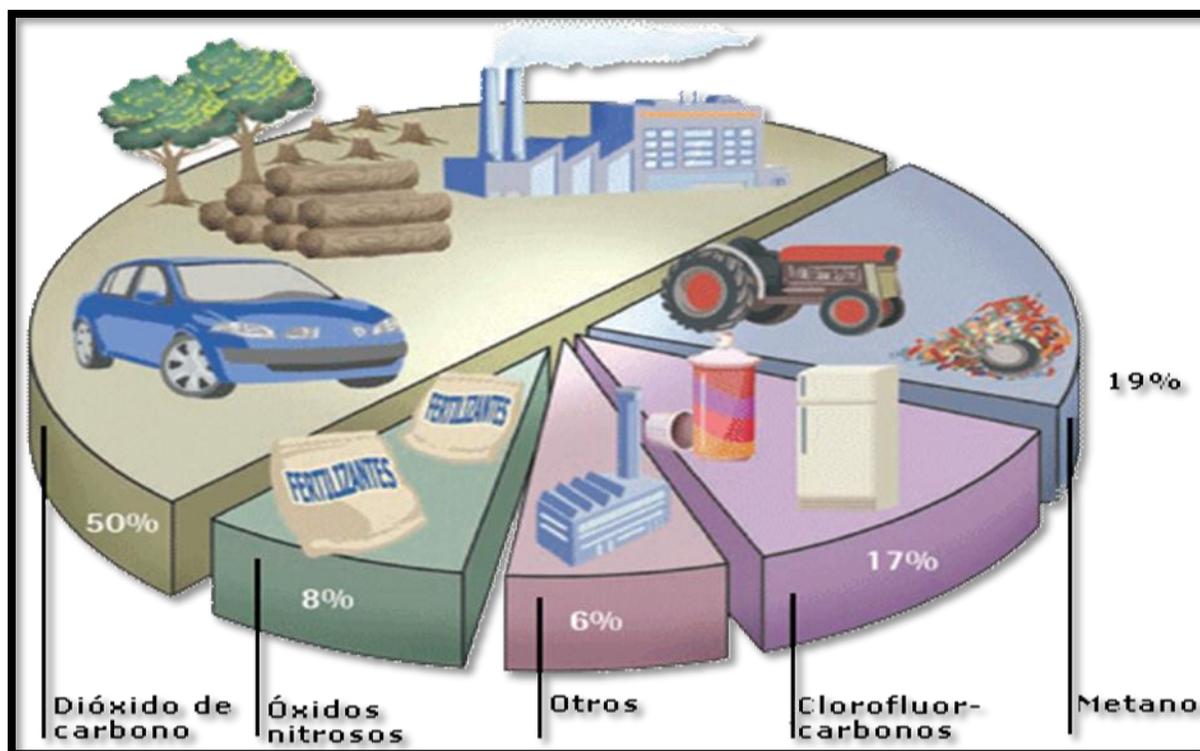


Figura 17. Porcentaje de emisiones de los GEI (PICC, 1995).

2.3. El dióxido de carbono en la atmósfera.

Las teorías que explican los cambios del clima en planeta son tan variadas como el mismo clima. Las más comunes lo atribuyen a cataclismos geológicos y erupciones de polvo volcánicas a variaciones a largo plazo en la radiación solar y excentricidades

en la órbita de la tierra. Solo la teoría del anhídrido carbónico, tiene como fundamento que la actividad humana tenga efecto en el clima (Plass, 1979). El CO₂ es considerado como uno de los GEI más importantes, tanto en términos de cantidad presente en la atmósfera como por sus potenciales efectos en el calentamiento global (Ciesla, 1996).

Su concentración ha variado través del tiempo; antes de la industrialización, durante la primera mitad del siglo XIX, los niveles de concentración de CO₂ oscilaban alrededor de las 270 ppmv. En 1958 se registró una concentración de 315 ppmv, incrementándose a 343 ppmv en 1984; y en las últimas décadas del siglo XX la concentración se elevó aún más alcanzando a principios del siglo XXI 379 ppmv. Durante este periodo se estima que el incremento medio anual es de 0.5 ppmv (IPCC, 2005).

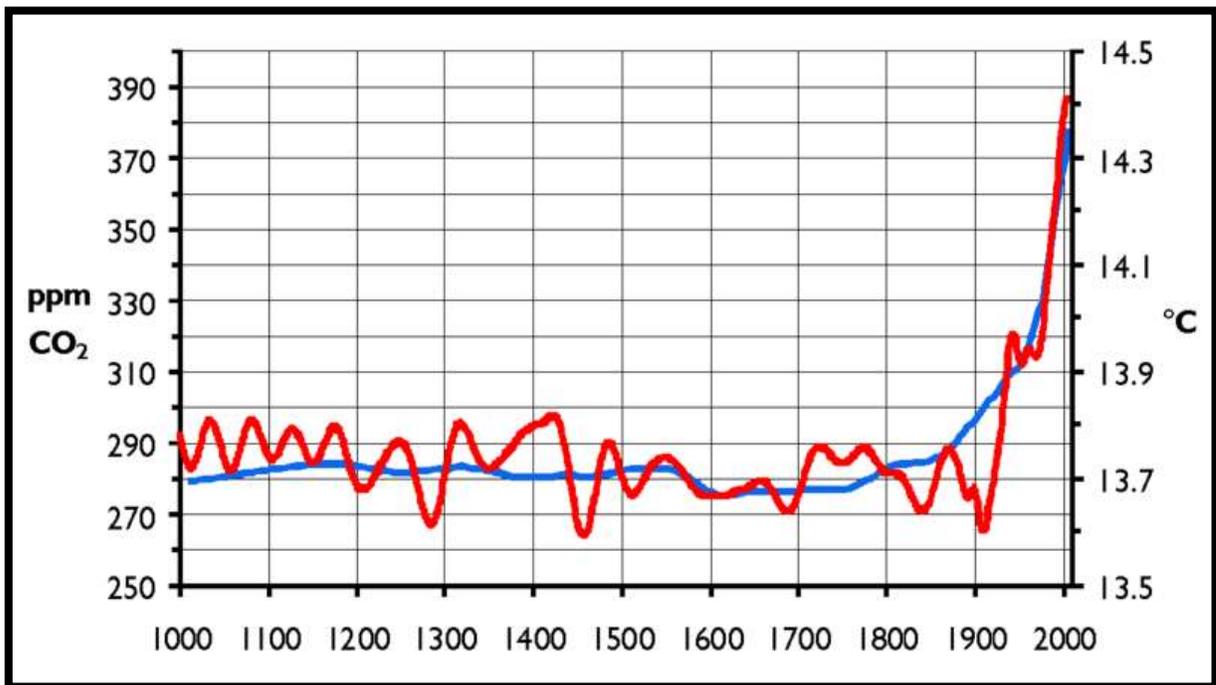


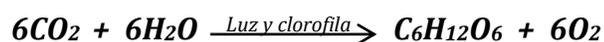
Figura 18. Variación en la concentración de CO₂ atmosférico (IPCC, 2005).

El CO₂ se elimina de la atmósfera mediante varios procesos que operan en varios momentos, teniendo un tiempo de permanencia en ella relativamente largo. Si se mantienen los niveles actuales de emisión para finales del siglo XXI, se estima que la concentración podría oscilar en las 500 ppmv. Para lograr la estabilización entre la tasa

de eliminación y la tasa de emisión es necesaria una reducción inmediata de las emisiones de 50 a 70 %, y proceder a más reducciones (PICC, 2005).

5.4. Fijación del carbono por medio de la fotosíntesis.

El crecimiento de las plantas y de la vegetación depende del balance entre la adquisición de carbono en forma de CO₂, mediante la fotosíntesis, y su pérdida también como CO₂, debido a la respiración. En esencia, la fotosíntesis es el único mecanismo que permite la entrada de energía al mundo viviente. La energía lumínica es incorporada como energía química a la materia viva, a través de procesos fotosintéticos que presentan cierta diversidad evolutiva y conducen a la absorción de carbono para formar moléculas orgánicas (Terradas, 2001). La reacción global de la fotosíntesis es la siguiente:



La fotosíntesis puede analizarse en dos fases: las reacciones fotoquímicas y el proceso de fijación de carbono por medio del Ciclo de Calvin.

2.5. Sumideros de carbono en áreas forestales.

De acuerdo a la CMNUCC, se define como *sumidero de carbono* a, "cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe o remueve un Gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un GEI de la atmósfera". Uno de los principales sumideros de carbono son los bosques. Lo anterior significa que si se emite GEI y existe un sumidero de carbono, parte de éste se fija o se bioacumula en un bosque y su concentración en la atmósfera disminuye.

Específicamente el CO₂ es absorbido por plantas y otros organismos fotosintéticos como las algas. Este CO₂ se fija o se convierte en biomasa a través de la fotosíntesis como ya se explicó anteriormente. Teniendo en cuenta que biomasa es

toda la materia orgánica de origen animal o vegetal que hay en el planeta, denominaremos a la biomasa proveniente de procesos fotosintéticos como "fitomasa". Cuando se habla de fitomasa, se tiende a creer que ésta se compone de los árboles en pie de un bosque, sin embargo, como se puede observar en la Figura 19, en un área boscosa se pueden identificar 5 reservorios de carbono.

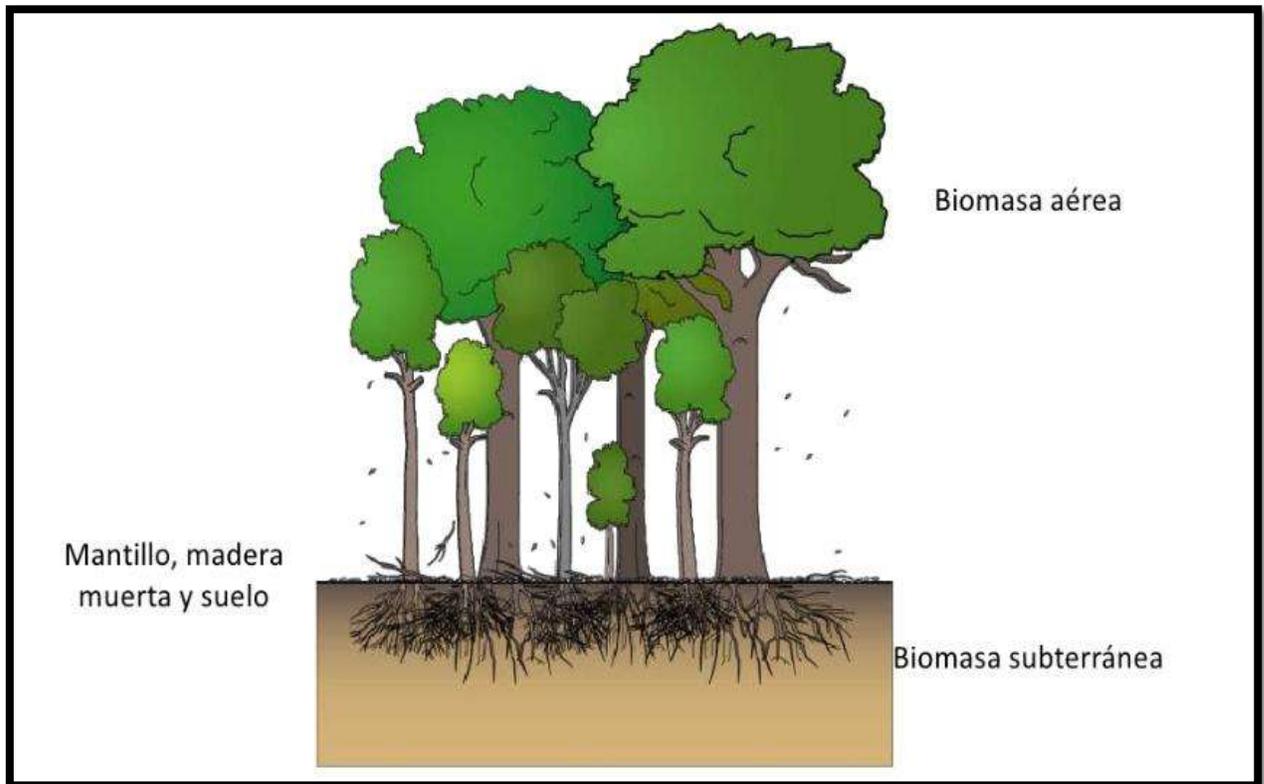


Figura 19. Reservorios de carbono que conforman un bosque.

La *biomasa aérea* abarca todos los troncos leñosos, ramas y hojas de árboles vivos, plantas rastreras, enredaderas y epífitas, así como las plantas del sotobosque y la vegetación herbácea. En el caso de los suelos agrícolas, incluye árboles, cultivos y maleza. La *biomasa subterránea* abarca las raíces, la fauna del suelo y los microorganismos. La *materia orgánica muerta* (necromasa) incluye árboles caídos y tocones y otros desechos leñosos gruesos. El *mantillo* es una capa formada por residuos de plantas y animales muertos sobre la superficie del suelo. El *carbono del*

suelo abarca el carbono orgánico, el carbono inorgánico y el carbón vegetal (PICC, 2001).

2.6. Metodologías para la estimación de biomasa y captura de carbono.

2.6.1. Metodologías para estimar la biomasa.

La biomasa forestal se define como el peso, o estimación equivalente, de materia orgánica existente en un ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo (Schelegel *et al.*, 2000). Generalmente es expresada en toneladas por hectárea de peso seco. Es separada en componentes que corresponden a la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta. La biomasa es considerada como una fuente de energía renovable, porque su valor proviene del sol. Cuando los carbohidratos derivados de la fotosíntesis se queman regresan a su forma de CO₂ y agua, liberando la energía que contienen. De esa forma, la biomasa tiene la función similar a una batería que almacena energía solar. La biomasa forestal es un importante elemento en las investigaciones sobre los cambios que ocurren a nivel mundial. A partir de la biomasa se puede calcular la concentración de carbono en la vegetación (aproximadamente el 50% de biomasa es carbono) y, por consiguiente, es posible hacer estimaciones sobre la cantidad de dióxido de carbono que se emite a la atmósfera cada vez que se desmonta o quema un bosque (FAO, 1995).

2.6.1.1. Uso de modelos de biomasa por especie.

Mediante este método se estima la biomasa total aérea, basándose en el diámetro a la altura del pecho (DAP) = 1.30 m y la altura total (AT) del árbol. Es importante usar modelos que hayan sido generados en condiciones similares en las que se encuentra la especie de interés, principalmente en términos de dimensiones y densidad arbórea.

2.6.1.2. Uso de modelos generales.

Los modelos que se han generado se utilizan para estimar el contenido de biomasa en inventarios forestales. A pesar de sus limitaciones, se utilizan cuando no existen modelos específicos para zonas o condiciones particulares. Los parámetros necesarios para utilizar estos modelos son DAP, en algunos casos se relacionan con la AT del árbol y densidad de la madera.

2.6.1.3. Construcción de modelos o tablas de biomasa por especie.

Los modelos de biomasa son ecuaciones que establecen la relación de la biomasa con las dimensiones de los árboles en pie: utilizan el DAP, la altura comercial (AC), AT y crecimiento diamétrico del árbol. La construcción de estos modelos se realiza mediante un muestreo destructivo de árboles. El árbol se divide en los siguientes componentes: fuste, ramas grandes, ramas pequeñas y hojas. Las ramas pequeñas (diámetro <25 cm) y hojas pueden ser pesadas en fresco y transformadas a valores de biomasa tomando una muestra y secándola en el horno (70 °C hasta peso constante). El fuste y las ramas grandes (diámetro >25 cm) se cubican (determinación de su volumen por medio de ecuaciones de Smalian, Huber, etc.) y se transforman a biomasa por medio de su gravedad específica (Brown, 1997b).

2.6.1.4. Tablas de rendimiento estándar.

Con estas tablas se estima la biomasa mediante la medición del DAP y la AT. Después, con los datos de gravedad específica y factor de expansión de biomasa (FEB) para el caso de tablas de volumen fustal, es posible estimar la biomasa total del árbol de la siguiente forma:

$$B_{ta} = V_f * GE * FEB$$

Dónde:

B_{ta} = Biomasa aérea total (t MS árbol⁻¹)

V_f = Volumen del fuste (m³)

GE = Gravedad específica o densidad de la madera (kg m⁻³)

FEB = Factor de expansión de biomasa.

En la literatura se encuentran valores promedio de gravedad específica (peso por unidad de volumen) o pueden ser determinados con un análisis de laboratorio. El peso de muestras secas se estima fácilmente (Brown, 1997b).

Para calcular el volumen se pueden tomar piezas de madera en forma regular (Ej. un cubo) de dimensiones conocidas o cubrir las muestras con parafina e introducir las en un recipiente con agua para calcular su volumen por desplazamiento (Principio de Arquímedes) (Andrade e Ibrahim, 2003).

2.6.1.5. La técnica del árbol promedio.

Es una opción que disminuye los costos para los métodos alométricos. Un árbol con dimensiones promedio tiene una biomasa promedio; para esto, se toma en cuenta al área basal como un indicador de la biomasa total. Los árboles seleccionados se derriban y se estima su biomasa, posteriormente se multiplica el peso del árbol promedio por la densidad de árboles para obtener la biomasa total. Se pueden incluir modificaciones como un muestreo estratificado, el método de la relación del área basal o la utilización de valores promedio (MacDiken, 1997).

2.6.1.6. Método de modelado con sistemas de información geográfica (SIG).

Este método utiliza bases de datos digitales existentes de inventarios forestales, información de densidad de población, clima, vegetación, zonas ecoflorísticas, suelos y topografía. Fue desarrollado como un medio para extrapolar los datos de inventarios

confiables, aunque no se obtienen buenos ajustes en sus modelos, son adecuados para grandes extensiones de terreno, como países e incluso continentes (Brown, 1997b).

La densidad de biomasa, es modelada en un enfoque multi-etapas con paquetes software SIG, una variedad de estadística espacial y bases de datos. Para estimar la densidad de biomasa es necesario tomar en cuenta el potencial del paisaje en virtud de sus condiciones ambientales y los efectos acumulativos de las actividades humanas que reducen la densidad de biomasa en los bosques. Las capas de datos son introducidas en un SIG y manipuladas de acuerdo a las especificaciones del modelo (Brown, 1997b).

2.6.2. Metodologías para estimar la captura de carbono.

Locatelli y Leonard (2001) mencionan que los métodos existentes para medir los almacenes de carbono en las masas forestales son de tres tipos. Los primeros se realizan a nivel global, en países o continentes, teniendo como ventaja la sencillez de los datos necesarios, solo que se alejan de la realidad del terreno.

Los segundos se acercan más a la realidad pero eluden mediciones del terreno, generalmente se basan en datos de inventarios forestales. En el tercer tipo, se utilizan correlaciones entre las dimensiones y la biomasa, se realizan en base a datos proporcionados por muestreos destructivos.

2.6.2.1. Estimación de carbono basado en un inventario forestal.

Conversión de volúmenes verdes a peso seco. Se obtiene la densidad específica en Kg m^{-3} a distintos niveles de humedad para las especies de interés. Posteriormente, se obtienen los pesos secos con la expresión:

$$\text{Peso seco (t m}^{-3}\text{)} = \text{Peso verde (t m}^{-3}\text{)} / 100 + \% \text{ humedad}$$

Estimación del peso de carbono en la biomasa. Se multiplica el peso de la biomasa por un factor que varía entre 0.45 y 0.55. El valor indica la fracción de carbono en la materia vegetativa. A falta de información específica, generalmente se usa un valor de 0.50. Si se cuenta con información por especie, se calcula un promedio ponderado. Estimación de biomasa y carbono por hectárea y superficie total. Se calculan los pesos por metro cúbico de madera y carbono según diferentes volúmenes por hectárea. El factor de expansión de biomasa se utiliza para calcular el peso de los demás componentes (ramas, follaje, raíces, otra vegetación y detritus sobre el suelo) (Husch, 2001).

5.6.2.2. El modelo de fijación de carbono CO2FIX.

Este modelo fue desarrollado en 1990 por los holandeses Mohren y Goldewijk funciona como un simulador del ciclo del carbono para rodales forestales bajo manejo silvícola, permitiendo así, calcular el carbono capturado en una plantación (Ordoñez, 1999). El programa modela la captura de carbono acumulado durante el crecimiento mediante procesos fisiológicos incluyendo tres reservorios. Biomasa; comprende el carbono contenido en el tronco, las ramas, las raíces y el follaje, que dependen de su incremento. Suelo; se integra el carbono existente en humus y detritus, también sus tasas de residencia y descomposición. Productos; los productos se dividen en seis categorías: madera muerta, madera para papel, madera para empaque, madera para uso energético, madera para construcción y madera para aglomerados, e incluye el reciclado (Ordoñez, 1999). Los datos que se ingresan al programa son: parámetros del rodal, tablas de cosecha y aclareo, especificaciones de la especie y crecimiento de la especie. La presentación de resultados es mediante cuadros que permiten ver de manera cuantitativa la cantidad de carbono en cada uno de los reservorios.

5.6.2.3. Técnica de mapeo de carbono.

En estos estudios se aplican las imágenes multiespectrales de alta resolución SPOT 5 HRG para realizar el mapeo de biomasa y carbono aéreo en los bosques,

mediante técnicas de regresión lineal múltiple y k-nn. Los métodos de regresión generalmente tienen alta precisión y producen estimaciones de las variables bien documentadas en los parámetros (Aguirre *et al.*, 2009). El método k-nn produce estimaciones de todas las variables requeridas simultáneamente, preserva las relaciones naturales entre las variables y retiene mejor la variabilidad en los datos de entrenamiento. El objetivo del método es generar mapas de alta resolución que expresen el carbono aéreo en $t\ ha^{-1}$ (Aguirre *et al.*, 2009).

2.7. Alometría.

La alometría designa los cambios en las dimensiones relativas de las partes de un organismo que se correlacionan con los cambios en el tamaño global. El análisis de las relaciones entre diferentes dimensiones de las plantas es de gran utilidad en los estudios de crecimiento; especialmente, el principio de crecimiento alométrico determina el crecimiento de una parte del organismo en relación con el organismo entero o alguna parte del mismo. Las bases del escalamiento alométrico se expresan de la forma $Y = aX^b$, donde la variable Y depende de la masa del cuerpo X a través del exponente de escalamiento b y de una constante a que es característica de la clase de organismo (Gayon, 2000). A pesar de que el enfoque ha prevalecido en estudios sobre animales, con trabajos recientes se ha demostrado la eficacia del análisis alométrico para interpretar cambios en el crecimiento de las plantas (Niklas y Enquist, 1994). Un modelo alométrico se define como una relación matemática que permite estimar una variable (volumen o biomasa) con base a una o más variables independientes (DAP, AT) (Vallejo y Noriega, 2008). Para poder ajustar el modelo, se requiere una base de datos donde se tengan datos de diámetro normal y biomasa, para estos casos se usa el peso seco porque arroja mayor precisión (Castellanos, 1993). Las relaciones alométricas se establecen mediante el análisis de la regresión entre datos del peso seco de los componentes arbóreos y atributos morfológicos como diámetro normal, área basal y altura. Las relaciones matemáticas se aplican sobre inventarios de árboles individuales o tablas de rodal donde se obtiene la densidad del carbono por unidad de superficie (Gayoso *et al.*, 2002).

3. ANTECEDENTES.

Como se comentó anteriormente, el cambio climático y las implicaciones que tienen los GEI, en la actualidad están tomando mucha importancia, debido a esta problemática ambiental actualmente se le está poniendo especial atención a los servicios ambientales que brindan las masas forestales por ayudar a mitigar el cambio climático por medio de la captura de carbono. En este aspecto se han elaborado algunos trabajos para determinar las cantidades de carbono que almacenas estos ecosistemas; entre los que destaca el que desarrolló en 2008 Martínez y Masera sobre captura de carbono en el Parque Ecológico Jaguaroundi ubicado en Mundo Nuevo, Coatzacoalcos, Veracruz; los cuales primeramente en delimitar los tipos de cobertura vegetal a través de fotointerpretación y delimitación de polígonos de los tipos de vegetación para posteriormente realizar un trabajo de digitalización, para las estimaciones dasométricas de la biomasa aérea se desarrolló la metodología empleada en los inventarios forestales que consiste en tres círculos concéntricos, de 100, 500 y 1000 m² para obtener el DAP y altura por categoría diamétrica y especies de los árboles contenidos en los sitios. Con las medidas dasométricas se obtuvo el carbono en la biomasa aérea por medio del Software CO2Fix por tipo de vegetación, para finalmente hacer una representación espacial sobre el mapa de vegetación.

Al realizar el análisis de toda la información arrojó que el parque Jaguaroundi tiene una línea base de carbono establecida en 111,000 t de carbono, al identificar cada uno de los reservorios de carbono del parque. El acahual cerrado joven fue el tipo de vegetación donde se encontró el mayor contenido de carbono (30,300 t) distribuidas en 166 ha; por otro lado, el contenido más bajo de carbono fue el popal-tular con 1,000 t distribuidas en 14 ha. Los pastizales sobre suelos temporalmente inundados mostraron un alto contenido de carbono, el cual cuantificó 26, 600 t distribuidas en 175 ha. El parque presenta un escenario de mitigación de carbono a un plazo de 10 años de 21,000 t; en 30 años el potencial de captura será de 51, 000 t y al final de la simulación en 50 años tendrá una captura de carbono potencial de 66, 500 t.

En el año 2008 Rodríguez *et al.*, determinaron el contenido de carbono en un bosque tropical subcaducifolio en la Reserva de la Biosfera "El Cielo" ubicada en Tamaulipas. Para éste estudio en cuanto a la biomasa aérea, se midieron diámetros y alturas en árboles y arbustos en sitios de 1000 m² utilizando un muestreo dirigido y considerando sitios de muestreo representativos del lugar en cuanto a su vegetación. Para la selección de árboles para la medición de carbono por tratarse de un área natural protegida no se permitió tomar muestras de madera en los árboles representativos del ecosistema. Como no fue posible derribar el árbol para ser pesado en cada uno de sus componentes, se procedió a calcular el volumen por árbol por especie, utilizando el coeficiente de forma que reporta la Memoria del Inventario Forestal del estado de Hidalgo (1985) para ciertas especies de hojosas, además, se consideró agregar el 30% del volumen fustal obtenido, que representa los brazuelos y ramas que conforman la copa del árbol; para el tocón, hojas y ramas menores de 5 cm de diámetro se agregó el 5% del volumen fustal obtenido. El volumen individual por especie se multiplicó por la densidad básica respectiva de cada especie obteniendo la biomasa. Con los datos obtenidos de biomasa individual por especie, se procedió a desarrollar funciones de regresión de biomasa. De los cuales se utilizó el modelo potencial (Acosta, 2003) por presentar para cada especie el mayor coeficiente de determinación (R²), además de su simplicidad en la ecuación. Como no se obtuvieron muestras de madera para determinar la concentración de carbono por especie se tomó como referencia los resultados de Montoya *et al.*, (1995), MacDicken (1997) y Husch (2001), que afirman que en promedio la materia vegetal seca contiene aproximadamente 50% de carbono. En cuanto a la biomasa aérea los resultados mostraron en promedio 778.8 individuos ha⁻¹ y 1655 renuevos ha⁻¹. El modelo potencial estimó en el bosque tropical subcaducifolio 94.6 t ha⁻¹ de carbono, de las cuales 68.5 se encuentran almacenadas en fustes, ramas y hojas.

Con relación al empleo del análisis espacial para la determinación del contenido de carbono se tiene pocas referencias, una de ellas es el estudio que realizó en 2009 Aguirre *et al.*, titulado "Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de *Pinus patula* en Hidalgo, México", en donde se utilizaron las imágenes multiespectrales

de alta resolución para realizar el mapeo de biomasa y carbono aéreo en los bosques. Mediante técnicas de regresión lineal múltiple y kaésimo vecino más cercano (k-nn). Estos métodos de regresión tienen alta precisión y producen estimaciones de las variables bien documentadas en los parámetros. El método k-nn produce estimaciones de todas las variables requeridas simultáneamente, preserva las relaciones naturales entre las variables y retiene mejor la variabilidad en los datos de entrenamiento.

En 2010 Vigil, realizó una estimación de biomasa y contenido de carbono en *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. en el Campo Forestal Experimental “Las Cruces”, Texcoco, México”. En el cual se realizó una selección de 18 árboles de *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., el estudio se realizó con el objeto de estimar la biomasa y contenido de carbono para correlacionarlos con el DAP y obtener para cada caso una ecuación alométrica aplicando el modelo $Y = B \cdot X^k$. La determinación de biomasa se realizó por medio del secado de las muestras en un invernadero en forma de microtúnel y en estufas. Se tomaron 15 submuestras (cinco de cada componente) para determinar el porcentaje de carbono con la técnica de combustión seca mediante un analizador de carbono. La ecuación obtenida para biomasa fue $B = 0.5266 \cdot DAP^{1.7712}$ y para contenido de carbono $CC = 0.2637 \cdot DAP^{1.7698}$, el coeficiente de determinación R^2 fue de 0.9305 y 0.9312 respectivamente. El mayor porcentaje de distribución de la biomasa y el contenido de carbono se presentó en el fuste, seguido por el follaje y por último las ramas.

En el contexto internacional está el trabajo que realizó Gayoso en 2002, que consistió en la Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile”, el cual se planteó como objetivo del estudio el desarrollar funciones de biomasa, factores de expansión y reducción, así como definir la metodología de inventario de carbono para determinar la capacidad de captura de carbono de distintos bosques. Este proyecto comprendió el estudio de 14 especies del bosque nativo siempre-verde y 3 especies de plantaciones exóticas. Las funciones de biomasa y coeficientes de expansión fueron estimados en base a ensayos destructivos sobre 540 árboles y la extracción de 137 raíces. El inventario de carbono se basó en

168 parcelas, de tamaño entre 250 y 500 m², distribuidas en 13 predios forestales (37° LS y 42° LS). En cuanto a la biomasa aérea los resultados para las especies nativas del tipo forestal siempre-verde (árboles de DAP > 10 cm) muestran que la biomasa aérea de los árboles se distribuye como sigue: 0,62 - 5,05% en las hojas; 6,09 - 22,23 % ramas; 61,89 - 88,06 % fuste; y, 4,62 - 16,21 % en la corteza. En rodales de *Pinus radiata*, edad de 23 años, la biomasa alcanza: 4,07 % en las acículas; 9,08 % en las ramas; 5,64 % en la corteza; y 80,56 % en el fuste comercial con índice de utilización 8 cm. Lo que representa 283,75 t ha⁻¹ de carbono en la biomasa aérea.

4. METODOLOGÍA.

Hay muchas dificultades para estimar la cantidad de carbono que puede ser capturado o conservado en un proyecto forestal determinado, aunque, por otra parte, hay algunas aproximaciones alternativas para evaluar el carbono secuestrado. Estas dificultades son múltiples en el contexto de proyectos forestales regionales como es el caso de una Cuenca. Para fines prácticos es relativamente fácil medir el carbono almacenado en árboles en crecimiento en un sistema de plantación forestal. Se sabe que el carbono contenido en la biomasa es aproximadamente el 50% del peso seco, ya que existen técnicas adecuadas para medir o monitorear el progreso de captura de carbono tanto en plantaciones comerciales como en masas de boscosas naturales. De cualquier forma, en donde existen proyectos que implican el crecimiento de múltiples especies de diferentes edades, estructurados en complejos arreglos con cultivos anuales o perennes, como es el caso de los sistemas agroforestales, la predicción de la acumulación de biomasa se torna más difícil.

En lo que respecta al mapeo de carbono se han utilizado principalmente dos herramientas estadísticas que han arrojado buenos resultados, por un lado está el método de clasificación knn vecinos más cercanos y por otro lado los modelos de regresión lineal, como lo utilizado en el presente trabajo, en donde se permite establecer si existe una correlación entre con el carbono arbóreo aéreo obtenido a partir de la información dasométrica de los sitios de muestreo en los conglomerados y la información espectral (reflectancia) de los índices de vegetación NDVI y SAVI para éste caso en particular, generando un modelo de correlación el cual permitirá obtener los mapas de captura de carbono con apoyo de un SIG para ambos índices de vegetación, permitiendo comparar los resultados. Es importante comentar que en el presente trabajo se enfocará en la información de campo de los estratos arbustivo y arbóreo con categorías diamétricas igual y/o mayores de 10 cm (diámetros \geq a 7.5 cm) que se reportaron en dicho muestreo. Por otro lado, se aprovechará esta información de campo para generar ecuaciones alométricas para la estimación de carbono, para lo cual se llevará a cabo la comparación de cuatro modelos diferentes y el empleo de distintas

variables dasométricas como el DAP y la AT que son las variables más utilizadas en distintos estudios sobre todo para la estimación de volumen en las masas forestales (Figura 20).

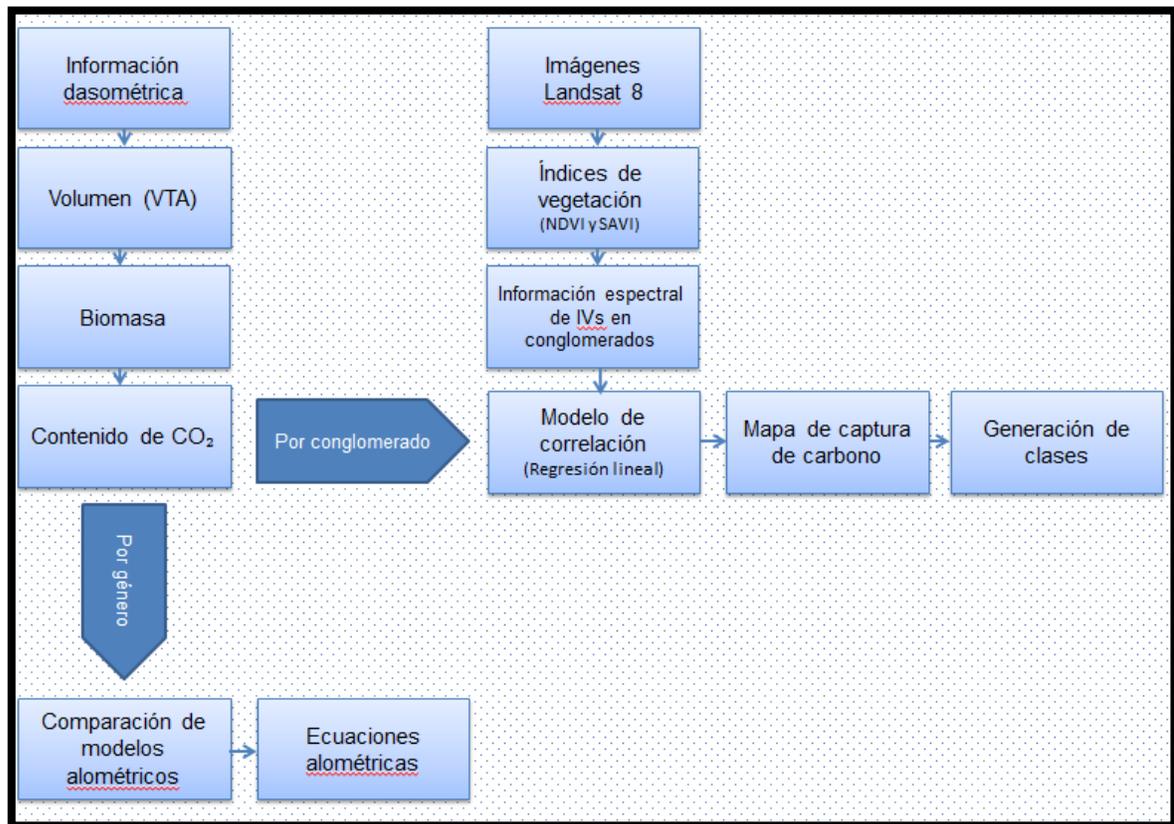


Figura 20. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

Para la obtención del contenido de carbono tanto en los sitios de muestreo como por género de las diferentes especies para la obtención de las ecuaciones alométricas, primeramente se obtiene tanto de volumen, biomasa y contenido de carbono lo que será la información de las variables dependientes o de respuesta, que permitirán realizar las regresiones correspondientes.

4.1. Información de campo.

Como se mencionó anteriormente, la información de campo utilizada en el presente trabajo es la recopilada durante el re-muestreo forestal del 2012 realizado por

la CONAFOR en coordinación con los diferentes gobiernos estatales y empleado para la realización del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) del 2015. Esta información nos da los elementos para poder determinar la biomasa arbórea aérea ya que contiene información como: datos ecológicos, ubicación geográfica de los sitios de muestreo, diversidad de especies, variables dasonómicas en los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo, así como información cualitativa de las condiciones del sitio, tales como: rasgos orográficos, altitud, pendiente, fisiografía, uso de suelo, profundidad del suelo, presencia de erosión-degradación, y su grado de afectación (CONAFOR, 2012).

En cuanto a su diseño de muestreo para el levantamiento de datos en campo es estratificado sistemático por conglomerados. Las unidades de muestreo están distribuidas en una red cuadriculada de puntos basada en el sistema de coordenadas UTM de la Cartografía 1:250 000 del INEGI. La equidistancia entre conglomerados varía de acuerdo al tipo de vegetación. La unidad de muestreo es un conglomerado integrado por 4 unidades de registro o sitios equidistantes del centro a cada 45.14 m para bosques y zonas áridas y 36.42 m para el caso de selvas, la distribución se observa en la siguiente figura de acuerdo a cada diseño. La forma de las unidades de muestreo secundarias es rectangular para el caso de las selvas, mientras que para los demás tipos de vegetación es de forma circular (Figura 21).

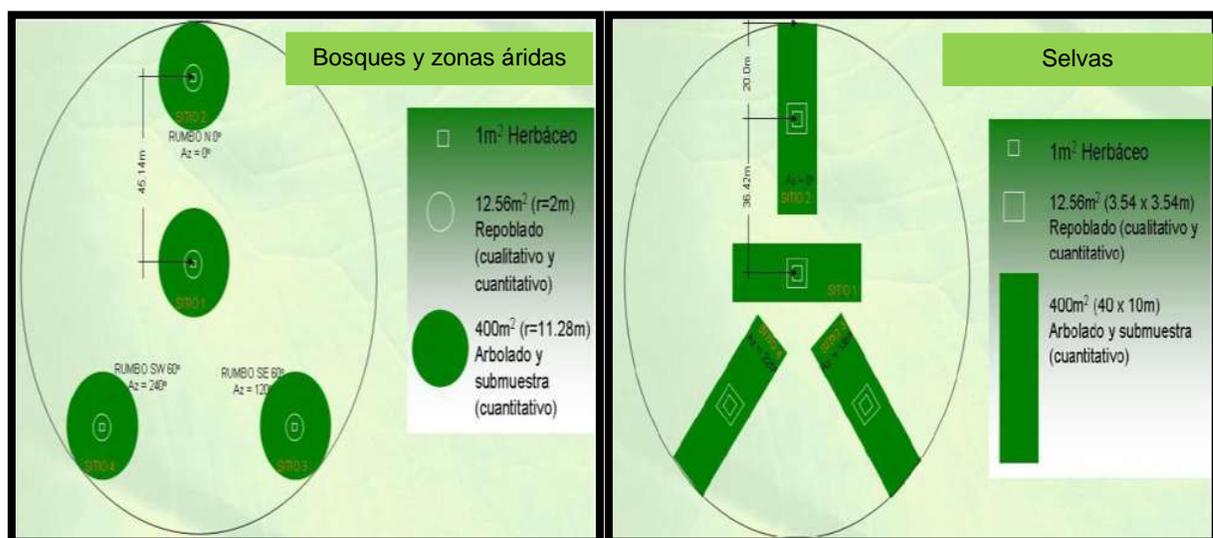


Figura 21. Diseños de los conglomerados de muestreo (CONAFOR, 2012).

4.2. Determinación del volumen de los árboles.

Una de las finalidades del presente trabajo es la de no realizar trabajos destructivos los cuales se basan en el derribo de los árboles para su posterior determinación del volumen, biomasa y contenido de carbono en cada uno de sus componentes, para este caso en particular se procedió a calcular el volumen por árbol por género, utilizando los modelos alométricos de las tablas de volúmenes empleadas por la COFOM derivadas del Inventario Forestal realizado en el Estado de Michoacán en el año 2005 (Anexo 2). Estas tablas de volúmenes se generaron para ciertos géneros de coníferas y hojosas, en estas tablas se consideran 2 datos de entrada que son el DAP y la AT, proporcionando el VTA en m³, que representa el volumen fustal así como los brazos y ramas que conforman la copa del árbol; para este caso en lo que respecta al tocón, hojas y ramas menores de 5 cm de diámetro que no son considerados por estas tablas de volumen se agregó el 5% del volumen total árbol obtenido (Rodríguez *et al.*, 2008).

4.3. Determinación de la biomasa y carbono arbóreo aéreo.

Para determinar la biomasa individual por género se utilizó la fórmula de la densidad de la madera, de tal manera que despejando de ésta fórmula, la biomasa (m) y utilizando la densidad de las diferentes especies de las maderas en base a su peso seco reportadas en el INFyS se podrá obtener la biomasa de cada uno de los árboles.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dónde:

ρ = Densidad de la madera (kg m⁻³)

m = Biomasa de la madera (kg)

V = Volumen de la madera (m³)

Cabe mencionar que se utilizaron las densidades de la madera de las diferentes especies según lo reportado en diferentes estudios realizados en el Estado de Michoacán (Sotomayor, 2005; Sotomayor *et al.*, 2010; Sotomayor y Hernández, 2012) (Anexo 3).

Como se comentó anteriormente para el presente estudio no se obtuvieron muestras de madera para determinar la concentración de carbono en las diferentes especies, por lo tanto se tomó como referencia los resultados de diferentes estudios, en donde se afirma que en promedio la materia vegetal seca de los árboles contiene aproximadamente 50% de carbono (Yong, 2010; Montoya *et al.*, 1995; MacDicken, 1997; Husch, 2001).

4.4. Determinación de ecuaciones alométricas.

En general, se ha establecido que el diámetro normal es la variable independiente más confiable para estimar la biomasa y contenido de carbono de los árboles (Acosta, 2003), por tal motivo en el presente trabajo se enfocará principalmente en ésta variable, cabe mencionar que se utilizarán la información de las variables por géneros tanto de coníferas como de latifoliadas que se reportan en el INFyS dentro de la cuenca de Cuitzeo. Al contar con la información de nuestras variables predictoras (DAP, AT) y variables de respuesta (CO_2) se procedió a desarrollar funciones de regresión de carbono, utilizando el paquete estadístico de *Excel*, se realizó un análisis comparativo de los 4 modelos alométricos aplicados a los diferentes géneros tanto de coníferas como de latifoliadas reportados por el INFyS dentro de la cuenca (Cuadro 13).

Para constatar cual es el modelo que mejor se ajusta para estimar el contenido de carbono de acuerdo a la dispersión de nuestros datos, el indicador que se jerarquizó con mayor importancia fue el coeficiente de determinación (R^2) por ser el que permite observar la confiabilidad de nuestros modelos de regresión, seguido de la distribución de los datos y el análisis de la varianza.

Cuadro 13. Modelos alométricos empleados.

Tipo	Forma	Con variables dasométricas
Regresión lineal simple	$Y = a + bX$	$C = a + b(DAP)$
Exponencial	$Y = a \exp(bX)$	$C = a \exp(b(DAP))$
Potencia	$Y = aX^b$	$C = a(DAP^b)$
Regresión lineal múltiple	$Y = a + bX_1 + cX_2$	$C = a + b(DAP) + c(AT)$

4.5. Obtención de modelos de correlación y mapas de captura de carbono.

4.5.1. Imágenes satelitales empleadas.

Las imágenes satelitales Landsat 8 empleadas para el presente Capítulo, fueron las utilizadas en el Capítulo I (Cuadro 6), las cuales como se comentó anteriormente se obtuvieron del portal de internet de USGS (www.earthexplorer.com).

4.5.2. Obtención de los índices de vegetación (NDVI y SAVI).

Existen 2 tipos de índices de vegetación, los *basados en la pendiente* empleados para la estimación de biomasa vegetal verde y los basados en la distancia utilizados en casos donde la vegetación es escasa y los píxeles contiene una mezcla de vegetación verde y fondo del suelo, en el presente trabajo se utilizarán los más empleados para cada caso, el NDVI y el SAVI respectivamente.

Sus expresiones matemáticas son las siguientes:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

$$SAVI = \frac{IRC - R}{IRC + R + L} (1 + L)$$

Dónde:

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada.

SAVI = Índice de vegetación ajustado al suelo.

IRC = Banda de infrarrojo cercano

R = Banda de rojo.

L = Factor de ajuste al suelo.

Para obtener éstos índices de vegetación con las imágenes Landsat 8, se utilizaron las bandas 4 y 5 correspondientes al Rojo y al Infrarrojo cercano respectivamente, mediante el SIG Idrisi, con el módulo *vegindex*. Para el caso de SAVI se utilizó como factor de ajuste al suelo **0.5** por tener en la cuenca tanto zonas con demasiada cobertura como áreas perturbadas o con poca cobertura como es el caso de la selva baja caducifolia y el bosque de encino.

4.5.3. Modelos de regresión.

Para realizar el proceso de regresión lineal y obtener las unidades empleadas para este tipo de estudios, las cantidades de contenido de carbono dentro de los 4 sitios de muestreo que conforman los conglomerados ubicados dentro de la cuenca de Cuitzeo se sumaron y se ponderaron de tal manera que quedaron expresados en toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$), la información resultante se utilizará como la variable de respuesta dentro del proceso de regresión.

Por otra parte, para obtener el modelo predictivo y estimar el contenido de carbono en una determinada posición geográfica, se realizó un modelo de regresión entre el contenido de carbono resultante en los conglomerados de muestreo de campo y las características espectrales que contienen los índices de vegetación en donde se localizan geográficamente los conglomerados, ésta información se utilizará como la variables predictora o explicativa. La información espectral (reflectancia) de los 37 conglomerados se obtuvo mediante el siguiente procedimiento:

1. Con ayuda del SIG **Arcgis 9.3** se generaron búferes para los 37 conglomerados, con un radio de 56.42 metros, para obtener polígonos circulares equivalentes a una hectárea de superficie.
2. Con los polígonos de los 37 conglomerados se obtuvieron estadísticas zonales de los índices de vegetación NDVI y SAVI: Mínimo, Máximo, Rango, Promedio, Desviación estándar y Suma.

Con la información anterior se hizo un análisis de correlación con la técnica denominada "*best subset*" (mejores subconjuntos), la cual permite identificar los modelos de regresión de mejor ajuste que se pueden construir con las variables predictoras (Daniel, 2002), esto se realizó con ayuda del programa estadístico **Minitab**. Por último, se realizó la regresión lineal con el contenido de carbono ($t\ ha^{-1}$) de los conglomerados como variable de respuesta y la variable predictora o explicativa del NDVI y SAVI que arrojó una mayor correlación, obteniendo de esta manera los modelos de correlación que nos ayudará a generar los mapas de captura de carbono.

En cuanto a la validación de la precisión en las mediciones de los mapas de captura de carbono, se realiza evaluando los indicadores estadísticos propios de la regresión lineal como es el caso del coeficiente de determinación (R^2), el cual nos indica la medida de la bondad de ajuste del modelo de regresión resultante o dicho de otra manera nos indica el porcentaje de la variabilidad de la variable de respuesta (CO_2) es explicada por su relación lineal con la variable predictora (reflectancia).

Un indicador de mucha importancia sobre todo por tratarse de una muestra de campo pequeña es la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) ya que nos permite observar el grado de error que arroja el modelo con respecto de la línea de regresión, algo también importante es el análisis de residuales ya que nos permite observar la normalidad, si hay varianza constante e independencia de nuestros errores. Con los estadísticos mencionados anteriormente se puede validar la confiabilidad que

genera el modelo de regresión utilizado para la realización del mapa de captura de carbono.

4.5.4. Generación de mapas de captura de carbono.

Teniendo el modelo matemático de correlación, se generó el mapa de captura de carbono, aplicando la expresión matemática obtenida anteriormente a los índices de vegetación (NDVI y SAVI) mediante un SIG.

4.5.4.1. Determinación de clases de los mapas de captura de carbono.

Para este caso se va a utilizar el método de "*Natural Breaks de Jenks*", el cual tiene la ventaja de ajustarse al agrupamiento de los datos por clasificar, minimizando la variabilidad interna de las clases y maximizando la diferencia entre las mismas (Jones, 2010). Para fines prácticos se tratará de ajustar la clasificación a intervalos de 20 t ha^{-1} .

5. RESULTADOS.

5.1. Información dasométrica del área de estudio.

En lo que respecta a la información obtenida del re-muestreo 2012 realizado por CONAFOR dentro de la cuenca de Cuitzeo, se pudo observar la localización en dicha superficie de 37 conglomerados (Anexo 4), lo que arroja una totalidad de 148 sitios de 400 m², de los cuales 35 se localizaron principalmente en la parte oriente y poniente del Estado de Michoacán y solamente 2 se localizaron en la parte sur del Estado de Guanajuato (Figura 22).

El estado de Michoacán es uno de los estados con mayor biodiversidad y la cuenca de Cuitzeo no es la excepción, al verificar la información del re-muestreo en cuanto a especies arbóreas y arbustivas arrojó como resultado la presencia de 64 especies entre arbóreas y arbustivas, de las cuales 10 son coníferas y 54 latifoliadas, destacando por su importancia forestal y predominancia 7 especies de pino (*Pinus*) y el oyamel (*Abies*) en cuanto a coníferas y 14 especies de encino (*Quercus*) y 2 especies de aile (*Alnus*) en cuanto a latifoliadas (Cuadro 14).

Las demás especies se presentan en menor cantidad y sobresalen algunas especies que se ubican asociadas con las mencionadas anteriormente o en comunidades vegetales como son la selva baja caducifolia. Es importante mencionar que para validar la presencia en esta región de las especies aquí citadas se apoyó de los portales de internet "The gymnosperm Database" (www.conifers.org), así como de "Missouri Botanical Garden" (www.trópicos.org), los cuales cuentan con amplias bases de datos sobre procedencias de infinidad de especies, lo que dio mayor certeza a la información generada en el re-muestreo.

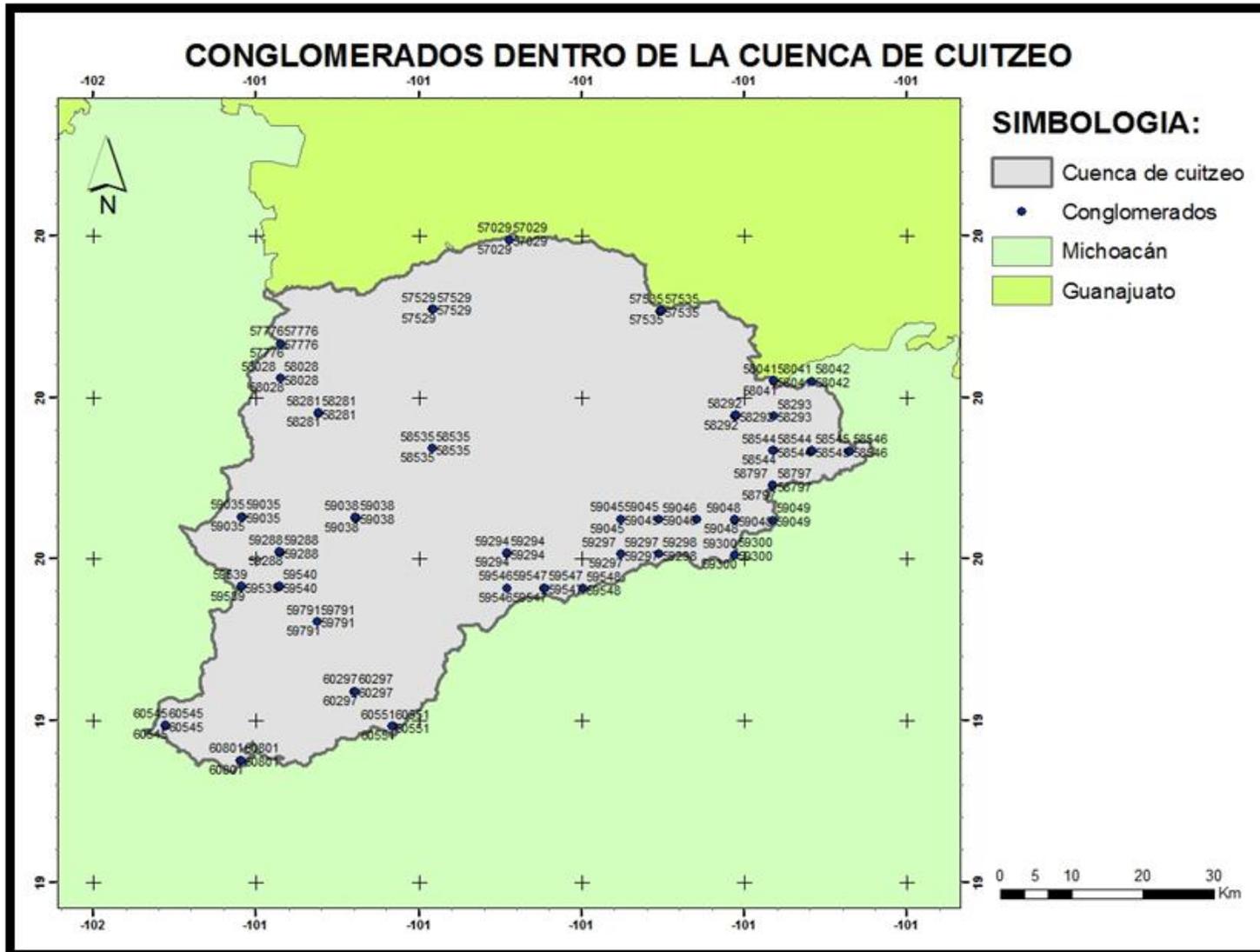


Figura 22. Conglomerados y sitios dentro de la cuenca de Cuitzeo.

Cuadro 14. Especies inventariadas en el re-muestreo 2012 en la cuenca de Cuitzeo.

	Nombre científico	Nombre común		Nombre científico	Nombre común
1	<i>Abies religiosa</i>	Oyamel	33	<i>Lippia umbellata</i>	Menta
2	<i>Acacia farnesiana</i>	Huizache	34	<i>Lonchocarpus rugosus</i>	Palo fierro
3	<i>Acacia pennatula</i>	Tepame	35	<i>Lysiloma acapulcense</i>	Tepehuaje
4	<i>Alnus acuminata</i>	Aile	36	<i>Meliosma dentata</i>	Aguacatillo
5	<i>Alnus jorullensis</i>	Aile	37	<i>Pinus devoniana</i>	Pino lasio
6	<i>Arbutus glandulosa</i>	Madroño	38	<i>Pinus douglasiana</i>	Pino
7	<i>Arbutus xalapensis</i>	Madroño	39	<i>Pinus hartwegii</i>	Pino
8	<i>Arctostaphylos pungens</i>	Pinguica	40	<i>Pinus leiophylla</i>	Pino
9	<i>Baccharis heterophylla</i>	Escoba	41	<i>Pinus oocarpa</i>	Pino
10	<i>Baccharis salicifolia</i>	Escobilla	42	<i>Pinus pseudostrobus</i>	Pino
11	<i>Buddleja cordata</i>	Tepozan	43	<i>Pinus teocote</i>	Pino
12	<i>Buddleja parviflora</i>	Tepozan	44	<i>Pistacia mexicana</i>	Lastrinco
13	<i>Bursera bipinnata</i>	Copal chino	45	<i>Prockia crucis</i>	Palo blanco
14	<i>Bursera copallifera</i>	Copalillo	46	<i>Protium copal</i>	Copal
15	<i>Bursera fagaroides</i>	Cuajote verde	47	<i>Prunus serótina</i> ssp <i>Capuli</i>	Capulín
16	<i>Bursera palmeri</i>	Copal	48	<i>Quercus acutifolia</i>	Encino
17	<i>Ceiba aesculifolia</i>	Pochote	49	<i>Quercus candicans</i>	Encino
18	<i>Celtis caudata</i>	Sasanaco	50	<i>Quercus castanea</i>	Encino colorado
19	<i>Clethra mexicana</i>	Jaboncillo	51	<i>Quercus crassifolia</i>	Encino cuchara
20	<i>Colubrina macrocarpa</i>	Trompillo	52	<i>Quercus crassipes</i>	Encino
21	<i>Condalia mexicana</i>	Granjeno	53	<i>Quercus deserticola</i>	Encino
22	<i>Crataegus mexicana</i>	Tejocote	54	<i>Quercus glaucooides</i>	Tocus
23	<i>Croton niveus</i>	Vara blanca	55	<i>Quercus hintonii</i>	Encino
24	<i>Cupressus lusitanica</i>	Cedro blanco	56	<i>Quercus laeta</i>	Encino
25	<i>Eucaliptus</i> sp.	Eucalipto	57	<i>Quercus laurina</i>	Encino
26	<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Palo dulce	58	<i>Quercus magnoliifolia</i>	Encino colorado
27	<i>Ficus insípida</i>	Ficus	59	<i>Quercus obtusata</i>	Roble
28	<i>Forestiera phillyreoides</i>	Granjeno	60	<i>Quercus rugosa</i>	Encino prieto
29	<i>Ipomoea murucoides</i>	Cazahuate	61	<i>Quercus scytophylla</i>	Encino prieto
30	<i>Ipomoea wolcottiana</i>	Cazahuate	62	<i>Randia aculeata</i>	Tojocutillo
31	<i>Juniperus fláccida</i>	Tascate	63	<i>Senna polyantha</i>	Palo macho
32	<i>Leucaena leucocephala</i>	Guajillo	64	<i>Ternstroemia lineata</i>	Té de tila

En lo que respecta a la información dasométrica destaca el género *Pinus* que presenta un promedio 32.03 cm de DAP, y una AT promedio de 15.82 m (Cuadro 15), así como un intervalo diamétrico que va de 10 a 85 cm (Cuadro 16), cabe destacar la información correspondiente al género *Quercus*, que presenta un DAP de 18.5 cm, una AT de 8.12 m y un rango en su intervalo diamétrico que va desde 10 hasta 85 cm, es importante mencionar que la mayoría de los árboles se concentran en categorías diamétricas pequeñas, lo cual indica que las áreas boscosas en la cuenca de Cuitzeo son áreas perturbadas y que se encuentran en proceso de recuperación.

Cuadro 15. Información dasométrica de los géneros forestales inventariados en la cuenca de Cuitzeo.

Género	DAP promedio (cm)	AT promedio (m)	DC promedio (m)
<i>Abies</i>	34.8	19.4	5.5
<i>Acacia</i>	11.1	3.9	2.65
<i>Alnus</i>	19.6	10.14	5.17
<i>Arbutus</i>	14.95	6.25	3
<i>Buddleja</i>	16.9	4.85	3.5
<i>Bursera</i>	13.93	4.53	2.68
<i>Ceiba</i>	18.2	7.0	3.4
<i>Celtis</i>	14.7	5.1	2.5
<i>Clethra</i>	11.7	10.2	3.1
<i>Crataegus</i>	13.1	6.3	3.7
<i>Cupressus</i>	13.6	9.5	3.7
<i>Eucalyptus</i>	27.8	11.0	4.4
<i>Eysenhardtia</i>	10.6	4.7	2.6
<i>Ficus</i>	12.4	7.5	3.9
<i>Ipomoea</i>	13.1	4.3	3
<i>Juniperus</i>	9.0	6.1	3.4
<i>Leucaenea</i>	9.4	4.4	2.9
<i>Lonchocarpus</i>	15.8	6.8	3.2
<i>Lysiloma</i>	10.8	5.1	3.5
<i>Meliosma</i>	15.6	6	3.1
<i>Pinus</i>	32.03	15.82	5.12
<i>Prunus</i>	30	8.15	5.5
<i>Quercus</i>	18.5	8.12	3.94
<i>Ternstroemia</i>	11.3	7.4	2.7
<i>Diferentes especies arbustivas</i>	10.47	5.53	2.85

Cuadro 16. Categorías diamétricas y número de arboles de los géneros forestales más representativos en la Cuenca de Cuitzeo.

Género	Categoría diamétrica (cm)															
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
<i>Abies</i>	2	5	5	13	7	8	9	6	6	3	-	3	-	-	1	-
<i>Acacia</i>	47	10	20													
<i>Alnus</i>	25	23	17	10	5	2	2	-	-	1	-	1	-	-	-	-
<i>Arbutus</i>	44	20	7	6	4	2	1	-	-	2	-	-	-	-	-	-
<i>Bursera</i>	92	36	13	6	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Crataegus</i>	45	6	5	-	-	2	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Eucalyptus</i>	1	1	4	2	6	3	1			1						
<i>Eysenhardtia</i>	73	11	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ipomoea</i>	103	68	24	9	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Pinus</i>	104	88	72	54	52	55	42	33	20	8	6	3	5	5	1	-
<i>Quercus</i>	188	159	102	66	30	25	15	9	4	3	2	-	2	-	-	2
<i>Leucaenea</i>	28	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Acacia</i>	9	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ternstroemia</i>	14	4	4													

En la figura 23 se muestra la relación entre el número de árboles y las categorías diamétricas de cinco géneros forestales representativos dentro de la cuenca de Cuitzeo.

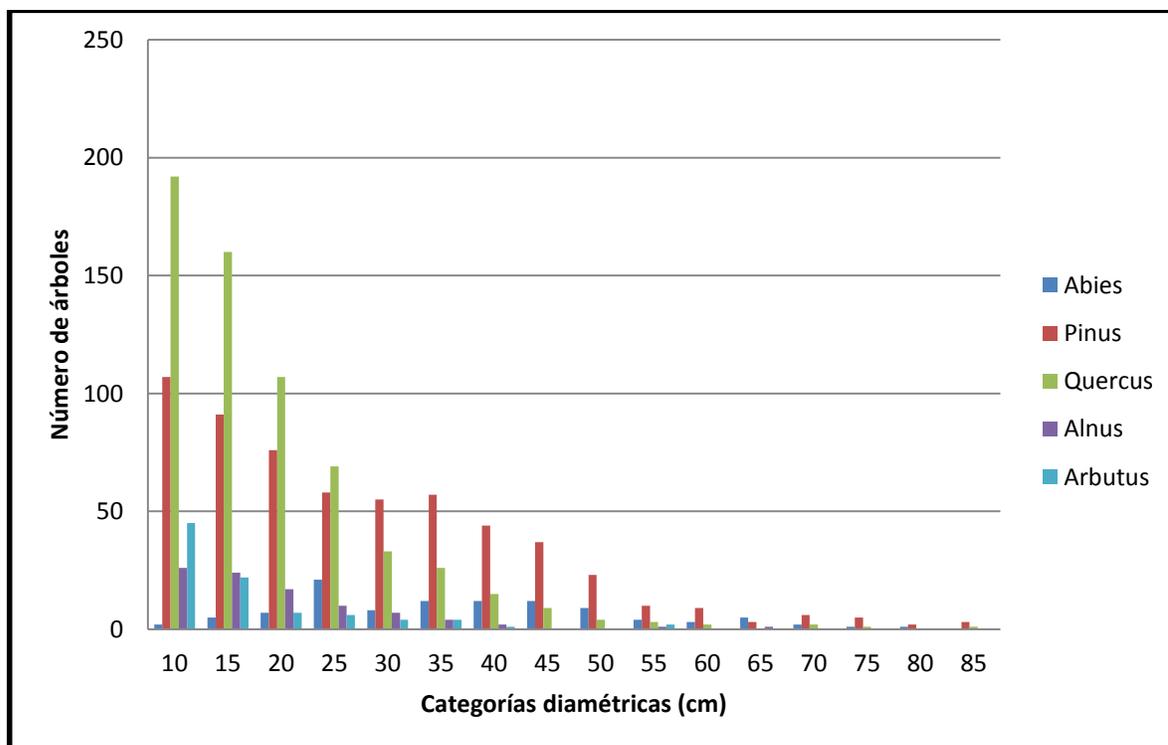


Figura 23. Categorías diamétricas de 5 géneros de la cuenca de Cuitzeo.

5.2. Ecuaciones alométricas.

5.2.1. Volumen, biomasa y contenido de carbono por género.

En lo que respecta a la obtención de los modelos alométricos se obtuvo el contenido de carbono por individuo por especie y conjuntados por género (Cuadro 17); para de ésta manera contar con los datos de nuestras variables para realizar nuestros procesos de regresión, de tal manera de contar con nuestra variable de respuesta (CO₂) y nuestras variables predictoras (DAP, AT) ya descritas anteriormente.

Cuadro 17. Volumen , biomasa y contenido de carbono en los géneros forestales representativos de la cuenca de Cuitzeo.

Género	Número de árboles	VTA (m ³)	Biomasa (t)	C (t)
<i>Abies</i>	68	72.21	28.88	14.44
<i>Acacia</i>	59	2.17	2.50	0.75
<i>Alnus</i>	85	18.66	8.44	4.22
<i>Arbutus</i>	84	12.47	10.72	5.36
<i>Buddleja</i>	10	0.67	0.48	0.24
<i>Bursera</i>	154	11.04	4.99	2.50
<i>Ceiba</i>	16	2.45	0.65	0.32
<i>Celtis</i>	8	0.60	0.44	0.22
<i>Clethra</i>	12	1.33	0.67	0.34
<i>Crataegus</i>	59	6.53	4.72	2.36
<i>Cupressus</i>	13	1.03	0.42	0.21
<i>Eucalyptus</i>	19	4.28	3.02	1.51
<i>Eysenhardtia</i>	85	3.16	2.56	1.28
<i>Ficus</i>	17	1.05	0.41	0.20
<i>Ipomoea</i>	213	15.86	9.82	4.76
<i>Juniperus</i>	2	0.04	0.02	0.01
<i>Leucaena</i>	30	0.85	0.75	0.38
<i>Lonchocarpus</i>	11	1.02	0.98	0.49
<i>Lysiloma</i>	10	0.39	0.31	0.16
<i>Meliosma</i>	10	0.96	0.58	0.29
<i>Pinus</i>	613	409.10	207.52	103.77
<i>Prunus</i>	9	7.20	5.79	2.90
<i>Quercus</i>	724	163.92	125.28	62.67
<i>Ternstroemia</i>	21	1.00	0.66	0.33
Otros	141	6.80	4.85	2.43

5.2.2. Comparativo de modelos.

Como se puede observar en el Cuadro 18, el modelo que mejor se ajusta es el potencial debido a que su R^2 es el más cercano a uno, lo que demuestra que es el modelo que mide la mayor proporción de variabilidad total de la variable de respuesta con respecto a su media, que es explicada por la variable explicativa por medio del modelo de regresión. Así mismo en la figura 24, podemos observar las líneas de ajuste para estimar la captura de carbono de 4 géneros forestales diferentes utilizando el modelo de potencia.

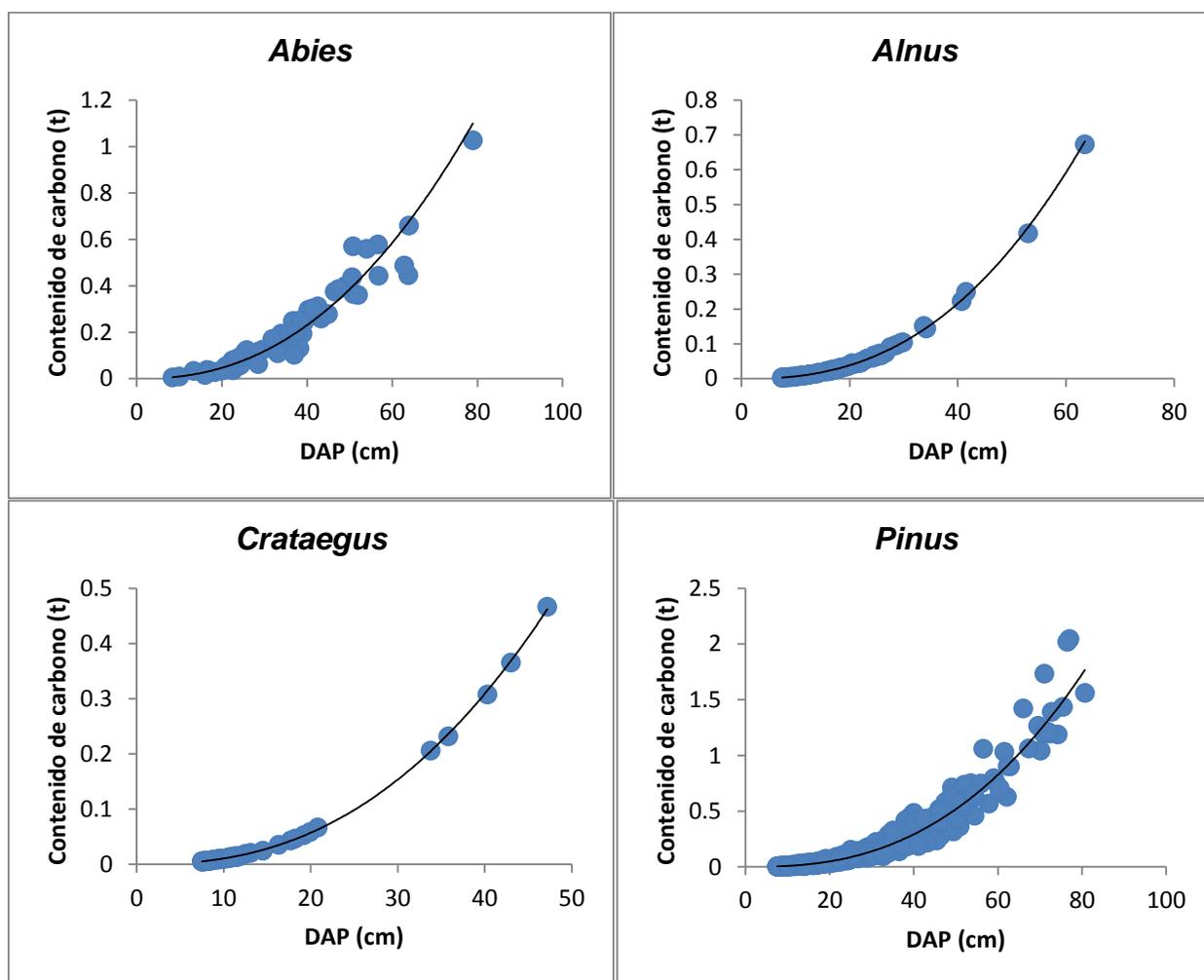


Figura 24. Curvas de ajuste para estimar el contenido de carbono en 4 géneros mediante el modelo alométrico de potencia.

Cuadro 18. Comparativo de los 4 modelos alométricos.

Género	Modelo de regresión							
	Regresión lineal simple		Regresión lineal múltiple		Potencial		Exponencial	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
<i>Abies</i>	$C = -0.4448 + 0.025DAP$	0.9046	$C = -0.5888 + 0.0217DAP + 0.0132AT$	0.9046	$C = 1 \times 10^{-4} DAP^{2.2967}$	0.9462	$C = 0.0128e^{0.068DAP}$	0.8616
<i>Acacia</i>	$C = -0.0278 + 0.0038DAP$	0.8932	$C = -0.0289 + 0.0035DAP + 0.0008AT$	0.8879	$C = 2 \times 10^{-5} DAP^{2.6225}$	0.9788	$C = 0.001e^{0.2148DAP}$	0.8926
<i>Alnus</i>	$C = -0.2152 + 0.017DAP$	0.8217	$C = -0.1803 + 0.0193DAP + 0.0072AT$	0.8319	$C = 5 \times 10^{-5} DAP^{2.4849}$	0.999	$C = 0.0031e^{0.1107DAP}$	0.8926
<i>Arbutus</i>	$C = -0.2587 + 0.0245DAP$	0.8777	$C = -0.1776 + 0.0263DAP + 0.0167AT$	0.8928	$C = 8 \times 10^{-5} DAP^{2.4633}$	0.9971	$C = 0.0044e^{0.1174DAP}$	0.917
<i>Buddleja</i>	$C = -0.0266 + 0.0038DAP$	0.913	$C = -0.0459 + 0.0037DAP + 0.0034AT$	0.9615	$C = 7 \times 10^{-5} DAP^{2.1994}$	0.9637	$C = 0.0025e^{0.1543DAP}$	0.9615
<i>Bursera</i>	$C = -0.0306 + 0.0036DAP$	0.9117	$C = -0.0306 + 0.0035DAP - 6.5 \times 10^{-6} AT$	0.9117	$C = 2 \times 10^{-5} DAP^{2.4511}$	0.9964	$C = 0.0013e^{0.1555DAP}$	0.9499
<i>Ceiba</i>	$C = -0.0182 + 0.0021DAP$	0.9605	$C = -0.0102 + 0.0024DAP - 0.0021AT$	0.9729	$C = 1 \times 10^{-5} DAP^{2.4611}$	0.9997	$C = 0.0008e^{0.1554DAP}$	0.9746
<i>Clethra</i>	$C = -0.0659 + 0.008DAP$	0.9801	$C = -0.0697 + 0.0072DAP + 0.0013AT$	0.9811	$C = 2 \times 10^{-5} DAP^{2.5123}$	0.9991	$C = 0.0019e^{0.1265DAP}$	0.9636
<i>Crataegus</i>	$C = -0.0869 + 0.0097DAP$	0.9331	$C = -0.0729 + 0.0099DAP - 0.0028AT$	0.9348	$C = 4 \times 10^{-5} DAP^{2.4325}$	0.9988	$C = 0.003e^{0.1213DAP}$	0.9391
<i>Cupressus</i>	$C = -0.0191 + 0.0026DAP$	0.9365	$C = -0.0284 + 0.0019DAP + 0.0019AT$	0.9701	$C = 4 \times 10^{-5} DAP^{2.2309}$	0.9722	$C = 0.0015e^{0.1655DAP}$	0.9523
<i>Eysenhardtia</i>	$C = -0.0312 + 0.0044DAP$	0.9447	$C = -0.0341 + 0.0042DAP - 0.0009AT$	0.9509	$C = 4 \times 10^{-5} DAP^{2.4461}$	0.9943	$C = 0.0015e^{0.1943DAP}$	0.9748
<i>Ficus</i>	$C = -0.0184 + 0.0025DAP$	0.962	$C = -0.0188 + 0.0024DAP + 0.0001AT$	0.9621	$C = 2 \times 10^{-5} DAP^{2.4576}$	0.9987	$C = 0.0009e^{0.1837DAP}$	0.9758
<i>Guazuma</i>	$C = -0.0163 + 0.0027DAP$	0.9767	$C = -0.0156 + 0.0026DAP - 0.0001AT$	0.9768	$C = 4 \times 10^{-5} DAP^{2.3765}$	0.9989	$C = 0.001e^{0.2159DAP}$	0.9851
<i>Ipomoea</i>	$C = -0.0395 + 0.0046DAP$	0.8953	$C = -0.0378 + 0.0046DAP - 0.0005AT$	0.8957	$C = 3 \times 10^{-5} DAP^{2.4519}$	0.9979	$C = 0.0017e^{0.1598DAP}$	0.9517
<i>Leucaena</i>	$C = -0.0209 + 0.0034DAP$	0.9784	$C = -0.0214 + 0.0033DAP + 0.0001AT$	0.9787	$C = 5 \times 10^{-5} DAP^{2.3891}$	0.994	$C = 0.0013e^{0.2195DAP}$	0.9728
<i>Lonchocarpus</i>	$C = -0.0613 + 0.0067DAP$	0.9971	$C = -0.0609 + 0.0069DAP - 0.0004AT$	0.9975	$C = 4 \times 10^{-5} DAP^{2.5455}$	0.9981	$C = 0.0031e^{0.165DAP}$	0.9915
<i>Lysiloma</i>	$C = -0.0245 + 0.0037DAP$	0.9714	$C = -0.0259 + 0.0028DAP + 0.0022AT$	0.9802	$C = 3 \times 10^{-5} DAP^{2.5233}$	0.9994	$C = 0.0011e^{0.2234DAP}$	0.991
<i>Meliosma</i>	$C = -0.0406 + 0.0044DAP$	0.961	$C = -0.0453 + 0.0042DAP + 0.0014AT$	0.9721	$C = 3 \times 10^{-5} DAP^{2.4493}$	0.9938	$C = 0.0021e^{0.1554DAP}$	0.9851
<i>Pinus</i>	$C = -0.2296 + 0.0155DAP$	0.7859	$C = -0.2586 + 0.0137DAP + 0.0053AT$	0.7921	$C = 2 \times 10^{-5} DAP^{2.5655}$	0.9753	$C = 0.0051e^{0.0961DAP}$	0.8914
<i>Pistacia</i>	$C = -0.0426 + 0.0051DAP$	0.9812	$C = -0.0416 + 0.0051DAP - 0.0003AT$	0.9811	$C = 3 \times 10^{-5} DAP^{2.4507}$	0.9991	$C = 0.0017e^{0.1375DAP}$	0.9721
<i>Prunus</i>	$C = -0.2708 + 0.0205DAP$	0.9223	$C = -0.1632 + 0.0247DAP - 0.0294AT$	0.9391	$C = 3 \times 10^{-5} DAP^{2.5472}$	0.9957	$C = 0.0066e^{0.085DAP}$	0.9404
<i>Quercus</i>	$C = -0.227 + 0.0171DAP$	0.6754	$C = -0.2367 + 0.0166DAP + 0.0022AT$	0.6762	$C = 3 \times 10^{-5} DAP^{2.5547}$	0.9711	$C = 0.0048e^{0.1074DAP}$	0.8586
<i>Ternstroemia</i>	$C = -0.025 + 0.0036DAP$	0.9677	$C = -0.0262 + 0.0034DAP + 0.0005AT$	0.9717	$C = 3 \times 10^{-5} DAP^{2.4918}$	0.9958	$C = 0.0012e^{0.2069DAP}$	0.9846
<i>Eucaliptus</i>	$C = -0.0348 + 0.0041DAP$	0.8858	$C = -0.0798 + 0.0038DAP + 0.0048AT$	0.9193	$C = 5 \times 10^{-4} DAP^{1.4927}$	0.931	$C = 0.0138e^{0.0569DAP}$	0.8452
<i>Arbustos</i>	$C = -0.0577 + 0.0069DAP$	0.8924	$C = -0.0514 + 0.0069DAP - 0.0013AT$	0.8957	$C = 2 \times 10^{-5} DAP^{2.5778}$	0.926	$C = 0.0016e^{0.1599DAP}$	0.8489

Las ecuaciones alométricas obtenidas a partir del modelo potencial se muestran en el Cuadro 19, para el caso de las especies arbustivas se generó solamente una ecuación alométrica debido a los pocos ejemplares de cada especie que había dentro de la muestra.

Cuadro 19. Coeficiente de determinación (R^2) y modelos alométricos de potencia para la estimación del contenido de carbono en árboles individuales por género en la cuenca de Cuitzeo.

Género	Parámetros		R^2	Ecuación
	b	k		
<i>Abies</i>	5×10^{-5}	2.2977	0.9462	$C = 5 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.2977}$
<i>Acacia</i>	2×10^{-5}	2.6225	0.9788	$C = 2 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.6225}$
<i>Alnus</i>	2×10^{-5}	2.4849	0.999	$C = 2 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4849}$
<i>Arbutus</i>	4×10^{-5}	2.4633	0.9971	$C = 4 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4633}$
<i>Buddleja</i>	7×10^{-5}	2.1994	0.9637	$C = 7 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.1994}$
<i>Bursera</i>	2×10^{-5}	2.4511	0.9964	$C = 2 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4511}$
<i>Ceiba</i>	1×10^{-5}	2.4611	0.9977	$C = 1 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4611}$
<i>Clethra</i>	2×10^{-5}	2.5123	0.999	$C = 2 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.5123}$
<i>Crataegus</i>	4×10^{-5}	2.4325	0.998	$C = 4 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4325}$
<i>Eysenhardtia</i>	4×10^{-5}	2.4461	0.9943	$C = 4 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4461}$
<i>Ficus</i>	2×10^{-5}	2.4576	0.9987	$C = 2 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4576}$
<i>Guazuma</i>	4×10^{-5}	2.3765	0.9989	$C = 4 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.3765}$
<i>Ipomoea</i>	3×10^{-5}	2.4519	0.9979	$C = 3 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4519}$
<i>Leucaena</i>	5×10^{-5}	2.3891	0.984	$C = 5 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.3891}$
<i>Lonchocarpus</i>	4×10^{-5}	2.5455	0.9981	$C = 4 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.5455}$
<i>Lysiloma</i>	3×10^{-5}	2.5233	0.994	$C = 3 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.5233}$
<i>Meliosma</i>	3×10^{-5}	2.4493	0.993	$C = 3 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4493}$
<i>Pinus</i>	2×10^{-5}	2.5655	0.9747	$C = 2 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.5655}$
<i>Quercus</i>	3×10^{-5}	2.5547	0.9711	$C = 3 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.5547}$
<i>Pistacia</i>	3×10^{-5}	2.4507	0.9991	$C = 3 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4507}$
<i>Prunus</i>	3×10^{-5}	2.5472	0.995	$C = 3 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.5472}$
<i>Ternstroemia</i>	3×10^{-5}	2.4918	0.985	$C = 3 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.4918}$
<i>Eucaliptus</i>	5×10^{-4}	1.4927	0.931	$C = 5 \times 10^{-4} \text{ DAP}^{1.4927}$
Arbustos	2×10^{-5}	2.5778	0.926	$C = 2 \times 10^{-5} \text{ DAP}^{2.5778}$

5.3. Mapas de captura de carbono.

5.3.1. Volumen, biomasa y contenido de carbono en los conglomerados.

En lo que respecta a la determinación del contenido de carbono de la biomasa arbórea aérea en los 4 sitios que contienen los conglomerados para el desarrollo y obtención de los modelo de regresión, usados para generar el mapa de carbono se pueden observar los resultados en el Cuadro 20, así mismo se pueden observar los resultados de contenido de carbono ponderado, expresados en unidades de $t\ ha^{-1}$.

Cuadro 20. Volumen, biomasa y contenido de carbono en los conglomerados de muestreo de la cuenca de Cuitzeo.

Número de conglomerado	Información de los 4 sitios					Expresado en toneladas por hectárea
	Sitios	Número de árboles	VTA (m^3)	Biomasa (t)	C ($t\ 1600\ m^3$)	C ($t\ ha^{-1}$)
60801	4	11	4.54	1.82	0.91	5.68
60551	4	115	46.44	25.47	12.73	79.58
60545	4	95	16.28	9.58	4.79	29.93
60297	4	56	7.07	4.25	2.12	13.27
59791	4	52	6.27	4.79	2.39	14.95
59548	4	80	31.54	17.57	8.78	54.90
59547	4	104	18.23	14.14	7.07	44.18
59546	4	49	36.80	20.73	10.36	64.77
59539	4	125	14.25	9.11	4.56	28.47
59540	4	24	2.11	1.75	0.88	5.47
59300	4	70	114.58	50.46	25.23	157.68
59298	4	88	30.86	21.51	10.75	67.21
59297	4	97	51.38	31.30	15.65	97.79
59294	4	32	5.13	3.66	1.83	11.43
59288	4	123	5.14	2.72	1.36	8.50
59049	4	128	33.33	16.91	8.46	52.85
59048	4	36	37.62	20.31	10.17	63.55
59047	4	41	16.51	11.21	5.61	35.04
59046	4	56	24.69	17.60	8.80	55.00
59045	4	90	14.39	9.51	4.75	29.71
59038	4	71	27.28	18.54	9.27	57.94
59035	4	22	9.05	7.66	3.83	23.95
58797	4	30	21.77	10.43	5.21	32.58
58546	4	42	6.80	3.87	1.92	12.01
58545	4	66	6.56	3.54	1.77	11.07
58544	4	80	52.21	23.31	11.65	72.84
58535	4	113	7.51	4.13	2.07	12.91
58293	4	82	28.89	15.01	7.50	46.89
58292	4	30	10.58	5.24	2.62	16.39
58281	4	39	7.54	5.31	2.65	16.58
58042	4	54	4.31	3.057	1.53	9.55
58041	4	112	8.72	5.54	2.77	18.09
58028	4	100	8.48	5.23	2.61	16.34
57776	4	13	1.47	1.03	0.51	3.21
57535	4	62	9.23	7.48	3.74	23.36
57529	4	98	3.94	2.65	1.32	8.27
57029	4	15	5.21	3.50	1.75	10.93

En cuanto a los valores de contenido de carbono ponderado a hectárea dentro de los conglomerados de muestreo se puede observar que la mayoría contienen entre 3.21 y 55 t ha⁻¹ de contenido de carbono, con excepción de un conglomerado que se muestra como valor atípico en el diagrama de caja el cual contiene un valor de 157.68 t ha⁻¹ (Figura 25), es importante mencionar que ésta información se decidió conservarlo ya que se encuentra ubicado en una área conservada de bosque de Oyamel y es factible la existencias de dichas cantidades.

Éstos conglomerados tienen un promedio de 35.48 t ha⁻¹, un rango de 154.47 t ha⁻¹ y una desviación estándar de 32.1 t ha⁻¹ de contenido de carbono (Cuadro 21).

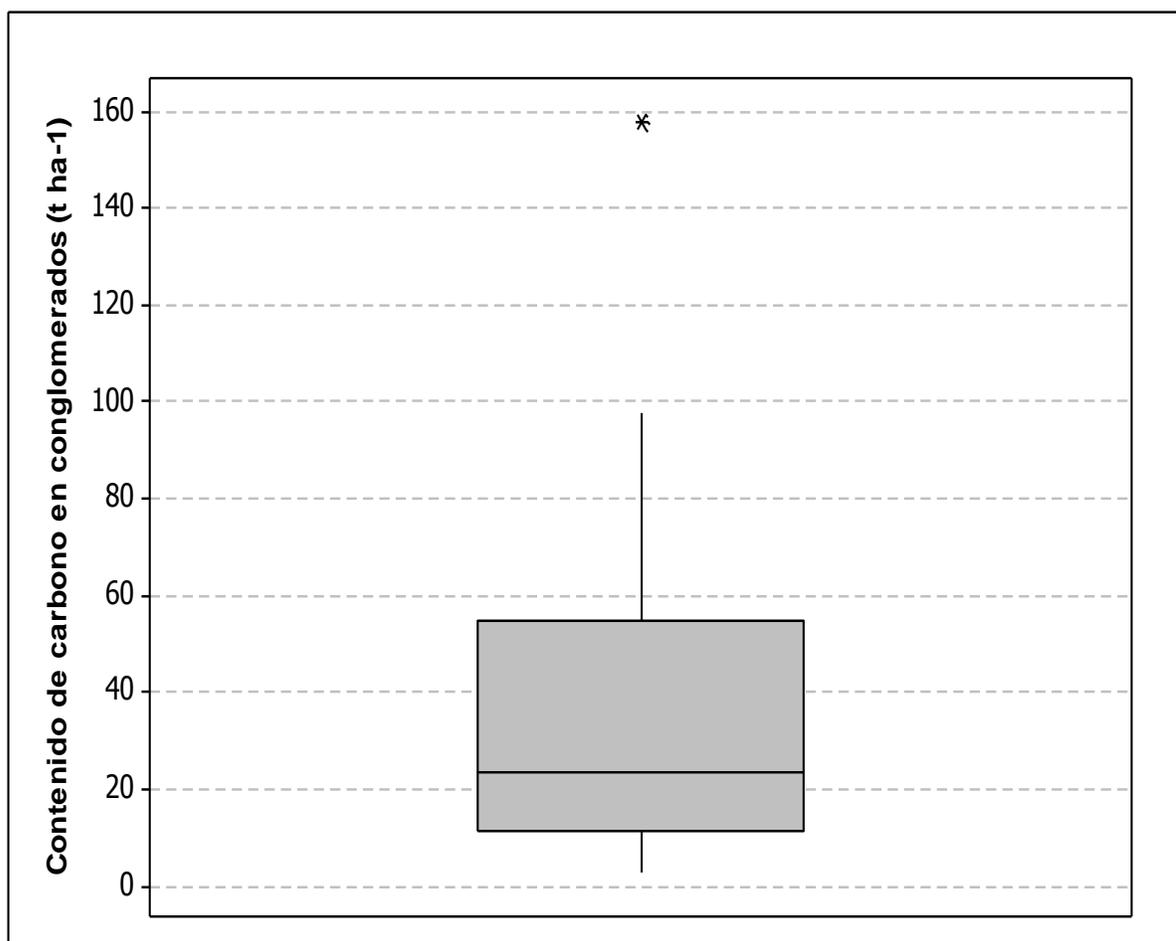


Figura 25. Diagrama de caja del contenido de carbono en los conglomerados.

Cuadro 21. Resumen de estadísticas de contenido de carbono ($t\ ha^{-1}$) en los conglomerados.

Promedio	Rango	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
35.48	154.47	32.1	3.21	157.68

5.3.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).

Para el caso del área de estudio el NDVI obtuvo valores de reflectancia que van desde -0.38 hasta 0.64 (Figura 26) y el SAVI de -0.26 hasta 0.53 (Figura 27), para ambos casos se destaca que los valores positivos más altos se asocian a las áreas con mayor abundancia de vegetación, en este caso dichos valores se ubican en áreas boscosas de clima templado-frio como son el bosque de oyamel, bosque de pino, bosque mesófilo y bosque de pino-encino, así como en las áreas de bosque cultivado y en alturas sobre el nivel del mar más elevadas, caso contrario de la selva baja caducifolia en donde se puede observar que tiene menores valores de reflectancia.

Existen valores positivos más altos que se salen de las áreas de bosques y selvas, sobre todo en áreas de agricultura de riego y en donde existe presencia de vegetación acuática dentro de los cuerpos de agua existentes en la cuenca de Cuitzeo, esto se debe particularmente a que dicha vegetación arroja valores más altos de reflectividad que se relaciona con el mesófilo de la hoja siempre verde en el infrarrojo cercano lo cual se ve reflejado en ambos mapas.

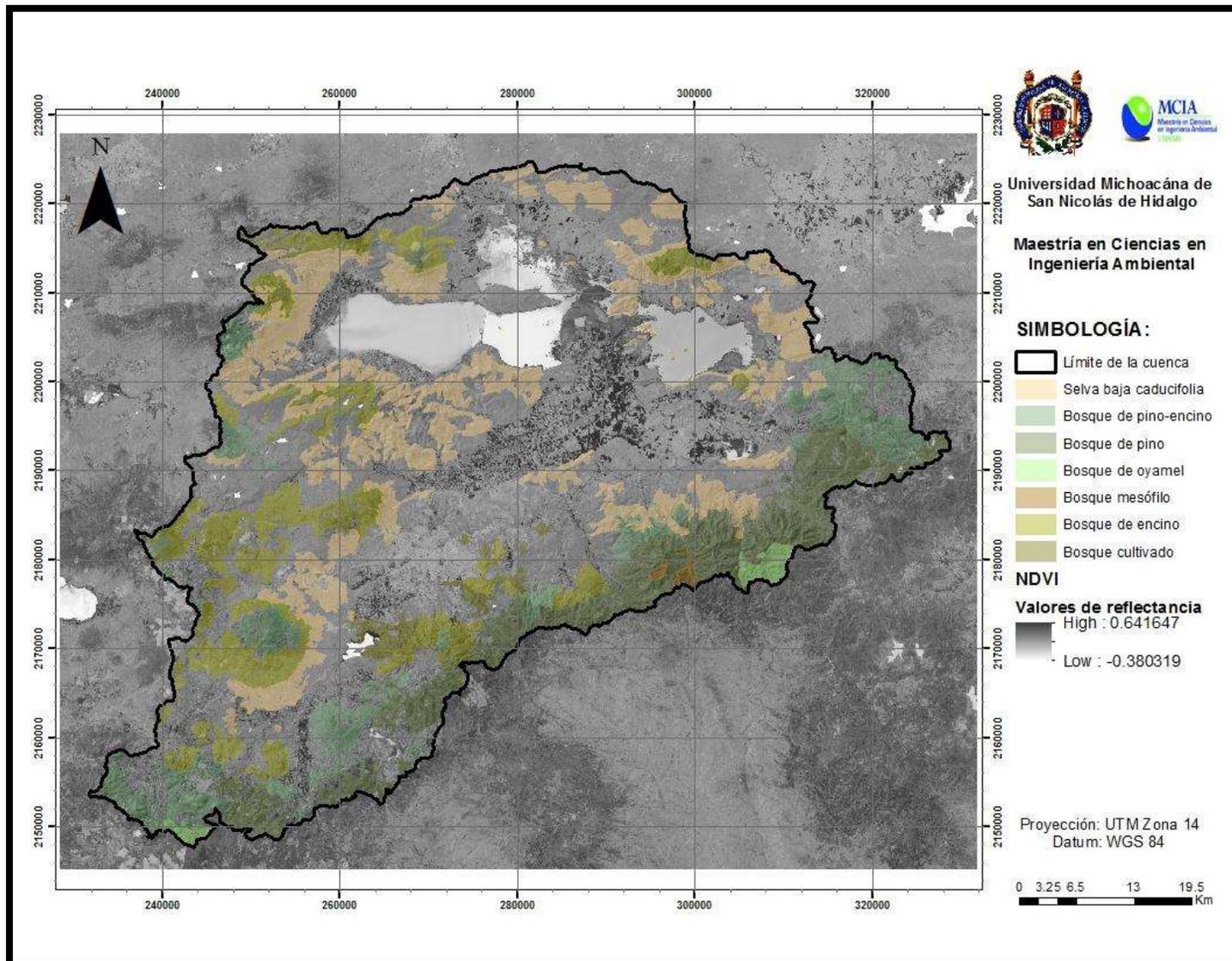


Figura 26. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de la cuenca de Cuitzeo.

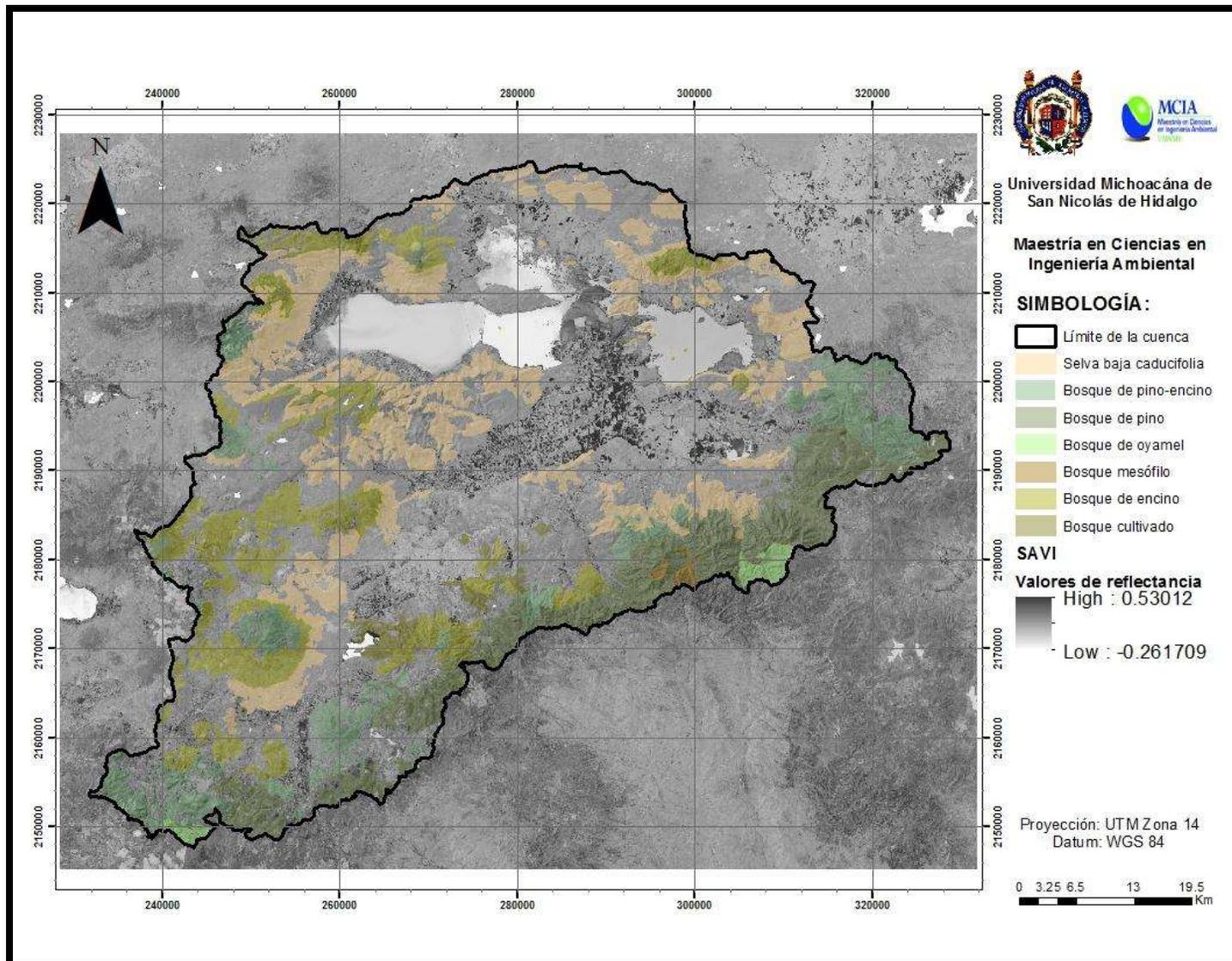


Figura 27. Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) de la cuenca de Cuitzeo.

5.3.3. Información espectral en los conglomerados de muestreo.

Los resultados de la estadística zonal se muestran en el Cuadro 22, al realizar las regresiones de mejores subconjuntos con ayuda de Minitab, arrojó como resultado que la variable que se correlaciona mejor con el contenido de carbono contenido en los conglomerados de muestreo es el promedio con un coeficiente de determinación (R^2) con un $R^2= 0.70$, seguido de la suma con un $R^2=$ de 0.59. En lo que respecta al SAVI, la que se correlaciona mejor con el contenido de carbono en los conglomerados de muestreo, y que obtuvo un mayor coeficiente de determinación (R^2) fue el promedio con un $R^2= 0.714$, seguido de la suma con un $R^2=$ de 0.64.

Cuadro 22. Resumen de estadísticas de reflectancia del NDVI y SAVI en los conglomerados.

Reflectancia	N	Media	Desviación estándar	Mediana	Máximo
NDVI					
Rango	37	0.088	0.038	0.085	0.193
Promedio	37	0.296	0.057	0.299	0.411
Desviación estándar	37	0.028	0.013	0.024	0.058
Suma	37	3.406	0.729	3.533	4.757
SAVI					
Rango	37	0.0615	0.0042	0.0593	0.1204
Promedio	37	0.1655	0.0067	0.1585	0.2635
Desviación estándar	37	0.019	0.0014	0.0177	0.041
Suma	37	1.891	0.084	1.881	2.933

5.3.4. Modelos de regresión.

Teniendo en cuenta que la variable estadística de reflectancia que más se correlaciona es el promedio para ambos casos, se procedió a realizar la regresión lineal para la obtención del modelo de correlación en donde la variable predictora como se mencionó anteriormente es la reflectancia promedio y nuestra variable de respuesta son los contenidos de carbono de los conglomerados de muestreo (Figura 28 y 30).

Al realizar la regresión lineal simple entre éstas dos variables para cada índice de vegetación arrojó como resultado para el caso del NDVI un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0.838, lo cual indica una alta correlación entre las variables, además de un R^2 de 0.70 lo cual indica que el grado de confiabilidad del modelo entre éstas variables es de moderado a fuerte, así mismo se obtuvo un R^2 ajustado de 0.69, además de arrojar un valor de P (P-value) de 0.0004 lo cual indica que la variable predictora (reflectancia del NDVI) es confiable para predecir por medio de regresión lineal el valor de contenido de carbono. Importante también mencionar los resultados obtenidos en cuanto a la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) que arrojó un resultado de 14.08 (Cuadro 24), indicador importante para la validación del modelo debido a que nos muestra el error que genera el modelo con relación a la línea de regresión, de acuerdo al resultado es aceptable y se asemeja a lo reflejado en algunos estudios similares como el realizado por Aguirre (2009). En el análisis de varianza de este modelo de regresión arrojó un estadístico F de 75.28 así como un valor crítico de F (P-value) de 0.0004, lo cual indica que la variación de los datos no es significativa. En cuanto al modelo que arrojó la regresión fue el siguiente:

$$C = -104.9 + 480.37NDVI$$

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

En lo que respecta al análisis de residuales de este modelo se puede observar que los puntos están dispersos y no tienen ningún patrón, lo que sugiere que la varianza de los errores es constante y por lo tanto se distribuyen de forma normal, en ambos casos se puede observar un dato atípico poco común (conglomerado 59300) el cual influye de manera considerable éstos indicadores en el modelo de regresión (Figura 29).

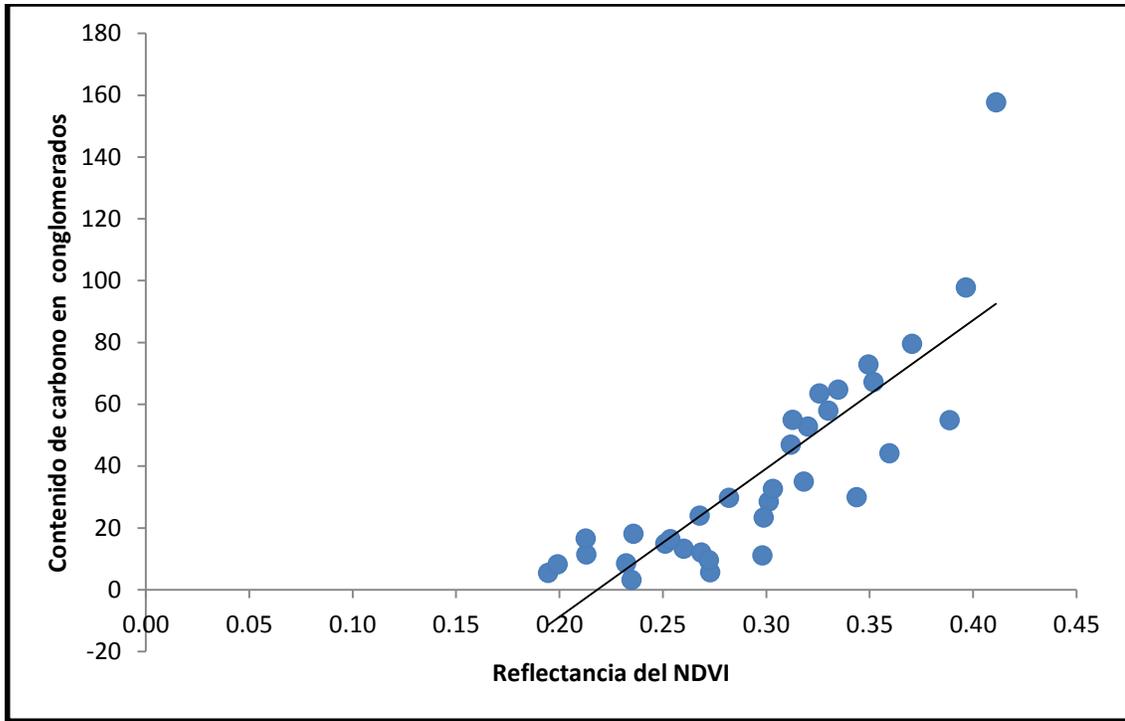


Figura 28. Gráfica de regresión lineal del NDVI.

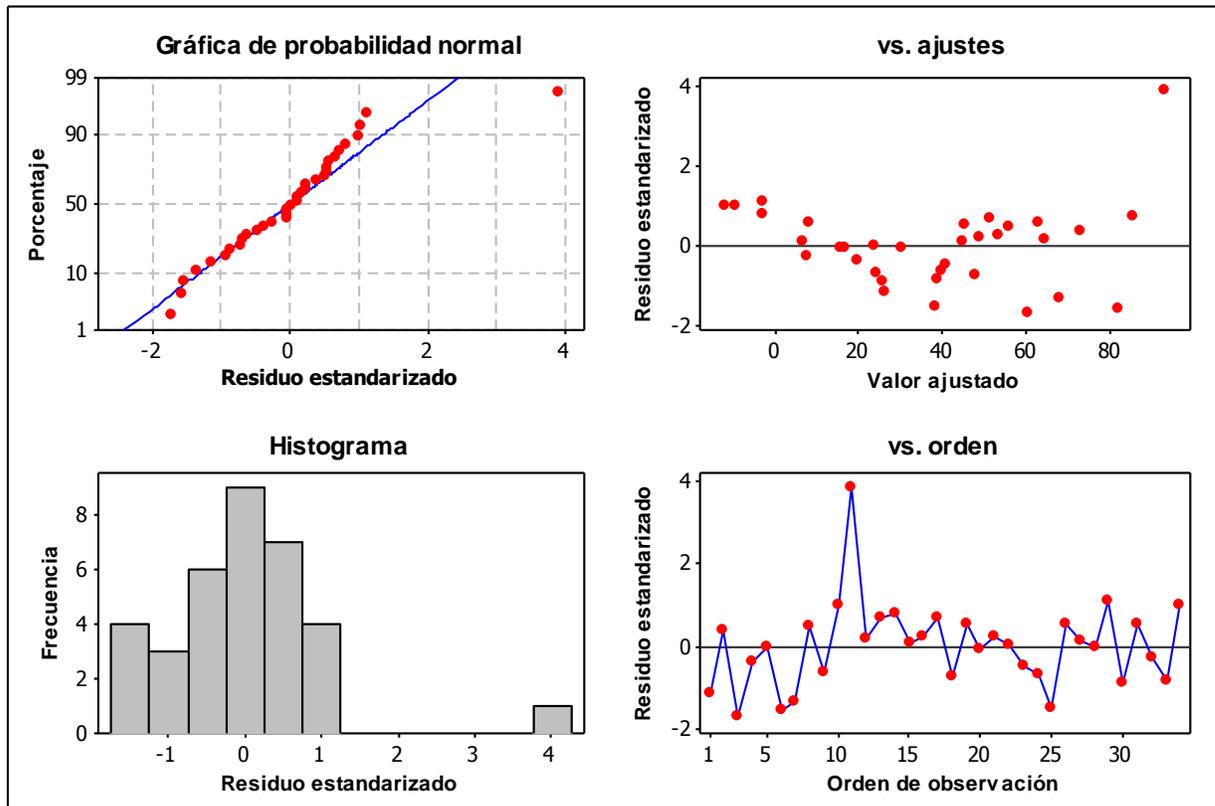


Figura 29. Gráficas de residuos del modelo de regresión con NDVI.

Para el caso de la regresión lineal del índice de vegetación SAVI, arrojó un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0.845, así como un R^2 de 0.714, un mejor grado de confiabilidad en el modelo que lo resultante para el caso del NDVI, así mismo se obtuvo un R^2 ajustado de 0.706, además de un valor de P (P-value) de 0.0003.

En cuanto a los indicadores que sirven para validar el modelo arrojó resultados ligeramente mejores que el caso anterior, para el caso del RMSE arrojó un resultado de 13.78 (Cuadro 11). En el análisis de varianza de este modelo de regresión arrojó un estadístico F de 87.25, así como un valor crítico de F (P-value) de 0.0003. El modelo que arrojó la regresión fue:

$$C = -74.23 + 663.04SAVI$$

Dónde: -74.23 es la ordenada al origen y 663.04 la pendiente de la línea de regresión.

En cuanto al análisis de residuales de este modelo fue un resultado muy parecido al modelo anterior en donde se puede observar que los puntos están dispersos y sin patrón teniendo buenos indicadores en los residuales del modelo, y en la probabilidad de normalidad se puede observar que siguen una distribución normal, pero con la observación que influye notablemente (Figura 30).

Estadísticamente hablando el índice de vegetación que genera mayor certeza en el modelo de regresión lineal es el SAVI, aunque no es una diferencia muy significativa (Cuadro 23), para fines prácticos ambos índices de vegetación son recomendables para áreas de bosques y selvas siempre verdes, aunque el SAVI tiene cierta ventaja sobre el NDVI ya que elimina los efectos que genera el fondo del suelo al momento de obtener la información espectral relacionada con la concentración de biomasa vegetal, sobre todo para aquellas áreas donde la cobertura vegetal es escasa o bien para vegetación de zonas áridas y semiáridas.

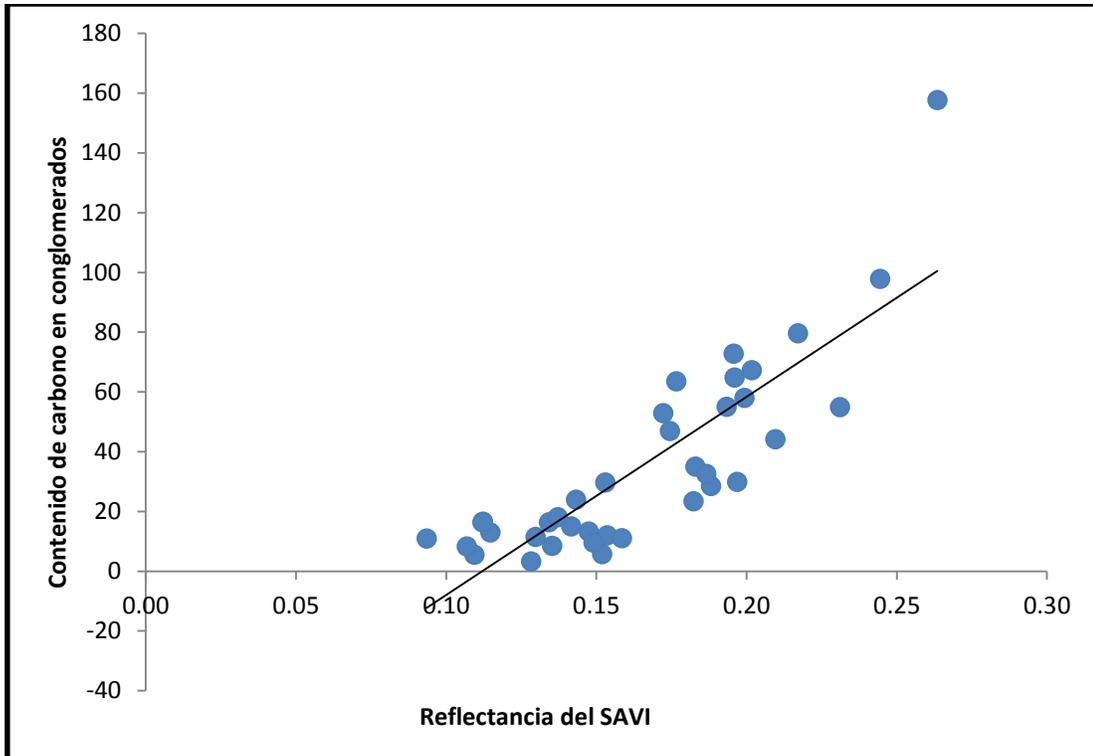


Figura 30. Gráfica de regresión lineal del SAVI.

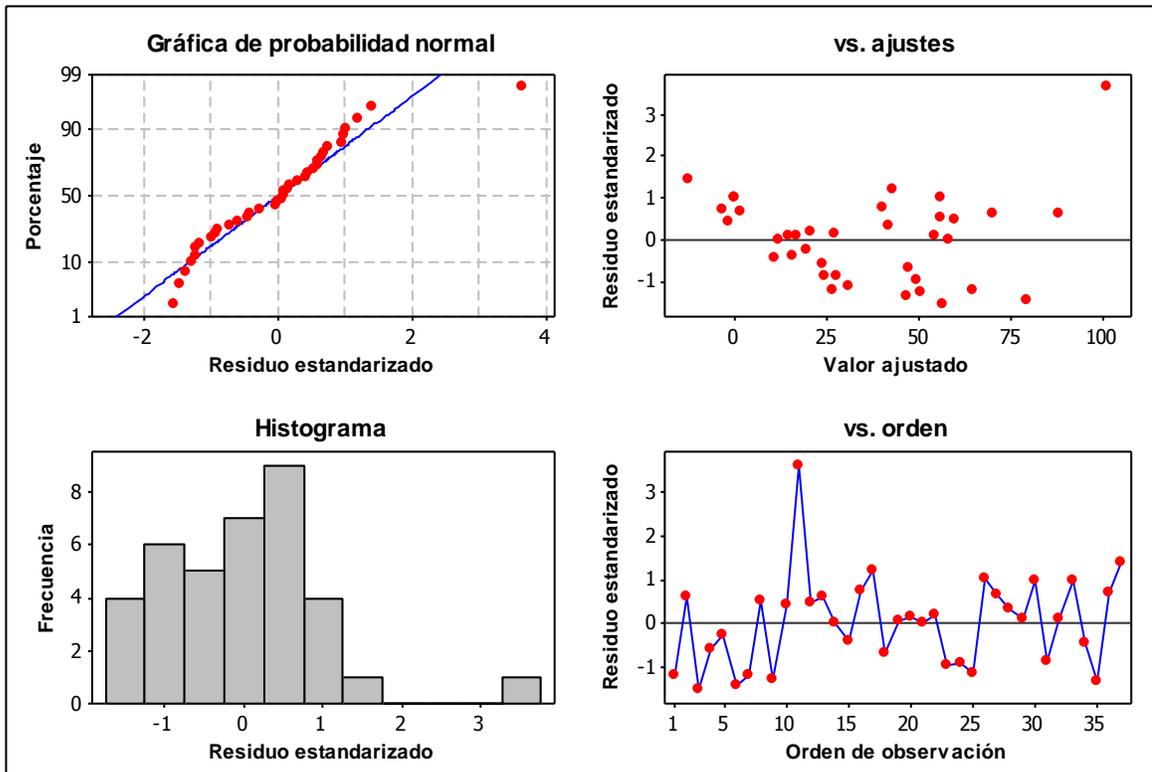


Figura 31. Gráficas de residuos del modelo de regresión con SAVI.

Cuadro 23. Indicadores de validación de los modelos de regresión.

Índice de vegetación	R	R ²	R ² (ajustado)	Valor de P (P-value)	RMSE
NDVI	0.838	0.7	0.69	0.0004	14.8
SAVI	0.845	0.71	0.7	0.0003	13.78

5.3.5. Mapas de captura de carbono.

Las Figuras 32 y 33 muestran el mapa de contenido de carbono para toda el área de estudio estimado aplicando el modelo de regresión al NDVI y al SAVI por medio de Idrisi. Una propiedad no deseada del mapa fue la aparición ocasional de los valores negativos, que son causados por los valores de las predicciones negativas que arrojaron los modelos de regresión, como se precisó anteriormente las regresiones lineales se realizaron correlacionando los valores de reflectancia de los índices de vegetación en zonas arboladas (forestales) con el carbono arbóreo aéreo obtenido a partir de la información dasométrica de dichas zonas, por tal motivo los valores que arrojaron los mapas de captura de carbono asociados a las clases o categorías diferentes a las zonas forestales que son los valores negativos principalmente no se tomarán en cuenta para el presente estudio. También es importante mencionar que para el caso del mapa elaborado mediante el NDVI, el rango superior de las predicciones de todo el mapa (204.309 t ha⁻¹) resultó ser superior al rango superior del modelo (180 t ha⁻¹). Lo mismo para el caso del mapa obtenido por medio de SAVI, el rango superior de las predicciones de todo el mapa (277.25 t ha⁻¹) también resultó ser superior al rango superior del modelo (237 t ha⁻¹), que al igual que los valores negativos, pertenecen a clases distintas de las zonas forestales.

Para ambos casos, los valores de éstas celdas del raster fueron cambiados por medio de la herramienta "Reclass" del SIG Idrisi con valores de cero (0), lo mismo se realizó para ambos mapas en lo que respecta a los valores negativos.

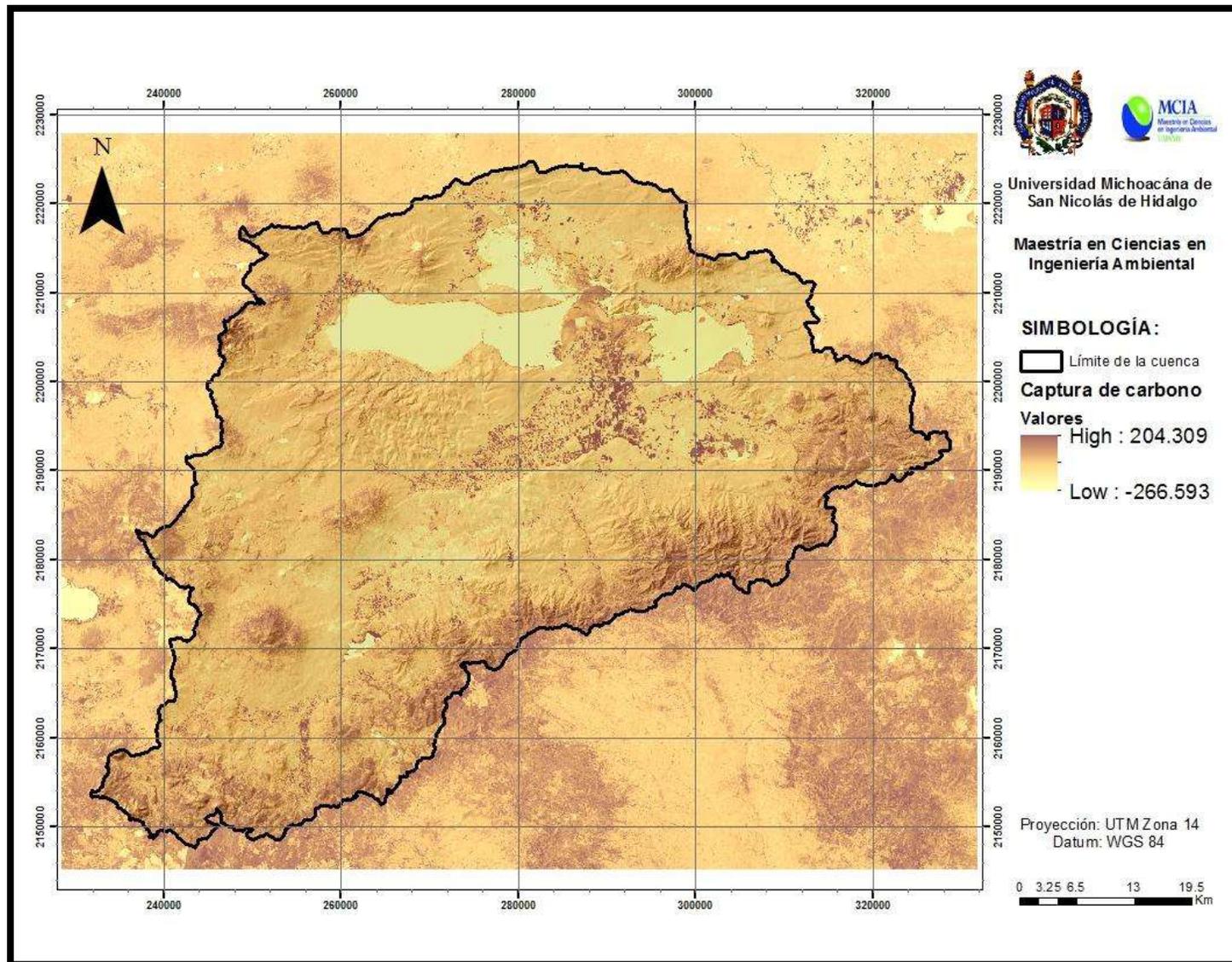


Figura 32. Mapa de captura de carbono empleando NDVI.

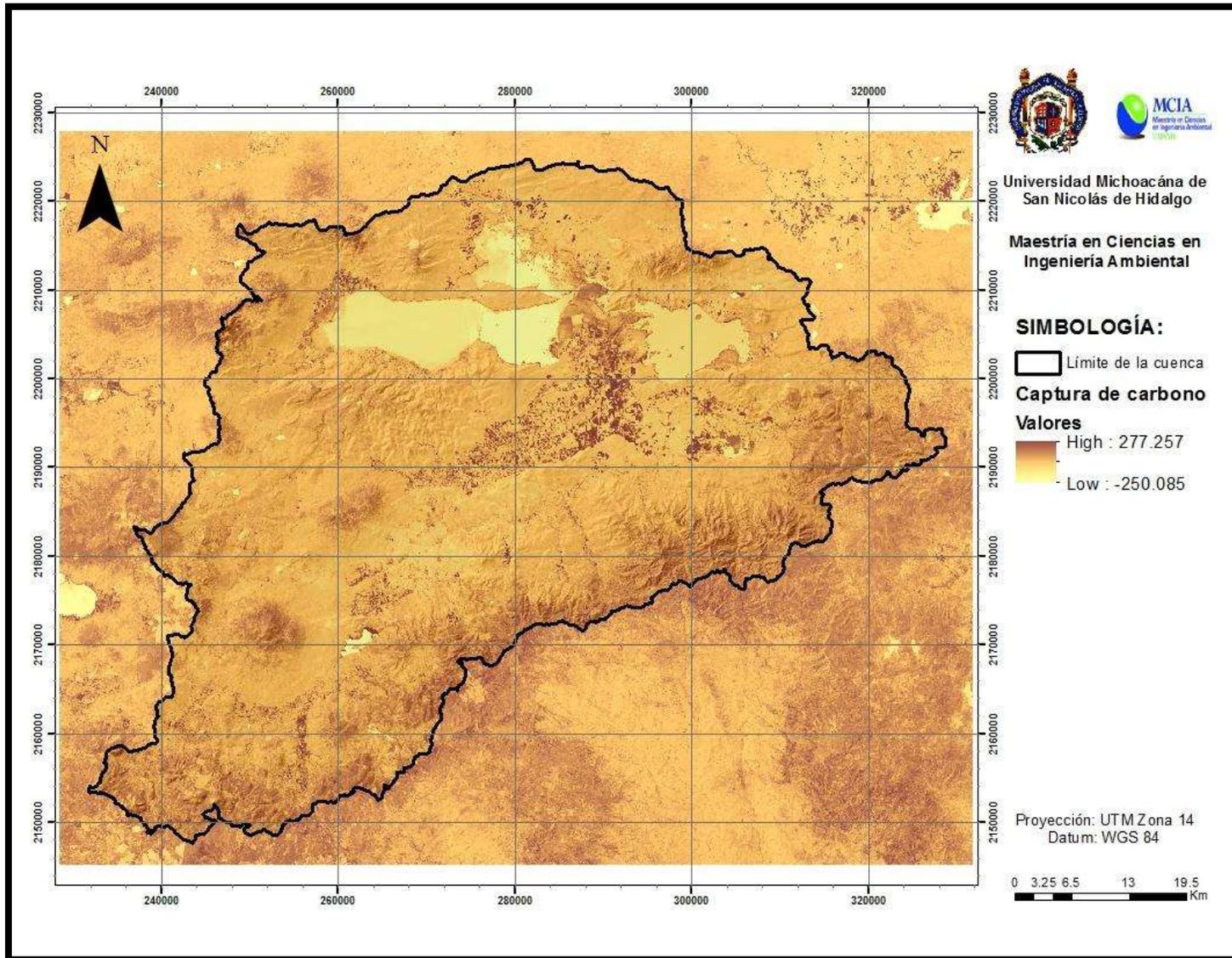


Figura 33. Mapa de captura de carbono empleando SAVI.

La clasificación de los mapas mediante el método de clasificación de natural break de Jenks, dio como resultado para ambos casos 6 intervalos de 20 t ha⁻¹ aproximadamente, como se puede ver en las figuras 34 y 35.

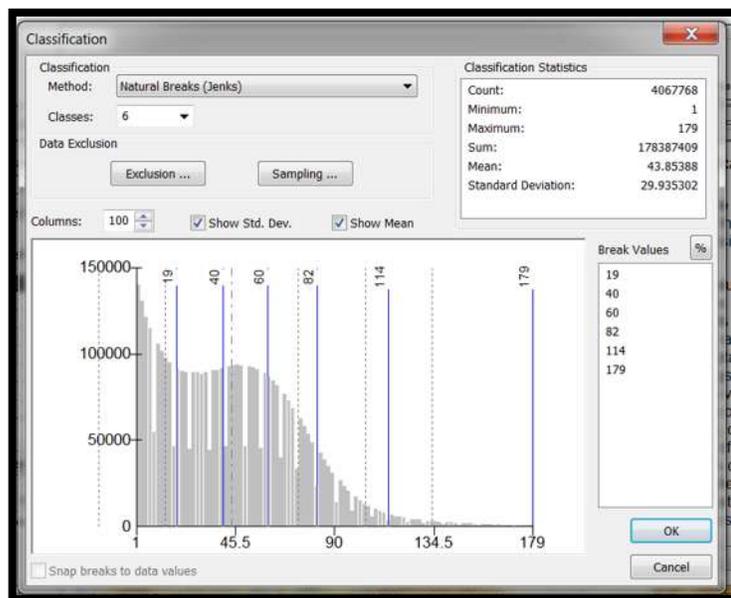


Figura 34. Proceso de clasificación del mapa de carbono empleando el NDVI.

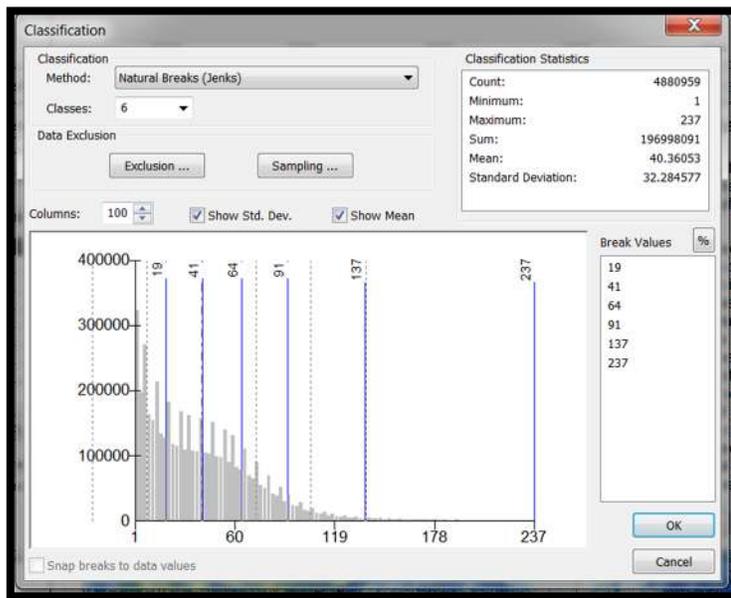


Figura 35. Proceso de clasificación del mapa de carbono empleando el SAVI.

En lo que respecta a la comparación y discusión de los resultados del presente estudio se tuvo una problemática ya que se tienen pocas referencias de trabajos similares, en donde se haya empleado la teledetección para realizar el mapeo de carbono, en este aspecto el enfoque para la discusión de los resultado se hace en base a la validación estadística de los procesos de regresión realizados.

De las pocas referencias que se tienen está el realizado por Aguirre *et al.*, (2009), que realizó un mapeo del carbono utilizando imágenes de alta resolución (10 x 10 m) Spot 5 en la biomasa arbórea aérea en un bosque de *Pinus patula*, el cual al momento de realizar la regresión lineal entre su información de campo y los valores espectrales de sus índices de vegetación obtuvo un R^2 de 0.65 para el caso del NDVI, valor similar a lo que arrojó el presente trabajo, el cual arrojó un R^2 de 0.70 para el caso del NDVI y del 0.71 para el caso del SAVI lo que refleja que el comportamiento tanto del NDVI como del SAVI fue directamente proporcional a la densidad forestal, siendo consistente con el aumento de la reflectividad registrada en el infrarrojo cercano, ocasionada por la presencia de mayores cantidades de clorofila, propia de bosques densos, aunque se destaca la ligera diferencia que arrojó el SAVI en cuanto al mayor grado de correlación.

Otro estudio es el realizado por Breschan y Mandallaz (2014), los cuales desarrollaron un mapa para la estimación de volumen en un bosque de coníferas ubicado en Suiza que cubre una superficie forestal de 2.000 ha, mediante un modelo de regresión lineal múltiple, basado en la correlación de la información sobre la altura del dosel que arrojó el sistema de escaneo laser "Lidar" (CHM) e información de campo del último inventario forestal realizado en dicho país, en tal estudio al momento de validar el modelo de regresión lineal se obtuvo un R^2 de 0.64 y la raíz cuadrada del error cuadrático medio RMSE de $123.79 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, parámetros estadísticos similares al presente estudio si consideramos la proporcionalidad de lo obtenido en los volúmenes con respecto a su contenido de carbono que arrojó el presente estudio.

Importante mencionar los resultados de Haapanen y Tuominen (2008) aportan conclusiones importantes que complementan los del presente trabajo; ellos usaron una fotografía aérea generalizada a un tamaño de píxel de 20 m y encontraron un menor error en la estimación de volumen maderable que el obtenido con una imagen Landsat ETM. Lo que indica que es posible mejorar las estimaciones si hay datos con una resolución espectral mejorada.

6. CONCLUSIONES.

De los 4 modelos alométricos utilizados el que obtuvo mejores resultados fue el de potencia, al obtener mejores resultados en los coeficientes de determinación (R^2), lo cual indica que éste modelo genera una mayor certeza estadística.

El poder hacer estimaciones mediante herramientas de teledetección de las cantidades de carbono que almacenan las masas forestales, son importantes para desarrollar una planeación ambiental sectorial en lo referente a los servicios ambientales que proporcionan los recursos forestales.

El empleo de índices de vegetación obtenidos mediante las imágenes de satélite LANDSAT 8 conjuntamente con las herramientas de análisis geoestadístico como es el caso de los modelos de regresión lineal, son confiables para la estimación de biomasa y contenido de carbono en las masas arbóreas forestales.

De los índices espectrales de vegetación probados, el que arrojó una mejor correlación con el carbono arbóreo aéreo obtenido a partir de la información de campo del INFyS fue el SAVI, el cual obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.71 y un RMSE de 13.78, a diferencia del NDVI el cual arrojó un R^2 del 0.69 y un RMSE de 14.8. Lo que confirma la capacidad de ambos índices de vegetación espectrales para predecir variables de densidad forestal en bosques siempre verdes.

El modelo de regresión lineal permite realizar estimaciones confiables de sumideros de carbono en el estrato arbóreo aéreo, aunque algunas pueden ser menos confiables, sobre todo para el caso de zonas donde existe vegetación caducifolia, ya que depende mucho de contar con imágenes de calidad en temporadas donde éste tipo de vegetación cuenta con el mayor grado de permanencia del follaje, el cual es importante al momento de obtención de resultados de la reflectancia de los índices de vegetación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL.

Situación actual de los reservorios de carbono arbóreo aéreo en la cuenca de Cuitzeo.

El presente trabajo se estructuró en 2 Capítulos de manera tal, que permitiera mediante el Capítulo 1 observar los diferentes tipos de vegetación existentes en la cuenca, así como determinar los cambios que hubo en ellos en un determinado periodo de tiempo (2001-2014) y complementado con los mapas de carbono obtenidos en el Capítulo 2, se pudo estimar tanto los reservorios de carbono arbóreo aéreo promedio, como las pérdidas generadas del mismo en el periodo de tiempo citado en los diferentes tipos de vegetación. Dicho lo anterior, al sobreponer los polígonos de los tipos de vegetación (áreas forestales) obtenidos del proceso de clasificación del año 2014 del Capítulo 1 a los mapas de carbono obtenidos (Figuras 36 y 37) y obtener las estadísticas zonales, los resultados que se obtuvieron en cuanto a la línea base de contenido de carbono arbóreo aéreo en los mapas realizados por medio del NDVI y del SAVI, fueron los siguientes:

Para el caso del mapa de captura de carbono obtenido mediante el NDVI, el bosque de oyamel arrojó un promedio de contenido de carbono de 53.9 t ha^{-1} , el bosque de pino de 54.6 t ha^{-1} , el bosque de encino de 29.08 t ha^{-1} , el bosque de pino encino de 43.19 t ha^{-1} , el bosque mesófilo de 58.3 t ha^{-1} , el bosque cultivado de 24.39 t ha^{-1} y 11.05 t ha^{-1} en selva baja caducifolia. Para el mapa realizado por medio del SAVI fue que el bosque de oyamel tiene un promedio de contenido de carbono de 49.05 t ha^{-1} , el bosque de pino de 52.47 t ha^{-1} , el bosque de encino de 27.95 t ha^{-1} , el bosque de pino encino de 42.68 t ha^{-1} , el bosque mesófilo de 54.87 t ha^{-1} , el bosque cultivado de 22.92 t ha^{-1} y 11.11 t ha^{-1} en cuanto a la selva baja caducifolia (Cuadro 24).

En cuanto a las cantidades de carbono arbóreo aéreo existentes en la cuenca de Cuitzeo los tipos de vegetación más importantes al respecto son el bosque de pino con una existencia de 1872863 t seguido del bosque de pino-encino con 1275779 t y el bosque de encino con una cantidad de 1007596 t .

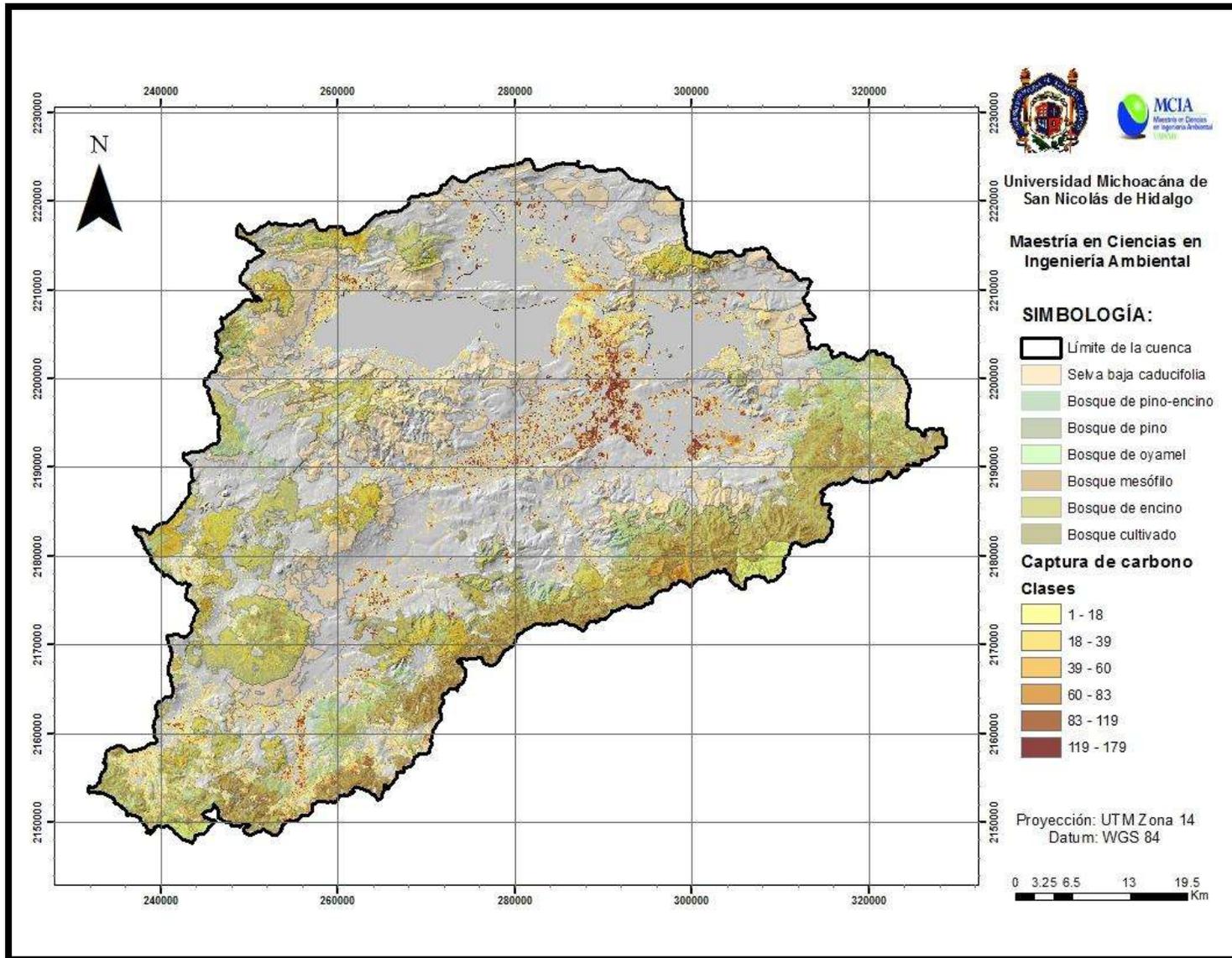


Figura 36. Mapa de captura de carbono hecho con NDVI y tipos de vegetación.

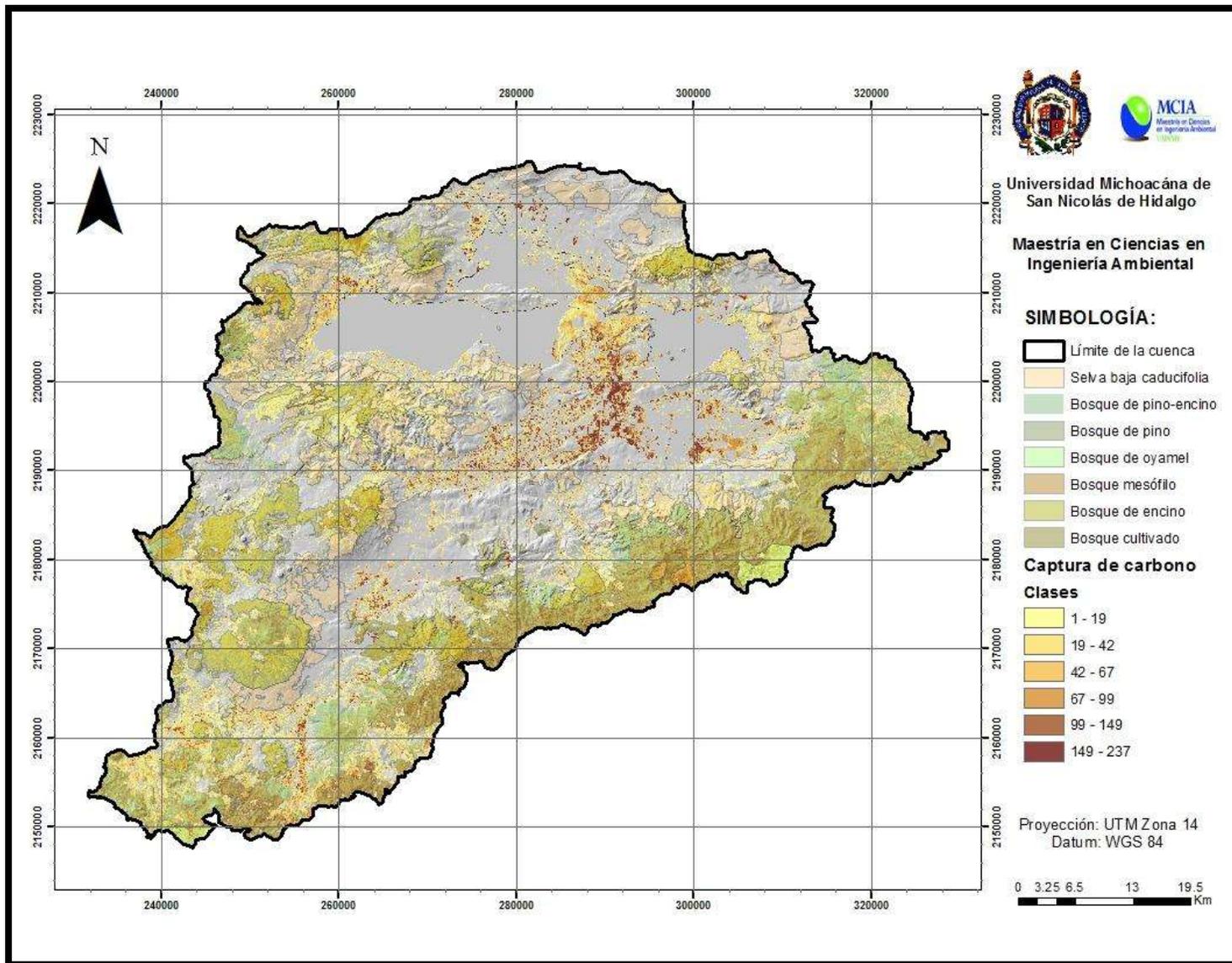


Figura 37. Mapa de captura de carbono hecho con SAVI y tipos de vegetación.

Importante mencionar la selva baja caducifolia por su cobertura dentro de la cuenca de Cuitzeo, con una cantidad de 673260 t. Por último mencionar tanto al bosque de oyamel con 145416 t, el bosque mesófilo de montaña con 60189 t, así como al bosque cultivado con una cantidad de 81567 t, esto en lo que respecta al mapa de carbono realizado con el NDVI.

Para el caso del mapa de captura de carbono realizado con SAVI, los resultados son parecidos ya que el bosque de pino arrojó un resultado de 1808745 t seguido de igual manera del bosque de pino-encino con 1245146 t y el bosque de encino con una cantidad de 977858 t, en lo que se refiere a la selva baja caducifolia arrojó una cantidad de 603706 t. Sin dejar de mencionar al bosque de oyamel con 133148 t, el bosque mesófilo de montaña con 57009 t y el bosque cultivado con una cantidad de carbono arbóreo aéreo de 77125 t (Cuadro 24).

Cuadro 24. Estimación de carbono arbóreo aéreo promedio por tipo de vegetación en la cuenca de Cuitzeo.

Tipo vegetación	Sup. (ha)	Carbono arbóreo aéreo promedio (t ha ⁻¹)		Carbono arbóreo aéreo (t)	
		NDVI	SAVI	NDVI	SAVI
Bosque de oyamel	2714	53.58	49.06	145416	133148
Bosque pino	34472	54.33	52.47	1872863	1808745
Bosque encino	34986	28.80	27.95	1007596	977858
Bosque pino-encino	29174	43.73	42.68	1275779	1245146
Bosque mesófilo	1039	57.93	54.87	60189	57009
Bosque cultivado	3365	24.24	22.92	81567	77125
Selva baja caducifolia	54339	11.05	11.11	673260	603706

Impactos ambientales en los reservorios de carbono arbóreo aéreo derivados del proceso de deforestación en el periodo 2001-2014 en la cuenca de Cuitzeo.

De acuerdo a la superficie pérdida durante el periodo 2001-2014 que arrojó el Capítulo I (Cuadro 9), así como a la cantidad promedio de captura de carbono en la biomasa arbórea aérea que arrojaron los mapas obtenidos con ambos índices de

vegetación a partir de las imágenes Landsat 8 del año 2014 (Cuadro 24), para cada tipo de vegetación tenemos las siguientes pérdidas aproximadas de captura de carbono:

Para el caso del NDVI hubo pérdidas de manera significativa durante este periodo para el caso del bosque de encino con 64396.8 t de carbono, también destacar el caso la selva baja caducifolia con 32696.95 t, seguidos por el bosque de pino y el bosque de pino-encino con una pérdida de 22492.62 y 13293.92 t respectivamente, los tipos de vegetación con menos pérdidas fueron el bosque de oyamel con 375.06 t y el bosque mesófilo el cual no tuvo pérdidas, caso especial las pérdidas del bosque cultivado con 4944.96 t, por ser forestaciones realizadas por el hombre y las cuales se han visto afectadas principalmente por el crecimiento de las áreas urbanas. En lo que respecta a SAVI, los resultados fueron parecidos a los arrojados por el NDVI, acentuando el bosque de encino con 62496.2 t de carbono y también la selva baja caducifolia con 32874.49 t, seguidos por el bosque de pino y el bosque de pino-encino con una pérdida de 21722.58 y 12974.72 t respectivamente, al igual que el caso anterior, los tipos de vegetación con menos pérdidas fueron el bosque de oyamel con 343.42 t y el bosque mesófilo de montaña el cual no tuvo pérdidas, para el caso del bosque cultivado con 4944.96 t de CO₂ perdidas hasta el 2014 (Cuadro 25).

Con lo anterior, se puede observar que se debe de poner especial atención a 2 tipos de vegetación, el bosque de encino y la selva baja caducifolia, tanto por la superficie pérdida que arrojó el periodo de estudio, como por las cantidades de carbono arbóreo aéreo que existen en ellos, ya que son susceptibles debido a la cercanía con las áreas urbanas y por estar colindantes con las áreas agrícolas.

También se puede observar la deforestación gradual de las áreas de bosque de pino y el bosque de pino-encino, debido principalmente a su importancia comercial, por tal motivo, se deben realizar acciones de conservación y/o restauración en dichas áreas.

Cuadro 25. Estimación de carbono arbóreo aéreo perdido por tipo de vegetación en la cuenca de Cuitzeo en el periodo 2001-2014.

Tipo vegetación	Sup. (ha)	NDVI		SAVI	
		(t ha ⁻¹)	Perdidas (t)	(t ha ⁻¹)	Perdidas (t)
Bosque de oyamel	7	53.58	375.06	49.06	343.42
Bosque pino	414	54.33	22492.62	52.47	21722.58
Bosque encino	2236	28.80	64396.8	27.95	62496.2
Bosque pino-encino	304	43.73	13293.92	42.68	12974.72
Bosque mesófilo	-	57.93	0	54.87	0
Bosque cultivado	204	24.24	4944.96	22.92	4675.68
Selva baja caducifolia	2959	11.05	32696.95	11.11	32874.49

En lo que respecta a la comparación y discusión con trabajos de captura de carbono realizados en la biomasa aérea por métodos convencionales como son por medio de las estimaciones del inventario forestal así como en estudios de carbono con métodos destructivos, en el Cuadro 26 se presentan algunos resultados.

Se puede observar que los resultados obtenidos por Masera y Ordoñez (1997), son similares a los obtenidos en el presente trabajo, a excepción del caso de la selva baja caducifolia en donde se obtuvo un resultado menor, lo cual se debe principalmente a que en la cuenca de Cuitzeo, estas áreas están conformadas por matorrales en su mayoría con poca cobertura e indicios de deterioro, también se puede deducir que ésta diferencia en los resultados se debe a la época de las escenas Landsat 8 utilizadas, ya que son del mes de Marzo y la vegetación caducifolia aún no contiene la totalidad de su follaje, el cual es determinante para la obtención de las concentraciones de biomasa vegetal, por su interacción muy distintiva con la energía en las regiones visibles del rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético y que se asocia principalmente con la clorofila de las hojas y por lo tanto con la cobertura vegetal, lamentablemente no se pudieron conseguir escenas de calidad de épocas de lluvia cuando la vegetación tiene el follaje en su totalidad, teniendo como principal problemática la considerable presencia de nubes y en algunos casos éstas cubrían donde se localizaban los conglomerados de muestreo lo que afectaba considerablemente los valores de

reflectancia de los índices de vegetación y por consecuencia los resultados de la regresión lineal.

En lo que respecta al estudio de captura de carbono realizado por Razo *et al.*, (2013) en áreas de bosque de Oyamel se puede observar una similitud, aunque mayor, con lo arrojado en el presente trabajo para ambos mapas de carbono.

Como se comentó anteriormente los resultados que se obtienen dependen de muchos factores, tanto del tipo de estudio que se realiza, como de las condiciones propias del área de estudio, como el tipo de vegetación, el grado de conservación o perturbación que se tenga, las condiciones agroecológicas, entre otros. Por ejemplo, en el estudio de De Jong (2000) que realizó en la Sierra de Chiapas, arrojó resultados promedio de contenido de carbono en la biomasa arbolada mayores a las del presente estudio, destacando la diferencia en los bosques de encino y el bosque de pino-encino. Lo más adecuado para el presente estudio, era el conseguir algún trabajo de captura de carbono realizado dentro de la cuenca de Cuitzeo para poder cotejar lo obtenido en dicho estudio y lo que arrojarán los mapas de captura de carbono dentro del polígono del área de estudio, de ésta manera se obtendría un comparativo mejor sustentado, pero lamentablemente no se pudo conseguir ningún estudio.

Cuadro 26. Comparativo del potencial de captura de carbono arbóreo aéreo ($t\ ha^{-1}$) con otros estudios.

Fuente	Presente estudio (2014)		Masera y Ordoñez (1997)	Razo <i>et al.</i> , (2013)	De Jong <i>et al.</i> , (1999)
Nivel	Regional		Nacional	Local	Local
Tipo de vegetación	NDVI	SAVI			
Bosque de pino	54.33	52.47	43.0	-	76.8
Bosque de encino	28.8	27.95	30.0	-	112.2
Bosque de pino-encino	43.73	42.68	51.0	-	100.95
Selva baja	11.05	12.11	42.0	-	19.6
Bosque cultivado	24.24	22.92	19.0	-	-
Bosque de oyamel	53.58	49.06	-	62.6	-

CONCLUSIONES GENERALES.

El empleo de imágenes satelitales Landsat y la teledetección, son herramientas que coadyuvan en la toma de decisiones para generar alternativas de la planeación regional en materia ambiental, ya que permiten realizar el monitoreo de los recursos naturales, generando información y conocimiento de manera rápida, sencilla y confiable.

En general, la vegetación de la cuenca de Cuitzeo se encuentra en un proceso de deterioro sensible, lo que ocasiona que se pongan en riesgo la permanencia de los servicios ambientales y la biodiversidad a causa del cambio de uso de suelo, principalmente en aquellas áreas que tienen menor distancia de los asentamientos humanos, lo que nos habla de la intensificación del uso del suelo como pastizales y áreas de cultivo, sin dejar de mencionar las afectadas por el crecimiento de las mismas.

Entre los resultados de cambio de uso de suelo y la evaluación de la captura de carbono en los diferentes tipos de vegetación, se destaca el impacto negativo generado a los bosque de encino y selva baja caducifolia principalmente causada por la agricultura y el crecimiento de las zonas urbanas, lo cual brindan argumentos para impulsar proyectos de aprovechamiento y/o conservación que busquen opciones más adecuadas para este tipo de ecosistemas vegetales.

Si bien, el sector forestal no es tan importante como el agrícola o el pesquero, los escenarios de mitigación de carbono, sitúan a la cuenca de Cuitzeo, como una superficie con alto potencial de captura de carbono en el mediano y largo plazo, por la buena conservación principalmente de sus bosques de pino, pino-encino y oyamel, ya que han tenido un menor proceso de deforestación y por tal motivo, se espera que el potencial de captura de carbono pueda incrementarse. Para el resto de los tipos de vegetación, la dinámica en el cambio de uso de suelo es clave para incrementar la captura de carbono de su superficie.

REFERENCIAS.

- Acosta, M. M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. 99 p. Montecillo, México.
- Aguirre, C. A. *et al.*, 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino patula en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43. 209-220 pp. México.
- Andrade, J. H. e Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. *Agroforesteria de las Américas*. 39-40 pp. Chile.
- Behrens *et al.*, 2010. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma*, v.5, n.3-4, 175-185 pp.
- Breschan, J. y Mandallaz, D. 2014. Accuracy Assessment of Timber Volume Maps Using Forest Inventory Data and LiDAR Canopy Height Models. *Forests*. 225-227 pp. Zurich, Suiza.
- Brown, S. 1997(a). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. Congreso Forestal Mundial. 107-121 pp. Anktara Turquía.
- Brown, S. 1997(b). Estimating biomass and biomass change of tropical forests. *FAO Forestry paper*, 134. Food and Agriculture Organization. Caracalla, 134 p. Rome, Italy.
- Castellanos, B. 1993. Producción de biomasa y eficiencia de crecimiento en rodales de *Pinus patula*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. 66 p. Montecillos, México.
- Castilla, G. 2003. Object-oriented analysis of remote sensing images for land cover mapping: conceptual foundations and a segmentation method to derive a baseline

- partition for classification. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 228 p. España.
- Chanton, J. 2002. Global Warming & Rising oceans. Action bioscience. Disponible en: <http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/chanton.html> (Fecha de consulta: Octubre del 2013).
- Chen, L.Y. y Yang, H. 2008. Scenario simulation and forecast of land use/cover in northern China. *Chines Scicence Bulletin*. 1401-1412 pp. China.
- Chuvieco, E. Fundamentos de teledetección espacial. 1996. Segunda edición. Ediciones Rialp, S.A., Madrid, España.
- Ciesla, W. M. 1996. Cambio climático, bosques y ordenación forestal: una visión de conjunto. FAO. 146 p. Roma.
- CONAFOR. 2012. Manual y procedimientos para el muestreo de campo. Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS). 136 p. Zapopan, Jalisco, México.
- CONANP. 2011. Tasa de cambio de uso del suelo en el Parque Nacional Pico de Orizaba, Veracruz, México en el periodo 2003-2011. 43 p. Xalapa, Veracruz, México.
- Daniel, W. 2002. Bioestadística: Base para las ciencias de la salud. 4ª Edición, Limusa. 736 p. México.
- Danilo, C. J. 2002. Teledetección del bosque. Ecología y conservación de bosques neotropicales. Editorial Tecnológica. pp 625-645. Disponible en <http://www.uprm.edu/biology/profs/chinea/lectesc/instrum/chineateledet.pdf>. (Fecha de consulta en: Noviembre del 2009).
- De Buen, F. 1940. Listado de peces de agua dulce de México. Trabajos Estación limnológica, 66 p. Pátzcuaro, Michoacán, México.

- De Jong, B. 2000. Forestry for mitigating the greenhouse effect. An ecological and economic assessment of the potential of land use to mitigate CO₂ emissions in the highlands of Chiapas, Mexico. Tesis Doctorado. 220 p. Holanda.
- Etter, A. Introducción a la ecología del Paisaje. 2001. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Colombia.
- Etter, A. *et al.*, 2006. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.114, 14-369 pp. USA.
- FAO, 1995. Evaluación de los recursos forestales 1990, Países tropicales. Estudio FAO Montes, Roma, Italia. pp. 32-36. Food and Agriculture Organization (FAO). 2007. Titulación de los bosques del mundo. 79-81 pp. Roma, Italia.
- FAO. 2005. Forest Resource Assessment (serie Internet) (15 resultados clave). Disponible en <http://www.fao.org>. (Fecha de consulta: Julio del 2014).
- FAO. 2010. Forest Resource Assessment (serie Internet) (principales resultados). Disponible en <http://www.fao.org>. (Fecha de consulta: Junio del 2014).
- Garduño, V. *et al.*, 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobre explotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia. México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 18-1: 37-54. p. México.
- Gayon, J. 2000. History of the Concept of Allometry. *Am Zool.* 40: 748-758 pp.
- Gayozo, J. 2010. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. *Revista Forestal Iberoamericana*: 1-13 pp. Chile.
- Haapanen, R., and S. Tuominen. 2008. Data combination and feature selection for Multi-source forest inventory. *Photogramm Eng. Rem. S.* 74(7): 869-880 pp. Finlandia.
- Husch, B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en los ecosistemas forestales. 9 p. Valdivia, Chile.

- INECC. 2006. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/615/inventario.pdf>. (Fecha de consulta: Octubre del 2013).
- INEGI. 2005. Marco Geoestadístico Nacional. Disponible en: <http://www.cuentame.inegi.org.mx> (Fecha de consulta: Noviembre del 2014).
- INEGI. 2009. Guía para la interpretación cartográfica: uso del suelo y vegetación. Aguascalientes, INEGI. 89 p. México.
- INEGI. Censo poblacional para Michoacán 2010(a). Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/poblacion/> (Fecha de consulta: Enero del 2013).
- INEGI. Economía y actividades productivas en Michoacán 2010(b). Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/movil/mexicocifras>. (Fecha de consulta: Abril del 2013).
- INEGI. Recursos naturales. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/default.aspx>. (Fecha de consulta: Agosto del 2013).
- Instituto de Geografía, UNAM. 2001. La dinámica de cambio de uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de procesos de deforestación. Boletín. 18-38 pp. Michoacán, México.
- Instituto de Geografía, UNAM. 2002. Análisis del cambio de uso del suelo. 83 p. México, México.
- Instituto de Geografía de la UNAM. 2009. Análisis de cambio del uso de suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. 33-52 pp. Estado de México, México.
- Israde, I. y Garduño, V. 1999. Lacustrine Record in a volcanic Intra-Arc Setting. The Evolution of de Late Neogene Cuitzeo Basin System (Central western Michoacán, México) Palaeogeography, Palaeoecology, Vol. 15. 209-227 pp. Michoacán, México.

- Jaramillo, J. B. 2005. El ciclo global del carbono en Cambio Climático: Una visión desde México. INE-SEMARNAT. México. 523 p.
- Jones, R. 2010. GIS Data Classifications in Cartographica. Disponible en: <http://blog.cartographica.com/blog/2010/8/16/gis-data-classifications-in-cartographica.html> (Fecha de consulta: Noviembre del 2014).
- Lambin, E. F. 1997. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography* 21: 375-393 pp.
- Locatelli, B. y Leonard, S. 2001. Un método para medir carbono almacenado en los bosques de Malleco (Chile). *Bois et Forêts des Tropiques*. 69-80 pp. Chile.
- Macdicken, K. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Estados Unidos, F. C. M. P. Winrock International Institute for Agricultural Development. 91 p. USA.
- Márquez, R. A. 2008. Cambio de uso de suelo y el desarrollo turístico en Bahía de Banderas Nayarit. *Ciencia UANL*. 161-167 pp. México.
- Martínez, R. D. y Masera, O. R. 2008. La captura de carbono como servicio ecosistémico del Parque Ecológico Jaguarundi: Una estrategia para la conservación y manejo de los recursos forestales. Centro de investigación en ecosistemas, UNAM: 5-11 p. Michoacán, México.
- Masera, O. y Flamenco, A. 2000. Dinámica de cambio de uso de suelo y emisiones de carbono en el trópico húmedo de México. Instituto de ecología de la UNAM. 61 p. Michoacán, México.
- Masera, O. R., Ordoñez, M. J. y Dirzo, R. 1997. Carbon emissions from Mexican Forests: Current Situation and Long-term Scenarios, *Climatic Change* 35: 265-295 pp. México.
- Mesa, G. 2007. Cadenas de Markov, una sencilla aplicación. *Memorias* ISSN: 0124-4361, vol: 5. 40-42 pp. México.

- Montoya, G. *et al.*, 1995. Desarrollo forestal sustentable: captura de carbono en las zonas Tzeltal y Tojolabal del estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología. Cuadernos de Trabajo 4. 50 p. México D. F.
- Nájera, G. O., Bojorquez J. I. y Vilchez F. F. 2000. Cobertura del terreno y uso del suelo de la reserva ecológica sierra de San Juan, Nayarit. En: Cuarta Reunión de Investigación y Desarrollo Tecnológico. 180-181 p. Tepic, Nayarit, México.
- Niklas, K. J. and Enquist, B. J. 2002. On the vegetative biomass partitioning of seed plant leaves, stems, and roots. *American Naturalist* 159. 482-496 pp. USA.
- Novo, E.M. 2002. Sensoriamento Remoto. Princípios e Aplicações. São Paulo: Edgard Blucher. 2da edição. Brasil.
- Odum, E. P. y Barrett, G. W. 2008. Fundamentos de Ecología. Traducción de María Teresa Aguilar Ortega. Editorial Cengage Learning. 597 p. México, D. F.
- Ordoñez, D. y J. A. B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo Michoacán. INE-SEMARNAP. 71 p. México.
- Ortega, J. M. 2003. Evaluación multicriterio y sistemas espaciales d toma de decisiones aplicados a la planeación del uso del suelo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- Pérez, C. y Muñoz, A. 2006. Teledetección: Nociones y Aplicaciones. Eds. Los autores. 3 ed. Universidad de Salamanca. 359 p. España.
- PICC.1995. Segunda evaluación: Cambio Climático 1995, Segunda síntesis de evaluación del IPCC de la 60 información científica y técnica pertinente para interpretar el artículo 2 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 81 p. Disponible en: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.htm#2 (Fecha de consulta: Noviembre del 2009).

- PICC. 2001. Climate change 2001: The scientific Basis. Contribution of working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press. Disponible en: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.htm#2 (Fecha de consulta: Noviembre del 2013).
- PICC. 2005. Technical Sumamary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press. Disponible en: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.htm#2 (Fecha de consulta: Noviembre del 2009).
- Plass, G. N. 1979. Dióxido de Carbono y Clima. El hombre y la ecosfera: Selecciones de Scientific American. 195-201 pp. Madrid, España.
- PNUMA. 1999. Para comprender el Cambio climático: Guía elemental de la Convención Marco de las Naciones Unidas y el protocolo de Kioto, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Secretaria Sobre el Cambio Climático (CMNUCC) Disponible en: www.unfccc.int/resource/beginner_02_sp.pdf. (Fecha de consulta: Octubre del 2009).
- Razo, Z. R. *et al.*, 2013. Escenarios de carbono para el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 17-21 pp. México.
- Rodríguez, A. F. 2011. Metodología para detectar los cambios en el uso de tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos en piedemonte de Villavicencio, Meta. Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería Agronómica. 90 p. Colombia.
- Rodríguez, L. R. *et al.*, 2008. Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la reserva de la biosfera el cielo. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales: 2-8 pp. Tamaulipas, México.
- Rzedowski, J. 1987. La vegetación de México. Editorial Limusa. 432 p. México.

- Schelegel, B., Gayoso, J. y Guerra, J. 2000. Manual de procedimientos de muestreo de biomasa forestal. Medición de capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. 24 p. Valdivia, Chile.
- SEMARNAT. 2005. Indicadores Básicos del desempeño Ambiental de México: 2005. 337 p. México.
- SEMARNAT. 2009(a). Compendio de Estadísticas ambientales: 2005 (en línea). Disponible en http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/sitio_wf/Index.htm. (Fecha de consulta: Octubre del 2014).
- SEMARNAT. 2009(b). Informe de la situación del Medio Ambiente en México: Compendio de Estadísticas Ambientales. 359 p. México.
- SEMARNAT. 2010. Visión de México sobre REDD+: Hacia una estrategia nacional. Comisión Nacional Forestal. 56 p. México.
- Smith, R. L. y Smith, T. M. 2001. Ecología. Ed. Pearson. 4^o edición. p. 642. Madrid, España.
- Sotomayor, J. R. 2005. Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 24 p. Morelia, Mich., México.
- Sotomayor, J. R. *et al.*, 2010. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 32 p. Morelia, Mich., México.
- Sotomayor, J. R. y Hernández, S. A. 2012. Características elásticas de maderas mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 78 p. Morelia, Mich., México.

- SUMA. 2004. Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Michoacán de Ocampo. Congreso del Estado de Michoacán de Ocampo. Morelia, Michoacán, México.
- SUMA: Áreas naturales protegidas en Michoacán. Disponible en: <http://michoacan.gob.mx/index.php/temas/medio-ambiente/tipos-de-areas-protegidas-naturales>. (Fecha de consulta: Octubre del 2012).
- Terradas, J. 2001. Ecología de la vegetación: de la ecofisiología de las plantas y la dinámica de comunidades y paisajes. Editorial Omega. 703 p. Barcelona, España.
- The Gymnosperm Database. Disponible en: <http://www.tropicos.org> (Fecha de consulta: Diciembre del 2014).
- Tropicos.org. Missouri Botanical Garden. Disponible en: <http://www.tropicos.org> (Fecha de consulta: Diciembre del 2014).
- Turner, M. G. 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on processes. Annual Review of Ecology and Systematics. 20:171-197 p. USA.
- U. S. Geological Survey (USGS). Disponible en: <http://www.usgs.gov/> (Fecha de consulta: Junio del 2014).
- Vallejo, A. y Noriega, R.P. 2008. Cuantificación de carbono en proyectos REDD. Curso internacional: diseño de actividades REDD para la mitigación del cambio climático. Catie, Turrialba, Costa Rica. 51 p. Disponible en: www.katoombagroup.org/documents/events/event22/15_AVallejo_PRodriguez_Medicion_biomasa.pdf (Fecha de consulta: Septiembre del 2009).
- Velázquez, A. *et al.*, 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. Gaceta Ecológica INE-SEMARNAT, 21-37 pp. México.
- Vidal, Z. R. 2005. Las regiones climáticas de México. Temas selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía. UNAM. D.F, 213 p. México.

- Vigil, N. 2010. Estimación de biomasa y contenido de carbono en *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. En el campo forestal experimental "Las Cruces", Texcoco, México. Tesis. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. 61 p. Texcoco, México.
- Weng, Q. 2009. Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications. McGraw-Hill, 8-15 p. USA.
- Zenil, N. M. 2009. Determinación de la tasa de cambio de uso de suelo en el Municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, México. Tesis. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. 56 p. Texcoco, México.

ANEXOS.

Anexo 1. Fórmulas para calcular estadísticos de la matriz de confusión.

Estadístico	Fórmula	Dónde: X_{ij} = Celdas y/o sitios correctamente clasificados X_{ij} = Total de celdas y/o sitios muestreados X_{+i} = Marginal de columna i X_{i+} = Marginal de la fila i
Fiabilidad global	$\frac{\sum_{i=1,m} X_{ii}}{\sum_{i=1,m} \sum_{j=1,m} X_{ij}}$	
Error de omisión	$\frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}}$	
Error de comisión	$\frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}}$	
Exactitud del productor	$\frac{X_{ii}}{X_{+i}}$	
Exactitud del usuario	$\frac{X_{ii}}{X_{i+}}$	

Fuente: Chuvieco, 1996.

Anexo 2. Modelos alométricos para calcular volúmenes.

Género	Modelo alométrico
Pino	$\text{EXP}(-9.7753+2.04668\text{LN}(\text{DAP})+0.81083*\text{LN}(\text{AT}))$
Encino	$\text{EXP}(-9.7852+2.19788\text{LN}(\text{DAP})+0.63077*\text{LN}(\text{AT}))$
Oyamel	$\text{EXP}(-9.718+1.78606\text{LN}(\text{DAP})+1.08051*\text{LN}(\text{AT}))$
Cedro	$\text{EXP}(-9.5382+1.74008\text{LN}(\text{DAP})+1.04811*\text{LN}(\text{AT}))$
**Eucalipto	$-9.68805+1.5911*\text{LOG}(\text{DAP})+1.2045*\text{LOG}(\text{AT})$
Hojosas	$\text{EXP}(-9.3156+2.38434\text{LN}(\text{DAP})+0.16699*\text{LN}(\text{AT}))$
Hojosas arbustivas	$\text{EXP}(-9.1121+2.6344\text{LN}(\text{DAP})+0.13267*\text{LN}(\text{AT}))$

Fuente: * COFOM, **FOMEX.

Anexo 3. Densidad de especies de maderas.

Nombre científico		Densidad (Kg m ⁻³)	Nombre científico		Densidad (Kg m ⁻³)
1	<i>Abies religiosa</i>	380	33	<i>Lippia umbellata</i>	700
2	<i>Acacia farnesiana</i>	730	34	<i>Lonchocarpus rugosus</i>	910
3	<i>Acacia pennatula</i>	600	35	<i>Lysiloma acapulcense</i>	760
4	<i>Alnus acuminata</i>	430	36	<i>Meliosma dentata</i>	570
5	<i>Alnus jorullensis</i>	430	37	<i>Pinus devoniana</i>	455
6	<i>Arbutus glandulosa</i>	770	38	<i>Pinus douglasiana</i>	420
7	<i>Arbutus xalapensis</i>	825	39	<i>Pinus hartwegii</i>	490
8	<i>Arctostaphylos pungens</i>	500	40	<i>Pinus leiophylla</i>	430
9	<i>Baccharis heterophylla</i>	570	41	<i>Pinus oocarpa</i>	470
10	<i>Baccharis salicifolia</i>	560	42	<i>Pinus pseudostrobus</i>	540
11	<i>Buddleja corbata</i>	520	43	<i>Pinus teocote</i>	520
12	<i>Buddleja parviflora</i>	720	44	<i>Pistacia mexicana</i>	500
13	<i>Bursera bipinnata</i>	430	45	<i>Prockia crucis</i>	580
14	<i>Bursera copallifera</i>	430	46	<i>Protium copal</i>	590
15	<i>Bursera fagaroides</i>	450	47	<i>Prunus serótina ssp Capuli</i>	745
16	<i>Bursera palmeri</i>	430	48	<i>Quercus acutifolia</i>	770
17	<i>Ceiba aesculifolia</i>	250	49	<i>Quercus candicans</i>	690
18	<i>Celtis caudata</i>	700	50	<i>Quercus castanea</i>	790
19	<i>Clethra mexicana</i>	480	51	<i>Quercus crassifolia</i>	690
20	<i>Colubrina macrocarpa</i>	730	52	<i>Quercus crassipes</i>	800
21	<i>Condalia mexicana</i>	1020	53	<i>Quercus deserticola</i>	1010
22	<i>Crataegus mexicana</i>	687	54	<i>Quercus glaucoides</i>	870
23	<i>Croton niveus</i>	500	55	<i>Quercus hintonii</i>	740
24	<i>Cupressus lusitanica</i>	390	56	<i>Quercus laeta</i>	830
25	<i>Eucaliptus sp.</i>	670	57	<i>Quercus laurina</i>	660
26	<i>Eysenhardtia polystachya</i>	770	58	<i>Quercus magnoliifolia</i>	770
27	<i>Ficus insípida</i>	370	59	<i>Quercus obtusata</i>	820
28	<i>Forestiera phillyreoides</i>	460	60	<i>Quercus rugosa</i>	580
29	<i>Ipomoea murucoides</i>	570	61	<i>Quercus scytophylla</i>	810
30	<i>Ipomoea wolcottiana</i>	570	62	<i>Randia aculeata</i>	800
31	<i>Juniperus fláccida</i>	550	63	<i>Senna polyantha</i>	620
32	<i>Leucaena leucocephala</i>	840	64	<i>Ternstroemia lineata</i>	630

Anexo 4. Ubicación geográfica de los conglomerados de muestreo.

No.	ID	Tipo de vegetación	Municipio	* Coordenadas (UTM)		Altitud
				Latitud	Longitud	
1	60801	BA	Acuitzio	2149259	244512	2959
2	60551	BPQ	Madero	2153910	264653	2281
3	60545	BPQ	Pátzcuaro	2154454	234545	2633
4	60297	BPQ	Acuitzio	2159014	259735	2369
5	59791	BQ	Morelia	2169145	254909	2311
6	59548	BPQ	Charo	2173489	290091	2014
7	59547	BQ	Charo	2173589	285077	2120
8	59546	BPQ	Morelia	2173678	280066	2260
9	59539	BPQ	Morelia	2174326	244956	2595
10	59540	BQ	Morelia	2174258	249968	2404
11	59300	BA	Querendaro	2178126	310271	3114
12	59298	BP	Indaparapeo	2178328	300224	2393
13	59297	BPQ	Charo	2178418	295221	2431
14	59294	BC	Morelia	2178727	280158	2100
15	59288	BQ	Morelia	2179271	250071	2102
16	59049	BQ	Hidalgo	2183051	315365	2446
17	59048	BP	Querendaro	2183165	310345	2803
18	59047	BPQ	Querendaro	2183250	305349	2232
19	59046	BPQ	Indaparapeo	2183337	300307	2712
20	59045	BQ	Indaparapeo	2183428	295296	2278
21	59038	BQ	Morelia	2184079	260182	2549
22	59035	BQ	Morelia	2184387	245129	2813
23	58797	BP	Zinapécuaro	2188066	315472	2531
24	58546	BPQ	Zinapécuaro	2192886	325600	2918
25	58545	BQ	Zinapécuaro	2192998	320590	2496
26	58544	BP	Zinapécuaro	2193069	315536	2428
27	58535	SBC	Tarímbaro	2193947	270420	2009
28	58293	BPQ	Zinapécuaro	2198120	315661	2120
29	58292	BPQ	Zinapécuaro	2198201	310626	2151
30	58281	BQ	Chucándiro	2199249	255446	2181
31	58042	BPQ	Zinapécuaro	2203015	320776	2615
32	58041	BQ	Zinapécuaro	2203135	315746	2167
33	58028	SBC	Chucándiro	2204341	250538	2245
34	57776	BPQ	Morelos	2209380	250604	5442
35	57535	BQ	Acámbaro	2213443	300883	2404
36	57529	BQ	Cuitzeo	2214026	270804	2145
37	57029	SBC	Uriangato	2223862	281008	2119

*La coordenada corresponde al sitio central del conglomerado.