



Universidad Autónoma de Sinaloa
Posgrado en Ciencias de la Información

Análisis, descripción y simulación geoespacial de la deforestación en la cuenca Pacífico Norte, México

Tesis doctoral presentada por:
Sergio Alberto Monjardin Armenta

Directores de tesis:
Dr. Wenseslao Plata Rocha
Dr. Carlos Eduardo Pacheco Angulo

Culiacán, Sinaloa, marzo 2019.

Agradecimientos

Esta Tesis, es producto del esfuerzo de diversas personas e instituciones que de manera directa e indirecta han participado:

- Un agradecimiento especial a mis directores de tesis, el Doctor Wenseslao Plata Rocha y al Doctor Carlos Eduardo Pacheco Angulo, por su apoyo, opiniones, críticas, sugerencias, correcciones, debates, entre muchos aspectos más que se involucraron en este trabajo.
- Al posgrado de Ciencias de la Información de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por brindarme la oportunidad de superarme, así como a los maestros de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio y de la Facultad de Informática, que nos impartieron clases y nos asesoraron en las diversas temáticas.
- Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por su apoyo en modalidad de beca con el número CVU: 390093.
- A la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de los Andes, Venezuela, por permitir realizar una estancia académica en sus instalaciones.
- A mi esposa Carla K. Villalobos, a mis padres y hermanas, quienes me brindaron su apoyo y me dieron ánimos para lograr este gran reto en mi vida.
- A los amigos y compañeros del posgrado en Ciencias de la Información.
- A todos mis amigos de Venezuela, en especial a la señora Ángela, Ana Isabel y su familia, a Yhonny y su familia, y a todos los amigos de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales (Kicke, Christopher, El Gordito, Dimas, Chabelito, Mariam, Mafalda, Cadete, Chabelita y El Coflas).

Índice

Capítulo I. Introducción	10
1.1. Introducción.....	10
1.2. Justificación	13
1.3. Hipótesis	14
1.4. Objetivos.....	15
1.5 Referencias	15
Capítulo II. Antecedentes	18
2.1. Importancia y monitoreo de la deforestación	18
2.2. La deforestación a nivel mundial, regional, nacional y local	21
2.3. Factores y causas de la deforestación	29
2.4. Simulación de modelos espaciales mediante Tecnologías de la Información Geográfica	33
2.4. Referencias	36
Capítulo III. Descripción y contexto geográfico de la cuenca Pacífico Norte.....	46
3.1. Ubicación de la cuenca Pacífico Norte.....	46
3.2. Aspecto físico natural de la cuenca Pacífico Norte	47
3.2.1. Clima.....	47
3.2.2. Geología.....	48
3.2.3. Geomorfología	48
3.2.4. Red de drenaje.....	49
3.1.5. Suelos.....	50
3.3. Aspecto Socioeconómicos de la cuenca Pacífico Norte	52
3.3.1. Municipios	52
3.3.2. Población.....	53
3.3.3. Migración.....	55
3.3.4. Actividad económica	56
3.3.5. Uso del suelo.....	57
3.3.6. Áreas de conservación y protección	59
3.3.7. Zonas de producción forestal	60
3.3.8. Zonas de restauración	61
3.2. Referencias	62
Capítulo IV. Emisiones/absorciones de Carbono producidas por deforestación, degradación forestal y reforestación, entre 2002 y 2011. Cuenca Pacífico Norte, México.	64

4.1. Introducción.....	64
4.2. Materiales y métodos.....	67
4.2.1. Datos	67
4.2.2. Metodología	67
4.2.3. Pre-procesamiento de los mapas	67
4.2.4. Análisis de los cambios de uso de suelo	68
4.2.5. Estimación de emisiones y absorciones producidas por los principales procesos forestales	70
4.3. Resultados.....	71
4.3.1 Análisis de cambios de uso y cobertura del suelo.....	71
4.3.2. Estimación de las emisiones por deforestación y degradación forestal	83
4.4. Discusión y conclusiones.....	84
4.5. Anexos	86
4.6. Referencias	90
Capítulo V. Factores conductores de la deforestación, mediante Consulta a Expertos y Regresión Logística Espacial. Cuenca Pacífico Norte, México	95
5.1. Introducción.....	95
5.2. Materiales y métodos.....	97
5.2.1. Datos	97
5.2.2. Metodología	99
5.2.3. Preparación de los datos.....	99
5.2.4. Estimación de la deforestación	100
5.2.5. Diseño de encuesta.....	101
5.2.7. Análisis exploratorio de datos.....	103
5.2.8. Ajuste del modelo Regresión Logística Espacial (RLE)	103
5.2.9. Evaluación del modelo RLE	104
5.3. Resultados.....	105
5.3.1. Deforestación de la Cuenca Pacífico Norte	105
5.3.2. Causas de la deforestación de la Cuenca Pacífico Norte	106
5.3.3. Análisis exploratorio de datos.....	108
5.3.5. Evaluación del modelo RLE	113
5.4. Discusión y conclusiones.....	114
5.5. Referencias	119

Capítulo VI. Modelo de simulación geoespacial de deforestación y reforestación.....	126
6.1. Introducción.....	126
6.2. Datos y métodos	129
6.2.1. Datos	129
6.2.2. Metodología	130
6.2.2.1. Selección y pre-procesamiento de los datos.....	132
6.2.2.2. Análisis de detección de cambios.....	132
6.2.2.3. Demanda de uso de suelo	133
6.2.2.4. Simulación geoespacial mediante Evaluación Multi-Criterio.....	133
6.2.2.5. Indicadores cualitativos	138
6.3. Resultados.....	139
6.3.1. Detección de cambios	139
6.3.2. Demanda de uso de suelo.....	140
6.3.3. Ponderación de criterios y factores	143
6.3.4. Normalización de los factores y restricciones de las coberturas	146
6.4.6. Indicadores cuantitativos	154
6.5. Discusión y conclusiones.....	160
6.6. Referencias	162
Capítulo VII. Conclusiones y futuras líneas de investigación	166

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de la Cuenca Hidrográfica Pacífico Norte. Fuente: Elaboración propia	46
Figura 2. Unidades climáticas. Fuente: INEGI, (2001a)	47
Figura 3. Tipos de roca. Fuente: SGM, (2005)	48
Figura 4. Provincias Fisiográficas. Fuente: INEGI, (2001c)	49
Figura 5. Hidrografía de la cuenca. Fuente: INEGI, (1998)	50
Figura 6. Tipos de suelo. Fuente: INEGI, (2001c)	51
Figura 7. Humedad del suelo. Fuente: INEGI, (2001d)	52
Figura 8. Municipios. Fuente: INEGI, (2012)	53
Figura 9. Densidad de la población a nivel municipal. Fuente: Elaboración propia	54
Figura 10. Porcentaje de población migrante por municipio. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 11. Tasa de actividad económica y sector de actividad del 2015. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 12. Usos de Suelo y Vegetación de año 2011 de la cuenca Pacífico Norte. Fuente: Modificación de INEGI, (2016b)	58
Figura 13. Áreas de conservación y protección. Fuente: CONAFOR, (2013).	60

Figura 14. Áreas de producción forestal. Fuente: CONAFOR, (2013)	61
Figura 15. Áreas forestales para restauración. Fuente: (CONAFOR, 2013)	62
Figura 16. Esquema metodológico	71
Figura 17. Cartografía de Uso de Suelos y Vegetación 2002-2011	73
Figura 18. Cartografía de procesos forestales	80
Figura 19. Modelo estimativo de los procesos forestales en bosques y selvas para la cuenca Norte del Pacífico. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 20. Cartografía de deforestación y ganancias forestales 2002-2011	106
Figura 21. Mapa de probabilidad de deforestación obtenido del ajuste del Modelo de RLE	110
Figura 22. Graficas de probabilidad de los factores más significativos en el resultado del modelo RLE.	113
Figura 23. TOC del modelo de RLE.	114
Figura 24. Esquema metodológico	131
Figura 25. Funciones lineales, creciente (1) y decreciente (2), puntos de inflexión (a, b, c, d); funciones determinadas por el usuario (3 y 4), puntos de control (*). Fuente: Eastman, (2009)	137
Figura 26. Mapas de cobertura de bosque de los años 2002 y 2014.	139
Figura 27. Cartografía de deforestación y reforestación 2002-2014.	140
Figura 28. Comportamiento del bosque.	141
Figura 29. Cartografía de deforestación (a) y reforestación (b).	142
Figura 30. Promedio anual de deforestación y reforestación y cobertura de bosques	143
Figura 31. Factores normalizados	151
Figura 32. Restricciones para los objetivos de deforestación y reforestación.	152
Figura 33. Mapas de aptitud para deforestación y reforestación.	153
Figura 34. Modelo de simulación geoespacial de deforestación y reforestación para el año 2030 y 2050	154
Figura 35. Impacto del modelo de simulación geoespacial al 2030 sobre las coberturas y usos de suelo	155
Figura 36. Impacto del modelo de simulación geoespacial al 2050 sobre las coberturas y usos de suelo	156
Figura 37. Mapa de balance de Carbono por deforestación y reforestación del periodo 2014-2030	159
Figura 38. Mapa de balance de Carbono por deforestación y reforestación del periodo 2014-2050	160

Lista de tablas

Tabla 1. Matriz de tabulación cruzada. Adaptación de Pontius <i>et al.</i> , (2004).	68
Tabla 2. Matriz de cambios.	74
Tabla 3. Parámetros de cambio de uso de suelo (2002 – 2011).	76
Tabla 4. Índices de persistencia.	77
Tabla 5. Procesos forestales a nivel municipal.	79
Tabla 6. Emisiones y absorciones de CO ₂ de la cuenca Norte del Pacífico.	84
Tabla 7. Descripción de la información geoespacial utilizada	98

Tabla 8. Factores conductores.	102
Tabla 9. Tasa media anual de deforestación a nivel estatal.	106
Tabla 10. Casusas principales y secundarias de la deforestación.	108
Tabla 11. Matriz de correlación de los factores conductores	109
Tabla 12. Resultado del modelo RLE.	111
Tabla 13. Relación de los factores conductores en el modelo RLE	115
Tabla 14. Relación de las casusas de la deforestación y sus factores conductores.	116
Tabla 15. Datos utilizados para simulación del modelo geoespacial.	129
Tabla 16. Factores considerados en la simulación espacial de deforestación y reforestación.	134
Tabla 17. Cobertura de los bosque, deforestación y reforestación de la Cuenca Pacifico Norte	141
Tabla 18. Ponderación de criterios y factores.	144
Tabla 19. Matrices de comparación por pares.	145
Tabla 20. Normalización de los factores.	146
Tabla 21. Restricciones de las coberturas y usos del suelo para cada objetivo.	151
Tabla 22. Impacto del modelo de simulación geoespacial sobre las coberturas y usos de suelo.	157
Tabla 23. Estimación de la pérdida y ganancia de Carbono en Biomasa viva y en Raíces	158

Anexos

Anexos 1. Deforestación en la cuenca Norte del Pacífico.	86
Anexos 2. Degradación forestal de la cuenca Norte del Pacífico.	87
Anexos 3. Reforestación de la cuenca Norte del Pacífico.	88
Anexos 4. Recuperación natural de la cuenca Norte del Pacífico.	90

Resumen

México posee una de las biodiversidades más importantes a nivel global, que en su mayoría se alberga en las coberturas forestales, no obstante, estas coberturas se han modificado al proporcionar bienes y servicios a los seres humanos, desde el suministro de alimentos, fibras, medicamentos, y similares, hasta elementos menos evidentes en nuestras vidas como las influencias culturales y recreativas. Estas actividades han provocado procesos de deforestación, que han traído como consecuencias deterioro en los aspectos naturales, como el ciclo global del carbono, el agua y los suelos, el aumento de la temperatura local y global, y la sostenibilidad de la agricultura.

Al respecto, el gobierno mexicano ha tomado una fuerte consideración sobre los temas de deforestación en las últimas décadas participando en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), a través del mecanismo de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (REDD+), donde la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) forma parte crucial sobre cómo abordar el problema respecto a las políticas, manejo y gestión de los recursos forestales.

En este orden de ideas, la cuenca Pacífico Norte, México, es considerada una de las zonas más importantes en cuanto a la producción agrícola, y por consecuencia con impactos significativos en las coberturas forestales. Es por ello, que en la presente tesis doctoral se definió como objetivo general realizar el análisis, descripción y simulación geoespacial de la deforestación de sus bosques. Para el abordaje de este, se establecieron tres objetivos particulares: en el primero, se determinaron las emisiones y absorciones de Carbono producidas los procesos de deforestación, degradación forestal, reforestación y recuperación natural; en el segundo, se realizó un análisis de los factores explicativos de la deforestación mediante la consulta de las causas principales y secundarias a personas expertas y la Regresión Logística Espacial para describir de una manera lógica la deforestación; y en el tercero, se desarrolló un modelo de simulación geoespacial hacia los años 2030 y 2050 que contemplan las áreas con mayor aptitud para que se desarrolle la deforestación y la reforestación.

Abstract

Mexico has one of the most important biodiversities in the world, which is mostly housed in forest cover, however, these coverings have been modified to provide goods and services to humans, from the supply of food, fibers, medicines, and similar, to less evident elements in our lives such as cultural and recreational influences. These activities have caused deforestation processes, which have resulted in deterioration in natural aspects, such as the global carbon, water and soil cycle, the increase in local and global temperatures, and the sustainability of agriculture.

In this regard, the Mexican government has taken a strong view on the issues of deforestation in recent decades participating in the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), through the mechanism of Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD +), where the National Forestry Commission (CONAFOR) is a crucial part of how to approach the problem regarding policies, management and management of forest resources.

In this order of ideas, the North Pacific basin, Mexico, is considered one of the most important areas in terms of agricultural production, and consequently with significant impacts on forest cover. That is why, in this doctoral thesis, the general objective was to carry out the analysis, description and geospatial simulation of the deforestation of their forests. To address this, three specific objectives were established: in the first, Carbon emissions and removals were determined, resulting in the processes of deforestation, forest degradation, reforestation and natural recovery; in the second, an analysis of the explanatory factors of deforestation was carried out by consulting the main and secondary causes of experts and the Spatial Logistics Regression to logically describe deforestation; and in the third, two simulation scenarios were developed towards the years 2030 and 2050 that contemplate the areas with the greatest aptitude for the development of deforestation and reforestation.

Capítulo I. Introducción

1.1. Introducción

El cuarto Informe (AR4) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas indica que la mayor parte del calentamiento global observado durante los últimos 50 años es debido a la creciente de concentraciones de gases de efecto invernadero producidos por actividades humanas (Huisinigh *et al.*, 2015; IPCC, 2007). El calentamiento global o el cambio climático es un fenómeno que se produce en diversas escalas, espacial y temporal, el cual genera gran cantidad de problemas ambientales y meteorológicos (Argüelles *et al.*, 2006), afectando, principalmente, la temperatura, presión atmosférica, precipitación, nubosidad, sequía, degradación del suelo y pérdida de biodiversidad, así como, otros elementos del sistema atmosférico. Esta conclusión fue corroborada en el Quinto Informe (AR5) del IPCC que se dio en el año 2013, donde se indicó que la concentración de dióxido de carbono CO₂ en la atmósfera ha aumentado de un valor preindustrial de aproximadamente 391 ppm en el año 2011 a 400 ppm en 2014 (Yue, Zhao, & Zhang, 2015).

La consecuencia previsible es el aumento de la temperatura media de la superficie de la Tierra, con un cambio global del clima que está afectando tanto a las plantas como a los animales (Green *et al.*, 2011). Se estima que gran parte del cambio climático se debe a los Gases Efecto Invernadero (GEI) derivado aproximadamente en un 70% por la quema de combustibles fósiles, los cambios de usos de suelo, la deforestación y degradación forestal (IPCC, 2007a). Específicamente la deforestación contribuye aproximadamente en un 20% de las emisiones globales de Dióxido de Carbono (CO₂) antropogénico en la atmósfera (Denman *et al.*, 2007; Houghton, 2012; Kanninen *et al.*, 2010; van der Werf *et al.*, 2009; Yue *et al.*, 2015), siendo este uno de los motores principales del cambio climático (Ashton, 2012; Bonan, 2008).

Tanto el proceso de deforestación, donde las tierras forestales han pasado a ser superficies no forestales (UNFCCC, 2011), como el proceso de degradación forestal, generado por las actividades de aprovechamiento forestal selectivo, incendios forestales, uso local de la madera para leña y pastoreo de ganado (Achard *et al.*, 2014; Hosonuma *et al.*, 2012), el cual llega a superar en algunos casos a las

pérdidas de reserva de carbono originadas por la deforestación (Asner *et al.*, 2002; Asner *et al.*, 2009), están siendo considerados por las organizaciones internacionales, mediante el establecimiento de políticas que mitiguen el efecto de dichos impactos.

Es por ello en la décima tercera Conferencia de las Partes (COP 13) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), realizada en Bali en 2007, se aprobó el Plan de acción de Bali, en el que se reconoció la importancia del tema y se tomó la iniciativa de establecer un esquema de Reducción de las Emisiones ocasionadas por Deforestación y Degradación del Bosque (REDD) dentro del Plan de acción de Largo Plazo. La discusión iniciada en el 2005 en el seno de la UNFCCC acerca del tema forestal estuvo centrada originalmente en lograr el reconocimiento del potencial existente en la reducción de las emisiones globales causadas por la deforestación (RED), y posteriormente se reconoció que el proceso de degradación del bosque representaba también una fuente importante de emisiones de GEI incluyendo así una segunda “D” y acuñándose el término REDD (Denman *et al.*, 2007).

Adicionalmente se incorporó el papel de la conservación, el manejo sustentable de los bosques y el mejoramiento de inventarios de Carbono, elementos que ahora son representados por el signo “+”, acuñando la noción de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación del Bosque (REDD+). Algunas propuestas plantean que habría que ampliar el conjunto de actividades más allá de REDD+ y considerar un enfoque territorial integrado que incluya a la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (CONAFOR, 2010).

Al respecto, el gobierno Mexicano ha tomado una fuerte consideración sobre los temas de deforestación en la última década participando en la UNFCCC a través del mecanismo REDD+, donde la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) forma parte crucial sobre cómo abordar el problema respecto a las políticas, manejo y gestión de los recursos forestales (Skutsch *et al.*, 2014). La cual es importante, ya que México está considerado entre los primeros cinco países con mayor biodiversidad a nivel mundial (Mittermeier *et al.*, 2004).

Sin embargo, los procesos de deforestación y degradación del bosque se están originando constantemente, a tal punto que, existen investigaciones, donde se considera que en las últimas tres

décadas se han perdido la mitad de estos bosques (Masera, 1995; Rosete-Vergés *et al.*, 2014); existen documentos oficiales, como la "visión de México para REDD+", donde se afirma que el país pasó de perder un promedio de 354,035 hectáreas de extensión forestal por año durante el periodo 1993-2002 a 155,150 ha en el periodo 2002-2007, lo cual significa una disminución de las tasas de deforestación de más del 50 %, haciendo relevante el hecho de que durante los últimos 5 años el 99.9 % de la deforestación se ha producido en los bosques tropicales del país (CONAFOR, 2010; Couturier *et al.*, 2012); y existe información, proporcionada por las instituciones políticas nacionales que difieren significativamente de acuerdo con las fuentes científicas que analizó Velázquez, (2008).

Ante estas disyuntivas, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) desde el año 2000 trabajan en conjunto para proporcionar bases de datos actualizadas, para poder hacer comparaciones y calcular las tasas de deforestación con base a cartográfica de mayor precisión (Jean-François Mas *et al.*, 2004), las cuales son reportadas oficialmente a través del programa Evaluaciones de Recursos Forestales mundiales (FRA), de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). En la última evaluación de la FRA de 2015, reveló una cifra decreciente en las tasas de deforestación del país, ya que para los 1990s presentaba una tasa anual de pérdida de 7.3 M ha/año, la cual disminuyó para los años 2010-2015 con una tasa anual de 3.3 M ha/año (FAO, 2015; Keenan *et al.*, 2015).

En el caso particular de la Cuenca del Pacífico Norte conformada por los estados Sinaloa, Chihuahua, Durango, Zacatecas y Nayarit, gran parte de la superficie que originalmente era ocupada por bosque y selva, ahora se desarrollan actividades como agricultura y ganadería. Según los datos de los mapas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para 1986 la cobertura de bosque era de 101,378.74 km² lo que representó el 65% de la cuenca, mientras que para el mapa de 2014 la cobertura bajó a 97,452.02 km² lo que representó el 63% de la cuenca, es decir, que en 28 años la cuenca perdió 3,926,72 km² (2,54%) de su bosque, con una tasa media anual de deforestación de 0.14% (INEGI, 2016).

En consecuencia, se considera relevante y oportuno analizar, describir y plantear escenarios futuros de deforestación para ayudar a mitigar el problema de pérdida forestal y de emisiones de CO₂ generadas como consecuencias, así como encontrar zonas adecuadas para la reforestación (Pineda

Jaimes, 2010). Ya que se estima que este tipo de proyectos pueden ser de gran ayuda para convertir bosques y selvas en potenciales almacenes de Carbono en los próximos años (IPCC, 2007a). Un par de opciones para contrarrestar este proceso de pérdida es a través de la conservación, que consiste en evitar las emisiones de carbono preservando las áreas naturales protegidas, y la reforestación, dedicada a recuperar áreas degradadas a través de reforestación urbana, plantaciones comerciales, plantaciones energéticas y de sistemas agroforestales (Maser, 1995). Todo esto con la finalidad de reducir el crecimiento de las emisiones de CO₂.

Es por ello que se estableció como objetivo general de esta tesis doctoral, desarrollar una propuesta metodológica que integre métodos óptimos para el análisis, descripción, y simulación de la deforestación, mediante técnicas geoespaciales. Para lograr este objetivo, se estableció como objetivos particulares: analizar los cambios de uso y cobertura de suelo mediante cartografía temática y estimar las emisiones de gases efecto invernadero producidas por deforestación y degradación forestal; explorar y analizar los factores conductores de la deforestación mediante la consulta a expertos y la Regresión Logística Espacial (RLE); y desarrollar un modelo de simulación geoespacial que comprenda la deforestación y la reforestación hacia los años 2030 y 2050 mediante técnicas de Evaluación Multi-Criterio (EMC).

Los datos necesarios que permitieron precisar y analizar la superficie forestal de manera espacial y temporal, fueron la serie cartográfica de Uso de Suelo y Vegetación (USyV), que se combinaron con las Tecnologías de la Información Geográfica (TIGs), lo cual permitió describir, explorar y analizar la pérdida y la degradación forestal cualitativa y cuantitativamente examinando los diferentes factores y variables que intervinieron en estos procesos, para poder simular un modelo geoespacial de deforestación y reforestación a futuro. Estos resultados servirán de base para el programa REDD+ llevado actualmente en el país, así como, para los futuros reportes de cambio climático, y la generación de los indicadores establecidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas de la Agenda 2030 del IPCC.

1.2. Justificación

La dinámica de la cobertura de los bosques, definida por los procesos de deforestación, degradación del bosque y de reforestación (tanto de manera natural como por plantaciones), determinan el futuro de los ecosistemas forestales. En este sentido, los estudios de simulación en el sector forestal tratan de identificar los posibles efectos que pueden influir en el futuro de la cobertura forestal basándose en las acciones que se implementan en el presente, mediante modelos de simulación geoespacial a futuro. Ejemplo de ello, los análisis y elaboración de modelos espaciales de simulación del sector forestal en diferentes países y regiones del mundo desarrollados por la FAO y la colaboración de los diferentes sectores privados, gubernamentales, organizaciones u otras instituciones (Killmann, 2006). Las tendencias históricas en América Latina y el Caribe nos indica una reducción de la cubierta forestal, es decir, se perderán 43 millones de ha forestales para el año 2020 y serán cuatro los países que cubrirán el 80% de la deforestación, incluyendo a México (Killmann, 2006).

Conforme a lo anterior, se propone estudiar el proceso de deforestación en la cuenca Pacífico Norte, México, región que se localiza en una de las partes más afectadas del país en cuanto a la pérdida de cobertura forestal, debido a la diversidad de actividades socioeconómicas que se desarrollan dentro de la superficie de la cuenca. Aunado a ello, los estudios a nivel cuenca tienen un gran impacto en cuestiones ambientales, ya que ayudarán a la ordenación y planificación de la gestión y el manejo integral de las cuencas, áreas territoriales con un sistema dinámico compuesto de elementos biológicos, físicos y antrópicos que reaccionan entre sí, creando un conjunto único e inseparable en permanente cambio.

En relación con las implicaciones antes mencionadas surge la necesidad de analizar, describir y simular la deforestación en la Cuenca Pacifico Norte, con la intención de que los resultados de la presente investigación sirvan de apoyo a la toma de decisiones en la planificación y manejo forestal, asimismo a mitigar la pérdida forestal y el cambio climático que producen diversos efectos naturales, perturbando con ello, las principales actividades económicas de la región como: la agricultura, la ganadería y la pesca; las cuales representan a nivel global, nacional y local la subsistencia de la población, el desarrollo social y económico.

1.3. Hipótesis

La evaluación de la deforestación en la cuenca Pacifico Norte mediante técnicas geoespaciales, permitirán analizar, describir y simular el impacto de estos procesos en el cambio climático a nivel regional y nacional.

1.4. Objetivos

General

Desarrollar una propuesta metodológica que integre métodos óptimos para el análisis, descripción, y simulación geoespacial de la deforestación, en la cuenca Pacifico Norte de México, mediante técnicas geoespaciales.

Particulares

- Analizar los cambios de uso y cobertura de suelo mediante cartografía temática y estimar las emisiones de gases efecto invernadero producidas por deforestación y degradación forestal.
- Explorar y analizar los factores conductores de la deforestación mediante la consulta a expertos y la Regresión Logística Espacial (RLE).
- Desarrollar un modelo de simulación geoespacial a futuro que comprenda la deforestación y la reforestación, mediante técnicas de Evaluación Multi-Criterio (EMC).

1.5 Referencias

- Achard, F., Beuchle, R., Mayaux, P., Stibig, H.-J., Bodart, C., Brink, A., ... Simonetti, D. (2014). Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global Change Biology*, 20(8), 2540–2554. <https://doi.org/10.1111/gcb.12605>
- Argüelles, M., Benavides, C., & Junquera, B. (2006). The impact of economic activity in Asturias on greenhouse gas emissions: Consequences for environmental policy within the Kyoto Protocol framework. *Journal of Environmental Management*, 81(3), 249–264. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2005.10.011>
- Ashton, M. S. (2012). *Managing forest carbon in a changing climate*. Springer.
- Asner, G. P., Keller, M., Pereira, R., & Zweede, J. C. (2002). Remote sensing of selective logging in Amazonia: Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 483–496. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00326-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00326-1)
- Asner, G. P., Knapp, D. E., Balaji, A., & Paez-Acosta, G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1), 033543. <https://doi.org/10.1117/1.3223675>
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science (New*

- York, N.Y.), 320(5882), 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- CONAFOR. (2010). *VISIÓN DE MÉXICO SOBRE REDD+ HACIA UNA ESTRATEGIA NACIONAL*. Retrieved from http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/1393Visión de México sobre REDD_.pdf
- Couturier, S., Nuñez, M. J., & Kolb, M. (2012). Measuring Tropical Deforestation with Error Margins: A Method for REDD Monitoring in South-Eastern Mexico. In *Tropical Forests*. InTech. <https://doi.org/10.5772/31523>
- Denman, K. L., Brasseur USA, G., Ramachandran, S., Leite da Silva Dias, P., Wofsy, S. C., Brasseur, G., ... Averyt, K. (2007). *7 Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry Coordinating Lead Authors: This chapter should be cited as*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter7.pdf>
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., ... Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405(3–4), 532–560. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.05.002>
- Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, R. S., Brockhaus, M., Verhot, L., ... Romijn, E. (2012). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009>
- Houghton, R. . (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(6), 597–603. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2012.06.006>
- Huisingh, D., Zhang, Z., Moore, J., Qiao, Q., & Li, Q. (2015). Recent advances in carbon emissions reduction: policies, technologies, monitoring, assessment and modeling. *Journal of Cleaner Production*, 103, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.04.098>
- INEGI. (2016). Uso de suelo y vegetación. Retrieved August 27, 2018, from <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/usosuelo/>
- IPCC. (2007). *AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis — IPCC*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- Kanninen, M., Brockhaus, M., Murdiyarso, D., & Nabuurs, G. (2010). *Harnessing forests for climate change mitigation through REDD+*. Wien, Austria. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113395930>
- Killmann, W. (2006). *TENDENCIAS Y PERSPECTIVAS DEL SECTOR FORESTAL EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE*. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/pdf/009/a0470s/a0470s00.pdf>
- Mas, J.-F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multidecade spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249–261. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2004.06.002>
- Masera, O. R. (1995). Carbon mitigation scenarios for Mexican forests: methodological considerations and results. *Interciencia*, 20(6), 388–436. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19970601103>
- Mittermeier, R. A., Mittermeier, R. A., & Cemex, S. A. de C. V. (2004). *Hotspots revisited*. Cemex.
- Pineda Jaimes, N. B. (2010). *Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el estado de México mediante tecnologías de la información geográfica*. Universidad de Alcalá, España. Retrieved from <https://eubuh.uah.es/dspace/handle/10017/9705>
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E., & Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20(1), 21–35. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712014000100003&script=sci_arttext&tlng=pt
- Skutsch, M., Mas, J. F., Bocco, G., Bee, B., Cuevas, G., & Gao, Y. (2014). Deforestation and land tenure in Mexico: A response to Bonilla-Moheno et al. *Land Use Policy*, 39, 390–396. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2013.11.013>
- UNFCCC. (2011). *Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10*

December 2010. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/2010/cop16/eng/07a01.pdf>

- van der Werf, G. R., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., ... Randerson, J. T. (2009). CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2(11), 737–738. <https://doi.org/10.1038/ngeo671>
- Velázquez, A. (2008). *La dinámica de la cubierta forestal de México*. Retrieved from www.smf.mx/C-Global/webCubFor.htm
- Yue, T.-X., Zhao, M.-W., & Zhang, X.-Y. (2015). A high-accuracy method for filling voids on remotely sensed XCO₂ surfaces and its verification. *Journal of Cleaner Production*, 103, 819–827. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.08.080>

Capítulo II. Antecedentes

2.1. Importancia y monitoreo de la deforestación

Hoy en día, el estado de la cubierta forestal juega un rol importante en diferentes aspectos que contempla el ecosistema global, como es la conservación del agua y del suelo, la condición atmosférica, la biodiversidad, entre otros, manteniendo un balance ecológico (Xuejun Wang *et al.*, 2014). Por ello, la deforestación y la degradación del bosque es una preocupación ambiental a nivel mundial. Se ha calculado que se perdieron 2.3 millones de km² de bosques en el periodo 2000-2012 a nivel global (Hansen *et al.*, 2013). Asimismo, el Global Forest Resources Assessment (FRA) indica que se perdieron 83 000 km²/año en el periodo 1990-2000 y 55 000 km²/año en el periodo 2005-2010 (FRA, 2010). De igual manera las estadísticas actualizadas de la (FAO, 2015; MacDicken, 2015) indican que las tasas de deforestación han disminuido los últimos cinco años, presentando una pérdida de 76 000 km²/año y una ganancia de 43 000 km²/año, lo que equivale a una pérdida neta anual de 33 000 km²/año a nivel mundial en el periodo 2010-2015.

Este problema de deforestación y degradación forestal se define como la pérdida o reducción de las masas forestales, inducida principalmente por el hombre, convirtiendo las coberturas de tierras forestales a otros usos de suelo no forestales, el cual es inducido especialmente por la expansión de la agricultura (Lambin *et al.*, 2003; RUDEL *et al.*, 2009) y el crecimiento desorganizado de la población urbana (DeFries *et al.*, 2010; Pacheco *et al.*, 2011), generada desde escala local a regional, que tienen un alto impacto en el funcionamiento global del medio ambiente, y produciendo con ello un conjunto de cambios que modifican y provocan alteraciones en el clima, el ciclo de carbono, en la biodiversidad, la sostenibilidad del sumidero de agua potable, entre otras (Lambin & Meyfroidt, 2010; Lepers *et al.*, 2005; Meyfroidt *et al.*, 2010).

Estos procesos están estrechamente relacionados con el uso y aplicación inadecuada de políticas relacionadas con la conservación y manejo de los recursos forestales (Jaboury, 2013). La deforestación y la degradación forestal son responsables de emitir gran cantidad de gases de efecto invernadero a la atmosfera, esencialmente el CO₂ (Menon *et al.*, 2007; Penman *et al.*, 2003), debido a la combustión de la biomasa forestal, la descomposición del resto de material vegetal y el carbono del suelo. Según

el estudio de van der Werf *et al.*, (2009) estos procesos de pérdida y degradación forestal y emisiones de turberas, son responsables del 17% de las emisiones antropogénicas de CO₂ a nivel global.

Las estimaciones de las emisiones de gases efecto invernadero poseen un alto grado de incertidumbre (UNFCCC, 1992), no obstante, son reconocidas por la comunidad internacional del cambio climático (Achard *et al.*, 2010). Esto ha propiciado una serie de debates internacionales oficiales sobre el problema, como lo fue en la 20ª Conferencia de las Partes (COP-20) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) celebrada en la ciudad de Lima, Perú en Diciembre del 2014, donde trataron esta problemática a través del trabajo que se ha realizado y que está por realizarse en base a las estrategias REDD+(Unfccc, 2014). Es por ello, por lo que se hace necesario calcular de manera precisa las pérdidas forestales por los procesos de deforestación y degradación forestal, con la finalidad de disminuir la incertidumbre y optimizar los recursos que se dispongan para la reducción de las emisiones de CO₂. Actualmente estos cálculos o estimaciones se apoyan en imágenes de satélites, que integrándolas con datos de campo son fundamentales en la determinación de la pérdida de la cubierta forestal (Ramankutty *et al.*, 2006).

Hoy en día existen dos técnicas principales de Percepción Remota para evaluar la deforestación, a saber: el análisis mediante el muestreo y el análisis de barrido completo (wall-to-wall), de este par de técnicas se derivan otras, tal como el análisis hot spot (Achard *et al.*, 2014; DeFries *et al.*, 2007). El emplear cualquiera de estas técnicas está en función del objetivo del trabajo, de la superficie que se requiere evaluar, de la disponibilidad de los datos de insumo y la precisión que se requiera. El análisis de muestreo se realiza solo en zonas de interés, por lo regular son áreas donde existe cobertura forestal, puede ser un muestreo de manera sistemática y a intervalos regulares o de manera estratificada y concentrada, solo en las áreas donde se ha sufrido una conversión de tierras forestales a tierras no forestales. Mientras que el análisis de barrido completo cubre la superficie total de la zona boscosa a evaluar, es decir toda la vegetación de una región o país (Pacheco *et al.*, 2014).

Mientras que para evaluar la degradación forestal mediante Percepción Remota, existen dos técnicas que se pueden utilizar, la primera, mediante un enfoque directo, identificando y mapeando los daños del dosel, o mapeando combinadamente el daño del dosel, con los bosques intactos y los parches de regeneración (GOFC-GOLD, 2016), y la segunda, mediante un enfoque indirecto, identificando en

las imágenes de sensores remotos las perturbaciones causadas por el hombre, posteriormente se aplica el concepto y los criterios de evaluación del bosque intacto dentro del marco mundial del IPCC, para categorizar finalmente los bosques intactos y no intactos, que discriminan a los bosques con diferentes reservas de carbono (GOFC-GOLD, 2016; Mollicone *et al.*, 2007).

Por otro lado, para estudiar las causas de la deforestación, existen metodologías que se enfocan en estudios que se dirigen a nivel global y a nivel local. Los estudios a nivel global son de gran importancia para establecer una base a priori de las causas de la deforestación, pero suelen sub-estimar o sobre-estimar ciertos factores conductores responsables de la pérdida de cobertura forestal, ya que cada país o región contemplan diferentes características y diferente manera de manejar la cuestión forestal (Köthke *et al.*, 2013), en cambio los estudios a nivel local explican de manera más concreta el modelo causal de la deforestación que los estudios que se enfocan a nivel global (MATHER & NEEDLE, 2000; Wibowo & Byron, 1999). De igual forma, se pueden estudiar las causas directas de la degradación del bosque, las cuales se enfocan principalmente en analizar las actividades antrópicas que pueden ocurrir en el bosque, como el aprovechamiento forestal selectivo, los incendios forestales, uso local de la madera para leña y pastoreo de ganado (Achard *et al.*, 2014; Hosonuma *et al.*, 2012).

Otra forma importante de contribuir con los estudios de deforestación y degradación del bosque, es el análisis evolutivo de la cubierta forestal mediante la simulación de escenarios futuros de deforestación y degradación del bosque, utilizando diversas metodologías y técnicas para ello, como son los Autómatas Celulares (Barni *et al.*, 2015; Shehzad *et al.*, 2014), Modelos basados en Agentes (Munthali & Murayama, 2015), Cadena de Marcov (de Barros Ferraz *et al.*, 2005; Thapa *et al.*, 2013), modelos espaciales de Regresión Logística para calcular las tendencias de la deforestación (Miranda-Aragón *et al.*, 2012; Müller *et al.*, 2014), así como también la simulación de escenarios mediante técnicas de Evaluación Multi-Criterio y Sistemas de Información Geográfica (Pineda Jaimes, 2010).

Todas las razones expuestas en estos trabajos mencionados sirven como apoyo a la toma de decisiones en cuestiones ambientales, específicamente en la gestión y manejo de los ecosistemas forestales para exponer la importancia y el impacto que tiene y pueda tener el problema de la deforestación en el medio ambiente.

2.2. La deforestación a nivel mundial, regional, nacional y local

En relación con las implicaciones anteriores, la deforestación y la degradación del bosque es un problema de carácter mundial, mismo que se presenta de diferentes maneras, de acuerdo con los factores que influyen en el área de interés, en las diferentes escalas. Para ello, la disponibilidad de datos geospaciales procedentes de sensores remotos permite disponer de gran cantidad de información sobre la cubierta del bosque a escalas globales, regionales y nacionales (Achard *et al.*, 2006).

Las estimaciones de pérdida forestal realizadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) a nivel global, son utilizadas como patrón de referencia para otros estudios (FRA, 2010; MacDicken, 2015). La FAO ha realizado el Estudio de Sensores Remotos (RSS), dentro del programa Evaluación de los Recursos Forestales (FRA) de 2010 y 2015 (FAO, 2015; FRA, 2010; Keenan *et al.*, 2015) a partir del 2007 para todo el planeta (Duveiller *et al.*, 2008; Eva *et al.*, 2010). Este estudio lo realizan mediante una alianza con el Joint Research Center (JRC) de la Comisión Europea, a través del proyecto Tropical Ecosystem Environment observation by Satellites (TREES). Este análisis se realiza mediante un muestreo sistemático de aproximadamente 4,000 unidades de 20 Km x 20 Km, en las cuales se evalúa un cuadro de 10 km x 10 km con imágenes Landsat las últimas dos décadas 1990-2010. Donde, el resultado de esta evaluación arrojó que se perdieron aproximadamente 8 millones de ha por año en el periodo (1990-2000) y de 7.6 millones de ha por año en el periodo (2000-2010), dando como resultado una tasa media anual de deforestación de 0.49% (Achard *et al.*, 2014).

Mientras que los resultados del periodo 2010-2015 de la FRA, indican que las tasas de deforestación han disminuido los últimos cinco años, presentando una pérdida de 7.6 millones de ha/año y una ganancia de 4.3 millones de ha/año, lo que equivale a una pérdida neta anual de 3.3 millones de ha/año a nivel mundial en el periodo 2010-2015 (Keenan *et al.*, 2015). Otro estudio de carácter global, fue el realizado por Hansen *et al.*, (2013), en el cual se estimó la deforestación y dinámica de los bosques durante los años 2000-2012, utilizando imágenes Landsat, MODIS y AVHRR, relacionando los resultados de la pérdida forestal con la tecnología LiDAR de GLAS (Geoscience Laser Altimetry System). Los resultados indicaron una pérdida de 2.3 millones de km² y una ganancia de 0.8 millones

de km² de bosques. Al mismo tiempo se evidenció que en las zonas tropicales hay una tendencia de pérdida de alrededor de 2,101 km²/año.

Con esa finalidad, el mismo autor y otros colaboradores (Hansen *et al.*, 2003), estimaron el porcentaje de cobertura arbórea a nivel global con las bandas del visible de MODIS con una resolución espacial de 500 metros, empleando un algoritmo de árbol de regresión supervisado, dichos resultados presentaron una precisión mayor que los que se han obtenido con datos procedentes del sensor AVHRR, en cuanto a resolución espacial y espectral.

Al respecto Hansen & DeFries, (2004), describieron los cambios de la cobertura forestal del periodo de 1982 a 1999 a nivel mundial, basándose en datos del sensor AVHRR. En dicho estudio se determinó que América Latina y la parte tropical de Asia es donde se presenta mayor pérdida de cobertura forestal, pero el objetivo principal de este trabajo fue determinar las áreas hot spot de deforestación a nivel global. Asimismo Hansen *et al.*, (2010) cuantificó la pérdida de cobertura de bosque grueso a nivel global mediante imágenes MODIS y Landsat, cubriendo la cobertura total de bosques con las imágenes MODIS y realizando un muestreo con los datos de Landsat en el periodo comprendido del 2000 al 2005. Comparó la biomasa que existía entre continentes y países. Como resultado se estimó que se perdieron 1,011, 000 km² en los cinco años evaluados, que representaban el 3.1% del total de bosque grueso que se tenía en el 2000 que era de 32, 688,000 km².

Otros trabajos de gran importancia a nivel global y continental que se relacionan directamente con la deforestación son los que tienen que ver con la cartografía de uso de suelo de la superficie terrestre, ya que estos forman una parte clave para entender la complejidad entre las actividades humanas y el cambio climático. En este sentido, a principios del año 2000 se generaron mapas de coberturas de suelo a una resolución de 1 km x 1 km (Global Land Cover), producidos por los sensores VEGETATION a bordo de los satélites SPOT y por el Espectroradiómetro de Moderada Resolución (MODIS) a bordo de las plataformas Terra y Aqua. Dichos productos han sido de gran utilidad para estudiar la dinámica de la superficie terrestre y en particular se han utilizado para estudiar la pérdida de cobertura forestal a nivel global (Bartholomé & Belward, 2005; Friedl *et al.*, 2002; Friedl *et al.*, 2010; Seebach *et al.*, 2012; Tsensbazar *et al.*, 2015).

Asimismo, es importante mencionar al Proyecto CORINE Land Cover, bajo el cual se realizó la cartografía de uso de suelo y vegetación para los países miembros de la Unión Europea, y el cual ha sido utilizado para diversos estudios territoriales, dentro de los que destaca la pérdida de superficie forestal (Büttner *et al.*, 2004). También es importante mencionar el trabajo Rapid Land-Cover Change, el cual se basa en la compilación de datos existentes procedentes de sensores remotos, censos y consulta a expertos, para la realización de un mapa global de los cambios rápidos de cobertura vegetal, identificando y evaluándose las áreas *hot spot* de deforestación del cinturón tropical, donde se determinó que a nivel global, la zona del Amazonas es donde existen más áreas *hot spot* y que en Asia se encuentra la mayor concentración de áreas de cambios de cobertura (Lepers *et al.*, 2005).

Otro estudio que se enfocó en determinar las áreas de cambio rápido en la cobertura de bosques tropicales húmedos, entre los años 1990 y 1997, resultando una pérdida de 5.8 +/-1.4 millones de hectáreas por año, aunado a ello se estimó una degradación de 2.3 +/-0.7 millones de hectáreas (Achard *et al.*, 2002). Asimismo, en el año 2000 se culminó el mapa global IGBP DIScover, donde se utilizaron imágenes de 1 km de resolución espacial del sensor AVHRR, detectando los cambios de usos de suelo a nivel global, mediante una clasificación supervisada de NDVI de los años 1992 y 1993 para determinar la composición de las coberturas y una post-clasificación para eliminar la confusión de los tipos de cobertura, determinando la pérdida de cobertura forestal (Loveland *et al.*, 2000).

En este mismo año 2000, se generó un mapa global de la cubierta terrestre con 1 km de resolución espacial desarrollado en la Universidad de Maryland (UMD) (Hansen *et al.*, 2000), a través de una clasificación supervisada utilizando tres métodos de clasificación digital. Otro producto global es el GlobCover que fue resultado del procesamiento de datos del sensor Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) entre el 2005-2009, el cual fue producido mediante un procedimiento automático de clasificación de múltiples etapas utilizando la información espectral y temporal para el empleo de una clasificación no supervisada (Bontemps *et al.*, 2011).

Al respecto, Japón produjo un mapa mundial de uso de suelos derivado de datos MODIS con 1 km de resolución espacial, empleando una combinación de algoritmos de clasificación supervisada (Tateishi *et al.*, 2011). Hoy en día, el mapa de cobertura de usos de suelo a nivel global más actualizado y preciso, fue desarrollado por Gong *et al.*, (2013), para lo cual utilizó 8,900 imágenes Landsat,

empleando cuatro clasificadores digitales; Máxima verosimilitud, árboles de decisión, búsqueda aleatoria y clasificador vectorial. Un resultado genérico de este trabajo fue la determinación del porcentaje de cada una de las categorías de uso y cobertura de suelo.

A nivel nacional y regional se pueden destacar los trabajos realizados por el Instituto Nacional de Pesquisas Aeroespaciales (INPE) de Brasil, que monitorean el Amazonas Brasileño desde el año de 1988 de manera anual en el Proyecto de Monitoreo de la Deforestación en la Amazonia por satélite (PRODES). Teniendo como objetivo primordial identificar y evaluar la pérdida de cobertura forestal para tomar las medidas pertinentes y disminuir las tasas de deforestación. Estos trabajos de PRODES se basan en el procesamiento digital de imágenes Landsat, LISS-3, CBERS e imágenes del satélite inglés UK-DMC2 principalmente. En tal sentido, estas evaluaciones de 1988 hasta el año 2014 revelan que se han perdido 407, 675 km² (INPE, 2018).

En el mismo sentido el INPE desarrolló un sistema de apoyo de supervisión y control de la deforestación del Amazonas llamado DETER, el cual divulga un mapa de alertas cada mes para reportar las zonas superiores a 25 ha que han sido deforestadas o que están en proceso de degradación forestal, este sistema sirve de apoyo para la evaluación de la pérdida forestal en el proyecto PRODES. Para ello, se emplean imágenes MODIS con una resolución espacial de 250 metros (INPE, 2015).

Asimismo el sistema DEGRAD fue diseñado para determinar anualmente áreas que están en proceso de degradación forestal con imágenes Landsat y CEBERS, sirviendo como apoyo en el monitoreo de deforestación a través de PRODES (INPE, 2015). No obstante, en el año 1978 se estableció en Brasil la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA), que tiene como objetivo a largo plazo garantizar la protección y el manejo sostenible de los recursos naturales de la Amazonia, mismo que se está llevando a cabo a través del proyecto “Monitoreo de la Deforestación, Aprovechamiento Forestal y Cambios de uso del Suelo en el Bosque Panamazónico”, en los países de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Venezuela, Guyana, para lo cual utilizan la misma metodología que el proyecto PRODES, (OTCA, 2015).

También es importante mencionar el reporte bianual de la evaluación y monitoreo los recursos forestales que realiza el Forest Survey of India (FSI), el cual tiene como finalidad presentar las tasas

de deforestación y sus implicaciones ambientales en la India, así como generar la cartografía escala 1:50,000, a partir de imágenes del sensor IRS 1C/1D LISS III con una resolución espacial de 23.5m. Se ha demostrado en los reportes del FSI, que del año 1987 hasta el año 1999 se presentaron pérdidas de cobertura forestal, mientras que entre 1999 y 2003 se han ido presentando ganancias, teniendo 640,819 km², 637,293 km² y 678,333 km² de cobertura de bosques para los años 1987, 1999 y 2003, respectivamente (FSI, 2015).

Asimismo, la revisión presentada por Asner *et al.*, (2009), muestra los estudios desarrollados en el Amazonas Peruano, Brasileño, Boliviano y Colombiano, así como en los bosques de Mozambique, Indonesia y Hawaii. Algunos resultados de estos estudios fueron la determinación de la tasa de deforestación media anual de Colombia con 336, 581 ha/año en el periodo 2000-2007. Igualmente, para Perú se determinaron las tasas anuales de deforestación correspondientes a los periodos 2000-2005, 2005-2009, 2009-2010, 2010-2011 las cuales presentaron 91, 000 ha/año, 163, 000 ha/año, 109, 000 ha/año, 103, 000 ha/año, respectivamente. En dichos trabajos se utilizó un sistema para el monitoreo forestal, que permite la identificación automatizada de la pérdida y perturbación de bosques a partir de imágenes de satélite de alta resolución, donde la mayoría de estos estudios utilizaron imágenes Landsat.

Por otro lado, se tiene el trabajo realizado por Bartalev *et al.*, (2014), en dicho trabajo se evalúa la cobertura forestal de Rusia mediante una combinación de un estudio wall-to-wall y un muestreo sistemático simple basado en el muestreo de la FAO. En tal sentido el mapa resultante TerraNorte (wall-to-wall), fue hecho con imágenes MODIS de 230 m x 230 m de resolución espacial del año 2010 y el muestreo de referencia forestal fue realizado con imágenes Landsat de 30 m x 30 m de resolución espacial. Se emplearon 32 unidades de muestra de 20 km x 20 km. El resultado que se obtuvo en la regresión lineal fue una correlación del 0.86, presentando una cobertura forestal de 807,664.282 ha para TerraNorte y 822,766.451 ha para Landsat correlacionado.

Al respecto, Gao & Liu, (2012), realizó una exploración sobre las causas de los procesos de deforestación e interpreta una relación entre lo observado y las características fisiográficas de una zona en la provincia de Heilongjiang en China, mediante un estudio retrospectivo de fotointerpretación en el periodo de 1896-2000, utilizando imágenes aéreas escaneadas en el periodo

de 1896 a 1980 y de 1980 al 2000 imágenes Landsat. A través de este estudio se determinaron las tasas anuales de deforestación para los periodos 1896-1958, 1958-1980 y de 1980-2000, las cuales fueron de 1, 146 km², 1, 046 km² y 419 km², respectivamente.

Por otra parte Grinand *et al.*, (2013), estimaron la deforestación a escala regional en Madagascar sobre los bosques húmedos y secos, mediante el procesamiento digital de imágenes Landsat, en el periodo 2000-2010. En consecuencia, se encontraron las tasas de deforestación anuales para los bosques húmedos, estas oscilan entre 0.93% y 2.33%, y para los bosques secos entre 0.46% y 1.17%. Sobre el mismo asunto, la investigación de Potapov *et al.*, (2012), cuantificó la pérdida de cobertura forestal en la República del Congo, evaluando el periodo 2000-2010, utilizando 8881 imágenes Landsat para generar una serie de tiempo, e imágenes MODIS para determinar las métricas que fueron necesarias en la normalización de las imágenes Landsat. Como consecuencia de este estudio se obtuvo que existía una pérdida de cobertura forestal promedio anual de 371, 200 ha/año, deduciendo que las estadísticas de la FAO subestimaron la deforestación, ya que estas presentan una pérdida de tan solo 311, 000 ha/año.

Por su parte, Munawar *et al.*, (2015) analizó la deforestación y degradación forestal con imágenes Spot y MODIS en el periodo 2000-2012 en Pakistan con el objetivo de proveer un mecanismo de reporte y verificación de la cobertura forestal, utilizando una clasificación de NDVI para evaluar la pérdida e identificar zonas potenciales para la implementación de las estrategias REDD+. Ya que las reservas forestales han estado disminuyendo del 2.5% al 5% en esta zona. De igual manera Zinner *et al.*, (2014), analizo la pérdida de bosques en la región central de Menabe, Madagascar en el periodo 1973-2010 con imágenes Landsat y Aster, utilizando una clasificación no supervisada y el NDVI, con ello se determinó una tasa media anual promedio de 0.67%.

Dentro del mismo entorno, en la zona suroeste de Nigeria en la región de Ijesa-Ekiti se estudió y analizó la deforestación, la pérdida de biodiversidad y los factores impulsores de este problema. Para ello emplearon imágenes Landsat, Spot e Imágenes NigeriaSat-1, aplicando una clasificación supervisada combinada con una interpretación visual, determinando una pérdida promedio de 53, 469.23 ha en 25 años y una tasa media anual de 5.02% en el periodo comprendido entre 1987-2003 (Adeoye & Ayeni, 2011). En relación con la pérdida de biodiversidad en cuanto a la construcción de

una nueva carretera, Müller *et al.*, (2016) analizo el impacto que sufre el ecosistema forestal en Brasil proponiendo un método de pre-procesado de imágenes digitales para antes de emplear la metodología de PRODES, estos resultados obtenidos muestran una mejoría en comparación con los trabajos realizados con datos de PRODES y Hansen *et al.*, (2013), los cuales divergen con la metodología propuesta con un 18 % y un 13 % respectivamente.

Por otro lado, Sudhakar Reddy *et al.*, (2015) estudiaron las implicaciones de la deforestación con los reservorios de carbono mediante técnicas híbridas de clasificación en múltiples datos espaciales y temporales; desde mapas topográficos a escala 1:250,000, imágenes Landsat con 80 m de resolución espacial e imágenes IRS de 56 m de resolución espacial. Los resultados de este análisis determinaron una pérdida de cobertura boscosa en la India Central del 15.84 % en el periodo de 1935-2010. En la misma vertiente, Barona *et al.*, (2010) realizó una investigación sobre la importancia y la influencia que presenta la pastura y el cultivo de soja en la deforestación del Amazonas brasileiro, mediante un análisis estadístico a nivel municipal examinado los patrones espaciales. Determinando que la pastura es la cobertura que más impulsa la pérdida de bosques y selvas y no el cultivo de soja como se pensaba hipotéticamente.

En el mismo sentido Graesser *et al.*, (2015) investigaron sobre la afectación de la cubierta forestal en Sur-América con respecto a la expansión de las tierras de cultivo y pastura en el periodo 2001-2013. Por otro lado, es necesario saber de los diferentes enfoques de evaluación en la cobertura forestal, Van Laake & Sánchez-Azofeifa, (2004) propuso una metodología para identificar y delinear áreas con altas tasas de deforestación (áreas hot spot de deforestación) en grandes superficies, mediante técnicas de clasificación digital, empleando algoritmos de vecindad y reglas de buffer en distancias, como ejemplo indica el caso de estudio del país de Costa Rica donde se identificaron tres áreas hot spot, de las cuales la más crítica fue el área de Siquirres presentando un 44% de deforestación en el periodo que comprende de 1986-1997.

En el mismo sentido, en los bosques boreales de Eurasia, se determinaron las áreas que han sufrido un cambio rápido de cobertura forestal (*hot spot*), se evaluó el periodo 2000-2005, mediante imágenes Spot-4 VEGETACION (1km x 1km) para la identificación de las áreas *hot spot* y después obtener las tasas de deforestación se utilizando datos Landsat (30 m x 30 m) y ASTER (15 m x 15 m). Los

resultados indican tasas anuales de deforestación donde las más alarmantes fueron en la región del río Lena y en Khabarovsk kray con 6.1% y 2.34%, respectivamente (Achard *et al.*, 2006).

Por su parte, en Venezuela se determinaron, delinearon y evaluaron las áreas *hot spot* de deforestación, en el periodo 2005-2010, a partir del tratamiento de imágenes MODIS, Landsat y consulta a expertos. Las imágenes MODIS se utilizaron para la identificación y delineación de las áreas *hot spot*, mientras las Landsat se utilizaron para estimar la deforestación. A raíz de esta investigación se encontró que en la parte norte del río Orinoco se concentra la mayoría de las áreas *hot spot* y sus tasas medias anuales de deforestación oscilan entre -0.72% y -2.95% (Pacheco *et al.*, 2014). En la misma vertiente, se puede mencionar el trabajo que realizó Monjardin *et al.*, (2014), en el cual se obtuvieron las áreas *hot spot* de deforestación en el estado de Sinaloa, México, mediante el uso de cartografía de USyV a escala 1:250, 000, para posteriormente evaluar la deforestación del *área hot spot* más crítica empleando un procesamiento digital de imágenes Landsat, arrojando una tasa media anual de deforestación de 0.60%.

Mientras tanto, diferentes investigadores han trabajado en optimizar técnicas y metodologías como es el caso de la fusión de datos óptico-electrónicos y de radar de apertura sintética (SAR), como ejemplo de ello se puede mencionar el trabajo de Lehmann *et al.*, (2015), donde se evaluó la complementariedad y la interoperabilidad de la combinación de datos Landsat y datos de radar de apertura sintética (SAR) para discriminar las coberturas boscosas y el suelo deforestado, realizando un análisis por separado con datos Landsat, SAR y la combinación de ambos, donde esta combinación presentó un porcentaje de casi el 100 % de discriminación en áreas deforestadas mediante un análisis variante en el bosque de Tansmania, Australia.

De igual manera, Reiche *et al.*, (2015) fusionó datos Landsat y SAR en series de tiempo para detectar la deforestación en los trópicos mediante un enfoque MulTiFuse para aglutinar datos PALSAR y el NDVI de Landsat. Esta problemática de pérdida de cobertura forestal también se ha estudiado a nivel de cuenca hidrográfica, ya que tienen un gran impacto en cuestiones ambientales, siendo estas áreas territoriales, un sistema natural dinámico compuesto de elementos biológicos, físicos y antrópicos que reaccionan entre sí, creando un conjunto único e inseparable en permanente cambio. Un ejemplo actual de ello es el trabajo realizado por Pacheco *et al.*, (2015) el cual evaluó los cambios de cobertura

forestal en la cuenca del río Chama en los Andes Venezolanos en el periodo 1998-2014, mediante el procesamiento digital de imágenes Landsat y el sistema TerraAmazon, clasificando y analizando cinco unidades ecológicas y determinando que el área forestal, se ha mantenido estable, presentando una pérdida neta de 89 hectáreas en el periodo evaluado.

Otro trabajo similar que vincula el impacto de la deforestación con los cambios de uso y la estabilidad de pendientes pronunciadas de gran altitud en las cuencas Andinas para determinar el control de los factores de pendiente que pueden derrumbar y generar azolves en los cuerpos de la cuenca (Vanacker *et al.*, 2003). A este respecto, Viana *et al.*, (2015) investigó el efecto de la deforestación a nivel cuenca sobre ocho estuarios de Manglar en el golfo de Chiriquí en el Pacífico Panameño, donde no se encontró una buena correlación sobre el nivel de deforestación y la red alimenticia de los estuarios analizados.

Sin lugar a duda, es de suma importancia evaluar los cambios en la cobertura forestal que se han generado durante varios años y la precisión de los datos que se utilizan son los que determinan la precisión del cálculo de las emisiones, ya que de acuerdo con RAMANKUTTY *et al.*, (2007) que analizó cinco trabajos a nivel global que evalúan la deforestación y estimación de los gases efecto invernadero, obtuvo resultados muy dispares a raíz de que variaba la resolución de los datos. Pero aun así, la capacidad de monitoreo de la deforestación ha mejorado en los países tropicales en los últimos 10 años, donde estas capacidades han evolucionado pasando de tener el 69 % en el año 2005 al 84 % en el 2015, debido a la disponibilidad de datos satelitales a nivel global y técnicas de percepción remota (Romijn *et al.*, 2015).

2.3. Factores y causas de la deforestación

Las causas de la eliminación de bosques y selvas varían regionalmente debido a la gran cantidad de factores conductores que propician cambios en el uso y cobertura de suelo, a su vez estos cambios se reflejan principalmente en el clima, la hidrología, en la calidad de los suelos y en la pérdida de biodiversidad (Chhabra *et al.*, 2006). A razón de esto, se han realizado estudios en diferentes partes del mundo que tratan de analizar y comprender los patrones, factores y causas que impulsan la deforestación.

Actualmente, el enfoque crítico del manejo sustentable de los ecosistemas forestales y medioambiente ha provocado que los estudios científicos sobre las causas y efectos de los cambios en la ocupación y uso del suelo tengan mayor importancia. Al respecto, existen numerosas técnicas efectivas para analizar, explicar y simular los cambios del uso y cobertura del suelo, como el análisis exploratorio de datos, los análisis de regresión, estadísticas bayesianas y redes neuronales artificiales (Lesschen *et al.*, 2005).

De igual manera están los modelos basados en agentes (MBA) que son una herramienta útil para el estudio del medio ambiente (Hare & Deadman, 2004). Se han realizado diversas aplicaciones de MBA para estudiar decisiones humanas y cambios en la cobertura y uso del suelo (Brown, *et al.*, 2004), y deforestación de bosques tropicales (Lim, 2002; Manson & Evans, 2007; Verburg *et al.*, 2006). Asimismo, existen algunos estudios que han empleado autómatas celulares, sobre todo en cambio de uso del suelo urbano (Han *et al.*, 2009; Jantz *et al.*, 2010; Long *et al.*, 2009), en dinámica del paisaje (Soares-Filho *et al.*, 2002; Walsh *et al.*, 2008) y modelos multinivel que trabajan en distintas escalas temporales y espaciales (Overmars & Verburg, 2006; Pan & Bilborrow, 2005; Walsh *et al.*, 2001).

Otro método, también empleado en el estudio de los causantes de la deforestación es a través del análisis de literatura (Lambin & Meyfroidt, 2010b), que permite identificar, las causas principales que son representadas por las actividades humanas y que afectan directamente al medio ambiente. Así como también se identifican las fuerzas conductoras subyacentes que sustentan las causas inmediatas de la deforestación. Estas suelen constituir un conjunto de variables sociales, políticas, económicas, tecnológicas o culturales que explican las condiciones iniciales en la relación hombre-medioambiente, dichas variables tienen carácter estructural y se desarrollan a nivel local, regional, nacional y global. En tal sentido, Geist & Lambin, (2001, 2002), analizaron las fuerzas conductoras subyacentes y causas directas de la deforestación y sus interacciones entre sí. El trabajo se basó en el análisis de más de 150 casos de estudio a nivel sub-nacional, demostrando que la deforestación es inducida por transiciones regionales en la sinérgica combinación causa/conducción donde los factores económicos, institucionales y políticos son los más destacados.

Por cierta razón, en los últimos años se han desarrollado diversos trabajos tratando de analizar, describir y explorar las causas de la deforestación desde diferentes puntos de vista de acuerdo con las

áreas de interés, ya que este proceso varía de acuerdo con una gran cantidad de variables biofísicas y socioeconómicas. Con referencia a lo anterior, es importante mencionar algunos trabajos que estudiaron los indicadores asociados a los patrones de la deforestación. Al respecto, en la región central de Menabe, Madagascar Zinner *et al.*, (2014) analizó la deforestación y degradación de los bosques, determinando que la causa directa de la pérdida de cobertura forestal se da a través de la quema intencional para despejar tierras que serán utilizadas en la agricultura, a nivel local conocido como “hatsake”, ya sea para subsistencia ó para el mercado de producción, provocando un aumento de la degradación de tierras cultivables debido a la expansión rural de la población y la tala selectiva.

Asimismo, Adeoye & Ayeni, (2011) indican que la deforestación en la zona Sur-Este de Ijesa-Ekiti, Nigeria se debe a la intensiva tala ilegal de madera, a las prácticas agrícolas y al crecimiento de los asentamientos humanos, basándose en una encuesta realizada en el área de estudio. En el mismo sentido, en las tierras bajas de Bolivia se estudiaron los procesos y condiciones que explican el uso y el cambio de la cubierta terrestre, específicamente la pérdida forestal, determinado tres causas directas que impulsan la pérdida forestal, donde la agricultura a gran escala es responsable del 53 % de la eliminación de bosques, el 19 % correspondiente a la agricultura a escala pequeña y el 27% a la ganadería (Müller *et al.*, 2014).

Sobre las ideas expuestas anteriormente, en África Occidental en la zona de Burkina Faso, Dimobe *et al.*, (2015) realizó un estudio donde se identificaron los factores conductores de la deforestación y degradación del bosque, mediante el procesamiento digital de imágenes Landsat para obtener la cartografía de los usos de suelo en las diferentes fechas y encuestas a comuneros de la zona, estos datos se analizaron para generar un modelo de regresión logística. Donde la tasa de deforestación por año fue de alrededor de 0.60 % en el periodo de 1984-2013, siendo la expansión agrícola la causa principal de la pérdida de cobertura forestal.

En el país de Colombia se analizaron los determinantes de la deforestación tropical mediante modelos lineales generales para explorar la relación entre la pérdida de forestal y los factores demográficos, socioeconómicos, los usos de suelo y variables biofísicas. Siendo la densidad de población rural, la cría de ganado, las áreas protegidas y la pendiente, las variables con mayor impacto (Armenteras *et al.*, 2013). Con la misma finalidad, el trabajo de (Casse *et al.*, 2004) estudió los modelos de regresión

lineal para determinar las causas directas e indirectas de la deforestación y su impacto en la zona suroestes de Madagascar.

Por otro lado en el Norte de Pakistan sobre el Valle de Roghani se analizaron las fuerzas socio-económicas conductoras de la deforestación, por medio de entrevistas, encuestas, grupos de discusión y participación, surgiendo de ello, que las fuerzas conductoras con mayor presencia es el cambio de régimen del uso de la tierra y los factores demográficos (Rahman *et al.*, 2014). Dentro de esta temática, en Etiopia se estudiaron los factores políticos y demográficos ante el panorama de deforestación con el objetivo de entender la extensión de la cobertura de los cambios en el tiempo y explorar las tasas de deforestación correlacionándolas con los cambios locales en los asentamientos humanos, condiciones demográficas y los cambios de uso en la tenencia de la tierra (Tadesse *et al.*, 2014).

Por otro lado, Tegegne *et al.*, (2016), estudiaron la evolución de las causas de la deforestación y degradación forestal en una cuenca forestal del Congo, indicando que los factores secundarios de mayor importancia son los institucionales y políticos. Por lo tanto, el análisis de las causas es indispensable para combatir eficazmente la deforestación y degradación de la cubierta forestal a largo plazo. Pero, el grado de incentivos económicos que proveen las políticas de conservación no es suficiente para proteger los impactos negativos de los cambios socio-económicos de acuerdo con Calvo-Alvarado *et al.*, (2009) que analizó de manera retrospectiva la dinámica social, la deforestación y restauración de los bosques en la provincia de Guanacastle, Costa Rica desde el año 1960 al 2005.

Referente a lo mencionado Dang Phan *et al.*, (2014) realizó un meta-análisis proponiendo una metodología para encontrar los factores económicos claves para evitar la deforestación en países que se encuentra en estado de desarrollo, empleando un modelo de meta-regresión, donde el objetivo principal de este análisis es evaluar y explicar la relación de costo por unidad de área forestal para evitar la deforestación y los principales factores que conducen este proceso. Igualmente, Weatherley-Singh & Gupta, (2015) realizaron un Meta-análisis entre los beneficios económicos que ofrece el mecanismo REDD+ y las fuerzas conductoras de la deforestación.

Por ello se requieren líneas base REDD+ para poder fundamentar a nivel mundial un método estandarizado que tomen en cuenta las circunstancias específicas de cada país. Hipotéticamente el

concepto de Transición Forestal implica que los cambios en la cubierta forestal de una región siguen un patrón determinable de declive y posteriormente de re-expansión a través del tiempo, lo que supone que es similar en la mayoría de los países y diferentes regiones en el mundo, lo cual indica que un número de patrones demostrados y cuantificados podrían ayudar en el establecimiento de las líneas base para el establecimiento de REDD+ en cuanto a las fuerzas conductoras que propician la deforestación (Köthke *et al.*, 2013).

2.4. Simulación de modelos espaciales mediante Tecnologías de la Información Geográfica

La superficie terrestre ha sufrido transformaciones importantes que han impulsado el cambio climático, siendo la deforestación uno de los problemas más preponderantes en la pérdida de biodiversidad (Buizer *et al.*, 2014; Onilude *et al.*, 2010), en la alteración de los ciclos hidrológicos (Panday *et al.*, 2015) y del Carbono (C) (Houghton, 2012). Deteriorando con ello a los ecosistemas y los servicios que estos brindan a la humanidad, como el agua potable, medicinas, alimentos, combustibles y por supuesto la regulación del clima (Gao *et al.*, 2017; Mohebalian & Aguilar, 2018).

Ante esta problemática se deben desarrollar medidas que contrarresten este deterioro forestal de una manera más eficaz. Ya que las cubiertas forestales son de suma importancia en el cambio climático, y deben ser considerados como sistemas biológicos con propósitos múltiples, donde uno de estos propósitos es almacenar la mayor cantidad de C y reducir las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) producidas por la deforestación. Por lo tanto, el manejo de estos recursos se debe hacer tomando en consideración diferentes aspectos relacionados con la conservación y sustentabilidad del sistema si se quiere evitar su deterioro.

Al respecto, se indica en la literatura, que no basta el monitoreo y análisis retrospectivo de los cambios, sino que es también necesario el análisis prospectivo a mediano y largo plazo (Cristián-Henríquez *et al.*, 2006a; Cristian-Henríquez *et al.*, 2006b; Jat *et al.*, 2008). Una alternativa, es optar por la generación de modelos espaciales, como lo es la simulación de escenarios futuros que nos permita conocer los procesos dinámicos en un espacio geográfico (Singh *et al.*, 2017). Tomando en cuenta que los modelos de simulación geoespacial no son una predicción, ni un pronóstico, sino que deben ser entendidos como descripciones e imágenes coherentes, consistentes de un posible estado futuro

(Patel & Rothman, 2007). Con la finalidad de estudiar diversas alternativas del futuro y comparar las consecuencias potenciales de cada una de ellas (Overmars & Verburg, 2006; Verburg *et al.*, 2006). De tal manera, que estos escenarios nos permitan reproducir un fenómeno existente en un área de estudio determinada para generar alternativas futuras y analizar las consecuencias de cada una de ellas, proporcionando información valiosa sobre el comportamiento de un sistema bajo un rango de condiciones determinadas (Veldkamp & Lambin, 2001).

En tal sentido, varios trabajos y metodologías se han desarrollado para realizar la simulación de escenarios que involucran cuestiones forestales con diferente finalidad. La gran mayoría de los modelos simulan los procesos forestales basados en criterios de tipo biofísico, socioeconómicos y de accesibilidad, con la intención de comprender los impactos asociados y poder implementar medidas para mitigar estos procesos de pérdida forestal (Thapa *et al.*, 2013).

Al respecto, algunas investigaciones han utilizado autómatas celulares como el trabajo de Killeen *et al.*, (2004), donde el objetivo fundamental fue pronosticar la deforestación 25 años a futuro, mediante la creación de modelos predictores, basados en los 25 años anteriores, a través de un estudio multitemporal de la deforestación utilizando imágenes de satélite Landsat. Por otro lado, también se han utilizado los modelos de Markov como el trabajo de (De Barroz Ferraz *et al.*, 2005), que analizaron los cambios de usos y cobertura para comprender los posibles cambios futuros en el paisaje que podrían ocurrir en los próximos 10 años, calculando las probabilidades de transición del uso del suelo para todas las transiciones posibles, generando tres escenarios diferentes que se clasificaron como: típico, intermedio y óptimo.

Por su parte, Rodríguez-Eraso, (2011) analizó el cambio en la cobertura y uso del suelo con énfasis en los procesos de deforestación en dos regiones contrastantes de Colombia: Andes y Guyana, entre 1985 y 2005. Se aplicó un enfoque espacial y temporal a partir del análisis del cambio de uso y cobertura del suelo (LULCC) para evaluar y predecir los procesos de cambios asociándolos a variables explicativas y junto con métricas del paisaje y sistemas de información geográfica se analizaron patrones y tendencias de deforestación. Utilizando enfoques espacialmente explícitos basado en probabilidades de Markov y modelos lineales generalizados (GLM).

De manera similar, utilizando markov y redes neuronales (Bax *et al.*, 2016), examinaron la relación entre la pérdida de bosque primario y las características del paisaje en la región de Ucayali, Perú. Se identificaron siete posibles variables (ríos, elevación, precipitación anual, aptitud del suelo para la agricultura, densidad de población, caminos pavimentados y caminos sin pavimentar) como posibles impulsores de la deforestación. Los resultados del modelado predicen una deforestación extensa a lo largo del río Aguaytia y en la interfaz bosque / no bosque a lo largo de la carretera pavimentada se espera que la tasa de remoción de bosque primario aumente de 4783 ha y-1 (para el período 2007-2014) a 5086 ha y-1 (para el período 2015-2025).

Asimismo, Hurato-Pidal, (2014), mediante una base de datos geográfica realizó un modelo de probabilidad de presencia de coberturas de tipo antrópico, usando la técnica de regresión logística multivariada, utilizando este modelo de probabilidad en un modelo de transición de coberturas que combina autómatas celulares y cadenas de markov, entre otros aspectos, simulando un mapas de tipo de coberturas (natural o antrópico para los años 2015 y 2020, donde se determinó la tasa de deforestación (cambio de natural hacia antrópico) en el período 1990-2008 fue de 4661 ha/año y en el período 2008-2020 sería de 3550 ha/año, indicando que la tendencia en el tiempo muestra en el mejor de los casos una disminución o por lo menos una estabilización de los procesos de deforestación.

En la temática de análisis multicriterio tenemos que Franco-Prieto, (2011), desarrollo un modelo de unidades de ordenamiento forestal a favor del uso sostenible de los bosques y de las zonas con o sin cobertura boscosa, usando análisis espacial multicriterio a través de los métodos directo y de pares. Este modelo se desarrolló a partir de tres visiones: una ambiental, una económica y por último una social. Para este caso, cuatro criterios y trece indicadores fueron establecidos para la definición de las unidades de ordenación forestal (UOF) en el departamento del Casanare, Colombia. Como resultado principal es la obtención de tres zonas de ordenación forestal: (1) Protección; (2) Producción; (3) Protección - Producción.

En México se han realizado algunos trabajos de simulación de modelos geoespaciales que involucran las cuestiones forestales, uno de los primeros trabajos en esta temática fue un mapa de riesgos de deforestación que se generó mediante una regresión entre la tasa de deforestación y algunas variables espaciales (Mas *et al.*, 1996). Así como también un ejemplo de referencia, es la investigación

desarrollada por (Pineda-Jaimes, 2010), donde generó modelos de simulación mediante técnicas combinadas de Evaluación Multi-criterio (EMC) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el objetivo de localizar áreas adecuadas para plantaciones forestales en el Estado de México.

Asimismo, en la cuenca del río Coyuquilla del Estado de Guerrero, se modeló la deforestación por medio de la técnica de pesos de evidencia, donde se determinó la probabilidad de cambio y las áreas más probables a sufrir una modificación (Osorio *et al.*, 2015). En la misma vertiente, en la Sierra Madre Oriental del estado de San Luis Potosí, se modelaron escenarios futuros empleando la técnica de autómatas celulares basada en un mapa de probabilidades, estimando que el 13% de la superficie con coberturas vegetales naturales son susceptibles al cambio y que para el 2025 el total de áreas modificadas podría triplicarse debido a las actividades agropecuarias (Sahagún-Sánchez *et al.*, 2011).

De manera similar en una región del sureste de México, se generaron dos escenarios, uno orientado a la tendencia y otro sostenible con un descenso en la tasa de cambio y una relocalización de los claros forestales en las áreas secundarias mediante las técnicas de pesos de evidencia y autómatas celulares (Mas & Flamenco, 2011). Y de igual forma, utilizando estas mismas técnicas en el estado de Oaxaca se definieron escenarios futuros de los cambios en la cubierta forestal al año 2025 (Leija-Loredo *et al.*, 2016). En tal sentido, se tiene que, al momento de estructurar un manejo forestal óptimo, es ineludible contemplar diversos criterios de tipo ambiental, económico y social. Por lo tanto, es recomendable formular modelos que permitan planificar el uso de sistemas forestales dentro del marco de la teoría de la decisión multicriterio.

2.4. Referencias

- Achard, F., Beuchle, R., Mayaux, P., Stibig, H.-J., Bodart, C., Brink, A., ... Simonetti, D. (2014). Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global Change Biology*, 20(8), 2540–2554. <https://doi.org/10.1111/gcb.12605>
- Achard, F., Boschetti, L., Brown, S., Brady, M., DeFries, R., Grassi, G., ... Souza, C. (2014). *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation*. Retrieved from <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/reports/481317>
- Achard, F., Eva, H. D., Stibig, H.-J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., & Malingreau, J.-P. (2002). Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science (New York, N.Y.)*, 297(5583), 999–1002. <https://doi.org/10.1126/science.1070656>
- Achard, F., Mollicone, D., Stibig, H.-J., Aksenov, D., Laestadius, L., Li, Z., ... Yaroshenko, A. (2006). Areas of rapid

- forest-cover change in boreal Eurasia. *Forest Ecology and Management*, 237(1–3), 322–334. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.09.080>
- Achard, F., Stibig, H.-J., Eva, H. D., Lindquist, E. J., Bouvet, A., Arino, O., & Mayaux, P. (2010). Estimating tropical deforestation from Earth observation data. *Carbon Management*, 1(2), 271–287. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.30>
- Adeoye, N. O., & Ayeni, B. (2011). Assessment of deforestation, biodiversity loss and the associated factors: case study of Ijesa-Ekiti region of Southwestern Nigeria. *GeoJournal*, 76(3), 229–243. <https://doi.org/10.1007/s10708-009-9336-z>
- Armenteras, D., Cabrera, E., Rodríguez, N., & Retana, J. (2013). National and regional determinants of tropical deforestation in Colombia. *Regional Environmental Change*, 13(6), 1181–1193. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0433-7>
- Asner, G. P., Knapp, D. E., Balaji, A., & Paez-Acosta, G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1), 033543. <https://doi.org/10.1117/1.3223675>
- Barni, P. E., Fearnside, P. M., & Graça, P. M. L. de A. (2015). Simulating Deforestation and Carbon Loss in Amazonia: Impacts in Brazil's Roraima State from Reconstructing Highway BR-319 (Manaus-Porto Velho). *Environmental Management*, 55(2), 259–278. <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0408-6>
- Barona, E., Ramankutty, N., Hyman, G., & Coomes, O. T. (2010). The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, 5(2), 024002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/024002>
- Bartalev, S. S., Kissiyar, O., Achard, F., Bartalev, S. A., & Simonetti, D. (2014). Assessment of forest cover in Russia by combining a wall-to-wall coarse-resolution land-cover map with a sample of 30 m resolution forest maps. *International Journal of Remote Sensing*, 35(7), 2671–2692. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.883099>
- Bartholomé, E., & Belward, A. S. (2005). GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9), 1959–1977. <https://doi.org/10.1080/01431160412331291297>
- Bax, V., Francesconi, W., & Quintero, M. (2016). Spatial modeling of deforestation processes in the Central Peruvian Amazon. *Journal for Nature Conservation*, 29, 79–88. <https://doi.org/10.1016/J.JNC.2015.12.002>
- Bontemps, S., Defourny, P., Bogaert, E., Arino, O., Kalogirou, & Perez, J. (2011). *GLOBCOVER 2009 - Products description and validation report*. Retrieved from <http://www.citeulike.org/group/15400/article/12770349>
- Brown, D. G., Page, S. E., Riolo, R., & Rand, W. (2004). Agent-based and analytical modeling to evaluate the effectiveness of greenbelts. *Environmental Modelling & Software*, 19(12), 1097–1109. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2003.11.012>
- Buizer, M., Humphreys, D., & De Jong, W. (2014). Climate change and deforestation: The evolution of an intersecting policy domain. *Environmental Science & Policy*, 35, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2013.06.001>
- Büttner, G., Feranec, J., Jaffrain, G., Mari, L., Maucha, G., & Soukup, T. (2004). THE CORINE LAND COVER 2000 PROJECT. *EARSel EProceedings*, 3. Retrieved from http://www.e proceedings.org/static/vol03_3/03_3_buttner2.pdf
- Calvo-Alvarado, J., McLennan, B., Sánchez-Azofeifa, A., & Garvin, T. (2009). Deforestation and forest restoration in Guanacaste, Costa Rica: Putting conservation policies in context. *Forest Ecology and Management*, 258(6), 931–940. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2008.10.035>
- Casse, T., Milhøj, A., Ranaivoson, S., & Romuald Randriamanarivo, J. (2004). Causes of deforestation in southwestern Madagascar: what do we know? *Forest Policy and Economics*, 6(1), 33–48. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(02\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(02)00084-9)
- Chhabra, A., Geist, H., Houghton, R. A., Haberl, H., Braimoh, A. K., Vlek, P. L. G., ... Lambin, E. F. (2006). Multiple Impacts of Land-Use/Cover Change. In *Land-Use and Land-Cover Change* (pp. 71–116). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7_4
- Dang Phan, T.-H., Brouwer, R., & Davidson, M. (2014). The economic costs of avoided deforestation in the developing

- world: A meta-analysis. *Journal of Forest Economics*, 20(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/J.JFE.2013.06.004>
- de Barros Ferraz, S. F., Vettorazzi, C. A., Theobald, D. M., & Ballester, M. V. R. (2005). Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: assessment and future scenarios. *Forest Ecology and Management*, 204(1), 69–85. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2004.07.073>
- DeFries, R., Achard, F., Brown, S., Herold, M., Murdiyarso, D., Schlamadinger, B., & de Souza, C. (2007). Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. *Environmental Science & Policy*, 10(4), 385–394. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2007.01.010>
- DeFries, R. S., Rudel, T., Uriarte, M., & Hansen, M. (2010). Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 3(3), 178–181. <https://doi.org/10.1038/ngeo756>
- Dimobe, K., Ouédraogo, A., Soma, S., Goetze, D., Porembski, S., & Thiombiano, A. (2015). Identification of driving factors of land degradation and deforestation in the Wildlife Reserve of Bontioli (Burkina Faso, West Africa). *Global Ecology and Conservation*, 4, 559–571. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2015.10.006>
- Duveiller, G., Defourny, P., Desclée, B., & Mayaux, P. (2008). Deforestation in Central Africa: Estimates at regional, national and landscape levels by advanced processing of systematically-distributed Landsat extracts. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 1969–1981. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2007.07.026>
- Eva, H., Carboni, S., Achard, F., Stach, N., Durieux, L., Faure, J.-F., & Mollicone, D. (2010). Monitoring forest areas from continental to territorial levels using a sample of medium spatial resolution satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(2), 191–197. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2009.10.008>
- FAO, F. A. A. O. O. T. U. N. (2015). *Global Forest Resources Assessment 2015 Desk reference*. Rome. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>
- FRA. (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010*. Rome, Italy. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i1757e.pdf>
- Franco-Prieto, C. A. (2011). *DESARROLLO DE UN MODELO BASADO EN ANÁLISIS ESPACIAL MULTICRITERIO PARA LA DETERMINACIÓN DE UNIDADES DE ORDENACIÓN FORESTAL. CASO DEPARTAMENTO DEL CASANARE*. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/5236/1/carlosandresfrancoprieto.2011.pdf>
- Friedl, M. ., McIver, D. ., Hodges, J. C. ., Zhang, X. ., Muchoney, D., Strahler, A. ., ... Schaaf, C. (2002). Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 287–302. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00078-0)
- Friedl, M. A., Sulla-Menasse, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., & Huang, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 168–182. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2009.08.016>
- FSI. (2015). *INDIAN STATE OF FOREST REPORT*. Retrieved from <http://fsi.nic.in/forest-report-2015>
- Gao, J., Gao, H., Zhou, C., & Zhang, X. (2017). The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 163, S148–S155. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.049>
- Gao, J., & Liu, Y. (2012). Deforestation in Heilongjiang Province of China, 1896–2000: Severity, spatiotemporal patterns and causes. *Applied Geography*, 35(1–2), 345–352. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2012.08.001>
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2001). *What Drives Tropical Deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*. Louvain-la-Neuve (Belgium). Retrieved from <http://www.pik-potsdam.de/~luedeke/lucc4.pdf>
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. *BioScience*, 52(2), 143–150. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:pcaudf\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:pcaudf]2.0.co;2)
- GOFC-GOLD. (2016). *A SOURCEBOOK OF METHODS AND PROCEDURES FOR MONITORING AND REPORTING*

ANTHROPOGENIC GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND REMOVALS ASSOCIATED WITH DEFORESTATION, GAINS AND LOSSES OF CARBON STOCKS IN FORESTS REMAINING FORESTS, AND FORESTATION Background and Rationale. Retrieved from <http://www.gfoi.org/methods-guidance-documentation>

- Gong, P., Wang, J., Yu, L., Zhao, Y., Zhao, Y., Liang, L., ... Chen, J. (2013). Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7), 2607–2654. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.748992>
- Graesser, J., Aide, T. M., Grau, H. R., & Ramankutty, N. (2015). Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. *Environmental Research Letters*, 10(3), 034017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/034017>
- Grinand, C., Rakotomalala, F., Gond, V., Vaudry, R., Bernoux, M., & Vieilledent, G. (2013). Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. *Remote Sensing of Environment*, 139, 68–80. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2013.07.008>
- Han, J., Hayashi, Y., Cao, X., & Imura, H. (2009). Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 91(3), 133–141. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2008.12.002>
- Hansen, M. C., & DeFries, R. S. (2004). Detecting Long-term Global Forest Change Using Continuous Fields of Tree-Cover Maps from 8-km Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Data for the Years 1982–99. *Ecosystems*, 7(7), 695–716. <https://doi.org/10.1007/s10021-004-0243-3>
- Hansen, M. C., DeFries, R. S., Townshend, J. R. G., Carroll, M., Dimiceli, C., Sohlberg, R. A., ... Sohlberg, R. A. (2003). Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. *Earth Interactions*, 7(10), 1–15. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2003\)007<0001:GPTCAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2003)007<0001:GPTCAA>2.0.CO;2)
- Hansen, M. C., Defries, R. S., Townshend, J. R. G., & Sohlberg, R. (2000). Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), 1331–1364. <https://doi.org/10.1080/014311600210209>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., & et., al. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342, 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hansen, M. C., Stehman, S. V., & Potapov, P. V. (2010). Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(19), 8650–8655. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0912668107>
- Hare, M., & Deadman, P. (2004). Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management. *Mathematics and Computers in Simulation*, 64(1), 25–40. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(03\)00118-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(03)00118-6)
- Henríquez, C., Azócar, G., & Aguayo, M. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile1. *Revista de Geografía Norte Grande*, (36), 61–74. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30003604>
- Henríquez, C., Azócar, G., & Romero, H. (2006). Monitoring and modeling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International*, 30(4), 945–964. <https://doi.org/10.1016/J.HABITATINT.2005.05.002>
- Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, R. S., Brockhaus, M., Verchot, L., ... Romijn, E. (2012). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009>
- Houghton, R. . (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(6), 597–603. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2012.06.006>
- Hurtado-Pidal, J. (2014). *Análisis, modelamiento y simulación espacial del cambio de cobertura del suelo, entre las áreas naturales y las de origen antrópico en la provincia de Napo (Ecuador), para el período 1990-2020*. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/37479>

- INPE. (2015). INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Retrieved January 17, 2019, from http://www.inpe.br/dados_abertos/
- INPE. (2018). PRODES — Coordenação-Geral de Observação da Terra. Retrieved November 21, 2018, from <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>
- Jaboury, G. (2013). Deforestation and Land Clearing. In *Encyclopedia of Biodiversity* (2nd Edition, pp. 447–456). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780123847201/encyclopedia-of-biodiversity>
- Jantz, C. A., Goetz, S. J., Donato, D., & Claggett, P. (2010). Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2009.08.003>
- Jat, M. K., Garg, P. K., & Khare, D. (2008). Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(1), 26–43. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2007.04.002>
- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9–20. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.06.014>
- Killeen, T., Villegas, Z., & Soria, L. (2004). *TENDENCIAS DE LA DEFORESTACION EN LOS MUNICIPIOS DE SAN JAVIER Y CONCEPCION, SANTA CRUZ - BOLIVIA*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Liliana_Soria/publication/228712759_TENDENCIAS_DE_LA_DEFORESTACION_EN_LOS_MUNICIPIOS_DE_SAN_JAVIER_Y_CONCEPCION_SANTA_CRUZ-BOLIVIA/links/02e7e515b31e2412c8000000.pdf
- Köthke, M., Leischner, B., & Elsasser, P. (2013). Uniform global deforestation patterns — An empirical analysis. *Forest Policy and Economics*, 28, 23–37. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2013.01.001>
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). DYNAMICS OF LAND USE AND LAND COVER CHANGE IN TROPICAL REGIONS. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Lambin, E. F., & Meyfroidt, P. (2010a). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27(2), 108–118. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2009.09.003>
- Lambin, E. F., & Meyfroidt, P. (2010b). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27(2), 108–118. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2009.09.003>
- Lehmann, E. A., Caccetta, P., Lowell, K., Mitchell, A., Zhou, Z.-S., Held, A., ... Tapley, I. (2015). SAR and optical remote sensing: Assessment of complementarity and interoperability in the context of a large-scale operational forest monitoring system. *Remote Sensing of Environment*, 156, 335–348. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.09.034>
- Leija-Loredo, E., Reyes-Hernandez, H., Reyes-Perez, O., Flores-Flores, J., & Sahagún-Sánchez, F. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 22(1), 125–140. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712016000100125&script=sci_arttext&tlng=pt
- Lepers, E., Lambin, E. F., Janetos, A. C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., & Scholes, R. J. (2005). A Synthesis of Information on Rapid Land-cover Change for the Period 1981–2000. *BioScience*, 55(2), 115–124. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0115:asoior\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0115:asoior]2.0.co;2)
- Lesschen, J. P., Verburg, P. H., & Staal, S. J. (2005). *Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems*. Retrieved from https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/42477425/Statistical_methods_for_analysing_the_sp20160209-16981-9f63g5.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1547681465&Signature=7ATlgtJ9y%2BQ%2Fv3Z9pG69cSmQACM%3D&response-content-disposition=inline
- Lim, k. (2002). Agent based simulations of household decision making and land use change near Altamira, Brazil. In

- Integrating Geographic Information Systems and Agent-based Modeling Techniques for Understanding Social and Ecological Processes*. (p. 342). Oxford University Press. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=0HBMhWxLp5gC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Agent+based+simulations+of+household+decision+making+and+land+use+change+near+Altamira,+Brazil.+En+O.+U.+Press,+Integrating+geographic+information+systems+and+agent-based+modell>
- Long, Y., Mao, Q., & Dang, A. (2009). Beijing urban development model: Urban growth analysis and simulation. *Tsinghua Science and Technology*, 14(6), 782–794. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(09\)70149-X](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70149-X)
- Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L., & Merchant, J. W. (2000). Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), 1303–1330. <https://doi.org/10.1080/014311600210191>
- MacDicken, K. G. (2015). Global Forest Resources Assessment 2015: What, why and how? *Forest Ecology and Management*, 352, 3–8. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.02.006>
- Manson, S. M., & Evans, T. (2007). Agent-based modeling of deforestation in southern Yucatan, Mexico, and reforestation in the Midwest United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(52), 20678–20683. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705802104>
- Mas, F.-J., Sorani, V., & Alvarez, R. (1996). Elaboración de un modelo de simulación del proceso de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 43–57. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/569/56909907.pdf>
- Mas, J.-F., & Flamenco, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*. Retrieved from http://www.geotropico.org/NS_5_1_Mas-Flamenco.pdf
- MATHER, A. S., & NEEDLE, C. L. (2000). The relationships of population and forest trends. *The Geographical Journal*, 166(1), 2–13. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2000.tb00002.x>
- Menon, S., Denman, K., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P., ... Holland, E. (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry (pp. 167–191). United States. <https://doi.org/10.1002/9781118971772.ch9>
- Meyfroidt, P., Rudel, T. K., & Lambin, E. F. (2010). Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(49), 20917–20922. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014773107>
- Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Pompa-García, M., & Aguirre-Salado, C. A. (2012). Modeling susceptibility to deforestation of remaining ecosystems in North Central Mexico with logistic regression. *Journal of Forestry Research*, 23(3), 345–354. <https://doi.org/10.1007/s11676-012-0230-z>
- Mohebalian, P. M., & Aguilar, F. X. (2018). Design of tropical forest conservation contracts considering risk of deforestation. *Land Use Policy*, 70, 451–462. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2017.11.008>
- Mollicone, D., Achard, F., Federici, S., Eva, H. D., Grassi, G., Belward, A., ... Schulze, E.-D. (2007). An incentive mechanism for reducing emissions from conversion of intact and non-intact forests. *Climatic Change*, 83(4), 477–493. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9231-2>
- Monjardin, S., Pacheco, C., Plata, W., Aguilar, J., & Corrales, G. (2014). Análisis de la deforestación en Sinaloa, México, mediante técnicas de Percepción Remota y Sistema de Información Geográfica, periodo. Medellín, Colombia. Retrieved from <https://selper.org.co/papers-XVI-Simposio/Fotogrametria-PDI-Fusion-de-datos/FP3-Analisis-de-la-deforestacion-en-Sinaloa-Mexico.pdf>
- Müller, H., Griffiths, P., & Hostert, P. (2016). Long-term deforestation dynamics in the Brazilian Amazon—Uncovering historic frontier development along the Cuiabá–Santarém highway. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 44, 61–69. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2015.07.005>
- Müller, R., Larrea-Alcázar, D., Cuéllar, S., & Espinoza, S. (2014). Proximate causes of recent deforestation (2000–2010) in the Bolivian lowlands and modeling of future scenarios. *Ecología En Bolivia*, 49(1). <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.06.019>

- Munawar, S., Khokhar, M. F., & Atif, S. (2015). Reducing emissions from deforestation and forest degradation implementation in northern Pakistan. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 102, 316–323. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2015.02.027>
- Munthali, K. G., & Murayama, Y. (2015). Modeling deforestation in Dzalanyama Forest Reserve, Lilongwe, Malawi: a multi-agent simulation approach. *GeoJournal*, 80(5), 743–757. <https://doi.org/10.1007/s10708-014-9592-4>
- Nunes de Oliveira, S., Abílio de Carvalho Júnior, O., Trancoso Gomes, R. A., Fontes Guimarães, R., & McManus, C. M. (2017). Deforestation analysis in protected areas and scenario simulation for structural corridors in the agricultural frontier of Western Bahia, Brazil. *Land Use Policy*, 61, 40–52. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2016.10.046>
- Onilude, Q., Awosusi, B., & Ige, P. (2010). Climate Change and Biodiversity: Conservation. In *Biodiversity, Development Biodiversity, Development and Poverty Alleviation. Seminar Proceedings of Nigeria Tropical Biology Association (NTBA)* (pp. 122–126). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Matthew_Ogwu/publication/288331484_Conserving_Biodiversity_Even_in_Poverty_The_African_Experience/links/569b905808aeeea985a56b96/Conserving-Biodiversity-Even-in-Poverty-The-African-Experience.pdf#page=122
- Osorio, L. P., Mas, J.-F., Guerra, F., & Maass, M. (2015). Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México Analysis and modeling of deforestation processes: a case study in the Coyuquilla River Basin, 88, 60–74. <https://doi.org/10.14350/rig.43853>
- OTCA. (2015). *PROYECTO: MONITOREO DE LA DEFORESTACIÓN, APROVECHAMIENTO FORESTAL Y CAMBIOS DE USO DEL SUELO EN EL BOSQUE PANAMAZÓNICO*. Retrieved from <https://docplayer.es/10047348-Proyecto-monitoreo-de-la-deforestacion-aprovechamiento-forestal-y-cambios-de-uso-del-suelo-en-el-bosque-panamazonico.html>
- Overmars, K. P., & Verburg, P. H. (2006a). Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines. *Agricultural Systems*, 89(2–3), 435–456. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2005.10.006>
- Overmars, K. P., & Verburg, P. H. (2006b). Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines. *Agricultural Systems*, 89(2–3), 435–456. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2005.10.006>
- Pacheco, C., Aguado, I., & Mollicone, D. (2011). LAS CAUSAS DE LA DEFORESTACIÓN EN VENEZUELA: UN ESTUDIO RETROSPECTIVO. *BioLlania*. Retrieved from https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30540296/Pacheco_et_al_%282011%29_Deforestacion_Venezuela.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1535400628&Signature=zWyvXFbsU0N9%2FqLnMb1KCrL1RCY%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filena
- Pacheco, C. E., Aguado, M. I., & Mollicone, D. (2014). Identification and characterization of deforestation hot spots in Venezuela using MODIS satellite images. *Acta Amazonica*, 44(2), 185–196. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672014000200004>
- Pacheco, E., Camargo, C., Arias, F., Gutiérrez, N., Gaméz, L. E., & Vilanova, E. (2015). Utilización del Sistema TerraAmazon para la evaluación de cambios en la cobertura forestal en una cuenca de los Andes venezolanos (1988–2014). Retrieved from <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0464.pdf>
- Pan, W. K. Y., & Bilsborrow, R. E. (2005). The use of a multilevel statistical model to analyze factors influencing land use: a study of the Ecuadorian Amazon. *Global and Planetary Change*, 47(2–4), 232–252. <https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2004.10.014>
- Panday, P. K., Coe, M. T., Macedo, M. N., Lefebvre, P., & Castanho, A. D. de A. (2015). Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 523, 822–829. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.02.018>
- Patel, M., & Rothman, D. S. (2007). Participatory scenario construction in land use analysis: An insight into the experiences created by stakeholder involvement in the Northern Mediterranean. *Land Use Policy*, 24(3), 546–561. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2006.02.005>

- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., ... Wagner, F. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Institute for Global Environmental Strategies. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20083162304>
- Pineda Jaimes, N. B. (2010). *Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el estado de México mediante tecnologías de la información geográfica*. Universidad de Alcalá, España. Retrieved from <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/9705>
- Potapov, P. V., Turubanova, S. A., Hansen, M. C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., ... Justice, C. O. (2012). Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000–2010, with Landsat ETM + data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 106–116. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2011.08.027>
- Rahman, F., Haq, F., Tabassum, I., & Ullah, I. (2014). Socio-economic drivers of deforestation in Roghani Valley, Hindu-Raj Mountains, Northern Pakistan. *Journal of Mountain Science*, 11(1), 167–179. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2770-x>
- RAMANKUTTY, N., GIBBS, H. K., ACHARD, F., DEFRIES, R., FOLEY, J. A., & HOUGHTON, R. A. (2007). Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation. *Global Change Biology*, 13(1), 51–66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01272.x>
- Ramankutty, N., Graumlich, L., Achard, F., Alves, D., Chhabra, A., DeFries, R. S., ... Turner, B. L. (2006). Global Land-Cover Change: Recent Progress, Remaining Challenges. In *Land-Use and Land-Cover Change* (pp. 9–39). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7_2
- Reiche, J., Verbesselt, J., Hoekman, D., & Herold, M. (2015). Fusing Landsat and SAR time series to detect deforestation in the tropics. *Remote Sensing of Environment*, 156, 276–293. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.10.001>
- Rodríguez-Eraso, N. (2011). *Land-cover and land-use change and deforestation in Colombia: spatial dynamics, drivers and modelling*. TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). Universitat Autònoma de Barcelona. Retrieved from <https://www.tesisenred.net/handle/10803/84004>
- Romijn, E., Lantican, C. B., Herold, M., Lindquist, E., Ochieng, R., Wijaya, A., ... Verchot, L. (2015). Assessing change in national forest monitoring capacities of 99 tropical countries. *Forest Ecology and Management*, 352, 109–123. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.06.003>
- RUDEL, T. K., DEFRIES, R., ASNER, G. P., & LAURANCE, W. F. (2009). Changing Drivers of Deforestation and New Opportunities for Conservation. *Conservation Biology*, 23(6), 1396–1405. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01332.x>
- Sahagún-Sánchez, F. J., Reyes-Hernández, H., Flores, J. L. F., & Vargas, L. C. (2011). Modelización de escenarios de cambio potencial en la vegetación y el uso de suelo en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí, México. *Journal of Latin American Geography*, 10, 65–86. <https://doi.org/10.2307/23209585>
- Seebach, L., McCallum, I., Fritz, S., Kindermann, G., Leduc, S., Böttcher, H., & Fuss, S. (2012). Choice of forest map has implications for policy analysis: A case study on the EU biofuel target. *Environmental Science & Policy*, 22, 13–24. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2012.04.010>
- Shehzad, K., Qamer, F. M., Murthy, M. S. R., Abbas, S., & Bhatta, L. D. (2014). Deforestation trends and spatial modelling of its drivers in the dry temperate forests of northern Pakistan — A case study of Chitral. *Journal of Mountain Science*, 11(5), 1192–1207. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2932-x>
- Singh, S., Reddy, C. S., Pasha, S. V., Dutta, K., Saranya, K. R. L., & Satish, K. V. (2017). Modeling the spatial dynamics of deforestation and fragmentation using Multi-Layer Perceptron neural network and landscape fragmentation tool. *Ecological Engineering*, 99, 543–551. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.11.047>
- Soares-Filho, B. S., Coutinho Cerqueira, G., & Lopes Pennachin, C. (2002). dinamica—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217–235. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00059-5)
- Sudhakar Reddy, C., Rajashekar, G., Hari Krishna, P., Jha, C. S., & Dadhwal, V. K. (2015). Multi-source and multi-date mapping of deforestation in Central India (1935–2010) and its implication on standing phytomass carbon pool.

- Ecological Indicators*, 57, 219–227. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2015.05.003>
- Tadesse, G., Zavaleta, E., Shennan, C., & FitzSimmons, M. (2014). Policy and demographic factors shape deforestation patterns and socio-ecological processes in southwest Ethiopian coffee agroecosystems. *Applied Geography*, 54, 149–159. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2014.08.001>
- Tateishi, R., Uriyangqai, B., Al-Bilbisi, H., Ghar, M. A., Tsend-Ayush, J., Kobayashi, T., ... Sato, H. P. (2011). Production of global land cover data – GLCNMO. *International Journal of Digital Earth*, 4(1), 22–49. <https://doi.org/10.1080/17538941003777521>
- Tegegne, Y. T., Lindner, M., Fobissie, K., & Kanninen, M. (2016). Evolution of drivers of deforestation and forest degradation in the Congo Basin forests: Exploring possible policy options to address forest loss. *Land Use Policy*, 51, 312–324. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2015.11.024>
- Thapa, R. B., Shimada, M., Watanabe, M., Motohka, T., & Shiraishi, T. (2013). L-band SAR data and spatially explicit model to analyse forest loss between 2007 and 2030 in central Sumatra. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/6705022>
- Tsendbazar, N. E., de Bruin, S., & Herold, M. (2015). Assessing global land cover reference datasets for different user communities. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 93–114. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2014.02.008>
- UNFCCC. (1992). *UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- Unfccc. (2014). *Information for Participants - COP 20/CMP 10*. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/information_for_participants_cop20.pdf
- van der Werf, G. R., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., ... Randerson, J. T. (2009). CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2(11), 737–738. <https://doi.org/10.1038/ngeo671>
- Van Laake, P. E., & Sánchez-Azofeifa, G. A. (2004). Focus on deforestation: zooming in on hot spots in highly fragmented ecosystems in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 102(1), 3–15. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2003.07.001>
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., & De Bievre, B. (2003). Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. *Geomorphology*, 52(3–4), 299–315. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00263-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00263-5)
- Veldkamp, A., & Lambin, E. . (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1–3), 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2)
- Verburg, P. H., Overmars, K. P., Huigen, M. G. A., de Groot, W. T., & Veldkamp, A. (2006). Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. *Applied Geography*, 26(2), 153–173. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2005.11.005>
- Viana, I. G., Valiela, I., Martinetto, P., Monteiro Pierce, R., & Fox, S. E. (2015). Isotopic studies in Pacific Panama mangrove estuaries reveal lack of effect of watershed deforestation on food webs. *Marine Environmental Research*, 103, 95–102. <https://doi.org/10.1016/J.MARENVRES.2014.10.003>
- Walsh, S. J., Crawford, T. W., Welsh, W. F., & Crews-Meyer, K. A. (2001). A multiscale analysis of LULC and NDVI variation in Nang Rong district, northeast Thailand. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1–3), 47–64. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00202-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00202-X)
- Walsh, S., Messina, J. P., Mena, C. F., Malanson, G. P., & Page, P. H. (2008). Complexity theory, spatial simulation models, and land use dynamics in the Northern Ecuadorian Amazon. *Geoforum*, 39(2), 867–878. <https://doi.org/10.1016/J.GEOFORUM.2007.02.011>
- Weatherley-Singh, J., & Gupta, A. (2015). Drivers of deforestation and REDD+ benefit-sharing: A meta-analysis of the (missing) link. *Environmental Science & Policy*, 54, 97–105. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2015.06.017>

- Wibowo, D. H., & Byron, R. N. (1999). Deforestation mechanisms: a survey. *International Journal of Social Economics*, 26(1/2/3), 455–474. <https://doi.org/10.1108/03068299910230099>
- Xuejun Wang, Yuxing Zhang, Enping Yan, Guosheng Huang, Chunxiang Cao, & Xiliang Ni. (2014). Deforestation area estimation in China based on Landsat data. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 4254–4256). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947428>
- Zinner, D., Wygoda, C., Razafimanantsoa, L., Rasoloarison, R., T. Andrianandrasana, H., Ganzhorn, J. U., & Torkler, F. (2014). Analysis of deforestation patterns in the central Menabe, Madagascar, between 1973 and 2010. *Regional Environmental Change*, 14(1), 157–166. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0475-x>

Capítulo III. Descripción y contexto geográfico de la cuenca Pacífico Norte

3.1. Ubicación de la cuenca Pacífico Norte

La Región Hidrológica Administrativa III o Cuenca Pacífico Norte presenta una gran variedad climática y geográfica comprendiendo la totalidad del estado de Sinaloa y parte de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Nayarit. Esta cuenca se encuentra en la parte Noroeste de México sobre la Sierra Madre Occidental y la Llanura Costera del Pacífico entre las latitudes $21^{\circ} 38'$ y $21^{\circ} 12'$ norte y longitudes $109^{\circ} 28'$ y $103^{\circ} 20'$ Oeste. Posee una superficie de $152,013 \text{ km}^2$, que representa el 8.0 % de la superficie total del País (Figura 1). Y su delimitación natural comprende las regiones hidrológicas “Sinaloa y Presidio-San Pedro” que abarcan una superficie $154,563 \text{ Km}^2$, cuyas precipitaciones medias anuales son de 716 y 815 mm, respectivamente. Donde, estas regiones presentan un valor muy parecido al nacional de 760 mm de acuerdo con las Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2012, 2014b).

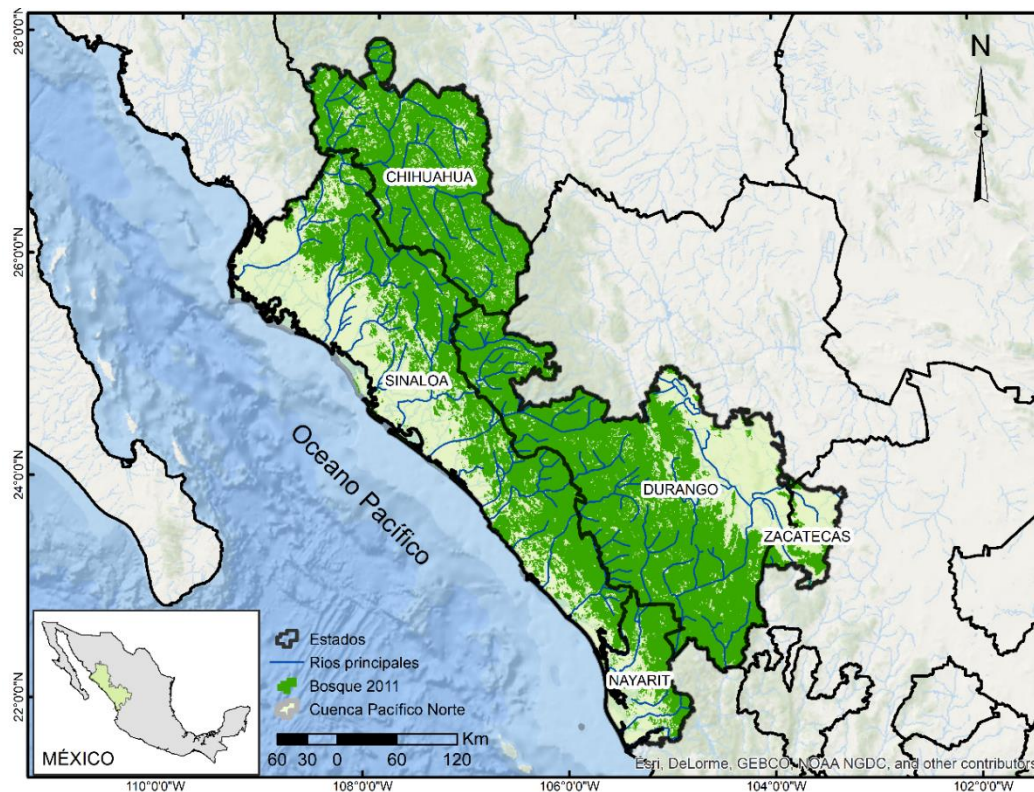


Figura 1. Ubicación de la Cuenca Hidrográfica Pacífico Norte. Fuente: Elaboración propia

3.2. Aspecto físico natural de la cuenca Pacífico Norte

3.2.1. Clima

La cuenca del Pacífico Norte está conformada por 15 unidades climáticas, de las cuales predomina el clima templado subhúmedo y cálido subhúmedo (Figura 2). Su temperatura media anual presenta fuertes variaciones, aunque oscila entre los 10° y los 26°C. Se puede observar que en la porción norte de la región se presentan temperaturas más cálidas y secas, aunque en las partes serranas pueden presentarse temperaturas bajo cero en ciertas épocas del año. A medida que se va más hacia el sur, la temperatura se hace más templada y húmeda, con temperaturas medias de 12 a 18°C, máximas de 22°C y bajo cero en las zonas serranas en épocas de invierno.

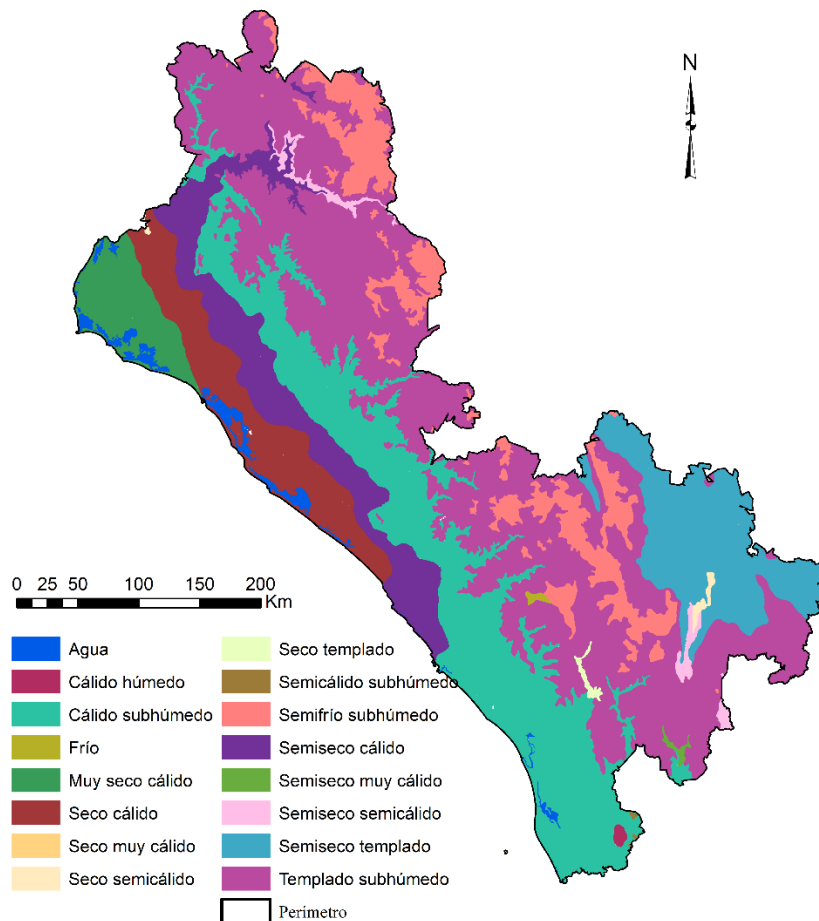


Figura 2. Unidades climáticas. Fuente: INEGI, (2001a)

3.2.2. Geología

Geológicamente la cuenca Pacífico Norte, está conformada por 5 tipos de rocas, de las cuales se observa que el 67.9% de la región contempla roca ígnea extrusiva, el 7% roca sedimentaria, el 5% de roca ígnea intrusiva, el 1.60% de metamórfica y el 0.31% de volcanosedimentaria (Figura 3).

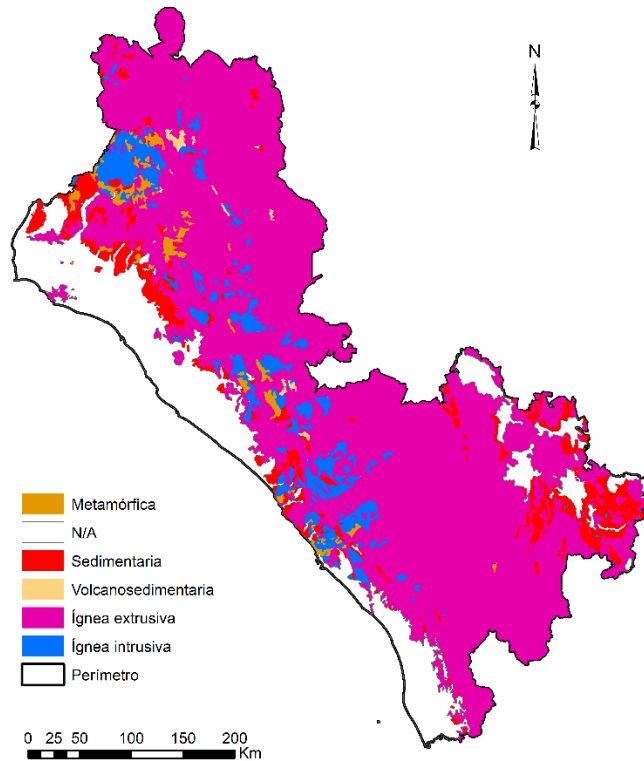


Figura 3. Tipos de roca. Fuente: SGM, (2005)

3.2.3. Geomorfología

En cuanto a la morfología de la cuenca, se encuentra caracterizada por cuatro paisajes fisiográficos, de los cuales el de la Sierra Madre Occidental es el de más predominio con el 79.62% del territorio de la cuenca, y una pequeña parte en la transición de esta hacia la Llanura Costera del Pacífico (17.04%), así como también contempla el 1.60% de la Mesa del Centro y el 0.06% del Eje neovolcánico (Figura 4).

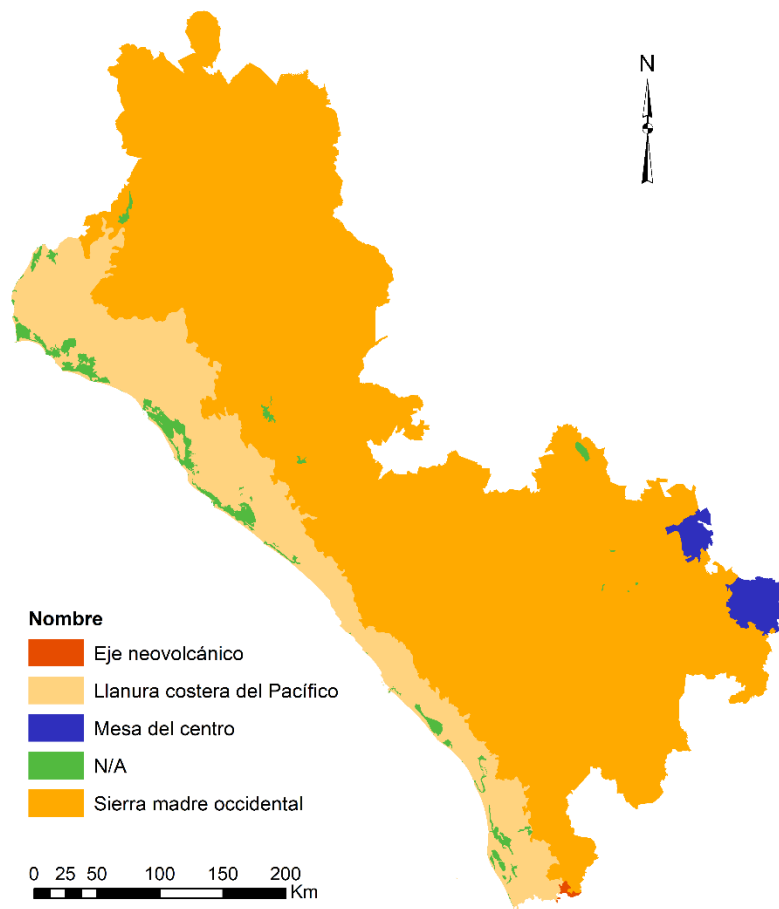


Figura 4. Provincias Fisiográficas. Fuente: INEGI, (2001c)

3.2.4. Red de drenaje

La hidrografía de la cuenca es caracterizada por corrientes que descienden de la Sierra Madre Occidental y desembocan en el Océano Pacífico, las principales corrientes superficiales las representan los ríos: Fuerte, Sinaloa, Mocorito, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quelite, Presidio, Baluarte, Cañas, Acaponeta y San Pedro, que además cuenta con grupos importantes de corrientes superficiales que descargan a esteros o al mar (Figura 5).

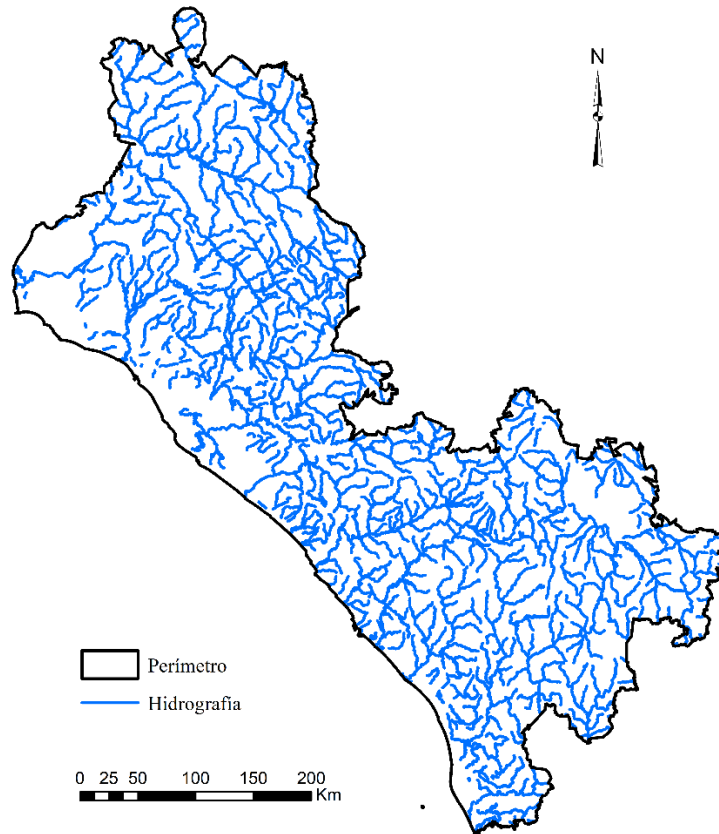


Figura 5. Hidrografía de la cuenca. Fuente: INEGI, (1998)

3.1.5. Suelos

En relación con la edafología de los suelos, se tiene que el 26.83 % está cubierto de suelos de tipo Leptosol, porcentualmente le sigue el suelo de tipo Regosol 17.36 %, el Luvisol y el Phaeozem con 15.15 % y 14.50 %, Vertisol, Cambisol, Soloncha, Umbrisol con el 7.89%, 6.75%, 2.71% y 1.54%, correspondientemente, los otros 12 tipos de suelo restantes contemplan de manera individual menos del 1% con respecto a la superficie de la cuenca (Figura 6).

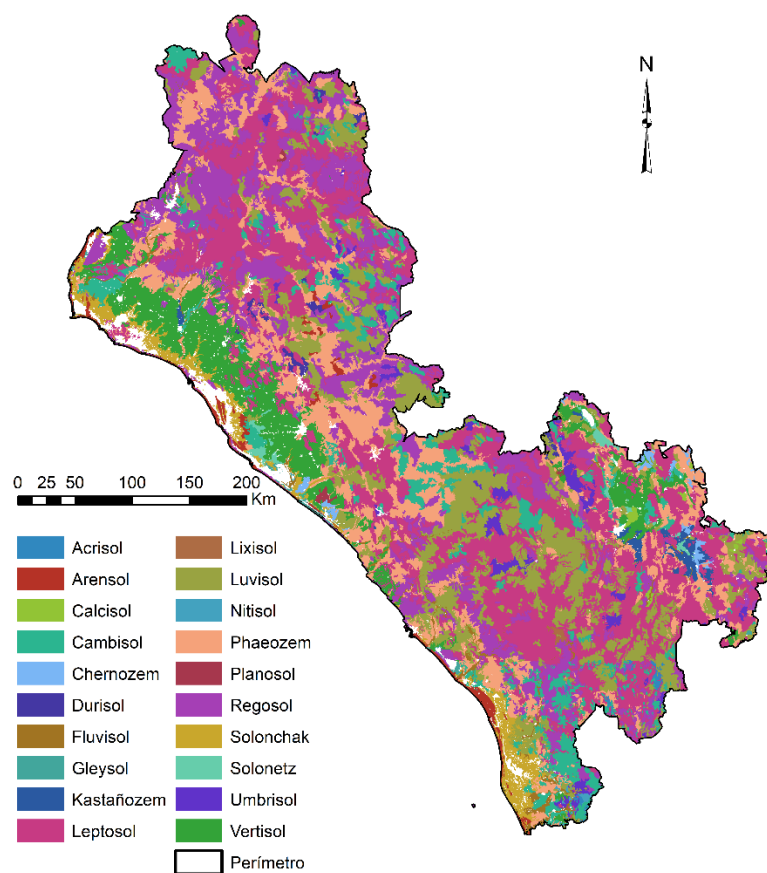


Figura 6. Tipos de suelo. Fuente: INEGI, (2001c)

Gran parte de los suelos de la Sierra Madre Occidental que contempla la cuenca Pacífico Norte, son suelos húmedos con mayor o igual a seis meses de humedad en el año, mientras que los suelos con menor cantidad de meses de humedad en el año se encuentran en la Llanura del Pacífico, que son de cero a seis meses (Figura 7).

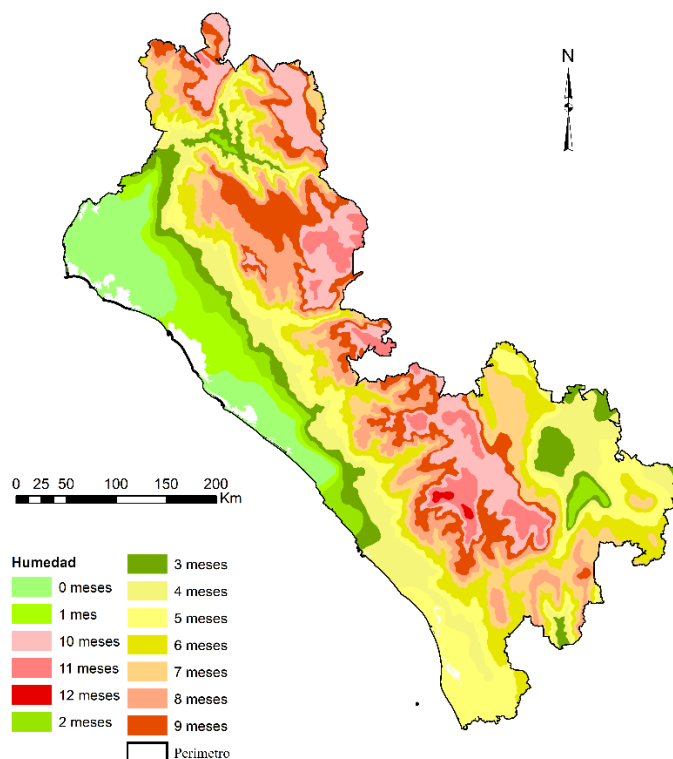


Figura 7. Humedad del suelo. Fuente: INEGI, (2001d)

3.3. Aspecto Socioeconómicos de la cuenca Pacífico Norte

3.3.1. Municipios

Administrativamente, la región contempla 51 municipios: 18 en Sinaloa, 8 en Chihuahua, 16 en Durango, 7 en Nayarit y 2 en Zacatecas (Figura 8), mismos que comparten procesos socio-ecológicos entre sí, ya que las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados naturalmente por un parteaguas, donde se concentran todos los escurrimientos que confluyen y desembocan en un punto o puntos en común. En estos territorios hay una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología y/o mercados) y las instituciones (organización social, cultura, reglas y/o leyes) (SEMARNAT, 2013).

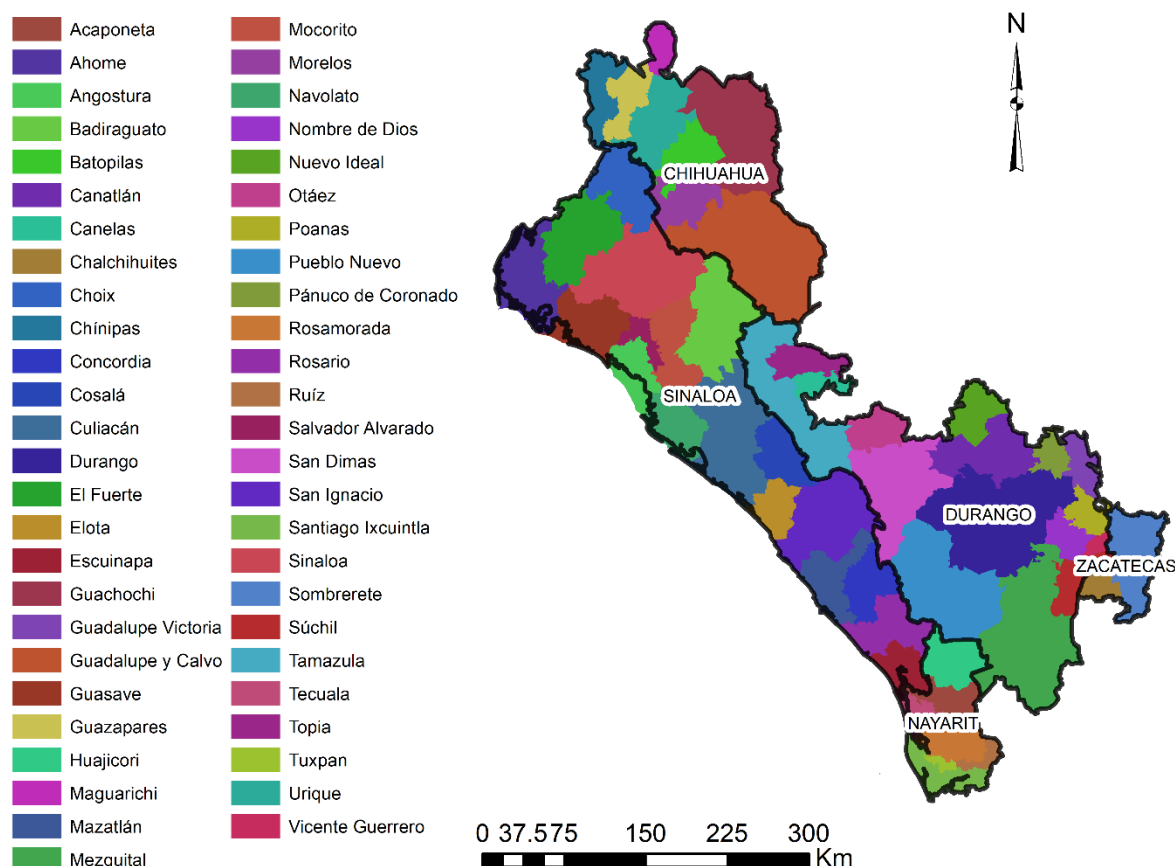


Figura 8. Municipios. Fuente: INEGI, (2012)

3.3.2. Población

Se estima que aproximadamente 4.466 millones de habitantes viven distribuidas en esta región, donde los municipios con mayor población son: Culiacán (905,265), Durango (654876), Mazatlán (502,547), Ahome (449,215) y Guasave (295,353) (CONAGUA, 2014a). Y de acuerdo con el índice socioeconómico de Desarrollo Humano que contempla parámetros como el ingreso, educación y salud nos indica que en casi toda la región de la cuenca el Índice de Desarrollo Humano es de nivel medio, excepto en el caso de los municipios de Chihuahua, donde el índice es de nivel bajo. El Producto Interno Bruto (PIB) de los municipios que integran la cuenca hidrográfica ascendió en el año 2008 a 266 mil 887.9 millones de pesos, que correspondió a 3.1% del PIB total nacional (CONAGUA, 2012).

En tal sentido, resulta importante destacar que los municipios del estado de Sinaloa y los del estado de Durango que pertenecen a la cuenca, contribuyen con el 87.3 % del total del PIB de la Región, debido a las condiciones ambientales y su fisiografía que son propicias para el desarrollo de la

agricultura, siendo una de las zonas con mayor producción de grano y ganado en el país. No obstante, las zonas pesqueras más importantes a nivel nacional se ubican en los litorales de Sinaloa y el Norte de Nayarit, con mayor producción y superficie abierta al cultivo de las especies de camarón, contemplando cerca de 350,000 hectáreas dedicadas a la acuicultura, incluyendo las aguas costeras protegidas, aptas para el aprovechamiento de diversos mari-cultivos como el ostión, el mejillón y varias especies de peces marinas.

La densidad de población a nivel nacional es de 61 habitantes por kilómetro cuadrado, mientras que la cuenca presenta 29 hab/km² de acuerdo con la encuesta intercensal 2015 (INEGI, 2016a), la cual no ha cambiado mucho, ya que en el año 2000 presentaba 25 hab/km², pasando de contemplar 3,830,294 de habitantes, a 4,177,398 en el 2010 y 4,466,192 en el 2015 (Figura 9).

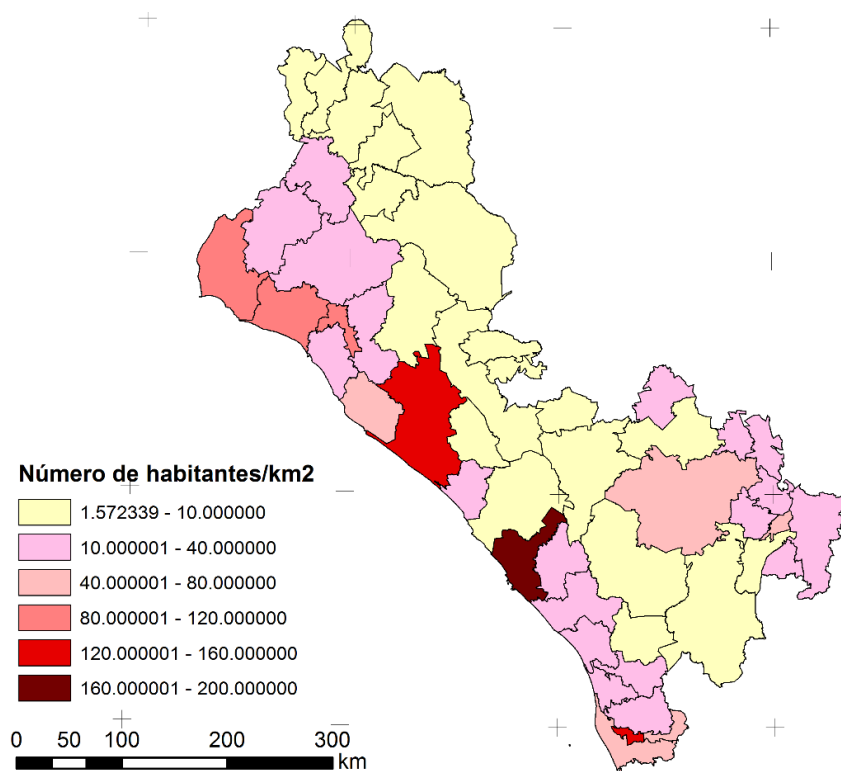


Figura 9. Densidad de la población a nivel municipal. Fuente: Elaboración propia, a partir de INEGI (2016a)

Por lo tanto, los municipios con mayor densidad de población se encuentran cercanos a la zona costera, siendo Mazatlán el municipio con mayor densidad de población con 198 hab/km², seguido de los municipios de Culiacán con 143 hab/km², Tuxpan con 121 hab/km² y Ahome con 111 hab/km², concurriendo que el municipio con mayor número de habitantes de la cuenca es Culiacán. Por lo

contrario, los municipios de Maguarichi, Morelos, Otáez y San Dimas contemplan menos de 4 hab/km².

3.3.3. Migración

Respecto a la migración, se puede decir que este fenómeno se ha ido incrementando a nivel mundial, nacional y regional, ya que en 1990 se estimó que había alrededor de 153 millones de personas que no vivían en su país natal, cifra que paso a tener 244 millones en el 2015 (Figura 10). Actualmente, México se encuentra en el segundo país con mayor número de migrantes con 12.3 millones, donde la mayoría de los migrantes se encuentra en Estados Unidos (CONAPO, 2016).

Particularmente, la zona de estudio del presente trabajo presenta un índice absoluto de intensidad migratoria entre nivel medio y alto, ya que los estados de Sinaloa y Chihuahua indican un nivel medio, Durango un nivel alto y Nayarit un nivel muy alto de migración (CONAPO, 2016). Y a nivel local, tenemos que los municipios de Tamazula, Chalchihuites, Morelos y Chínipas son los que presentan mayor porcentaje de migrantes con 33 %, 22 %, 18 % y 18 %, respectivamente (Figura 10). Más aun cabe destacar que estos municipios no sobrepasan una densidad de población de 15 hab/km² y no superan los 30,000 habitantes.

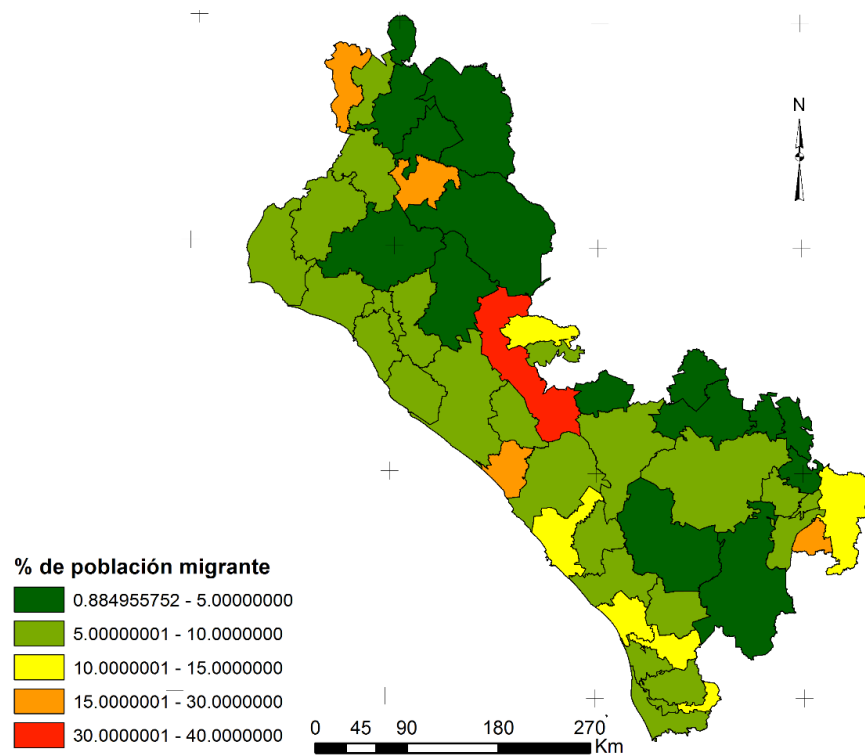


Figura 10. Porcentaje de población migrante por municipio. Fuente: Elaboración propia, a partir de CONAPO (2016).

3.3.4. Actividad económica

Otro punto importante en esta descripción es la economía en la región, siendo el análisis de las características ocupacionales de los trabajadores de acuerdo con la actividad laboral que desempeña una población. La actividad económica, considera la población económicamente activa ocupada respecto a la población total de cada municipio. Tomando en cuenta a las personas de 12 años en adelante que realizan algún tipo de trabajo o actividad económica a cambio de un pago o algún otro beneficio económico (INEGI, 2016a). En tal sentido, los sectores de actividad económica se dividen en: primario, que contempla la agricultura, ganadería, silvicultura, pesca y extracción forestal; el secundario, que lo integran las actividades de minería, industrias manufactureras, electricidad, agua y construcción; y el sector terciario, en el que se desarrollan actividades de comercio, transporte, comunicaciones, de mantenimiento, de administración pública, entre otros servicios.

En síntesis, se puede decir que los municipios de Elota, Mazatlán, Culiacán, Navolato y Durango son los que presentan mayor actividad mercantil, con tasas de actividad económica que van de 39.34 al

42.83, las cuales son muy variables, ya que en Elota y Navolato predomina el sector primario, mientras que en Mazatlán, Culiacán y Durango imperan las actividades del sector terciario (Figura 11).

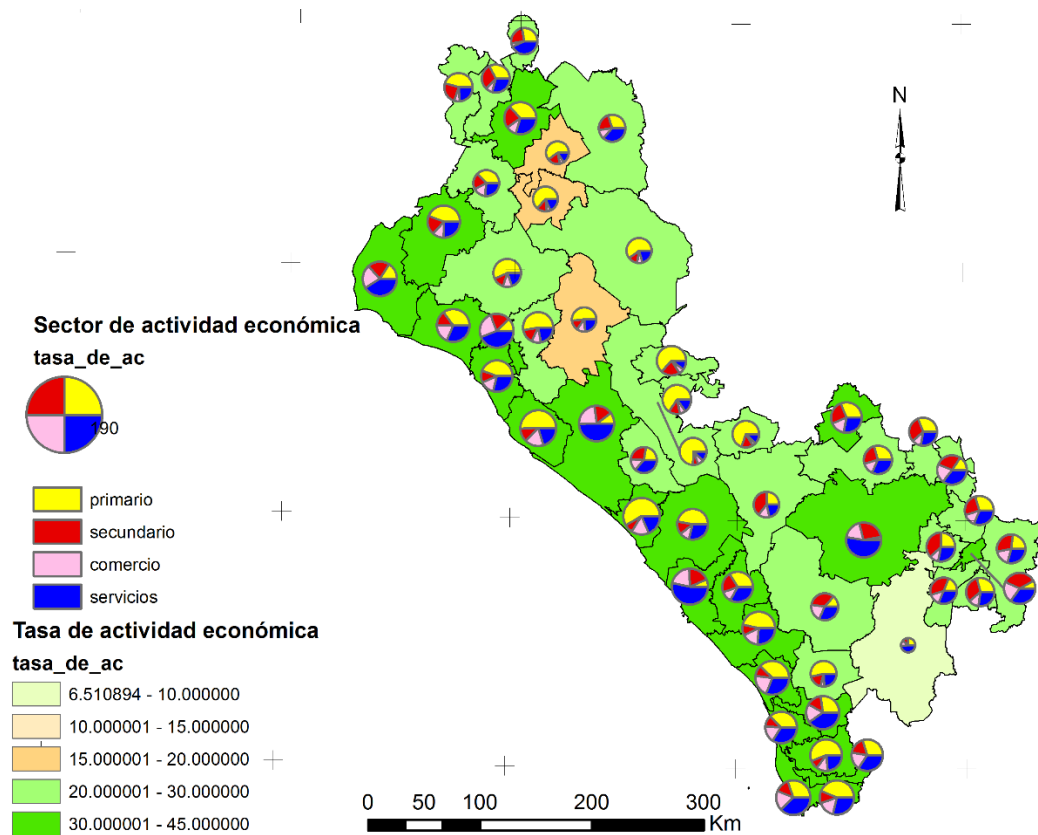


Figura 11.Tasa de actividad económica y sector de actividad del 2015. Fuente: Elaboración propia, a partir de INEGI (2016a)

3.3.5. Uso del suelo

Su población estimada es de 4.466 millones de habitantes de acuerdo con las estadísticas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (CONAGUA, 2014b; INEGI, 2016a). Los centros urbanos con mayor población son: Culiacán, Durango, Mazatlán, Los Mochis, Guasave y Salvador Alvarado, ya que la suma de habitantes de estas ciudades representa aproximadamente el 50 % de la población que habita en la Cuenca. En tal sentido, el aumento de la población y sus actividades socioeconómicas han provocado cambios en la ocupación y uso del suelo en algunas regiones de la cuenca, mismos que han inducido efectos negativos sobre los ecosistemas, como la degradación de los suelos, disminución de los mantos acuíferos al alterarse el ciclo del agua, pérdida de la biodiversidad, etc.

Debido a esto, gran parte de la superficie que originalmente era ocupada por bosque y selva, ahora se desarrollan actividades como agricultura y ganadería, exponiendo el suelo a la degradación y erosión, así como también se acostumbra a desmontar áreas para inducir pastizales y mantenerlos en producción a través de quemas periódicas que impiden la regeneración de las coberturas arbóreas.

Al respecto, la ocupación y uso del suelo, tenemos que, en el año 2011, la distribución de la cobertura del suelo estaba ocupada por un 21 % de usos agrícolas, un 17 % de pastizales para usos pecuarios y un 53 % de usos forestales (Figura 12). Donde la cuenca contempla una superficie forestal de bosques y selvas de 81,967.02 km², de los cuales, 56,424.74 km² corresponden a bosques y 25,542.28 km² a selvas (INEGI, 2016b), mismas que se cree que han sufrido grandes cambios, debido a una gran cantidad de factores que influyen en este proceso.

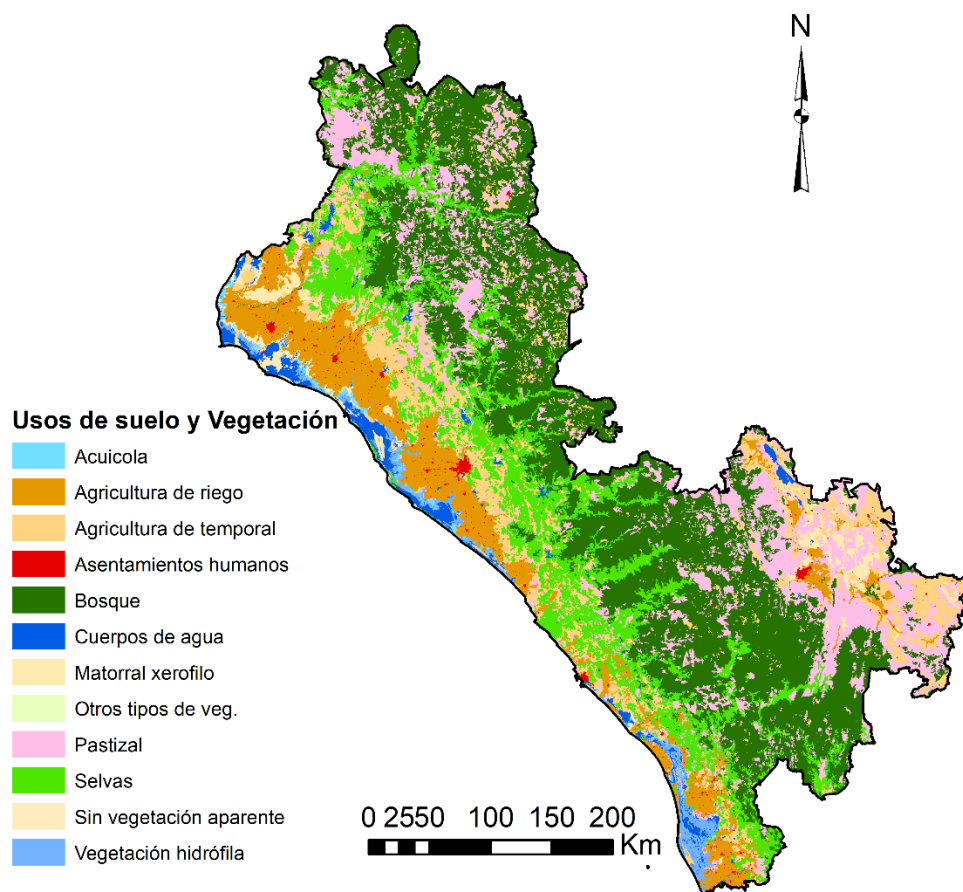


Figura 12. Usos de Suelo y Vegetación de año 2011 de la cuenca Pacífico Norte. Fuente: Modificación de INEGI, (2016b)

3.3.6. Áreas de conservación y protección

Dentro de esta descripción, se encuentra la zonificación forestal que permite determinar, identificar, agrupar y clasificar las áreas forestales mediante funciones y sub-funciones biológicas, ambientales, socioeconómicas, recreativas, protectoras y restauradoras, con el objetivo de propiciar una mejor administración de los recursos y contribuir al desarrollo forestal sustentable (CONAFOR, 2013). De tal manera, se tiene información clasificada basada en tres funciones: 1) protección y conservación de los recursos por encontrarse amenazados de alguna forma; 2) producción forestal maderable y no maderable; 3) restauración de ecosistemas forestales degradados por factores naturales o antropogénicos.

Donde las zonas de conservación y aprovechamiento restringido o prohibido se componen por áreas naturales protegidas que han sido declaradas reservas de la biósfera, tales como parques nacionales, áreas de protección de recursos naturales, áreas de protección de flora y fauna, santuarios o áreas naturales protegidas federales y estatales. De igual manera, también se encuentran incluidas las áreas con ecosistemas de alto riesgo ecológico como el bosque mesófilo, el manglar, la selva alta perennifolia y la vegetación de galería. En el mismo sentido, se incluyen las áreas que sobrepasan los 3,000 msnm o con pendientes mayores a 45°, con el objeto de proteger las zonas con alto grado de riesgo erosivo (Figura 13).

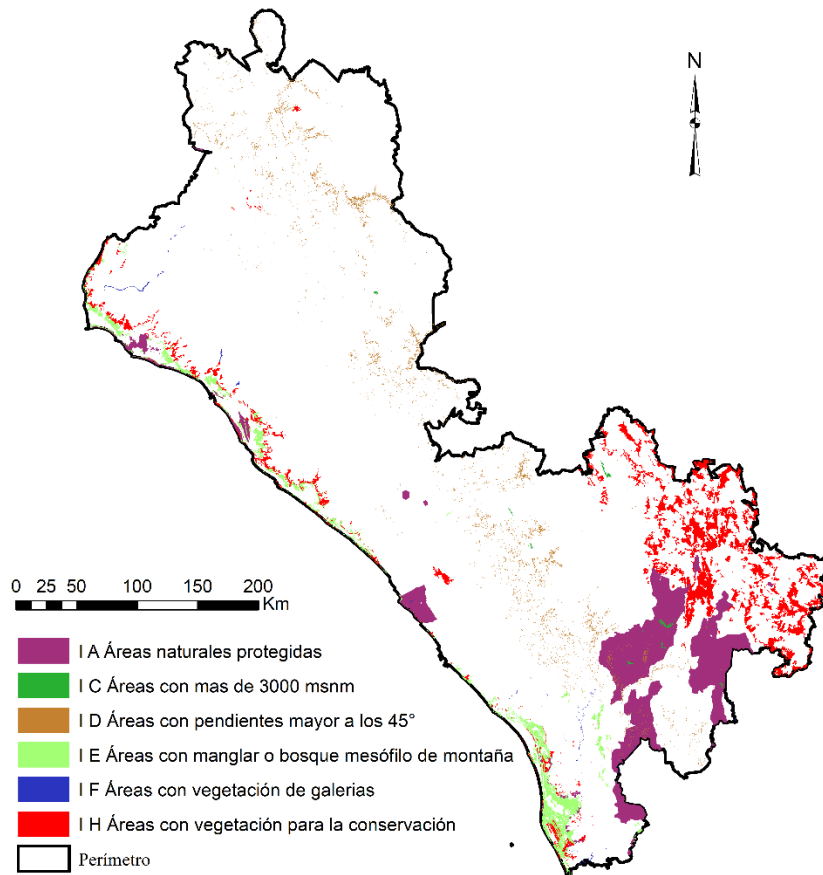


Figura 13. Áreas de conservación y protección. Fuente: CONAFOR, (2013).

3.3.7. Zonas de producción forestal

Las zonas de producción forestal corresponden a terrenos forestales que de acuerdo con la estructura y composición de la vegetación son objeto de aprovechamiento forestal maderable o no maderable, indicando si es de productividad alta, media o baja en función de la cobertura de copa de los árboles y a su altura promedio. También se incluyen las áreas forestales de zonas áridas y semiáridas, áreas especiales para realizar forestación y áreas que son perfectamente forestales (Figura 14).

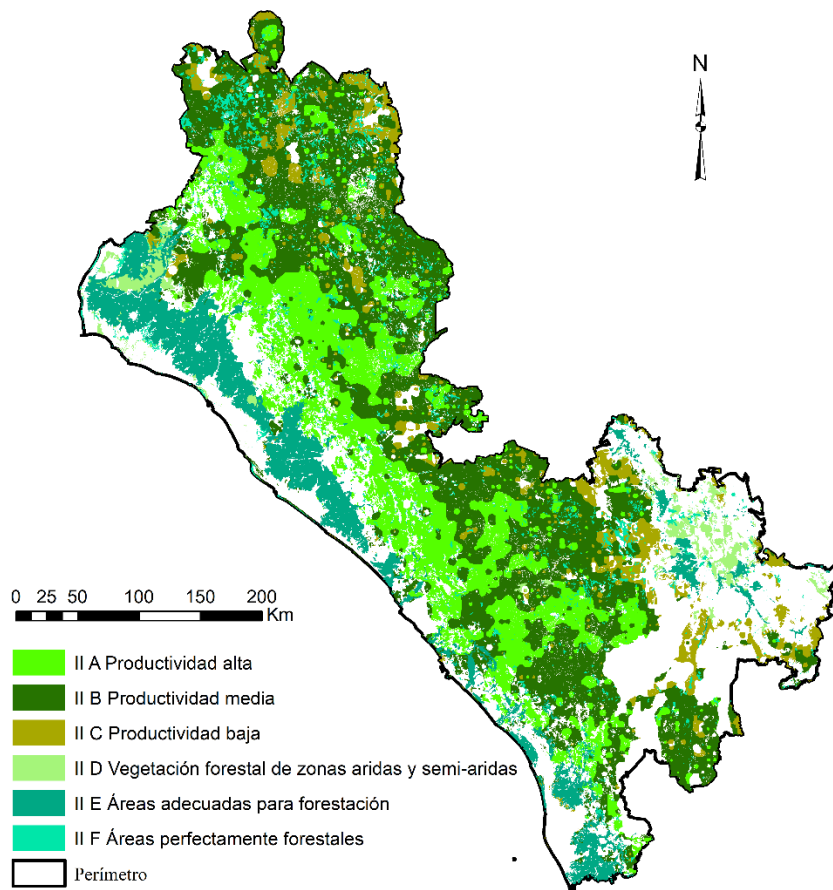


Figura 14. Áreas de producción forestal. Fuente: CONAFOR, (2013)

3.3.8. Zonas de restauración

Con referencia a lo anterior, las zonas de restauración forestal son todas aquellas tierras forestales que presentan evidencias de degradación y erosión de diferente grado y son un riesgo de pérdida de recurso forestal que impacta tanto en los ecosistemas como en el funcionamiento de este (Figura 15).

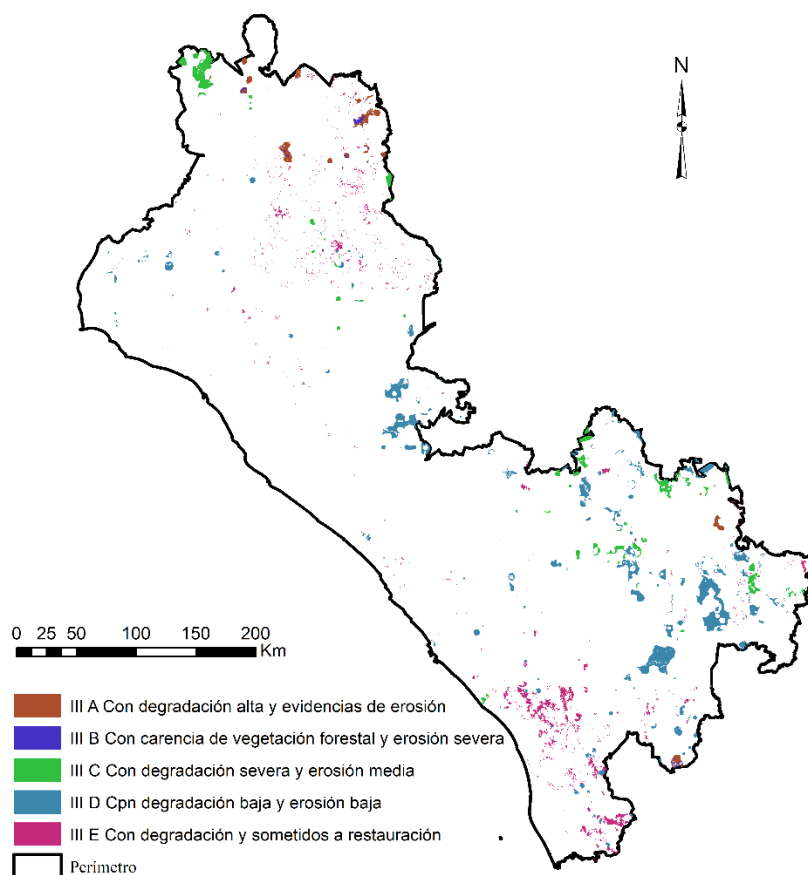


Figura 15. Áreas forestales para restauración. Fuente: (CONAFOR, 2013)

Finalmente, la información expuesta anteriormente, describe el área de estudio en diversos aspectos, dirigiendo estas ideas hacia la importancia del manejo forestal en una cuenca hidrológico-administrativa, específicamente los cambios en las coberturas de bosque y selva, ya que estas categorías son las que mayor cantidad de Carbono almacenan, y al presentar deterioros y pérdidas pueden producir una serie de problemas ambientales.

3.2. Referencias

- CONAFOR. (2013). *Zonificación forestal*. Retrieved from http://www.sema.gob.mx/SRN/DESCARGABLES/Metodologia_Zonificacion_Forestal_IEFYS.pdf
- CONAGUA. (2014a). *Estadísticas del Agua en México*. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>
- CONAGUA, C. N. del A. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa III Pacífico Norte*. Retrieved from

- www.semarnat.gob.mxwww.conagua.gob.mxwww.conagua.gob.mx/conagua07/temas/programashídricosregionales2030.pdf
- CONAGUA, C. N. del A. (2014b). *Estadísticas del Agua en México*. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>
- CONAPO. (2016). *Anuario de migración y remesas Yearbook of migration and remittances*. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/109457/Anuario_Migracion_y_Remesas_2016.pdf
- INEGI. (1998). Mapas. Hidrografía. Retrieved March 5, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/hidrografia/>
- INEGI. (2001a). Mapas. Climatológicos. Retrieved March 5, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/>
- INEGI. (2001b). Mapas. Edafológicos. Retrieved March 5, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/edafologia/>
- INEGI. (2001c). Mapas. Fisiográficos. Retrieved March 5, 2019, from <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/fisiografia/>
- INEGI. (2012, April 8). Áreas Geoestadísticas Municipales, 2012. Retrieved March 6, 2019, from http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni_2012gw.xml?&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl
- INEGI. (2016c). Encuesta, Intercensal, 2015. Retrieved August 27, 2018, from <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/especiales/intercensal/>
- INEGI. (2016d). Uso de suelo y vegetación. Retrieved August 27, 2018, from <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/ususuelo/>
- SEMARNAT. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001596.pdf>
- SGM. (2005). Cartografía Geológica de la República Mexicana escala 1:250,000 - Continuo Nacional de Geología de la República Mexicana escala 1:250,000. Retrieved March 5, 2019, from <https://datos.gob.mx/busca/dataset/cartografia-geologica-de-la-republica-mexicana-escala-1-250000/resource/20752893-6696-44e3-8851-c6db2a444d79>

Capítulo IV. Emisiones/absorciones de Carbono producidas por deforestación, degradación forestal y reforestación, entre 2002 y 2011. Cuenca Pacífico Norte, México.

4.1. Introducción

Existen evidencias científicas que han determinado que la calidad de vida del ser humano está relacionada con los ecosistemas (Chaudhary *et al.*, 2016; Tolessa, *et al.*, 2017), ya que dependen de los servicios proporcionados por estos, como el agua potable, alimentos, la regulación del clima, el ciclo de nutrientes, entre otras cosas (Gao *et al.*, 2017; Pullanikkatil *et al.*, 2016). No obstante, el crecimiento económico y demográfico que han desarrollado los seres humanos ha contribuido y contribuyen a disminuir la calidad de estos ecosistemas provocando reacciones negativas como la pérdida de diversidad biológica, del suelo y del carbono (Cao *et al.*, 2015; Kim & Rowe, 2012).

Los procesos asociados con la dinámica de los cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo, son unos de los principales factores que determinan la permanencia, disminución y extinción de los diferentes ecosistemas y especialmente los que comprenden los bosques (Camacho-Sanabria *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2017). A razón de ello, se han desarrollado avances científicos para estudiar la problemática de la disminución de los bosques y en consecuencia sus reservas de Carbono, como parte indispensable en el funcionamiento de los ecosistemas que se ven afectados en diferentes escalas debido a las transformaciones del uso de suelo (Ruckelshaus *et al.*, 2015). Ejemplo de ello, los estudios relacionados con el cambio de uso de suelo y vegetación que han determinado modelos causales de deforestación y degradación de las cubiertas forestales (Geist & Lambin, 2001; Pacheco *et al.*, 2011) y su relación con la pérdida de carbono (Achard *et al.*, 2014; Eckert *et al.*, 2011; Pacheco-Angulo *et al.*, 2017; Pearson *et al.*, 2014).

Las pérdidas y el deterioro forestal consideradas dentro del sector Agricultura, Bosque y Otros Usos del Suelo (AFOLU) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), contribuyen hasta un 20% de las emisiones globales de Dióxido de Carbono (CO₂) antropogénico en la atmósfera (Cadman *et al.*, 2017; Denman *et al.*, 2007; IPCC, 2007; Kanninen *et al.*, 2010; van der Werf *et al.*,

2009), esto es preocupante ya que los bosques funcionan como importantes sumideros que pueden capturar cerca del 15% de las emisiones antrópicas de carbono a escala global (Trumper *et al.*, 2009).

En tal sentido, las estrategias de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal (REDD+) establecidas por el IPCC, juegan un papel importante en la ordenación y conservación sostenible de la cubierta forestal y el aumento de las reservas de Carbono de los países en vía de desarrollo (Nathan & Pasgaard, 2017). No obstante, para el establecimiento de estas se necesitan conocer en cada uno de los países las pérdidas y las ganancias forestales, así como, la capacidad de estos países en monitorear dicha dinámica.

Para la primera, se tiene como fuente oficial de mayor referencia a nivel mundial, las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), a través del programa Evaluaciones de Recursos Forestales mundiales (FRA). Estas para la última evaluación, revelaron la cifra decreciente en las tasas de deforestación, ya que para los 1990s presentaba una tasa anual de pérdida de 7.3 M ha/año, la cual disminuyó para los años 2010-2015 con una tasa anual de 3.3 M ha/año (FAO, 2015; Keenan *et al.*, 2015).

Mientras que, para la segunda, la capacidad de monitoreo de la deforestación ha mejorado durante los últimos años en los países tropicales, donde estas capacidades han pasado de tener el 69% en el año 2005 al 84% en el 2015, debido a la disponibilidad de datos satelitales a nivel global y las diversas técnicas de percepción remota (Romijn *et al.*, 2015). Y es por ello, que los últimos años se han desarrollado una gran cantidad de investigaciones de los procesos forestales en diferentes partes del mundo (Achard *et al.*, 2002; Bartalev *et al.*, 2014; FSI, 2018; Grinand *et al.*, 2013; Hansen *et al.*, 2013; INPE, 2018; Potapov *et al.*, 2008; Xuejun-Wang *et al.*, 2014).

Pero no solo la deforestación es el único medio a través del cual las cubiertas forestales emiten Carbono (C), el proceso de degradación forestal puede conducir a emisiones significativas de C; a tal punto que en algunas regiones este proceso emite mayor cantidad de gases de efecto invernadero que el mismo proceso de deforestación (Hosonuma *et al.*, 2012). A nivel global, la degradación forestal es responsable de aproximadamente entre el 5-25 % de las emisiones forestales de CO₂ (Pearson *et al.*, 2017). Esta degradación forestal, es originada por la tala legal e ilegal de árboles, el uso de madera

como leña o para la construcción de fincas, incendios forestales y el pastoreo de animales (Achard *et al.*, 2012; Hosonuma *et al.*, 2012).

Dada la importancia de estos procesos, tanto la deforestación como la degradación forestal, se han evaluado de manera conjunta para las emisiones de C, como lo indican los trabajos de (Achard *et al.*, 2014; Bryan *et al.*, 2010; Eckert *et al.*, 2011; Pacheco-Angulo *et al.*, 2017), ya que estos procesos juegan un papel importante dentro del ciclo del C a nivel global (Houghton, 2012), afectando la capacidad de los ecosistemas para proporcionar su servicio de micro-regulación del clima, agua y biodiversidad.

Particularmente, México se encuentra dentro de los primeros 20 países con tasas de deforestación más elevadas a nivel mundial (FAO, 2015; FRA, 2010; Hansen *et al.*, 2013), no escapando de las tendencias mundiales antes descritas, con cambios que en general están por arriba de la media mundial en cuanto a tasas de deforestación, incremento de las áreas de cultivo, pastoreo, expansión urbana y muchos otros (Mas *et al.*, 2004; Rosete-Vergés *et al.*, 2014; Skutsch *et al.*, 2014; Valdez-Pérez *et al.*, 2015; Velázquez, 2008), de igual manera, es ubicado entre los primeros 50 países con mayor cantidad de emisiones por degradación forestal (Pearson *et al.*, 2017).

Conocer lo anterior permite tener una visión sinóptica de la condición en la que encuentran los recursos naturales. Por lo que se propone como objetivo principal de este capítulo estimar las emisiones de CO₂ producidas por deforestación y la degradación forestal, así como las absorciones de CO₂ generadas por la recuperación natural forestal y la reforestación en la cuenca Pacífico Norte, México, para el periodo 2002 y 2011, puesto que esta zona se encuentra dentro de las áreas más afectadas en cuanto a pérdida y deterioro de las coberturas forestales (CONAGUA, 2012), debido a las actividades socioeconómicas como la agricultura, la extracción de minerales, industria, comercio, turismo, entre otras, que han desarrollado los habitantes los últimos años, estimulado efectos negativos sobre los ecosistemas forestales que impulsa el deterioro de los mantos acuíferos, la biodiversidad, reservas de carbono y alteración de los patrones hídricos (Manson, 2004).

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Datos

En esta investigación se utilizó como base para el análisis de los cambios del uso y ocupación del suelo, los mapas digitales de la serie III y serie V de Uso de Suelo y Vegetación (USyV) a escala 1:250, 000, los cuales se obtuvieron a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (INEGI, 2014). La serie III comprende información del año 2002 y la serie V del año 2011, ambos productos fueron generados mediante la interpretación visual de datos de los satélites Landsat 4 y 5, y 7, todos ellos con una resolución espacial de 30 metros (INEGI, 2015).

Por otro lado, para obtener los Factores de Emisión (FE) y Factores de Absorción (FA), se emplearon datos del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero (INGEI) del sector Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura (USCUSS) para México (INECC & CONAFOR, 2015). Generados de a través de levantamientos de campo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) entre los años 2004 y 2009 (CONAFOR & SEMARNAT, 2009).

4.2.2. Metodología

Para alcanzar el objetivo planteado, se analizó dentro de la cuenca Pacífico Norte los cambios de uso de suelo, previo pre-procesamiento de los mapas de la serie III y V de USyV; posteriormente se estimó las emisiones de CO₂ por deforestación y degradación forestal y las absorciones de CO₂ por recuperación natural forestal y reforestación. Para ello, se utilizó la guía de las buenas prácticas para inventarios nacionales de gases efecto invernadero del IPCC, las cuales contemplan la combinación de los datos de actividad y los factores de emisión (IPCC, 2006).

4.2.3. Pre-procesamiento de los mapas

El pre-procesamiento de los mapas de la serie III y V de USyV, consistió, en primer lugar, en corregir los errores topológicos (superposición de polígonos y polígonos faltantes principalmente) y temáticos (llenado de la base de datos), y en segundo lugar, en redefinir la leyenda para que los mapas fueran

comparables entre sí (Moreno & Chuvieco, 2009), para ello se reclasificó y homogenizó las bases de datos de cada mapa en 28 categorías, de acuerdo a las categorías del INGEI de México (INECC & CONAFOR, 2015).

4.2.4. Análisis de los cambios de uso de suelo

Posteriormente se realizó un análisis de cambios de uso del suelo, utilizando la matriz de tabulación cruzada o matriz de cambios (Pontius *et al.*, 2004), la cual permitió obtener para cada uso del suelo las ganancias, las pérdidas, el cambio neto y los intercambios experimentados entre categorías en dicho periodo. En particular, mediante este proceso se verificó cuáles fueron las principales transiciones desde y hacia las coberturas de interés, que en este caso son los distintos tipos de *bosques* y *selvas* con la finalidad de conocer el comportamiento de los procesos forestales.

La matriz de tabulación se generó del cruce de los mapas de usos de suelo del 2002 y 2011. En la tabla 1 se visualiza la matriz de cambios, en las filas las categorías del mapa en el tiempo 1 (*Tiem₁*) y en las columnas las categorías del mapa en el tiempo 2 (*Tiem₂*). La diagonal principal indica las persistencias entre el tiempo 1 y el tiempo 2, y los elementos fuera de la diagonal principal determinan las transiciones ocurridas entre los dos tiempos para cada categoría. Asimismo, la fila 6 muestra el total ocupado por cada categoría en el *Tiem₂* (P_{+j}), y la columna 6 indica el total de cada categoría en el tiempo *Tiem₁* (P_{i+}). La fila 7 muestra la ganancia que tuvo cada categoría entre el *Tiem₁* y *Tiem₂* y la columna 7 la pérdida que tuvo cada categoría entre el *Tiem₁* y *Tiem₂*.

Tabla 1. Matriz de tabulación cruzada. Adaptación de Pontius *et al.*, (2004).

		<i>Tiem₂</i>						
		1	2	3	<i>n</i>	5	6	7
<i>Tiem₁</i>	1		<i>Clase 1</i>	<i>Clase 2</i>		<i>Clase n</i>	<i>Suma Tiem₁</i>	<i>Perdidas</i>
	2	<i>Clase 1</i>	P_{11}	P_{12}		P_{1n}	P_{1+}	$P_{1+} - P_{jj}$
	3	<i>Clase 2</i>	P_{21}	P_{22}		P_{2n}	P_{2+}	$P_{2+} - P_{jj}$
	<i>n</i>	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	4							
	5	<i>Clase n</i>	P_{n1}	P_{n2}		P_{nn}	P_{n+}	$P_{n+} - P_{jj}$
	6	<i>Suma Tiem₂</i>	P_{+1}	P_{+2}		P_{+n}	P	
	7	<i>Ganancias</i>	$P_{+1} - P_{jj}$	$P_{+2} - P_{jj}$		$P_{+n} - P_{jj}$		

Asimismo, se determinaron los parámetros de ganancias (Ecuación (Ec.) 1), pérdidas (Ecuación 2), cambios netos (Ecuación 3) y el cambio total (Ecuación 4).

$$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$L_{ij} = P_{j+} - P_{jj} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$D_j = |L_{ij} - G_{ij}| \quad (\text{Ec. 3})$$

$$DT_j = G_{ij+} - L_{jj} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde G_{ij} es la ganancia, P_{+j} es la sumatoria de la columna en cuestión, P_{jj} es el valor de la diagonal principal de la columna en cuestión, L_{ij} son las pérdidas, P_{j+} es la sumatoria de la fila en cuestión, D_j es el cambio neto, S_j son los intercambios y DT_j es el cambio total.

También se calcularon, los índices de persistencia de acuerdo con Braimoh (2006), el cual nos indica la vulnerabilidad de cada categoría a la transición, además de caracterizar e identificar las zonas estables en relación a la ganancia, pérdida y cambios netos. A saber, estos índices se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

Para la relación ganancia – persistencia:

$$Gp = \left(\frac{\text{Ganancia}}{\text{Persistencia}} \right) \quad \text{Ec. (5)}$$

Para la relación pérdida – persistencia:

$$Lp = \left(\frac{\text{Pérdida}}{\text{Persistencia}} \right) \quad \text{Ec. (6)}$$

Y para la relación, cambio neto - persistencia:

$$Np = \left(\frac{\text{Cambio neto}}{\text{Persistencia}} \right) \quad \text{Ec. (7)}$$

Posteriormente, se generó la cartografía de los procesos forestales de deforestación, degradación forestal, reforestación y recuperación forestal natural. Donde este mismo producto cartográfico se utilizó para realizar un análisis a nivel municipal, determinando con ello los municipios más afectados y más beneficiados de este conjunto de procesos antropogénicos y naturales que sufren los ecosistemas forestales que comprenden las coberturas de *bosques* y *selvas*.

De igual manera, se generó un modelo estimativo de los procesos forestales, con la finalidad de comprender el comportamiento de estas coberturas de interés y sus cambios, basándose en los modelos planteados por Velázquez *et al.*, (2002) y Pineda-Jaimes (2010).

4.2.5. Estimación de emisiones y absorciones producidas por los principales procesos forestales

Para el cálculo de las emisiones/absorciones de CO₂ producidas por deforestación, degradación forestal, recuperación natural forestal y reforestación se utilizó el enfoque metodológico de la guía de las buenas prácticas del IPCC (IPCC, 2006), el cual se basa en una ecuación básica donde se multiplican los Datos de Actividad (DA), que se refieren a la extensión de las superficies deforestadas, degradadas y recuperadas (expresadas en hectáreas), con los Factores de Emisión (FE) o Factores de Absorción (FA), que se refieren a los coeficientes que cuantifican la cantidad de C emitido o absorbido por unidad de superficie.

Los DA se obtuvieron de la matriz de tabulación cruzada de la metodología de Pontius *et al.*, (2004) calculados en la fase anterior; mientras que los FE/FA se obtuvieron a través del INGEI de México (INECC & CONAFOR, 2015), que los generaron mediante información dasométrica de muestreos en campo de todo el país como lo indica el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) entre los años 2004 y 2009 (CONAFOR & SEMARNAT, 2009), que utilizaron el método de *stock change* para la obtención de los FE/FA y el método *gain loss* para las permanencias de tierras agrícolas, donde se utilizaron valores por defecto.

Cabe señalar que estas estimaciones de emisiones/absorciones contempla solamente el C en la biomasa viva (biomasa aérea) y en raíces, excluyendo el C en suelos. Después de obtener las cantidades el C, se estimaron las emisiones/absorciones Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂ e) de acuerdo con (Greenhalgh *et al.*, 2005; INECC & CONAFOR, 2015), para obtener las emisiones/absorciones de cada uno de los procesos forestales de deforestación, degradación forestal, recuperación natural forestal y reforestación.

En consecuencia, de las ideas expuestas se diseñó el siguiente esquema metodológico de la presente investigación (Figura 16):

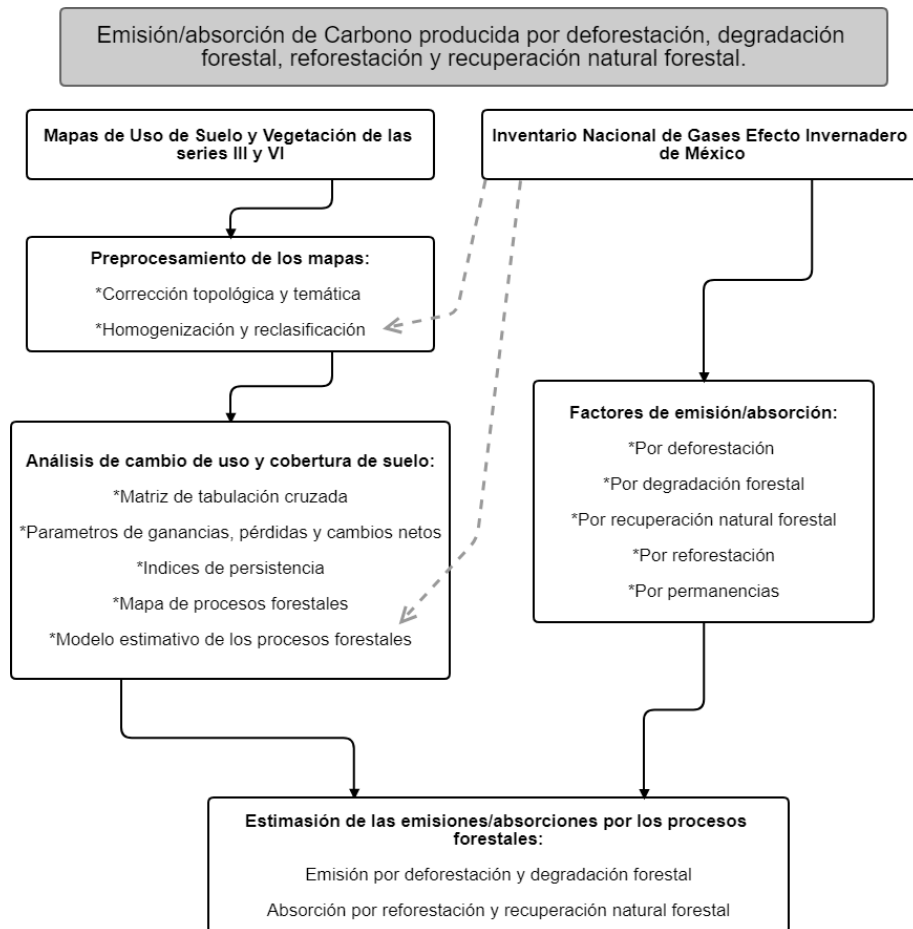


Figura 16. Esquema metodológico

4.3. Resultados

4.3.1 Análisis de cambios de uso y cobertura del suelo

De acuerdo con la metodología planteada, uno de los primeros resultados fue la cartografía de los mapas de 2002 y 2011, corregidas topológicamente, temáticamente y homogenizada en 28 categorías. Estas se pueden visualizar en la figura 17, donde se puede comentar que los patrones de las diversas categorías de uso de suelo se mantienen en ambas fechas, pero en diferentes proporciones, Ejemplo de ello, las categorías que involucran las actividades agrícolas que se encuentra en la parte oeste y

sureste de la cuenca, asimismo, las categorías que involucran los bosques que se encuentran en la parte central de norte a sur de la cuenca.

Posteriormente se obtuvo la matriz de tabulación cruzada, de la cual se derivó el análisis de los cambios ocurridos en el periodo evaluado, en la diagonal de esta matriz se mantienen las categorías en ambas fechas, mientras que los valores de las columnas que no corresponde a la diagonal nos indican ganancia de las categorías del 2002 al 2011, y los valores de las filas que no aparecen en la diagonal significan pérdidas de las categorías del 2002 al 2011. Por ejemplo, la categoría Agua identificada con el número 4, para el 2002 su superficie fue de 322,139 ha, mientras que para el 2011 fue de 324,794 ha, es decir, que hubo una ganancia entre el 2002 al 2011 de 2,655 ha, manteniéndose esta categoría en ambas fechas con 311,981 ha. Los valores con mayores ganancias en la categoría Agua lo presentaron las categorías Vegetación hidrófila leñosa primaria (26) con 2,993 ha, seguida de Pastizales (19) con 2,439 ha y la Agrícola anual (2) con 2,370 ha; mientras que los valores que presentaron mayor pérdida fueron la Vegetación hidrófila leñosa primaria (26) con 2,436 ha, Otras tierras (18) con 2,121 ha y la Acuícola (2) con 1,850 ha (Tabla 2).

En relación con las categorías que presentaron mayores pérdidas fueron la Selva caducifolia secundaria (21) con 328,840 ha, el Bosque de coníferas primario (7) con 252,700 ha y el Bosque de coníferas secundario (8) con 237,867 ha; las que presentaron mayores ganancias fueron el Bosque de coníferas primario (7) con 351,279 ha, la Agrícola anual (2) con 340,097 ha y la Selva caducifolia primaria (20) con 284,243 ha; las mayores persistencias se presentaron en las categorías el Bosque de coníferas primario (7) con 3,292,618 ha, la Agrícola anual (2) con 2,765,826 ha y la Selva caducifolia primaria (20) con 1,955,329 ha; las categorías con mayor cambio neto fueron la Selva caducifolia secundaria (21) con 237,208 ha, la Agrícola anual (2) con 167,723 ha y la Selva sub-caducifolia secundaria (25) con 140,264 ha; y las categorías con los valores positivos de cambios totales donde las ganancias superaron a las pérdidas fueron la Agrícola anual (2) con 167,723 ha, la Selva caducifolia primaria (20) con 130,490 ha y Selva sub-caducifolia primaria (24) con 118,808 ha; mientras las categorías con los valores negativos de cambios netos donde las pérdidas superaron a las ganancias fueron Selva caducifolia secundaria (21) con -237,208 ha, la Selva sub-caducifolia secundaria (25) con -140,264 ha y el Bosque de encino secundario (10) con -137,142 ha (Tabla 3).

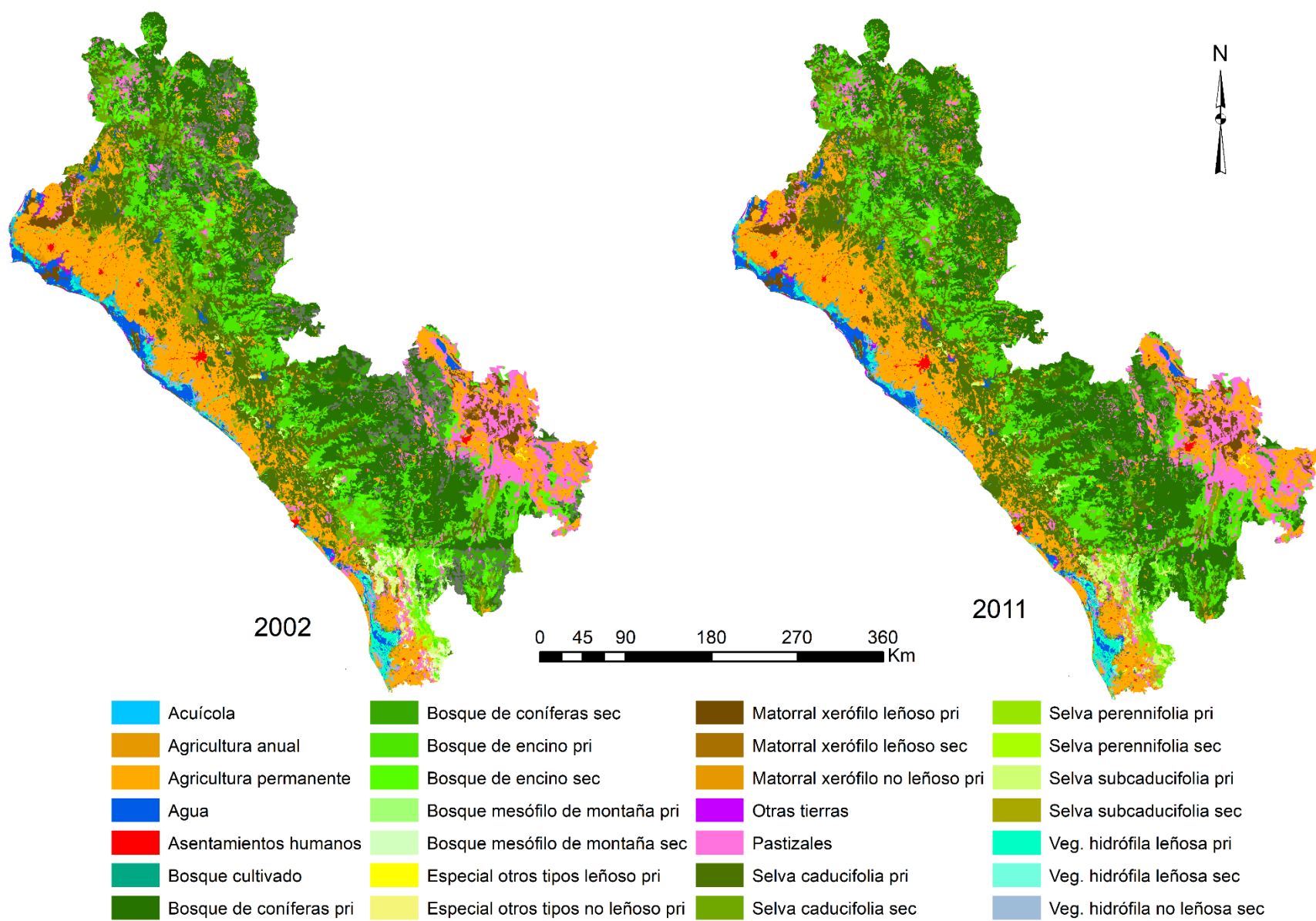


Figura 17. Cartografía de Uso de Suelos y Vegetación 2002-2011

Tabla 2. Matriz de cambios.

<i>Categoría (Hectáreas)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>1</i>	38807	772	6	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>2</i>	1161	2765826	27678	2370	15140	0	31002	15754	4619	1739	295	0	475	77	757
<i>3</i>	54	2133	8865	36	72	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>4</i>	1850	1361	7	311981	85	0	6	4	1	4	0	0	4	94	291
<i>5</i>	0	1423	64	18	72921	0	23	19	23	8	0	0	0	0	0
<i>6</i>	0	0	0	0	0	95	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>7</i>	0	26379	0	12	86	0	3292618	128643	44710	11680	255	0	0	0	1
<i>8</i>	0	6677	0	1	0	0	211254	486184	11563	1198	61	3	0	0	2
<i>9</i>	0	9144	0	2	1	0	33867	5632	1710249	52034	649	276	0	0	1
<i>10</i>	0	3631	0	2	4	0	44642	2551	147767	359880	1678	362	0	0	0
<i>11</i>	0	4	0	0	0	0	306	0	83	0	2640	0	0	0	0
<i>12</i>	0	54	0	0	2	0	1636	20	271	0	7650	12	0	0	0
<i>13</i>	0	1907	0	43	72	0	0	0	0	0	0	0	8379	0	0
<i>14</i>	307	61	52	67	38	0	0	0	0	0	0	0	17	6166	0
<i>15</i>	54	9306	189	268	53	0	3	2	43	673	0	0	72	0	286935
<i>16</i>	551	9098	0	6	537	0	0	0	0	0	0	0	172	0	147
<i>17</i>	2293	2943	0	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	118
<i>18</i>	1025	365	1780	774	25	0	0	0	0	0	0	0	0	1	389
<i>19</i>	1762	76819	6349	2439	1938	0	21870	11058	7721	6884	55	0	470	0	1744
<i>20</i>	458	65822	338	426	528	0	3340	16	16253	3629	15	0	0	5	160
<i>21</i>	407	87985	371	946	309	0	1602	72	6715	3876	0	0	0	0	43
<i>22</i>	0	28	0	0	0	0	3	0	425	0	672	15	0	0	0
<i>23</i>	0	675	0	1	0	0	550	0	2930	17	81	6	0	0	0
<i>24</i>	0	1347	13	19	27	0	92	13	1609	384	9380	0	16	0	0
<i>25</i>	0	10842	507	147	259	0	1045	55	7503	395	2873	322	0	0	0
<i>26</i>	613	8084	0	2993	154	0	0	0	0	137	0	0	0	468	403
<i>27</i>	554	247	0	880	34	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
<i>28</i>	6765	12990	0	1135	92	0	0	0	0	0	0	0	0	5	24
<i>Sumatoria 2011</i>	56661	3105923	46219	324794	92377	95	3643897	650023	1962485	442538	26304	996	9608	6816	291015

Tabla 2. Matriz de cambios.

<i>Categoría (Hectáreas)</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>	<i>21</i>	<i>22</i>	<i>23</i>	<i>24</i>	<i>25</i>	<i>26</i>	<i>27</i>	<i>28</i>	<i>Sumatoria 2002</i>
<i>1</i>	0	5755	42	27	29	42	0	0	0	0	311	46	74	45959
<i>2</i>	210	58	963	26936	17358	8961	1113	0	3704	2017	3513	3414	3060	2938200
<i>3</i>	0	0	0	200	31	7	2	0	442	109	31	7	0	12027
<i>4</i>	3	231	2121	94	164	66	0	0	0	0	2436	488	848	322139
<i>5</i>	1	0	373	56	56	8	0	0	2	13	8	8	0	75024
<i>6</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95
<i>7</i>	0	0	0	33328	4751	2732	0	0	123	0	0	0	0	3545318
<i>8</i>	0	0	0	6510	379	140	0	0	69	10	0	0	0	724051
<i>9</i>	0	0	0	19631	42051	27446	478	1	1512	79	15	0	0	1903068
<i>10</i>	167	0	0	7330	2821	6524	481	499	1113	220	8	0	0	579680
<i>11</i>	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	3038
<i>12</i>	0	0	0	0	0	0	35	9	12	32	0	0	0	9733
<i>13</i>	0	0	32	124	0	0	0	0	330	0	181	0	0	11068
<i>14</i>	0	0	598	16	50	0	0	0	0	0	105	0	59	7536
<i>15</i>	223	1763	595	5604	42	3	0	0	0	0	871	0	19	306718
<i>16</i>	29282	4059	0	1123	27	0	0	0	0	0	0	0	0	45002
<i>17</i>	0	23280	294	0	21	0	0	0	0	0	84	0	19	29232
<i>18</i>	0	20	36687	0	51	13	0	0	0	0	953	0	1166	43249
<i>19</i>	1042	0	1531	957549	6009	5391	85	0	7382	5672	2031	5192	55	1131048
<i>20</i>	1	0	2820	7716	1955329	38500	297	157	10181	1271	1387	347	86	2109082
<i>21</i>	0	0	1064	9833	205352	415071	3	0	7485	926	984	467	400	743911
<i>22</i>	0	0	0	5	0	0	9464	114	154	0	0	0	0	10880
<i>23</i>	0	0	0	14	0	0	33647	2404	345	191	0	0	0	40861
<i>24</i>	0	0	0	529	1998	299	6861	0	93190	957	64	0	0	116798
<i>25</i>	0	0	0	4950	2380	10	9576	642	109562	27234	677	0	17	178996
<i>26</i>	0	60	231	119	296	3	0	0	0	0	152630	4833	520	171544
<i>27</i>	0	0	0	73	320	45	0	0	0	0	6128	9056	1	17341
<i>28</i>	0	0	1	3	57	1442	0	0	0	1	1758	247	55227	79747
Sumatoria 2011	30929	35226	47352	1081770	2239572	506703	62047	3826	235606	38732	174175	24105	61551	

Acuícola 1; Agrícola anual 2; Agrícola perene 3; Agua 4; Asentamientos humanos 5; Bosque cultivado 6; Bosque de coníferas primario 7; Bosque de coníferas secundario 8; Bosque de encino primario 9; Bosque de encino secundario 10; Bosque Mesófilo de montaña primario 11; Bosque Mesófilo de montaña secundario 12; Especial otros tipos leñoso primario 13; Especial otros tipos no leñoso primario 14; Matorral xerófilo leñoso primario 15; Matorral xerófilo leñoso secundario 16; Matorral xerófilo no leñoso primario 17; Otras tierras 18; Pastizal 19; Selva caducifolia primaria 20; Selva caducifolia secundaria 21; Selva perennifolia primaria 22; Selva perennifolia secundaria 23; Selva sub-caducifolia primaria 24; Selva sub-caducifolia secundaria 25; Vegetación hidrófila leñosa primaria 26; Vegetación hidrófila leñosa secundaria 27; Vegetación hidrófila no leñosa primaria 28

Tabla 3. Parámetros de cambio de uso de suelo (2002 – 2011).

Categoría (ha)	Sumatoria 2000	Sumatoria 2011	Perdidas	Ganancias	persistencias	cambio neto	cambio total
1	45959	56661	7152	17854	38807	10702	10702
2	2938200	3105923	172374	340097	2765826	167723	167723
3	12027	46219	3162	37354	8865	34192	34192
4	322139	324794	10158	12813	311981	2655	2655
5	75024	92377	2103	19456	72921	17353	17353
6	95	95	0	0	95	0	0
7	3545318	3643897	252700	351279	3292618	98579	98579
8	724051	650023	237867	163839	486184	74028	-74028
9	1903068	1962485	192819	252236	1710249	59417	59417
10	579680	442538	219800	82658	359880	137142	-137142
11	3038	26304	398	23664	2640	23266	23266
12	9733	996	9721	984	12	8737	-8737
13	11068	9608	2689	1229	8379	1460	-1460
14	7536	6816	1370	650	6166	720	-720
15	306718	291015	19783	4080	286935	15703	-15703
16	45002	30929	15720	1647	29282	14073	-14073
17	29232	35226	5952	11946	23280	5994	5994
18	43249	47352	6562	10665	36687	4103	4103
19	1131048	1081770	173499	124221	957549	49278	-49278
20	2109082	2239572	153753	284243	1955329	130490	130490
21	743911	506703	328840	91632	415071	237208	-237208
22	10880	62047	1416	52583	9464	51167	51167
23	40861	3826	38457	1422	2404	37035	-37035
24	116798	235606	23608	142416	93190	118808	118808
25	178996	38732	151762	11498	27234	140264	-140264
26	171544	174175	18914	21545	152630	2631	2631
27	17341	24105	8285	15049	9056	6764	6764
28	79747	61551	24520	6324	55227	18196	-18196

Acuícola 1; Agrícola anual 2; Agrícola perene 3; Agua 4; Asentamientos humanos 5; Bosque cultivado 8; Bosque de coníferas primario 7; Bosque de coníferas secundario 8; Bosque de encino primario 9; Bosque de encino secundario 10; Bosque Mesófilo de montaña primario 11; Bosque Mesófilo de montaña secundario 12; Especial otros tipos leñoso primario 13; Especial otros tipos no leñoso primario 14; Matorral xerófilo leñoso primario 15; Matorral xerófilo leñoso secundario 16; Matorral xerófilo no leñoso primario 17; Otras tierras 18; Pastizal 19; Selva caducifolia primaria 20; Selva caducifolia secundaria 21; Selva perennifolia primaria 22; Selva perennifolia secundaria 23; Selva sub-caducifolia primaria 24; Selva sub-caducifolia secundaria 25; Vegetación hidrófila leñosa primaria 26; Vegetación hidrófila leñosa secundaria 27; Vegetación hidrófila no leñosa primaria 28.

Los índices de Braimoh (2006), indican que las categorías Bosque mesófilo de montaña secundario (82.00), la Selva perennifolia primaria (5.56), los Bosque Mesófilo de montaña primario (8.96), Agrícola perene (4.21), Selva sub-caducifolia primaria (1.53) y Vegetación hidrófila leñosa secundaria (1.66), tiene un índice de ganancia a persistencia superior a 1, lo cual demuestra una clara propensión a ganar más que a persistir. Por su parte, el índice de pérdida a persistencia muestra que el Bosque mesófilo de montaña secundario (810.08), la Selva perennifolia secundaria (16.00) y la Selva sub- caducifolia secundaria (5.57) tienden a perder más que a persistir. Mientras que el índice de cambio neto a persistencia, el Bosque mesófilo de montaña secundario (728.08), la Selva perennifolia secundaria (15.41), la Selva perennifolia primaria (5.41), la Selva sub- caducifolia secundaria (5.15), la Agrícola perene (3.86) y la Selva sub-caducifolia primaria (1.27), expresan que estas categorías tendieron más a cambiar que a persistir (Tabla 4).

Tabla 4. Índices de persistencia.

Categoría	Ganancias / Persistencias	Pérdidas / Persistencias	Cambio neto / Persistencias
1	0.46	0.18	0.28
2	0.12	0.06	0.06
3	4.21	0.36	3.86
4	0.04	0.03	0.01
5	0.27	0.03	0.24
6	0.00	0.00	0.00
7	0.11	0.08	0.03
8	0.34	0.49	0.15
9	0.15	0.11	0.03
10	0.23	0.61	0.38
11	8.96	0.15	8.81
12	82.00	810.08	728.08
13	0.15	0.32	0.17
14	0.11	0.22	0.12
15	0.01	0.07	0.05
16	0.06	0.54	0.48
17	0.51	0.26	0.26
18	0.29	0.18	0.11
19	0.13	0.18	0.05
20	0.15	0.08	0.07
21	0.22	0.79	0.57
22	5.56	0.15	5.41
23	0.59	16.00	15.41
24	1.53	0.25	1.27
25	0.42	5.57	5.15

26	0.14	0.12	0.02
27	1.66	0.91	0.75
28	0.11	0.44	0.33

Acuícola 1; Agrícola anual 2; Agrícola perene 3; Agua 4; Asentamientos humanos 5; Bosque cultivado 6; Bosque de coníferas primario 7; Bosque de coníferas secundario 8; Bosque de encino primario 9; Bosque de encino secundario 10; Bosque Mesófilo de montaña primario 11; Bosque Mesófilo de montaña secundario 12; Especial otros tipos leñoso primario 13; Especial otros tipos no leñoso primario 14; Matorral xerófilo leñoso primario 15; Matorral xerófilo leñoso secundario 16; Matorral xerófilo no leñoso primario 17; Otras tierras 18; Pastizal 19; Selva caducifolia primaria 20; Selva caducifolia secundaria 21; Selva perennifolia primaria 22; Selva perennifolia secundaria 23; Selva sub-caducifolia primaria 24; Selva sub-caducifolia secundaria 25; Vegetación hidrófila leñosa primaria 26; Vegetación hidrófila leñosa secundaria 27; Vegetación hidrófila no leñosa primaria 28.

Los resultados de ganancias y pérdidas de las coberturas forestales de *bosque y selva* en conjunto, indica una deforestación de 3,136.06 km², igual al 2.06% del territorio de la cuenca y correspondiente al 3.17% de la superficie inicial de dichas categorías en el año 2002. En relación con las implicaciones, se determinó una Tasa Media Anual (TMA) de deforestación en la cuenca de 0.17 %, la cual es inferior a la TMA de deforestación del país, ya que en el año 2010 contemplaba una tasa de 0.40 % y de 0.30 % en el 2015 de acuerdo con las estadísticas de la FAO (FAO, 2015; FRA, 2010). Como complemento se calculó la TMA para el conjunto de *bosques* que fue de 0.063 % y para las *selvas* de 0.395 %.

Por su lado, la degradación forestal revelada que fue de 2,202.48 km² de *bosques y selvas*, que cambiaron de categorías superiores a categorías inferiores de cobertura en cobertura de *bosques y selvas*. Por otro lado, las ganancias experimentadas de estas coberturas en cuanto a recuperación natural fueron de 7,152.32 km², y de reforestación fueron 1,611.26 km², dando lugar a una pérdida neta de coberturas forestales de 1,524.80 km² que representa el 1.00 % del territorio de la cuenca. Cabe mencionar que el 86.29 %, de todos los usos de suelo de la cuenca se encuentran sin algún cambio, y particularmente el 83.83 % de las coberturas forestales de *bosque y selva* permanecen estables.

A consecuencia de este análisis, se obtuvo la cartografía de los principales procesos forestales, donde se observan las zonas con mayor pérdida, deterioro, recuperación y ganancia de los ecosistemas forestales que implican las diferentes categorías de *bosques y selvas* en la superficie de la cuenca (Figura 18). En tal sentido, a partir de esta cartografía antes mencionada se realizó un análisis a nivel municipal de estos procesos, donde se determinó que los municipios con mayor deforestación son:

Badiraguato, Culiacán, Guachochi, Guadalupe y Calvo, y Mocorito. Así como los municipios con mayor degradación forestal son: Guachochi, Guadalupe y Calvo, Pueblo Nuevo y el Mezquital (Tabla 5). Por el contrario, los municipios con mayor recuperación natural forestal fueron: el Mezquital, el Rosario, Huajicori, y Rosamorada. Y los que presentaron mayor reforestación son: Guadalupe y Calvo, Guachochi, Huajicori y el Rosario (Tabla 5).

Tabla 5. Procesos forestales a nivel municipal.

Municipio	Deforestación km ²	Degradación km ²	Recuperación Natural km ²	Reforestación km ²
Acaponeta	71.84	9.70	316.16	48.65
Angostura	7.20	0	0	0
Badiraguato	436.26	19.27	106.99	23.15
Batopilas	69.72	160.21	99.87	29.65
Canatlan	13.98	9.63	22.93	15.32
Canelas	51.36	0.88	29.72	4.30
Chalchihuites	9.91	0.96	0.55	4.05
Chinipas	14.08	0.16	0.96	1.37
Choix	45.58	8.67	39.59	11.76
Concordia	22.15	7.29	302.69	17.69
Cosala	58.38	0	46.87	3.38
Culiacan	373.48	6.72	114.63	34.16
Durango	48.70	115.16	313.25	44.76
El Fuerte	114.07	26.87	219.75	7.56
Elota	68.01	14.04	47.87	22.37
Escuinapa	53.67	11.05	177.69	32.40
Guachochi	247.53	375.46	138.95	245.85
Guadalupe Victoria	5.58	0	0	0.50
Guadalupe y Calvo	145.81	352.64	222.67	389.64
Guasave	1.18	0	0	0
Guazapares	0.59	2.69	11.70	1.07
Huajicori	52.78	44.26	503.21	77.26
Maguarichi	18.17	0.64	1.46	10.25
Mazatlan	79.57	22.48	46.83	36.84
Mezquital	42.32	204.59	1,797.18	47.42
Mocorito	169.13	0.43	61.22	18.44
Morelos	42.28	152.15	77.34	52.26
Navolato	41.76	0.16	0	1.11
Nombre de Dios	9.15	0	0	0.01
Nuevo Ideal	7.89	9.24	20.41	10.86
Otaez	9.67	15.76	3.71	0.75
Poanas	4.57	3.40	0	13.26
Pueblo Nuevo	65.37	302.49	289.34	35.73
Rosamorada	64.71	0.03	479.41	31.82
Rosario	112.79	59.20	835.26	67.60
Ruiz	11.17	1.51	188.82	19.38
Salvador Alvarado	40.57	0	0	0.63
San Dimas	42.44	65.98	139.62	17.79
San Ignacio	55.39	81.26	66.87	45.27
Santiago Ixcuintla	26.00	0.01	17.33	46.58
Sinaloa	95.13	70.16	233.93	39.87

Sombrerete	20.66	4.42	1.15	18.22
Suchil	12.37	1.18	1.84	3.33
Tamazula	111.88	0	22.87	8.59
Tecuala	43.66	0.14	32.34	37.26
Topia	26.01	3.24	105.56	4.68
Tuxpan	2.06	0	9.95	9.18
Urique	69.76	38.49	3.61	19.42
Vicente Guerrero	0.12	0.01	0	0.05

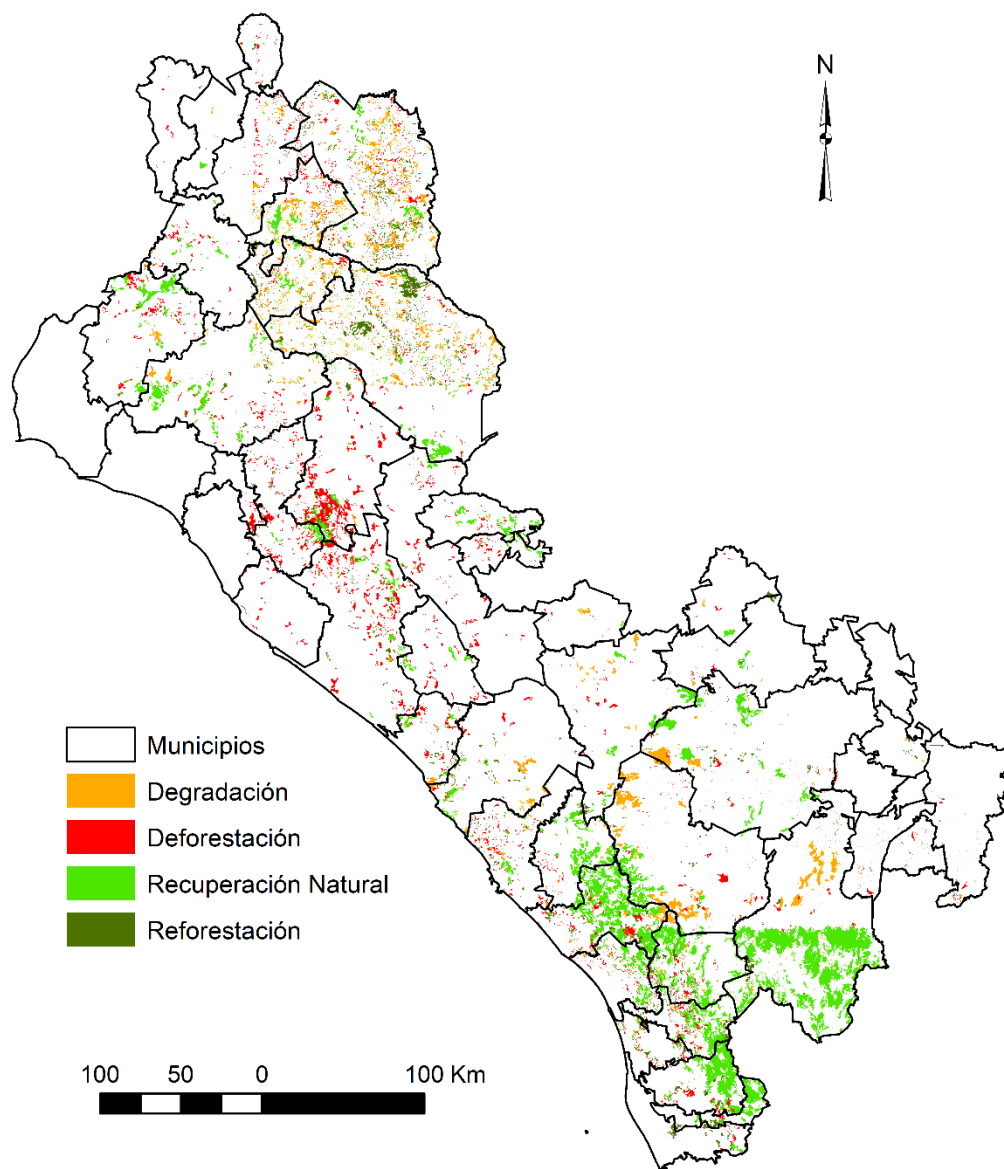


Figura 18. Cartografía de procesos forestales

Dentro de este análisis de cambios se generó un modelo estimativo de los principales procesos forestales, el cual indica el flujo o el comportamiento de una manera aproximada desde las coberturas forestales hacia las otras coberturas y viceversa, aportando una idea general de manera porcentual de los cambios que influyen en los ecosistemas forestales. De este modelo se puede comentar que el 12.12% de las selvas secundarias, el 3.54% de las selvas primarias, el 1.85% de los bosques secundarios y el 1.62% de los bosques primarios se deforestaron entre el 2002 y 2011, asimismo, el 3.31% del bosque primario se degradó a bosque secundario, y el 1.76% de selva primaria se degradó a selva secundaria.

Con respecto a la ganancia representada por la reconversión natural dentro de las mismas categorías del bosque y la selva, el 27.91% de bosque secundario pasaron a bosque primario, y el 36.16% de la selva secundaria paso a selva primaria, mientras que la reforestación definida en este estudio como la recuperación natural de otras categorías a las categorías de bosque y selva, el 1.42% pasaron a bosque primario, el 0.79% a selva primaria, el 0.78% bosque secundario y el 0.48% a selva secundaria (Figura 19).

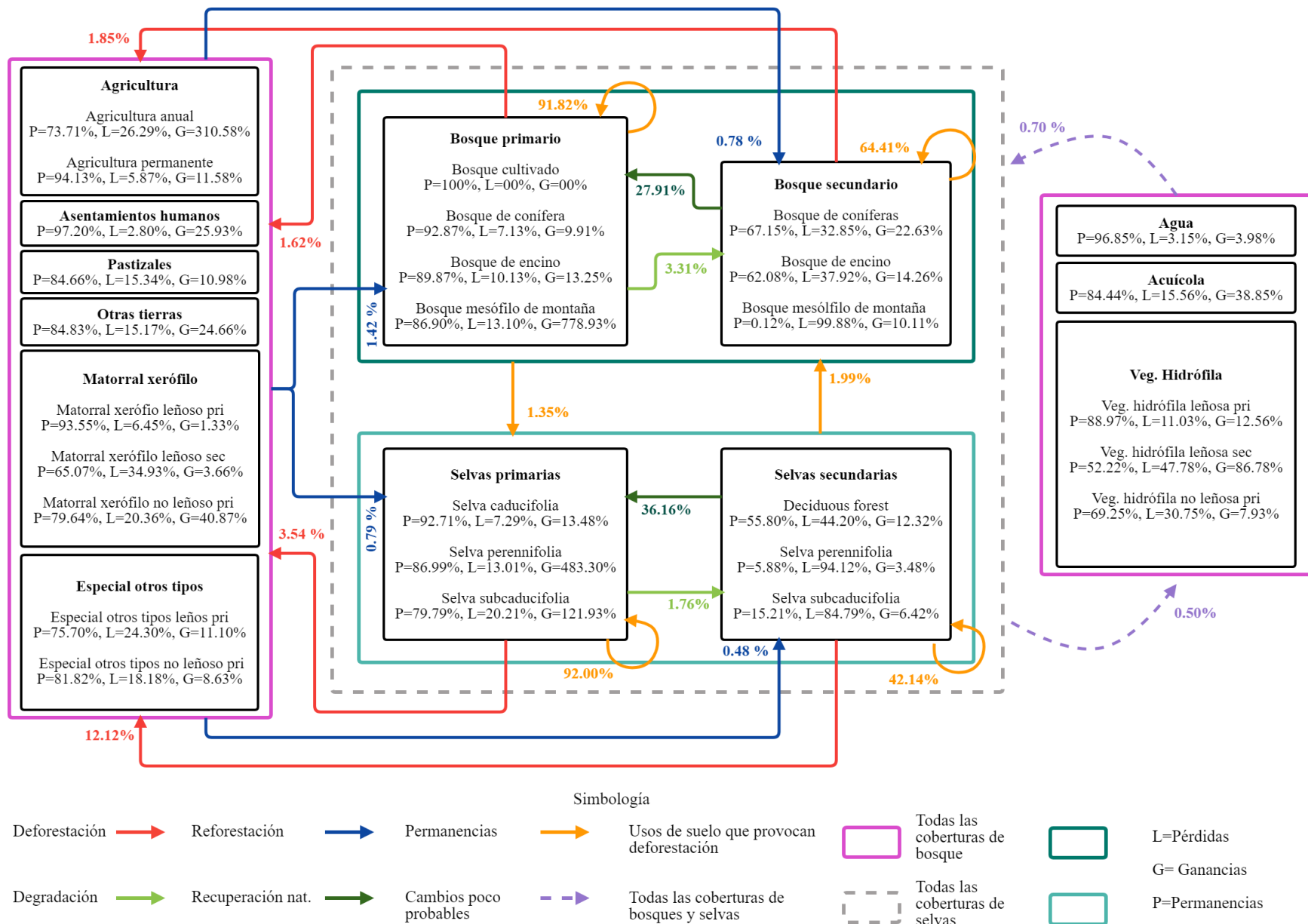


Figura 19. Modelo estimativo de los procesos forestales en bosques y selvas para la cuenca Norte del Pacífico. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Estimación de las emisiones por deforestación y degradación forestal

Por otro lado, las emisiones derivadas del proceso de deforestación de *bosques y selvas* son de 27,514.51 Gg de CO₂ e (Tabla 6). Donde se determinó que las coberturas con mayor cantidad de emisiones por pérdida son las *selvas caducifolias primarias y secundarias* que se transformaron en *agricultura permanente*, los *bosques de coníferas primarios* que pasaron a ser *pastizal* y el *bosque de encino primario* que también se convirtió en zonas de *agricultura permanente* (Anexo 1).

En el mismo sentido, los *bosques y las selvas primarias* que sufrieron una degradación emitieron un total de 508.21Gg de CO₂ e (Tabla 6). Indicando que la cobertura de *selva caducifolia primaria* presento mayor cantidad de emisiones (Anexo 2). De manera contraria, se determinó la absorción por reforestación, revelando que han capturado 603.38 Gg de CO₂ e (Tabla 6), debido a que principalmente zonas agrícolas permanentes fueron transformadas a *bosque de coníferas primario y secundario* y a *selvas caducifolias primarias*, al igual que coberturas de *pastizal* las transformaron a *bosque de coníferas primario* y a *selvas sub-caducifolias primarias* (Anexo 3).

Respecto a la absorción, por parte del proceso de recuperación natural forestal es de 2,856.26 Gg de CO₂ e (Tabla 6). Siendo las coberturas de *selvas sub-caducifolias y caducifolias* las que presentaron mayor significancia en absorción, respectivamente. Seguidas de las coberturas de *bosque de coníferas, encino, mesófilo de montaña* y por último la *selva perennifolia* (Anexo 4). En síntesis, las emisiones netas por los procesos forestales de pérdida y ganancia en las diferentes coberturas de *bosques y selvas* son de 24,563.09 Gg de CO₂, lo que indica que se emitió un promedio de 2,729.23 Gg de CO₂ e por año en el periodo 2002-2011.

De las evidencias anteriores se tiene que en la cuenca Pacífico Norte se produce aproximadamente el 11.96 % de las emisiones de gases efecto invernadero que comprenden los cambios en las coberturas de *bosque y selva* dentro del sector USCUS en México.

Tabla 6. Emisiones y absorciones de CO₂ de la cuenca Norte del Pacífico.

Proceso forestal	Carbono Biomasa Viva	Carbono Raíces	Carbono Total	Emisiones (Gg
	Ton/C	Ton/C	Ton/C	de CO₂)
Deforestación	-6019207.87	-1484750.13	-7503958.00	27514.51
Degradación	-111410.33	-27193.21	-138603.54	508.21
Recuperación natural	635111.24	143868.49	778979.72	-2856.26
Reforestación	134132.09	30425.05	164557.14	-603.38

Ton/C = Toneladas de Carbono; Gg= Giga-gramos; CO₂ e = Dióxido de Carbono equivalente

4.4. Discusión y conclusiones

En este capítulo se estimó las emisiones de CO₂ e por deforestación, degradación forestal, y absorciones de CO₂ por reforestación y recuperación natural forestal en biomasa viva y raíces, en la cuenca Pacífico Norte, una de las áreas hidrológico-administrativas más importantes de México en cuanto a la producción agrícola y por consecuencia una de las áreas con mayor afectación en los ecosistemas forestales. Asimismo, el estudio parte de análisis de cambios en la cobertura de uso de suelo, aplicando los enfoques de estimación del Nivel II para los DA que incluyen principalmente los procesos forestales de tipo natural y antrópico. En el mismo sentido, se contempló el Nivel III para los FE/FA que envuelven datos de C específico para cada categoría en función de su transformación o permanencia. Por tal conjunto de razones la homogenización y reclasificación de las categorías de los mapas de entrada se realizó en función del INGEI del sector USCUS de México y de acuerdo al marco metodológico del IPCC (IPCC, 2006).

Por otro lado, se puede inferir que la matriz de tabulación cruzada ayudó a evaluar las modificaciones que se generaron en el uso y cobertura del suelo a detalle, así como permitió que los especialistas centren la atención en las transiciones más importantes y facilitan el entendimiento de los diferentes procesos que ocurren en la cubierta, como es el caso de los procesos forestales de deforestación, degradación, reforestación y recuperación natural forestal. De acuerdo con este análisis de cambios se generó un mapa de procesos forestales, con el cual se determinó a nivel municipal la superficie afectada y beneficiada. El mismo mapa que puede ser utilizado para plantearse políticas de gestión y manejo de los ecosistemas forestales a un nivel más local. Por otro lado, cabe mencionar que los municipios más afectados de la cuenca en cuanto a pérdida forestal, coinciden con los municipios que

contemplan el área *hot spot* de deforestación más crítica en el estado de Sinaloa de acuerdo con Monjardin-Armenta *et al.*, (2016).

El modelo estimativo de los procesos forestales que también se generó a partir de los resultados de la matriz de tabulación cruzada ayudó a entender el comportamiento de una manera más general el flujo que presentan las coberturas forestales hacia otras coberturas y viceversa. De tal manera, se determinó que las coberturas forestales de la cuenca se deforestaron principalmente para pasar a ser áreas de *agricultura permanente* y de *temporal*, así como a *pastizales* inducidos para el pastoreo y cría de ganado, y por supuesto hacia *asentamientos humanos*. A razón de ello, existe una pérdida neta considerable del 3.17 % de cobertura forestal en cuanto a la superficie inicial de las coberturas de *bosques y selvas* en el año 2002. Asimismo, se degradó el 2.86 % de estas mismas coberturas primarias pasando a ser tipo secundarias.

Por estas razones, México se encuentra entre los primeros 20 países (FAO, 2015; Hansen *et al.*, 2013) con mayor pérdida de cobertura forestal a nivel mundial, así como también se encuentra entre los primeros 50 países con mayor degradación forestal (Pearson *et al.*, 2017), contribuyendo con ello a una gran cantidad de emisiones de gases efecto invernadero. Donde se hace referencia que particularmente el proceso de deforestación en la cuenca es el que más impacta de manera negativa. Por otro lado, la recuperación natural forestal es la que mayor contrarresta el problema de pérdida y deterioro de las coberturas forestales, por lo tanto, se pone en evidencia que los programas de reforestación son insuficientes.

También, es importante argumentar que las estimaciones de emisiones y absorciones generadas en este trabajo son más precisas que las que son estimadas mediante modelos globales, ya que en este estudio se tienen los FE/FA a detalle de biomasa aérea y de raíces de cada una de las categorías de uso de suelo y vegetación. De tal manera que los modelos globales de carbono subestiman las emisiones y absorciones de CO₂ e por los procesos forestales y se resaltan las ventajas de contar con un inventario nacional como el INGEI de México (Denman *et al.*, 2007). Un ejemplo de ello es que, cualquier tipo de cobertura forestal contempla diferentes FE/FA dependiendo hacia que cobertura se transforme o permanezca.

En tal sentido, el presente estudio revela de diferentes puntos de vista la importancia que tienen las coberturas forestales y sus cambios, específicamente la pérdida y el deterioro de estas, ya que afectan de manera negativa diferentes factores climáticos, que a su vez impactan en la economía y el bienestar de una sociedad. Asimismo, este estudio puede ser un punto de partida para que se gestione un manejo forestal adecuado para cada municipio. Por tal razón, unas de las recomendaciones son: Estudiar las coberturas forestales de manera periódica, con mayor precisión y a un nivel más local; Así como también, actualizar de manera constate los FE/FA de las diferentes coberturas de uso de suelo y vegetación.

4.5. Anexos

Anexos 1. Deforestación en la cuenca Norte del Pacífico.

Deforestación					
Uso de suelo Inicial	Uso de suelo Final	Carbono Biomasa Viva	Carbono Raíces	Carbono Total	Emisiones
Tierra Forestal	Pradera/Subcategoría de Reporte	Ton/C	Ton/C	Ton/C	(Gg de CO ₂)
Bosque de Coníferas Primario	Pastizal	-1120782.00	-266238.53	-1387020.52	5085.74
Bosque de Coníferas Secundario	Pastizal	-144019.92	-34905.29	-178925.21	656.06
Bosque de Encino Primario	Pastizal	-405510.73	-109084.47	-514595.20	1886.85
Bosque de Encino Secundario	Pastizal	-107508.90	-29279.17	-136788.07	501.56
Selva Perennifolia Primario	Pastizal	-201.94	-47.74	-249.68	0.92
Selva Perennifolia Secundario	Pastizal	-275.13	-66.99	-342.12	1.25
Selva Subcaducifolia Primario	Pastizal	-15992.15	-3855.93	-19848.08	72.78
Selva Subcaducifolia Secundario	Pastizal	-79515.47	-19753.50	-99268.97	363.99
Selva Subcaducifolia Secundario	Vegetación Hidrófila No Leñoso Primario	-273.08	-67.84	-340.92	1.25
Selva Caducifolia Primario	Pastizal	-134242.37	-33016.87	-167259.24	613.28
Selva Caducifolia Primario	Vegetación Hidrófila No Leñoso Primario	-1496.22	-368.00	-1864.22	6.84
Selva Caducifolia Secundario	Pastizal	-124344.04	-30972.97	-155317.01	569.50
Selva Caducifolia Secundario	Vegetación Hidrófila No Leñoso Primario	-5058.23	-1259.96	-6318.19	23.17
Bosque de Coníferas Primario	Agrícola Permanente	-887095.18	-210726.90	-1097822.08	4025.35
Bosque de Coníferas Secundario	Agrícola Permanente	-147714.44	-35800.71	-183515.15	672.89

Bosque de Encino Primario	Agrícola Permanente	-188884.42	-50810.88	-239695.31	878.88
Bosque de Encino Secundario	Agrícola Permanente	-53255.77	-14503.77	-67759.55	248.45
Bosque mesófilo de Montana Primario	Agrícola Permanente	-150.89	-37.63	-188.52	0.69
Selva Perennifolia Primario	Agrícola Permanente	-1130.84	-267.35	-1398.20	5.13
Selva Perennifolia Secundario	Agrícola Permanente	-13264.99	-3229.86	-16494.85	60.48
Selva Subcaducifolia Primario	Agrícola Anual	-393.00	-94.76	-487.76	1.79
Selva Subcaducifolia Primario	Agrícola Permanente	-40721.03	-9818.41	-50539.44	185.31
Selva Subcaducifolia Secundario	Agrícola Anual	-8144.31	-2023.24	-10167.55	37.28
Selva Subcaducifolia Secundario	Agrícola Permanente	-174162.97	-43266.15	-217429.12	797.24
Selva Caducifolia Primario	Agrícola Anual	-5880.50	-1446.31	-7326.80	26.86
Selva Caducifolia Primario	Agrícola Permanente	-1145166.01	-281653.28	-1426819.30	5231.67
Selva Caducifolia Secundario	Agrícola Anual	-4691.51	-1168.61	-5860.13	21.49
Selva Caducifolia Secundario	Agrícola Permanente	-1112621.78	-277144.00	-1389765.78	5095.81
Selva Caducifolia Primario	Acuícola	-7968.25	-1959.79	-9928.04	36.40
Selva Caducifolia Secundario	Acuícola	-5146.75	-1282.01	-6428.76	23.57
Bosque de Coníferas Primario	Asentamientos	-2892.08	-687.01	-3579.09	13.12
Bosque de Encino Primario	Asentamientos	-20.66	-5.56	-26.21	0.10
Bosque de Encino Secundario	Asentamientos	-58.67	-15.98	-74.65	0.27
Bosque mesófilo de Montana Secundario	Asentamientos	-36.25	-9.36	-45.61	0.17
Selva Subcaducifolia Primario	Asentamientos	-816.23	-196.81	-1013.04	3.71
Selva Subcaducifolia Secundario	Asentamientos	-4160.51	-1033.57	-5194.07	19.04
Selva Caducifolia Primario	Asentamientos	-9186.10	-2259.32	-11445.42	41.97
Selva Caducifolia Secundario	Asentamientos	-3907.49	-973.32	-4880.80	17.90
Selva Caducifolia Primario	Otras Tierras	-49062.14	-12066.82	-61128.96	224.14
Selva Caducifolia Secundario	Otras Tierras	-13454.90	-3351.49	-16806.40	61.62
Total		-6019207.87	-1484750.13	-7503958.00	27514.51

Anexos 2. Degradación forestal de la cuenca Norte del Pacífico.

Degradación					
Uso de suelo Inicial	Uso de suelo Final	Carbono Biomasa Viva	Carbono Raíces	Carbono Total	Emisiones

Tierra Forestal	Tierra forestal/Subcategoría de Reporte	Ton/C	Ton/C	Ton/C	(Gg de CO ₂)
Bosque de Coníferas Primario	Bosque de Coníferas Secundario	-11500.68	-2881.60	-14382.29	52.74
Bosque de Encino Primario	Bosque de Encino Secundario	-12571.41	-3153.26	-15724.67	57.66
Selva Perennifolia Primario	Selva Perennifolia Secundario	-221.13	-48.85	-269.97	0.99
Selva Subcaducifolia Primario	Selva Subcaducifolia Secundario	-2112.96	-512.00	-2624.96	9.62
Selva Caducifolia Primario	Selva Caducifolia Secundario	-85004.15	-20597.50	-105601.65	387.21
Total		-111410.33	-27193.21	-138603.54	508.21

Anexos 3. Reforestación de la cuenca Norte del Pacífico.

Reforestación					
Tierras convertidas a Tierras Forestales		Carbono Biomasa Viva	Carbono Raíces	Carbono Total	Emisiones
Uso de suelo Inicial	Uso de suelo Final				
Otros Usos	Tierra forestal/Subcategoría de Reporte	Ton/C	Ton/C	Ton/C	(Gg de CO ₂)
Pastizal	Bosque de Coníferas Primario	13651.254	3002.751	16654.005	-61.06
Pastizal	Bosque de Coníferas Secundario	10588.035	2382.999	12971.034	-47.56
Pastizal	Bosque de Encino Primario	5226.3449	1263.1556	6489.5005	-23.79
Pastizal	Bosque de Encino Secundario	5023.2548	1292.8152	6316.07	-23.16
Pastizal	Bosque mesófilo de Montana Primario	30.3875	7.579	37.9665	-0.14
Pastizal	Selva Perennifolia Primario	103.1985	23.0095	126.208	-0.46
Pastizal	Selva Subcaducifolia Primario	12967.9594	2870.1216	15838.081	-58.07
Pastizal	Selva Subcaducifolia Secundario	6679.9144	1505.3488	8185.2632	-30.01
Pastizal	Selva Caducifolia Primario	4848.0612	1109.8623	5957.9235	-21.85
Pastizal	Selva Caducifolia Secundario	3675.5838	853.3953	4528.9791	-16.61
Matorral Xerófilo No Leñoso Primario	Selva Caducifolia Primario	16.9428	3.8787	20.8215	-0.08
Vegetación Hidrófila No Leñoso Primario	Selva Subcaducifolia Secundario	1.1777	0.2654	1.4431	-0.01
Vegetación Hidrófila No Leñoso Primario	Selva Caducifolia Primario	45.9876	10.5279	56.5155	-0.21

Vegetación Hidrófila No Leñoso Primario	Selva Caducifolia Secundario	983.1556	228.2686	1211.4242	-4.44
Agrícola Anual	Bosque de Coníferas Primario	23.7196	5.2174	28.937	-0.11
Agrícola Anual	Selva Perennifolia Primario	2.4282	0.5414	2.9696	-0.01
Agrícola Anual	Selva Subcaducifolia Primario	776.4614	171.8496	948.311	-3.48
Agrícola Anual	Selva Subcaducifolia Secundario	128.3693	28.9286	157.2979	-0.58
Agrícola Anual	Selva Caducifolia Primario	25.0108	5.7257	30.7365	-0.11
Agrícola Anual	Selva Caducifolia Secundario	4.7726	1.1081	5.8807	-0.02
Agrícola Permanente	Bosque de Coníferas Primario	19351.4484	4256.5746	23608.023	-86.56
Agrícola Permanente	Bosque de Coníferas Secundario	15084.455	3394.987	18479.442	-67.76
Agrícola Permanente	Bosque de Encino Primario	3126.6011	755.6684	3882.2695	-14.23
Agrícola Permanente	Bosque mesófilo de Montana Primario	960.7975	239.6342	1200.4317	-4.40
Agrícola Permanente	Bosque mesófilo de Montana Secundario	251.93	61.832	313.762	-1.15
Agrícola Permanente	Selva Perennifolia Primario	1351.2933	301.2891	1652.5824	-6.06
Agrícola Permanente	Selva Subcaducifolia Primario	6506.8168	1440.1152	7946.932	-29.14
Agrícola Permanente	Selva Subcaducifolia Secundario	2375.4209	535.3118	2910.7327	-10.67
Agrícola Permanente	Selva Caducifolia Primario	14004.4344	3206.0226	17210.457	-63.11
Agrícola Permanente	Selva Caducifolia Secundario	6109.6098	1418.5263	7528.1361	-27.60
Acuícola	Selva Caducifolia Primario	23.3972	5.3563	28.7535	-0.11
Acuícola	Selva Caducifolia Secundario	28.6356	6.6486	35.2842	-0.13
Asentamientos	Bosque de Coníferas Primario	14.3566	3.1579	17.5145	-0.06
Asentamientos	Bosque de Encino Primario	15.5687	3.7628	19.3315	-0.07
Asentamientos	Bosque de Encino Secundario	5.8376	1.5024	7.34	-0.03
Asentamientos	Selva Subcaducifolia Primario	3.5134	0.7776	4.291	-0.02
Asentamientos	Selva Subcaducifolia Secundario	15.3101	3.4502	18.7603	-0.07
Asentamientos	Selva Caducifolia Primario	45.1808	10.3432	55.524	-0.20
Asentamientos	Selva Caducifolia Secundario	5.4544	1.2664	6.7208	-0.02
Otras Tierras	Selva Caducifolia Primario	41.1468	9.4197	50.5665	-0.19
Otras Tierras	Selva Caducifolia Secundario	8.8634	2.0579	10.9213	-0.04

Total	134132.0909	30425.0529	164557.1438	-603.38
-------	-------------	------------	-------------	---------

Anexos 4. Recuperación natural de la cuenca Norte del Pacífico.

		Recuperación			
Uso de suelo Inicial	Uso de suelo Final	Carbono Biomasa Viva	Carbono Raíces	Carbono Total	Emisiones
Tierra Forestal	Tierra forestal/Subcategoría de Reporte	Ton/C	Ton/C	Ton/C	(Gg de CO ₂)
Bosque de Coníferas Secundario	Bosque de Coníferas Primario	131864.7468	29005.1742	160869.921	-589.856377
Bosque de Encino Secundario	Bosque de Encino Primario	100023.4823	24174.6812	124198.1635	-455.3932662
Bosque mesófilo de Montana Secundario	Bosque mesófilo de Montana Primario	4226.625	1054.17	5280.795	-19.362915
Selva Perennifolia Secundario	Selva Perennifolia Primario	40850.8227	9108.2429	49959.0656	-183.1832405
Selva Subcaducifolia Secundario	Selva Subcaducifolia Primario	192467.5654	42597.7056	235065.271	-861.9059937
Selva Caducifolia Secundario	Selva Caducifolia Primario	165677.9936	37928.5144	203606.508	-746.557196
Total		635111.2358	143868.4883	778979.7241	-2856.25

4.6. Referencias

- Achard, F., Boschetti, L., Brown, S., Brady, M., DeFries, R., Grassi, G., ... Souza, C. (2014). *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation*. Retrieved from <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/reports/481317>
- ACHARD, F., BROWN, S., BRADY, M., DEFRIES, R., GRASSI, G., HEROLD, M., ... SOUZA, C. (2012). *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation*. GOFC-GOLD Land Cover Project Office, hosted by Wageningen University. Retrieved from <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC76900>
- Achard, F., Eva, H. D., Stibig, H.-J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., & Malingreau, J.-P. (2002). Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science (New York, N.Y.)*, 297(5583), 999–1002. <https://doi.org/10.1126/science.1070656>
- Bartalev, S. S., Kissiyar, O., Achard, F., Bartalev, S. A., & Simonetti, D. (2014). Assessment of forest cover in Russia by combining a wall-to-wall coarse-resolution land-cover map with a sample of 30 m resolution forest maps. *International Journal of Remote Sensing*, 35(7), 2671–2692. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.883099>
- Braimah, A. K. (2006). Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana. *Agriculture, Ecosystems &*

- Environment*, 113(1–4), 254–263. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2005.10.019>
- Bryan, J., Shearman, P., Ash, J., & Kirkpatrick, J. B. (2010). Estimating rainforest biomass stocks and carbon loss from deforestation and degradation in Papua New Guinea 1972–2002: Best estimates, uncertainties and research needs. *Journal of Environmental Management*, 91(4), 995–1001. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2009.12.006>
- Cadman, T., Maraseni, T., Ma, H. O., & Lopez-Casero, F. (2017). Five years of REDD+ governance: The use of market mechanisms as a response to anthropogenic climate change. *Forest Policy and Economics*, 79, 8–16. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2016.03.008>
- Camacho-Sanabria, J. M., Pérez, J. I. J., Jaimes, N. B. P., Vargas, E. G. C., Peña, L. C. B., López, M. S., ... López, M. S. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques (México) Num.1 Vol.21*. Retrieved from <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/39493>
- Cao, V., Margni, M., Favis, B. D., & Deschênes, L. (2015). Aggregated indicator to assess land use impacts in life cycle assessment (LCA) based on the economic value of ecosystem services. *Journal of Cleaner Production*, 94, 56–66. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.01.041>
- Chaudhary, S., Chettri, N., Uddin, K., Khatri, T. B., Dhakal, M., Bajracharya, B., & Ning, W. (2016). Implications of land cover change on ecosystems services and people's dependency: A case study from the Koshi Tappu Wildlife Reserve, Nepal. *Ecological Complexity*, 28, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2016.04.002>
- CONAFOR, & SEMARNAT. (2009). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos México 2004-2009*. Zapopan, Jalisco, México. Retrieved from <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Inventario-Nacional-Forestal-y-de-Suelos.pdf>
- CONAGUA, C. N. del A. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa III Pacífico Norte*. Retrieved from www.semarnat.gob.mxwww.conagua.gob.mxwww.conagua.gob.mx/conagua07/temas/programashidricosregionales2030.pdf
- CONAGUA, C. N. del A. (2015). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego Año agrícola 2013-2014*. Retrieved from <https://bpo.sep.gob.mx/#/recurso/615>
- Denman, K. L., Brasseur USA, G., Ramachandran, S., Leite da Silva Dias, P., Wofsy, S. C., Brasseur, G., ... Averyt, K. (2007). *7 Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry Coordinating Lead Authors: This chapter should be cited as*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter7.pdf>
- Eckert, S., Ratsimba, H. R., Rakotondrasoa, L. O., Rajoelison, L. G., & Ehrensperger, A. (2011). Deforestation and forest degradation monitoring and assessment of biomass and carbon stock of lowland rainforest in the Analanjirofo region, Madagascar. *Forest Ecology and Management*, 262(11), 1996–2007. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2011.08.041>
- FAO, F. A. A. O. O. T. U. N. (2015). *Global Forest Resources Assessment 2015 Desk reference*. Rome. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>
- FRA. (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010*. Rome, Italy. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i1757e.pdf>
- FSI. (2018). Forest Survey of India. Retrieved November 21, 2018, from <http://fsi.nic.in/fsi-node>
- Gao, J., Gao, H., Zhou, C., & Zhang, X. (2017). The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a

- study of the Guishui River Basin, Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 163, S148–S155. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.049>
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2001). *What Drives Tropical Deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*. Louvain-la-Neuve (Belgium). Retrieved from <http://www.pik-potsdam.de/~luedeke/lucc4.pdf>
- Greenhalgh, S., Daviet, F., & Weninger, E. (2005). *The Greenhouse Gas Protocol, The Land Use, Land-Use Change, and Forestry Guidance for GHG Project Accounting*. Retrieved from https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/LULUCF_Guidance_1.pdf
- Grinand, C., Rakotomalala, F., Gond, V., Vaudry, R., Bernoux, M., & Vieilledent, G. (2013). Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. *Remote Sensing of Environment*, 139, 68–80. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2013.07.008>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., & et., al. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342, 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Houghton, R. . (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(6), 597–603. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2012.06.006>
- INECC, & CONAFOR. (2015). *First Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change Executive Summary*. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Executive_Summary_1.pdf
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía Uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000*. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ususuelo/doc/guia_interususuelov.pdf
- INPE. (2018). PRODES — Coordenação-Geral de Observação da Terra. Retrieved November 21, 2018, from <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>
- IPCC. (2006). Agriculture, Forestry and Other Land Use. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hamaya, Japan. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm
- Kanninen, M., Brockhaus, M., Murdiyarso, D., & Nabuurs, G. (2010). *Harnessing forests for climate change mitigation through REDD+*. Wien, Austria. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113395930>
- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9–20. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.06.014>
- Kim, S., & Rowe, P. G. (2012). Does large-sized cities' urbanisation predominantly degrade environmental resources in China? Relationships between urbanisation and resources in the Changjiang Delta Region. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 19(4), 321–329. <https://doi.org/10.1080/13504509.2011.647108>
- Manson, R. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3–

20. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61710101>
- Mas, J.-F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multidecade spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249–261. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2004.06.002>
- Monjardin-Armenta, S. A., Pacheco-Angulo, C. E., Plata-Rocha, W., Corrales-Barraza, G., Romero-Andrade, R., & Beltrán-González, J. C. (2016). Determination and Analysis of Hot Spot Areas of Deforestation Using Remote Sensing and Geographic Information System Techniques. Case Study: State Sinaloa, Mexico. *Open Journal of Forestry*, 06(04), 295–304. <https://doi.org/10.4236/ojf.2016.64024>
- Moreno, M. V., & Chuvieco, E. (2009). Validación de productos globales de cobertura del suelo en la España Peninsular. Validation of global land cover products for the Spanish Peninsular area. *Revista de Teledetección*, 31, 5–22. Retrieved from http://www.aet.org.es/revistas/revista31/Numero31_1.pdf
- Nathan, I., & Pasgaard, M. (2017). Is REDD+ effective, efficient, and equitable? Learning from a REDD+ project in Northern Cambodia. *Geoforum*, 83, 26–38. <https://doi.org/10.1016/J.GEOFORUM.2017.04.020>
- Pacheco-Angulo, C., Vilanova, E., Aguado, I., Monjardin, S., Martínez, S., Pacheco-Angulo, C., ... Martínez, S. (2017). Carbon Emissions from Deforestation and Degradation in a Forest Reserve in Venezuela between 1990 and 2015. *Forests*, 8(8), 291. <https://doi.org/10.3390/f8080291>
- Pacheco, C., Aguado, I., & Mollicone, D. (2011). LAS CAUSAS DE LA DEFORESTACIÓN EN VENEZUELA: UN ESTUDIO RETROSPECTIVO. *BioLlania*. Retrieved from https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30540296/Pacheco_et_al_%282011%29_Deforestacion_Venezuela.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1535400628&Signature=zWyvXFbsU0N9%2FqLnMb1KCrL1RCY%3D&response-content-disposition=inline%3B%20file
- Pearson, T. R. H., Brown, S., & Casarim, F. M. (2014). Carbon emissions from tropical forest degradation caused by logging. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034017>
- Pearson, T. R. H., Brown, S., Murray, L., & Sidman, G. (2017). Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: an underestimated source. *Carbon Balance and Management*, 12(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0072-2>
- Pineda Jaimes, N. B. (2010). *Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el estado de México mediante tecnologías de la información geográfica*. Universidad de Alcalá, España. Retrieved from <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/9705>
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2003.09.008>
- Potapov, P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Loveland, T. R., & Pittman, K. (2008). Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3708–3719. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2008.05.006>
- Pullanikkatil, D., Palamuleni, L. G., & Ruhiiga, T. M. (2016). Land use/land cover change and implications for

- ecosystems services in the Likangala River Catchment, Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 93, 96–103. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2016.03.002>
- Romijn, E., Lantican, C. B., Herold, M., Lindquist, E., Ochieng, R., Wijaya, A., ... Verchot, L. (2015). Assessing change in national forest monitoring capacities of 99 tropical countries. *Forest Ecology and Management*, 352, 109–123. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.06.003>
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E., & Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20(1), 21–35. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712014000100003&script=sci_arttext&tlng=pt
- Ruckelshaus, M., McKenzie, E., Tallis, H., Guerry, A., Daily, G., Kareiva, P., ... Bernhardt, J. (2015). Notes from the field: Lessons learned from using ecosystem service approaches to inform real-world decisions. *Ecological Economics*, 115, 11–21. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2013.07.009>
- Skutsch, M., Mas, J. F., Bocco, G., Bee, B., Cuevas, G., & Gao, Y. (2014). Deforestation and land tenure in Mexico: A response to Bonilla-Moheno et al. *Land Use Policy*, 39, 390–396. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2013.11.013>
- Tolessa, T., Senbeta, F., & Kidane, M. (2017). The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem Services*, 23, 47–54. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2016.11.010>
- Trumper, K. (2009). The natural fix? : the role of ecosystems in climate mitigation : a UNEP rapid response assessment. United Nations Environment Programme. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=Jl0Me6vhnWMC&oi=fnd&pg=PA4&dq=trumper+2009&ots=w_HC2BMQAQ&sig=HivXvPrLQcLOZo7Wls_vnoNb_mk#v=onepage&q=trumper%202009&f=false
- Valdez Pérez, M. E., Orozco Hernández, M. E., Romero-Salazar, L., & Aguilar Ortigoza, C. J. (2015). Analysis Of Land Use Changes And Carbon Content In Forest Covers In The State Of Mexico With Spatial And Stochastic Methods. *Journal of Geography and Earth Sciences*, 3(2), 33–49. Retrieved from <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/71119>
- van der Werf, G. R., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., ... Randerson, J. T. (2009). CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2(11), 737–738. <https://doi.org/10.1038/ngeo671>
- Velázquez, A. (2008). *La dinámica de la cubierta forestal de México*. Retrieved from www.smf.mx/C-Global/webCubFor.htm
- Velázquez, A., Mas, J., Diaz-Gallegos, J., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, R., Castro, R., ... PalaCio, J. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, (62), 21–37. Retrieved from <file:///C:/Users/Sergio Monjardin/Downloads/Dialnet-PatronesYTasasDeCambioDeUsoDelSueloEnMexico-2897113.pdf>
- Xuejun Wang, Yuxing Zhang, Enping Yan, Guosheng Huang, Chunxiang Cao, & Xiliang Ni. (2014). Deforestation area estimation in China based on Landsat data. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 4254–4256). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947428>
- Zhang, F., Zhan, J., Zhang, Q., Yao, L., & Liu, W. (2017). Impacts of land use/cover change on terrestrial carbon stocks in Uganda. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 101, 195–203. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2017.03.005>

Capítulo V. Factores conductores de la deforestación, mediante Consulta a Expertos y Regresión Logística Espacial. Cuenca Pacífico Norte, México

5.1. Introducción

De acuerdo con las últimas estadísticas del Forest Resources Assessment (FRA) la pérdida neta anual del bosque a nivel mundial para el periodo 2010-2015 fue de 33,000 km²/año (Keenan *et al.*, 2015; MacDicken, 2015). Estas cifras de deforestación y degradación del bosque son alarmantes ya que son responsables aproximadamente del 20 % del Dióxido de Carbono (CO₂) que se emite a la atmosfera a nivel global (Cadman *et al.*, 2017; Houghton, 2012; van der Werf *et al.*, 2009), dentro del sector Agricultura, Bosque y Otros Usos del Suelo (AFOLU), que ha establecido el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). Este último ha generado, a nivel internacional el programa de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal (REDD+), dirigido a combatir el cambio climático a través de la mitigación de la deforestación y degradación de las superficies forestales, así como a preservar las reservas de carbono y sostenibilidad de estas (IPCC, 2014; Nathan & Pasgaard, 2017).

La participación de las Partes (que son países en desarrollo) en los mecanismos REDD+ es voluntaria, y el resultado de sus acciones debe Medirse, Notificarse y Verificarse (MNV), para ello se solicita a las partes que elaboren una estrategia o plan de acción a nivel nacional, donde deben incluir las formas de abordar los factores que impulsan la deforestación y degradación forestal y garantizar las salvaguardias, lo que asegura una participación plena y eficaz de las partes interesadas pertinentes, como los pueblos indígenas y comunidades locales (Reyes, 2013).

Para determinar los factores que impulsan la deforestación y la degradación del bosque, se tienen que realizar estudios de causas, debido a que estos describen las lógicas bajo las cuales se ha dado la pérdida de cobertura del bosque (Armenteras *et al.*, 2018), reduciendo así la incertidumbre acerca de la ocurrencia espacial y temporal de los futuros procesos de deforestación y degradación forestal (Aquino & Guay, 2013; Bax *et al.*, 2016), y determinando el impacto ecológico provocado sobre el

territorio, los cuales se manifiestan en pequeñas variaciones del clima, conservación del agua, del suelo y de la biodiversidad (Moonen *et al.*, 2016; Salvini *et al.*, 2014; Xuejun Wang *et al.*, 2014).

Los estudios de causas de la deforestación se enmarcan en analizar las causas principales, las causas secundarias y sus interacciones; las causas principales son actividades que directamente generan los procesos de deforestación, como la agricultura, la extensión de infraestructura, la extracción de madera, la minería, entre otras; mientras que las causas secundarias son los factores que impulsan a las actividades principales, tales como, los demográficos, económicos, políticos, culturales y tecnológicos (Geist & Lambin, 2001, 2002).

Actualmente para tratar de entender la capacidad interpretativa de las causas de la deforestación, se aplican diversas metodologías, algunas que se basan en estudios de casos a nivel local o regional, los cuales examinan las causas de la deforestación de manera empírica, mediante una extensa revisión bibliográfica (Hosonuma *et al.*, 2012; Lambin *et al.*, 2003; Lambin & Meyfroidt, 2010; Meyfroidt *et al.*, 2010; Pacheco *et al.*, 2011; RUDEL *et al.*, 2009; Weatherley-Singh & Gupta, 2015), o mediante aplicación de encuestas a expertos sobre las causas principales y secundarias de la deforestación (Defourny *et al.*, 2011; MECNT, 2012b, 2012a; Monjardín-Armenta *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2014).

Del mismo modo, se han empleado otras técnicas, tales como estadísticas de regresiones (Etter *et al.*, 2006; Schneider & Pontius, 2001; Serneels & Lambin, 2001; Wyman & Stein, 2010), redes neuronales artificiales (Mas *et al.*, 2004; Mayfield *et al.*, 2017), modelos basados en agentes (Hoffman *et al.*, 2002; Manson & Evans, 2007), autómatas celulares (Basse *et al.*, 2014; BEHERA *et al.*, 2012; Berberoğlu *et al.*, 2016; Jantz *et al.*, 2010; Messina & Walsh, 2001) y modelos estadísticos multinivel (López-Carr *et al.*, 2012; Overmars & Verburg, 2006b; Pan & Bilborrow, 2005).

Particularmente en México se han utilizado con mayor frecuencia los modelos de regresión lineal para modelar la deforestación y los cambios de la ocupación y uso del suelo (Alix-Garcia, 2007; Bray, Ellis *et al.*, 2004; Ellis *et al.*, 2010; Ellis *et al.*, 2017; Leyva-Reyes *et al.*, 2003; López-Barrera *et al.*, 2014; Márquez, 2005; Miranda-Aragón *et al.*, 2012; Morales-Barquero *et al.*, 2015; Roy Chowdhury, 2006). También se han utilizado Redes Bayesianas, Redes Neuronales y procesos Gaussianos (Mayfield *et*

al., 2017), así como Regresión Geográficamente Ponderada Regression (Farfán Gutiérrez, 2015; Pineda-Jaimes *et al.*, 2010), la técnica de Pesos de Evidencia (Osorio *et al.*, 2015) y a través de encuestas a expertos (Monjardín-Armenta *et al.*, 2017).

En este orden de ideas, se planteó en la presente investigación analizar y entender las causas de la deforestación, en la cuenca Pacífico Norte, México para el periodo 2002-2011, la importancia de este espacio geográfico radica, en ser uno de los principales valles más fértiles del país que posee una gran riqueza hídrica, y que en los últimos años se encuentra asediada por los procesos de deforestación, debido al aumento de la población y sus actividades socio-económicas (CONAGUA, 2015).

La contribución de este capítulo se enfoca en la integración de técnicas y metodologías que permitieron comprender en mayor medida las causas de la deforestación, estas se realizaron mediante la aplicación de encuestas para definir las causas de la deforestación y los factores conductores relacionados, estos últimos sirvieron de base para determinar las variables utilizadas en la construcción del modelo de Regresión Logística Espacial, lo que en conjunto determinó de manera cualitativa y cuantitativa las causas de la deforestación en la cuenca Pacífico Norte, México, y permitirá a futuro, bajo la utilización de reglas de decisión espacial crear modelos de simulación geoespacial (Wehkamp *et al.*, 2015).

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Datos

Se recopiló información de tipo vectorial, raster y alfanumérica de diferentes instituciones gubernamentales, en la tabla 7, se detalla dicha información.

Tabla 7. Descripción de la información geoespacial utilizada

Datos (año)	Escala / Resolución y formato	Descripción	Url
Mapa de Uso de Suelo y Vegetación (US&V) (2002 y 2011)	1:250,000 Vectorial	Cartografía de uso oficial de los diferentes tipos de uso de suelo y vegetación, generada a partir de imágenes Landsat	http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recreat/ usosuelo/Default.aspx
Red vial (2000)	1:50,000 Vectorial	La red de vialidades se generó a partir de cartas topografías, ortofotos e imágenes satelitales Spot e información de la SCT	http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/vectoriales_carreteras.aspx
Hidrografía (2000)	1:50,000 Vectorial	Esta cartografía de red hidrográfica se generó principalmente a partir de cartas topografías, ortofotos e imágenes satelitales Spot y de un Modelo Digital de Elevaciones	http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recreat/hidrologia/default.aspx
Minas (2000)	1:1,000,000 Vectorial	Se ubicaron las minas de acuerdo a la base de datos del Servicio Geológico Mexicano e imágenes del satélite Spot.	http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267612
Precipitación Media Anual (2000)	1:1,000,000 Vectorial	Se elaboró a través de datos puntuales provenientes de estaciones meteorológicas y observatorios climatológicos	http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267544
Temperatura (2000)	1:1,000,000 Vectorial	Se elaboró a través de datos puntuales provenientes de estaciones meteorológicas y observatorios climatológicos	http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267551
Humedad del suelo	1:1,000,000 Vectorial	Se elaboró a través de datos puntuales provenientes de estaciones meteorológicas y observatorios climatológicos	http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267537
Áreas Naturales Protegidas (2010)	1:250,000 Vectorial	Esta áreas protegidas se delimitaron en base a información cartográfica de los mapas de USyV, cartas topográficas y la red hidrográfica, así como también de imágenes de satélite Spot	http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm
Tasa de Actividad Económica (2000)	Localidad Numérico	Mediante el censo de población y vivienda 2000	http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/tabentidad.aspx?c=33144&s=est
Densidad de población (2000)	Localidad Numérico	Mediante el censo de población y vivienda 2000	http://www3.inegi.org.mx/sistemas/SCITEL/default?ev=3
Índice de Marginación (2000)	Localidad Numérico	Esta información se generó a partir del censo de población y vivienda 2000 del INEGI	http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_marginacion_a_nivel_localidad_2000
Producción Forestal (2012)	1:250,000 Vectorial	Esta zonificación forestal se delinea a partir de información de las cartas de USyV del INEGI, del Inventario Nacional Forestal y de Suelos y de un Modelo Digital de Elevaciones	http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/zonificacion
Áreas Naturales Protegidas (2010)	1:250,000 Vectorial	Esta áreas protegidas se delimitaron en base a información cartográfica de los mapas de USyV, cartas topográficas y la red hidrográfica, así como también de imágenes de satélite Spot	http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm
Modelo Digital de Elevaciones (DEM) (2008)	90 m Raster	Se elaboró a partir de datos de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM)	http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp

5.2.2. Metodología

Los métodos que se emplearon para analizar las causas de la deforestación en la cuenca Pacífico Norte, México, parten principalmente de la combinación de la Consulta a Expertos de las causas principales y secundarias de la deforestación y el ajuste de un modelo de Regresión Logística Espacial, para entender mejor las lógicas del problema de la deforestación.

5.2.3. Preparación de los datos

A esta información se le realizó un análisis temático, topológico, geométrico y una serie de operaciones espaciales como reclasificación, promedios, restas, sumatoria o intersecciones, entre otras, con el fin de homogeneizar la información, a nivel raster, con un tamaño de pixel de 100 m, que a su vez representa la Unidad Mínima Cartografiada de 1 hectárea (Blaschke & Hay, 2001; Lencinas & Siebert, 2009), e integradas en una misma proyección cartográfica y sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

En primera instancia teniendo los mapas homogenizados de US&V de los años 2002 y 2011 se obtuvo la variable dependiente, siendo esta la deforestación de bosques y selvas conjuntamente, tomando en cuenta que la leyenda homogenizada de estos mapas es de *bosque* (categorías de bosques y selvas) y *no bosque* (todas las demás categorías).

Por otro lado, es importante mencionar que, para obtener los factores conductores a partir de las variables, se emplearon diferentes algoritmos, como la Distancia Inversa Ponderada (Ec. 8) (IDW) utilizada para modelar los factores socioeconómicos (Farfán *et al.*, 2012; Harman *et al.*, 2016; Osorio *et al.*, 2015).

$$Z_j = \frac{\frac{\sum Z_i}{d_{ij}^\beta}}{\frac{\sum 1}{d_{ij}^\beta}} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde Z_j es el punto para interpolar, Z_i es un punto del entorno, β es el exponente de ponderación y d_{ij} es la distancia entre los puntos.

Asimismo, se utilizó el algoritmo de Distancia Euclidiana (Ec. 9) para obtener todos los factores de proximidad (Li & Lu, 2009; Osorio *et al.*, 2015).

$$d(A, B) = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde $d(A, B)$ es la distancia entre los puntos A y B , X_A, Y_A son las coordenadas del punto A y X_B, Y_B son las coordenadas del punto B .

Por su parte, la pendiente del terreno se obtuvo a partir del Modelo Digital de Elevaciones, por medio de la Ecuación 10.

$$\tan_slope = \sqrt{\left(\frac{right-left}{res*2}\right)^2 + \left(\frac{top-bottom}{res*2}\right)^2} \quad \text{Ec. (10)}$$

Dónde: $\tan_slope$ es la tangente del ángulo que tiene la pendiente máxima de descenso; *left*, *right*, *top* y *botton* son los atributos de los pixeles vecinos; y *res* es la resolución del pixel. Y dicho resultado, $\tan_slope$ se multiplica por 100 para obtener el gradiente de la pendiente en %, o se obtiene el Arco-tangente de $\tan_slope$ para obtener la pendiente en grados (Burrough *et al.*, 2015).

5.2.4. Estimación de la deforestación

Se utilizó la cartografía de US&V del año 2002 y 2011, siendo esta última la más actualizada, las cuales se corrigieron topológicamente y se homogenizaron sus leyendas, posteriormente se llevó a cabo el análisis de la pérdida de cobertura forestal, aplicando la técnica de Cross-Tab entre mapas (Pontius *et al.*, 2004), para obtener la cartografía de deforestación (2002-2011). De esta cartografía se obtuvo, por un lado, la cantidad de bosque deforestado en hectáreas, y, por otro lado, la Tasa Media Anual de Deforestación (TMAD), ambos resultados a nivel de cuenca, y de estados.

La TMAD se estimó de acuerdo con la ecuación planteada por Sader & Joyce, (1988) (Ecuación 11).

$$TMA = \frac{((B1-B2)*100)}{B1*N} \quad \text{Ec. (11)}$$

Dónde: *B1* y *B2* son las coberturas de bosques en las diferentes fechas y *N* es el número de años evaluado.

5.2.5. Diseño de encuesta

El propósito de la encuesta fue determinar las causas principales y secundarias de la deforestación dentro del periodo 2002-2014, para ello se consideraron los criterios planteados por Geist & Lambin, (2001) y adaptados por Monjardín-Armenta *et al.*, (2017) para el estado de Sinaloa. En las causas principales se ubicaron cinco grandes grupos: *la agricultura*, relacionada con los cultivos permanentes, agricultura itinerante, cría de ganado y apertura de nuevas áreas agrícolas; *la extracción de madera*, relacionada con fines comerciales, de combustibles y de mejoramiento de finca; *la extensión de infraestructuras*, relacionadas al transporte, expansión de asentamientos humanos y servicios públicos; *la explotación minera*, metálica o no metálica; y *los desencadenamiento de eventos sociales*, relacionados con los desplazamientos bruscos, desorden social y narcotráfico; Mientras que las causas secundarias se ubicaron en cinco factores: *demográficos*, relacionados con las migraciones e incremento poblacional; *económicos*, relacionadas con crecimiento del mercado y comercialización, estructura económica y urbanización industrias; *tecnológicos*, relacionados con obras estructurales, cambio de agro-técnicas y factor de producción agricultura; *políticos e institucionales*, relacionado con políticas formales, clima político y derecho a la propiedad; y *culturales*, relacionados con la actitud pública, valores y creencias, así como el comportamiento familiar e individual.

La encuesta se aplicó a 54 expertos del sector ecológico, ambiental y forestal, de diferentes instituciones que se encuentran distribuidas en el territorio de la cuenca, tales como: la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), la Procuraduría Federal de Protección al Medio Ambiente (PROFEPA), la Secretaría de Comunicación y Transporte (SCT), a Investigadores de la Universidad Autónoma de Sinaloa, también

se consultó a algunas personas que viven en las zonas con mayor deforestación, para reforzar y enriquecer la opinión de los expertos.

A partir de los resultados de las encuestas, se contabilizaron las frecuencias de los elementos causales principales y secundarios y sus subdivisiones, lo cual permitió conocer porcentualmente mediante un análisis estadístico la influencia de cada uno de estos elementos causales dentro de los procesos de deforestación en la Cuenca de manera parcial y total (Monjardín-Armenta *et al.*, 2017).

5.2.6. Determinación de los factores conductores de la deforestación

Con el propósito de modelar las causas principales y secundarias fue necesario relacionarlas con algunos factores conductores que las explicara cartográficamente, tal y como lo han realizado algunos estudios (Pineda-Jaimes *et al.*, 2010; Shehzad *et al.*, 2014). Una vez diseñada la encuesta de las causas principales y las secundarias, las cuales fueron relacionadas con un grupo de variables geográficas o factores conductores, para poder ser modelados espacialmente. Tomando en cuenta la complejidad de los factores conductores, se dividieron a su vez en tres grupos: a) socioeconómicos, b) biofísicos y de c) proximidad (Bax *et al.*, 2016; Mas *et al.*, 2004; Osorio *et al.*, 2015; Pineda-Jaimes *et al.*, 2010) para facilitar el análisis (Tabla 8).

Tabla 8. Factores conductores.

Factores conductores / Código	Modela
Socioeconómicas	
Incremento de población y Densidad de población / IncPob y DenPob	Estos factores modelan el aumento y cantidad poblacional de un área determinada, indicando que mientras estos aumentan, mayor es la demanda de recursos maderables; para el autoconsumo en localidades con menor de 2,500 habitante, como el uso de madera para leña, construcción de fincas y desmote para la agricultura en escalas pequeñas; mientras que en localidades con mayor población, modela la presión sobre recursos maderables con fines comerciales y para la expansión de grandes áreas agrícolas, industriales y urbanas
Índice de marginación / InMar	Este índice, configura el nivel de educación, el estatus de vivienda, y los ingresos económicos de una población, determinando varios actores en el proceso de deforestación, como; el comportamiento de las personas en base a la cultura, tradiciones y creencias frente al cuidado del medio ambiente, donde se intuye que a mayor índice de marginación mayor es la extracción de madera para uso doméstico en localidades rurales, mientras que en zonas urbanas se asocia más con la expansión del mercado y el comercio
Biofísicas	
Altitudes y Pendientes / Alt y Pend	La altitud y la pendiente son indicadores prioritarios, ya que estos delinear o delimitan las zonas para la expansión agrícola, la generación de infraestructura urbana e industrial, donde por lo regular las zonas con altitudes y pendientes pequeñas se facilitan para la expansión de estas coberturas
Producción forestal / PF	Este factor, clasifica el tipo de vegetación forestal en función de la producción maderable de 1 a 3 clases, siendo la categoría 3 la producción maderable más baja, que por lo regular comprende a las selvas caducifolias y sub-caducifolias, mismas que se encuentran en altitudes y pendientes bajas, siendo estas zonas óptimas para el desarrollo de la agricultura y el desarrollo urbano, sin embargo en las clases 2 y 3 se presenta la extracción de la madera para fines comerciales principalmente y al igual que se talan bosques para la agricultura temporal y el pastoreo, esencialmente

Precipitación, Humedad del suelo y Temperatura / Prec, HumS y Temp	Estos elementos climatológicos, son importantes estimulantes en la creación y permanencias áreas agrícolas, ya que de estos depende gran parte el tipo de actividad agrícola
Proximidad	
Distancia a áreas naturales protegidas / DANP	Modela la proximidad a las áreas que se encuentran protegidas bajo políticas, leyes y estatutos gubernamentales que coordinan diferentes instituciones, dando a entender que sí existe deforestación en estas áreas resguardadas o en sus inmediaciones, no se está ejerciendo un buen manejo forestal por parte de las autoridades correspondientes
Distancia a áreas agrícolas y Distancia a áreas de pastizal / DAA y DAP	Estos dos factores configuran la proximidad de las áreas forestales con respecto a las áreas agrícolas y de pastizal, modelando que, a menor distancia, mayor es la probabilidad a sufrir una pérdida forestal producida por la apertura de nuevas áreas agrícolas, así como la inducción de pastizales para el pastoreo y cría de ganado
Distancia a carreteras / DC	Este agente modela la accesibilidad a los recursos forestales ya que la existencia de nuevas vías de acceso como carreteras y caminos incrementa la presión hacia la utilización de las coberturas forestales. Estas vías de comunicación están estrechamente ligadas a la presión que ejerce la población sobre el recurso maderable y son importantes en el cambio y degradación del bosque, así como también ayudan a expandir la economía, impulsando a la población a obtener terrenos aledaños a las vialidades para usos agrícolas y ganaderos
Distancia a hidrografía / DH	Este factor modela la proximidad de los ríos, canales y cuerpos de agua hacia las áreas forestales, por lo tanto, se indica que, a menor distancia entre la hidrografía y las coberturas forestales, mayor es la probabilidad que se desarrollen áreas para actividades agrícolas y asentamientos humanos
Distancia a localidades con menor de 2,500 habitantes / DLM2500	Modela la proximidad de los pequeños asentamientos humanos a las coberturas forestales que deforestan áreas para el desarrollo de la agricultura y la extracción de la madera para fines domésticos y comerciales, principalmente
Distancia a minas / DM	Configura la pérdida forestal que produce una mina, en sus inmediaciones, por lo tanto, mientras menor sea la distancia entre una mina y las cubiertas vegetales, mayores la probabilidad a presentar pérdida forestal
Distancia a asentamientos humanos / DAH	Modela la presión que ejerce una población sobre las coberturas forestales a través de la infraestructura urbana, industrial y comercial, así como también la expansión económica que ejerce una población sobre las cubiertas forestales

5.2.7. Análisis exploratorio de datos

Una vez definidos los factores conducentes se les realizó un análisis exploratorio de datos para examinar la correlación entre estos, con la finalidad de no sobreestimar el modelo con factores pareados y coeficientes mayores de 0.75 en la matriz de correlación (Celemin, 2009; Goodchild, 2008; Mas *et al.*, 2004).

5.2.8. Ajuste del modelo Regresión Logística Espacial (RLE)

Finalmente se ajustó el modelo RLE (Quezada & Rocha, 2010) en el software IDRISI TerrSet mediante los factores conductores que fueron seleccionados, definiendo como variable binaria dependiente la deforestación en el periodo evaluado, tomando valores de 1 para la deforestación y 0 para las áreas de no-deforestación en cada observación o pixel (Ecuación 12):

$$\log it \left[\frac{Y=1}{Y=0} \right] = \frac{P}{1-P} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde: β son los parámetros por cada variable estimada por el modelo, $x_1, x_2 \dots x_k$ son los factores conductores incluidos en el modelo (Tabla 2); γ es la probabilidad de que un píxel no deforestado se convierta a deforestado.

Y de acuerdo con Menard, (2002), el análisis de los coeficientes obtenidos debe ser comparable, al respecto se determinaron los coeficientes estandarizados por medio de la ecuación (13):

$$B_{STD} = \frac{\beta * DS}{\pi^2/3} \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde: B_{STD} son los coeficientes estandarizados de cada variable en el modelo; DS es la desviación estándar de cada variable; π es aproximadamente igual a 3.141592654.

En relación con las implicaciones y con el objeto de comprender mejor el comportamiento de las variables más significativas estadísticamente, se generaron gráficas de probabilidad, utilizando para ello las siguientes ecuaciones (14; 15):

$$P(y = 1|Xi) = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} \quad \text{Ec. (14)}$$

$$Z = b + \beta * X \quad \text{Ec. (15)}$$

Dónde: b es el intercepto obtenido en el modelo; X los valores de cada variable, en dependencia de su magnitud y rango de medida. En las gráficas se analiza la probabilidad de que una variable independiente influya significativamente en el cambio de la variable dependiente.

5.2.9. Evaluación del modelo RLE

Para indicar el grado de ajuste del modelo espacial se tomó en cuenta el estadístico Total Operating Characteristic (TOC) (Pontius & Si, 2014), el cual se desarrolló en el software R (Pontius *et al.*, 2015a; Pontius *et al.*, 2015b), con la finalidad de analizar y comprender las fuerzas conductoras de la deforestación con mayor certeza. Ya que este diagrama TOC indica la capacidad del modelo para

determinar la susceptibilidad a la deforestación en las diferentes ubicaciones espaciales, trazando el porcentaje de aciertos positivos (sensibilidad) contra los falsos positivos (especificidad). En tal sentido, el Área Bajo la Curva (AUC) del TOC es un indicador que cuantifica la bondad de ajuste del modelo y normalmente varía entre 0.5 y 1.

Por último, se contrastaron y complementaron los resultados obtenidos del modelo RLE de los factores conductores de la deforestación y el análisis cualitativo y cuantitativo que surgió de la consulta a los expertos sobre los elementos causales de la deforestación, con la finalidad de analizar las sinergias entre estas técnicas y poder comprender de una mejor manera este proceso de pérdida forestal.

5.3. Resultados

5.3.1. Deforestación de la Cuenca Pacífico Norte

Entre los años de 2002 y 2011, se perdió en la Cuenca Pacifico Norte 3,159.16 km² de cobertura de bosque, esta superficie representó el 2.0 % del territorio de la cuenca; por su lado, la ganancia caracterizada por la recuperación natural e inducida de estas coberturas fue de 1,633.24 km², esta superficie representó el 1.03 % del territorio de la cuenca. El balance de las pérdidas y la ganancia fue negativo, es decir, que la pérdida neta de la cobertura bosque fue de 1,525.93 km² (Figura 20). En relación con la TMAD de la cuenca, se determinó que fue de 0.11 %, la cual es superior a la señalada por el programa Global Forest Watch para la misma área y periodo de tiempo (2002-2011), que indicó una TMAD de 0.08 % (Hansen *et al.*, 2013). Por otro lado, la TMAD señalada por las estadísticas de la FAO (Food and Agriculture Organization) entre el periodo del 2000 al 2010 es de 0.40 % para todo el país (FAO, 2015), siendo superior a la obtenida en este trabajo.

En la misma vertiente, en la tabla 9 se muestran los resultados de las pérdidas, ganancias y la TMAD a nivel estatal, resaltando el estado de Sinaloa con la tasa más elevada en cuanto a la pérdida forestal, seguida de los estados de Zacatecas, Durango y Nayarit, mientras que el estado de Chihuahua presenta una tasa negativa, lo que representa que la cantidad de ganancias fue superior a la pérdida.

Tabla 9. Tasa media anual de deforestación a nivel estatal.

	Bosque 2002 km2	Bosque 2011 km2	Pérdidas km2	Ganancias km2	TMAD
Chihuahua	25562.61	25712.98	612.18	762.55	-0.065
Durango	38815.12	38562.85	468.70	216.41	0.072
Nayarit	4399.95	4390.34	272.20	262.99	0.024
Sinaloa	29490.12	28085.72	1775.20	370.80	0.529
Zacatecas	1344.90	1334.51	30.88	20.49	0.086

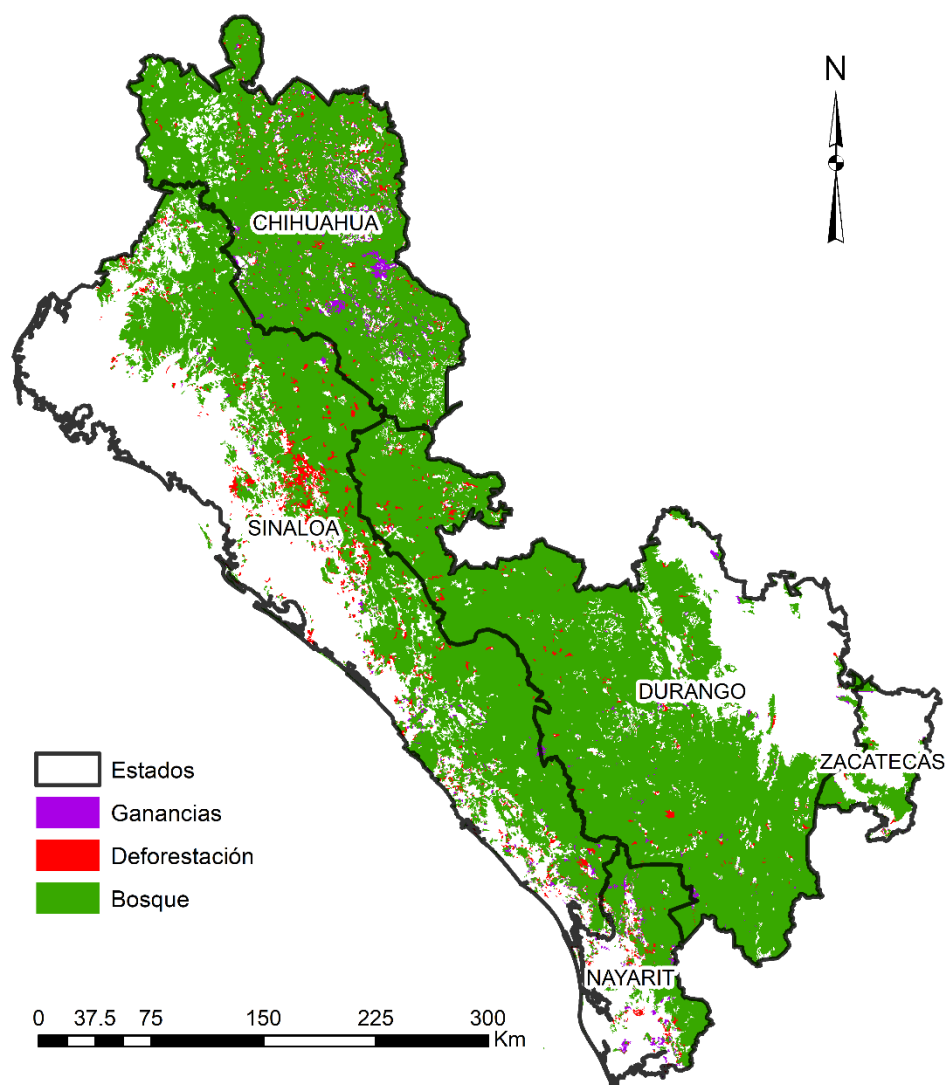


Figura 20. Cartografía de deforestación y ganancias forestales 2002-2011

5.3.2. Causas de la deforestación de la Cuenca Pacífico Norte

El análisis estadístico de las encuestas realizada a los expertos determinó que la causa principal de los procesos de pérdida forestal es la expansión agrícola con 53.42 %, seguida de la extensión de

infraestructura con 20.21 % y de la extracción de madera con 16.17 %. Mientras que las causas secundarias que impulsaron a las causas primarias están determinadas por los factores demográficos con 34.85 %, los económicos con 27.88 % y los políticos e institucionales con un 22.59 % (Tabla 10), datos que concuerdan con el trabajo Monjardín-Armenta *et al.*, (2017) en el estado de Sinaloa, así como en otras partes del mundo (Defourny *et al.*, 2011; Geist & Lambin, 2001; Pacheco *et al.*, 2014).

Como se puede observar, dentro de las sub-causas principales se tienen que los cultivos permanentes con 35.56%, la extracción de madera con fines comerciales con 69.48%, la extensión de infraestructura mediante el transporte con 41.36%, la extracción minera metálica con 78.54% y los desencadenamiento de eventos sociales a través del narcotráfico con 65.49%, son las sub-causas que se destacaron dentro de cada grupo de las causas principales; sin embargo, al realizar un análisis en conjunto de estas sub-causas, el resultado varía, ya que los cultivos permanentes con 19.00%, la agricultura itinerante con 15.18%, la cría de ganado con 13.15%, la extracción de madera con fines comerciales con 11.23% y la extensión de infraestructura mediante el transporte con 8.36%, fueron las cinco sub-causas que se destacaron dentro de las causas principales.

Con respecto, a las sub-causas secundarias, se destacó dentro del factor demográfico el incremento poblacional con 78.96%, dentro del factor económico el crecimiento del mercado y su comercialización con 47.54%, dentro del factor tecnológico las obras estructurales con 52.63%, dentro del factor político e institucional el clima político con 52.62%, y dentro del factor cultural la actitud publica, valores y creencias con 66.87%; mientras que el análisis en conjunto de estas sub-causas determinó, que el incremento poblacional es responsable con 27.52%, el crecimiento del mercado y su comercialización con 13.91%, el clima político con 11.89%, la estructura económica con 10.23% y las migraciones con 7.33% fueron las cinco sub-causas que se destacaron dentro de las causas secundarias (Tabla 10).

En el mismo sentido, es importante resaltar que la opinión de las personas que viven dentro de las zonas afectadas sirvió para corroborar la opinión de los expertos, y aunado a ello brindaron información específica sobre algunas causas de deforestación, como lo son la siembra de mariguana, amapola y establecimiento de laboratorios de drogas sintéticas, siendo estas causas de tipo regional, específicamente en las zonas serranas de la cuenca.

Tabla 10. Casusas principales y secundarias de la deforestación.

	Causa	%	Sub-causa	% Parcial	% Total
Causas principales de la deforestación	Agricultura	53.42	Cultivos permanentes	35.56	19.00
			Agricultura itinerante	28.41	15.18
			Cría de ganado	24.62	13.15
			Apertura de nuevas áreas agrícolas	11.41	6.10
	Extracción de madera	16.17	Comercial	69.48	11.23
			Combustible	21.49	3.47
			Mejoramiento de fincas	9.03	1.46
	Extensión de infraestructura	20.21	Transporte	41.36	8.36
			Expansión de asentamientos	33.48	6.77
			Servicios públicos	25.16	5.08
	Explotación minera	8.76	Metálica	78.54	6.88
			No metálica	21.46	1.88
	Desencadenamiento de eventos sociales	1.44	Desplazamientos bruscos	5.68	0.08
			Desorden Social	28.83	0.42
			Narcotráfico	65.49	0.94
Causas secundarias de la deforestación	Factores demográficos	34.85	Migraciones	21.04	7.33
			Incremento poblacional	78.96	27.52
	Factores económicos	29.26	Crecimiento del mercado y comercialización	47.54	13.91
			Estructura económica	34.95	10.23
			Urbanización-industrias	17.51	5.12
	Factores tecnológicos	7.58	Obras estructurales	52.63	3.99
			Cambios de agro-técnicas	9.63	0.73
			Factor de producción agricultura	37.74	2.86
	Factores políticos e institucionales	22.59	Políticas formales	20.96	4.73
			Clima político	52.62	11.89
			Derecho a la propiedad	26.42	5.97
	Factores culturales	5.72	Actitud pública, valores y creencias	66.87	3.82
			Comportamiento familiar e individual	33.13	1.90

5.3.3. Análisis exploratorio de datos

De acuerdo a la metodología planteada, previo al ajuste del modelo se realizó un análisis de correlación revelando que algunos de los factores conductores presentaban altas correlaciones entre sí, en particular, los factores de temperatura, humedad del suelo y altitud, donde la altitud y la temperatura mostraron la correlación más alta de -0.91, seguida de una correlación positiva de 0.74 entre la altitud y la humedad del suelo y una correlación negativa entre la temperatura y la humedad del suelo de -0.69 (Goodchild, 2008). Ante esto se tuvo la necesidad de eliminar del modelo la variable temperatura, con la finalidad de no sobreestimar el modelo de regresión y también de minimizar la multi-colinealidad entre los factores conductores de la deforestación (Tabla 11).

Tabla 11. Matriz de correlación de los factores conductores

Matriz de correlación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1.00	0.00	-0.01	-0.02	0.00	0.00	0.05	0.01	0.04	0.00	-0.02	-0.01	-0.03	-0.03	-0.07	-0.05	-0.05
2	0.00	1.00	-0.25	-0.06	-0.10	-0.11	-0.01	-0.06	0.04	-0.09	-0.10	0.00	-0.14	0.01	0.04	-0.05	-0.18
3	-0.01	-0.25	1.00	0.12	0.23	0.17	-0.08	0.09	-0.11	0.10	0.14	-0.13	0.19	0.01	0.08	-0.03	0.24
4	-0.02	-0.06	0.12	1.00	0.06	0.74	-0.22	-0.29	-0.91	0.13	0.18	-0.41	-0.05	0.12	0.32	0.22	0.42
5	0.00	-0.10	0.23	0.06	1.00	0.13	-0.05	0.19	0.03	0.07	0.27	-0.01	0.21	-0.05	-0.08	0.08	0.18
6	0.00	-0.11	0.17	0.74	0.13	1.00	-0.02	0.15	-0.69	0.19	0.21	-0.31	0.08	0.03	0.14	0.11	0.48
7	0.05	-0.01	-0.08	-0.22	-0.05	-0.02	1.00	0.21	0.18	0.18	-0.12	0.16	0.05	-0.02	-0.25	-0.11	-0.04
8	0.01	-0.06	0.09	-0.29	0.19	0.15	0.21	1.00	0.36	0.02	0.11	0.22	0.20	-0.07	-0.29	-0.08	0.07
9	0.04	0.04	-0.11	-0.91	0.03	-0.69	0.18	0.36	1.00	-0.21	-0.07	0.43	0.08	-0.14	-0.32	-0.20	-0.40
10	0.00	-0.09	0.10	0.13	0.07	0.19	0.18	0.02	-0.21	1.00	0.03	0.10	0.16	0.00	-0.03	-0.01	0.42
11	-0.02	-0.10	0.14	0.18	0.27	0.21	-0.12	0.11	-0.07	0.03	1.00	-0.03	0.24	0.00	0.03	0.23	0.11
12	-0.01	0.00	-0.13	-0.41	-0.01	-0.31	0.16	0.22	0.43	0.10	-0.03	1.00	0.11	-0.05	-0.15	0.02	0.05
13	-0.03	-0.14	0.19	-0.05	0.21	0.08	0.05	0.20	0.08	0.16	0.24	0.11	1.00	0.00	-0.01	0.30	0.10
14	-0.03	0.01	0.01	0.12	-0.05	0.03	-0.02	-0.07	-0.14	0.00	0.00	-0.05	0.00	1.00	0.01	0.01	-0.02
15	-0.07	0.04	0.08	0.32	-0.08	0.14	-0.25	-0.29	-0.32	-0.03	0.03	-0.15	-0.01	0.01	1.00	0.16	0.16
16	-0.05	-0.05	-0.03	0.22	0.08	0.11	-0.11	-0.08	-0.20	-0.01	0.23	0.02	0.30	0.01	0.16	1.00	0.08
17	-0.05	-0.18	0.24	0.42	0.18	0.48	-0.04	0.07	-0.40	0.42	0.11	0.05	0.10	-0.02	0.16	0.08	1.00

1.- Incremento de población, 2.- Densidad de población, 3.- Índice de marginación, 4.- Altitud, 5.- Pendiente, 6.- Humedad del suelo, 7.- Producción forestal, 8.- Precipitación media anual, 9.- Temperatura, 10.- Distancia a áreas naturales protegidas, 11.- Distancia a áreas agrícolas, 12.- Distancia a pastizales, 13.- Distancia a carreteras, 14.- Distancia a hidrografía, 15.- Distancia a minas, 16.- Distancia a localidades con menor de 2,500 habitantes, 17.- Distancia a asentamientos humanos.

5.3.4. Modelo de Regresión Logística Espacial

El conjunto de factores socioeconómicos, biofísicos y proximidad que se utilizaron para el análisis espacial y temporal del proceso de deforestación, dio lugar a la siguiente expresión matemática:

Logit (Deforestation)

$$\begin{aligned}
 = & 1.71629 + 0.00003 * IncPob + 0.000232 * DenPob + 0.00674 * IndMarg - 0.00109 \\
 & * Alt - 0.03704 * Pend + 0.08019 * HumSuelo - 1.62482 * ProFor - 0.00087 * PMA \\
 & + 0.00002 * DNP - 0.00011 * DA - 0.000005 * DP - 0.00003 * DC - 0.00002 \\
 & * DH - 0.00003 * DM - 0.00017 * DLOC2500 + 0.000001 * DAH
 \end{aligned}$$

En el mismo sentido, desde el punto de vista espacial, en la figura 21 se observa el resultado de la aplicación del modelo probabilístico RLE, indicando que las áreas con mayor probabilidad a ser deforestadas se encuentran alrededor de las zonas ya deforestadas, las cuales son áreas de producción forestal baja, que presentan pendientes y altitudes relativamente bajas, con un potencial elevado a ser

áreas agrícolas perenes o anuales. Asimismo, también se observan perspectivas altas a perder coberturas forestales en torno a los asentamientos humanos, los cuales demandan áreas para nuevos desarrollos urbanos, zonas comerciales, polígonos industriales, y su respectiva infraestructura urbana de servicios públicos.

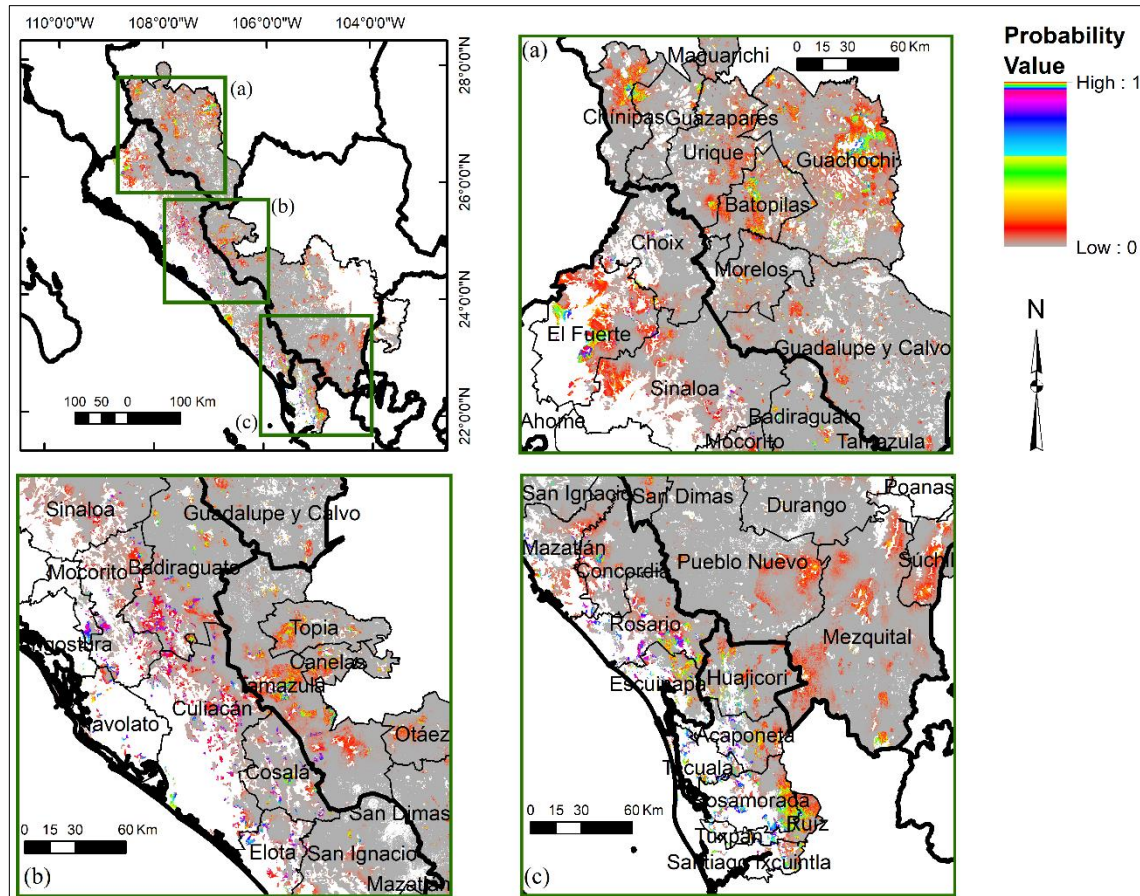


Figura 21. Mapa de probabilidad de deforestación obtenido del ajuste del Modelo de RLE

Respecto a la figura 21, en la imagen (a) se muestra que gran parte de las coberturas forestales de la zona Noroeste de la cuenca presenta probabilidades a ser deforestadas, principalmente en los municipios del Fuerte, Sinaloa de Leyva, Guachochi, Chinipas, Batopilas y Urique. De igual manera, en la imagen (b) se revela que en la parte Centro-Norte de la cuenca se encuentra la zona con las probabilidades más elevadas a presentar deforestación, contemplando los municipios de Culiacán, Badiraguato, Mocorito, Tamazula, Topia y Canelas. Mientras, se observa que los municipios del Rosario, Escuinapa, Rosamorada, Ruiz, Suchil y el Mezquital son los más propensos a sufrir una pérdida forestal en la zona Sureste de la cuenca.

Por su parte, con la finalidad de interpretar de manera homogénea el impacto de cada factor conductor en el modelo, se obtuvieron los coeficientes estandarizados de cada uno de los factores. Resaltando los factores que estadísticamente son los más significativos (Tabla 12).

Tabla 12. Resultado del modelo RLE.

Variables		β	Desviación estándar	β_{st}
Intercepto		1.71629		
Socio-económicas	Incremento de población	0.00003	2798.00	0.02
	Densidad de población	0.00023	199.21	0.01
	Índice de marginación	0.00674	7.32	0.01
Biofísicas	Altitud	-0.00109	864.79	-0.29
	Pendiente	-0.03704	22.71	-0.26
	Humedad del suelo	0.08019	2.44	0.06
	Producción forestal	-1.62482	1.00	-0.49
	Precipitación media anual	-0.00087	298.97	-0.08
Proximidad	Distancia a áreas naturales protegidas	0.00002	35387.59	0.18
	Distancia a áreas agrícolas	-0.00011	4790.61	-0.16
	Distancia a pastizales	0.00000	7820.82	-0.01
	Distancia a caminos	-0.00003	6115.64	-0.06
	Distancia a hidrografía	-0.00002	1885.82	-0.01
	Distancia a minas	-0.00003	8032.32	-0.06
	Distancia a localidades menores de 2500 habitantes	-0.00017	3164.11	-0.16
	Distancia a asentamientos humanos	0.00000	22299.61	-0.01

A partir de los resultados del modelo de RLE se graficaron las probabilidades de los factores más significativos, con la finalidad de visualizar el comportamiento de cada variable en el modelo de deforestación (Figura 22). Al respecto, las variables biofísicas son las que presentan mayor impacto en el modelo, a saber, que la variable “producción forestal” es el factor más significativo (Figura 22 a), indicando que la probabilidad de deforestación es mayor en terrenos de baja producción forestal (áreas maderables bajas) que comprenden principalmente a las coberturas de selvas caducifolias y sub-caducifolias.

Enseguida, se encuentra la variable pendiente (Figura 22 b), como segunda fuerza conductora de la deforestación, indicando que, a mayor pendiente, disminuye la probabilidad de pérdida. Del mismo modo la variable altitud (Figura 22 c), disminuye la probabilidad conforme aumenta la altura, ya que es más difícil el desarrollo de grandes extensiones agrícolas en zonas altas por el manejo del agua, las

tecnologías agrícolas y a las propias condiciones geográficas. No obstante, contrario a lo esperado existen zonas en altitudes elevadas y pendientes pronunciadas propensas a ser deforestadas, donde regularmente se desarrollan pequeños asentamientos humanos que propician la agricultura temporal y la cría de ganado a pequeña escala.

En cuanto a las variables de proximidad de mayor presencia en el proceso de pérdida forestal es la “distancia a las áreas naturales protegidas” (Figura 22 d), demostrando que a menor distancia las probabilidades disminuyen, lo que demuestra la presencia e implementación de leyes y políticas ambientales sobre el manejo forestal de las diferentes instituciones han mitigado el cambio de uso de suelo en estas áreas resguardadas de gran importancia ecológica.

Por el contrario, la variable distancia a localidades menores a 2,500 habitantes (Figura 22 e) muestra la posibilidad de pérdida de cobertura forestal se incrementa cuando disminuye la distancia a estos pequeños asentamiento humanos, ya que estas localidades se encuentran lejanas a las ciudades, y deforestan áreas para la extraer madera con fines domésticos, como leña para cocinar, madera para el mejoramiento de fincas, así como también para inducir pastizal para el pastoreo de ganado en pequeñas escalas. Sin lugar a duda, la variable distancia a las áreas agrícolas (Figura 22 f) es un fuerte indicador sobre este proceso de deforestación, presentando una relación inversamente proporcional, ya que al disminuir la distancia hacia las zonas de cultivo las posibilidades de pérdida forestal se aumentan, lo cual está altamente relacionado con la primera ley geográfica de Tobler indicando que “todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más próximas en el espacio tienen una relación mayor que las distantes (Tobler, 2004; Miller, 2004).

Finalmente, se puede observar que, de las variables socioeconómicas, el incremento de población es la variable con mayor impacto en el modelo (Tabla 7), donde se observa que a mayor incremento de población, el área forestal es más vulnerable a perder cobertura.

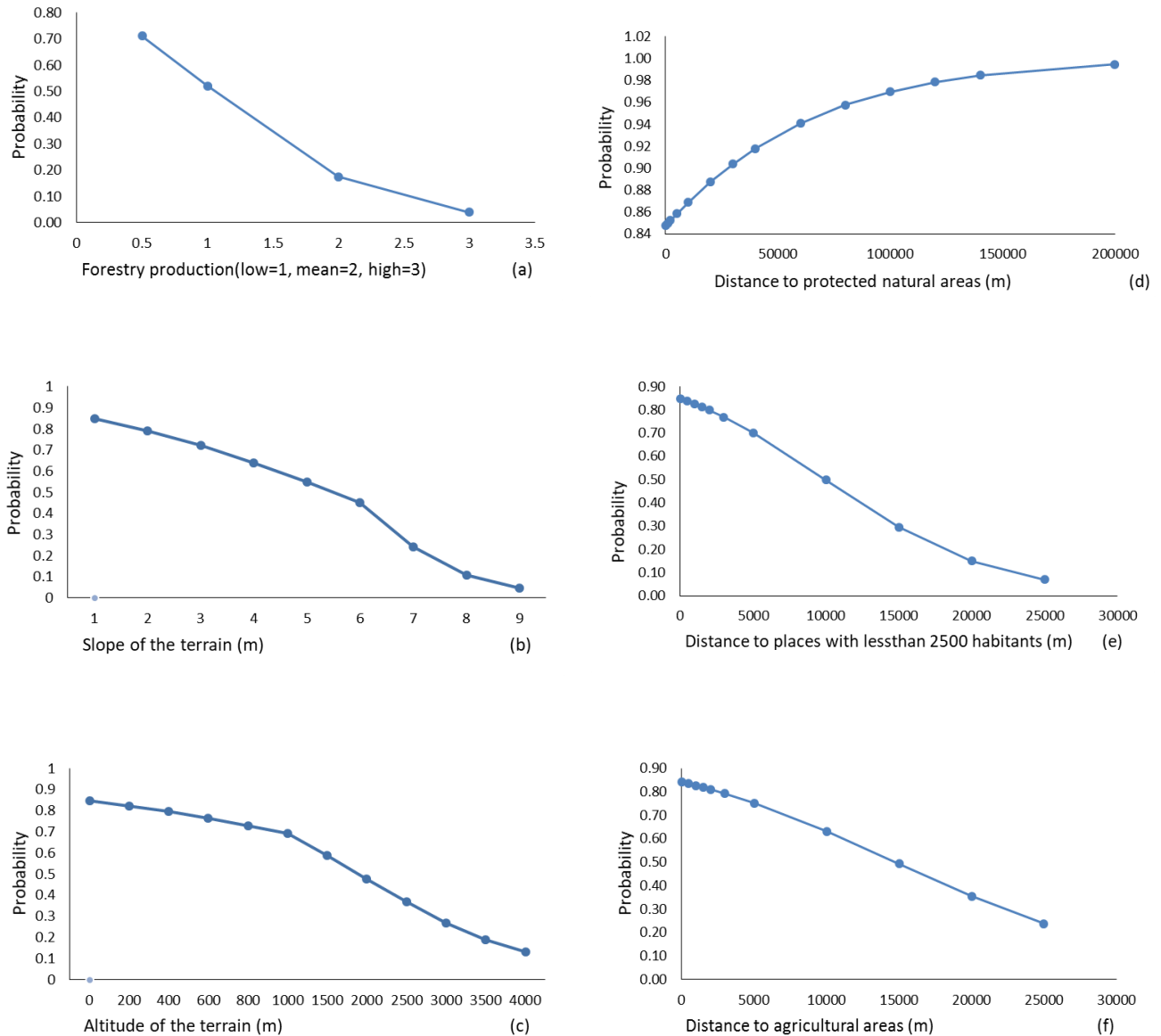


Figura 22. Graficas de probabilidad de los factores más significativos en el resultado del modelo RLE.

5.3.5. Evaluación del modelo RLE

El grado de ajuste del modelo se llevó a cabo mediante el estadístico TOC, obteniéndose un AUC correspondiente a un ajuste de 0.921, demostrando un índice de discriminación confiable y efectivo entre las clasificaciones de los verdaderos positivos y los falsos positivos en el ajuste acuerdo con Beguería, (2006) y Miranda-Aragón *et al.*, (2012) demostrando que un valor de 0.7 se considera aceptable, un valor mayor a 0.8 excelente y más de 0.9 es excepcional (Figura 23).

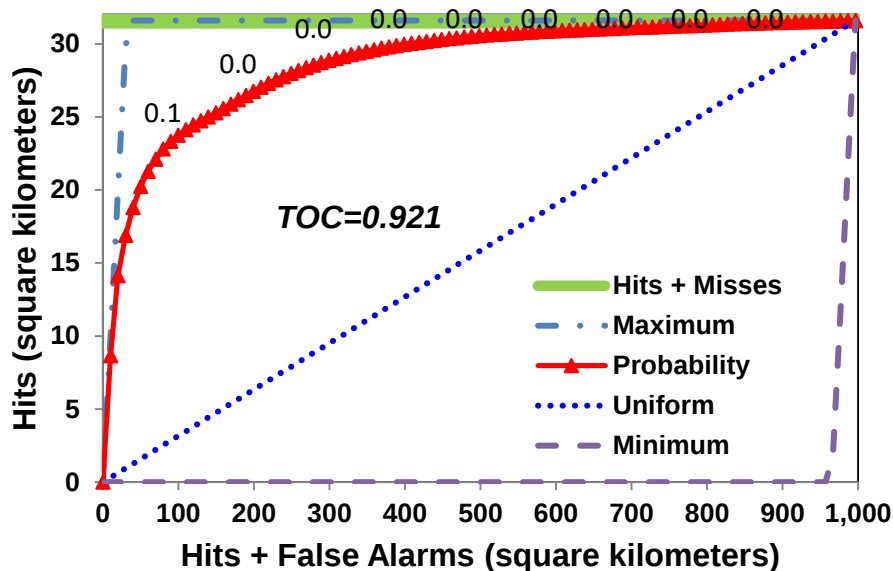


Figura 23. TOC del modelo de RLE.

5.4. Discusión y conclusiones

De acuerdo con las evidencias expuestas en los resultados del modelo RLE, indican que los factores conductores estadísticamente más significativos son la “producción forestal, la pendiente, la altitud, la distancia a áreas naturales protegidas, la distancia a localidades menores a 2,500 habitantes y la distancia a áreas agrícolas”.

Con referencia a lo anterior, los factores conductores impactan de diferente manera en el modelo espacial, la mayoría de estos de forma negativa y otros de manera positiva, indicando con ello el sentido de la probabilidad de que un área forestal sufra deforestación. Como ejemplo, tenemos los factores de proximidad que impactan de forma negativa, indicando que entre menor sea la distancia entre la cobertura forestal y las áreas o zonas de caminos, agricultura, pastizales, minas, hidrografía y asentamientos humanos, mayor es la probabilidad a presentar deforestación, excepto en las áreas naturales protegidas donde ocurre lo contrario, impactando este factor conductor de manera positiva, asumiendo que a menor distancia, menor es la probabilidad a sufrir una pérdida forestal (Tabla 13).

Por otro lado, los factores conductores de tipo socioeconómico impactan positivamente, indicando que a mayor densidad e incremento de población y mayor índice de marginación aumentan las probabilidades de perder coberturas forestales (Tabla 13).

En cuanto a los factores biofísicos, la mayoría influyen de manera negativa demostrando que, a menor altitud, pendiente, producción forestal y precipitación, la probabilidad a presentar deforestación aumenta. Mientras que el factor de humedad de suelo revela que, a mayor capacidad de un suelo a retener humedad, mayor es la probabilidad por presentar deforestación (Tabla 13).

Tabla 13. Relación de los factores conductores en el modelo RLE

Factor conductor	Relación	Factor conductor	Relación
Incremento de población	+	Distancia a áreas naturales protegidas	+
Densidad de población	+	Distancia a áreas agrícolas	-
Índice de marginación	+	Distancia a pastizales	-
Altitud	-	Distancia a caminos	-
Pendiente	-	Distancia a hidrografía	-
Humedad del suelo	+	Distancia a minas	-
Producción forestal	-	Distancia a localidades menores de 2500 habitantes	-
Precipitación media anual	-	Distancia a asentamientos humanos	-

Los signos representan la relación positiva (+) o negativa (-) que presentan los factores conductores en el modelo de Regresión Logística Espacial.

De lo anteriormente descrito, podemos afirmar que los factores biofísicos y de proximidad juegan un papel importante en la predisposición de las condiciones iniciales en las que los cambios de la cubierta forestal y uso del suelo se llevan a cabo (Lambin *et al.*, 2001).

Respecto a los factores socioeconómicos, resultan ser menos contundentes con una relación estadística más débil, ya que estos no mantienen un patrón continuo y no presentan un efecto único independiente sobre los procesos de deforestación como se ha reportado en otros estudios (Osorio *et al.*, 2015; Rosete-Vergés *et al.*, 2014). Por otro lado, las estadísticas de la consulta a expertos sobre los elementos causales de deforestación son determinantes y concuerdan con otros trabajos realizados en diferentes partes del mundo (Defourny *et al.*, 2011; Geist & Lambin, 2001; Mahonghol, 2012; MECNT, 2012a, 2012b; Monjardín-Armenta *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2012), indicando que las principales causas que impulsan la deforestación son las actividades agrícolas, la creación de infraestructura urbana, rural e industrial que a su vez son impulsadas principalmente por factores demográficos como el incremento de la población y el desarrollo de la economía de una región.

Asimismo, también es importante mencionar que la opinión de personas que habitan en las zonas más afectadas, diera una pauta acertada sobre causas específicas de la deforestación en algunas zonas, revelando datos importantes sobre la mala práctica de políticas o leyes sobre los permisos de tenencia y uso de la tierra, la falta de cultura, educación y economía. Evidenciando que algunas superficies que antes eran de uso forestal, hoy en día se práctica la agricultura, así como también se indica que en algunas partes serranas se deforestan áreas para el cultivo de mariguana, amapola y para establecer laboratorios de drogas sintéticas, donde estas causas han provocado migraciones y una serie de desencadenamiento de eventos sociales como pequeñas guerras entre el narcotráfico.

Por otro lado, en la tabla 14 se indica que uno o más factores conductores se relacionan con alguna causa o sub-causa principal o secundaria de la deforestación.

Tabla 14. Relación de las causas de la deforestación y sus factores conductores.

	Causa	%	Sub-causa	%	Factores conductores
Causas principales de la deforestación	Agricultura	53.42	Cultivos permanentes	35.56	Distancia a áreas agrícolas, Distancia a hidrografía, Distancia a áreas de pastizal, Producción forestal, Precipitación, Distancia a carreteras, Altitud, Pendiente y Humedad del suelo
			Agricultura itinerante	28.41	
			Cría de ganado	24.62	
			Apertura de nuevas áreas agrícolas	11.41	
	Extracción de madera	16.84	Comercial	69.48	Distancia a localidades con menor de 2,500 habitantes, Producción forestal
			Combustible	21.49	
			Mejoramiento de fincas	9.03	
	Extensión de infraestructura	18.8	Transporte	41.36	Distancia a asentamientos humanos, Distancia a carreteras, Incremento de la población, Altitud y Pendiente
			Expansión de asentamientos	33.48	
			Servicios públicos	25.16	
Causas secundarias de la deforestación	Explotación minera	10.12	Metálica	78.54	Distancia a minas
			No metálica	21.46	
	Desencadenamiento de eventos sociales	4.84	Desplazamientos bruscos	5.68	No se cuenta con información
			Desorden Social	28.83	
			Narcotráfico	65.49	
	Factores demográficos	34.85	Migraciones	21.04	Incremento de población, Densidad de población
			Incremento poblacional	78.96	
	Factores económicos	27.88	Crecimiento del mercado y comercialización	47.54	Índice de marginación, Distancia a carreteras, Distancia a asentamientos humanos y Producción forestal
			Estructura económica	34.95	
			Urbanización-industrias	17.51	

Factores tecnológicos	10.8	Obras estructurales	52.63	Distancia a asentamientos humanos, Distancia a carreteras
		Cambios de agro-técnicas	9.63	
		Factor de producción agrícola	37.74	
Factores políticos e institucionales	19.4	Políticas formales	20.96	Distancia a áreas naturales protegidas
		Clima político	52.62	
		Derecho a la propiedad	26.42	
Factores culturales	12.52	Actitud pública valores y creencias	66.87	Índice de marginación
		Comportamiento familiar e individual	33.13	

De acuerdo con la relación de la tabla 14, se puede inferir que los factores socioeconómicos se relacionan directamente con la presión demográfica que ejerce el incremento y la densidad de poblacional ante las coberturas forestales, ya que en cuanto mayores son estos factores, mayor es la demanda de madera, así como también de extensiones territoriales sobre las coberturas boscosas para la expansión agrícola, urbana e industrial. En el mismo sentido, el grado de marginación atañe a diferentes aspectos como lo es el sector económico de una población, el nivel de educación y la situación de vivienda, por lo cual se determinó que una población con mayor índice de marginación tiende a deforestar áreas para el uso doméstico.

En la misma vertiente, los factores biofísicos atañen las características topográficas como pendientes y altitudes, así como también cuestiones climáticas como lo es la humedad del suelo y la precipitación pluvial que condicionan de manera natural los usos y coberturas del suelo, delineando o perfilando la expansión de las fronteras agrícolas, las vialidades, desarrollos urbanos, rurales e industriales que están en función de la presión demográfica, donde por lo regular las áreas con mayor demanda para desarrollar estas actividades son las zonas de producción forestal baja, ya que estas presentan pendientes y altitudes mínimas, precipitación pluvial y humedad del suelo considerables.

Respecto al grupo de factores de proximidad, tenemos que relacionan distancias entre la expansión de la frontera agrícola, asentamientos humanos y nuevas infraestructuras como lo son las carreteras, áreas de pastizales, minas, localidades pequeñas y grandes e hidrografía con la cobertura forestal y su pérdida. Confirmando el conocimiento a priori de que las probabilidades de sufrir una pérdida forestal aumentan cuando la distancia disminuye entre esta y las áreas modificadas por el hombre.

Por otro lado, es necesario mencionar que se presenta la dificultad de relacionar algunas causas o sub-causas de la deforestación con algunos factores conductores, debido a la dificultad de ser representados de manera espacial, siendo esta una desventaja que se presenta el modelo espacial RLE, pero a su vez, se complementa mediante la información que proporcionan las personas expertas de manera cualitativa y cuantitativa. Un ejemplo de ello es la dificultad de representar de manera espacial los eventos sociales como el desorden social, el narcotráfico, así como también el clima político y algunos factores culturales y tecnológicos que son de gran importancia en este proceso forestal, pero que sí son tomados en cuenta mediante la opinión de expertos.

No obstante, el presente estudio que involucra la técnica espacial de RLE y la consulta a expertos, proporciona las ventajas de caracterizar y representar el comportamiento del proceso de deforestación de manera temporal, numérica y espacial. Permitiendo con ello, analizar cuáles son las zonas forestales con mayor probabilidad a sufrir una pérdida para determinar y alertar zonas de prioridad en cuanto al manejo forestal. Por tales razones, la combinación de ambas técnicas da mayor entendimiento a las lógicas que de alguna manera encausan la deforestación.

Ya que de acuerdo con otros estudios relevantes en esta temática realizados en México solo indican la parte numérica (Ellis et al., 2017; López-Barrera et al., 2014; Mayfield et al., 2017; Miranda-Aragón et al., 2012b; Morales-Barquero et al., 2015) o numérica y espacial (Osorio *et al.*, 2015; Pineda-Jaimes *et al.*, 2010), faltando la parte cualitativa de la caracterización de este proceso de deforestación mediante la opinión de expertos.

En tal sentido, el presente estudio no solamente puede ser utilizado para entender los procesos de deforestación, sino también como una alternativa fiable como base metodológica extrapolable para cualquier área de estudio para evaluar las fuerzas motrices detrás las transformaciones de la cubierta forestal donde es clave comprender los cambios en nuestro entorno y reducir la incertidumbre acerca de la ocurrencia espacial y temporal de la futura deforestación, así como también sirva para una buena planificación forestal, mitigación de los Gases Efecto Invernadero (GEI) y generación de programas de ordenamiento territorial, conformando planes de manejo forestal de restauración, conservación y aprovechamiento de recursos naturales.

Por otro lado, una de las recomendaciones que surgió fue “dirigir las estrategias de mitigación y los planes de acción forestal a nivel regional y local para abordar individualmente los factores causantes de la deforestación” ya que este fenómeno no se presenta de la misma manera en todas partes. Y sin lugar a duda este tipo de estudios son clave para definir las prioridades y los métodos adecuados para la medición y el monitoreo de los factores y causas que provocan la deforestación, debido a que permiten rastrear las actividades que provocan cambios en la cubierta forestal a lo largo del tiempo y que a su vez nos permite atribuir las emisiones de GEI a causas específicas de la deforestación.

5.5. Referencias

- Alix-Garcia, J. (2007). A spatial analysis of common property deforestation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 53(2), 141–157. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2006.09.004>
- Aquino, A., & Guay, B. (2013). Implementing REDD + in the Democratic Republic of Congo: An analysis of the emerging national REDD + governance structure. *Forest Policy and Economics*, 36, 71–79. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2013.04.003>
- Armenteras, D., Espelta, J. M., Rodríguez, N., & Retana, J. (2017). Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: Three decades of studies (1980–2010). *Global Environmental Change*, 46, 139–147. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2017.09.002>
- Basse, R. M., Omrani, H., Charif, O., Gerber, P., & Bódis, K. (2014). Land use changes modelling using advanced methods: Cellular automata and artificial neural networks. The spatial and explicit representation of land cover dynamics at the cross-border region scale. *Applied Geography*, 53, 160–171. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2014.06.016>
- Bax, V., Francesconi, W., & Quintero, M. (2016). Spatial modeling of deforestation processes in the Central Peruvian Amazon. *Journal for Nature Conservation*, 29, 79–88. <https://doi.org/10.1016/J.JNC.2015.12.002>
- Beguiría, S. (2006). Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 74(1–4), 196–206. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2005.07.018>
- BEHERA, M. D., BORATE, S. N., PANDA, S. N., BEHERA, P. R., & ROY, P. S. (2012). Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA)–Markov model – A geo-information based approach. *Journal of Earth System Science*, 121(4), 1011–1024. <https://doi.org/10.1007/s12040-012-0207-5>
- Berberoglu, S., Akin, A., & Clarke, K. C. (2016). Cellular automata modeling approaches to forecast urban growth for adana, Turkey: A comparative approach. *Landscape and Urban Planning*, 153, 11–27. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2016.04.017>
- Blaschke, T., & Hay, G. J. (2001). OBJECT-ORIENTED IMAGE ANALYSIS AND SCALE-SPACE: THEORY AND METHODS FOR MODELING AND EVALUATING MULTISCALE LANDSCAPE STRUCTURE. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34. Retrieved from http://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/4-w5/PDF/blaschke_hay.pdf

- Bray, D. B., Ellis, E. A., Armijo-Canto, N., & Beck, C. T. (2004). The institutional drivers of sustainable landscapes: a case study of the 'Mayan Zone' in Quintana Roo, Mexico. *Land Use Policy*, 21(4), 333–346. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2003.11.001>
- Burrough, P. A., McDonnell, R., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of geographical information systems*.
- Cadman, T., Maraseni, T., Ma, H. O., & Lopez-Casero, F. (2017). Five years of REDD+ governance: The use of market mechanisms as a response to anthropogenic climate change. *Forest Policy and Economics*, 79, 8–16. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2016.03.008>
- Celemín, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación Spatial Autocorrelation and Local Indicators of Spatial Association: Importance, Structure and Application. *Revista Universitaria de Geografía*, 18(1), 11–31. Retrieved from <http://www.scielo.org.ar/pdf/reuge/v18n1/v18n1a02.pdf>
- CONAGUA, C. N. del A. (2015). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego Año agrícola 2013-2014*. Retrieved from <https://bpo.sep.gob.mx/#/recurso/615>
- Defourny, Pierre, Delhage, C., & et Jean-Paul Kibambe Lubamba. (2011). *Analyse Quantitative des Causes de la Deforestation et de la Degradation des Forets en Republique Democratique du Congo - UN-REDD Programme Collaborative Online Workspace*. Retrieved from <https://unredd.net/documents/un-redd-partner-countries-181/africa-335/democratic-republic-of-the-congo-189/studies-publications-and-other-resources-500/9164-analyse-quantitative-des-causes-de-la-deforestation-et-de-la-degradation-des-forets-en-republique->
- Ellis, E. A., Baerenklau, K. A., Marcos-Martínez, R., & Chávez, E. (2010). Land use/land cover change dynamics and drivers in a low-grade marginal coffee growing region of Veracruz, Mexico. *Agroforestry Systems*, 80(1), 61–84. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9339-2>
- Ellis, E. A., Romero Montero, J. A., Hernández Gómez, I. U., Porter-Bolland, L., & Ellis, P. W. (2017). Private property and Mennonites are major drivers of forest cover loss in central Yucatan Peninsula, Mexico. *Land Use Policy*, 69, 474–484. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2017.09.048>
- Etter, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2006). Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management*, 79(1), 74–87. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2005.05.017>
- FAO, F. A. A. O. O. T. U. N. (2015). *Global Forest Resources Assessment 2015 Desk reference*. Rome. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>
- Farfán Gutiérrez, M. (2015). *Escenarios de deforestación (2004-2018) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán y su impacto en las áreas potenciales de distribución de dos especies de felinos*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Retrieved from <http://www.remeri.org.mx/tesis/INDIXE-TESIS.jsp?id=oai:tesis.dgbiblio.unam.mx:000724331>
- Farfán, M., François Mas, J., & Osorio, L. (2012). Interpolating Socioeconomic Data for the Analysis of Deforestation: A Comparison of Methods. *Journal of Geographic Information System*, 04(04), 358–365. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.44041>
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2001). *What Drives Tropical Deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying*

- causes of deforestation based on subnational case study evidence*. Louvain-la-Neuve (Belgium). Retrieved from <http://www.pik-potsdam.de/~luedeke/lucc4.pdf>
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. *BioScience*, 52(2), 143–150. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:pcaudf\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:pcaudf]2.0.co;2)
- Goodchild, M. F. (2008). *Spatial Autocorrelation*. Geo Books. Retrieved from <https://alexsingleton.files.wordpress.com/2014/09/47-spatial-aurocorrelation.pdf>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., & et., al. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342, 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Harman, B. I., Koseoglu, H., & Yigit, C. O. (2016). Performance evaluation of IDW, Kriging and multiquadric interpolation methods in producing noise mapping: A case study at the city of Isparta, Turkey. *Applied Acoustics*, 112, 147–157. <https://doi.org/10.1016/J.APACoust.2016.05.024>
- Hoffman, M., Kelley, H., & Evans, T. (2002). *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-Agent Systems*. Northampton, MA: Elgar. Retrieved from <https://ostromworkshop.indiana.edu/library/node/59444>
- Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, R. S., Brockhaus, M., Verchot, L., ... Romijn, E. (2012). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009>
- Houghton, R. . (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(6), 597–603. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2012.06.006>
- IPCC. (2014). *Chapter Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers Summary for Policymakers*. Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
- Jantz, C. A., Goetz, S. J., Donato, D., & Claggett, P. (2010). Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2009.08.003>
- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9–20. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.06.014>
- Khuc, Q. Van, Tran, B. Q., Meyfroidt, P., & Paschke, M. W. (2018). Drivers of deforestation and forest degradation in Vietnam: An exploratory analysis at the national level. *Forest Policy and Economics*, 90, 128–141. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2018.02.004>
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Leper, E. (2003). D YNAMICS OF L AND -U SE AND L AND -C OVER C HANGE IN T ROPICAL R EGIONS. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Lambin, E. F., & Meyfroidt, P. (2010). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27(2), 108–118. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2009.09.003>
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., ... Xu, J. (2001). The causes of land-

- use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261–269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
- Lencinas, J. D., & Siebert, A. (2009). Relevamiento de bosques con información satelital: Resolución espacial y escala Forest survey based on satellite imagery: spatial resolution and scale. *Revista de Ciencias Forestales - Quebracho*, 17(2), 101–105. Retrieved from <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/v17a11.pdf>
- Leyva Reyes, J. C.; Herrera y Herrera, B. (2003). Análisis de la dinámica territorial en México y su interrelación con la dinámica poblacional, periodo 1980-2000. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 9(1). Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/629/62990108/>
- Li, J., & Lu, B.-L. (2009). An adaptive image Euclidean distance. *Pattern Recognition*, 42(3), 349–357. <https://doi.org/10.1016/J.PATCOG.2008.07.017>
- López-Barrera, F., Manson, R. H., & Landgrave, R. (2014). Identifying deforestation attractors and patterns of fragmentation for seasonally dry tropical forest in central Veracruz, Mexico. *Land Use Policy*, 41, 274–283. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2014.06.004>
- López-Carr, D., Davis, J., Jankowska, M. M., Grant, L., López-Carr, A. C., & Clark, M. (2012). Space versus place in complex human–natural systems: Spatial and multi-level models of tropical land use and cover change (LUCC) in Guatemala. *Ecological Modelling*, 229, 64–75. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2011.08.020>
- MacDicken, K. G. (2015). Global Forest Resources Assessment 2015: What, why and how? *Forest Ecology and Management*, 352, 3–8. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.02.006>
- Mahonghol, D. (2012). *Analyse qualitative des causes et agents de la déforestation et de la dégradation des terres forestières dans une RDC post-conflit - UN-REDD Programme Collaborative Online Workspace*. Retrieved from <https://unredd.net/documents/un-redd-partner-countries-181/africa-335/democratic-republic-of-the-congo-189/studies-publications-and-other-resources-500/9165-analyse-qualitative-des-causes-et-agents-de-la-deforestation-et-de-la-degradation-des-terres-fores>
- Manson, S. M., & Evans, T. (2007). Agent-based modeling of deforestation in southern Yucatan, Mexico, and reforestation in the Midwest United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(52), 20678–20683. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705802104>
- Márquez, I. D. J. E. O.-G. H. (2005). *Ecosistemas y recursos agropecuarios. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* (Vol. 21). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/3586/358636309002/>
- Mas, J. F., Puig, H., Palacio, J. L., & Sosa-López, A. (2004). Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. *Environmental Modelling & Software*, 19(5), 461–471. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00161-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00161-0)
- Mayfield, H., Smith, C., Gallagher, M., & Hockings, M. (2017). Use of freely available datasets and machine learning methods in predicting deforestation. *Environmental Modelling & Software*, 87, 17–28. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2016.10.006>
- MECNT. (2012a). *Etude qualitative sur les causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en République Démocratique du Congo*. Retrieved from <http://www.forestpeoples.org/sites/fpp/files/publication/2013/05/etude-qualitative-causes-dd-menee-par-le-gtcr-faofinalaout2012.pdf>
- MECNT. (2012b). *ETUDE SUR LES MOTEURS DE LA DEFORESTATION : ETAPE DE VALIDATION*. Retrieved from

- <http://www.forestpeoples.org/sites/fpp/files/publication/2013/05/etude-quantitative-causes-dddonnees-terraingtcrfinal.pdf>
- Menard, S. W. (2002). *Applied logistic regression analysis*. Sage Publications. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=EAI1QmUUsbUC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Applied+logistic+regression+analysis&ots=4UEOM-qXLT&sig=S3g0A9ht5XYXXRkoDSptHI2eKZ8#v=onepage&q=Applied+logistic+regression+analysis&f=false>
- Messina, J. P., & Walsh, S. J. (2001). *Simulating Land Use and Land Cover Dynamics in the Ecuadorian Amazon through Cellular Automata Approaches and an Integrated GIS*. Retrieved from http://sedac.ciesin.org/openmeeting/downloads/1005859063_presentation_swalsh_riopaper.pdf
- Meyfroidt, P., Rudel, T. K., & Lambin, E. F. (2010). Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(49), 20917–20922. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014773107>
- Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Pompa-García, M., & Aguirre-Salado, C. A. (2012). Modeling susceptibility to deforestation of remaining ecosystems in North Central Mexico with logistic regression. *Journal of Forestry Research*, 23(3), 345–354. <https://doi.org/10.1007/s11676-012-0230-z>
- Monjardín-Armenta, S. A., Pacheco-Angulo, C. E., Plata-Rocha, W., Corrales-Barraza, G., Monjardín-Armenta, S. A., Pacheco-Angulo, C. E., ... Corrales-Barraza, G. (2017). La deforestación y sus factores causales en el estado de Sinaloa, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 7. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311482>
- Moonen, P. C. J., Verbist, B., Schaeffer, J., Bwama Meyi, M., Van Rompaey, A., & Muys, B. (2016). Actor-based identification of deforestation drivers paves the road to effective REDD+ in DR Congo. *Land Use Policy*, 58, 123–132. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2016.07.019>
- Morales-Barquero, L., Borrego, A., Skutsch, M., Kleinn, C., & Healey, J. R. (2015). Identification and quantification of drivers of forest degradation in tropical dry forests: A case study in Western Mexico. *Land Use Policy*, 49, 296–309. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2015.07.006>
- Nathan, I., & Pasgaard, M. (2017). Is REDD+ effective, efficient, and equitable? Learning from a REDD+ project in Northern Cambodia. *Geoforum*, 83, 26–38. <https://doi.org/10.1016/J.GEOFORUM.2017.04.020>
- Osorio, L. P., Mas, J.-F., Guerra, F., & Maass, M. (2015). Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México Analysis and modeling of deforestation processes: a case study in the Coyuquilla River Basin, 88, 60–74. <https://doi.org/10.14350/rig.43853>
- Overmars, K. P., & Verburg, P. H. (2006). Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines. *Agricultural Systems*, 89(2–3), 435–456. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2005.10.006>
- Pacheco, C., Aguado, I., & Mollicone, D. (2011). LAS CAUSAS DE LA DEFORESTACIÓN EN VENEZUELA: UN ESTUDIO RETROSPECTIVO. *BioLlania*. Retrieved from https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30540296/Pacheco_et_al_%282011%29_Deforestacion_Venezuela.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1535400628&Signature=zWYvXFbsU0N9%2FqLnMb1KCrL1RCY%3D&response-content-disposition=inline%3B+filena

- Pacheco, C. E., Aguado, M. I., & Mollicone, D. (2014). Identification and characterization of deforestation hot spots in Venezuela using MODIS satellite images. *Acta Amazonica*, 44(2), 185–196. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672014000200004>
- Pacheco, C. E., Aguado, M. I., Vilanova, E., & Martínez, S. (2012). Utilización de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) en el desarrollo de un sistema de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de emisiones de CO₂ en tres áreas “hot spot” de deforestación en Venezuela. In *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*. Retrieved from http://www.age-geografia.es/tig/2012_Madrid/ponencia1/Pacheco_final_imp.pdf
- Pan, W. K. Y., & Bilsborrow, R. E. (2005). The use of a multilevel statistical model to analyze factors influencing land use: a study of the Ecuadorian Amazon. *Global and Planetary Change*, 47(2–4), 232–252. <https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2004.10.014>
- Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Franco Plata, R. (2010). Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico (Mexico) using geographically weighted regression. *Applied Geography*, 30(4), 576–591. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2010.05.004>
- Pontius Jr, R. G., & Si, K. (2014). The total operating characteristic to measure diagnostic ability for multiple thresholds. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(3), 570–583. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.862623>
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2003.09.008>
- Pontius, R., Santacruz, A., Tayyebi, A., Parmentier, B., & Si, K. (2015). *How to run the TOC Package in R*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=1JRwVOi0FSE>
- Pontius, R., Santacruz, A., Tayyebi, A., Parmentier, B., & Si, K. (2015). *Package ‘TOC.’* Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/TOC/TOC.pdf>
- Quezada, C. R., & Rocha, W. P. (2010). Área Metropolitana de Concepción: Factores espaciales explicativos de su crecimiento urbano reciente (2001-2009) por medio de un Modelo de Regresión Logística Espacial. *Revista Postgrados UNAH*, 2(4). Retrieved from http://faces.unah.edu.hn/decanato/images/stories/PDF/Revista_Congreso_V2/area_metropolitana_concepcion.pdf
- Reyes, G. (2013). *Empowered lives. Resilient nations. The UN-REDD Programme is the United Nations collaborative initiative on Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation (REDD+) in developing countries*. Retrieved from www.fao.org/
- Rosete Vergés, F. A., Velázquez, A., Bocco, G., & Espejel, I. (2014). Multi-scale land cover dynamics of semiarid scrubland in Baja California, Mexico. *Regional Environmental Change*, 14(4), 1315–1328. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0574-8>
- Roy Chowdhury, R. (2006). Landscape change in the Calakmul Biosphere Reserve, Mexico: Modeling the driving forces of smallholder deforestation in land parcels. *Applied Geography*, 26(2), 129–152. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2005.11.004>
- RUDEL, T. K., DEFRIES, R., ASNER, G. P., & LAURANCE, W. F. (2009). Changing Drivers of Deforestation and New

- Opportunities for Conservation. *Conservation Biology*, 23(6), 1396–1405. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01332.x>
- Sader, S. A., & Joyce, A. T. (1988). Deforestation Rates and Trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica*, 20(1), 11. <https://doi.org/10.2307/2388421>
- Salvini, G., Herold, M., De Sy, V., Kissinger, G., Brockhaus, M., & Skutsch, M. (2014). How countries link REDD+ interventions to drivers in their readiness plans: implications for monitoring systems. *Environmental Research Letters*, 9(7), 074004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/7/074004>
- Samndong, R. A., Bush, G., Vatn, A., & Chapman, M. (2018). Institutional analysis of causes of deforestation in REDD+ pilot sites in the Equateur province: Implication for REDD+ in the Democratic Republic of Congo. *Land Use Policy*, 76, 664–674. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2018.02.048>
- Schneider, L., & Pontius, R. (2001). Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1–3), 83–94. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00189-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00189-X)
- Serneels, S., & Lambin, E. F. (2001). Proximate causes of land-use change in Narok District, Kenya: a spatial statistical model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1–3), 65–81. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00188-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00188-8)
- Shehzad, K., Qamer, F. M., Murthy, M. S. R., Abbas, S., & Bhatta, L. D. (2014). Deforestation trends and spatial modelling of its drivers in the dry temperate forests of northern Pakistan — A case study of Chitral. *Journal of Mountain Science*, 11(5), 1192–1207. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2932-x>
- van der Werf, G. R., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., ... Randerson, J. T. (2009). CO2 emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2(11), 737–738. <https://doi.org/10.1038/ngeo671>
- Weatherley-Singh, J., & Gupta, A. (2015). Drivers of deforestation and REDD+ benefit-sharing: A meta-analysis of the (missing) link. *Environmental Science & Policy*, 54, 97–105. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2015.06.017>
- Wehkamp, J., Aquino, A., Fuss, S., & Reed, E. W. (2015). Analyzing the perception of deforestation drivers by African policy makers in light of possible REDD+ policy responses. *Forest Policy and Economics*, 59, 7–18. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2015.05.005>
- Wyman, M. S., & Stein, T. V. (2010). Modeling social and land-use/land-cover change data to assess drivers of smallholder deforestation in Belize. *Applied Geography*, 30(3), 329–342. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2009.10.001>
- Xuejun Wang, Yuxing Zhang, Enping Yan, Guosheng Huang, Chunxiang Cao, & Xiliang Ni. (2014). Deforestation area estimation in China based on Landsat data. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 4254–4256). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947428>

Capítulo VI. Modelo de simulación geoespacial de deforestación y reforestación

6.1. Introducción

A través de los años, la superficie terrestre ha sufrido transformaciones importantes que han impulsado el cambio climático, siendo la deforestación uno de los problemas más preponderantes en la pérdida de biodiversidad (Buizer *et al.*, 2014; Onilude *et al.*, 2010), la alteración de los ciclos hidrológicos (Panday *et al.*, 2015) y la pérdida del stock de carbono (C) (Houghton, 2012). Deteriorando además a los ecosistemas y los servicios que estos brindan a la humanidad, como el agua potable, medicinas, alimentos, combustibles y por supuesto la regulación del clima (Gao *et al.*, 2017; Mohebalian & Aguilar, 2018).

Ante esta problemática se deben desarrollar medidas que contrarresten los procesos de deforestación de una manera más eficaz. Ya que las cubiertas forestales son de suma importancia en el cambio climático, y deben ser considerados como sistemas biológicos con propósitos múltiples, como almacenar la mayor cantidad de C y reducir las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) producidas por la deforestación. Por lo tanto, el manejo de estos recursos se debe hacer tomando en consideración diferentes aspectos relacionados con la conservación y sustentabilidad del sistema si se quiere evitar su deterioro.

Algunos estudios indican que la deforestación ha sido reconocida como la segunda fuente más grande de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) y se espera que esta tendencia continúe durante los próximos años (Saatchi *et al.*, 2011). Por tal razón, se han implementado las estrategias de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal (REDD+), la cual requiere para su establecimiento información espacial sobre cambios en la cubierta forestal y el desarrollo de escenarios para proyectar estos procesos forestales a futuro y por consecuencia las emisiones de CO₂ asociadas a estos problemas.

Al respecto, se indica en la literatura, que no basta el monitoreo y análisis retrospectivo de los cambios, sino que también es necesario el análisis prospectivo a mediano y largo plazo (Cristián-Henríquez *et*

al., 2006a; Cristian-Henríquez *et al.*, 2006b; Jat *et al.*, 2008), con la finalidad de establecer las estrategias más precisas para mitigar este daño ambiental. Una alternativa, es optar por la generación de modelos espaciales, como la simulación geoespacial a futuro que nos permita conocer los procesos dinámicos en un espacio geográfico (Singh *et al.*, 2017). Tomando en cuenta que los modelos de simulación no son una predicción, ni un pronóstico, sino que deben ser entendidos como descripciones e imágenes coherentes, consistentes de un posible estado futuro (Patel & Rothman, 2007), con la finalidad de estudiar diversas alternativas del futuro y comparar las consecuencias potenciales de cada una de ellas (Overmars & Verburg, 2006; Verburg *et al.*, 2006).

Estos modelos geoespaciales permitirán reproducir un fenómeno existente en un área de estudio determinada para generar alternativas futuras y analizar las consecuencias de cada una de ellas, proporcionando información valiosa sobre el comportamiento de un sistema bajo un rango de condiciones determinadas (Veldkamp & Lambin, 2001). A escala regional y local los modelos son más variados y presentan más ventajas que los modelos globales. Una de las primicias de estas geosimulaciones regionales es que se generan de diferentes puntos de vista con enfoques tendenciales, sostenibles, conservadores y críticos que se utilizan para desarrollar herramientas de apoyo en la toma de decisiones, así como indican dónde tendrá lugar el cambio, la escala temporal y por lo regular son escenarios de corto a mediano plazo.

En tal sentido, varios trabajos y metodologías se han desarrollado para realizar la simulación geoespacial que involucren cuestiones forestales con diferente finalidad. La gran mayoría de los modelos simulan los procesos forestales basados en factores de tipo biofísico, socioeconómicos y de accesibilidad, con la intención de comprender los impactos asociados y poder implementar medidas para mitigar estos procesos de pérdida forestal (Thapa *et al.*, 2013). Al respecto, algunas investigaciones han utilizado autómatas celulares (Killeen *et al.*, 2004), Cadenas de Markov (de Barros Ferraz *et al.*, 2005; Rodríguez-Eraso, 2011) o la combinación de Autómatas Celulares y Cadenas de Markov (Bax, Francesconi, & Quintero, 2016; Hurtado-Pidal, 2014), técnicas de Evaluación Multi-Criterio (EMC) (Franco-Prieto, 2011), Análisis de Patrones Espaciales Morfológicos (MSPA) (Nunes de Oliveira *et al.*, 2017), etc.

Específicamente, en México se han realizado algunos trabajos de simulación de escenarios que en el ámbito forestales, uno de los primeros trabajos en esta temática fue un mapa de riesgos de deforestación que se generó mediante una regresión entre la tasa de deforestación y algunas variables espaciales (Mas *et al.*, 1996), otro ejemplo de referencia fue la investigación desarrollada por Pineda-Jaimes (2010), que generó modelos de simulación mediante técnicas combinadas de Evaluación Multi-criterio (EMC) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el objetivo de localizar áreas adecuadas para plantaciones forestales en el Estado de México.

Asimismo, en la cuenca del río Coyuquilla del Estado de Guerrero, se modeló la deforestación por medio de la técnica de Pesos de Evidencia, donde se determinó la probabilidad de cambio y las áreas más probables a sufrir una modificación (Osorio *et al.*, 2015). En la misma vertiente, en la Sierra Madre Oriental del estado de San Luis Potosí, se modelaron escenarios futuros empleando la técnica de Autómatas Celulares basada en un mapa de probabilidades, estimando que el 13% de la superficie con coberturas vegetales naturales son susceptibles al cambio y que para el 2025 el total de áreas modificadas podría triplicarse debido a las actividades agropecuarias (Sahagún-Sánchez *et al.*, 2011).

De manera similar en una región del sureste de México, se generaron dos escenarios, uno orientado a la tendencia y otro sostenible con un descenso en la tasa de cambio y una relocalización de los claros forestales en las áreas secundarias mediante las técnicas de Pesos de Evidencia y Autómatas Celulares (Mas & Flamenco, 2011). Y de igual forma, utilizando estas mismas técnicas en el estado de Oaxaca se definieron escenarios futuros de los cambios en la cubierta forestal al año 2025 (Leija-Loredo *et al.*, 2016). En tal sentido, se tiene que al momento de estructurar un manejo forestal óptimo, es ineludible contemplar diversos criterios de tipo ambiental, económico y social. Por lo tanto, es recomendable formular modelos que permitan planificar el uso de sistemas forestales dentro del marco de la teoría de la decisión multicriterio.

Y a consecuencia de lo anteriormente expuesto, en este capítulo se planteó como objetivo principal generar un modelo de simulación geoespacial a futuro que contemple las cobertura de deforestación y reforestación para los años 2030 y 2050, con la intención de analizar la dinámica forestal en la cuenca Pacífico, Norte, México, mediante técnicas de Evaluación Multi-Criterio (EMC), dicho

modelo permitirán conocer sobre cuales coberturas se presentara la deforestación y la reforestación y como consecuencia las estimaciones de pérdida y ganancia de Carbono.

6.2. Datos y métodos

6.2.1. Datos

Según Mena, (1996) y Pineda-Jaimes, (2010), en la simulación de modelos futuros no existe un esquema general de variables para estudios del territorio, por lo que la elección de estas se realizó tomando en consideración los objetivos de los escenarios, una consulta a expertos y de una revisión bibliográfica. De acuerdo a la disponibilidad de los datos, se recopiló información de tipo vectorial, raster y alfanumérica de diferentes instituciones gubernamentales, en la tabla 15, se detalla dicha información.

Tabla 15. Datos utilizados para simulación del modelo geoespacial.

Datos (año)	Escala / Resolución y formato	Fuente	Factores
Población (2015)	Habitantes Numérica	INEGI (http://www3.inegi.org.mx/sistemas/SCITEL/default?ev=3)	Densidad de población
Población (2010)	Localidad Numérica	CONAPO (http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_marginacion_a_nivel_localidad_2010)	Índice de marginación
Modelo digital de elevaciones (MDE) (2008)	90 m Raster	CGIAR (http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp)	Altitud y pendiente
Producción forestal (2012) Áreas para restauración (2012)	1:250,000 Vectorial	CONAFOR (http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/zonificacion)	Producción forestal; Áreas para restauración
Edafología (2000)	1:250,000 Vectorial	INEGI (https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/edafologia/)	Tipos de suelo
Mapa de Uso de Suelo y Vegetación (US&V) (2002; 2014)	1:250,000 Vectorial	INEGI (http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/ususuelo/Default.aspx)	Usos de suelo y vegetación; Bosques degradados
Mapa de Uso de Suelo y Vegetación (US&V) (2014)	1:250,000 Vectorial	INEGI (http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/ususuelo/Default.aspx)	Distancia a agricultura; Distancia a pastizales

Áreas naturales protegidas (2010)	1:250,000 Vectorial	INEGI (http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm) CONANP (http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm)	Distancia a áreas naturales protegidas
Hidrografía (2000)	1:50,000 Vectorial	INEGI (http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/hidrologia/default.aspx)	Distancia a hidrografía
Carreteras (2000)	1:50,000 Vectorial	INEGI (http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/vectoriales_carreteras.aspx)	Distancia a carreteras
Población (2015)	Localidad Numérica	INEGI (http://www3.inegi.org.mx/sistemas/SCITEL/default?ev=3)	Distancia a localidades con menor de 2500 habitantes

6.2.2. Metodología

El modelo de simulación espacial de deforestación y reforestación se estableció teniendo como año base la cobertura forestal entre los años 2002 y 2014, con un horizonte futuro hacia el año 2030 y 2050, integrando para ello, métodos de Evaluación Multi-Criterio (EMC) para modelar de manera espacial la deforestación y reforestación de los bosques (bosques y selvas en conjunto). Estos métodos engloban desde las pautas para el diseño e implementación de la simulación de un modelo geoespacial, como son; la descripción cualitativa y el cálculo de la demanda de superficie. De la misma forma, se siguen los pasos estructurales para la implementación de técnicas de EMC, los cuales van desde la definición de los objetivos de modelo de simulación, es decir, que es lo que se quiere simular; hasta la búsqueda y selección de los criterios, factores y restricciones, concluyendo con un mapa simulado de las coberturas de deforestación y reforestación. Los métodos y técnicas que se emplearon para simular el modelo geoespacial se desarrollan a continuación (Figura 24).

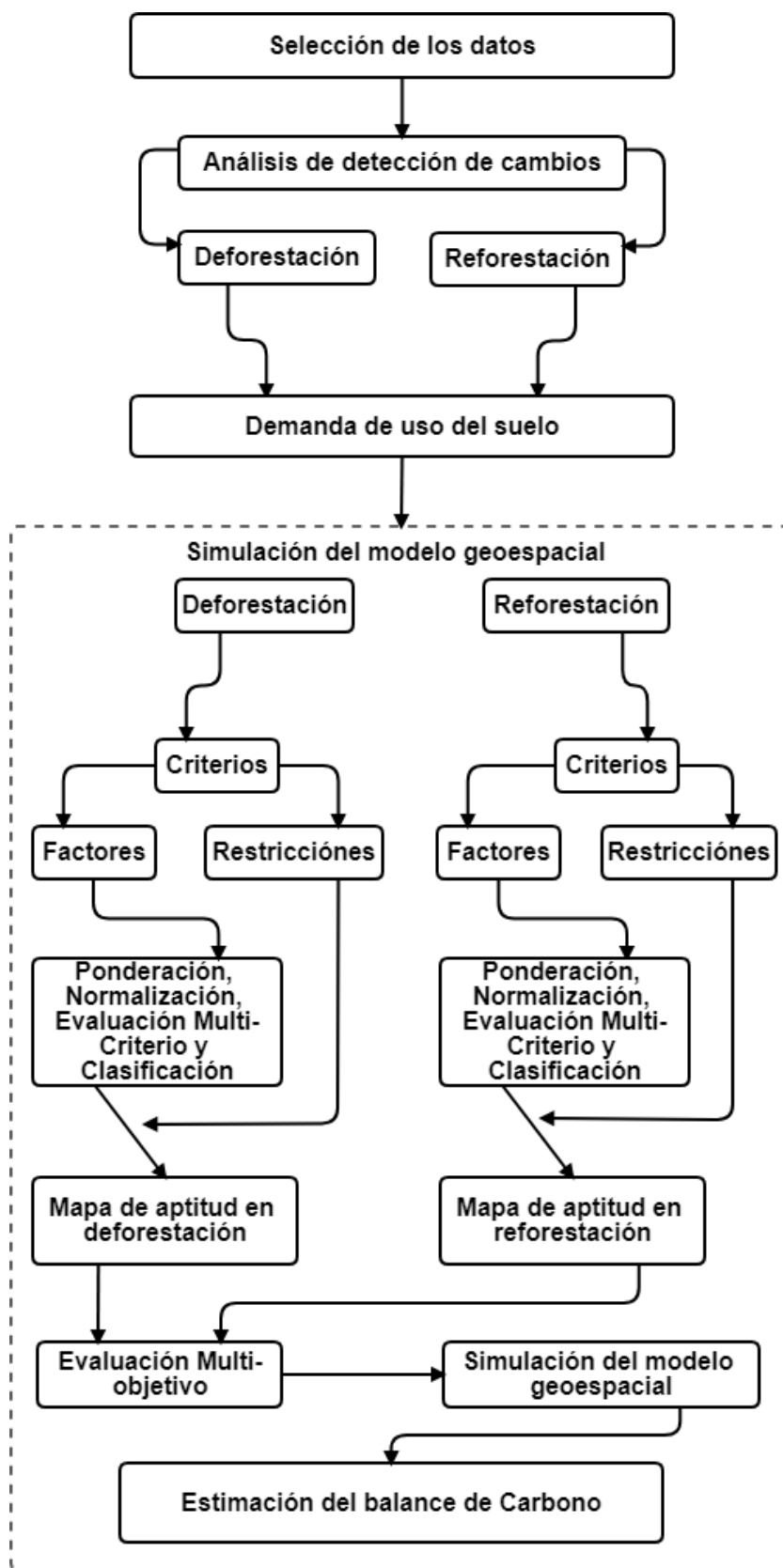


Figura 24. Esquema metodológico

6.2.2.1. Selección y pre-procesamiento de los datos

Según los estudios científicos (Bax *et al.*, 2016; Mas *et al.*, 1996; Osorio *et al.*, 2015; Pineda-Jaimes *et al.*, 2010) y la consulta a los expertos de la CONAFOR y SEMARMAT, las 13 variables seleccionadas para la simulación del modelo geoespacial fueron: densidad de población, índice de marginación, mapa de uso de suelo y vegetación, tipos de suelo, red vial, hidrografía, precipitación media anual, áreas naturales protegidas, producción forestal, áreas naturales protegidas, modelo digital de elevaciones y áreas para restauración.

A dichas variables se les realizó un pre-procesamiento que constó de cinco métodos: el primero, de espacialización, donde los datos que se encontraban en tablas fueron cartografiados mediante técnicas de geoprocésamiento; el segundo, de reproyección cartográfica, donde se homogenizó el sistema de proyección y el datum cartográfico; el tercero, de reclasificación, donde se unieron diferentes clases en una sola, ejemplo de ello los diferentes tipo de bosque y selva en una sola clase denominada bosque; el cuarto, de corrección topológica y temática, que constó principalmente en detectar y corregir los errores topológicos y temáticos presentados en las variables utilizadas, ejemplo, las coberturas de uso del suelo que poseían algunas deficiencias en estos puntos; y el quinto, de rasterización, que permitió llevar toda la información de formato vectorial a forma raster, considerando el tamaño del pixel de 100 m, que equivale a 1 ha.

6.2.2.2. Análisis de detección de cambios

Con la finalidad de obtener la deforestación y reforestación para el periodo 2002 y 2014, las cuales se definieron como variables independientes en la EMC, se utilizaron los mapas de Uso de Suelo y Vegetación de los años 2002 y 2014, estos se reclasificaron con las clases de *bosque*, que incluyó todas las clases de bosques y selvas, y *no bosque*, que incluyó el resto de las clases. Posteriormente, a estas reclasificaciones se les aplicó una técnica de detección de cambios, específicamente la diferencia entre mapas, para obtener los polígonos de deforestación y reforestación de bosque del periodo 2002-2014.

6.2.2.3. Demanda de uso de suelo

Después de obtener las variables deforestación y reforestación, se realizó la construcción del modelo, partiendo de la cobertura de bosques del año 2014 como capa restrictiva para la EMC, se realizó un análisis de la demanda de uso de suelo, que consistió, en calcular la superficie que debería tener la cobertura de bosque (bosques y selvas), la cual se generó mediante un análisis temporal de las superficies de bosque, a través de los mapas de USyV de INEGI de los años 1986, 1993, 2002, 2007, 2011 y 2014, para establecer la superficie del bosque a los años 2030 y 2050 mediante una función polinómica de 3^{er} grado, estableciendo como prioridad que las coberturas de bosque para el año 2050 sean iguales o ligeramente superiores a las que presentaba en el año de 1986 y en función de esto definir las coberturas de deforestación y reforestación para los años 2030 y 2050.

Para lo cual se analizó el comportamiento de la deforestación y reforestación entre los periodos 1986-1993, 1993-2002, 2002-2011, 2011-2014 con la intención de dar una idea más certera al momento de definir las superficies de deforestación y reforestación, y por supuesto vayan en concordancia, a las metas del Programa Nacional Forestal de México (SEGOB, 2014), al Plan de Desarrollo Forestal Sustentable de México (CONAFOR, 2014) y a los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) a nivel internacional que se plantea el IPCC en cuanto al estado actual y futuro de los bosques en el mundo (FAO, 2016).

6.2.2.4. Simulación geoespacial mediante Evaluación Multi-Criterio

Para obtener las áreas de mayor aptitud, se utilizaron diversos criterios basados en los objetivos planteados (deforestación y la reforestación). Para la creación de modelos geoespaciales, en cada uno de los objetivos se definieron los factores y las restricciones, el primero, mediante la ponderación de cada uno, en función de su influencia dentro de cada objetivo, y el segundo, mediante una serie de limitaciones espaciales que se definieron a cada factor o a los mapas de aptitud resultantes de la Sumatoria Lineal Ponderada (SLP). A continuación, se describe cada uno de estos procesos.

Criterios y su ponderación: Se emplearon tres criterios, Biofísico, que caracteriza los elementos físicos naturales del área de estudio; Socioeconómico, que caracteriza a la población y sus actividades económicas; y, Proximidad, que caracteriza la relación que existen entre algunos elementos físicos

naturales y antrópicos mediante una distancia. Cada uno de estos criterios fue ponderado en función de una consulta a algunos expertos y con base a una revisión bibliográfica, luego fueron normalizados, de tal manera que la sumatoria de los pesos de los tres criterios fuese igual a 1.

Factores: Una vez definidos y ponderados los criterios, se establecieron los factores en cada uno de ellos para modelar espacialmente las variables, en función de los objetivos de cada escenario, esto permitió determinar las áreas con mayor aptitud para la deforestación y la reforestación. Dichos factores considerados se presentan en la tabla 16, en esta se puede señalar que para el criterio socioeconómico se estudiaron 2 factores, para el biofísico 6 factores y para el de proximidad 5 factores.

Tabla 16. Factores considerados en la simulación espacial de deforestación y reforestación.

Criterio	Factores	Descripción
Socioeconómicas	Densidad de población	Este factor indica la cantidad poblacional de un área determinada, indicando que mientras es mayor la densidad, mayor es la demanda de recursos maderables para uso comercial y domestico
	Índice de marginación	Este factor, configura el nivel de educación, el estatus de vivienda, y los ingresos económicos de una población, determinando varios actores en los procesos forestales de deforestación y reforestación
Biofísicas	Altitud y pendiente	Este par de factores se enfocan en determinar zonas óptimas para reforestación de bosques y selvas, así como también, estos delinean o delimitan las zonas para la expansión agrícola, la generación de infraestructura urbana e industrial
	Producción forestal	Este factor natural clasifica el tipo de vegetación forestal en función de la producción maderable de 1 a 3 clases, siendo la categoría 3 la producción maderable más baja
	Tipos de suelo	Indican los diferentes tipos de suelo en los cuales se presta para desarrollar diferentes tipos de actividades como el desarrollo de la agricultura, desarrollo urbano, etcétera, así como también indica cuales son los suelos más aptos para realizar actividades de reforestación
	Usos de suelo y vegetación	Los usos y coberturas del suelo determinan las actividades que se desarrollan sobre un la superficie, y nos permite determinar las causas principales de las modificaciones que sufre la cubierta forestal
	Bosques degradados	Indica los bosques que han sufrido un deterioro forestal, debido a diversas causas de extracción de madera, como la tala selectiva para uso doméstico y comercial
	Áreas para restauración	Estas áreas son enmarcadas por la CONAFOR como áreas prioritarias para reforestar y restaurar, ya que son zonas con gran potencial ser forestales
Proximidad	Distancia a agricultura y distancia a pastizales	Estos dos factores configuran la proximidad de las áreas forestales con respecto a las áreas agrícolas y de pastizal, modelando que, a menor distancia, mayor es la probabilidad a sufrir una pérdida forestal producida por la apertura de nuevas áreas agrícolas, así como la inducción de pastizales para el pastoreo y cría de ganado

Distancia a áreas naturales protegidas	Modela la proximidad a las áreas que se encuentran protegidas bajo políticas, leyes y estatutos gubernamentales que coordinan diferentes instituciones, dando a entender que sí existe deforestación en estas áreas resguardadas o en sus inmediaciones, no se está ejerciendo un buen manejo forestal por parte de las autoridades correspondientes
Distancia a hidrografía	Este, modela la proximidad de los ríos, canales y cuerpos de agua hacia las áreas forestales, por lo tanto, se indica que, a menor distancia entre la hidrografía y las coberturas forestales, mayor es la probabilidad a que se desarrollen áreas para actividades agrícolas y asentamientos humanos, así como también se considera esencial para el desarrollo de cualquier tipo de vegetación
Distancia a carreteras	Este factor describe la accesibilidad a los recursos forestales ya que la existencia de nuevas vías de acceso como carreteras y caminos incrementa la presión hacia la utilización de las coberturas forestales, así como también ayudan a expandir la economía, impulsando a la población a obtener terrenos aledaños a las vialidades para usos agrícolas, ganaderos y urbanos
Distancia a localidades con menor de 2500 habitantes	Enmarca la proximidad de los pequeños asentamientos humanos a las coberturas forestales que deforestan áreas para el desarrollo de la agricultura y la extracción de la madera para fines domésticos y comerciales, principalmente

Ponderación de los factores: Este proceso se realizó para todos los factores, asignándosele un peso a cada uno de los factores, mediante la ayuda de la consulta a expertos y la revisión bibliográfica, cumpliendo con la condición de la sumatoria de los pesos de los factores de un mismo criterio sea 1. Es decir, todos los factores que contempla el criterio biofísico suman 1 y así de la misma manera la sumatoria de todos los factores por criterio son igual a 1. De igual forma, fue necesario indicar que el peso o ponderación final de cada uno de los factores se obtuvo mediante la multiplicación del peso de cada uno de los factores por su criterio correspondiente. Por ejemplo si el peso del factor Altitud es de 0.20 y su criterio correspondiente es el biofísico que tiene un peso es de 0.50, el peso final resultante de este factor es 0.10, y así sucesivamente.

En el mismo sentido, es necesario indicar que antes de realizar la ponderación antes descrita, los factores biofísicos: tipos de suelo, usos de suelo y vegetación, áreas para restauración y bosques degradados, los cuales se caracterizan por poseer clases temáticas se les aplicó el Método de Jerarquías Analíticas (MJA) de Saaty, con la propósito de establecer jerarquías relativas de importancia entre categorías de un mismo factor (Saaty, 1980). La asignación de los pesos a cada clase temática se realizó considerando dos puntos de vista, uno *cuantitativo* y otro *cualitativo*.

Desde el punto de vista *cuantitativo*, se realizó una intersección espacial entre la variable dependiente deforestación o reforestación por separado, con cada una de las variables antes mencionadas, con la finalidad de determinar el porcentaje de impacto de cada clase dentro de cada uno de los factores. Y desde el punto de vista *cualitativo*, se utilizó la opinión de 6 expertos externos, 3 de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), y 3 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), los cuales valoraron con su opinión las ponderaciones establecidas en las categorías del mismo factor. Entonces, mediante estos dos puntos de vista se reclasificaron las clases de los factores.

Normalización de los factores: A continuación, se realizó el proceso de normalización de los factores, para ello se utilizó una escala de 0 – 255, mediante lógica borrosa (fuzzy), con funciones lineales monótonas crecientes y decrecientes y funciones definidas por el usuario de acuerdo con el comportamiento de los factores con las variables dependientes de deforestación y reforestación (Figura 25). La utilización de estas funciones se justificó, ya que los valores mínimos y máximos utilizados al momento de la normalización se obtuvieron de la reclasificación de cada factor de acuerdo con el método de Jerarquías Analíticas de Saaty, la consulta a expertos y la revisión bibliográfica, considerando valores diferentes en las funciones de normalización para cada uno de los objetivos a simular.

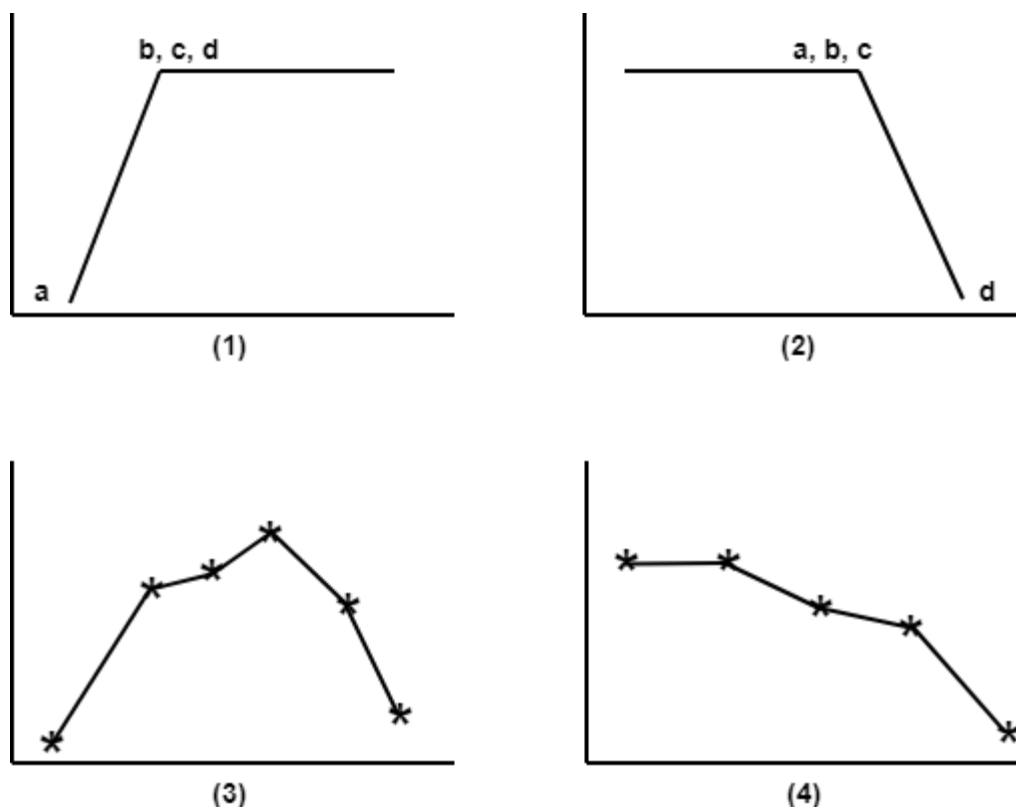


Figura 25. Funciones lineales, creciente (1) y decreciente (2), puntos de inflexión (a, b, c, d); funciones determinadas por el usuario (3 y 4), puntos de control (*). Fuente: Eastman, (2009)

Restricciones: Las restricciones son alternativas binarias, donde el valor 0 indica todas las zonas excluidas del análisis y el 1 que corresponde al lugar candidato para desarrollar la actividad a simular. En esta investigación, para la creación de los mapas de restricciones se consideraron como limitantes base para el diseño del modelo de simulación geoespacial a algunos factores, con el objetivo de impedir que sobre estos se desarrolle alguna transformación.

Mapas de aptitud: Una vez que se obtuvieron cada uno de los factores ponderados y normalizados, se utilizó la SLP (Ec. 16), para conseguir una evaluación de las alternativas para cada objetivo dentro del escenario, es decir, se utilizó esta técnica para obtener el mapa de aptitud de deforestación y el mapa de aptitud de reforestación. Esta técnica de SLP se generó sumando el resultado de multiplicar el valor individual del pixel de cada factor normalizado, por el peso final que se le asignó a ese mismo factor, mediante la siguiente ecuación:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij} \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde: r_i es el nivel de adecuación de la alternativa i ; w_i es el peso del factor j ; y v_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i del factor j .

Después de conseguir los mapas de impacto se multiplicaron por las restricciones antes generadas, luego se realizó una clasificación de los píxeles, de mayor aptitud a menor aptitud en cada uno de los mapas de aptitud, para poder realizar una operación espacial y seleccionar la cantidad de píxeles con mayor aptitud en cada uno de los mapas antes mencionados, cabe destacar que la cantidad de píxeles seleccionados para determinar los mapas de aptitud final están en función de la demanda de uso de suelo antes mencionada. De esta manera se obtuvieron los mapas de aptitud final para deforestación y reforestación.

Asignación Multi-Objetivo: Finalmente, con los dos mapas de aptitud del modelo de simulación geoespacial (deforestación y reforestación), se realizó una asignación de tipo Multi Objective Land Allocation (MOLA), asumiendo que algunas coberturas de deforestación y reforestación compiten por el territorio óptimo; en otras palabras, se utilizó el análisis multiobjetivo para resolver problemas de conflictos entre los objetivos. La función MOLA, reclasifica repetidamente los mapas de impacto evaluados para realizar una asignación de primer paso, verifica los conflictos y después asigna los conflictos basándose en una regla de distancia mínima al punto ideal empleado los valores ponderados. El objetivo con un peso mayor cumplirá su meta de superficie en primer lugar, es decir, si dos objetivos compiten por el mismo grupo de píxeles, el objetivo con el peso más alto se quedará con él.

6.2.2.5. Indicadores cualitativos

En esta última parte se tomó la cartografía de USyV del año 2014, la cual se homogenizó y reclasificó en 29 categorías en función del Inventario Nacional de Gases Efecto invernadero de México (INECC & CONAFOR, 2015), la cual se intersectó con el modelo de simulación geoespacial resultante para determinar dentro de cuales coberturas de uso de suelo y vegetación se desarrolló la deforestación y la reforestación, los cuales se traducen a indicadores de cambio. Posteriormente, el siguiente indicador fue la estimación del balance de carbono, en función de las pérdidas (emisión) y ganancias (absorción) de Carbono, correspondiente a biomasa viva y raíces, lo cual se determinó mediante la multiplicación

de la cobertura de deforestación o reforestación por su factor de emisión/absorción en Toneladas de Carbono (Ton/C), y a partir de esta información se generaron los mapas de balance de Carbono para los periodos 2014-2030 y 2014-2050.

6.3. Resultados

6.3.1. Detección de cambios

La reclasificación de los mapas de Uso de Suelo y Vegetación de 2002 y 2014 con leyendas de *Bosque* y *No bosque*, permitió conocer la cantidad de bosque que tenía la Cuenca del Pacífico Norte para dichos años, en este sentido, se puede comentar que para el año 2002 la cuenca conservaba una superficie de bosque de 98,844.23 Km² y para el 2014 de 97,452.01 Km², lo que representó el 65.02% y 64.10% respectivamente de la cuenca. En la figura 26 se puede visualizar la distribución de los bosques en el 2002 y 2014 dentro de la cuenca, estos se localizaron principalmente en el centro y a largo de la cuenca.

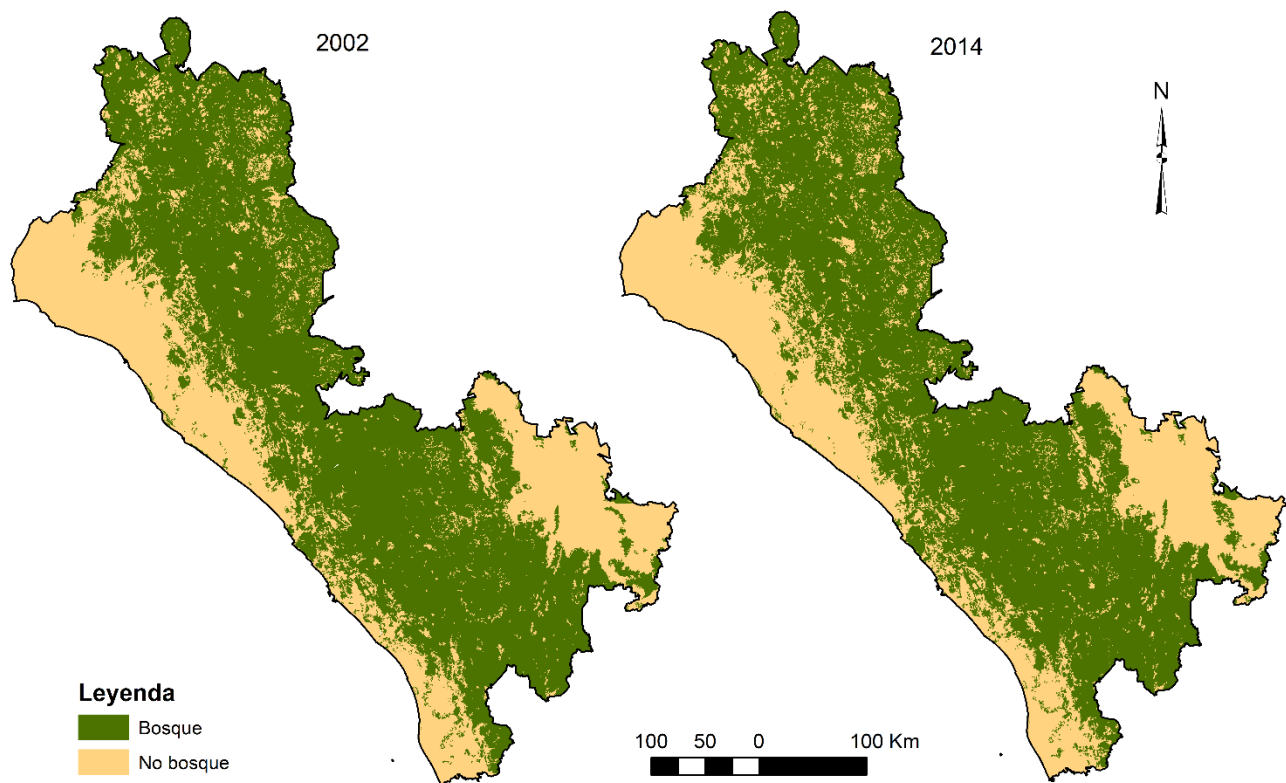


Figura 26. Mapas de cobertura de bosque de los años 2002 y 2014.

El resultado de la detección de cambios de la cobertura forestal anteriormente comentada originó las áreas deforestadas y reforestadas durante el periodo 2002 y 2014. Las áreas deforestadas obtuvieron una superficie de 3,840.55km² que representó el 3.88% de la superficie de bosques en el año 2002, estas se ubicaron en toda la cuenca, más específicamente en la parte central y sur de la misma. Mientras que las áreas reforestadas obtuvieron una superficie de 2,596.72km², que representó el 2.66% de la cobertura de bosque en el año 2002, estas se ubicaron específicamente en la parte norte y suroeste de la misma (Figura 27).

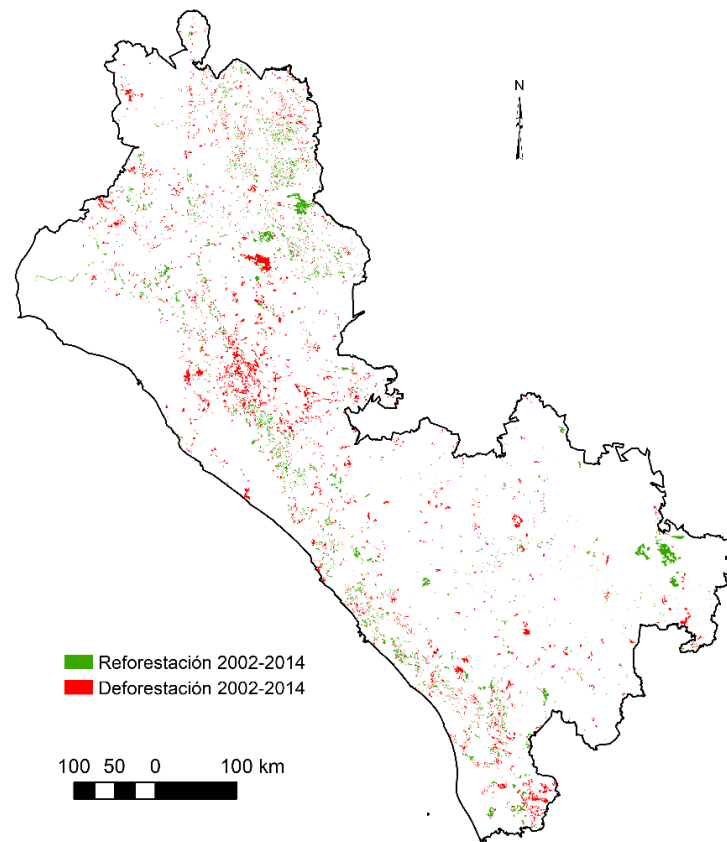


Figura 27. Cartografía de deforestación y reforestación 2002-2014.

6.3.2. Demanda de uso de suelo

A partir de las superficies de cobertura de bosque se diseñó un modelo de demanda, mediante el ajuste de una función polinómica de 3^{er} orden. Dicha función se ajustó al 0.99% de los datos y nos permitió realizar la extrapolación de la superficie de bosque al 2030 y 2050 (figura 28). En este sentido, la cobertura del bosque para el año 2030 será de 98,713.52 km² y de 101,239.8 km² para el año 2050 (Tabla 17).

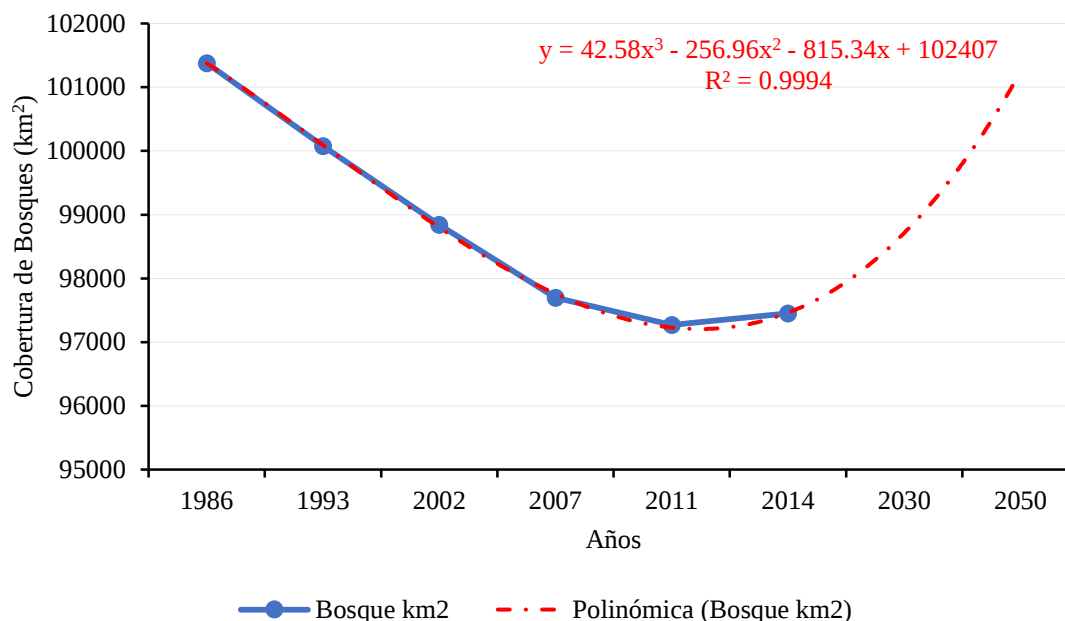


Figura 28. Comportamiento del bosque.

A partir de la superficie de bosque en 2030 y 2050 se obtuvo la deforestación y reforestación de futuro. Para lo cual se analizó la deforestación y la reforestación para los periodos 1986-1993, 1993-2002, 2002-2011 y 2011-2014, mediante la aplicación de la técnica de detección de cambios. Espacialmente estos se pueden detallar en la figura 29, en la cual se interpreta que los procesos de deforestación para estos periodos se dieron en mayor proporción que los procesos de reforestación, ambos procesos variaron espacial y temporalmente en cada periodo, lo que nos indica la complejidad de los procesos estudiados.

Tabla 17. Cobertura de los bosque, deforestación y reforestación de la Cuenca Pacifico Norte

Periodo	Año	Bosque km²	Deforestación km²	Reforestación km²	Deforestación promedio anual km²	Reforestación promedio anual km²
	1986	101378.744				
1 (1986-1993)	1993	100075.291	5537.539	4234.086	791.077	604.869
2 (1993-2002)	2002	98844.236	2645.140	1414.085	293.904	157.121
3 (2002-2007)	2007	97696.281	2617.308	1469.354	523.462	293.871
4 (2007-2011)	2011	97269.517	803.263	376.499	200.816	94.125
5 (2011-2014)	2014	97452.020	1032.442	1214.944	344.147	404.981
6 (2014-2030)	2030	98713.52	1840.000	3101.500	115.000	193.840
7 (2030-2050)	2050	101239.8	1900.000	4426.280	95.000	221.314

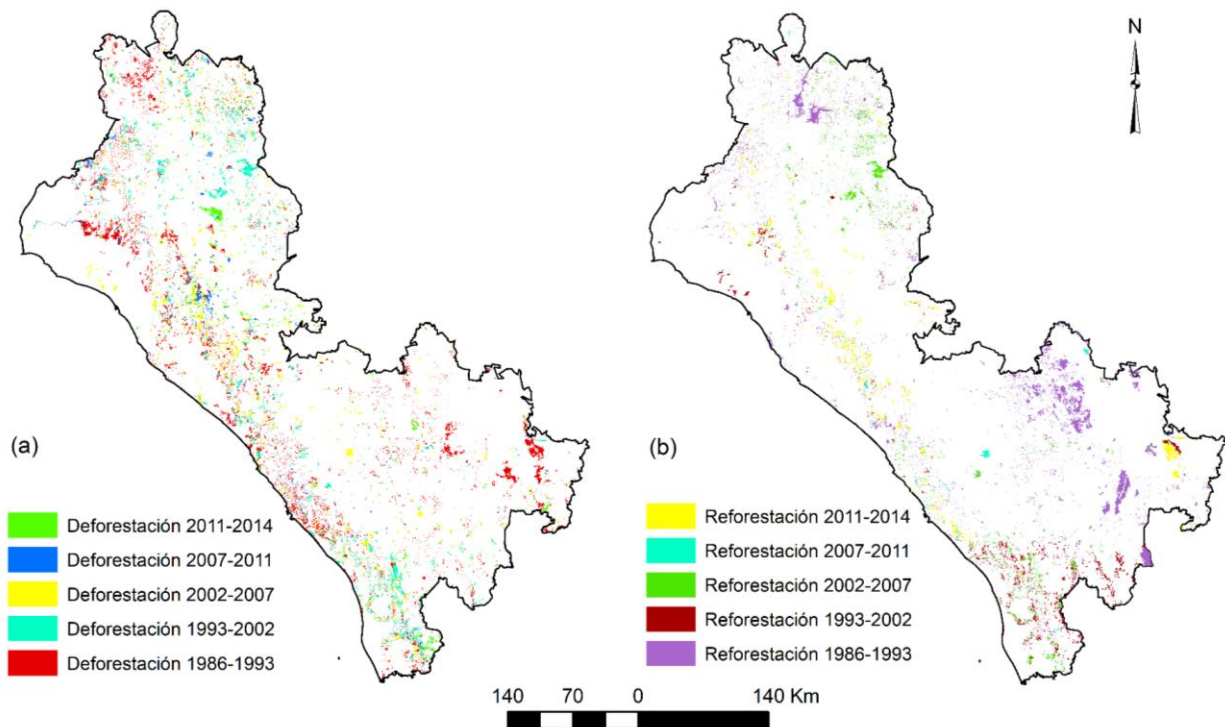


Figura 29. Cartografía de deforestación (a) y reforestación (b).

Numéricamente, se puede observar en la tabla 8, la superficie de bosque para los años analizados, se puede detallar como ha sido el proceso de disminución del bosque en la cuenca, ya que para 1986 tenía 101,378.74 Km² mientras que para el 2014 había 97,452.02 Km². Con respecto a los procesos de deforestación y reforestación, se puede comentar que la deforestación es superior a la reforestación, de estos periodos el que presentó la mayor cantidad y mayor promedio de deforestación y reforestación fue el periodo 1986-1993 y el que presentó menor cantidad y el menor promedio de deforestación y reforestación fue el periodo 2007-2011.

Por lo tanto, en la figura 30, se observa cómo la cobertura de bosque para el año 2050 se equilibra ante el año de 1986, a través de la función polinómica de 3^{er} grado, determinando que los promedios anuales de deforestación y reforestación disminuyen, pero la reforestación promedio anual para los periodos 2014-2030 y 2030-2050 son mayor que la deforestación promedio anual en un 62.75% y 69.96%, respectivamente. Ya que unas de las metas prioritarias del Programa Nacional Forestal es

reducir las tasas de deforestación a más del 50% y aumentar los programas de reforestación para el año 2030 y por ende al 2050.

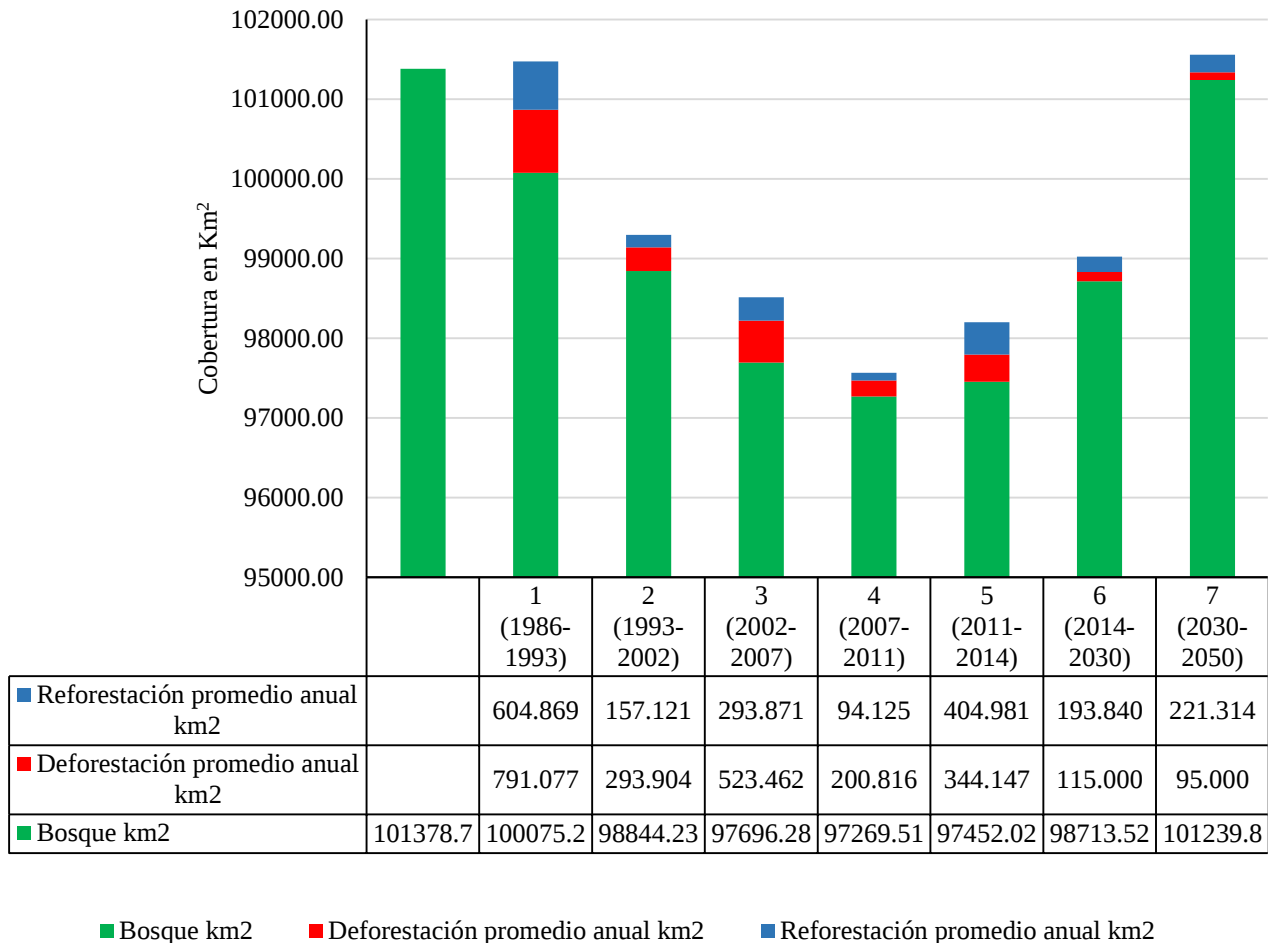


Figura 30. Promedio anual de deforestación y reforestación y cobertura de bosques

6.3.3. Ponderación de criterios y factores

Los resultados de la ponderación de los criterios y factores asignados mediante la consulta a expertos y la revisión bibliográfica, se resumen en la tabla 18, en estas se identifican el peso de los criterios (W_c) el cual se le asignó 0.5 a las biofísicas, 0.35 a la proximidad y 0.15 a las socioeconómicas; mientras que el peso de los factores (W_i), por ejemplo, para los socioeconómicos fue de 0.6 para el

índice de marginación y 0.4 densidad de la población, a estos valores fueron multiplicados por el peso de los criterios y originó el peso final (W_j), de 0.09 y 0.06 respectivamente.

Tabla 18. Ponderación de criterios y factores.

Criterios	W _c	Factores	Def	Ref	Def	Ref
			W _i	W _i	W _j	W _j
Socioeconómicas	0.15	Densidad de población	0.4	0.4	0.06	0.06
		Índice de marginación	0.6	0.6	0.09	0.09
		Σ	1	1		
Biofísicas	0.5	Altitud	0.2	0.09	0.1	0.045
		Pendiente	0.25	0.11	0.125	0.055
		Producción forestal	0.3	0.14	0.15	0.07
		Tipos de suelo	0.1	0.07	0.05	0.035
		Usos de suelo y vegetación	0.15	0.2	0.075	0.1
		Bosques degradados		0.17		0.085
		Áreas para restauración		0.22		0.11
		Σ	1	1		
Proximidad	0.35	Distancia a agricultura	0.28	0.2	0.098	0.07
		Distancia a pastizales	0.23	0.3	0.0805	0.105
		Distancia a áreas naturales protegidas	0.15	0.15	0.0525	0.0525
		Distancia a hidrografía	0.07	0.1	0.0245	0.035
		Distancia a carreteras	0.1	0.07	0.035	0.0245
		Distancia a localidades con menor de 2500 habitantes	0.17	0.18	0.0595	0.063
		Σ	1	1	1	1

Def=Deforestación; Ref= Reforestación; W_c =Peso del criterio; W_i = Peso del factor; W_j = Peso final del factor

Los resultados de la ponderación de las categorías para los factores tipos de suelo, usos de suelo y vegetación, bosques degradados y áreas para restauración, realizados mediante el MJA de Saaty, se muestran en la tabla 19, en esta se señala, el valor numérico asignado a cada categoría, la matriz de comparación por pares y el peso que posee cada categoría, la cual fue obtenido mediante la opinión de expertos (Pineda-Jaimes *et al.*, 2010) y su intersección con los objetivos deforestación y reforestación, de igual manera, se señala el coeficiente de consistencia c, quien obtuvo mayor valor para el factor tipo del suelo con 0.03. Es importante indicar que el único factor que sus clases se ponderaron dos veces con pesos diferentes fue el de usos de suelo y vegetación, ya que los pesos de sus categorías cambian respecto al objetivo a modelar.

Tabla 19. Matrices de comparación por pares.

Reclasificación según grado de idoneidad		Matriz de comparación por pares de Saaty								
Ocupación y uso de suelo (ET)	Valor reclasificado	Tipos	1	2	3	4	5	6	7	Pesos
Bosque	1	1	1							0.3543
Agricultura	2	2	1/2	1						0.2399
Pastizal	3	3	1/3	1/2	1					0.1587
Asentamientos humanos	4	4	1/4	1/3	1/2	1				0.1036
Otras tierras	5	5	1/5	1/4	1/3	1/2	1			0.0676
Matorral	6	6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1		0.0448
Otros tipos de vegetación	7	7	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0.0312
Relación de consistencia = 0.02										
Ocupación y uso de suelo (ES)	Valor reclasificado	Tipos	1	2	3	4	5	6	7	Pesos
Pastizal	1	1	1							0.3543
Matorral	2	2	1/2	1						0.2399
Agricultura	3	3	1/3	1/2	1					0.1587
Otras tierras	4	4	1/4	1/3	1/2	1				0.1036
Otros tipos de vegetación	5	5	1/5	1/4	1/3	1/2	1			0.0676
Bosque	6	6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1		0.0448
Asentamientos humanos	7	7	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0.0312
Relación de consistencia = 0.02										
Tipos de suelo (ET; ES)	Valor reclasificado	Tipos	1	2	3	4	5	6	7	Pesos
Phaeozem	1	1	1							0.352
Regosol	2	2	1/2	1						0.2393
Leptosol	3	3	1/3	1/2	1					0.1583
Luviosol	4	4	1/4	1/3	1/2	1				0.1033
Cambisol	5	5	1/5	1/4	1/3	1/2	1			0.0713
Vertizol	6	6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1		0.444
Otros tipos de suelo	7	7	1/7	1/6	1/5	1/4	1/4	1/2	1	0.0302
Relación de consistencia = 0.03										
Bosques degradados (ES)	Valor reclasificado	Tipos	1	2	3	4	5	6		Pesos
Selva subcaducifolia primaria a secundaria	1	1	1							0.3825
Selva caducifolia primaria a secundaria	2	2	1/2	1						0.2504

Selva perennifolia primaria a secundaria	3	3	1/3	1/2	1				0.1596
Bosque mesófilo de montaña primario a secundario	4	4	1/4	1/3	1/2	1			0.1006
Bosque de encino primario a secundario	5	5	1/5	1/4	1/3	1/2	1		0.0641
Bosque coníferas primario a secundario	6	6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0.0428
Relación de consistencia = 0.02									
Áreas para restauración (ES)	Valor reclasificado	Tipos	1	2	3	4	5		Pesos
Terrenos forestales con degradación alta	1	1	1						0.4842
Terrenos preferentemente forestales	2	2	1/2	1					0.2465
Terrenos forestales con degradación media	3	3	1/4	1/2	1				0.1445
Terrenos forestales con degradación baja	4	4	1/6	1/3	1/2	1			0.0803
Terrenos forestales o preferentemente forestales degradados	5	5	1/9	1/5	1/4	1/2	1		0.0445
Relación de consistencia = 0.01									

6.3.4. Normalización de los factores y restricciones de las coberturas

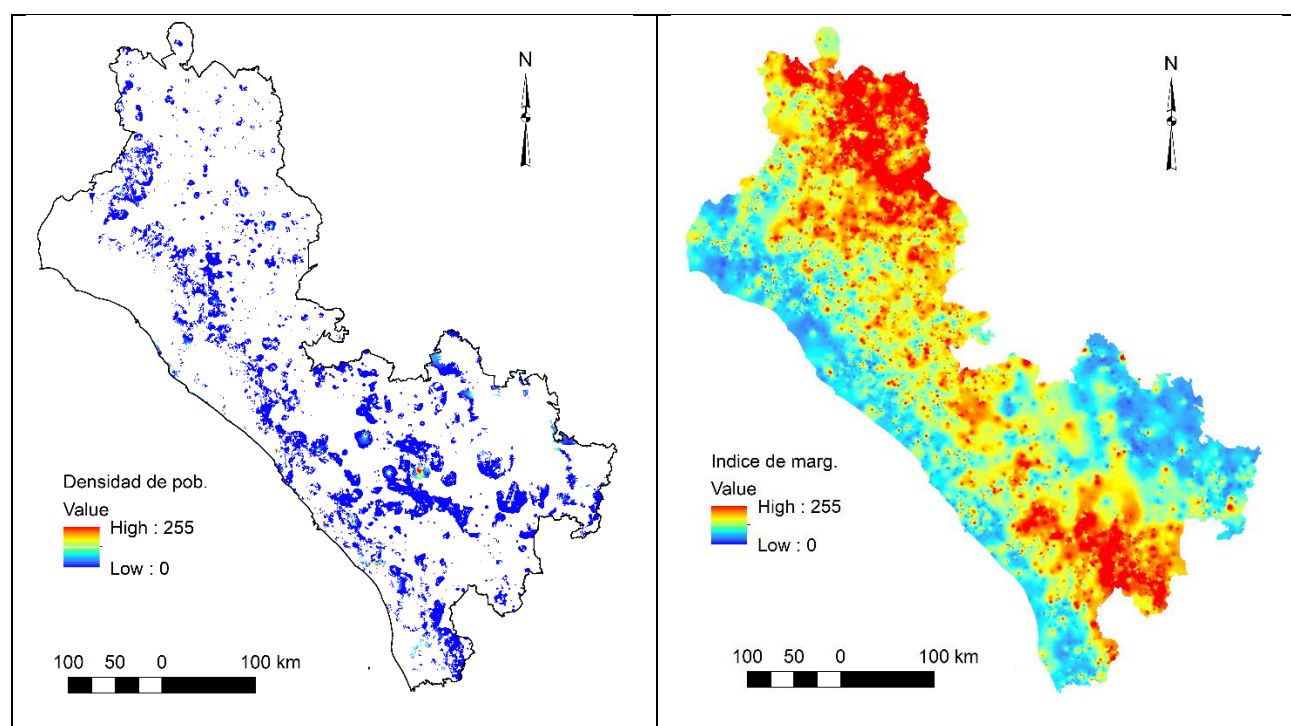
Con respecto a la normalización de los factores tenemos que se realizó utilizando lógica borrosa (fuzzy), con la función lineal creciente, lineal decreciente y definida por el usuario. La escala compatible entre todos los factores de todos los criterios para ambos objetivos del modelo de simulación geoespacial fue de 0 como valor mínimo normalizado y 255 como valor máximo normalizado, en la tabla 20, se detallan los factores con los valores mínimos y máximos originales, así como, la función aplicada para normalizar sus valores.

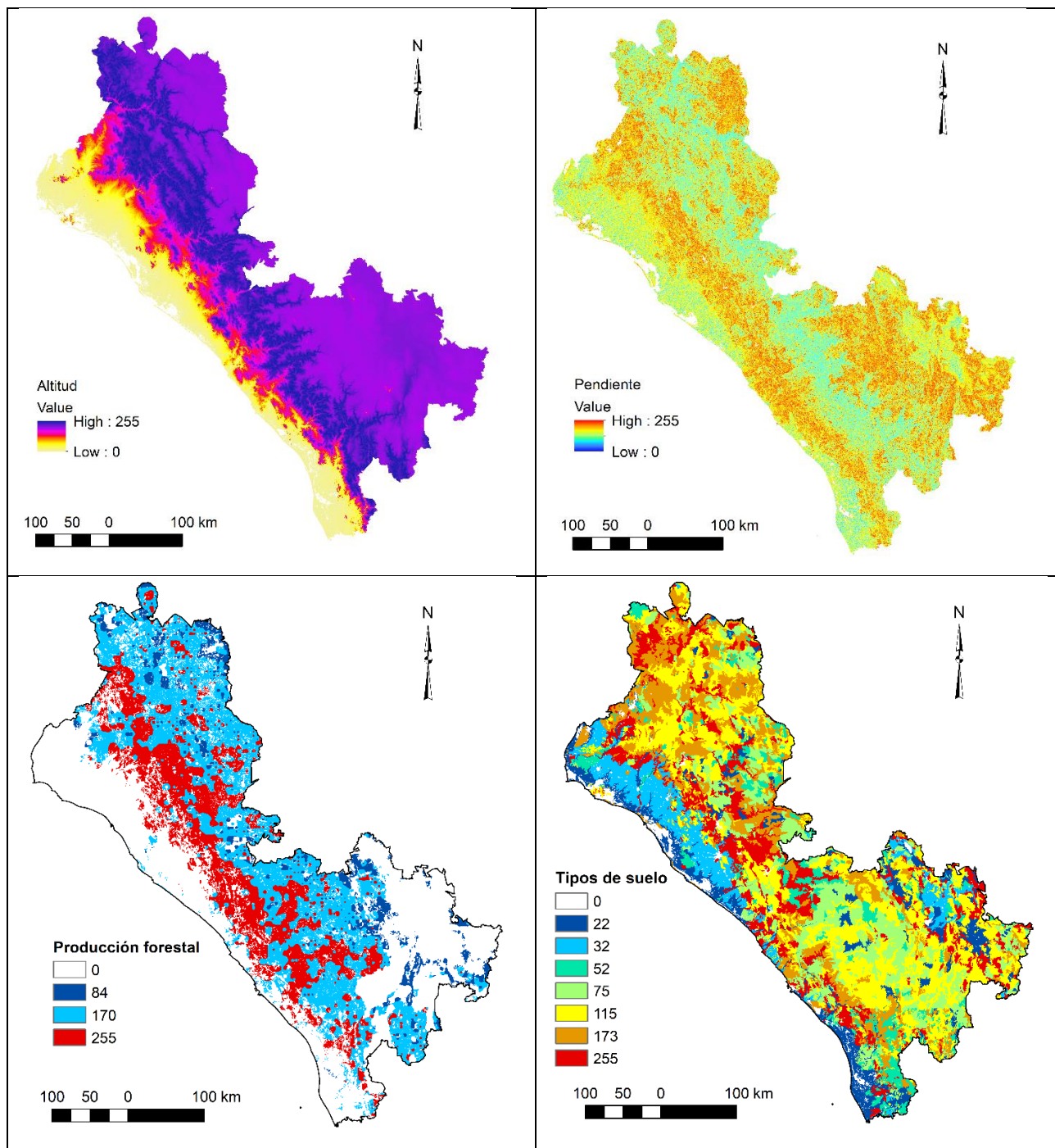
Tabla 20. Normalización de los factores.

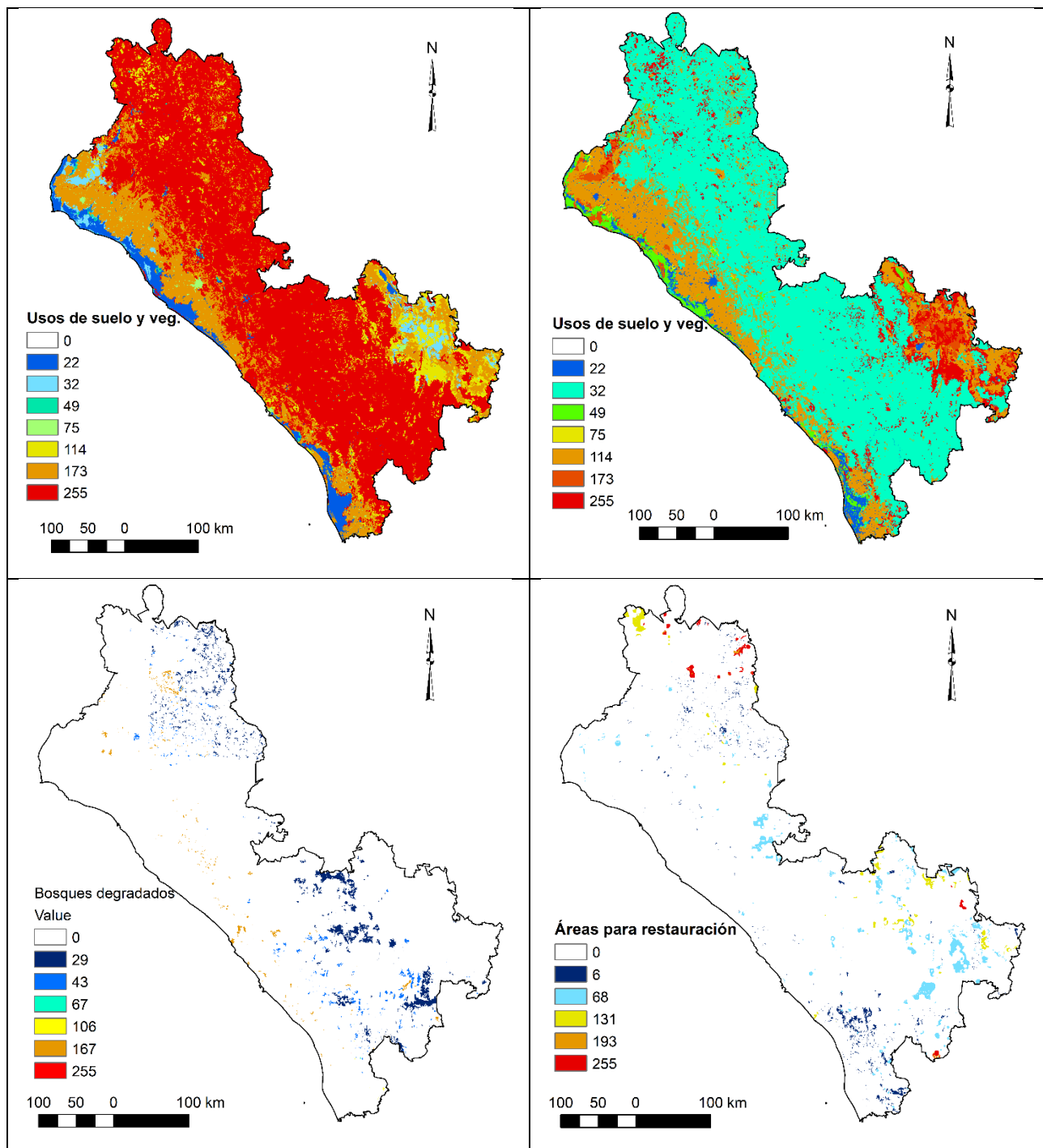
Factores	valor mínimo	valor máximo	Función	Valor mínimo normalizado	Valor máximo normalizado
Densidad de población	0	43355.67	Lineal creciente	0	255
Índice de marginación	0	60.93	Lineal creciente	0	255
Altitud	0	3308	Definida por el usuario	0	255
Pendiente	0	1149	Definida por el usuario	0	255
Producción forestal	0	3	Lineal creciente	0	255

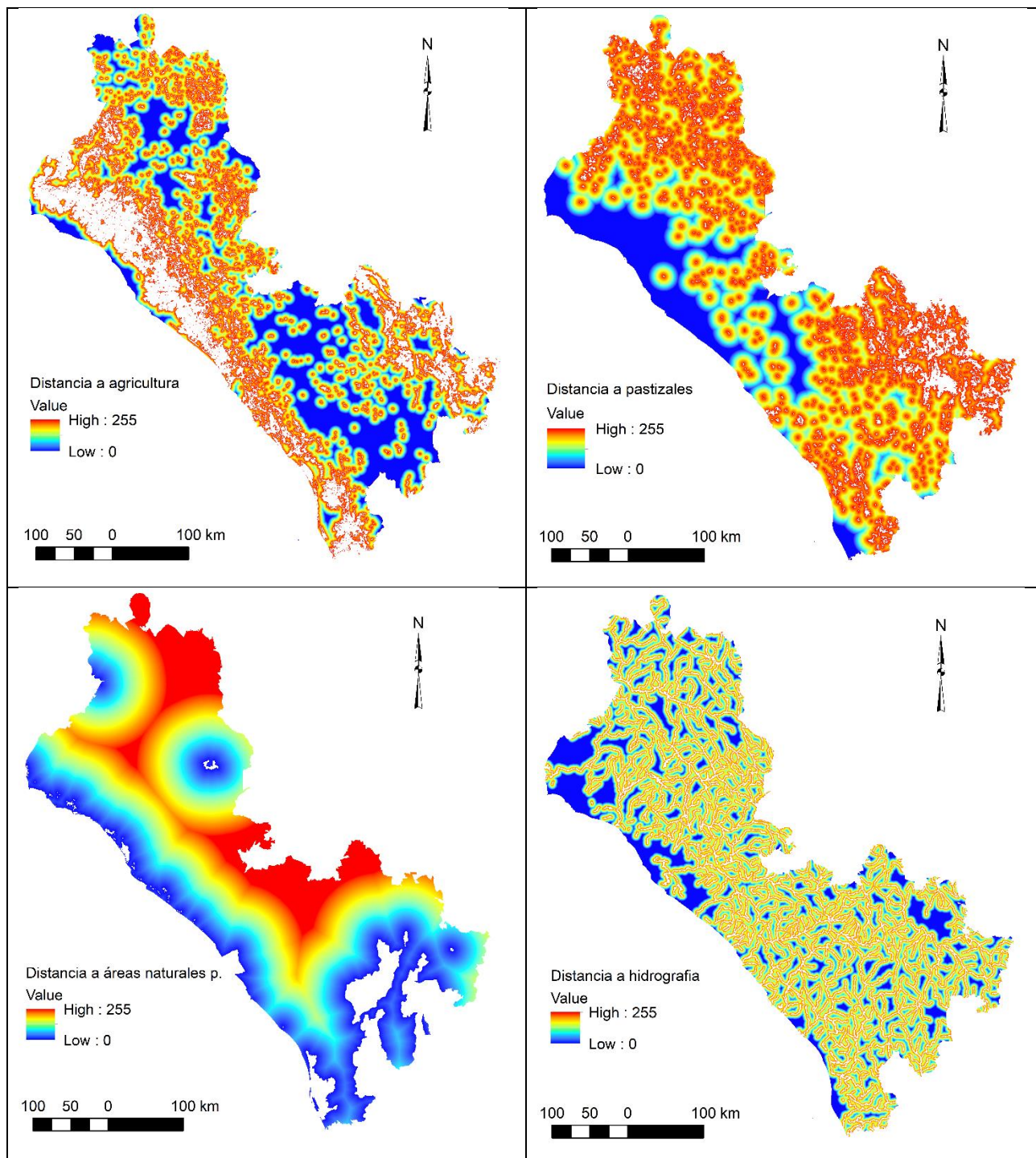
Tipos de suelo	0	7	Lineal creciente	0	255
Usos de suelo y vegetación	0	7	Lineal creciente	0	255
Bosques degradados	0	6	Lineal creciente	0	255
Áreas para restauración	0	5	Lineal creciente	0	255
Distancia a agricultura	0	30398.19	Lineal decreciente	0	255
Distancia a pastizales	0	65573.47	Lineal decreciente	0	255
Distancia a áreas naturales protegidas	0	160639.3	Lineal creciente	0	255
Distancia a hidrografía	0	40462.33	Lineal decreciente	0	255
Distancia a carreteras	0	34920.63	Lineal decreciente	0	255
Distancia a localidades con menor de 2500 habitantes	0	33224.39	Lineal decreciente	0	255

A continuación, se visualizan los 16 factores normalizados de 0 a 255, producto de la aplicación de la técnica lógica borrosa (Figura 31).









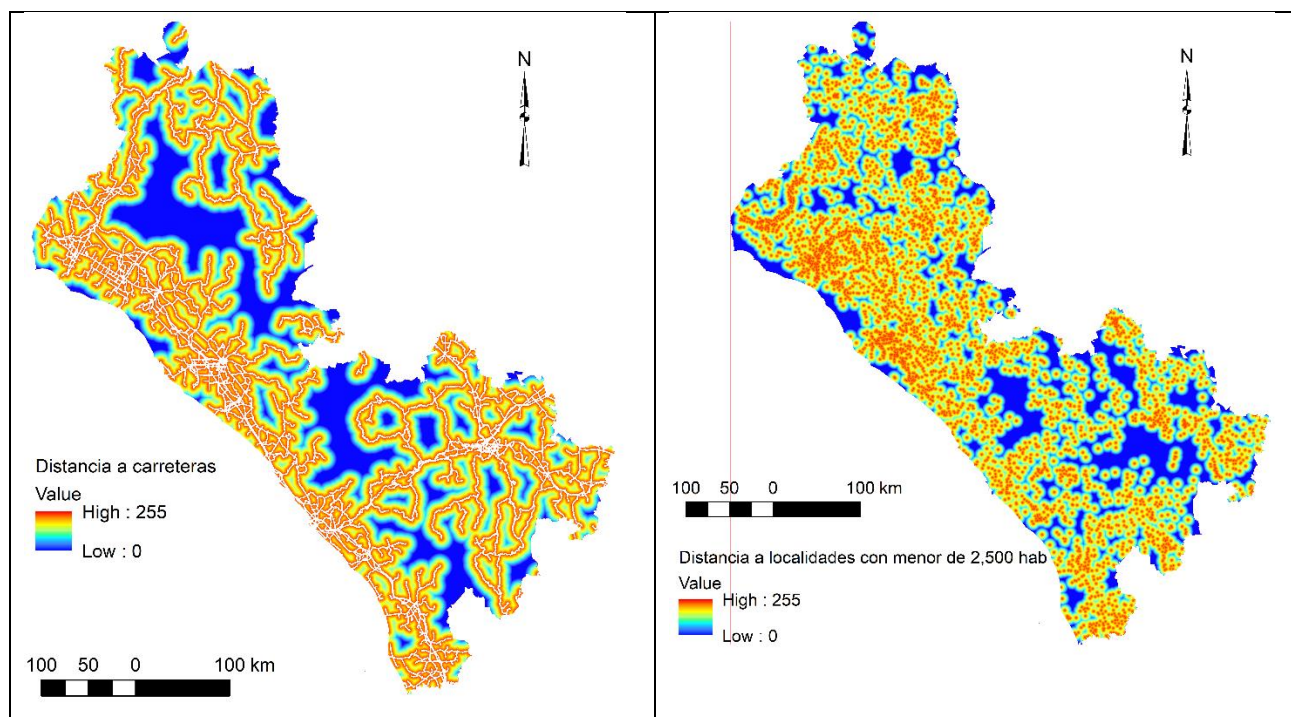


Figura 31. Factores normalizados

Con respecto a las restricciones, teniendo como base la capa de bosque y no bosque del 2014, se puede comentar que estas últimas fueron relacionadas con las coberturas de uso del suelo y los objetivos del modelo espacial. El valor del píxel varió en función de la cobertura, por ejemplo, los valores de las coberturas acuícolas, agricultura, agua y asentamientos humanos, fueron 0 para ambos objetivos; mientras, que la categoría bosque fue 1 para el objetivo deforestación y 0 para el objetivo reforestación; caso contrario la cobertura matorral que fue 0 para el objetivo deforestación y 1 para la reforestación (Tabla 21).

Tabla 21. Restricciones de las coberturas y usos del suelo para cada objetivo.

Restricciones de coberturas y usos del suelo	Deforestación Valor del píxel	Reforestación Valor del píxel
Acuícola	0	0
Agricultura	0	0
Agua	0	0
Asentamientos humanos	0	0
Bosque	1	0
Especial otros tipos de veg.	0	1
Matorral	0	1
Otras tierras	0	1

Pastizal	0	1
Vegetación hidrófila	0	0
Áreas para restauración	0	1
Bosques degradados	0	1
Hidrografía	0	0
Carreteras	0	0

Las restricciones de los objetivos se observan en la figura 32, donde la deforestación se acentuó en las áreas de bosques y la reforestación en las áreas de no bosque, bosques degradados y áreas para restauración.

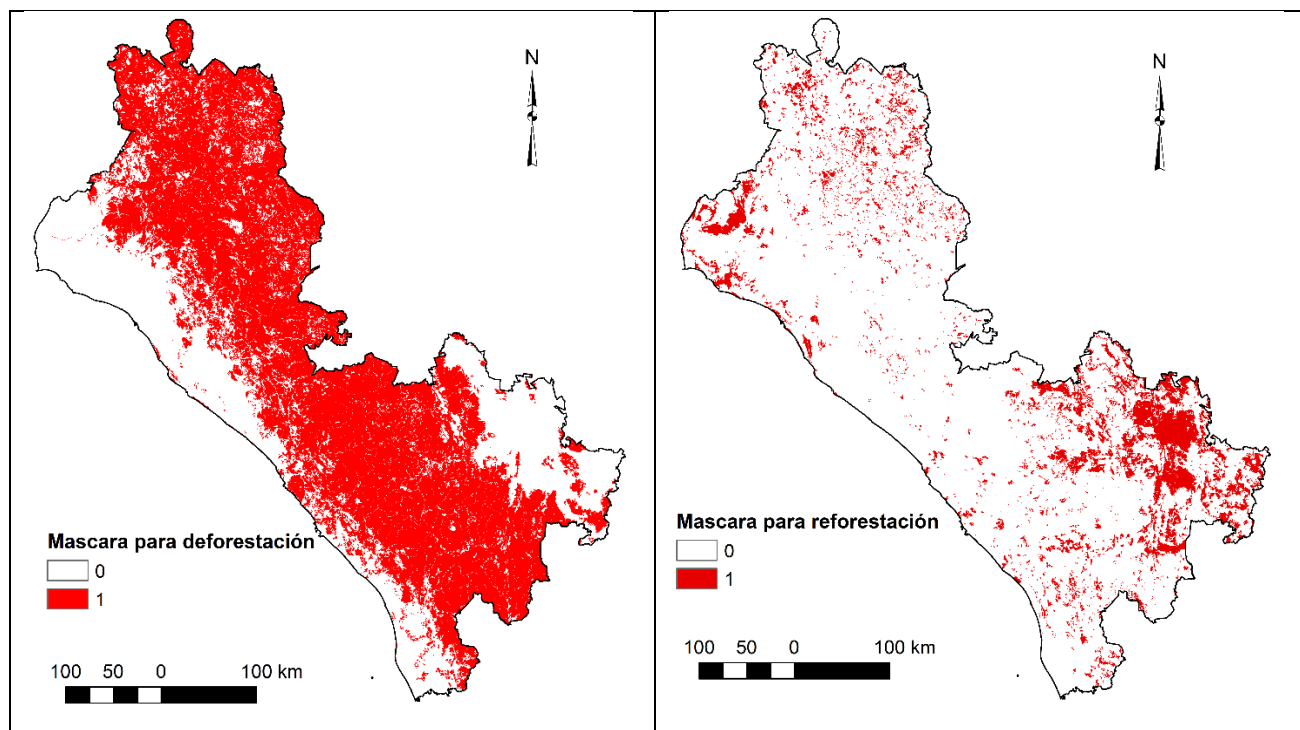


Figura 32. Restricciones para los objetivos de deforestación y reforestación.

6.3.5. Mapas de aptitud y asignación Multi-Objetivo

Una vez teniendo todos los factores ponderados y normalizados, así como, las restricciones definidas a cada uno de los objetivos, aplicamos la Sumatoria Lineal Ponderada al objetivo de deforestación y al de reforestación por separado. Posterior a ello, se multiplicaron las restricciones correspondientes a cada objetivo. De acuerdo con los resultados obtenidos en los mapas de aptitud para deforestación

y reforestación, se puede observar que el mayor nivel de aptitud para deforestar la presenta la parte noroeste de la cuenca, mientras sucede lo contrario para las zonas de reforestación (Figura 33).

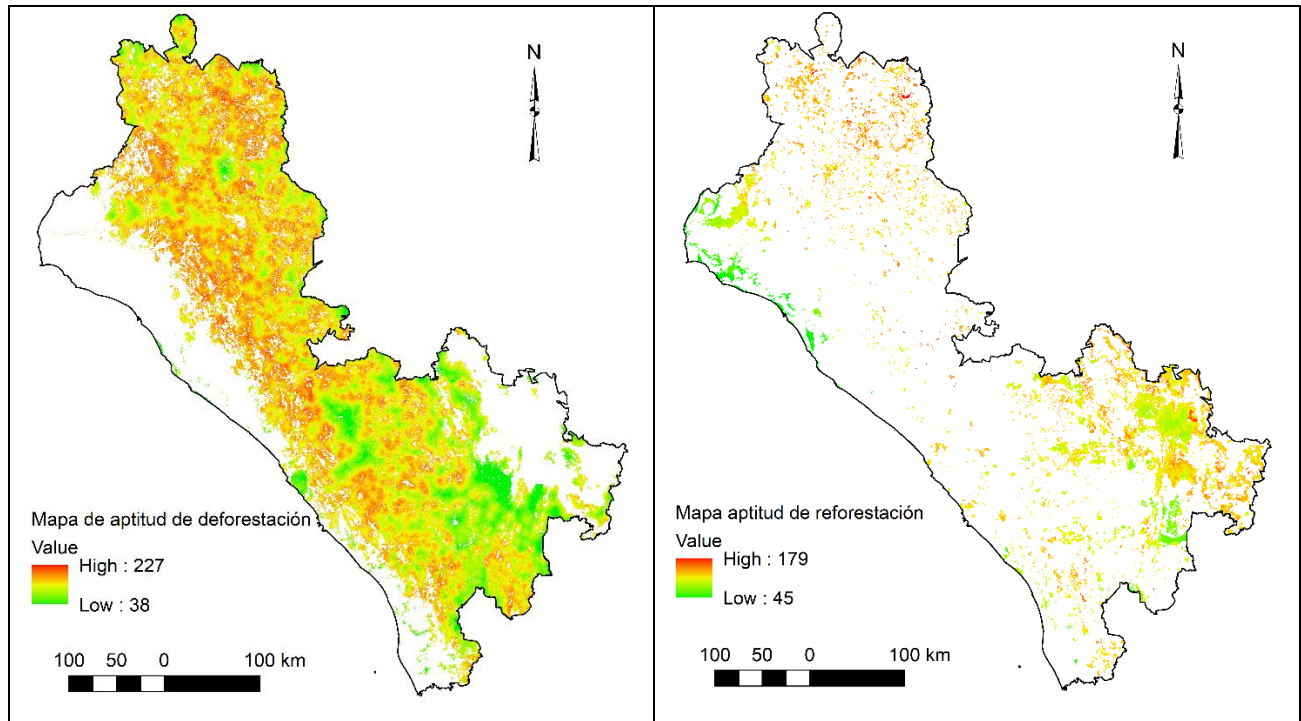


Figura 33. Mapas de aptitud para deforestación y reforestación.

Después, se realizó una clasificación (ranking) de cada uno de los objetivos resultantes (mapas de aptitud), y se empleó una asignación multiobjetivo con MOLA, para resolver posibles conflictos entre ellos, obteniendo de esta manera los escenarios planteados para los años 2030 y 2050, acorde a la demanda se superficie que se requiere para cada objetivo en cada una de las fechas planteadas (figura 34).

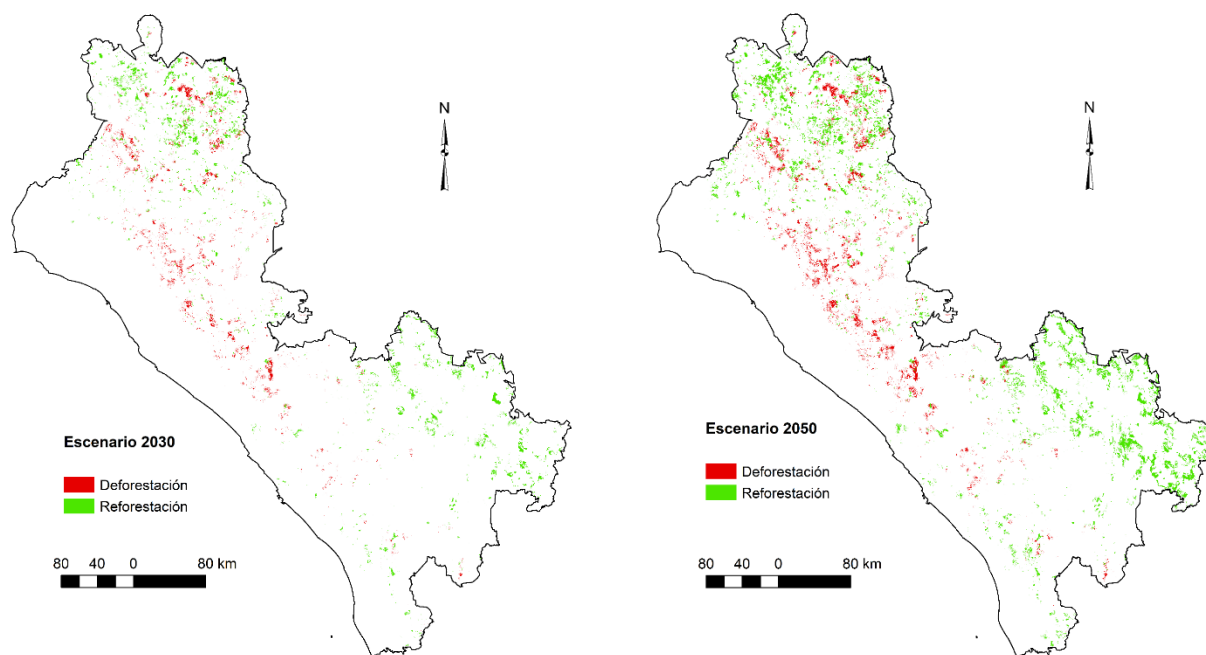


Figura 34. Modelo de simulación geoespacial de deforestación y reforestación para el año 2030 y 2050

6.4.6. Indicadores cuantitativos

Indicadores de cambio: Una vez obtenido el modelo de simulación geoespacial, se realizó un análisis de impacto sobre los usos de suelo y vegetación en la cuenca, que provocarían las perspectivas del modelo a hacia el futuro. En la figura 35 y en la tabla 22, se muestran los indicadores de cambio. Con respecto a la deforestación para el 2030, tenemos que se dará en las coberturas de selva caducifolia primaria, bosque de coníferas primario, selva caducifolia secundaria y el bosque de encino primario, con porcentajes de deforestación de 33.60%, 31.87%, 13.85%, y 10.37%, respectivamente. Asimismo, se tiene que la reforestación de 3,101.5 km² para el año 2030 se presentara con mayor impacto en las coberturas de pastizal, selva caducifolia secundaria y bosque de coníferas secundario, con porcentajes del 86.77%, 6.64% y 5.00%, constitutivamente.

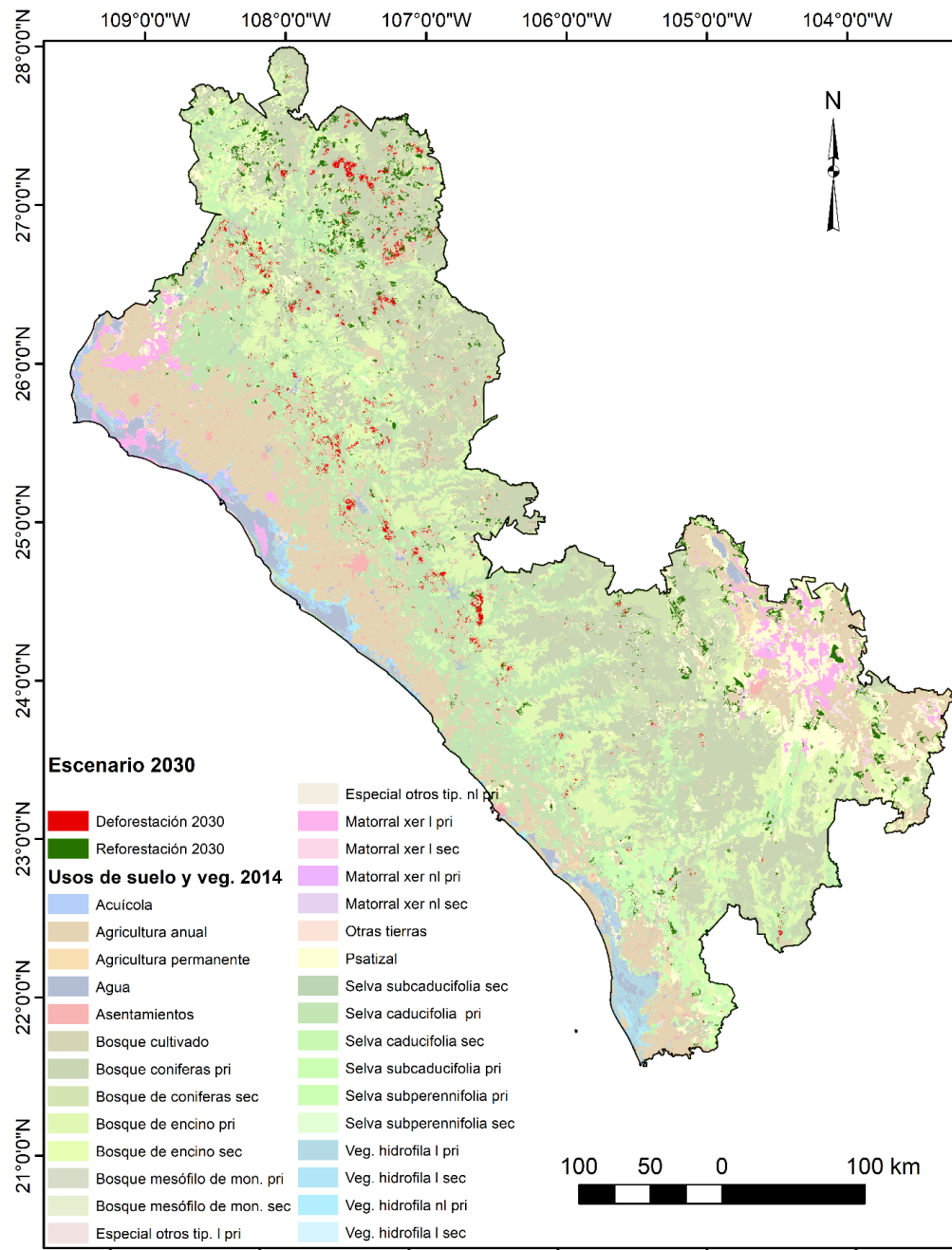


Figura 35. Impacto del modelo de simulación geoespacial al 2030 sobre las coberturas y usos de suelo

Respecto al escenario 2050 y la superficie que demanda la deforestación que es de 3,740 km², se indica en la figura 36, que las categorías con mayor importancia son la selva caducifolia primaria, bosque de coníferas primario, selva caducifolia secundaria y el bosque de encino primario, que reclaman el 36.35%, 29.35%, 14.00% y 10.73%, de manera constitutiva. Asimismo, la superficie para reforestación para este mismo modelo espacial es de 7,527.78 km², concentrándose en las categorías

de pastizal, bosque de coníferas secundario y selva caducifolia secundaria con un porcentaje de 83.85%, 8.22% y 5.45%, ordenadamente (Tabla 22).

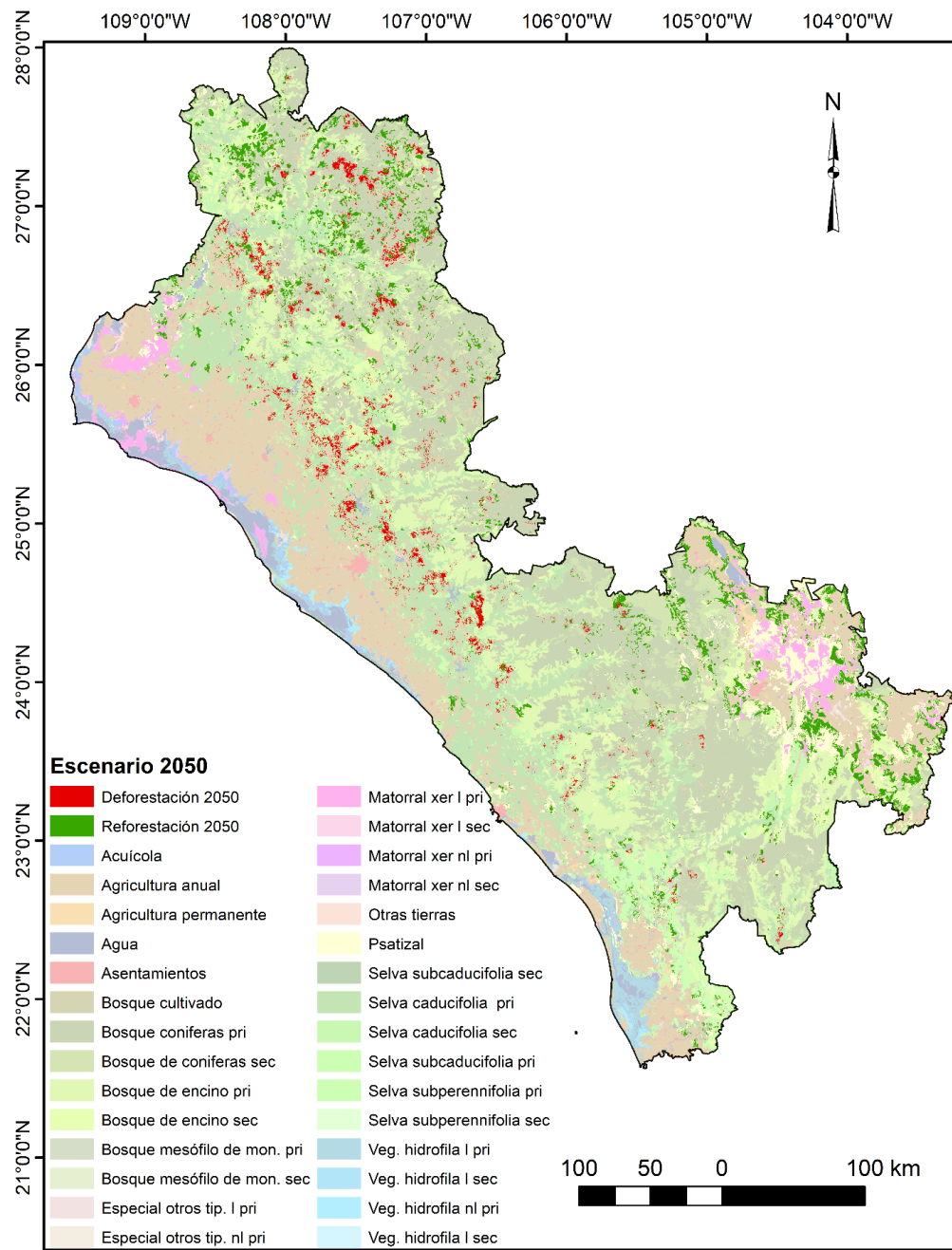


Figura 36. Impacto del modelo de simulación geoespacial al 2050 sobre las coberturas y usos de suelo

Igualmente en la tabla 22, también se indica el nivel de impacto positivo o negativo que puede ser el proceso de deforestación y reforestación desde el punto de vista ambiental. Ya cualquier tipo de

pérdida forestal es negativo, pero más negativo perder una cobertura de bosque primario a perder una cobertura de bosque secundario debido a la diferente cantidad de Carbono que se pierde. Y de la misma manera sucede con la reforestación, donde se indica de manera positiva, pero en este caso se le da un nivel de mayor positivismo a las coberturas de matorral y pastizal que pasaran a coberturas de cualquier tipo de bosque o selva.

Tabla 22. Impacto del modelo de simulación geoespacial sobre las coberturas y usos de suelo.

Categoría	Deforestación 2030 (km ²)	Reforestación 2030 (km ²)	Deforestación 2050 (km ²)	Reforestación 2050 (km ²)
Bosque de coníferas primario	587(- - -)		558(- - -)	
Bosque de encino primario	191(- - -)		204(- - -)	
Bosque mesófilo de montaña primario	3(- - -)		3(- - -)	
Matorral xerófilo leñoso primario		34(+ + +)		58(+ + +)
Pastizal		2691(+ + +)		3712(+ + +)
Selva caducifolia primaria	618(- -)		690(- -)	
Selva subcaducifolia primaria	24(- - -)		25(- - -)	
Selva subperennifolia primaria	3(- - -)		5(- - -)	
Otras tierras		2(+)		9(+)
Bosque de encino secundario	27(- - -)	9(+ +)	31(- -)	37(+ +)
Bosque de coníferas secundario	128(- - -)	155(+ +)	114(- - -)	364(+ +)
Matorral xerófilo leñoso secundario		3(+ +)		3(+ +)
Selva caducifolia secundaria	255(-)	206(+ +)	266(-)	241(+ +)
Selva subcaducifolia secundaria	3(- -)	1(+ +)	4(- -)	1(- -)
Selva subperennifolia secundaria	1(- - -)			
Total	1840	3101	1900	4425

* Negativo:(-) bajo, (- -) medio, (- - -) alto; Positivo: (+) bajo, (+ +) medio (+ + +) alto

Balance de carbono: Posteriormente, se estimó el balance de carbono de la biomasa viva y raíces, respecto a las coberturas deforestadas y reforestadas de los escenarios planteados. Determinando que se perderán (emisión) 105,428 Toneladas de Carbono (Ton/C) por deforestación y se ganaran

(absorción) 121,628 Ton/C por reforestación para en el periodo 2014-2030, mientras que para el periodo 2030-2050 se emitirán 109,242 Ton/C y se absorberán 171,368 Ton/C (Tabla 23).

Tabla 23. Estimación de la pérdida y ganancia de Carbono en Biomasa viva y en Raíces

Categoría	Deforestación 2030		Reforestación 2030		Deforestación 2050		Reforestación 2050	
	Biomasa viva (Ton/C)	Raíces (Ton/C)	Biomasa viva (Ton/C)	Raíces (Ton/C)	Biomasa viva (Ton/C)	Raíces (Ton/C)	Biomasa viva (Ton/C)	Raíces (Ton/C)
Bosque de coníferas primario	25392.83	5535.26			24138.33	5261.79		
Bosque de encino primario	8819.17	2209.40			9419.43	2359.78		
Bosque mesófilo de montaña primario	300.00				300.00			
Matorral xerófilo leñoso primario			-524.56	-134.07			-894.84	-12659.43
Pastizal			81123.85	18017.96			111903.28	549129.84
Selva caducifolia primaria	25630.82	5982.56			28616.93	6679.55		
Selva subcaducifolia primaria	3253.72	748.13			3389.29	779.30		
Selva subperennifolia primaria	145.11	33.48			241.85	55.80		
Otras tierras			60.29	13.39			271.32	3605.13
Bosque de encino secundario	1306.75	335.51	435.58	111.84	1500.34	385.21	1790.73	3439.69
Bosque de coníferas secundario	3858.73	857.04	4672.69	1037.82	3436.68	763.30	10973.27	815.99
Matorral xerófilo leñoso secundario			12.67	3.05			12.67	
Selva caducifolia secundaria	16832.45	3875.73	13597.98	3130.98	17558.56	4042.92	15908.32	12289.46
Selva subcaducifolia secundaria	190.44	44.28	63.48	14.76	253.92	59.04	63.48	126.50
Selva subperennifolia secundaria	62.62	14.01					62.62	
Total	85792.64	19635.40	99441.97	22195.73	88855.33	20386.71	140090.84	1212231.25

Por último, como parte de este indicador, se generaron los mapas de balance de carbono, con base a los datos anteriormente descritos de la pérdida y la ganancia en captura de Carbono, que a su vez están referidos al modelo de simulación geoespacial de los años 2030 y 2050. Determinando con ello, la

distribución espacial de la pérdida de captura de Carbono por deforestación en las diferentes categorías, y de igual manera para la ganancia por reforestación (figura 37, 38).

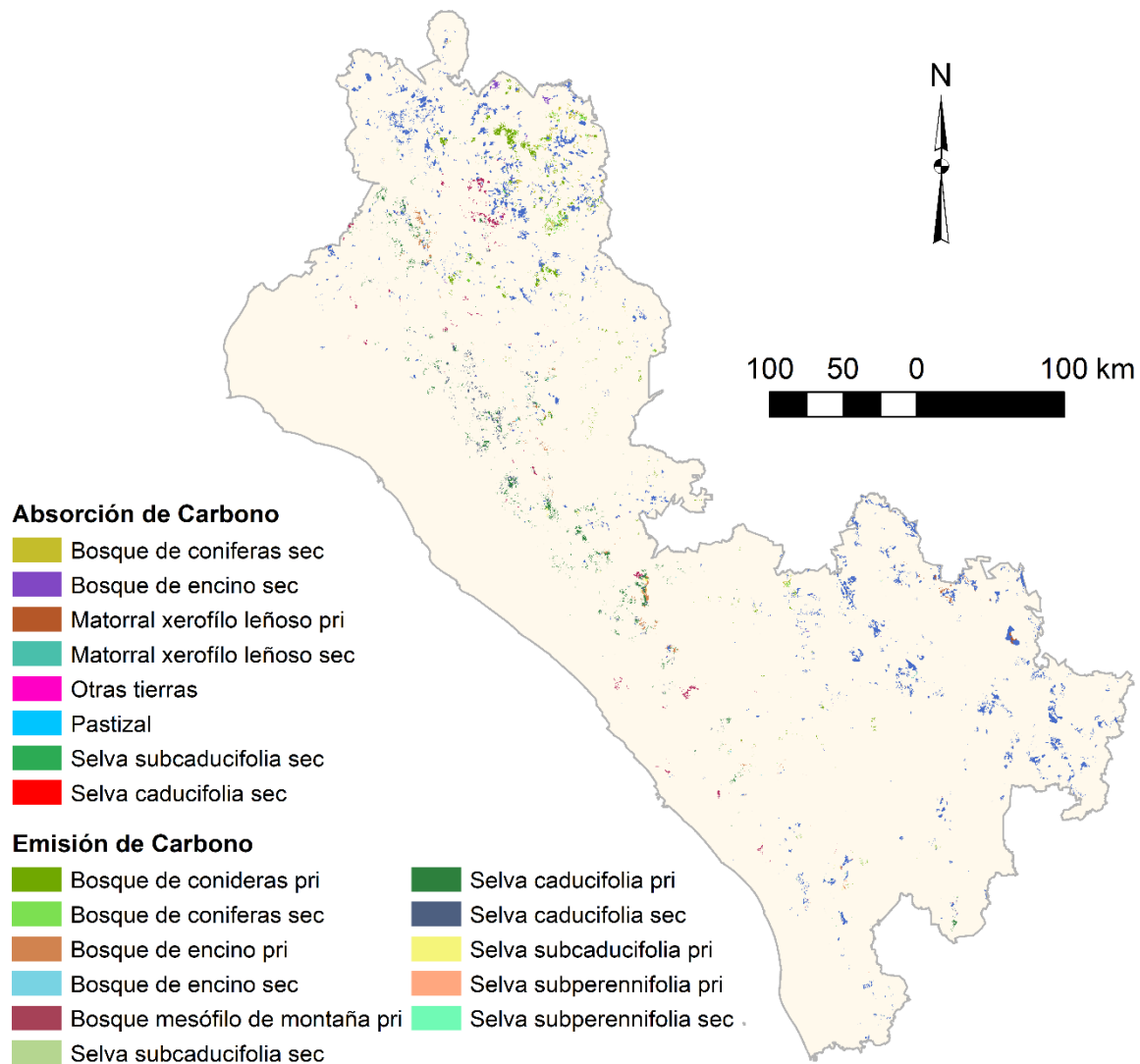


Figura 37. Mapa de balance de Carbono por deforestación y reforestación del periodo 2014-2030

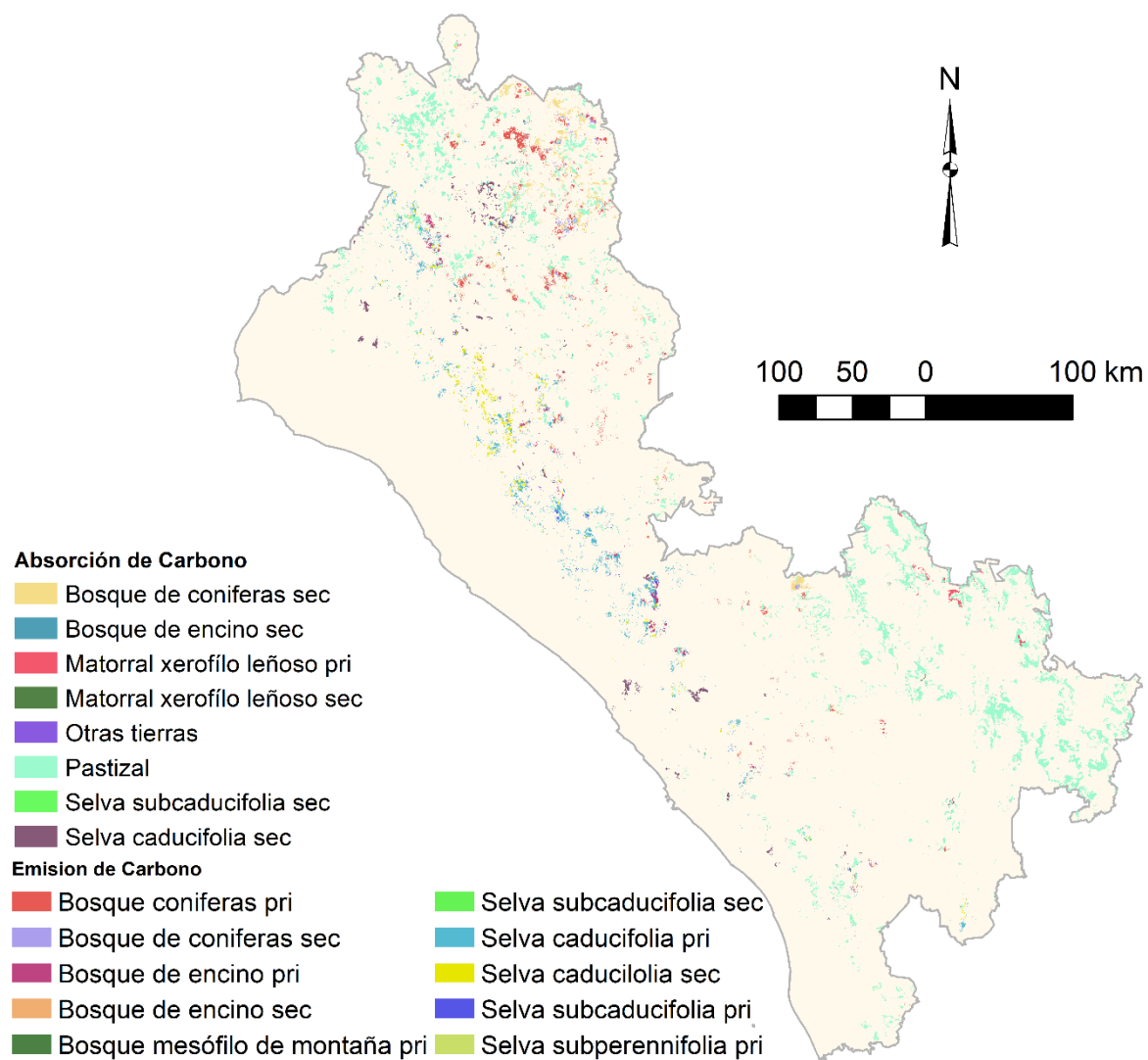


Figura 38. Mapa de balance de Carbono por deforestación y reforestación del periodo 2014-2050

6.5. Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que este tipo de estudios pueden contribuir de manera importante al manejo de los ecosistemas forestales, y de apoyo a la toma de decisiones, ya que aportan información sobre una aproximación del estado futuro de las coberturas forestales. Una de las principales conclusiones de este capítulo, fue haber simulado un modelo geoespacial a futuro que contempla unos de los procesos forestales más importantes dentro de los ecosistemas forestales, utilizando algunos aspectos metodológicos novedosos a la problemática forestal que enfrenta el territorio de la cuenca Pacífico Norte, México.

El modelo de simulación geoespacial hacia el año 2030 y 2050 indica que las áreas con mayor aptitud para que se presente la deforestación son las coberturas de selva caducifolia primaria, bosque de coníferas primario, selva caducifolia secundaria y el bosque de encino primario. Mientras, que las coberturas que presentan mayor aptitud para que se presente la reforestación son las coberturas de pastizales, selva caducifolia secundaria y bosque de coníferas secundario, lo cual determina que las simulaciones de los escenarios resultantes son lógicas. Por lo tanto, podemos afirmar que los métodos empleados ayudaron a generar información apreciable para resolver problemas de manejo forestal y plantear objetivos óptimos en esta directriz. Revelando, con esto que las técnicas de EMC fueron fundamentales para el desarrollo de los modelos.

Asimismo, el resultado de este modelo geoespacial nos permitió estimar la emisión y absorción de Carbono por los procesos de deforestación y reforestación en Biomasa Viva y en Raíces y a su vez se logró generar mapas de balance de Carbono. Por lo tanto, esta información generada sirve como indicadores para tomar decisiones importantes en el manejo, mitigación y planificación forestal, que están directamente relacionadas con el cambio climático a nivel local, regional y global.

Además, el modelo resultante, proporciona información importante sobre los potenciales impactos ambientales, territoriales y económicos que podría ocasionar la deforestación, como los beneficios que podría aportar el aumento de las cubiertas forestales, así como plantearse políticas de planificación y alternativas de desarrollo de un punto de vista más sustentables. Dentro de este contexto, hay que resaltar que las simulaciones se hacen a futuro, partiendo del año 2014 y con un horizonte al 2030 y 2050, utilizando variables espaciales ponderadas según el nivel de importancia que tengan en el planteamiento conceptual de cada escenario y factor, por tal razón, los resultados obtenidos deben ser tratados con atención, ya que no es posible realizar una validación con datos futuros.

Por otro lado es importante destacar que a pesar de la aparente sencillez de los módulos y programas informáticos utilizados, la simulación de los modelos requirió de un esfuerzo importante, sobre todo para definir los criterios y factores que deberían usarse para estructurar la base de datos geográfica, así como para normalizar y ponderar cada uno de los factores, pues este es un paso determinante para obtener buenos resultados. Ya que los escenarios futuros que contemplan aspectos forestales están bajo sistemas complejos que involucran cuestiones sociales y ecológicas interrelacionadas.

También, es necesario resaltar que el modelo de simulación geoespacial a futuro podría servir para discutir exhaustivamente sobre las ventajas y desventajas que pueden ocasionar los problemas de pérdida y ganancia de cobertura forestal en el territorio. Asimismo, el planteamiento metodológico seguido para la implementación de los escenarios planteados es factible de ser utilizado para generar otras líneas evolutivas que podrían ser propuestas por las instituciones involucradas en la planificación y manejo forestal. Además, la metodología planteada puede ser extrapolada a otros lugares y con objetivos diferentes, pudiendo involucrar nuevas variables que permitirán enriquecer los resultados obtenidos.

Por último, es importante resaltar que las coberturas forestales, cuando se manejan de manera responsable, contribuyen a una gran cantidad de servicios ambientales como la protección del suelo, el aumento de las masas de agua, rehabilitación de tierras degradadas, restauración de los paisajes, desarrollo del hábitat, captura de carbono, medicinas y alimentos, entre otros. Y por ello, es importante plantearse alternativas para mejorar el manejo forestal de una región, de las cuales este estudio es una de ellas.

6.6. Referencias

- Bax, V., Francesconi, W., & Quintero, M. (2016). Spatial modeling of deforestation processes in the Central Peruvian Amazon. *Journal for Nature Conservation*, 29, 79–88. <https://doi.org/10.1016/J.JNC.2015.12.002>
- Buizer, M., Humphreys, D., & De Jong, W. (2014). Climate change and deforestation: The evolution of an intersecting policy domain. *Environmental Science & Policy*, 35, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2013.06.001>
- CONAFOR. (2014). *Estrategia Nacional para REDD+*. Retrieved from http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/35/5559Elementos para el diseño de la Estrategia Nacional para REDD_.pdf
- de Barros Ferraz, S. F., Vettorazzi, C. A., Theobald, D. M., & Ballester, M. V. R. (2005). Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: assessment and future scenarios. *Forest Ecology and Management*, 204(1), 69–85. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2004.07.073>
- Eastman, J. R. (2009). *IDRISI Taiga Guide to GIS and Image Processing*. Retrieved from <http://web.pdx.edu/~nauna/resources/TaigaManual.pdf>
- FAO. (2016). *EL ESTADO DE LOS BOSQUES DEL MUNDO LOS BOSQUES Y LA AGRICULTURA: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i5850s.pdf>
- Franco-Prieto, C. A. (2011). *DESARROLLO DE UN MODELO BASADO EN ANÁLISIS ESPACIAL MULTICRITERIO*

- PARA LA DETERMINACIÓN DE UNIDADES DE ORDENACIÓN FORESTAL. CASO DEPARTAMENTO DEL CASANARE. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/5236/1/carlosandresfrancoprieto.2011.pdf>
- Gao, J., Gao, H., Zhou, C., & Zhang, X. (2017). The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 163, S148–S155. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.049>
- Henríquez, C., Azócar, G., & Aguayo, M. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile1. *Revista de Geografía Norte Grande*, (36), 61–74. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30003604>
- Henríquez, C., Azócar, G., & Romero, H. (2006). Monitoring and modeling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International*, 30(4), 945–964. <https://doi.org/10.1016/J.HABITATINT.2005.05.002>
- Houghton, R. . (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(6), 597–603. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2012.06.006>
- Hurtado-Pidal, J. (2014). *Análisis, modelamiento y simulación espacial del cambio de cobertura del suelo, entre las áreas naturales y las de origen antrópico en la provincia de Napo (Ecuador), para el período 1990-2020*. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/37479>
- INECC, & CONAFOR. (2015). *First Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change Executive Summary*. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Executive_Summary_1.pdf
- Jat, M. K., Garg, P. K., & Khare, D. (2008). Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(1), 26–43. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2007.04.002>
- Killeen, T., Villegas, Z., & Soria, L. (2004). *TENDENCIAS DE LA DEFORESTACION EN LOS MUNICIPIOS DE SAN JAVIER Y CONCEPCION, SANTA CRUZ - BOLIVIA*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Liliana_Soria/publication/228712759_TENDENCIAS_DE_LA_DEFORESTACION_EN_LOS_MUNICIPIOS_DE_SAN_JAVIER_Y_CONCEPCION_SANTA_CRUZ-BOLIVIA/links/02e7e515b31e2412c8000000.pdf
- Leija-Loredo, E., Reyes-Hernandez, H., Reyes-Perez, O., Flores-Flores, J., & Sahagún-Sánchez, F. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 22(1), 125–140. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712016000100125&script=sci_arttext&tlng=pt
- Mas, F.-J., Sorani, V., & Alvarez, R. (1996). Elaboración de un modelo de simulación del proceso de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 43–57. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/569/56909907.pdf>
- Mas, J.-F., & Flamenco, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*. Retrieved from http://www.geotropico.org/NS_5_1_Mas-Flamenco.pdf
- Mena, F. C. (1996). *Análisis del proceso de forestación artificial en la VII Región del Maule: un ejemplo modélico en la comuna de Empedrado*. Consejo de Universidades, Secretaría General. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=CIgeAgAAQBAJ&pg=PA281&lpg=PA281&dq=Análisis+del+proceso+d>

e+forestación+artificial+en+la+VII+Región+del+Maule:+un+ejemplo+modélico+en+la+comuna+de+Empredado
&source=bl&ots=gMYlbif_IV&sig=ACfU3U0Dd6hi3

- Mohebalian, P. M., & Aguilar, F. X. (2018). Design of tropical forest conservation contracts considering risk of deforestation. *Land Use Policy*, 70, 451–462. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2017.11.008>
- Nunes de Oliveira, S., Abílio de Carvalho Júnior, O., Trancoso Gomes, R. A., Fontes Guimarães, R., & McManus, C. M. (2017). Deforestation analysis in protected areas and scenario simulation for structural corridors in the agricultural frontier of Western Bahia, Brazil. *Land Use Policy*, 61, 40–52. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2016.10.046>
- Onilude, Q., Awosusi, B., & Ige, P. (2010). Climate Change and Biodiversity: Conservation. In *Biodiversity, Development Biodiversity, Development and Poverty Alleviation. Seminar Proceedings of Nigeria Tropical Biology Association (NTBA)* (pp. 122–126). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Matthew_Ogwu/publication/288331484_Conserving_Biodiversity_Even_in_Poverty_The_African_Experience/links/569b905808aeaa985a56b96/Conserving-Biodiversity-Even-in-Poverty-The-African-Experience.pdf#page=122
- Osorio, L. P., Mas, J.-F., Guerra, F., & Maass, M. (2015). Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México Analysis and modeling of deforestation processes: a case study in the Coyuquilla River Basin, 88, 60–74. <https://doi.org/10.14350/rig.43853>
- Overmars, K. P., & Verburg, P. H. (2006). Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines. *Agricultural Systems*, 89(2–3), 435–456. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2005.10.006>
- Panday, P. K., Coe, M. T., Macedo, M. N., Lefebvre, P., & Castanho, A. D. de A. (2015). Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 523, 822–829. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.02.018>
- Patel, M., & Rothman, D. S. (2007). Participatory scenario construction in land use analysis: An insight into the experiences created by stakeholder involvement in the Northern Mediterranean. *Land Use Policy*, 24(3), 546–561. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2006.02.005>
- Pineda Jaimes, N. B. (2010). *Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el estado de México mediante tecnologías de la información geográfica*. Universidad de Alcalá, España. Retrieved from <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/9705>
- Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Franco Plata, R. (2010). Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico (Mexico) using geographically weighted regression. *Applied Geography*, 30(4), 576–591. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2010.05.004>
- Rodríguez-Eraso, N. (2011). *Land-cover and land-use change and deforestation in Colombia: spatial dynamics, drivers and modelling. TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. Universitat Autònoma de Barcelona. Retrieved from <https://www.tesisenred.net/handle/10803/84004>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., ... Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(24), 9899–9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>

- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process : planning, priority setting, resource allocation*. New York; London: McGraw-Hill International Book Co. Retrieved from http://www.worldcat.org/search?qt=worldcat_org_all&q=0070543712
- Sahagún-Sánchez, F. J., Reyes-Hernández, H., Flores, J. L. F., & Vargas, L. C. (2011). Modelización de escenarios de cambio potencial en la vegetación y el uso de suelo en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí, México. *Journal of Latin American Geography*, 10, 65–86. <https://doi.org/10.2307/23209585>
- SEGOB. (2014). *Programa Nacional Forestal 2014-2018*. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342498&fecha=28/04/2014
- Singh, S., Reddy, C. S., Pasha, S. V., Dutta, K., Saranya, K. R. L., & Satish, K. V. (2017). Modeling the spatial dynamics of deforestation and fragmentation using Multi-Layer Perceptron neural network and landscape fragmentation tool. *Ecological Engineering*, 99, 543–551. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.11.047>
- Thapa, R. B., Shimada, M., Watanabe, M., Motohka, T., & Shiraishi, T. (2013). L-band SAR data and spatially explicit model to analyse forest loss between 2007 and 2030 in central Sumatra. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/6705022>
- Veldkamp, A., & Lambin, E. . (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1–3), 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2)
- Verburg, P. H., Overmars, K. P., Huigen, M. G. A., de Groot, W. T., & Veldkamp, A. (2006). Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. *Applied Geography*, 26(2), 153–173. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2005.11.005>

Capítulo VII. Conclusiones y futuras líneas de investigación

La presente tesis doctoral muestra por primera vez en la cuenca Pacífico Norte, México, un análisis del proceso de deforestación, el cual fue desarrollado en cada uno de los capítulos mediante un conjunto de métodos y técnicas que conformaron una metodología integral que permitió el estudio de los cambios de usos de suelos, las estimaciones de emisiones y absorciones de Carbono provocadas por deforestación, degradación, reforestación y recuperación natural, el estudio de los factores explicativos de la deforestación mediante la combinación de las técnicas de consulta a expertos y un modelo de Regresión Logística Espacial (RLE), y la generación de dos escenarios de deforestación mediante técnicas de Evaluación Multi-Criterio y Tecnologías de la Información Geográfica.

Los resultados revelaron que los procesos de deforestación en la cuenca se generaron principalmente, al pasar las coberturas *forestales* a coberturas de *agricultura permanente y temporal*, *pastizales* inducidos para el pastoreo y cría de ganado, y al pasar a áreas de *asentamientos humanos*. Estos cambios representaron una pérdida neta del 3.17% de cobertura forestal en cuanto a la superficie inicial de las coberturas de *bosques y selvas* en el periodo 2002-2011. De igual manera, se determinó el proceso de degradación del bosque, que fue generado por el cambio de coberturas forestales primarias a secundarias, esto representó el 2.86% de la superficie. En consecuencia, tanto el proceso de deforestación como la degradación del bosque aportaron aproximadamente el 12% de las emisiones a nivel nacional, en cuanto a las coberturas de bosques y selvas del sector Uso de Suelos y Cambio de Uso de Suelos.

De igual manera, se reveló que a través de la aplicación del modelo RLE, se determinó estadísticamente los factores conductores que más influyeron en el proceso de deforestación dentro de la cuenca, estos fueron, la producción forestal, la pendiente, la altitud, la distancia a áreas naturales protegidas, la distancia a localidades menores a 2,500 habitantes y la distancia a áreas agrícolas. Esto permitió afirmar que los factores biofísicos y de proximidad juegan un papel importante en la predisposición de las condiciones iniciales en las que los cambios de la cubierta forestal y uso del suelo se llevan a cabo. Mientras que los factores socioeconómicos, resultan ser menos contundentes con una relación estadística más débil, ya que estos no mantienen un patrón continuo y no presentan un efecto único independiente sobre los procesos forestales como se ha reportado en otros estudios.

Por su parte, el modelo empírico generado a través de la consulta a experto reveló que las principales causas que impulsan la deforestación en la cuenca Pacífico Norte, son las actividades agrícolas y la creación de infraestructura urbana, rural e industrial, estas fueron impulsadas principalmente por los factores demográficos, representados por el incremento de la población y el desarrollo de la economía de una región. Resultados estos concordantes con otros trabajos realizados a nivel del cinturón tropical y subtropical.

Finalmente, en referencia al modelo de simulación geoespacial, se concluye que los métodos empleados ayudaron a generar información valiosa para resolver problemas de manejo forestal y plantear objetivos óptimos en esta directriz. Revelando, que el modelo de simulación geoespacial nos permitió estimar la emisión y absorción de Carbono por los procesos de deforestación y reforestación y a su vez se logró generar mapas de balance de Carbono. Por lo tanto, esta información generada sirve como un indicador para tomar decisiones importantes en el manejo, mitigación y planificación forestal, que están directamente relacionadas con el cambio climático a nivel local, regional y global, proporcionando información importante sobre los potenciales impactos ambientales, territoriales y económicos que podría ocasionar la deforestación, como los beneficios que podría aportar el aumento de las cubiertas forestales, así como plantearse políticas de planificación y alternativas de desarrollo de un punto de vista más sustentables.

Cabe mencionar que la metodología integral desarrollada en esta tesis se generó con base a la utilización de software libre y datos oficiales del país que son de dominio público, esto junto con la calidad científica de los resultados obtenidos, dará la oportunidad de ser extrapolada a otras áreas de estudio, para conocer la realidad en el análisis, descripción y simulación de los procesos de deforestación.

Los resultados de esta tesis muestran como la deforestación ha contribuido a la reducción de la superficie boscosa y las emisiones de carbono, lo que puede ser considerado como un avance en los estudios de cambio climático y del ciclo de carbono, pérdida de biodiversidad, sostenibilidad de la agricultura o de sumidero de agua potable, ya que servirán para mejorar los datos de referencia, establecidos por la comunidad científica nacional e internacional.

Esta tesis servirá de apoyo al manejo integral de la cuenca del Pacífico Norte, ya que los resultados aquí generados podrían ser utilizados como base para el inventario, diagnóstico y creación de imágenes tendenciales, elementos claves para el proceso de ordenamiento y planificación territorial de la cuenca, lo cual permitirá un manejo sustentable de las coberturas forestales, que impactará directamente no solo al ciclo global del carbono, si no al mejoramiento del ciclo hidrológico, aumentando la disponibilidad de agua para el desarrollo de diversas actividades económicas como la agricultura, pesca etc.

Por otro lado, tomando como referencia los resultados alcanzados en esta tesis se puede recomendar para futuros trabajos:

- Validar geo-estadísticamente la cartografía de Usos de Suelo y Vegetación, para saber el grado de precisión o incertidumbre de los datos, ya que de estos se derivan los análisis de cambios de uso y cobertura del suelo. Y en la misma vertiente, realizar el análisis de incertidumbre de las estimaciones de gases efecto invernadero derivadas por los principales procesos forestales.
- Comparar las técnicas geo-estadísticas empleadas en estas tesis con otras técnicas, para la exploración de los factores conductores de la deforestación, y para evaluar otros métodos de validación de los modelos geo-estadísticos con la finalidad de dar mayor robustez a los resultados obtenidos.
- Aplicar otro tipo de técnicas estadísticas a los resultados de la consulta a expertos sobre las causas principales y secundarias de la deforestación, así como ampliar la encuesta para determinar el modelo causal de degradación forestal para el área de estudio.
- Emplear diferentes técnicas geo-espaciales de simulación de escenarios para comparar resultados, y aplicar el un análisis de sensibilidad a las simulaciones para dar robustez a los resultados obtenidos por los modelos geo-espaciales.

Junto a estas acciones, es necesario fortalecer la conexión entre la investigación y la política, propiciando así que los trabajos científicos contribuyan a mejorar el proceso de toma de decisiones, relacionadas con la conservación y el uso sostenible de las coberturas forestales.

Todo ello servirá de base para el fortalecimiento de programa REDD+ llevado actualmente en el país, así como, para los futuros reportes de cambio climático, y la generación de los indicadores establecidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas de la Agenda 2030 del IPCC.