



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DEL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN
EN MÉXICO ENTRE 1968 Y 2011 PARA SU USO
EN UN MODELO DE PRONÓSTICO
METEOROLÓGICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOMÁTICO

PRESENTA:

Saulo Leonardo Rivera Martínez



DIRECTORA DE TESIS:
M.C. María Elena Osorio Tai

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por las oportunidades dadas con las cuales expandí mis fronteras en el espacio y en el conocimiento.

A mis profesores, por transmitirme su conocimiento e inspirarme a seguir esta profesión.

A la M.C. María Elena Osorio Tai y al Dr. Jorge Zavala Hidalgo, por el apoyo y paciencia brindados para la realización de este trabajo. Al grupo Interacción Océano-Atmósfera del

Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Esta investigación ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACyT - SENER - Hidrocarburos, proyecto 201441.

Al INEGI por facilitarme los archivos vectoriales de las Series de Uso de Suelo y Vegetación.

Al Programa de Becas Estudiantiles SEP-UNAM-FUNAM 2017 por la Beca de Capacitación en Métodos de Investigación. Primera Fase.

Al Grupo de Cartografía Geoambiental y Teledetección de la Universidad Politécnica de Valencia, España, por haberme brindado un espacio e ideas para desarrollar este trabajo.

Al Dr. Isidro Ahmed Cruz Leyva de SEMARNAT y a la Dra. Rosa Irma Trejo Vázquez del Instituto de Geografía por el tiempo dedicado para hacer las observaciones pertinentes para mejorar el presente trabajo.

A mis amigos: León, Armando, Fabián, Arantxa, Óscar por sus consejos y todas las charlas que hemos tenido desde que nos conocemos. Me enseñaron más lo que es la vida.

A mi familia, por los consejos dados que me han guiado para ser una mejor persona.

A mi mamá Mónica y a mi mamá Elena, por quienes soy y seré siempre.

Resumen

Se presenta una propuesta de clasificación de los tipos de vegetación de las Series de Uso de Suelo y Vegetación I, II, III, IV y V escala 1:250,000, elaboradas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), a la clasificación del Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica (USGS) que forma parte de los productos de la Caracterización Global de Uso de Suelo y Cobertura Terrestre (GLCC), con la finalidad de emplear y adoptar los datos de INEGI en el modelo de pronóstico meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF) ya que, comúnmente los modelos de pronóstico meteorológico, tienen bases de datos de uso de suelo y vegetación globales estáticos, es decir, datos obtenidos en una fecha determinada por lo que no muestran los cambios que se han presentado en la superficie terrestre con el tiempo. El producto de esta reclasificación permitirá construir un reanálisis de las condiciones climáticas para México del periodo de los años setentas hasta el año 2011, lo que representa una mejora, ya que el modelo WRF tiene datos del año 1993.

Para llevar a cabo la propuesta de clasificación se utilizaron archivos vectoriales de las Series proporcionadas por el INEGI y un archivo ráster obtenido del portal EarthExplorer del USGS. Primero se revisaron las definiciones de cada clase tanto para el sistema de INEGI como del USGS. Posteriormente se manipularon los archivos vectoriales de las cinco Series de INEGI, para agrupar los tipos de vegetación en las categorías utilizadas por el USGS. Como última fase de la reclasificación, los archivos vectoriales se convirtieron a formato ráster con coordenadas geográficas y resolución de 1 km.

Las Series I y V se utilizaron para analizar los cambios de vegetación y uso de suelo en México entre 1968 y 2011. Esto se llevó a cabo agrupando las clases de las Series en 10 grupos que generalizan sus características y facilitan su estudio. De este análisis se encontró que los tipos de vegetación con mayor pérdida, de acuerdo a su extensión para la Serie I son: otros tipos de vegetación (16.15%), selva (12.98%), y matorral (11.52%). Por otro lado, los tipos con mayor crecimiento son: zonas urbanas (822.92%), actividades agrícolas (28.06%) y áreas sin vegetación (20.84%).

Índice general

Portada	I
Agradecimientos	III
Resumen	v
Índice general	vii
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Antecedentes	5
2. Marco teórico	9
3. Sensores remotos aplicados al monitoreo de la vegetación	15
3.1. Percepción remota aplicada al estudio de la vegetación	24
3.2. Métodos de clasificación	27
4. Clasificaciones del uso del suelo y vegetación disponibles	33
4.1. Series de uso del suelo y vegetación de INEGI, escala 1:250,000	33
4.1.1. Serie I	39
4.1.2. Serie II	39
4.1.3. Serie III	41
4.1.4. Serie IV	42
4.1.5. Serie V	42
4.2. United States Geological Service (USGS)	43
4.3. International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)	45
4.4. Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO)	46
4.5. North American Land Change Monitoring System (NALCMS)	50

5. Metodología	57
5.1. Propuesta de clasificación para su uso en el modelo de pronóstico meteorológico	59
5.2. Cálculo de estadísticas	62
6. Resultados	69
7. Conclusiones	89
Anexo I	91
Anexo II	95
Anexo III	97
Bibliografía	101

Abreviaturas

USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme (Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
NALCMS	North American Land Change Monitoring System (Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura de Suelo de América del Norte)
WRF	Modelo de Pronóstico Meteorológico (Weather Research and Forecasting model)
SARH	Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
INF	Inventario Nacional Forestal
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica)

Capítulo 1

Introducción

La cobertura de la superficie terrestre es dinámica y cambia a causa de la expansión de los seres humanos y sus necesidades (alimentación y hogar). Esta situación impacta a las especies animales y vegetales, por lo que es necesario realizar estudios multitemporales¹ que registren los cambios en diversas partes del mundo para crear políticas de desarrollo sustentable.

Sin embargo, la biodiversidad complica la tarea de elaborar un estudio sobre la superficie terrestre que sea compatible con los estudios realizados por otros especialistas, ya que dependiendo de la escala del estudio, se clasifica de manera diferente al mismo tipo de vegetación (Rzewdoski, 2006).

Para mitigar las diferencias en la interpretación, dependencias internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), y dependencias nacionales como el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) o el Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI) en México, desarrollan sistemas de clasificación estándar para los estudios de la superficie terrestre que entre sus objetivos destacan evaluar los cambios temporales en la vegetación de una región (paleobotánica), determinar la distribución de especies (biogeografía) y el planteamiento de soluciones a los problemas que representan los cambios ocasionados por el ser humano.

¹Realizados en fechas distintas para que los cambios puedan ser calculados comparándolos con una fecha de inicio o base.

Un método para registrar dichos cambios es emplear imágenes satelitales, producto de sensores remotos que miden la radiación espectral que es reflejada y absorbida por la superficie. Dichas imágenes son procesadas mediante metodologías de clasificación de la percepción remota, que definen las cualidades de la superficie terrestre en categorías o clases definidas por las instituciones mencionadas anteriormente.

Los resultados de los estudios de la superficie terrestre usualmente son publicados como mapas temáticos que muestran geográficamente el **Uso del Suelo** y la **Cobertura Vegetal**. Entendiendo el Uso del suelo (*Land Use*) como la actividad que el hombre realiza en determinada cubierta terrestre para cambiarla, mantenerla o producir recursos. Por otro lado, la Cobertura vegetal (*Land Cover, Cubierta o Cobertura terrestre*) se refiere a la característica biofísica observada en la superficie de la Tierra. Ambos conceptos tienen una leyenda que depende de la escala y la calidad de los datos colectados (DiGregorio, 2005).

De acuerdo con Di Gregorio y Jansen (1997), para la adecuada representación de estos conceptos, es necesario que la clasificación pueda incluir información de diversas fuentes que pueda ser interpretada y comparada, representando la situación real, en un momento determinado, de la zona de estudio sin importar la escala. Por esto se plantean distintos tipos de clasificaciones: *Jerárquicas, No Jerárquicas, a priori* y *a posteriori* (ver diagrama de la fig.1.1).

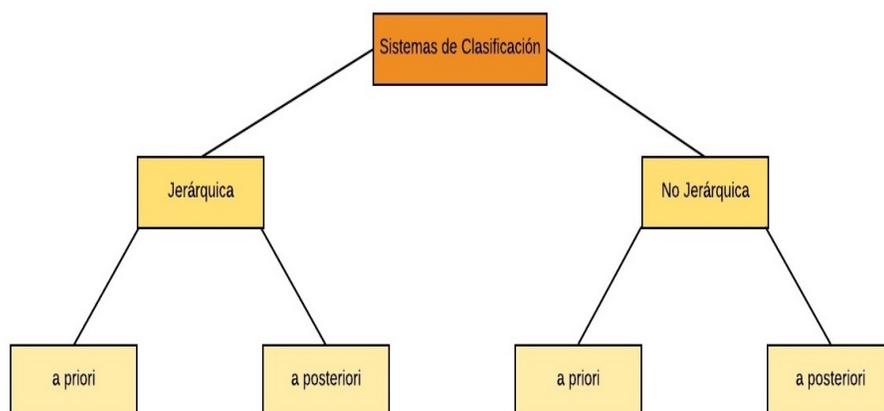


Figura 1.1: Tipos de clasificaciones utilizadas en los estudios de uso de suelo y vegetación.

Clasificaciones No Jerárquicas

Este tipo de clasificación es automática, discrimina a los elementos en clases considerando la similitud de ciertas características de cada elemento, sin hacer un análisis con las demás clases. En este tipo de clasificaciones se utilizan algoritmos de clasificación no supervisada, que permiten que la información captada por las imágenes satelitales sea agrupada automáticamente.

Clasificaciones Jerárquicas

Las clasificaciones jerárquicas tienen una mejor comprensión de la cobertura al capturar la información en niveles que van de lo general a lo más particular, donde las clases tienen una descripción más detallada, disminuyendo la confusión entre ellas al no utilizar el mismo criterio de clasificación en sus distintos niveles.

Clasificación *a priori*

Este tipo de clasificación se basa en la investigación previa de la zona de estudio, de este modo, es complejo agrupar los elementos presentes en clases definidas, por lo que deben plantearse parámetros fisonómicos o bioclimáticos, ya que algunas especies vegetales están presentes en diversos ecosistemas.

Clasificación *a posteriori*

Es flexible y adaptable y que define las clases después de agrupar muestras de campo. La desventaja de esta clasificación es la limitación que tiene para crear clases estándar definidas, ya que dependiente de la escala del estudio, se adapta a una zona específica.

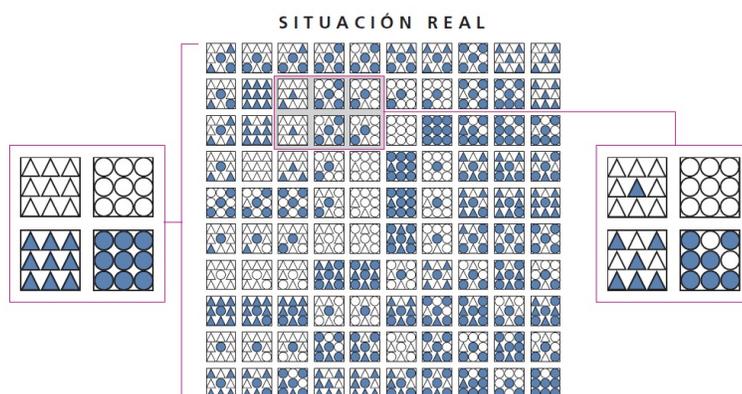


Figura 1.2: Ilustración del tipo de clasificación: *a priori* (izq.) y *a posteriori* (der.) Tomado de DiGregorio (2005).

1.1. Objetivos

- Proponer una clasificación de las series de uso de suelo y vegetación del INEGI del periodo 1968-2011 a una clasificación internacional (Global Land Cover Characterization) manejada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica, para ser implementadas por usuarios del modelo de pronóstico meteorológico WRF (Weather Research and Forecasting).
- Conocer las tendencias de cambio de la cubierta vegetal en México para el periodo 1968-2011 a través de las series de INEGI.

1.2. Antecedentes

El estudio de la biodiversidad en México se ha encaminado en dos direcciones: en el estudio de las especies y su relación con el medio ambiente (autoecología y sinecología) y en el estudio de sus patrones de distribución espacial y temporal (biogeografía).

Las primeras investigaciones sobre vegetación en México provienen de códices y escritos de las culturas prehispánicas quienes estaban interesadas en las propiedades medicinales, alimenticias o recreativas de la vegetación. Por otro lado, las investigaciones biogeográficas surgen en el siglo XIX con Alexander Von Humboldt, que investigó la vegetación de México proponiendo divisiones del territorio de acuerdo a la división altitudinal, distinguiendo la tierra caliente, la tierra templada y la tierra fría. Por otro lado, en el mismo siglo, Galeotti y otros investigadores, crearon su división tomando en cuenta características como altitud, clima, tipo de vegetación y endemismo de helechos, dividiendo las propuestas realizadas por Humboldt (Espinosa *et al.*, 2008).

En el siglo XX, se publicaron múltiples investigaciones de la biodiversidad mexicana, principalmente a nivel regional. Los investigadores con mayor cantidad de estudios son el Dr. Efraín Hernández, el Dr. Jerzy Rzedowski y el Dr. Faustino Miranda. Este último impulsó entre sus alumnos y demás investigadores mexicanos el interés en los estudios ecológicos creando una escuela en esta especialidad (Rzedowski, 2006).

Los estudios de Miranda y Hernández (1963) y Rzedowski (1978, 2006) han sido tomados como base en el desarrollo de las Series de Uso de Suelo y Vegetación que INEGI ha elaborado desde 1968, recopilando información para representarla gráficamente en mapas temáticos. Sin embargo, estas series no son los únicos repositorios de información de la vegetación en México. Desde 1960, distintas dependencias como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), llevan a cabo otras clasificaciones, como los Inventarios Nacionales Forestales, que representan una opción más de la información de los recursos naturales, basándose en el mapeo de la cobertura, fisionomía, florística y volumen de los recursos maderables (Velázquez *et al.*, 2001).

Inventario Nacional Forestal

Elaborado por la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos (SARH), hoy Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Inventario Nacional Forestal (INF) tiene cinco versiones, de las cuales sólo dos se consideran completas y están administradas por la CONAFOR (2012, 2016).

Primer Inventario Nacional Forestal

Fue creado por el gobierno mexicano con apoyo de la FAO, los trabajos que comenzaron en 1960 fueron publicados en 1985, con el objetivo de conocer las zonas potenciales para el comercio de los recursos madereros. Los resultados fueron mapas escala 1:50,000 y escala 1:100,000. Sin embargo, por la duración de los estudios, no se tomó un año como base que permitiera el cálculo de estadísticas. Además, tiene una clasificación diferente por lo que no es compatible con los demás inventarios.

Inventario Nacional Forestal de Gran Visión

Fue publicado por la SARH en 1991 para actualizar de manera rápida el Primer Inventario Nacional Forestal, utilizadon imágenes de satélite del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), tomando como base la información de uso de suelo y vegetación escala 1:1,000,000. Además, este inventario fue planteado para proveer una base a inventarios futuros.

Inventario Nacional Forestal Periódico

Publicado en 1994, se basó en la Serie I de INEGI y en un análisis de imágenes de satélite Landsat TM 5, aunque los resultados fueron mapas escala 1:250,000, sólo abarca 75% de la superficie del país. Su objetivo era identificar los terrenos forestales de acuerdo a aptitudes y funciones para servir como base en la actualización permanente de la información que se llevaría a cabo cada diez años.

Inventario Forestal Nacional

Fue publicado en el año 2000 como una Carta de Vegetación y de Uso del Suelo. Su principal función era fungir como un inventario nuevo, pero la información no se organizó como en los inventarios anteriores y no hubo muestreo de campo, por lo que quedó inconcluso y está constituido por mapas temáticos de vegetación y uso del suelo escala 1:250,000.

Inventario Nacional Forestal y de Suelos

Es un conjunto de datos de muestreo que cuenta con alrededor de 26,200 conglomerados (<http://www.conafor.gob.mx/innovacionforestal/?p=2905>) y será actualizado cada cinco años, tomando como base las *Series de Uso de Suelo y Vegetación* de INEGI con el apoyo de las imágenes de satélite. Los trabajos de muestreo iniciaron en 2004 y terminaron en 2009. La CONAFOR, en su página web (www.cnf.gob.mx), consultada en junio de 2017, menciona que se lleva a cabo el muestreo para los años 2009-2014.

Capítulo 2

Marco teórico

México tiene 1,959,248 km^2 de territorio continental, 5,127 km^2 de territorio insular y una superficie marítima de 5,109,168 km^2 (Reyes Posadas *et al.*, 2003) en los cuales se desarrollan infinidad de especies vegetales y animales (cerca del 10 % de la biodiversidad mundial) que hacen a México acreedor al título de país *megadiverso*, donde ocupa la quinta posición de 12 países que en conjunto poseen cerca del 70 % de la biodiversidad (Mittermeier y Goettsch, 1997).

La biodiversidad de México tiene su razón en el relieve, ya que nuestro país está ubicado en una zona con diversos sistemas montañosos (Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y el Eje NeoVolcánico) por lo que el relieve es muy variado. Estos cambios en el relieve fueron indispensables para el desarrollo de las especies (algunas endémicas) que evolucionaron adaptándose al medio y al clima donde habitan.

Según Espinosa *et al.* (2008), el estudio más conocido sobre la distribución de especies es el que teorizó Philip L. Sclater en 1858. Este consistió en un sistema mundial de regiones biogeográficas, que fue representado por Wallace, A.R. (ver fig. 2.1). En este estudio, México se ubica en dos regiones biogeográficas: la Neártica y la Neotropical (fig. 2.2) en cuya zona de transición, se encuentra la mayor diversidad biológica (Mittermeier y Goettsch, 1992).

Actualmente, la biodiversidad se toma en cuenta como un índice de desarrollo humano llamado *Capital Natural* que se define como el conjunto de ecosistemas naturales o manejados por los seres humanos, que generan bienes y servicios y son perpetuales ya sea por sí mismos o por el manejo humano (Sarukhán *et al.*, 2009). Para conservar el Capital Natural de nuestro país, se han creado y delimitado Áreas Naturales Protegidas (ANP) que en la legislación mexicana se definen como:

Las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas y están sujetas al régimen previsto en la presente ley.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (2016)



Figura 2.1: Delimitación de las regiones geográficas del mundo propuesta en 1876 por Alfred Russel Wallace. Tomado de: Espinosa *et al.* (2008).

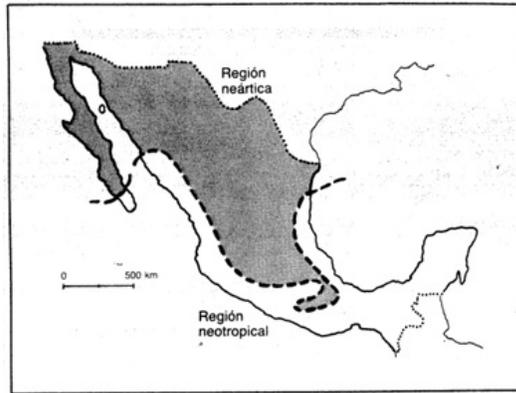


Figura 2.2: Delimitación de las regiones biogeográficas dentro de la República. Tomado de: Mittermeier y Goettsch (1992).

Además, el *Capital Natural* influye en los climas locales o regionales, por lo que es necesario estudiar sus cambios para determinar cómo se modifican los climas de una región, para lo cual se utilizan sistemas numéricos de pronóstico meteorológico. Un ejemplo de estos modelos es el Weather Research and Forecasting Model (WRF) (Wang *et al.*, 2017).

El modelo WRF es un sistema de predicción numérica del tiempo que puede ser configurado para aplicaciones operativas o de investigación y puede ser utilizado también desde máquinas de supercómputo hasta laptops. Es un proyecto iniciado por las siguientes instituciones de Estados Unidos: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory* (NRL), *Center for Analysis and Prediction Storms* (CAPS) y *Federal Aviation Administration* (FAA).

Para el uso del modelo WRF, se pueden tener datos reales o datos de condiciones ideales que pueden ser empleados en actividades como:

- Pronóstico del clima en tiempo real
- Modelación de calidad del aire
- Estudios meteorológicos

- Asimilación de datos
- Modelación de la interacción océano-atmósfera

La estructura general del WRF (WRF Software Infraestructura, WSI) se muestra en la figura 2.3. En esta, se integran motores para el cálculo de dinámica atmosférica (*Dynamics Solvers*): el *Advanced Research WRF* (ARW) y el *Nonhydrostatical Mesoscale Model* (NMM) así como las paqueterías que inician la asimilación de datos que interactúan con los motores. Fuera de la WSI se encuentra el pre-procesamiento de los datos y el post-proceso de los resultados.

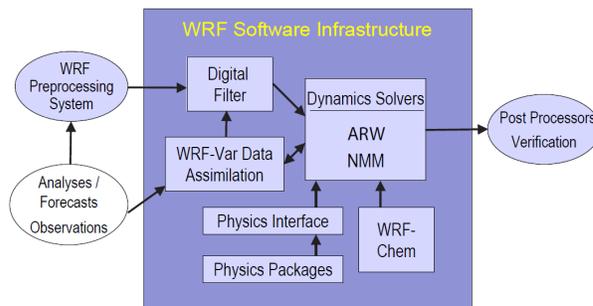


Figura 2.3: Estructura general del modelo WRF. Tomada de Skamarock *et al.* (2008).

A continuación, se describe brevemente el proceso de una simulación numérica en el WRF con datos reales utilizando ARW (fig. 2.4) ; este proceso se divide en tres partes:

- **Pre-procesamiento**

Se procesan los datos de entrada para el modelo con el módulo WRF Preprocessing System (WPS). Éste módulo utiliza un archivo llamado *namelist.wps* donde se especifica el tamaño de los dominios, tamaño de celda de la malla en la que se interpolarán los datos, las rutas de los compiladores, entre otras características.

Como resultado de su compilación, WPS genera tres archivos ejecutables:

- **geogrid.exe** Configura el dominio y anidamientos a simular. Interpola datos terrestres a las mallas del modelo: Topografía, uso de suelo, proyección cartográfica, etc.
 - **ungrib.exe** Decodifica los datos de entrada que normalmente provienen de modelos globales como NAM (North American Mesoscale Forecast System) o GFS (Global Forecast System).
 - **metgrid.exe** Interpola horizontalmente los datos meteorológicos a los dominios configurados con geogrid.
- **Procesamiento** Al igual que el pre-procesamiento, se compila con un archivo *namelist.input* donde se describen las variables reales, obtenidas por medio de mediciones en campo, y sus dominios.

Una vez compilado WRF, se generan dos archivos ejecutables:

- **real.exe** Interpola verticalmente los datos a la coordenada del modelo.
 - **wrf.exe** Genera la simulación numérica cuyas salidas se obtienen en formato netCDF.
- **Post-procesamiento** Es la visualización de las salidas de wrf.exe por lo que se pueden realizar con cualquier programa que manipule el formato netcdf como: Ncview, NCL Graphics, Matlab, etc.

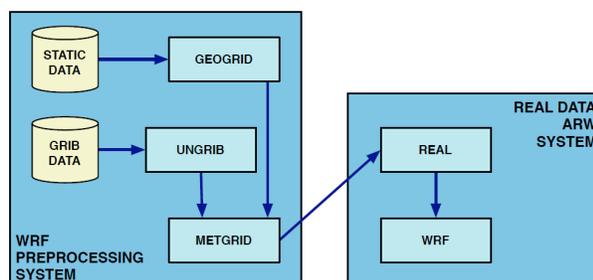


Figura 2.4: Diagrama del flujo de los datos del WPS al ARW. Tomada de Skamarock *et al.* (2008).

Sensores remotos aplicados al monitoreo de la vegetación

Desde hace varios años, la percepción remota es una de las fuentes de información sobre el sistema tierra (océano-tierra-atmósfera) para el estudio de sus características, ya que facilita la obtención de datos de lugares accesibles o inaccesibles sin estar en contacto con ellos. Estos datos tienen aplicación en cuestiones de gestión de recursos, planificación urbana, agrícola, meteorológicas, climáticas, energéticas, entre otros. En éste capítulo se dará especial atención a la determinación y análisis del uso de suelo y cobertura terrestre.

Percepción Remota

La percepción remota es la ciencia dedicada a la obtención de información de objetos a distancia, en este caso la superficie terrestre. Desde el espacio se utilizan sensores transportados en vehículos llamados plataformas que miden la energía que viaja por la atmósfera e interactúa con la superficie terrestre para múltiples aplicaciones como la prevención de riesgos, el manejo de recursos naturales, estudios costeros y marinos, entre otros (ver tabla 3.1).

Los sensores utilizados se clasifican según la manera en que captan la energía, por ejemplo, los sensores que captan la energía reflejada del Sol (proceso de reflexión, ver fig. 3.1) o la temperatura de la superficie (proceso de emisión) son llamados *Pasivos*. Por otro lado, los sensores que tienen la capacidad de emitir energía y captarla (proceso de emisión-reflexión) son llamados *Activos* (Salinero, 1995).

En este capítulo sólo se mencionará el proceso de obtención de información de los sensores pasivos que son los más utilizados en estudios de uso del suelo y cobertura vegetal.

Tabla 3.1: Ejemplos de aplicaciones de la percepción remota en la NOAA. Información tomada de: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/remotesensing.html> y complementado con información de Salinero (1995).

Aplicación	Ejemplo
Costeras	Monitoreo de la línea de playa, rastreo del transporte de sedimentos, mapa de las características de la playa.
Oceánicas	Monitoreo de corrientes oceánicas, medición de temperatura del mar y altura de olas, rastreo del hielo marino, verificación y control de la calidad física del agua, turbiedad y contenido de algas.
Prevención de riesgos	Rastreo de huracanes, terremotos, erosión e inundaciones
Manejo de recursos naturales	Monitoreo del uso de suelo, mapeo de manglares, mapeo de áreas quemadas y seguimiento de los ritmos de repoblación natural.

Los sensores pasivos detectan el tipo de espectro que emite o absorbe una sustancia u objeto en el cual incide la luz. En este caso, la propiedad que nos interesa es la *Radiancia* (L), definida como la energía reflejada por la superficie en una dirección particular medida en densidad por ángulo sólido (Salinero, 1995 ; Richards, 2013), su cálculo necesita de variables como: la reflectancia, transmitancia y el ángulo de incidencia. Las unidades en que se mide la radiancia son Watts por metro cuadrado por estereorradián ($Wm^{-2}sr^{-1}$) y está dada por la siguiente expresión:

$$L = \frac{T(\lambda)E(\lambda)R(\lambda) \cos(\theta)}{\pi} + L_p \quad [Wm^{-2}sr^{-1}] \quad (3.1)$$

donde:

- $E(\lambda)$ es la energía irradiada por el Sol en determinada longitud de onda λ .
- $T(\lambda)$ es la transmitancia en determinada longitud de onda.
- $R(\lambda)$ es la reflectancia de la superficie en determinada longitud de onda.
- L_p es la radiancia atmosférica.
- $\cos \theta$ proyecta las radiaciones al eje perpendicular a la superficie de la Tierra.
- θ es el ángulo zenital.

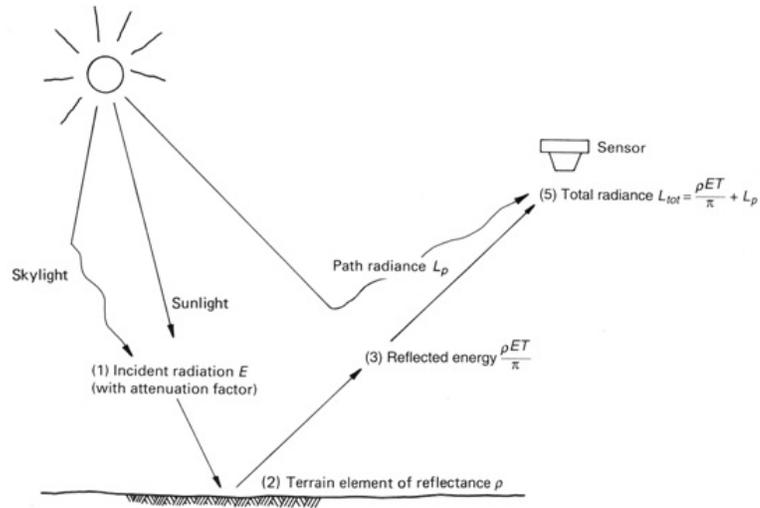


Figura 3.1: Interacción de la energía solar con la atmósfera antes de ser detectada por el sensor. Tomada de: Lillesand *et al.* (2014).

Reflectancia / Reflectance

La reflectancia o reflectividad (R), se define como la relación de la energía incidente con la reflejada (en porcentaje) que varía de acuerdo al tipo de cobertura y a la longitud de onda (λ), formando lo que se conoce como *Firma Espectral* (fig. 3.2). Se calcula como:

$$R = \frac{E_r}{E_i} * 100 \quad (3.2)$$

donde:

- E_i es la energía incidente.
- E_r es la energía reflejada.

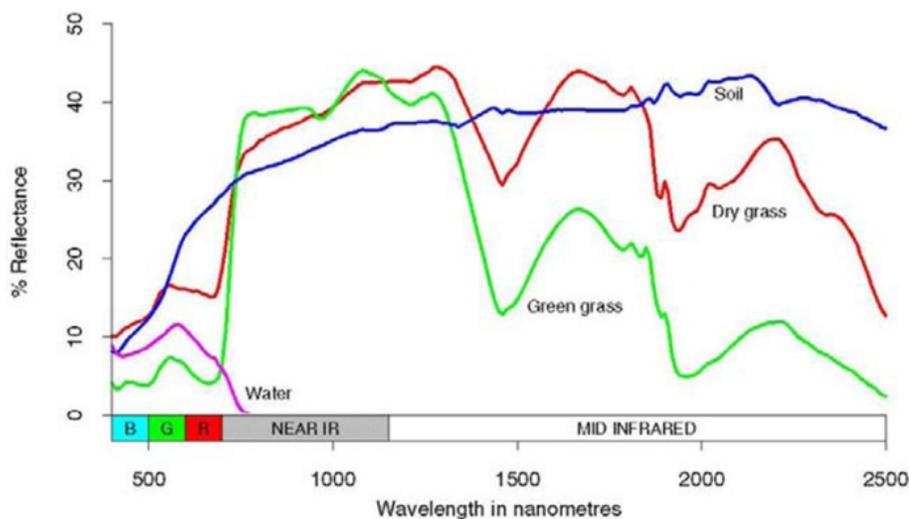


Figura 3.2: Firmas espectrales para las distintas cubiertas: suelo desnudo, pasto verde, pasto seco y agua. Tomado de Ashraf *et al.* (2011).

Radiancia Atmosférica / Path Radiance

Es la energía de zonas vecinas que es dispersada en la atmósfera a la zona de interés, antes o después de ser reflejada por la superficie terrestre.

$$L_p = \frac{E(\lambda)R_A}{\pi} \quad (3.3)$$

donde:

- R_A es la reflectancia de la atmósfera.
- $E(\lambda)$ es la energía irradiada por el Sol en determinada longitud de onda λ .

Transmitancia / Transmittance

Según Campbell (2002), la transmitancia sucede cuando la radiación solar viaja a través de la atmósfera sin debilitarse. Es decir, es el porcentaje de energía que emite el sol y que incide en la superficie terrestre sin haber sido alterada por los fenómenos de absorción y dispersión de la atmósfera, por lo que depende de la longitud de onda.

$$T = \frac{\text{radiación incidente}}{\text{radiación emitida}} \quad (3.4)$$

Absorción y dispersión

Los procesos de dispersión y absorción son ocasionados por la composición de la atmósfera, por lo cual la energía es afectada según sea su longitud de onda (λ).

La absorción ocurre cuando los gases presentes en la atmósfera absorben la energía en determinadas longitudes de onda, lo cual depende de las propiedades de cada molécula, creando *Ventanas Atmosféricas* (ver fig. 3.3), que se definen como zonas del espectro electromagnético donde la absorción es poca o nula (Richards, 2013).

Por otro lado, en la superficie de la Tierra, la absorción depende de características físicas y químicas del suelo así como de su cubierta, ya que la vegetación tiende a absorber longitudes de onda grandes como los infrarrojos.

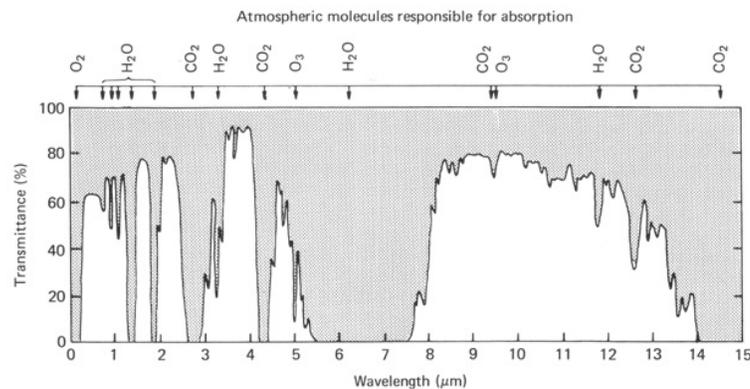


Figura 3.3: Partículas responsables de la absorción de las ondas en el espectro electromagnético. Los espacios en blanco representan las ventanas atmosféricas. Tomado de Lillesand *et al.* (1994).

La dispersión se define como la redirección de la energía por partículas suspendidas o gases en la atmósfera (Campbell, 2002). Existen tres tipos de dispersión: de Rayleigh, de Mie y la dispersión no selectiva que se ejemplifican en la figura 3.5.

Dispersión de Rayleigh

Ocurre cuando la energía es dispersada por moléculas, usualmente nitrógeno (N_2) y Oxígeno (O_2), esto ocasiona que las ondas cortas sean reflejadas fácilmente, generando el efecto azul del cielo y del agua (fig. 3.4a). Del mismo modo, es la razón por la que el cielo se ve con tonos rojos en la puesta del Sol, ya que las longitudes de onda grandes, espectro de los rojos, evaden estas partículas y viajan directamente (fig. 3.4b).

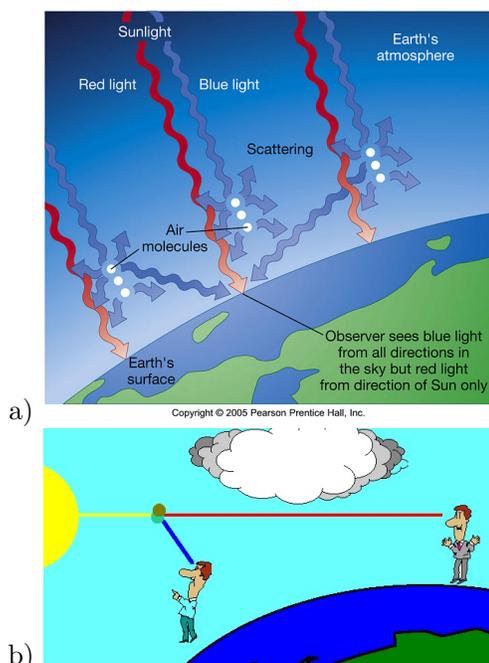


Figura 3.4: Dispersión de Rayleigh; a) durante el día y b) al atardecer, las ondas largas se dispersan menos y viajan de forma más directa. Tomadas de: a) Brau (2014). b) Gibbs (1997).

Dispersión de Mie

Al igual que la de Rayleigh, la dispersión de Mie es resultado de la interacción del Sol con partículas más grandes como partículas de polvo y polen. Estas partículas reflejan la energía con mayor intensidad en dirección de la luz incidente, lo que crea el efecto de percibir el brillo del Sol casi blanco.

Dispersión No Selectiva

Difiere de la dispersión de Rayleigh y de Mie, ya que no depende de la longitud de onda de la energía. Afectando de igual manera las regiones: visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, dispersando la energía de manera uniforme generando el efecto de ver nubes y neblina de color blanco.

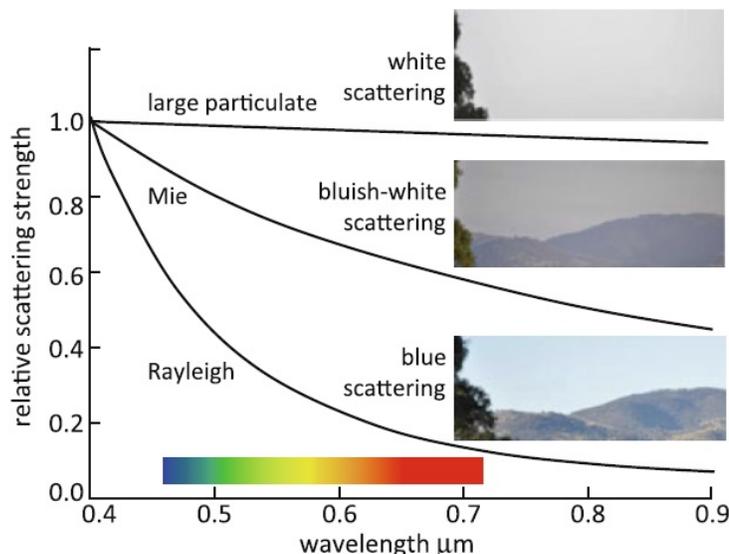


Figura 3.5: Representación de la intensidad relativa de cada dispersión en el espectro de $0.4 \mu\text{m}$ a $0.9 \mu\text{m}$. Tomada de Richards (2013).

Sensores Remotos

Los sensores remotos utilizados para la obtención de información de la cobertura terrestre son los radiómetros y los espectroradiómetros; ambos obtienen la radiancia indirectamente en Niveles Digitales (DN) que indican la radiancia como brillo en una escala que dependerá de la resolución espectral del sensor que está calculada en bits. Por ejemplo, una imagen capturada a 8 bits contiene 256 niveles de gris ($2^8 = 256$) con valores del 0 al 255 (Liang *et al.*, 2012). Entonces, para obtener los valores de radiancia (proceso de calibración radiométrica) a partir de una imagen de satélite, se aplica la ecuación 3.5.

$$L = kDN + L_{min} \quad \dots \quad [Wm^{-2}sr^{-1}] \quad (3.5)$$

Calculando k como:

$$k = \frac{L_{max} - L_{min}}{DN_{max}} \dots\dots [Wm^{-2}sr^{-1}] \quad (3.6)$$

donde:

- L_{max} , L_{min} son los valores máximo y mínimo de radiancia dados por el fabricante del sensor.
- DN_{max} Es el valor máximo de los niveles digitales.
- k es un parámetro que compensa los errores de calibración del sensor.

Los radiómetros son sensores que detectan la radiancia en las regiones visible, infrarrojo y microondas del espectro electromagnético y pueden ser de dos tipos: de barrido y de empuje. El radiómetro de barrido registra la información pixel por pixel por medio de un espejo que gira de manera perpendicular a su trayectoria (ver fig. 3.6). Por otro lado, los radiómetros de empuje no dependen de un espejo para obtener información ya que tienen varios sensores, cada uno detecta el ancho de un pixel registrando la información en líneas de múltiples pixeles, por lo que registra mayor información en menos tiempo que un sensor de barrido.

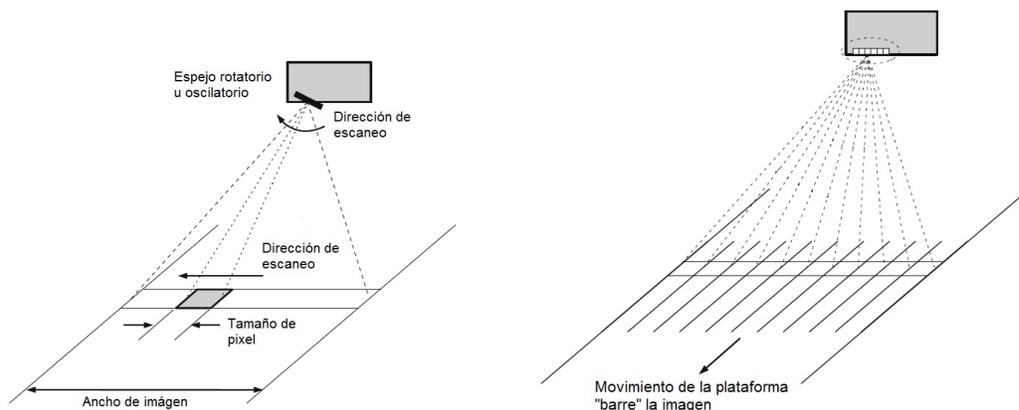


Figura 3.6: Ilustración del proceso de recolección de radiancia para los escaner de barrido (izquierda) y de empuje (derecha). Tomado de Richards (2013).

Espectroradiómetro

Es un radiómetro que mide la radiancia en bandas multispectrales, descomponiéndola en las distintas regiones del espectro electromagnético, creando una imagen digital para cada región del espectro: MODIS es un ejemplo de estos sensores (Liang *et al.*, 2012).

Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)

Es un sensor de banda ancha que detecta las regiones: visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético. Es transportado en los satélites de la NOAA, su primera versión fue lanzada en el satélite TIROS-N, en 1978. Su versión más reciente, AVHRR/3 fue lanzado en el satélite NOAA-15 en 1998, sigue actualmente en operación.

Los sensores AVHRR tienen resolución espacial de 1.1 km, resolución temporal de 24 hrs, resolución espectral de 10 bits capaz de detectar 1,024 niveles de brillo (NOAASIS, 2013; CREPAD, 2007), ancho de barrido de 2,580 km en cada imagen y facilidad de obtención, ya que sus imágenes pueden ser descargadas de internet, lo que las hace más utilizadas en los estudios de cobertura terrestre y uso del suelo a escala continental. Además de otros estudios científicos como el mapeo de la superficie y de nubes, la delimitación de cuerpos de agua, la aplicación de índices de vegetación, la obtención de la temperatura del mar y de la superficie terrestre.

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

MODIS fue lanzado en los satélites de la NASA llamados TERRA y AQUA para obtener información que permite el cálculo y estimación de variables como nubes, vapor de agua en la atmósfera, precipitación, suelos, la cobertura de hielo y nieve, índices de vegetación, reflectancia y temperatura de la superficie (INEGI (sf); Lindsey y Herring (sf)).

MODIS presenta mejoras respecto al sensor AVHRR ya que obtiene información en 36 bandas, permitiendo hacer una diferenciación más precisa de las respuestas espectrales al captar 12 bits de niveles de radiancia (4,096 niveles). Su resolución espacial depende de la banda con la que se trabaje: las bandas 1 y 2 tienen una resolución de 250 m, las bandas 3 a 7 de 500 m y las bandas 8 a 36 de 1 km (NASA, 2015). Las ventajas de resolución espectral se utilizan para los estudios regionales y globales de cobertura terrestre y uso del suelo.

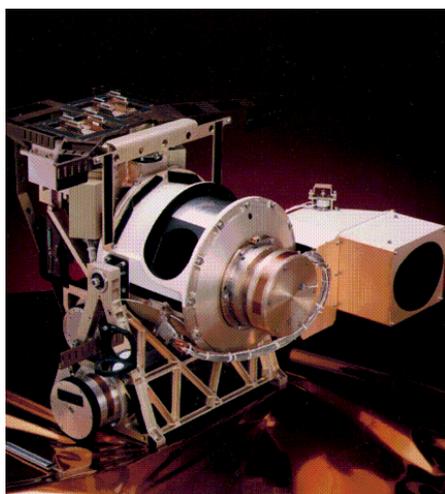


Figura 3.7: Fotografía del sensor MODIS. Tomado de <https://podaac.jpl.nasa.gov/MODIS>, el 24 de noviembre de 2016.

3.1. Percepción remota aplicada al estudio de la vegetación

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la forma más común de obtener información de las imágenes, es la interpretación visual de las mismas. Sin embargo, en el pasado las imágenes eran impresas analógicamente, por lo tanto la obtención de información dependía meramente de la capacidad del intérprete. Ahora, con el uso de sensores espectrales y nuevas metodologías que resaltan características biológicas, químicas y físicas de la superficie se facilita tanto la interpretación como la producción de mapas temáticos.

Estas metodologías incluyen operaciones que dan sentido físico a la información, las más utilizadas son la resta y la división. La resta es utilizada para resaltar cambios de la superficie ocurridos en distintas fechas y, por otro lado, la división mejora (dependiendo las bandas que se utilicen) la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve o topografía (Salinero, 1995; Richards, 2013). A estos últimos, se les llama *índices*, de acuerdo con Huete (1987), *los índices de vegetación se basan en la existencia de una línea de suelo en el espacio definido por las regiones del Infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (R) del espectro electromagnético*. Ejemplos de algunos de estos índices son el NDVI y el SAVI.

NDVI. Índice de vegetación de diferencia normalizada

El índice de vegetación de diferencia normalizada (ec. 3.7) es utilizada principalmente para estimar la cantidad y determinar la calidad de la vegetación sobre la superficie como biomasa, niveles de clorofila, índices de área foliar y dosel (Lillesand *et al.*, 2014).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3.7)$$

A pesar de que el NDVI contrasta bien la vegetación del suelo, es susceptible a los efectos de las condiciones de iluminación y a las propiedades ópticas del suelo, ya que en suelos de sustrato oscuro se obtienen valores de NDVI altos (Liang *et al.*, 2012).

SAVI. Índice de vegetación ajustado al suelo

El índice de vegetación ajustado al suelo es una propuesta que corrige la influencia que tiene el suelo sobre la vegetación al aplicar el NDVI. Basado en el principio de la existencia de una “línea de suelo” propuesto por Huete (1987).

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L}(1 + L) \quad (3.8)$$

donde:

- L es una constante para ajustar la línea de vegetación-suelo al origen minimizando la influencia del brillo del suelo. Se obtiene calculando la pendiente de la *línea de suelo* mediante la transformación *Tasseled Cap*.

Transformación Tasseled Cap

La Transformación Tasseled Cap (TTC) transforma las bandas de una imagen por medio de combinaciones lineales y las concentra en planos formados por ejes ortogonales entre sí, que resaltan las características de la vegetación (verdor, brillo y humedad) por medio de la ecuación 3.9. Su formulación se aplica al estudio de los cultivos por medio de su comportamiento espectral en las regiones espectrales infrarrojo (IR) y rojo (R) (ver fig. 3.8).

$$TC = W_{TC} * DN + B \quad (3.9)$$

Donde:

- W_{TC} es una matriz de transformación y B es un vector de sesgo. El valor de ambas es dependiente del sensor utilizado.
- DN es el nivel digital de cada pixel.

Las características físicas que la TTC resalta son *verdor*, *brillo* y *humedad*. R. Crist y C. Cicone (1984) estudiaron el comportamiento de la TTC con el satélite Landsat TM y definen a las características de la vegetación como:

- Brillo. Transformación de todas las bandas espectrales que responden a los cambios de reflectancia generados por el tipo de suelo. Junto con el verdor representan el *plano de la vegetación*.
- Verdor. Transformación derivada de la vegetación de acuerdo a su respuesta espectral. Responde al contraste entre la alta absorción de las bandas del espectro visible y la alta reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano, característico de la vegetación.
- Humedad. Es el contraste de las bandas de los espectros visibles e infrarrojo cercano con la suma de las bandas del infrarrojo lejano. Está relacionado con la textura del suelo y el dosel de la vegetación.

A partir de los resultados de la TTC se puede conocer el comportamiento de la vegetación. Por ejemplo, de la figura 3.8, se puede decir que, cuando en la superficie no hay algún tipo de vegetación, la información forma la llamada *línea de suelo*, cuya pendiente depende del tipo de sustrato (un sustrato oscuro disminuye el brillo); conforme la vegetación crece, esta crea sombra sobre el suelo, lo que hace que el brillo (eje X) disminuya y el verdor (eje Y) aumente. Posteriormente, conforme la vegetación madura, el brillo y el verdor aumentan. Sin embargo, cuando la vegetación empieza a marchitarse (senescencia), el verdor disminuye y tiende de nuevo a la línea de suelos.

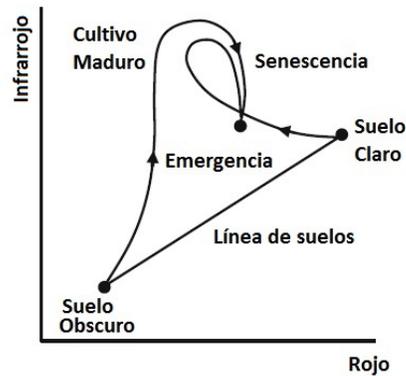


Figura 3.8: Transformación Tasseled Cap. Tomado de Richards (2013).

3.2. Métodos de clasificación

Después de la obtención de variables biofísicas mediante índices o transformaciones, sigue el agrupamiento de píxeles con valores similares en categorías. A este proceso se le llama *Clasificación* y establece una relación de estas variables con las categorías propuestas, como se mencionó en el capítulo 1.

El propósito de una clasificación, en términos de la percepción remota, es agrupar píxeles con respuestas espectrales similares, estableciendo una relación cuantitativa de parámetros físicos con los valores de los niveles digitales.

Según Liang *et al.* (2012), los pasos para realizar una clasificación son:

- **Definición del sistema o esquema de clasificación:** Depende del objetivo y las características de las imágenes satelitales. Su propósito es proveer una referencia para la organización y categorización de la información que puede ser extraída de las imágenes.
- **Selección de rasgos:** Es el tratamiento de los datos para realzar características en el terreno que son el objeto de estudio en el sistema de clasificación. En esta etapa se aplican índices de vegetación y transformaciones como: NDVI, Tasseled Cap, SAVI, etc.

- **Selección de áreas de entrenamiento:** Es la etapa donde se definen los parámetros que se utilizan para la clasificación de los píxeles y su posterior validación. Estas áreas son establecidas de acuerdo al tipo de clasificación: supervisada y no supervisada.
- **Clasificación:** Es la aplicación de reglas de decisión llamadas clasificadores, que asignan píxeles a las distintas clases comparándolos con las áreas de entrenamiento, por ejemplo: mínima distancia, paralelepípedos, máxima similitud, árboles de decisión, etc.

Clasificación Supervisada

Este método se basa en la selección de áreas de entrenamiento que el algoritmo utiliza para efectuar cálculos estadísticos como la desviación estándar, el promedio, entre otros, con la finalidad de agrupar los píxeles que conforman la imagen. Estas áreas son elegidas por el especialista que debe tener conocimiento previo de la zona de estudio.

Salinero (1995) recomienda se tomen en cuenta las siguientes características:

- Las áreas deben ser en zonas donde una categoría sea lo suficientemente homogénea, pero que permita cierta variabilidad con otras clases, como se mostraría en campo. Para esto, no se recomienda que se ubiquen en zonas de transición de las clases.
- Tomar en cuenta el tamaño de las áreas de entrenamiento, de manera que la muestra sea estadísticamente representativa.

Clasificación No Supervisada

Estas agrupaciones no son conocidas al inicio del proceso, por lo que el usuario sólo tienen que interpretar los resultados.

- **Cálculo de precisión:** En esta etapa los resultados son verificados usualmente por medio de matrices de error (o también llamadas matrices de confusión) creadas a partir de las áreas de entrenamiento. Los valores de estas matrices es la cantidad de píxeles asignados a las distintas clases siendo la diagonal principal las clasificadas correctamente.

La suma de las columnas representan la cantidad de píxeles asignados por el usuario en las áreas de entrenamiento. La suma de los renglones representa los píxeles clasificados por el algoritmo en cada una de las clases. De aquí se desprenden dos tipos de errores: 1) los píxeles que el algoritmo no pudo identificar como perteneciente a alguna clase, son llamados *errores de omisión*. 2) los píxeles que fueron asignados a una clase a la que no pertenecen, son llamados *errores de comisión* (Richards, 2013).

Richards (2013) menciona que hay dos maneras de evaluar un clasificador: la primera es obtener muestras del mapa temático y compararlos con lo observado en campo, calculando la precisión del mapa por medio de la probabilidad de que el píxel asignado en el mapa y el píxel de referencia pertenezcan a la misma clase (ec. 3.10a). En la segunda, se calcula la probabilidad de que el píxel tomado en campo pertenezca a la misma clase que el píxel del mapa (ec. 3.10b).

$$\sum_{Z \in A, B, C} p(m = Z | r = Z) \quad (3.10a)$$

$$\sum_{Z \in A, B, C} p(r = Z | m = Z) \quad (3.10b)$$

donde:

m: píxeles clasificados en el mapa.

r: píxeles utilizados de referencia.

Z: clase considerada en el sistema de clasificación representado por *A*, *B* y *C*.

$p(m=Z|r=Z)$: la probabilidad de que un píxel clasificado en el mapa como *Z* tenga el mismo valor en los datos de referencia.

Por otro lado, la precisión del mapa se calcula tomando las probabilidades de los clasificadores junto con la probabilidad de ocurrencia de las clases en el mapa (ec. 3.11a) o por el funcionamiento del clasificador, tomando las probabilidades del clasificador en el mapa con las probabilidades de los datos de referencia (ec. 3.11b):

$$\sum_{Z \in A, B, C} p(r = Z | m = Z) p(m = Z) \quad (3.11a)$$

$$\sum_{Z \in A, B, C} p(m = Z | r = Z) p(r = Z) \quad (3.11b)$$

Coefficiente Kappa

Es una medición del funcionamiento de los clasificadores que se obtienen de la matriz de confusión, que supuestamente está libre de cualquier sesgo y es resultado de la concordancia entre las clases derivadas del clasificador y los datos de referencia (Richards, 2013). Se calcula como:

$$k = \frac{P_o - P_c}{1 - p_c} \quad (3.12)$$

donde:

- P_o : Es la suma de los elementos de la diagonal de la matriz de error dividida entre el total de píxeles.

$$p_o = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M n_{ii} \quad (3.13)$$

- P_c : Es la suma del producto de las probabilidades del clasificador y de los datos de referencia

$$p_c = \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M n_{ki} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M n_{ik} \right\} \quad (3.14)$$

- N: total de píxeles de la matriz.
- M: número de clases.
- n_{ik} : elemento del renglón (i) columna (k) de la matriz de error.
- n_{ii} : elemento de la diagonal principal de la matriz de error.

Por lo que otra forma de escribir el cociente kappa es:

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^M n_{ii} - \sum_{i=1}^M \{ \sum_{k=1}^M n_{ki} \sum_{k=1}^M n_{ik} \}}{N^2 - \sum_{i=1}^M \{ \sum_{k=1}^M n_{ki} \sum_{k=1}^M n_{ik} \}} \quad (3.15)$$

En el caso donde la matriz de error no tenga valores fuera de la diagonal principal, el coeficiente kappa tomaría valor 1, pero puede llegar a tener valores negativos dado que a pesar de ser muy utilizado, es una medición con múltiples fuentes de error, su dependencia de la comparación con la concordancia no agrega información útil porque compara la precisión a una línea base de aleatoriedad. Además, al ser un índice sus valores no son exclusivos, ya que se pueden generar otros similares combinando tanto el numerador como el denominador (Richards, 2013; Pontius, 2011).

Clasificaciones del uso del suelo y vegetación disponibles

Como se mencionó en los capítulos 1 y 3, la percepción remota se puede emplear para el estudio del uso de suelo y cobertura vegetal mapeando los distintos tipos de vegetación y actividades humanas. Sin embargo, dadas las múltiples formas de interpretar la vegetación, es difícil adaptar un sistema estándar para su clasificación, lo que lleva a la creación de diversas propuestas en función del objetivo de los investigadores y de los tipos de vegetación presentes en la zona en estudio. En este capítulo se mencionan algunos de los sistemas de clasificación para México, con datos disponibles para consulta.

4.1. Series de uso del suelo y vegetación de INEGI, escala 1:250,000

En México, INEGI es la institución encargada de la obtención y distribución de información geográfica y estadística, por lo que ha elaborado cinco conjuntos de datos sobre uso de suelo y cobertura vegetal llamadas *Series de Uso del Suelo y Vegetación* escala 1:250,000, con las que busca, entre otros objetivos, apoyar en la planeación y ejecución de acciones encaminadas al uso óptimo de los recursos naturales, renovables y no renovables, para frenar el deterioro ambiental y prevenir desastres ecológicos, que son problemas que México enfrenta actualmente (INEGI, 2013).

La metodología y el sistema de clasificación de las especies vegetales de cada serie ha variado debido a las herramientas empleadas (ver tabla 4.1). En su inicio, se utilizaron fotografías aéreas y métodos de restitución analógicos y en la actualidad se utilizan imágenes satelitales (SPOT y Landsat) y métodos de clasificación digitales.

4. CLASIFICACIONES DEL USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN DISPONIBLES

Tabla 4.1: Características de las Series de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI escala 1:250,000. Modificado de Victoria-Hernández *et al.* (2011) y complementado con información de INEGI (2014).

	Fuente de datos	Resolución espacial	Metodología	Fecha de referencia ¹	Fecha datos de campo
Serie I	Fotografías aéreas	Grano de emulsión / escala de vuelo	Equipo óptico-mecánico	(1968 ²) 1985	1979-1991
Serie II	Imágenes impresas Landsat TM	50 m, escala de impresión: 1:250,000	Equipo óptico-mecánico	1993	1993-1999
Serie III	Imágenes Landsat ETM	27.5 m	Tecnología digital: PC y software de SIG.	2002	2002-2005
Serie IV	Imágenes SPOT de 2007-2008	10 m	Tecnología digital: PC y software de SIG	2007	2006-2010
Serie V	Imágenes SPOT 2011-2013	10 m	Tecnología digital: PC y software de SIG	2011	2011-2013

Cada serie se conforma de 144 conjuntos de datos digitales que cubren la superficie total del país y pueden ser consultados independientemente utilizando la nomenclatura de las cartas de INEGI, o como un conjunto nacional (fig. 4.1).

Se cuenta con tres versiones de un “Diccionario de datos de uso de suelo y vegetación” y cada serie tiene una “Guía de interpretación de cartografía” para que los usuarios puedan comprender mejor el contenido de las series. En ambos documentos se explican tanto las metodologías y definiciones de los tipos de vegetación así como de las agrupaciones en que se conforman.

¹La fecha de referencia es el año en que los datos fueron obtenidos.

²Se considera el año 1968 ya que parte de los insumos utilizados en la verificación y análisis espacial fueron obtenidos en ese año.



Figura 4.1: Índice de cartas 1:250,000 conjunto de datos de la Serie de Uso y Vegetación. Tomado de INEGI (2014).

Guía para la interpretación de cartografía de INEGI

INEGI ha desarrollado estas guías para sus diferentes productos: cartas edafológicas, cartas de topografía, cartas de uso potencial del suelo y cartas de uso del suelo y vegetación. Ésta última se organiza de acuerdo a un sistema jerárquico que agrupa la información (tipos de vegetación y uso de suelo) en tres tipos (ver fig. 4.2):

- **Ecológica, florística y fisonómica.** Incluye todos los tipos de vegetación que son considerados en los sistemas de clasificación de Rzewdoski (2006) y Miranda y Hernández (1963). Describen su desarrollo, es decir, el grado de conservación de la vegetación original, por ejemplo, se considera vegetación secundaria si ha sido alterada considerablemente y en caso contrario, se considera vegetación primaria.
- **Agrícola, pecuaria y forestal.** La información de este grupo se divide en los denominados *Agroecosistemas*; son los tipos de agricultura y actividades acuícolas. Sus atributos se dividen también de acuerdo al uso de los productos como aprovechamiento industrial, alimentación animal o humana, dividiéndose a su vez por el tipo de plantación agrícola o forestal y por su ciclo vegetativo¹ que puede ser: anual (menor a un año), semipermanente (de dos a diez años) o permanente (mayor a diez años).

¹Periodo de tiempo en el que las plantas desarrollan todos sus órganos alcanzando la maduración haciéndolas perfectas para su cosecha-recolección. Tomado de Real Hardisson (sf).

- **Agrícola.** Son áreas de producción de cultivos que son utilizados como alimento, forraje, ornamento o uso industrial.
 - **Pecuario.** Son lugares donde se realiza la explotación ganadera de manera intensiva o extensiva para la obtención de diferentes productos: carne, leche, huevo, etcétera.
 - **Forestal.** Se refiere a la utilización de especies forestales cultivadas para la obtención de diferentes productos: madera, aceites, celulosa, etcétera.
 - **Acuícola.** Se refiere al manejo de especies de agua dulce o marinas con fines de obtención de producción de carne o de crías. Incluyen: piscifactorías, granjas de cultivos de camarón, granjas de cultivos de peces, etcétera.
- **Información complementaria.** Son los elementos que no forman parte de cobertura vegetal ni áreas de uso agrícola, pecuario o forestal. Estos elementos son: cuerpos de agua, áreas desprovistas de vegetación, asentamientos humanos, zonas urbanas, país extranjero y nomadismo agrícola.

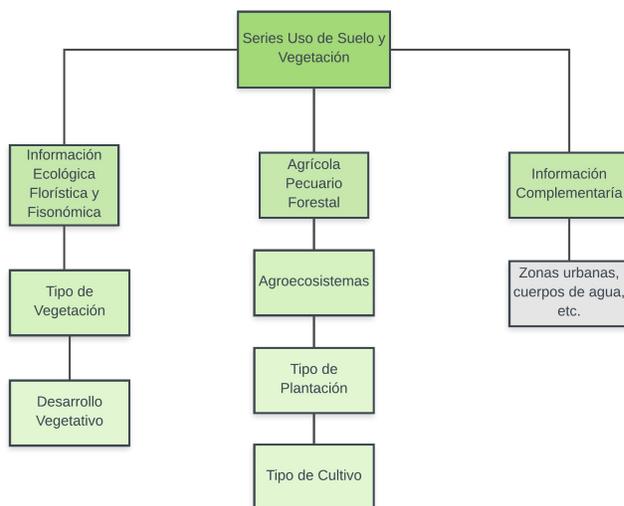


Figura 4.2: Esquema general de las Series de Uso del Suelo y Vegetación. Elaboración propia con información de INEGI (2014).

Las guías de interpretación de cartografía del uso suelo también describen la nomenclatura y estructura de las tablas de atributos de los archivos vectoriales, así como la metodología empleada en la elaboración de las series y características geográficas de los datos vectoriales (tabla 4.2).

Tabla 4.2: Parámetros de referencia espacial para los productos disponibles de Uso de Suelo y Vegetación. Tomado de INEGI (2014).

	Conjunto Nacional	Conjuntos individuales
Proyección	Cónica Conforme de Lambert	Universal Transversa de Mercator
Cubrimiento	Nacional	1° de latitud 2° de longitud
Unidades	Metros	Metros
Escala	1:250,000	1:250,000
Sistema geodésico de referencia	ITRF92	ITRF92

Diccionario de datos

Contiene los nombres, definiciones y características de los objetos espaciales que, descritos bajo especificaciones comunes, dan lugar a la generación de datos espaciales. También explica la nomenclatura y claves de los archivos vectoriales, para su mejor interpretación física:

- **us:** Tema de los archivos, Uso de Suelo.
- **250:** Escala de interpretación 1:250,000.
- **s4:** Identificación de la serie a la que pertenece.
- **v:** Tipo de información que contiene cada capa.

4. CLASIFICACIONES DEL USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN DISPONIBLES

Es necesario mencionar que no todas las series tienen el mismo número de capas (tabla 4.3) ni el mismo número de tipos de vegetación o tipos de agricultura (tabla 4.4) ya sea por los insumos utilizados o por las nuevas definiciones de los tipos de vegetación y uso de suelo.

Tabla 4.3: Existencia de capas para las cinco series de INEGI. Elaboración propia. Tomado de las Guías de interpretación y de los archivos vectoriales.

Capa	Serie I	Serie II	Serie III	Serie IV	Serie V
Tipos de vegetación (v)	x	x	x	x	x
Agricultura (g)			x	x	x
Aspecto matorral (a)			x	x	x
Erosión (r)			x		
Nomadismo agrícola (n)		x	x	x	x
Altura de la vegetación (h)				x	x
Cobertura arbórea (d)			x	x	x
Especies vegetales (e)		x	x	x	x
Cultivos (c)		x	x	x	x
Actividades pecuarias (p)			x	x	x
Actividades forestales (f)		x	x	x	x
Sitios de importancia ecológica (i)			x	x	x
Otras actividades (o)			x	x	x
Líneas de importancia ecológica (l)			x	x	x

Tabla 4.4: Tipos de vegetación y uso de suelo. Elaboración propia a partir de los archivos vectoriales de cada serie. En el Anexo I se pueden consultar todos los tipos de vegetación.

Serie	Clases	Agroecosistemas	Otros	Total
I	53	7	3	63
II	54	7	4	65
III	56	6	5	67
IV	57	6	5	68
V	59	6	6	71

4.1.1. Serie I

La elaboración de la Serie I comenzó en 1968 con asesoramiento de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) con tecnología y metodologías analógicas (fotografías aéreas, restitución analógica y fotointerpretación). Aunado a la verificación en campo, este trabajo se realizó durante casi 20 años de esfuerzo (1970 - 1988) y se publicó en 1993.

Victoria-Hernández *et al.* (2011) menciona que la escala planeada para las cartas de uso de suelo y vegetación era 1:50,000. Sin embargo, por el tiempo requerido para su elaboración, la escala fue cambiada, en 1975, a 1:250,000.

4.1.2. Serie II

Es la primera serie en que se utilizaron imágenes de satélite (Landsat TM) tomadas en 1993 que, con la verificación de campo de 1994 a 1996, fueron la base para la actualización de la Serie I, manteniendo los procedimientos de análisis analógicos para su posterior transformación a medio digital por digitalización manual y de barrido (escaneo).

La Serie II fue desarrollada en tres etapas:

- Proceso de compilación

Se recopilaron los antecedentes conceptuales y de información cartográfica comparándose con la nueva información definida por el análisis visual de las imágenes aéreas, complementada con visitas de campo y análisis de laboratorio de las muestras. Éste proceso se llevó a cabo entre 1996 y 1999.

- Proceso de actualización de datos

Con la finalidad de mantener la homogeneidad de los criterios de clasificación, reflejando con gran fidelidad los cambios de la vegetación y uso del suelo con la cartografía temática de la Serie I, se emplearon espaciomaps¹ analógicos redefiniendo los límites de los polígonos.

- Proceso de conversión

Es la digitalización de la serie, efectuada en 1999 mediante un barredor óptico-mecánico, para verificar la homogeneidad de criterios y detectar los cambios en las imágenes de satélite.

El objetivo de esta serie era ser un insumo digital que formara parte de un Sistema Nacional de Información Geográfica (SNIG) que es antecedente del actual SNIEG (Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica) creado en 2006, y que tiene como propósito proveer a la sociedad información de interés nacional adoptando estándares internacionales (INEGI, 2010b).

¹Son imágenes de satélite en falso color del territorio, con una resolución espacial de 50 m, a las cuales se le agregan los nombres de las principales poblaciones, y de algunos rasgos geográficos sobresalientes. Fueron elaborados a partir de imágenes LANDSAT de 1993 y 1994, cada uno cubre aproximadamente 24,000 km² de territorio. (INEGI, 2017)

4.1.3. Serie III

Realizada entre 2002 y 2005, es la primera serie cuya elaboración fue enteramente digital, ya que fueron utilizadas imágenes satelitales Landsat ETM, tomadas entre 2002 y 2003, con resolución espacial de 30 *m* que fueron analizadas con software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y una recolección de datos de campo efectuada entre 2002 y 2003 siendo publicada en 2006.

La Serie III fue elaborada en las siguientes fases:

- Proceso de compilación

Se recopilaron los antecedentes conceptuales y de información cartográfica comparándose con la nueva información definida por el análisis visual de las imágenes aéreas, complementada con visitas de campo y análisis de laboratorio de las muestras.

- Proceso de actualización de datos

Siguiendo el procedimiento de las series anteriores, esta fase consistió en la determinación de cambios de los límites, condición y presencia de la vegetación y sistemas agrícolas, aprovechando para corregir errores de las series anteriores utilizando imágenes Landsat ETM del año 2002 con resolución espacial de 27 *m*. Utilizando como apoyo espaciomaps con resolución espacial de 30 *m* obtenidas de imágenes Landsat ETM del año 2000 georreferenciadas a una base topográfica de 1997. Este proceso se llevó a cabo en los años 2003-2004.

- Proceso de homogeneización geográfica

En esta fase, cada uno de los resultados de la actualización fueron comparados con las series anteriores para comprobar la homogeneidad de los criterios de interpretación y la continuidad de las entidades geográficas, separando y validando los distintos tipos de información que conforman las capas de la serie mencionada.

- Proceso de generación del continuo nacional

En esta última fase, se llevó a cabo la unión de todos los datos que estaban en proyección UTM para posteriormente proyectarlas en Cónica Conforme de Lambert con datum ITRF92, verificando la información, continuidad y compatibilidad para las diferentes cubiertas. Este proceso inició en septiembre de 2004 entregando el producto final en mayo de 2005, siendo liberado en diciembre del mismo año.

4.1.4. Serie IV

Representa la actualización de la Serie III con una mejora en los insumos siendo imágenes multiespectrales SPOT 5 con resolución espacial de 10 *m* tomadas de 2007 a 2008 y con validación de campo en el mismo periodo, pero manteniendo el mismo sistema conceptual jerárquico.

Su elaboración consistió en tres etapas:

- Compilación y análisis de la información conceptual-bibliográfica y espacial (muestreo de campo) que se llevó a cabo de 2006 a 2008.
- Actualización de datos de la Serie III, utilizando imágenes SPOT tomadas en febrero del 2007 hasta junio del 2008, mediante la modificación de polígonos detectando cambios en los límites, condición y presencia de las comunidades vegetales y sistemas agrícolas, ajustando discrepancias con las series anteriores (INEGI, 2010a).
- Verificación de la continuidad y homogeneidad de los polígonos y sus atributos con base en su posición y relaciones en el mosaico de imágenes, separando los tipos de información para crear las diversas capas que conforman la serie.

4.1.5. Serie V

Es la serie más reciente, publicada en 2013, fue elaborada mediante la unión de imágenes multiespectrales Landsat TM5 con resolución espacial de 30 *m* del año 2011 y apoyada con verificación de campo durante el 2012.

De acuerdo a INEGI (2013), el proceso de elaboración de la Serie V es similar al utilizado en la elaboración de la Serie IV, dividiéndose en 4 procesos:

1. Proceso de actualización de datos (2010-2011),
2. Proceso de compilación (2011-2013),
3. Proceso de homogeneización (mayo 2012 - agosto 2013),
4. Proceso de generación del Conjunto Nacional (enero 2013 - diciembre 2013).

4.2. United States Geological Service (USGS)

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) *proporciona información de los desastres naturales que amenazan nuestra vida y los recursos naturales que son nuestro sustento, también proporciona información sobre la salud de nuestro ambiente y nuestros ecosistemas y el impacto del cambio climático y del uso de suelo*¹.

Los productos que el USGS tiene a disposición son: fotografías aéreas, mapas digitalizados, imágenes satelitales y datos de uso de suelo que pueden ser consultados en el portal de internet del Centro de Ciencia y Observación de los Recursos Terrestres (Earth Resources Observation and Science, EROS) (<http://eros.usgs.gov/>). Del uso de suelo y vegetación destaca la Caracterización Global de Cubierta Terrestre (Global Land Cover Characterization, GLCC) que contiene diversas clasificaciones de uso de suelo y vegetación como:

- Ecosistemas globales
- Sistema de clasificación del Programa Internacional para la Geósfera-Biósfera (IGBP)
- Modelo de la Biósfera Simple
- Segundo modelo de la Biósfera Simple
- Esquema de Transferencia Biósfera-Atmósfera
- Formas de vida de la vegetación

¹USGS,2016 <https://www.usgs.gov/about/about-us>

- Valores NDVI para los meses de abril de 1992 a marzo de 1993

La GLCC es producto de una clasificación no supervisada de imágenes obtenidas del sensor AVHRR con resolución espacial de 1 *km* capturadas entre abril de 1992 y marzo de 1993, con el fin de obtener un promedio de los cambios en las respuestas espectrales en cada una de las estaciones del año. Los datos de la GLCC pueden ser descargados del portal web (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) en dos formatos .tif y Binario (.bil) en las proyecciones: Azimutal Equiárea de Lambert (fig. 4.3a) y de Goode (fig. 4.3b). Fue elaborada por el USGS en colaboración con la Universidad de Nebraska-Lincoln (UNL) y el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea con el objetivo de ser utilizada para investigaciones ambientales y aplicación de modelos (USGS, 2015).

Se desarrolló en partes continentales, es decir, la información se encuentra disponible por continentes para su descarga: África, Australia y zona del Océano Pacífico, Eurasia, América del Norte y América del Sur, o también de manera global.

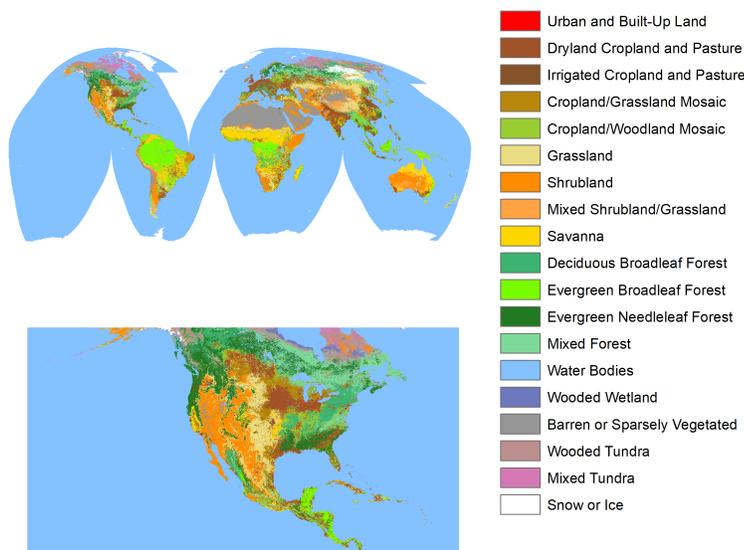


Figura 4.3: Clasificación USGS de manera Global (arriba), y clasificación USGS para Norteamérica (Abajo). Archivos de la GLCC descargados de EarthExplorer del USGS.

El sistema de clasificación de la USGS, que se encuentra en la GLCC, está basado en el sistema propuesto por Anderson (1976), el cual es un sistema jerárquico que se divide en cuatro niveles de información. El primero corresponde a los tipos de uso de suelo y cobertura más generales con una escala pequeña, ideal para estudios nacionales, su insumo son las imágenes Landsat con un rango de escalas de 1:24,000 a 1:1,000,000. El segundo nivel es sobre el cual se basa principalmente el sistema de clasificación, describe de manera general los tipos de vegetación de las categorías de nivel uno; los insumos de este segundo nivel son imágenes aéreas con un rango de escalas de 1:24,000 a 1:250,000. El tercer nivel utiliza imágenes aéreas escala 1:15,000 a 1:40,000 detallando mejor los tipos de cobertura y uso del suelo con ayuda de información auxiliar. El cuarto nivel requiere información auxiliar más detallada, por lo tanto, también necesita imágenes a mayor escala. La clasificación USGS mezcla los valores de los tres primeros niveles del sistema de clasificación de Anderson (1976) (ver Anexo II).

4.3. International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)

Fue creado por el Programa Internacional para la Geósfera-Biósfera (IGBP) para el mejor entendimiento de los cambios y procesos de los ciclos físicos, químicos y biológicos así como su impacto social y económico a los sistemas humanos (IGBP, (sf); D' Souza, 2000).

Los datos fueron desarrollados con la misma metodología que el USGS (D' Souza, 2000), es decir, imágenes satelitales AVHRR de resolución espacial de 1 *km*, tomadas de abril de 1992 a marzo de 1993, de las cuales se calcularon los valores NDVI. Sin embargo, sólo contiene 17 categorías definidas para acoger independencia climática y la teoría sobre el dosel propuesto por Runnig (1994) que considera la permanencia de las hojas en los árboles, el tiempo de vida de las hojas y el tipo de hoja para la estimación del ciclo de carbono.

4.4. Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO)

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), desarrolló un programa (software) llamado Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra (Land Cover Classification System, LCCS) (fig. 4.4) que permite agrupar los distintos tipos de vegetación del mundo por medio de *clasificadores* sin importar las fuentes de información, sector económico o país, disminuyendo las diferencias de interpretación de los usuarios (DiGregorio, 2005).

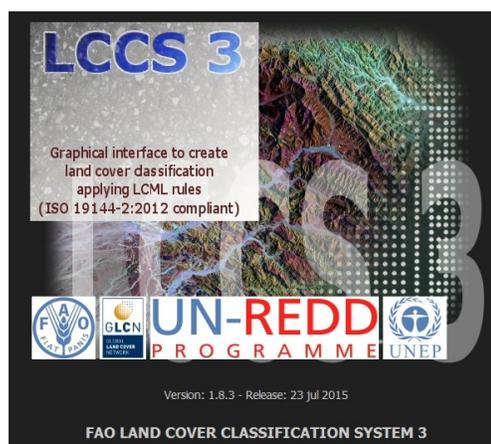


Figura 4.4: Todas las versiones del LCCS están disponibles en: <http://www.geovis.net>.

El LCCS es jerárquico, tiene una fase dicotómica¹ y otra modular-jerárquica; ambas fases hacen uso de los *clasificadores*, que aumentan en número de acuerdo a la descripción de la clase, lo que permite sea más detallada (ver fig. 4.7).

La fase dicotómica (fig. 4.5) define las principales características de la vegetación: tipo de vegetación, tipo de suelo y manejo que se le da a la vegetación. Los tipos de cobertura principales que tiene la fase dicotómica son:

- Áreas Terrestres Cultivadas y Manejadas.
- Vegetación Terrestre Natural y Semi-natural.
- Áreas Cultivadas Acuáticas o Regularmente Inundadas.

¹De la palabra *dicotomía* que es el método de clasificación que consiste en dividir en dos un concepto sucesivamente (RAE, 2016)

- Vegetación Natural y Semi-natural Acuática o Regularmente Inundada.
- Superficies Artificiales y Áreas Asociadas.
- Áreas Descubiertas o Suelo Desnudo.
- Cuerpos Artificiales de Agua, Nieve y Hielo.
- Cuerpos Naturales de Agua, Nieve y Hielo.

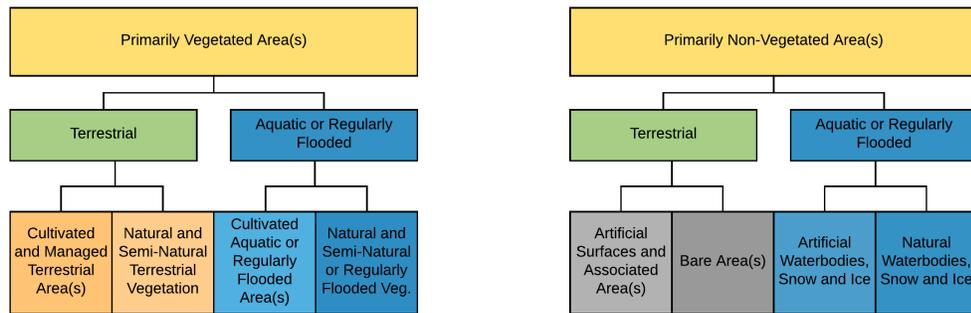


Figura 4.5: Diagrama de la Fase Dicotómica de LCSS. Tomado del programa LCSS versión 2.

La Fase modular-jerárquica utiliza clasificadores diferentes para cada tipo de clase de la fase dicotómica, estos clasificadores se complementan con dos tipos de atributos: medio ambientales y técnicos específicos que no son ordenados jerárquicamente, por lo que el orden en que se seleccionen alterará la nomenclatura de la clase de la cobertura (fig. 4.6).

Los atributos medio ambientales describen las propiedades que influyen en la cobertura de la tierra, pero no son parte de ella, por ejemplo el tipo de suelo, el clima, la altitud, la calidad del agua y la erosión.

Los atributos técnicos describen las características de uso de la cobertura, por ejemplo, las áreas cultivadas tienen un atributo técnico llamado *Tipo de Cultivo* o en el caso de áreas sin vegetación el atributo será *Tipo de Suelo*.

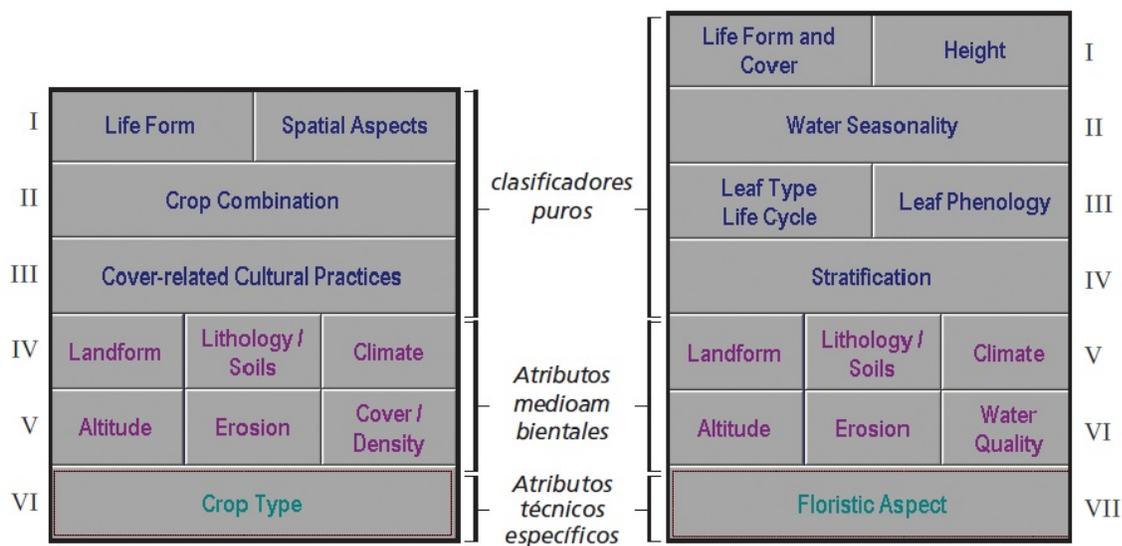


Figura 4.6: Ejemplo de clasificadores y atributos para “Áreas terrestres cultivadas y manejadas” (izq.) y “Vegetación natural y semi-natural acuática o regularmente inundada” (der.) disponibles para la fase modular-jerárquica. Tomado de DiGregorio (2005).

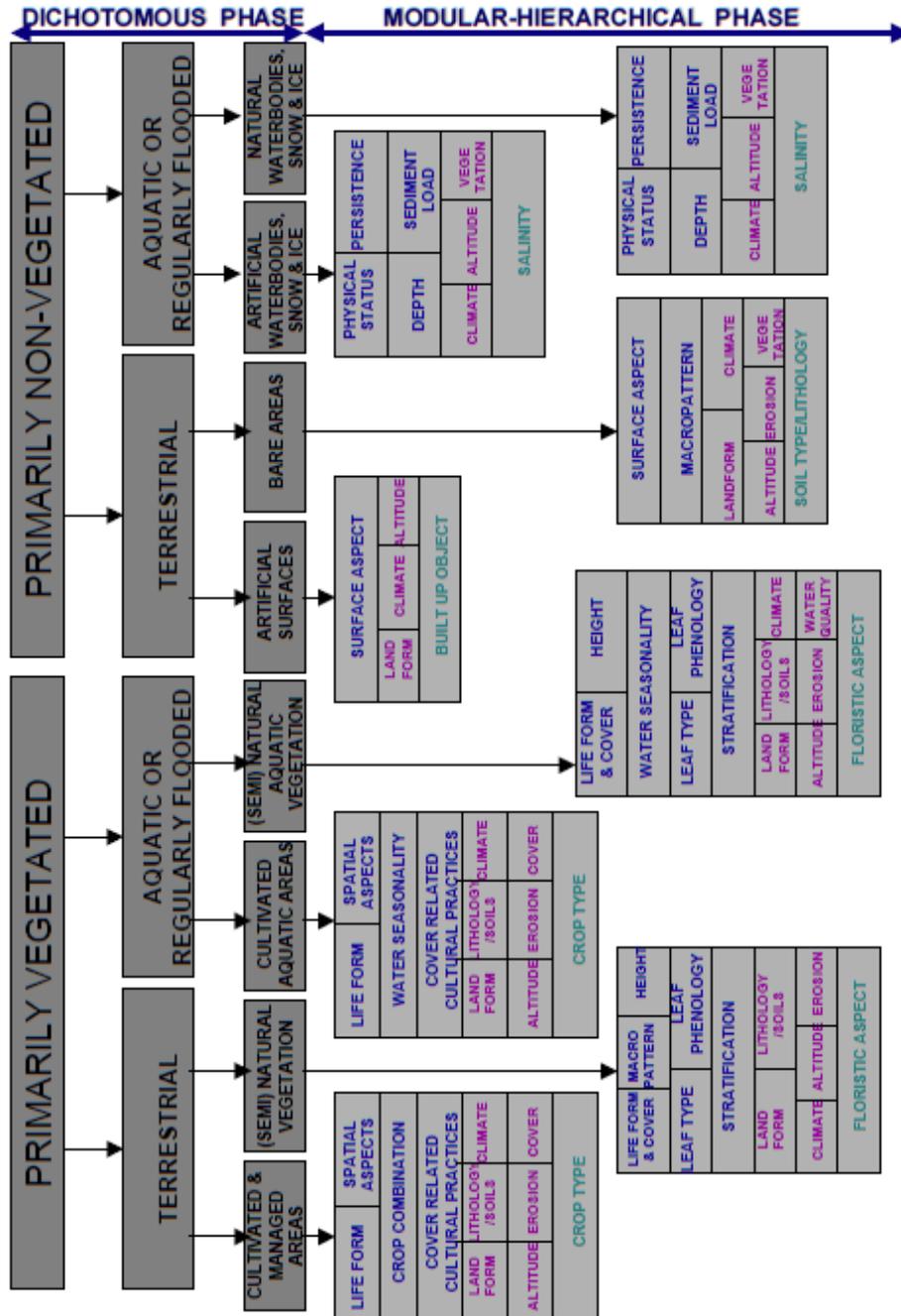


Figura 4.7: Ilustración general del LCCS, con sus dos fases (Ditocómica y Modular-Jerárquica) y clasificadores. Tomada de DiGregorio (2005).

4. CLASIFICACIONES DEL USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN DISPONIBLES

El resultado de la aplicación de este sistema es una leyenda que etiqueta los tipos de vegetación de manera alfanumérica. Se descarga en el enlace <http://www.geovis.net/OlderVersions.htm>, siendo compatible sólo con sistemas operativos Windows anteriores a Windows 10. La versión más actual es la 3.0 y contiene una nueva interfaz gráfica, haciendo la creación de clases de manera más clara (fig. 4.8), además se puede utilizar como plugin de QGIS.

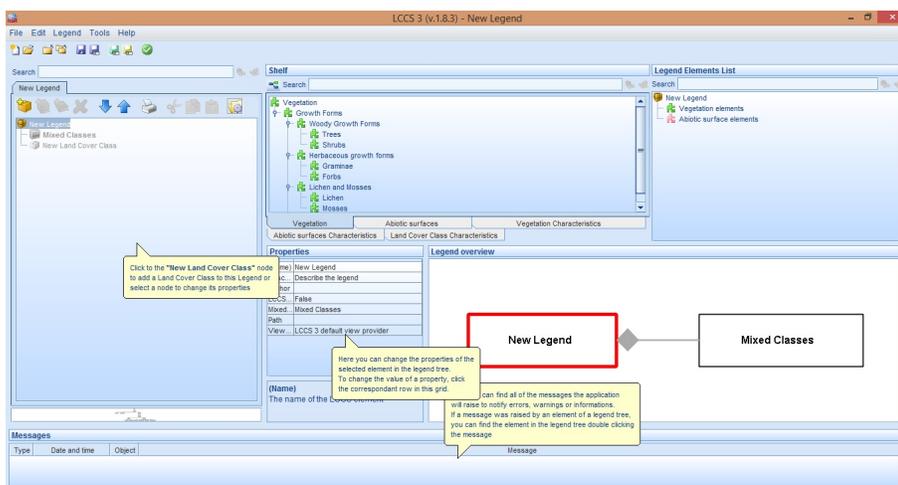


Figura 4.8: Ejemplos del uso del LCCS.

4.5. North American Land Change Monitoring System (NALCMS)

El Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura de Suelo de América del Norte (NALCMS) es una iniciativa de colaboración de los países de América del Norte (Canadá, Estados Unidos y México) que bajo la coordinación de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CEC) buscan trazar un marco de monitoreo que puedan aplicar los países de América del Norte con gran precisión en las necesidades específicas de cada país (USGS Land Cover Institute, 2016b).

De acuerdo con Latifovic *et al.* (2012), el NALCMS pretende desarrollar productos cada cinco años, con resolución de 250 *m*, que comprenden:

- Composiciones de imágenes satelitales
- Mapa temático de la cubierta terrestre
- Mapa temático del cambio espectral y cambio de la cubierta terrestre
- Productos fraccionarios del cambio de vegetación

Según CONABIO, en su página web (www.biodiversidad.gob.mx), con el NALCMS se genera información equiparable de la cobertura de suelo en México de manera consistente y automatizada, esta información se integra en un contexto de estudios a escala continental que sirven para generar “datos activos” relacionados con el Programa Colaborativo de las Naciones Unidas de Reducción de Emisiones de Carbono causadas por la Deforestación y la Degradación de los Bosques en los Países en Desarrollo (REDD).

Los insumos del NALCMS son imágenes MODIS con una resolución espacial de 250 *m*, múltiples fuentes de información auxiliar y un sistema de clasificación jerárquico cuyas clases se dividen en tres niveles obtenidos del Sistema de Clasificación de la Cubierta Terrestre (LCCS) de la FAO. Las clases de los niveles I y II son iguales para los tres países siendo el nivel III específico para cada país (USGS Land Cover Institute, 2016b) (tabla 4.5).

4. CLASIFICACIONES DEL USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN DISPONIBLES

Tabla 4.5: Clases del NALCMS, los niveles I y II son comunes para el conjunto de América del Norte, las clases resaltadas en negritas no existen para México. El nivel III especifica las clases que se encuentran en México. Tomado de Colditz *et al.* (2012).

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
1. Bosque hoja de aguja	1. Bosque hoja de aguja templado o sub-polar	Bosque de coníferas y vegetación arbórea secundaria
		Bosque de coníferas estacional y vegetación arbórea secundaria
		Bosque de coníferas menos denso y vegetación arbórea secundaria
	2. Hoja aguja de taiga sup-polar	-
2. Bosque hoja ancha	3. Bosque perenne de hoja ancha tropical o sub-tropical	Bosque tropical perenne y vegetación arbórea secundaria
		Bosque tropical semi-caducifolio y vegetación arbórea secundaria
	4. Bosque tropical o sub-tropical caducifolia de hoja ancha	Bosque tropical caducifolio de hoja ancha y vegetación arbórea secundaria
	5. Bosque templado o sub-polar caducifolio de hoja ancha	Bosque de roble caducifolio y vegetación arbórea secundaria
3. Bosque mixto	6. Bosque mixto	Bosque perenne de hoja ancha y hoja de aguja denso y vegetación secundaria arbustiva
		Bosque nuboso (mesófilo de montaña) y vegetación arbórea secundaria
4. Matorrales	7. Matorral tropical o sub-tropical	Matorral xerófilo denso
		Matorral xerófilo abierto
		Vegetación secundaria de matorral o bosque tropical
	8. Matorral templado o sub-tropical	Conífera de alta montaña, matorral con roble y vegetación arbustiva secundaria
5. Pastizal	9. Pastizal tropical o sub-tropical	Pastizal natural
		Pastizal inducido y vegetación secundaria herbácea
	10. Pastizal templado o sub-polar	Pastizal de alta montaña

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
6. <i>Líquenes/musgo</i>	11. Matorral-liquen-musgo polar o sub-polar	-
	12. Pastizal-liquen-musgo polar o sub-polar	
	13. Desprovisto de vegetación-liquen-musgo polar o sub-polar	
7. Manglar	14. Manglar	Vegetación arbórea hidrófila de agua dulce
		Vegetación hidrófila herbácea y arbustiva de agua dulce
		Vegetación hidrófila arbórea de agua salobre y salada
		Vegetación hidrófila herbácea y arbustiva de agua salobre y salada
8. Campo de cultivo	15. Campo de cultivo	Campo de cultivo herbáceos y arbustivos
		Campo de cultivo boscoso
		Campos cultivados
9. Desprovisto de vegetación	16. Desprovisto de vegetación	Desprovisto de vegetación
10. Urbano y urbanizado	17. Urbano y urbanizado	Urbano y urbanizado
11. Cuerpos de agua	18. Cuerpos de Agua	Cuerpos de agua
12. Nieve o hielo	19. Nieve o hielo	Nieve o hielo

Según Latifovic *et al.* (2012), el NALCMS fue elaborado en tres etapas:

1. Determinación de zonas

En esta etapa se establecieron zonas en América del Norte de acuerdo a la similitud biofísica y espectral de los distintos tipos de vegetación dentro de cada país con la finalidad de que especialistas determinaran áreas de entrenamiento y reducir errores en la continuidad en las zonas fronterizas, realizando una sobreposición de 50 *km* entre países.

2. Recopilación de Datos

En esta etapa cada país utilizó diferentes fuentes de información nacionales para crear zonas de entrenamiento para los clasificadores. En México se utilizó la Serie III para seleccionar píxeles, para lo cual sus clases fueron reclasificadas en las categorías del NALCMS. Dada la complejidad del paisaje mexicano, fue necesario utilizar diversas fuentes de información auxiliar (MDE¹ a 250 m, días de precipitación, temperaturas máxima y promedio mensuales y la precipitación total en mm, todas del periodo 1970-2000, también valores medio, mínimo y máximo de NDVI multiperiodo²) para mejorar su descripción.

3. Clasificación

El proceso de clasificación del NALCMS se realizó con un programa de Árbol de Decisión³ (Decision Tree, DT) (fig. 4.9) llamado C5.0 que aplica dos procedimientos: *Boosting* y *Cross-Validation*. El primero aplica varios clasificadores en cadena y el segundo provee una estimación de calidad de la clasificación.

El estudio de México empleó 10 DT con datos de áreas de entrenamiento e información adicional para realizar diversos mapas de cubierta, de las cuales 23 fueron seleccionadas estadísticamente para inspección visual por parte de expertos de INEGI, CONAFOR y CONABIO (Colditz *et al.*, 2012).

¹Modelo Digital de Elevación

²Se refiere al promedio del cálculo del NDVI durante un año (anual), 6 meses, 4 meses y 3 meses

³De acuerdo con Richards (2013) consiste en varios clasificadores (nodos) conectados, los cuales no procesan toda la información de la imagen, si no que procesan sólo la información que les fue asignada. La forma más común de aplicar un DT es de forma binaria, esto es, si un píxel cumple con una condición, es asignado a una clase, si no la cumple es enviado a otro clasificador para ser analizado.

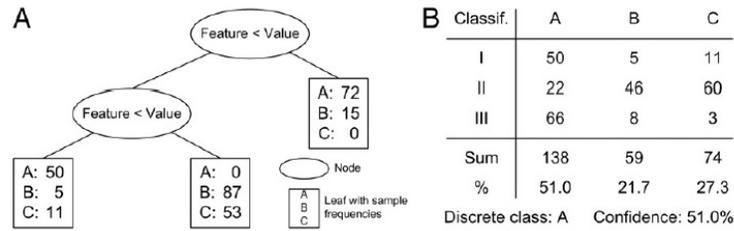


Figura 4.9: A) DT de frecuencia para las muestras. B) Combinación de clasificaciones de DT de las cuales se toma el atributo con mayor frecuencia como el valor del pixel. Tomado de Colditz *et al.* (2012).

4. Postproceso

En esta etapa se corrigieron las clasificaciones debido a la existencia de confusión en las cubiertas, ya que en las zonas fronterizas existían criterios diferentes sobre la clasificación de la vegetación, por lo que se asignaban diferentes clases a un mismo espacio. Latifovic *et al.* (2012) menciona que en la frontera Estados Unidos-México, el problema de confusión entre clases se resolvió tomando la clase con la segunda probabilidad más alta de cada pixel, misma que fue multiplicada por una capa de distancia, estos pixeles fueron renombrados como una segunda clase si su probabilidad resultaba ser más alta que la probabilidad de la clase dominante.

El cálculo de precisión del NALCMS, se llevó a cabo por medio de una matriz de confusión¹, de la cual según Colditz *et al.* (2012), se obtuvo una precisión global del 68.5% para las muestras con una confianza mayor al 50%, mismas que se utilizaron para el cálculo de confianza de los mapas del NALCMS elaborados para 2005 y 2006.

¹“Es el resultado de un muestreo donde se resumen los acuerdos y desacuerdos entre clases del mapa y del terreno. Esta matriz puede analizarse estadísticamente, con objeto de obtener una serie de medidas sobre la fiabilidad del trabajo: global y para cada una de las categorías.” (Salinero, 1995)

Capítulo 5

Metodología

En México, los análisis que se llevan a cabo con modelos de pronóstico no son del todo adecuados, ya que utilizan información de uso de suelo no actualizada (elaborada en 1993). Lo que se propone en el presente trabajo es utilizar los archivos de uso de suelo de INEGI de los que se tiene una cobertura temporal mayor, con datos que van desde 1968 a 2011.

Como se mencionó en el capítulo 2, el modelo WRF utiliza la herramienta geogrid.exe para interpolar los datos reales dentro de la malla que será la base para la simulación numérica. Entre los datos que interpola se encuentra el uso de suelo que es utilizado para estimar cambios en las interacciones del sistema terrestre (océano-tierra-atmósfera). Para implementarlo es necesario tener información en alguno de los sistemas de clasificación que el modelo soporta, el sistema del USGS o el modificado con MODIS de la IGBP.

Para la implementación de la información del uso del suelo de INEGI en el modelo WRF, se diseñó una metodología para crear los archivos de uso de suelo de México. Dicha metodología consiste de cinco etapas:

1. Investigación de las clases INEGI y USGS.
2. Relación de las clases INEGI-USGS.
3. Análisis y reclasificación de los archivos vectoriales de las Series de INEGI.
4. Conversión de los archivos vectoriales (.shp) a formato ráster (.tif).

Investigación de las clases INEGI y USGS

La información de las clases de ambos sistemas de clasificación fue tomada de diversas fuentes. Para las clases de INEGI se tomó de las *Guías para la interpretación de cartografía escala 1:250,000*, de portales Web de dependencias oficiales como CONABIO y de artículos sobre el tema de vegetación mexicana como Rzewdoski (2006) y Miranda y Hernández (1963). Para las clases de la USGS se tomó de USGS Land Cover Institute (2016a), Anderson (1976) y USDA (2015).

Primeramente, la información fue recopilada en un catálogo, como se muestra en la figura 5.1, que muestra los aspectos y características geográficas, climáticas y de especies para cada clase. Una vez generado el catálogo, se generó una propuesta de clasificación que se describe en el apartado siguiente.

Clase	Ilustración	Descripción
Pastizal cultivado	 <p>Zacate buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>). Tomado de: http://www.naturalista.mx/observations/4074217 el 8 de marzo de 2017.</p>	<p>Es el que se ha introducido intencionalmente en una región (principalmente tropical), para su establecimiento y conservación se realizan algunas labores de cultivo y manejo. Son pastos nativos de diferentes partes del mundo como: <i>Digitaria decumbens</i> (Zacate Pangola), <i>Pennisetum ciliaris</i> (Zacate Buffel), <i>Panicum maximum</i> (Zacate Guinea o Privilegio), <i>Panicum purpurascens</i> (Zacate Pará), entre otras muchas especies.</p> <p>Tomado de: INEGI. 2009. Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie III.</p>
Evergreen needleleaf (Perenne de hoja de aguja)	 <p>Bosque de coníferas, un ejemplo de vegetación perenne hoja de aguja. Tomada el 6 de marzo de 2017, de la página web: https://www.flickr.com/photos/craighadun/4689306456/</p>	<p>Son áreas dominadas por vegetación boscosa con un 50% de cobertura y alturas que exceden los 2 metros. Los árboles y arbustos son de hoja perenne.</p> <p>Tomado de: FAO. <i>Land Cover categories</i>. Consultado de la página web: http://www.fao.org/gtos/tems/landcover.htm el 3 de octubre de 2016.</p>

Figura 5.1: Muestra del catálogo realizado que reúne la información de las clases de vegetación de las series de INEGI y USGS.

5.1. Propuesta de clasificación para su uso en el modelo de pronóstico meteorológico

Posteriormente a la elaboración del catálogo de clases se realizó la relación de las clases INEGI a USGS por medio de la comparación de características fenológicas y geográficas de los tipos de vegetación. Esto se llevó a cabo con la generación de dos tablas auxiliares: la primera resume las características de la vegetación de cada serie de INEGI y la segunda tabla contiene las especies vegetales de cada categoría. Dichas tablas sirvieron para la re-

visión de homogeneidad de los tipos de vegetación agrupados en cada clase de USGS. En el Anexo III puede consultarse la relación de las clases INEGI-USGS.

Análisis y reclasificación de los archivos vectoriales de las Series de INEGI

Con base en la relación, los atributos de los archivos vectoriales fueron modificados con la creación de dos campos: el primero para describir los tipos de vegetación (“*entidad_*”) y el segundo para el valor de la clasificación USGS (“*usgs*”) (ver fig. 5.2). Sin embargo, para las series 3, 4 y 5 proporcionadas por INEGI, los archivos de vegetación, *us250s3v*, *us250s4v* y *us250s5v* respectivamente, no especificaban los tipos de agricultura y sólo se tenían polígonos con valor Agrícola-Pecuaria-Forestal (APF) por lo que dichos polígonos fueron sustituidos por los polígonos de los archivos de agricultura de cada serie *us250s3g*, *us250s4g* y *us250s5g* (ver fig. 5.3).

CULT_TER	entidad_	usgs
no aplicable	Chaparral	9
no aplicable	Zona Urbana	1
no aplicable	Pastizal inducido	7
no aplicable	Pastizal inducido	7
no aplicable	Chaparral	9
no aplicable	Chaparral	9
ninguno	temporal	2
no aplicable	Chaparral	9
no aplicable	Vegetacion de galeria	8
no aplicable	Chaparral	9
ninguno	temporal	2
no aplicable	Pastizal inducido	7

Figura 5.2: Campos creados en la tabla de atributos de los archivos de cada serie de INEGI. Los valores del campo “*entidad_*” son los tipos de vegetación y uso de suelo de las Series de INEGI, mientras que los valores del campo “*usgs*” son las clases de la clasificación USGS. La asignación de valores de USGS se hizo con selecciones por atributos de acuerdo a los tipos de vegetación de INEGI agrupados previamente en la relación INEGI-USGS (Anexo III).

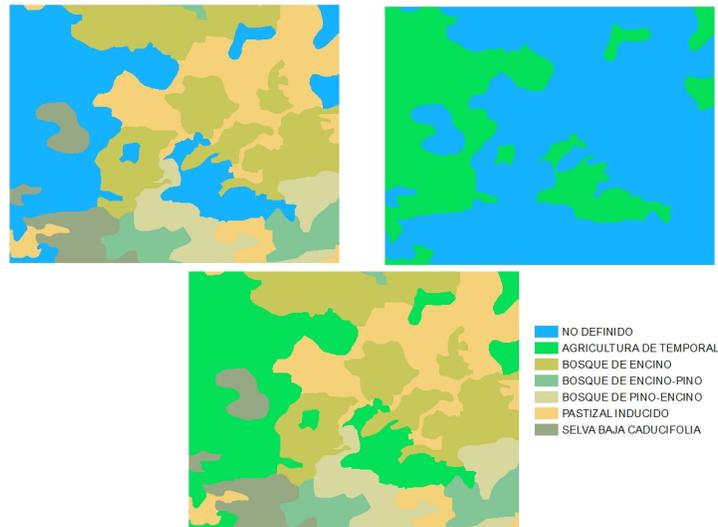


Figura 5.3: Se muestran los archivos de la Serie V de tipos de vegetación (izq.) y de tipos de agricultura (der.) para ilustrar la falta de definición de los tipos de agricultura en los archivos de vegetación de cada Serie. También se muestra el resultado del procedimiento mencionado anteriormente (abajo).

Conversión de archivos vectoriales a formato ráster

Posterior a la asignación de valores de la clasificación USGS a los tipos de vegetación, los archivos vectoriales fueron transformados a formato ráster (.tif). Para esto fueron procesados con los siguientes pasos:

1. Proyección a coordenadas geográficas (elipsoide y datum WGS 84).
2. Conversión a formato ráster .tif con resolución espacial de 1 km calculado a partir de la consideración que $1^\circ = 111.325$ km aproximadamente, por lo que se obtuvieron pixeles con tamaño: $\frac{1^\circ}{111.325} = 0.008982708^\circ$.
3. Los archivos ráster fueron convertidos a formato ASCII (.asc), listos para su conversión a formato binario para ingresarlos como una variable más en el modelo WRF.

Por último se calculó la precisión de la reclasificación obteniendo las diferencias de los archivos raster de USGS y los raster de la reclasificación INEGI-USGS, calculando el área de los valores nulos y obteniendo su porcentaje de acuerdo al área nacional (véase el capítulo 6).

5.2. Cálculo de estadísticas

Los tipos de vegetación fueron analizados para el periodo 1968-2011 por medio de una *matriz de cambio* creada a partir de la intersección de la Serie I y la Serie V. Para esto los tipos de vegetación de INEGI fueron agrupados en 10 clases que generalizan sus características:

1. Agrícola
2. Bosque
3. Cuerpos de agua
4. Vegetación acuática
5. Matorral
6. Otros tipos
7. Pastizal
8. Sin vegetación
9. Zona urbana

La agrupación de los tipos de vegetación de las series de INEGI facilita el análisis de su evolución, ya que, en lugar de tener que analizar 79 clases, se analizan solo 10. Para este agrupamiento se tomaron como guía las publicaciones de Rzewdoski (2006) y el portal web de CONABIO. A continuación se describe cada una de estas 10 clases agrupadas.

Agrícola

En esta agrupación se reúnen los agroecosistemas (ver tabla 5.1) que INEGI (2014) define como *los diferentes tipos de agricultura y actividades acuícolas que conforman la información agrícola, pecuaria y forestal*, en la cual, también se incluye el cultivo de bosques y de pastizales, de los cuales pueden obtenerse diferentes productos.

Tabla 5.1: Agroecosistemas considerados en las cinco Series de INEGI.

Agrícola	
Acuicola	Agricultura de humedad
Agricultura de riego	Agricultura de riego eventual
Agricultura de temporal	Bosque cultivado
Bosque inducido	Pastizal cultivado
Pastizal inducido	Riego suspendido

Bosque

En México, CONABIO considera la existencia de dos tipos de bosque: Nublado y Templado. El *bosque nublado* se encuentra en zonas muy húmedas, con lluvias y nubosidad frecuentes, están compuestos por árboles de distintos estratos, con abundancia de helechos y epífitas. Además, abarcan cerca del 1% de la superficie del país. El *bosque templado* está compuesto principalmente de árboles altos con carencia de estrato bajo, estos bosques cubren aproximadamente 16% de la superficie del país. En la tabla 5.2 se enlistan los tipos de vegetación boscosa.

Al igual que los demás tipos de vegetación, los bosques son de gran importancia, ya que ofrecen servicios ambientales (Pérez *et al.*, 2007), de los que los seres humanos podemos sacar provecho. Estos servicios son: la biodiversidad, el ciclo hidrológico, la educación y ocio y la fijación de carbono.

La biodiversidad y el ciclo hidrológico, son los servicios que permiten la permanencia de los suelos mitigando la erosión. La educación y ocio se representa frecuentemente en actividades turísticas que concientizan a las personas de la importancia de los bosques. Por último, la fijación de carbono, es el servicio que más relevancia ha tenido en la actualidad, ya que de acuerdo con la FAO (2012), *poseen el potencial de absorber un décimo de las emisiones mundiales de carbono previstas para la primera mitad del siglo XXI en sus biomásas, suelos y productos y almacenarlos, en principio, a perpetuidad* .

Tabla 5.2: Tipos de vegetación Boscosa.

Bosque templado	
Bosque bajo abierto	Bosque de ayarín
Bosque de cedro	Bosque de encino
Bosque de encino-pino	Bosque de oyamel
Bosque de pino	Bosque de pino-encino
Bosque de tascate	Matorral de coníferas
Bosque nublado	
Bosque mesófilo de montaña	

Cuerpos de agua

El agua está estrechamente relacionada con los tipos de vegetación ya que estos retienen el líquido en el suelo recargando los mantos acuíferos subterráneos a la vez que previenen erosión e inundaciones en centros de población (FEA *et al.*, 2006).

El estudio de los cuerpos de agua es prioritario ya que actualmente la necesidad de este líquido crece día con día con la expansión de los centros urbanos y el crecimiento de la población que necesita el agua para subsistir y realizar sus actividades. Sin embargo, estos estudios deben considerar no solo los cuerpos de agua superficiales, sino también el equilibrio hidrológico ya que de no poder renovarse los mantos acuíferos de agua fresca, se presentarían problemas como *desertificación, desequilibrio ecológico, contaminación y riesgos a la salud pública* (Moreno Vázquez *et al.*, 2010).

Vegetación acuática

De los tipos de vegetación acuática resalta el manglar, que al igual que los bosques y selvas, brinda servicios ambientales protegiendo a los suelos costeros de la erosión causada por las olas o tormentas tropicales. Además, sustentan la pesquería, ya que sirven como lugar de alimento y refugio de especies marinas hasta llegar a la edad adulta. También el manglar filtra el agua de los ríos que desembocan al mar, guardando en su suelo los contaminantes presentes en los sedimentos que fluyen por los ríos (Ezcurra *et al.*, 2010). En la tabla 5.3 se enlistan los tipos de vegetación acuática.

Tabla 5.3: Tipos de vegetación acuática.

Vegetación acuática	
Bosque de galería	Manglar
Popal	Selva de galería
Tular	Vegetación halófila hidrófila
Vegetación de galería	

Matorral

Los matorrales de México se agrupan en la clase de matorral xerófilo, cuya vegetación tiene gran importancia por el número de endemismo de especies vegetales adaptadas a los climas desérticos. Los servicios ambientales de los matorrales son: *alimentos derivados de la ganadería, leña, producción de alimentos, combustibles, textiles, medicina y plantas ornamentales, regulación de plagas, de erosión, del clima y criadero de especies endémicas* (Balvanera *et al.*, 2009).

De las especies de matorrales, el mezquite es el tipo de vegetación con mayor uso en México, especialmente en el norte donde su legumbre se comercializa en zonas de San Luis Potosí y Sinaloa como fruta fresca, pinole y piloncillo. Además, su madera se utiliza en la fabricación de muebles, leña, carbón y los distintos tipos de goma natural que posee, se emplean en el tratamiento tradicional de enfermedades como la disentería y la diarrea (Meraz Vázquez *et al.*, 1998).

De acuerdo con Flores Tena (1993), la explotación del mezquite ha hecho que haya disminuido considerablemente. Su importancia radica en que modifica el ambiente extremo, característico de las zonas áridas, recuperando los nutrientes permitiendo que otras especies puedan desarrollarse. Esto es importante, ya que el 64% del territorio mexicano se encuentra en proceso avanzado de degradación y el 49.2% se consideran tierras secas de las cuales el 0.2% son zonas hiperáridas, 28.3% zonas áridas y 23.7% zonas semiáridas (CONABIO, 2017; SAGARPA, 2014).

Tabla 5.4: Clases de matorrales considerados en esta agrupación.

Matorral	
Chaparral	Huizachal
Matorral crasicaule	Matorral desértico micrófilo
Matorral desértico rosetófilo	Matorral espinoso tamaulipeco
Matorral rosetófilo costero	Matorral sarcocaule
Matorral sarco-crasicaule	Matorral sarco-crasicaule de neblina
Matorral submontano	Matorral subtropical
Mezquite	
Bosque de mezquite	Mezquital
Mezquital desértico	Mezquital tropical

Otros tipos

En esta agrupación se encuentran los tipos de vegetación que *por su origen y características ecológicas, espaciales y fisonómicas son diferentes a los tipos de vegetación anteriores* (INEGI, 2009).

Tabla 5.5: Otros tipos de vegetación.

Otros tipos	
Palmar	Palmar inducido
Palmar natural	Sabana
Vegetación sabanoide	Vegetación de desiertos arenosos
Vegetación de dunas costeras	Vegetación gipsófila
Vegetación halófila	Vegetación halófila xerófila
Vegetación de petén	

Pastizal

Los pastizales naturales ocupan el 6.38 % del territorio mexicano, mientras que los inducidos ocupan otro 3.23 % (Challenger y Soberón, 2008). Su importancia radica en la conservación de los suelos, previniendo su erosión ayudando a la recarga de los mantos acuíferos. Además, son una fuente económica de forraje de la que se alimenta al ganado (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología de Coahuila, 1985).

Tabla 5.6: Tipos de vegetación agrupados en pastizal.

Pastizal	
Pastizal-huizachal	Pastizal gipsófilo
Pastizal halófilo	Pastizal natural
Pradera de alta montaña	

Selva

Las selvas son vegetación arbórea que se dividen en dos subtipos: selva húmeda y selva seca. La selva húmeda está formada por especies que alcanzan hasta 30 *m* de altura, se desarrollan en zonas con lluvia abundante y temperaturas cálidas durante todo el año. Por otro lado, las especies de la selva seca están adaptadas a climas más secos y fríos, por lo que su vegetación es más baja y es caducifolia.

Ambos tipos de selva tienen los beneficios ambientales de conservación de suelos, hábitat de biodiversidad, regulación del clima y son receptores de carbono. Debido a los recursos que pueden ser obtenidos de ellas y a la expansión de los campos de cultivo, las selvas son explotadas sobremanera quedando, para el 2002 (Challenger *et al.*, 2009), sólo el 17.5 % de vegetación primaria de las selvas húmedas y el 26 % de la vegetación de selva seca.

Tabla 5.7: Tipos de selva que son consideradas en las series de INEGI.

Selva húmeda	
Selva alta perennifolia	Selva alta subperennifolia
Selva baja perennifolia	Selva baja subperennifolia
Selva mediana perennifolia	Selva mediana subperennifolia
Selva seca	
Selva baja caducifolia	Selva baja espinosa
Selva baja espinosa caducifolia	Selva baja espinosa subperennifolia
Selva baja subcaducifolia	Selva mediana caducifolia
Selva mediana subcaducifolia	

Sin vegetación

En esta agrupación se reúnen las áreas que aparentemente carecen de vegetación alguna. Estas zonas pueden albergar algún tipo de vegetación, pero pueden estar tan dispersas que no es cartografiable. Usualmente las zonas clasificadas como sin vegetación son eriales, depósitos de litoral, jales mineros, dunas y bancos de materiales INEGI (2003).

Tabla 5.8: Agrupación de las áreas sin vegetación.

Áreas sin vegetación	
Desprovisto de vegetación	Sin vegetación aparente

Zona Urbana

En esta clase se agrupan los asentamientos humanos y las zonas urbanas que, de acuerdo con INEGI, en su página web *Cuentame de México* <http://cuentame.inegi.org.mx/>, define a los asentamientos humanos como el *lugar físico donde se establece un grupo de personas para formar una comunidad* diferenciándose las zonas urbanas como aquellos asentamientos con población mayor a las 2,500 personas y que cuentan con más infraestructura de servicios como: drenaje, tuberías de agua o tendidos eléctricos. En México, aproximadamente 75 % de la población es urbana y registra una tasa de crecimiento de 1.5 %, esto representa pérdida de vegetación o campos de cultivo disminuyendo la cantidad y calidad de los servicios ambientales que dicha vegetación puede proveer (Rivera y Monroy-Ortiz, 2009).

Capítulo 6

Resultados

Los archivos creados como apoyo para realizar la reclasificación INEGI-USGS (fig. 6.1 a 6.5) pueden ser consultados en el enlace: <http://bit.ly/2tDy7Cb>. La tabla de relación de las clases INEGI-USGS puede ser consultado en el Anexo III.

La precisión promedio de la reclasificación de las series es 34.04 %, en la tabla 6.1 es visible que la mayor precisión se obtiene para la Serie I y disminuye para las series posteriores.

Tabla 6.1: Porcentaje de precisión para cada una de las series respecto a la GLCC.

Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Promedio
35.23	33.77	34.04	33.69	33.47	34.04

Ráster INEGI-GLCC

Tabla 6.2: Simbología correspondiente a los mapas de las figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5.

Clave	Clase USGS	Clave	Clase USGS
1	Urban and built-up land (Suelo urbano y urbanizado)	13	Evergreen broadleaf (Perenne de hoja ancha)
2	Dryland cropland and pasture (Cultivos y pasturas de tierra seca)	14	Evergreen needleleaf (Perenne hoja de aguja)
3	Irrigated cropland and pasture (Cultivos y pasturas de riego)	15	Mixed forest (Bosque mixto)
6	Cropland/woodland mosaic (Mosaico de cultivo con bosque poco denso)	16	Water bodies (Cuerpos de agua)
7	Grassland (Pastizales)	17	Herbaceous wetland (Pantano herbáceo [humedal])
8	Shrubland (Matorrales)	18	Wooded wetland (Pantano [humedal] boscoso)

6. RESULTADOS

Clave	Clase USGS	Clave	Clase USGS
9	Mixed shrubland/grassland (Combinación de matorrales y pastizales)	19	Barren or sparsely vegetated (Áreas sin vegetación aparente)
10	Savanna (Sabana)	20	Herbaceous tundra (Tundra herbácea)
11	Deciduous broadleaf forest (Bosque caducifolio de hoja ancha)	21	Wooded tundra (Tundra boscosa)

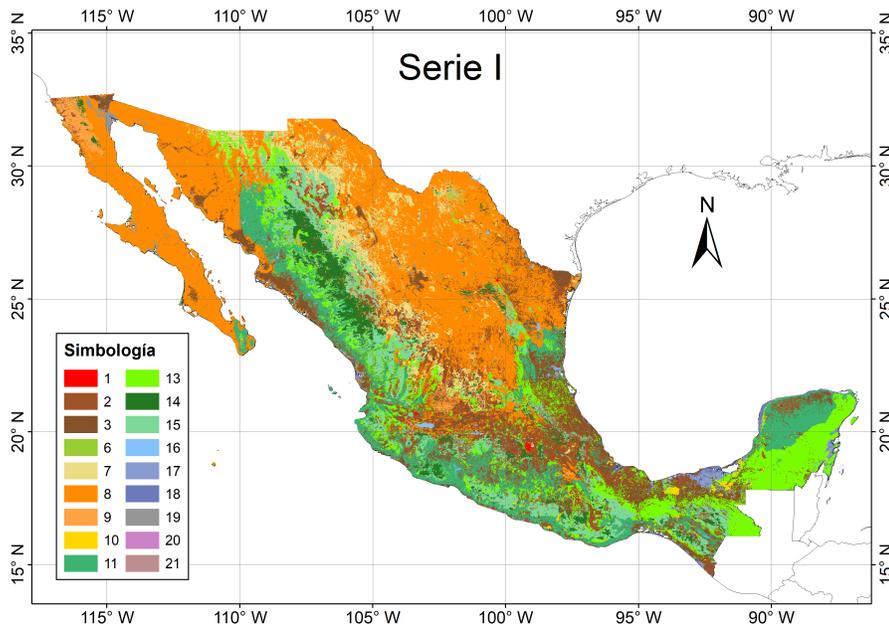


Figura 6.1: Reclasificación de la Serie I a USGS.

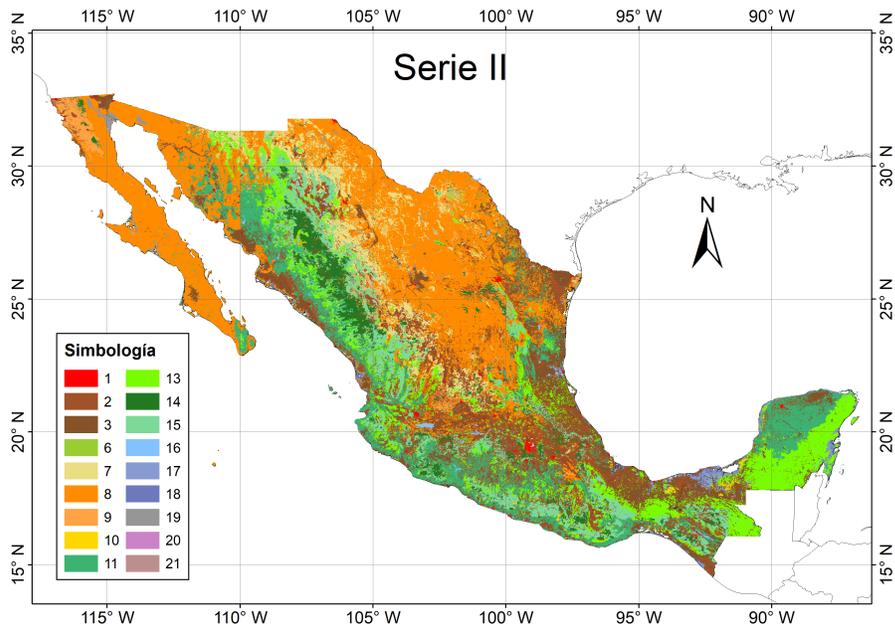


Figura 6.2: Reclasificación de la Serie II a USGS.

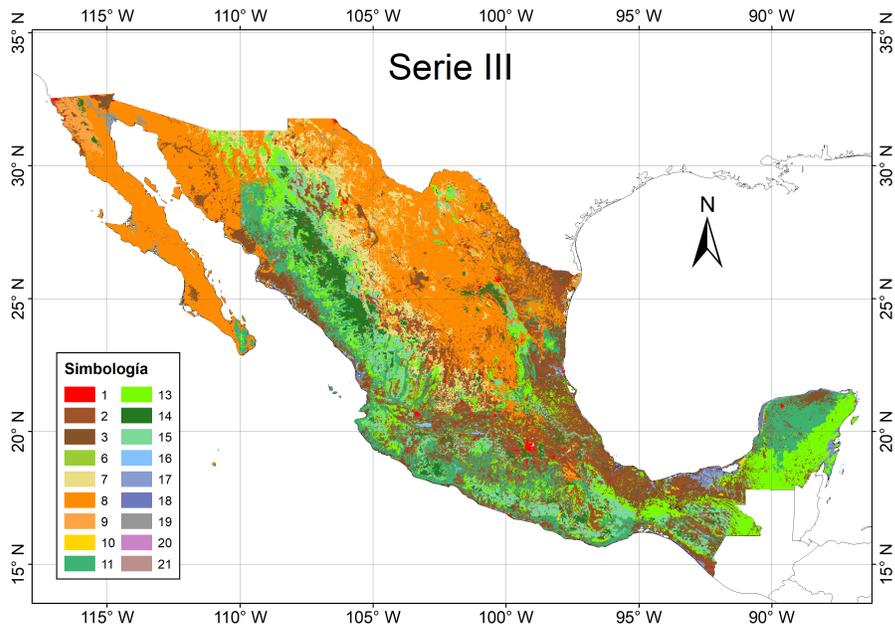


Figura 6.3: Reclasificación de la Serie III a USGS.

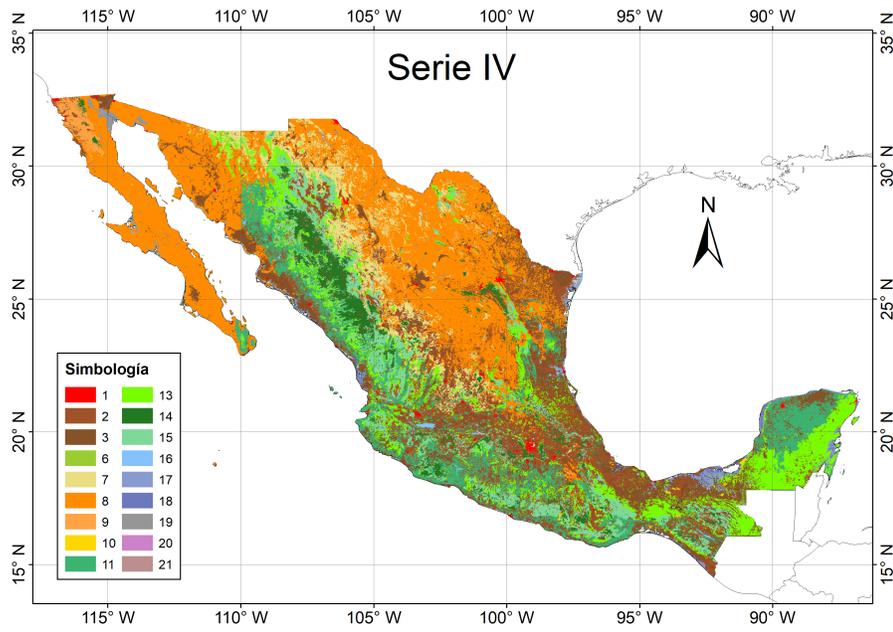


Figura 6.4: Reclasificación de la Serie IV a USGS.

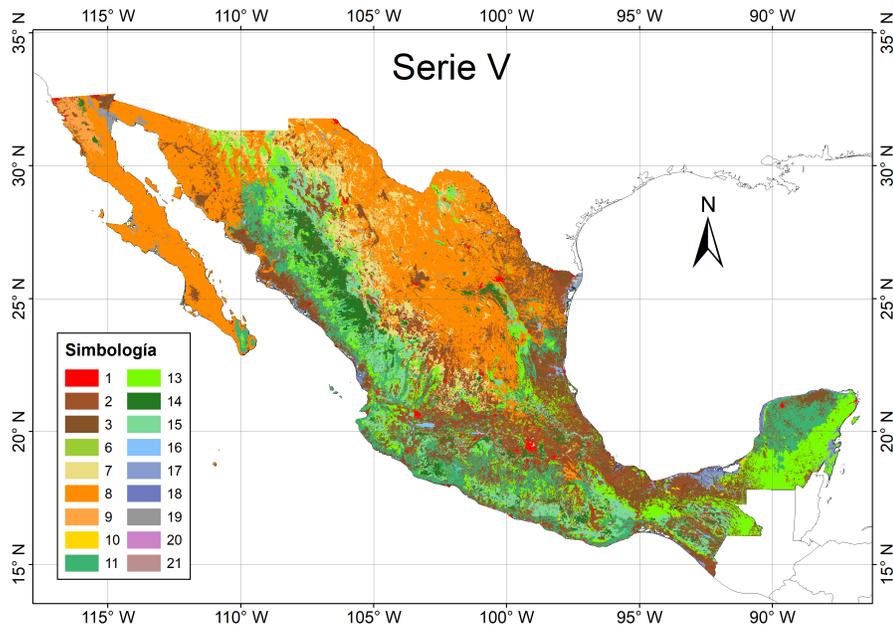


Figura 6.5: Reclasificación de la Serie V a USGS.

Tendencias de la vegetación

Para el conocimiento de los cambios de la vegetación se analizó la matriz de cambio (tabla 6.5) en la cual, siguiendo lo mencionado por Velázquez *et al.* (2002), se estimó la existencia de falsos cambios ocasionados por la conversión entre categorías no factibles o el uso de diferentes criterios para definir la clase de un tipo de vegetación. En este caso, los falsos cambios representan el 1.91 % de la matriz, por lo que se considera no es significativa para las estadísticas.

Periodo 1968 - 2011

La tabla 6.3 muestra que en la Serie I (1968), las principales coberturas son el matorral, el bosque y la selva, que en conjunto ocupan 67.55 % del territorio nacional, las actividades agrícolas ocupaban 20.81 %, el pastizal 6.10 %, otros tipos de vegetación, incluyendo la vegetación acuática, abarcan 4.57 % y, por último, las zonas urbanas y áreas sin vegetación ocupan 0.10 % y 0.43 % respectivamente.

Esta distribución cambia para la Serie V (2011), ya que a pesar de que los matorrales siguen siendo el tipo de vegetación predominante (27.89 %), tuvieron una pérdida de 11.52 % de su área original (ver figura 6.8). Por otro lado, las actividades agrícolas aumentaron 28.06 % y del mismo modo, las zonas urbanas tuvieron un aumento de 822.92 %, ocupando 0.95 % de la superficie nacional.

6. RESULTADOS

Tabla 6.3: Distribución de las clases para cada serie. Serie I (izq.), Serie V (der.).

Clase	Área km ² (1968)	%	Clase	Área km ² (2012)	%
Matorral	614,869	31.51	Matorral	544,056	27.89
Actividades Agrícolas	406,068	20.81	Actividades Agrícolas	519,992	26.65
Bosque	352,279	18.05	Bosque	342,881	17.58
Selva	351,036	17.99	Selva	305,488	15.66
Pastizal	119,131	6.10	Pastizal	117,234	6.01
Otros tipos de vegetación	64,519	3.31	Otros tipos de vegetación	54,100	2.77
Vegetación acuática	24,651	1.26	Vegetación acuática	25,554	1.31
Cuerpos de agua	8,624	0.44	Zona urbana	18,537	0.95
Áreas sin vegetación	8,335	0.43	Cuerpos de agua	13,035	0.67
Zona urbana	2,009	0.10	Áreas sin vegetación	10,073	0.52
Total	1,951,521	100	Total	1,950,952	100

Para facilitar la lectura de la tabla 6.3 se elaboraron gráficos de pastel para las Series I y V, figuras 6.6 y 6.7, respectivamente. Asimismo, la tabla 6.4 indica las pérdidas y ganancias de cada clase y se representa gráficamente en la figura 6.8.

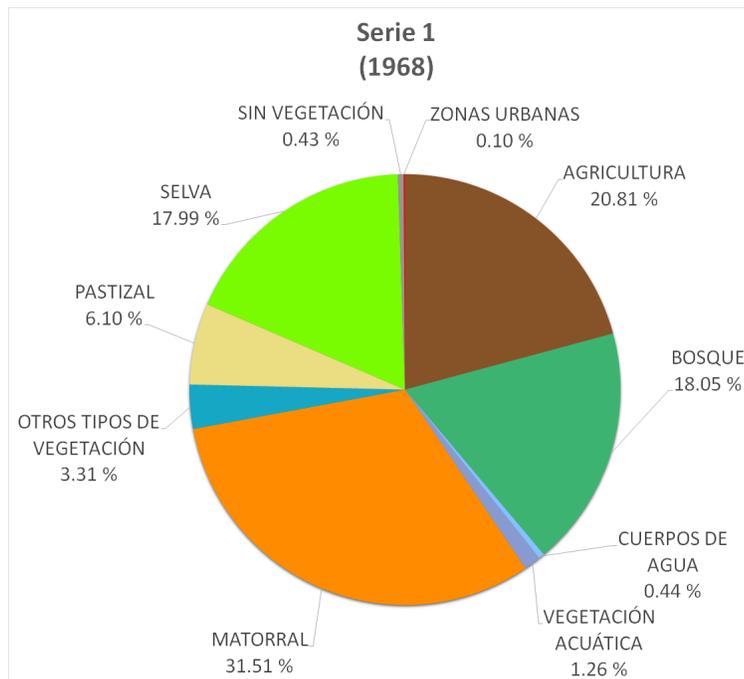


Figura 6.6: Gráfica de pastel que representa el porcentaje de la distribución de las clases de vegetación en relación al territorio nacional para la Serie I.

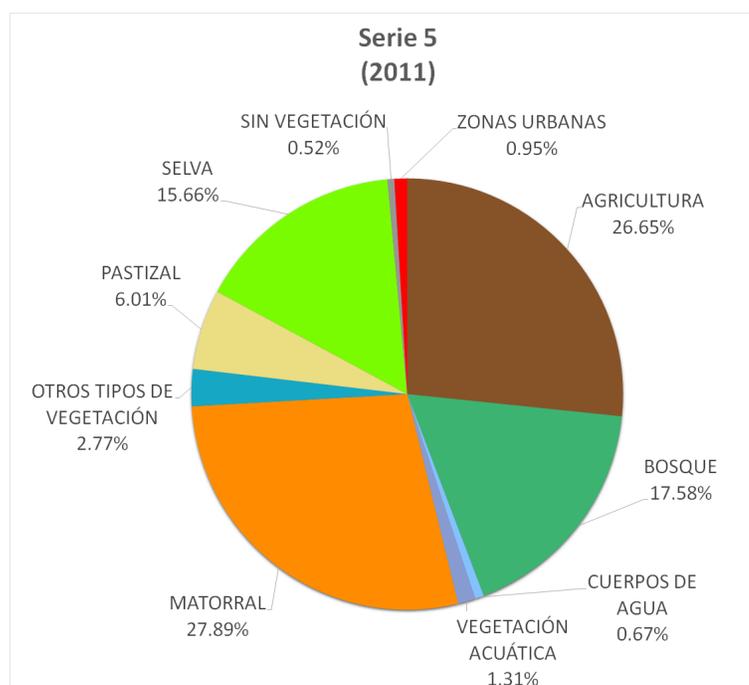


Figura 6.7: Gráfica de pastel que representa el porcentaje de la distribución de las clases de vegetación en relación al territorio nacional para la Serie V.

Tabla 6.4: Pérdidas y ganancias de las clases.

	Serie I	Serie V	Pérdidas	Ganancias
Agrícola	406,068	519,992	-	113,925
Bosque	352,279	342,881	9,398	-
Cuerpos de agua	8624	13,035	-	4,411
Vegetación acuática	24,651	25,554	-	904
Matorral	614,869	544,056	70,813	-
Otros tipos	64,519	54,100	10,419	-
Pastizal	119,131	117,234	1,896	-
Selva	351,036	305,488	45,549	
Sin vegetación	8,335	10,073	-	1,737
Zona urbana	2,009	18,537	-	16,529
Total	1,951,521	1,950,952	138,074	137,506

6. RESULTADOS

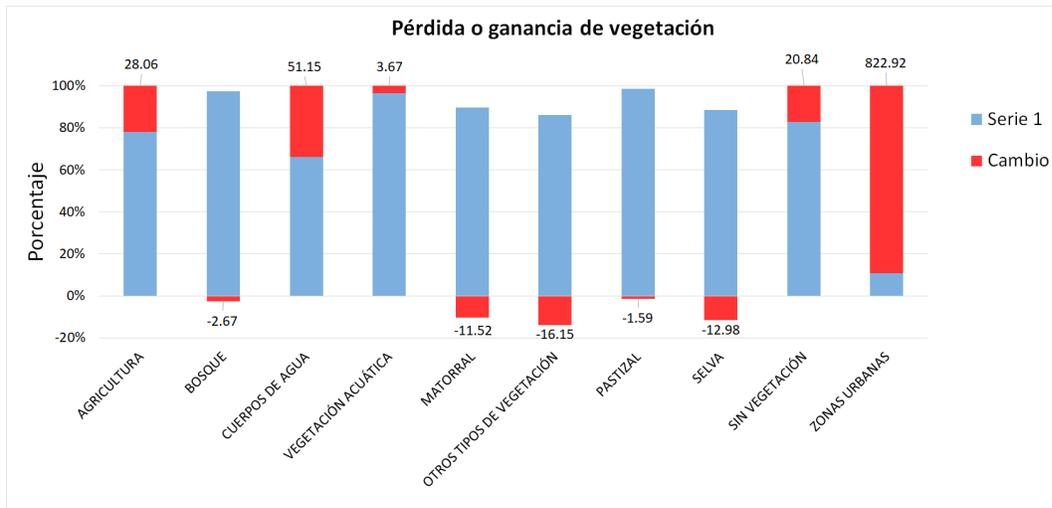


Figura 6.8: Cambios por pérdidas y ganancias de los tipos de vegetación en porcentaje de acuerdo a su extensión en la Serie 1.

Otro análisis realizado se hizo por estado, el cuál arrojó que los cambios se presentan mayormente en Chihuahua (8.62%), Sonora (7%), Tamaulipas (6.52%), Chiapas (5.79%), Jalisco (5.71%) y Coahuila (5.62%) (fig. 6.9). Sin embargo, considerando los cambios relativos a la superficie estatal, Tamaulipas tiene el mayor cambio (29.38%), seguido de Tabasco (29.17%), Chiapas (28.05%), Querétaro (27.77%) y Yucatán (27.34%) (fig. 6.10).

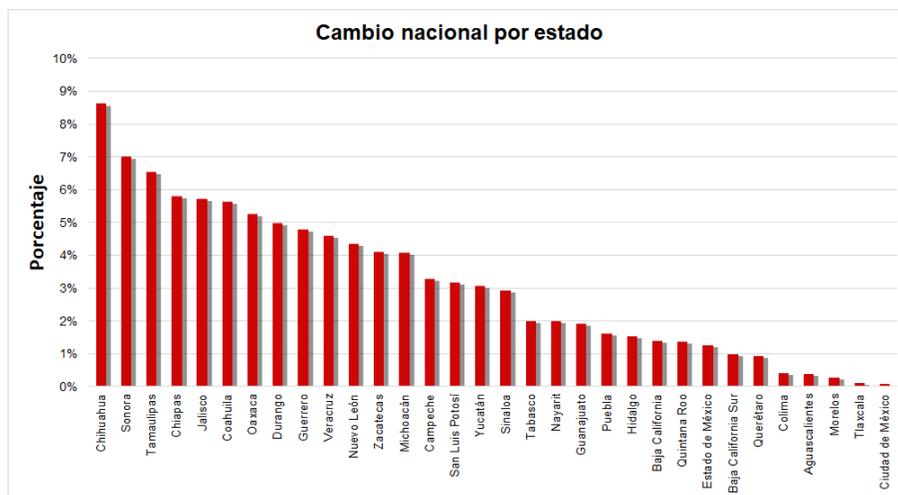


Figura 6.9: Porcentaje de cambio por estado calculado a partir del área nacional.

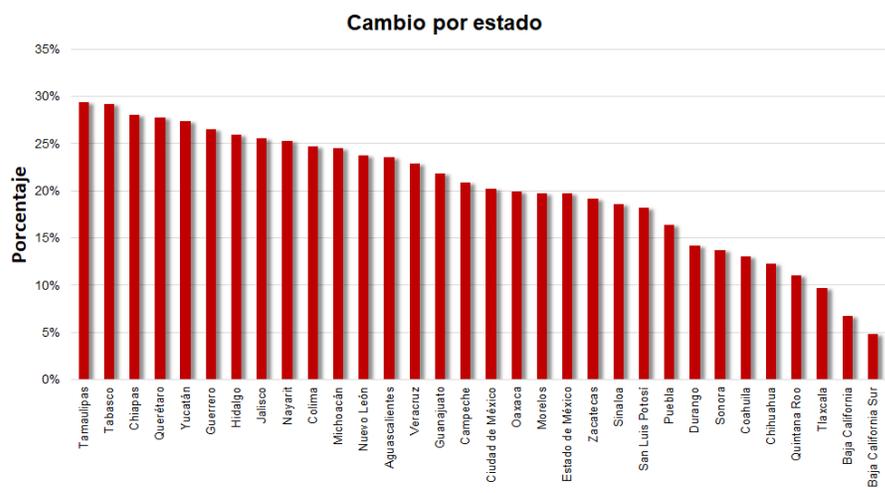


Figura 6.10: Porcentaje de cambio calculado para cada estado según su extensión geográfica.

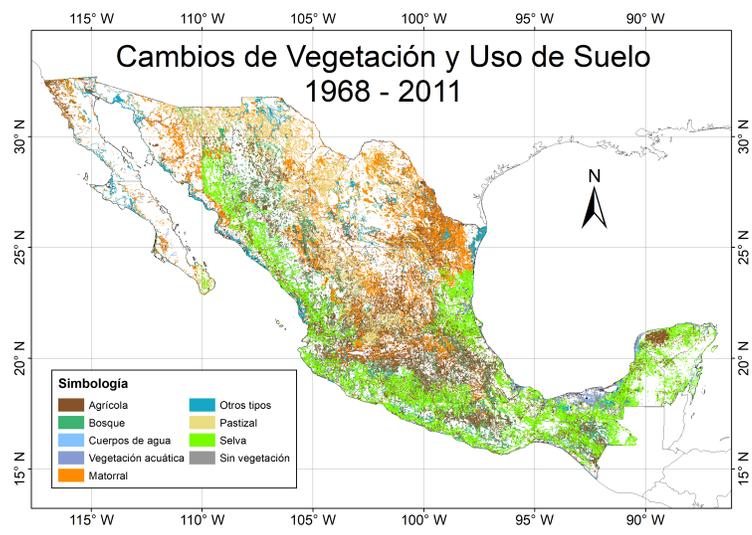


Figura 6.11: Se muestra la distribución de los tipos de vegetación de 1968 (Serie I) que presentaron algún cambio para 2011 (Serie V).

Agrícola

El área dedicada a las actividades agrícolas tuvieron un cambio de otras clases por 178,849 km^2 de los cuales 42.15 % pertenecían a selva, 28.25 % a matorral, 16.63 % a bosque y 6.67 % a pastizal. Los estados con mayor presencia de este incremento son Tamaulipas (8.55 %), Chiapas (8.09 %), Sonora (7.44 %) y Chihuahua (6.65 %)(fig. 6.12).

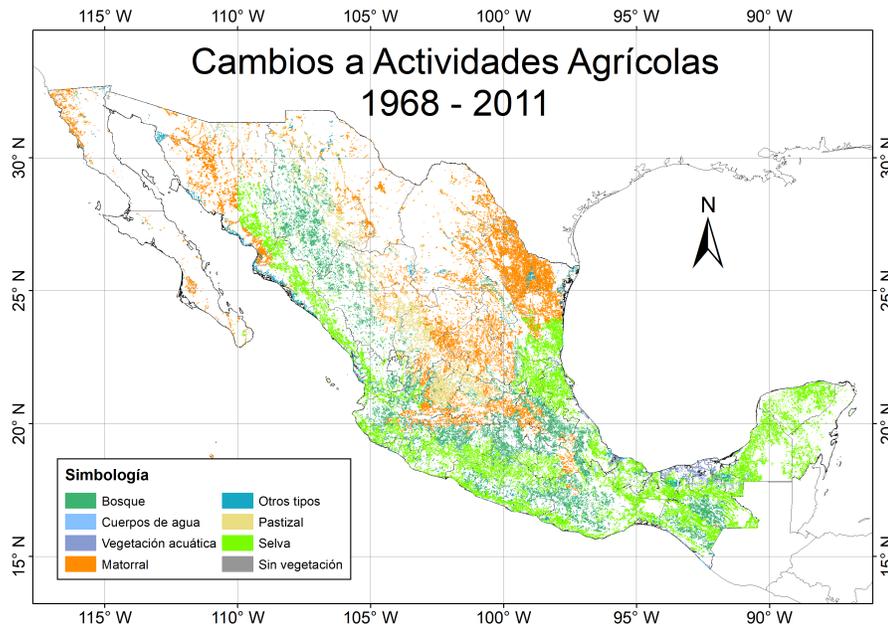


Figura 6.12: Distribución de los cambios de uso de suelo a actividades agrícolas.

Sin embargo, las actividades agrícolas también presentan cambios a otros tipos que se estiman en $64,794 \text{ km}^2$ que indican una aparente recuperación de algunos tipos de vegetación. De estos cambios 33.60 % son selva, 23.19 % son bosque y 12.75 % son matorral, además, 17.19 % son cambios a zonas urbanas. Los estados con mayor recuperación aparente de la vegetación son Yucatán (7.26 %), Oaxaca (6.67 %), Chiapas (6.37 %), Guerrero (6.12 %) y Veracruz (6 %).

Bosque

Los bosques tuvieron cambios a otros tipos de vegetación por $49,179 \text{ km}^2$ de los cuales 60.47 % se convirtieron en actividades agrícolas y 17.20 % en pastizales. Estos cambios se observan principalmente en Chihuahua (13.62 %), Durango (11.52 %), Oaxaca (10.42 %), Chiapas (10 %) y Guerrero (7.64 %)(fig. 6.13).

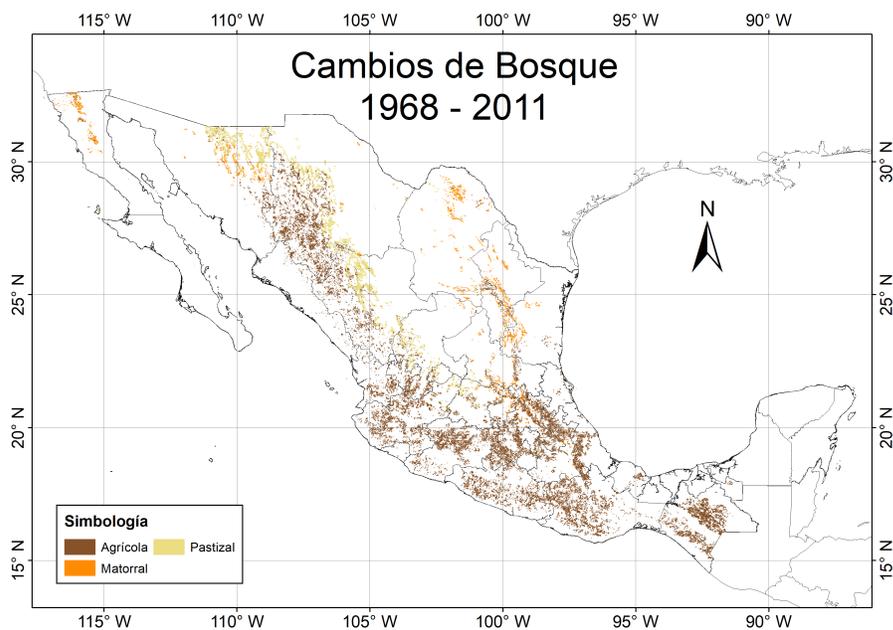


Figura 6.13: Se muestran los cambios que tuvieron los bosques de 1968 a otros tipos de vegetación en 2011.

Por otro lado, los bosques presentan cambios que pueden indicar una recuperación de los mismos, ya que $39,788 \text{ km}^2$ de otras cubiertas presentan cambios a bosque, de estos cambios 37.76 % eran considerados actividades agrícolas y 32.55 % matorral.

Vegetación acuática

La vegetación acuática presentó cambios a otras cubiertas vegetales estimadas por $7,515 \text{ km}^2$, de los cuales 46 % son por el cambio a actividades agrícolas, 15.79 % a selva y 11.60 % a cuerpos de agua. Los estados donde se presentan estos cambios son Tabasco (22.27 %), Campeche (15.88 %), Veracruz (9.58 %), Quintana Roo (8.76 %) y Yucatán (6.03 %) (fig. 6.14).

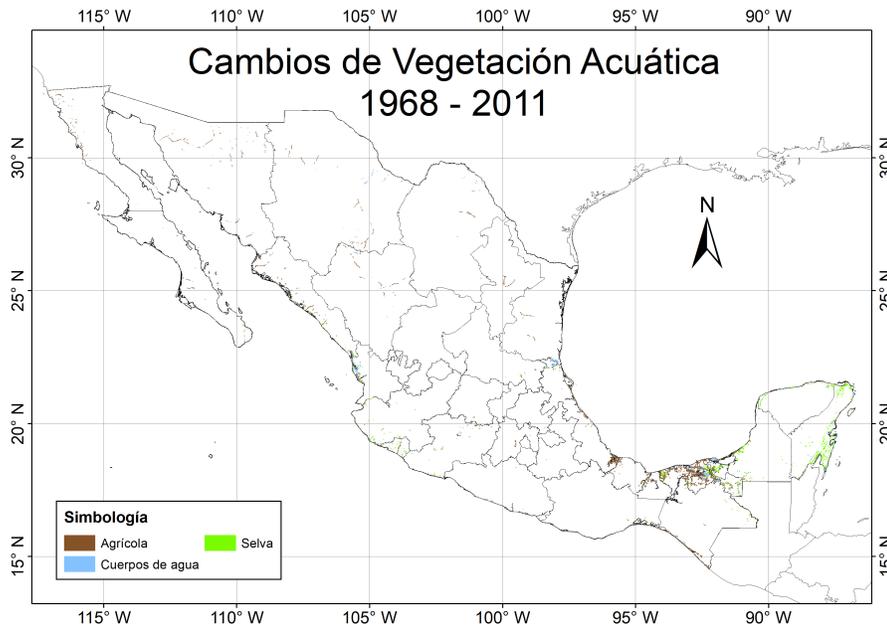


Figura 6.14: Se muestran los cambios que la vegetación acuática de 1968 tuvo a otros tipos de vegetación en 2011.

Por otro lado, 8,118 km^2 de otras cubiertas vegetales cambiaron a vegetación acuática, de estos cambios 33.21 % son cambios de la clase otros tipos de vegetación y 5.19 % de cuerpos de agua.

Matorral

Los matorrales presentan cambios a otras clases por 93,153 km^2 , de los cuales 54.24 % se cambiaron a actividades agrícolas, 14.74 % a selva y 9.13 % a pastizal. Estos cambios se presentan mayormente en Coahuila (13.36 %), Nuevo León (13.09 %), Tamaulipas (11.91 %), Sonora (11.88 %) y Chihuahua (10.09 %) (ver fig. 6.15).

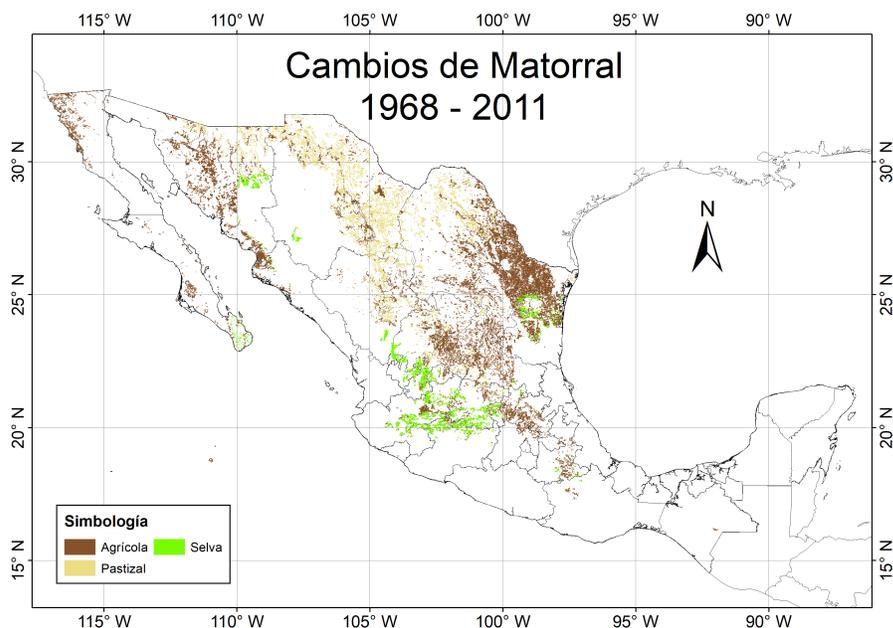


Figura 6.15: Se muestra la distribución de los cambios que presentaron los matorrales de 1968 en 2011.

Por otro lado, clases como actividades agrícolas (36.56%), pastizal (31.89%) y otros tipos de vegetación (10.14%) presentan cambios a matorrales que, en conjunto suman 22,589 km^2 . Presentándose mayormente en Coahuila (19.16%), Chihuahua (18.83%), Sonora (14.30%) y San Luis Potosí (7.99%).

Otros tipos

Para 2011, esta clase tuvo cambios a otras clases por 17,810 km^2 , de las cuales 37.99% fueron a actividades agrícolas, 19.05% a vegetación acuática, 12.86% a matorral, 8.31% a pastizal y 7.80% a áreas sin vegetación. Algunos de los estados donde estos cambios se presentan son: Tamaulipas que abarca el 10.91%, Coahuila con el 10.38%, Sonora con 10.10%, Tabasco el 8.99% y Chihuahua el 8.81% (fig. 6.16).

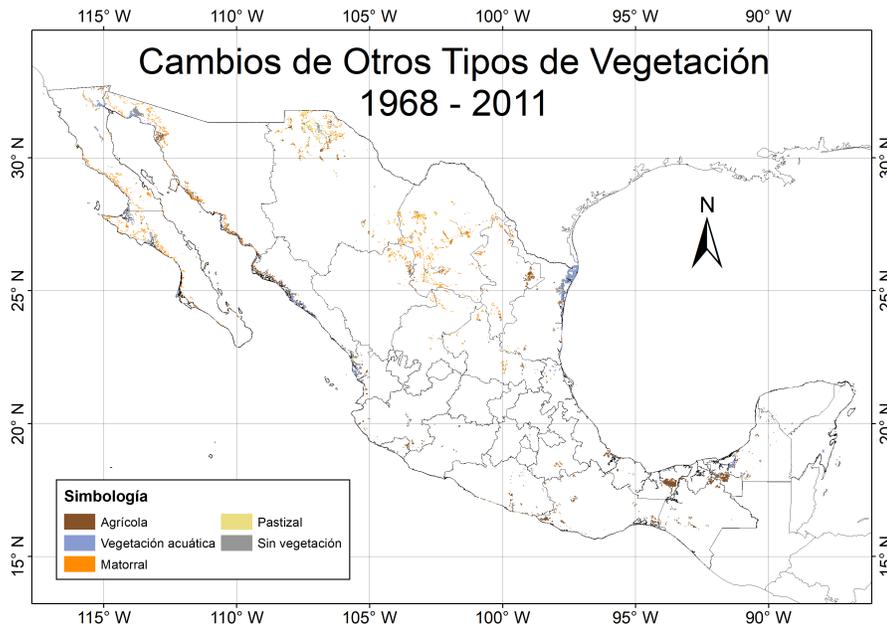


Figura 6.16: Se muestran los cambios que presentó la clase otros tipos de vegetación a las demás clases.

Sin embargo, esta clase también tiene cambios por parte de las demás clases, calculado en $7,650 \text{ km}^2$. De las clases que presentan cambios a la clase de otros tipos de vegetación, sólo se considera a la vegetación acuática que forma el 9.11 % y las áreas sin vegetación que representan 5.21 %, ya que los demás cambios son considerados falsos cambios (ver tabla 6.5).

Pastizal

El pastizal tuvo cambios a otras clases por $37,236 \text{ km}^2$, de los cuales 32.06 % corresponden a actividades agrícolas y 19.34 % a matorral. Los estados con mayor presencia de estos cambios son: Chihuahua (35.54 %), Zacatecas (15.71 %), Coahuila (11.13 %), Durango (10.58 %) y Jalisco (10.32 %) (fig. 6.17).

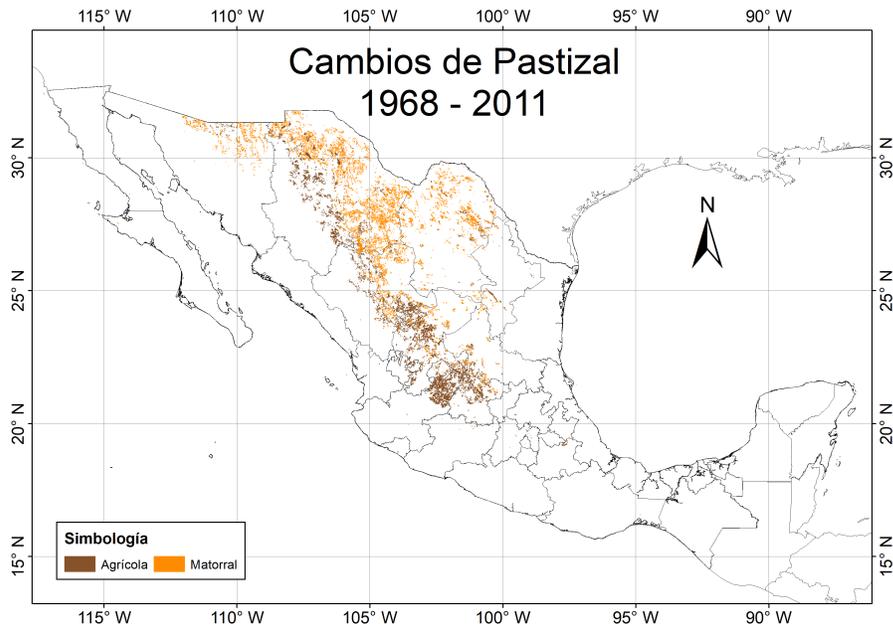


Figura 6.17: Se muestran los cambios de Pastizal a los demás tipos de vegetación o uso de suelo para el periodo 1968-2011.

El cambio de las diferentes clases a pastizal se estimó en $22,450 \text{ km}^2$, de los cuales 37.87 % eran matorral, 37.68 % bosque y 16 % actividades agrícolas. Estos cambios se presentan mayormente en Chihuahua (33.92 %), Durango (21.45 %), Coahuila (14.35 %) y Sonora (10.24 %).

Selva

La Selva es la segunda clase con mayor pérdida, estimada en $45,549 \text{ km}^2$. Debido a la dinámica de cambio a otras clases ($92,000 \text{ km}^2$) y a la dinámica de cambio de otras clases a selva ($46,680 \text{ km}^2$). De los cambios a otras clases, 81.90 % son actividades agrícolas y 2.06 % a matorral, estos cambios se presentan mayormente en Chiapas (11.73 %), Veracruz (10.53 %), Guerrero (9.62 %) y Oaxaca (8.77 %)(fig. 6.18).

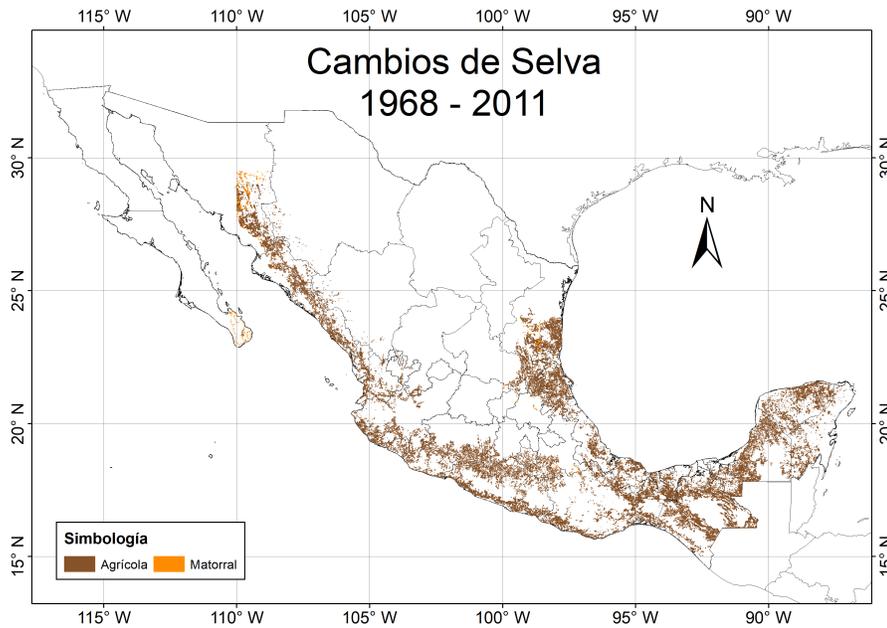


Figura 6.18: Se muestran los tipos de vegetación a los que la selva de 1968 cambió en 2011.

Las clases que presentan cambios a selva son 46.64 % actividades agrícolas y 29.42 % matorral. Estos cambios se presentan en Jalisco (13.09 %), Michoacán (9.42 %), Yucatán (8.75 %) y Guerrero (6.82 %).

Sin vegetación

Las áreas sin vegetación tuvieron cambios a otras clases por 1,800 km^2 , de los cuales 22 % son causadas por otros tipos de vegetación, 21.24 % por actividades agrícolas, 18 % por cuerpos de agua y 15.70 % por vegetación acuática. Los estados donde se muestra gran parte de estos cambios son: Sinaloa (18.24 %), Chihuahua (11.95 %), Sonora (11.52 %), Tamaulipas (11.01 %) y Baja California Sur (9.48 %) (ver fig. 6.19).

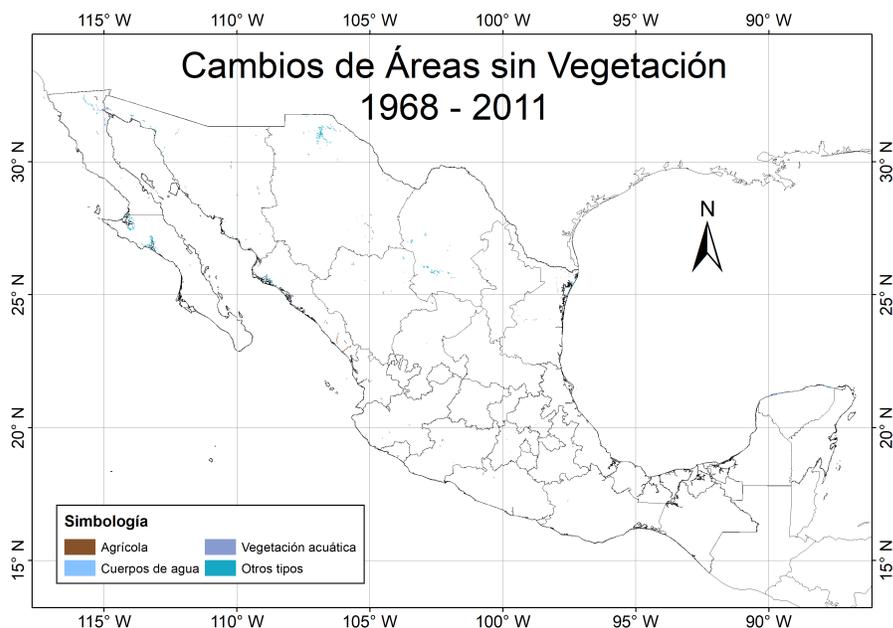


Figura 6.19: Se muestran los cambios de las áreas sin vegetación a algún tipo de vegetación o uso de suelo.

Las áreas sin vegetación también presentan cambios a partir de otras clases. Estos cambios se estimaron en $3,410 \text{ km}^2$ de los cuales, 40.76 % son de otros tipos de vegetación, 18.27 % de matorral y 13.63 % de vegetación acuática. Estos cambios se presentan mayormente en Sonora (23.80 %), Coahuila (14.08 %), Chihuahua (11.45 %), Baja California (9.29 %) y Baja California Sur (5.84 %).

Zona urbana

Las Zonas urbanas aumentaron $16,529 \text{ km}^2$, 8.23 veces el área que abarcaban en 1968. Estos aumentos se dieron por los cambios de actividades agrícolas (67.51 %) y otros tipos de vegetación (2.16 %). Los estados con mayor desarrollo urbano son: Chihuahua (6.72 %), Jalisco (6.29 %), Nuevo León (5.46 %) y el Estado de México (5.38 %). Sin embargo, de acuerdo a la superficie estatal, el desarrollo de las zonas urbanas tuvo fuerte impacto en la Ciudad de México, con el 12.83 % de su superficie, Morelos con el 6.02 % y en el Estado de México con el 3.96 % (fig. 6.20).

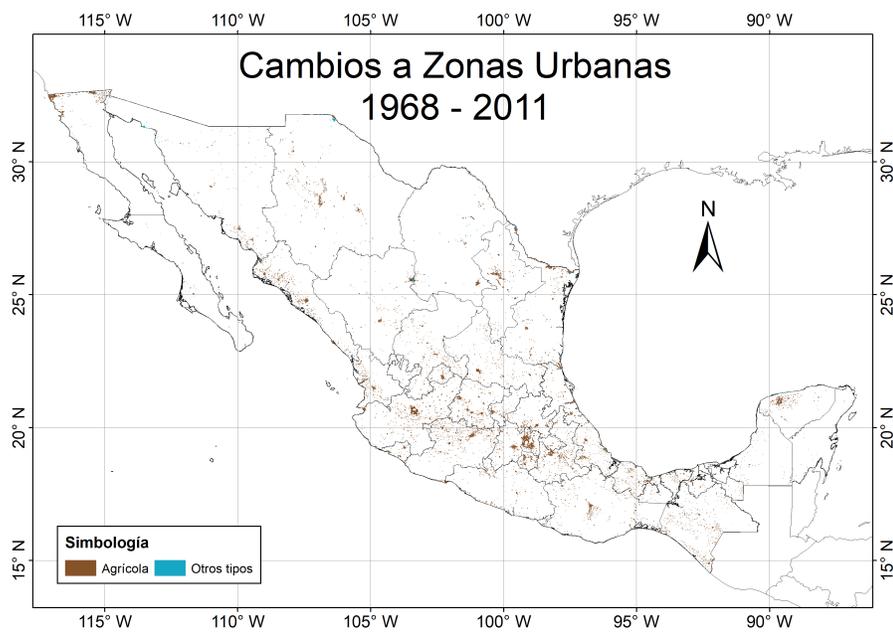


Figura 6.20: Distribución de las ganancias a Zonas Urbanas.

Tabla 6.5: Matriz de cambio de la Serie I y Serie V. Los elementos son en km^2 y los sombreados son los falsos cambios.

Serie I

	Agrícola	Bosque	Cuerpos de agua	Vegetación acuática	Matorral	Otros tipos	Pastizal	Selva	Sin vegetación	Zona urbana	TOTAL
Agrícola	340,764	29,738	664	3,456	50,526	6,766	11,937	75,378	384	18	519,631.101
Bosque	15,024	303,088	3	23	12,951	308	2,551	8,922	7	1	342,876
Cuerpos de agua	1,958	65	6,433	872	717	524	549	1,167	327	2	12,614
Vegetación acuática	1,520	25	451	16,595	669	3,393	129	1,649	284	0	24,714
Matorral	8,259	2,163	73	547	520,973	2,291	7,203	1,899	148	6	543,562
Otros tipos	1,242	177	23	697	3,006	46,216	1,035	1,051	399	1	53,866
Pastizal	3,592	8,458	84	173	8,502	1,480	94,768	52	105	3	117,218
Selva	21,770	8,201	217,398	1,186	13,732	1,303	235	258,712	34	2	305,393
Sin vegetación	288	90	55	465	623	1,390	299	199	6,287	0	9,697.331
Zona urbana	11,140	262	23	95	2,428	356	359	1,720	121	1,969	18,472
TOTAL	405,558	352,267	8,026	24,110	614,126	64,0261	119,083	350,749	8,095	2,002	1,948,042

Serie V

Capítulo 7

Conclusiones

Se pudieron agrupar los distintos tipos de vegetación y uso de suelo de las Series de INEGI en un nuevo conjunto de datos para México que pueden ser implementados en el modelo de pronóstico WRF. Los resultados serán evaluados por los usuarios que podrán analizar las condiciones meteorológicas en distintos periodos (pasados o futuros) del territorio nacional, de acuerdo a la fecha de referencia de las Series de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI. Se espera que esta propuesta siga en desarrollo para mejorar la adecuación de los distintos tipos de vegetación de México.

De acuerdo a las referencias temporales, la Serie II debe ser la que coincida más con los datos USGS al ser elaborada en el año 1993. Sin embargo no ocurre así, esto puede deberse a: 1) la escala de la serie; ya que tiene mayor resolución espacial y por ende, delimita mejor los polígonos de vegetación. 2) la validación de campo realizada por INEGI; que sirvió de apoyo para la clasificación de la vegetación en el proceso de restitución y 3) la aproximación que tiene la propuesta de reclasificación presentada a los tipos de vegetación reales, ya que algunos tipos de vegetación de las Series no empata totalmente en las categorías del USGS. Sin embargo, cumple el objetivo de dar al modelo WRF una aproximación del uso de suelo de México.

Del análisis sobre cambios de vegetación, se encontró que la pérdida de vegetación es ocasionada principalmente por el desarrollo humano, debido a que los tipos de vegetación con mayores pérdidas son pastizales, matorrales, selvas y bosques. Los pastizales y matorrales, al ser vegetaciones bajas y poco densas, en su mayoría, facilita su transformación a zonas urbanas y actividades agrícolas. Por otro lado, las selvas y bosques son explotados para la expansión de actividades agrícolas.

Para la mitigación de la pérdida de los distintos tipos de vegetación es necesario plantear estrategias que permitan un balance de explotación-conservación de los recursos naturales, prestando atención a los estados con mayores pérdidas de vegetación.

Trabajo a futuro

- Validación de los resultados generados por el modelo meteorológico para estimar el impacto en el uso del conjunto de datos obtenidos en éste trabajo.
- Invitar a profesionales dedicados al estudio del uso del suelo para refinar la propuesta de clasificación aquí desarrollada.

Anexo I

Tipos de vegetación en las Series de INEGI

	Serie I	Serie II	Serie III	Serie IV	Serie V
Agrícola-Pecuario-Forestal	-	-	x	x	-
Área sin vegetación	-	x	-	-	-
Acuícola	-	-	x	x	x
Agricultura de humedad	x	x	-	-	x
Agricultura de riego	x	x	-	-	x
Agricultura de temporal	x	x	-	-	x
Riego eventual	x	x	-	-	-
Riego suspendido	x	x	-	-	-
Bosque bajo abierto	x	x	-	-	-
Asentamientos humanos	-	-	x	x	x
Bosque cultivado	x	x	-	-	x
Bosque de ayarín	x	x	x	x	x
Bosque de cedro	x	x	x	x	x
Bosque de encino	x	x	x	x	x
Bosque de encino-pino	x	x	x	x	x
Bosque de galería	x	x	x	x	x
Bosque de mezquite	-	-	-	x	x
Bosque de oyamel	x	x	x	x	x
Bosque de pino	x	x	x	x	x
Bosque de pino-encino	x	x	x	x	x
Bosque de táscate	x	x	x	x	x
Bosque inducido	-	-	x	x	x
Bosque mesófilo de montaña	x	x	x	x	x

	Serie I	Serie II	Serie III	Serie IV	Serie V
Chaparral	x	x	x	x	x
Cuerpo de agua	x	x	x	x	x
Desprovisto de vegetación	x	x	x	x	x
Manglar	x	x	x	x	x
Matorral crasicaule	x	x	x	x	x
Matorral de coníferas	x	x	x	x	x
Matorral desértico micrófilo	x	x	x	x	x
Matorral desértico rosetófilo	x	x	x	x	x
Matorral espinoso tamaulipeco	x	x	x	x	x
Matorral rosetófilo costero	x	x	x	x	x
Matorral sarcocaulé	x	x	x	x	x
Matorral sarco-crasicaule	x	x	x	x	x
Matorral sarco-crasicaule de neblina	x	x	x	x	x
Matorral submontano	x	x	x	x	x
Matorral subtropical	x	x	x	x	x
Mezquital	x	x	x	-	-
Mezquital desértico	-	-	-	x	x
Pastizal-huizachal	x	x	-	-	-
Pastizal cultivado	x	x	-	-	-
Palmar	x	x	-	-	-
Mezquital tropical	-	-	-	x	x
Palmar inducido	-	-	x	x	x
Palmar natural	-	-	x	x	x
Pastizal cultivado		-	-	-	x
Pastizal gipsófilo	x	x	x	x	x
Pastizal halófilo	x	x	x	x	x
Pastizal inducido	x	x	x	x	x
Pastizal natural	x	x	x	x	x
Popal	x	x	x	x	x
Pradera de alta montaña	x	x	x	x	x
Sabana	x	x	x	x	x

	Serie I	Serie II	Serie III	Serie IV	Serie V
Sabanoide	-	-	x	x	x
Selva alta perennifolia	x	x	x	x	x
Selva alta subperennifolia	x	x	x	x	x
Selva baja caducifolia	x	x	x	x	x
Selva baja espinosa caducifolia	-	-	x	x	x
Selva baja espinosa subperennifolia	x	x	x	x	x
Selva baja perennifolia	x	x	x	x	x
Selva baja subcaducifolia	x	x	x	x	x
Selva baja subperennifolia	x	x	x	-	x
Selva de galería	x	x	x	x	x
Selva mediana caducifolia	x	x	x	x	x
Selva mediana perennifolia	x	x	x	x	x
Selva mediana subcaducifolia	x	x	x	x	x
Selva mediana subperennifolia	x	x	x	x	x
Sin vegetación aparente	-	-	x	x	x
Tular	x	x	x	x	x
Vegetación de desiertos arenosos	x	x	x	x	x
Vegetación de dunas costeras	x	x	x	x	x
Vegetación de galería	x	x	x	x	x
Vegetación de petén	-	-	x	x	x
Vegetación gipsófila	x	x	x	x	x
Vegetación halófila	x	x	x	x	-
Vegetación halófila hidrófila	-	-	-	x	x
Vegetación halófila xerófila	-	-	-	x	x
Zona urbana	x	x	x	x	x

Anexo II

Clases de la clasificación USGS-GLCC

Clase USGS	Clave	Clase USGS	Clave
Urban and built-up land (Suelo urbano y urbanizado)	1	Evergreen broadleaf (Perenne de hoja ancha)	13
Dryland cropland and pasture (Cultivos y pasturas de tierra seca)	2	Evergreen needleleaf (Perenne hoja de aguja)	14
Irrigated cropland and pasture (Cultivos y pasturas de riego)	3	Mixed forest (Bosque mixto)	15
Mixed dryland/irrigated cropland and pasture (Cultivos y pasturas de tierra seca y de riego)	4	Water bodies (Cuerpos de agua)	16
Cropland/grassland (Mosaico de cultivo y pastizales)	5	Herbaceous wetland (Pantano herbáceo [humedal])	17
Cropland/woodland mosaic (Mosaico de cultivo con bosque poco denso)	6	Wooded wetland (Pantano [humedal] boscoso)	18
Grassland (Pastizales)	7	Barren or sparsely vegetated (Áreas sin vegetación aparente)	19
Shrubland (Matorrales)	8	Herbaceous tundra (Tundra herbácea)	20
Mixed shrubland/grassland (Combinación de matorrales y pastizales)	9	Wooded tundra (Tundra boscosa)	21
Savanna (Sabana)	10	Mixed tundra (Tundra mixta)	22
Deciduous broadleaf forest (Bosque caducifolio de hoja ancha)	11	Bare ground tundra (Tundra con suelo desnudo)	23
Deciduous needleleaf forest (Bosque caducifolio de hoja de aguja)	12	Snow or ice (Nieve o hielo)	24

Anexo III

Agrupación de las clases INEGI a GLCC

	CLASE USGS	CLASE INEGI
1	Urban and built-up (Suelo urbano y urbanizado)	Zona urbana Asentamientos humanos
2	Dryland cropland and pasture (Cultivos y pasturas de tierra seca)	Agricultura de humedad Agricultura de temporal Pastizal inducido
3	Irrigated cropland and pasture (Cultivos y pasturas de riego)	Agricultura de riego Agricultura de riego eventual Pastizal cultivado
4	Mixed dryland/irrigated cropland and pasture (Cultivos y pasturas de tierra seca y de riego)	No hay comparable
5	Cropland/grassland (Mosaico de cultivo y pastizales)	No hay comparable
6	Cropland/woodland mosaic (Mosaico de cultivo con bosque poco denso)	Bosque cultivado
7	Grassland (Pastizales)	Pastizal natural Pastizal gipsófilo Pastizal halófilo
8	Shrubland (Matorrales)	Bosque de mezquite Matorral crasicaule Matorral desértico micrófilo Matorral desértico rosetófilo Matorral espinoso tamaulipeco Matorral rosetófilo costero Matorral sarcocaulo Matorral sarcocrasicaule Matorral sarcocrasicaule de neblina Matorral submontano

	Clase USGS	Clase INEGI
8 (cont.)	Shrubland (Matorrales) (cont.)	Matorral subtropical Mezquital Mezquital desértico Mezquital tropical Mezquital xerófilo Vegetación de desiertos arenosos Vegetación gipsófila Vegetación halófila Vegetación halófila xerófila
9	Mixed shrubland/grassland (Combinación de matorrales y pastizales)	Chaparral Huizachal Pastizal-huizachal
10	Savanna (Sabana)	Sabana Vegetación sabanoide
11	Deciduous broadleaf forest (Bosque caducifolio de hoja ancha)	Selva baja caducifolia Selva baja espinosa Selva baja espinosa caducifolia Selva baja espinosa subcaducifolia Selva baja subcaducifolia Selva mediana caducifolia Selva mediana subcaducifolia
12	Deciduous needleleaf forest (Bosque caducifolio de hoja de aguja)	No hay comparable
13	Evergreen broadleaf (Perenne de hoja ancha)	Bosque de encino Palmar Palmar inducido Palmar natural Selva alta perennifolia Selva alta subperennifolia Selva baja espinosa subperennifolia Selva baja perennifolia Selva baja subperennifolia Selva mediana perennifolia Selva mediana subperennifolia
14	Evergreen needleleaf (Perenne hoja de aguja)	Bosque de ayarín Bosque de cedro Bosque de oyamel Bosque de pino

	Clase USGS	Clase INEGI
14 (cont.)	Evergreen needleleaf (Perenne hoja de aguja) (cont.)	Bosque de táscate Matorral de coníferas
15	Mixed forest (Bosque mixto)	Bosque bajo abierto Bosque de encino-pino Bosque de pino-encino Bosque inducido Bosque mesófilo de montaña Vegetación de dunas costeras
16	Water Bodies (Cuerpos de agua)	Cuerpos de agua Actividades acuícola
17	Herbaceous wetland (Pantano herbáceo [humedal])	Popal Tular Vegetación halófila hidrófila
18	Wooded wetland (Pantano [humedal] boscoso)	Bosque de galería Manglar Selva de galería Vegetación de galería Vegetación de petén
19	Barren or sparsely vegetated (Áreas sin vegetación aparente)	Áreas sin vegetación aparente Riego suspendido Desprovisto de vegetación
20	Herbaceous tundra (Tundra herbácea)	Pradera de alta montaña
21	Wooded tundra (Tundra boscosa)	No hay comparable
22	Mixed tundra (Tundra mixta)	No hay comparable
23	Bare ground tundra (Tundra con suelo desnudo)	No hay comparable
24	Snow or ice (Nieve o hielo)	No hay comparable

Bibliografía

- Anderson, J. R. (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*, volumen 964. US Government Printing Office. Recuperado de: <https://landcover.usgs.gov/pdf/anderson.pdf> el 27 de enero de 2016. 45, 58
- Ashraf, M. A., Maah, M. J., y Yusoff, I. (2011). Introduction to remote sensing of biomass. En *Biomass and Remote Sensing of Biomass*. InTech. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/biomass-and-remote-sensing-ofbiomass/introduction-to-remote-sensing-of-biomass>. 18
- Balvanera, Patricia and Cotler, Helena and Aburto, Octavio and Aguilar, Abigail and Aguilera, Martha and Aluja, Martín and Andrade, Adolfo and Arroyo, Inés and Ashworth, Lorena and Astier, Marta and others (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. *Capital natural de México*, 2:185–245. 65
- Brau, J. (2014). Center for high energy physics, university of oregon. Tomado de: http://pages.uoregon.edu/jimbrau/BrauImNew/Chap07/FG07_23-04.jpg el 11 de octubre de 2016. 20
- Campbell, J. (2002). *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis, USA. 18, 19
- Challenger, A., Dirzo, R., López, J. C., Mendoza, E., Lira-Noriega, A., y Cruz, I. (2009). Factores de cambio y estado de la biodiversidad. *Capital natural de México*, 2:37–73. 67
- Challenger, A. y Soberón, J. (2008). *Los ecosistemas terrestres*, volumen 2, pp. 87–108. CONABIO. 67
- Colditz, R., López Saldaña, G., Maeda, P., Argumedo Espinoza, J., Meneses tovar, C., Victoria Hernández, A., Zermeño Benítez, C., Cruz lópez, I., y Ressler, R. (2012). Generation and analysis of the 2005 land cover map for Mexico using 250 m MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 123:541–552. Recuperado el 13 de enero del 2017, de:

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712001976>. 52, 54, 55
- CREPAD (2007). Sensor AVHRR. Recuperado el 24 de noviembre de 2016, del sitio: <http://crepadweb.cec.inta.es/es/plataformas/avhrr.html>.
- Di Gregorio, A. y Jansen, L. J. (1997). A new concept for a land cover classification system. en: Proceedings of the Earth Observation and Environmental Information 1997 Conference. Alexandria, Egypt. 2
- DiGregorio, A. (2005). Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra Conceptos de Clasificación y manual para el usuario Versión 2 del Programa. *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome*. Consultado el 9 de noviembre de 2016. de <http://www.fao.org/gtos/doc/ecvs/t09/ecv-t9-landcover-ref25-lccs.pdf>. 2, 4, 46, 48, 49
- D' Souza, G. (2000). Forest cover mapping and monitoring with NOAA-AVHRR and other coarse spatial resolution sensors. Technical report, FAO FRAP Working Paper 29, Rome. 45
- Espinosa, D., Ocegueda, S., Aguilar, C., Flores, O., Llorente-Bousquets, J., y Vázquez, B. (2008). El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural. 1:33–65. En: Capital natural de México, vol.I Conocimiento actual de la biodiversidad. 5, 9, 10
- Ezcurra, E., Aburto, O., y Rosenzweig, L. (2010). Los riñones del mundo: ¿por qué debemos proteger los manglares de México? *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, 1(2):202–206. 64
- FAO (2012). Las funciones de los bosques en el cambio climático. Consultado el 15 de febrero de 2017, de la página web <http://www.fao.org/forestry/climatechange/53459/es/>. 63
- FEA, CEMDA, y Presencia Ciudadana Mexicana (2006). El agua en México: lo que todas y todos debemos saber. *México, Centro Mexicano de Derecho Ambiental-Fondo Educación Ambiental-The Tinker Foundation-Presencia Ciudadana Mexicana-National Wild-*

- life Federation, disponible en https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/agua-mexico_001.pdf. 64*
- Flores Tena, F. J. (1993). Atributos ecológicos y aprovechamiento del mezquite. *Revista Investigación y Ciencia de la UAA*, 9:24–30. 65
- Gibbs, P. (1997). Department of Mathematics, University of California Riverside. Tomado de: http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/BlueSky/blue_sky.html el 11 de octubre de 2016. 20
- Huete, A. (1987). Spectral signatures and vegetation indices. 2a Reunión Nacional del Grupo de Trabajo en Teledetección. pp. 13-26. 24, 25
- IGBP (s.f). Recuperado el 12 de enero de 2017, de: <http://www.igbp.net/about.4.6285fa5a12be4b403968000417.html>.
- INEGI (2003). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación Serie III. 68
- INEGI (2009). Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: Serie III. 66
- INEGI (2010a). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, Serie IV (Continuo Nacional). Metadatos. 42
- INEGI (2010b). Programa Estratégico del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica SNIEG 2016-2040. Consultado el 22 de febrero de 2017, de <http://www.snieg.mx/contenidos/espanol/programas/PESNIEG.pdf>. 40
- INEGI (2013). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, Serie V (Continuo Nacional). Metadatos. 33, 43
- INEGI (2014). Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: Serie V. 34, 35, 36, 37, 62
- INEGI (2017). Espaciomapas. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/espaciomapas.aspx>. 40
- INEGI (sf). Ficha técnica terra aqua. [en línea] tomado de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_de_imagenes_modis.pdf el 13 de marzo 2017. 23

- Latifovic, R., Homer, C., Ressler, R., Pouliot, D., Nazmul Hossain, S., R. Colditz, R., Olthof, I., P. Giri, C., y Victoria, A. (2012). North american land-change monitoring system. En: *Remote Sensing of Land Use and Land Cover Principles and Applications* pp. 303-324. 51, 53, 55
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (2016). Diario Oficial de la Federación. [Fecha de consulta, 28 de septiembre de 2016]. Disponible en:http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_130516.pdf. 10
- Liang, S., Li, X., y Wang, J. (2012). *Advanced Remote Sensing Terrestrial Information Extraction and Applications*. elsevier, USA. 21, 23, 25, 27
- Lillesand, TM and Kiefer, RW and others (1994). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley and Sons, Inc., Toronto. 19
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., y Chipman, J. (2014). Remote sensing and image interpretation. 17, 25
- Lindsey, R. y Herring, D. (sf). MODIS Moderate-resolution Imaging Spectrometer . [en línea] tomado de: https://modis.gsfc.nasa.gov/about/media/modis_brochure.pdf el 23 de enero de 2017. 23
- Meraz Vázquez, S., Orozco Villafuerte, J., Lechuga Corchado, J. A., Cruz Sosa, F., y Vernon Carter, J. (1998). El mezquite, árbol de gran utilidad. *Ciencias*, 51:20–21. 65
- Miranda, F. y Hernández, E. (1963). *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. Int. Mex. Rec. Nat. Renovables, México. 5, 35, 58
- Mittermeier, R. y Goettsch, C. (1992). La importancia de la diversidad biológica de México. *México ante los Retos de la Biodiversidad*. Ed. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 63–73. [En línea][Consulta, 1 de septiembre de 2016]. Disponible en: <https://library.conservation.org/Published%20Documents/1992/La%20Importancia%20de%20la%20Diversidad%20Biologica%20de%20Mexico.pdf>. 9, 11
- Mittermeier, R. y Goettsch, C. (1997). *Megadiversidad: los países biológicamente más ricos del mundo*. CEMEX-Agrupación Sierra Madre, México. 9

- Moreno Vázquez, J. L., Marañón Pimentel, B., y López Córdova, D. (2010). Los acuíferos sobreexplotados: origen, crisis y gestión social. *Cauces y encauces del agua en México. México, Academia Mexicana de Ciencias y Comisión Nacional del Agua*, pp. 79–115. 64
- NASA (2015). Especificaciones. Recuperado el 24 de noviembre de 2016, del sitio: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php#>. 23
- NOAASIS (2013). Advanced Very High Resolution Radiometer. Recuperado el 24 de noviembre de 2016, del sitio: <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>.
- Pérez, M. R., Fernández, C. G., y Sayer, J. A. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Revista Ecosistemas*, 16(3). Consultado el 19 de julio de 2017. 63
- R. Crist, E. y C. Cicone, R. (1984). A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data- The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 256–263. 26
- Real Hardisson, F. (sf). Crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas. Tomado de: <http://freal.webs.u11.es/BTema19.pdf>, el 6 de enero de 2017. 35
- Reyes Posadas, C., Enríquez Denton, F. J., Hernández Figueroa, E., y Rangel Calvillo, E. (2003). *Explorando la geografía de México*. Nuevo México. citado en: Referencias geográficas y extensión territorial de México, INEGI. www.inegi.org-mx/inegi/SPC/doc/internet/1-GeografiaDeMexico/MAN_REFGEOG_EXTTERR_VS_ENERO_30_2088.PDF. 9
- Richards, J. A. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis*, volumen 3. Springer. 19, 21, 22, 27, 29, 30, 54
- Rivera, S. E. M. y Monroy-Ortiz, R. (2009). La expansión urbana sobre el campo mexicano. La otra cara de la crisis agrícola. *Revista Estudios Agrarios*, 43:29–46. 68
- Runnig, S. (1994). Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17):3587–3620. Recuperado el 12 de enero de 2017, de: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169408954346>. 45

- Rzewdoski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. edición digital. [fecha de consulta 14 de junio de 2016], cap. 1, Resumen histórico de los estudios sobre la vegetación de México. Disponible en: http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf. 1, 5, 35, 58, 62
- Salinero, E. C. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Rialp, España. 15, 16, 28, 55
- Sarukhán, J., Halffter, C., Koleff, P., González, R., Carabias, J., March, I., Soberón, J., Mohar, A., Dirzo, J., Anta, S., Llorente-Bousquets, J., y de la Maza, J. (2009). Capital natural de México. síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. 10
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología de Coahuila (1985). Manejo y transformación de pastizales. [En línea] obtenido de http://repositorio.inecc.gob.mx/ae/ae_002698.pdf el 21 de julio de 2017. 67
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., y Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical report, National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div. Consultado el 1 de diciembre de 2017 de: https://www.researchgate.net/publication/306154004_A_Description_of_the_Advanced_Research_WRF_Version_3. 12, 13
- USDA (2015). Land Values 2015 Summary August 2015. <https://www.usda.gov/nass/PUBS/TODAYRPT/land0815.pdf>. 58
- USGS (2015). Global Land Cover Characterization (GLCC). Recuperado de <https://lta.cr.usgs.gov/GLCC> consultado el 9 de enero de 2017. 44
- USGS Land Cover Institute (2016a). NLCD92 Land Cover Class Definitions. <https://landcover.usgs.gov/classes.php#herb2>. 58
- USGS Land Cover Institute (2016b). North american land change monitoring system [en línea]. Recuperado el 13 de enero de 2017, de: <https://landcover.usgs.gov/nalcms.php>. 50, 51

- Velázquez, A., François Mas, J., Mayorga Saucedo, R., Palacio, J. L., Gonzáles, L. L., Trejo, I., López García, J., Palma, M., Peralta, A., Prado Molina, J., Bocco, G., Gómez Rodríguez, G., y González Medrano, F. (2001). El inventario forestal nacional 2000. *Ciencias*, 1(64):13–19. 5
- Velázquez, A., Mas, J., Días-Gallegos, J., Mayorca-Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R., Fernández, T., y Palacio, J. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62:21–37. 73
- Victoria-Hernández, A., Niño-Alcocer, M., Rodríguez-Avalos, J. A., y Argumedo-Espinoza, J. A. (2011). Generación de información de uso del suelo y vegetación proyectos y convenios escala 1:50,000. [En línea], recuperado de http://www.inegi.org.mx/eventos/2011/conf_ibero/doc/ET6_46_HERN%C3%81NDEZ.pdf. 34, 39
- Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Kavulich, M., Keene, K., Ming, C., Lin, H.-C., Michalakes, J., Rizvi, S., Zhang, X., Berner, J., Ha, S., y Fossell, K. (2017). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical report, National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div. Consultado el 1 de diciembre de 2017 de:http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf. 11