



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

POSGRADO EN GEOGRAFÍA  
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DEL PROCESO DE PÉRDIDA FORESTAL EN LOS MUNICIPIOS  
DE CHARO, HIDALGO, INDAPARAPEO, QUERÉNDARO Y ZINAPÉCUARO. MICHOACÁN,  
MÉXICO.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:  
ARACELI BENÍTEZ FRANCO

TUTOR  
DR. LUIS MIGUEL MORALES MANILLA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

FEBRERO 2021.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Os eventos são, todos, Presente. Eles acontecem em um dado instante, uma fração de tempo que eles qualificam. Os eventos são, simultaneamente, a matriz do tempo e do espaço.

Milton Santos, 1926-2001

## **Dedicatória**

A mis dos pilares de vida, por velar que mi estudio de posgrado culmine de la mejor manera. Estos pilares son mis padres a los que buscaría miles de formas para agradecerles cada día, a mi madre por decirme desde pequeña la importancia de estudiar y ser profesionalista, a mi padre por apoyar el camino que elegí y que la lucha es constante cuando uno realmente quiere estudiar. Podría agradecer miles de cosas a ellos, pero lo importante es que son las personas que siempre confían en que puedo lograr lo que me propongo y recibo su apoyo incondicional. Los quiero tanto, es una bendición tenerlos como papás.

## AGRADECIMIENTOS

A la UNAM y al centro de Investigaciones en Geografía Ambiental por el apoyo y formación que me brindaron durante este proceso del posgrado.

A CONACYT por haberme otorgado la beca para la realización de este posgrado, así como la estancia académica en el Laboratoire ESPACE, University of Nice Sophia Antipolis.

A mi tutor Luis Miguel Morales Manilla por estar siempre brindándome su apoyo, conocimiento, tiempo, esfuerzo y motivación para culminar esta tesis. Mil gracias doctor.

A mi comité sinodal la Dra. Margarita Anaya Corona, la Dra. Ana Isabel Ramírez Quintana, el Dr. Adrián Ghilardi y al Dr. Arturo Muñiz.

A Christine Voiron-Canicio por su conocimiento en otras herramientas y métodos de análisis espacial.

A mis queridas maestras de la Universidad de Guadalajara, las cuales me brindaron su apoyo incondicional y conocimiento para continuar en el camino del posgrado. Mil gracias por ser mis guías académicas.

A mi hermano y hermanas que siempre están llenándome de su alegría y que se dan el tiempo para escuchar mis aventuras de vida. ¡los quiero!

A mis súper chicas Karla, Paz y Gemma por haberme acompañado en esta travesía llamada tesis y que esta nos ha logrado forjar una amistad magnífica llena de aventuras. Ellas se volvieron mis hermanas y a que pesar de la distancia siempre estarán para mí. ¡las quiero!

A mis amigos Leopoldo, Richard (“hermano”), Ignacio (Nacho) y Miguel Salinas, gracias muchachos por apoyarme todo este tiempo.

A Linda, Eduardo y su familia por estar presentes en mi desveladas de tesis y apoyándome en todo momento.

A Alejandro (alexandrino) por sacarme siempre una sonrisa con sus ocurrencias, por creer que yo lograría ser una maestra y lo que yo me propusiera. Y bueno aquí está el logro de la Aracemily.

Por último, a todas las personas que de alguna manera han apoyado en esta etapa académica.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	4
1.1    Introducción.....	5
1.2    Planteamiento del problema.....	8
1.3    Justificación.....	8
1.4    Antecedentes.....	9
1.5    Objetivos.....	15
1.5.1    Objetivo general.....	15
1.5.2    Objetivos particulares.....	15
1.6    Preguntas de investigación.....	16
CAPÍTULO II.....	17
2.    DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	17
2.1    Ubicación del área de estudio.....	18
2.1    Tipos de suelos.....	19
2.2    Clima.....	20
2.3    Vegetación.....	21
CAPÍTULO III.....	23
3.    MARCO CONCEPTUAL.....	23
3.1    La importancia de los bosques.....	24
3.2    Las causas de la deforestación.....	24
3.3    La deforestación como proceso espacial.....	25
CAPÍTULO IV.....	27
4.    MARCO METODOLÓGICO.....	27
4.1    Metodología.....	28
4.2    Materiales utilizados.....	28
4.3    Determinación del cambio de uso y cobertura del suelo en zonas forestales ...	29
4.4    Construcción del modelo DEFORELATIONS.....	31
4.4.1    Etapas del modelo DEFORELATIONS.....	33
4.4.1.1    Determinación de la relevancia.....	34
4.4.1.1.1    Obtención de las capas de las distribuciones de la pérdida forestal real y aleatoria.....	36
4.4.1.1.2    Elección de las relaciones espaciales que hipotéticamente influyen en el proceso de pérdida forestal.....	37

4.4.1.1.3	Construcción de la capa de costo.....	38
4.4.1.1.4	Cálculo de distancia mínima y multiplicación.....	39
4.4.1.2	Elección de las relaciones espaciales relevantes (parámetros) .....	40
4.4.1.3	Determinación de la influencia.....	42
4.4.1.4	Ponderación de los parámetros relevantes.....	42
4.4.1.5	Aplicación del modelo.....	43
4.4.1.5.1	Modo paramétrico .....	44
4.4.1.5.2	Modo sintético .....	44
5.	Resultados.....	46
5.1	Áreas de cambio en los bosques de 1994 a 2015 .....	47
5.1.1	Obtención de la cubierta y uso de suelo y caminos .....	48
5.1.2	Cambios en las cubiertas y uso de suelo.....	51
5.2	Construcción del modelo.....	58
5.2.1	Análisis de la relevancia .....	58
5.2.1.1	Relevancia de las relaciones espaciales para pérdida de bosque .....	60
5.2.1.2.....	Relevancia de las relaciones espaciales para pérdida de bosque abierto	61
5.2.1.3	Relaciones espaciales relevantes en la pérdida de bosque.....	62
5.2.1.3.1	Proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque.....	62
5.2.1.3.2	Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque .....	65
5.2.1.3.3	Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque.....	68
5.2.1.3.4	Proximidad de caminos a pérdida de bosque .....	70
5.2.1.3.5...	Coincidencia de la orientación de la pendiente en pérdida de bosque.	73
5.2.1.4	Relaciones espaciales relevantes en la pérdida de bosque abierto .....	75
5.2.1.4.1	Proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto .	75
5.2.1.4.2	Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque abierto.....	78
5.2.1.4.3	Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque abierto.....	81
5.2.1.4.4	Coincidencia de la orientación de la pendiente en bosque abierto...	83
5.3	Análisis de influencia de los valores de los parámetros.....	86
5.3.1	Funciones de probabilidad empírica para los valores de las relaciones	87
	espaciales en la pérdida de bosque .....	

5.3.1.1	Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a asentamientos humanos .....	88
5.3.1.2	Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a cultivos permanentes .....	88
5.3.1.3	Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a cultivos anuales	89
5.3.1.4	Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a caminos .....	90
5.3.2	Funciones de probabilidad paramétrica para los valores de las relaciones espaciales en relación a la pérdida de bosque abierto .....	91
5.3.2.1	Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a asentamientos humanos .....	92
5.3.2.2	Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a cultivos permanentes .....	93
5.3.2.3	Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a Cultivos anuales .....	94
5.4	Análisis de Ponderación .....	95
5.4.1	Ponderación de factores en pérdida de bosque .....	96
5.4.2	Ponderación de factores en relación con la pérdida de bosque abierto .....	96
5.5	Análisis paramétrico .....	97
5.5.1	Probabilidad de pérdida de bosque por cada parámetro .....	97
5.5.1.1	Probabilidad de pérdida de bosque por asentamientos humanos .....	97
5.5.1.2	Probabilidad de pérdida de bosque por cultivos permanentes .....	98
5.5.1.3	Probabilidad de pérdida de bosque por cultivo anual .....	99
5.5.1.4	Probabilidad de pérdida de bosque por caminos .....	100
5.5.2	Probabilidad de pérdida de bosque abierto .....	101
5.5.2.1	Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a asentamientos humanos .....	101
5.5.2.2	Probabilidad de pérdida de bosque abierto por cultivos permanentes	102
5.5.2.3	Probabilidad de pérdida de bosque abierto por cultivos anuales .....	104
5.6	Análisis sintético .....	104
5.6.1	Probabilidad de pérdida de bosque .....	105
5.6.2	Probabilidad de pérdida de bosque abierto .....	106
CAPÍTULO VI .....		107
6.	Discusión .....	107

6.1	Cambios en la cubierta forestal en los municipios Charo, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro, e Hidalgo .....	108
6.2	Relaciones espaciales que influyen en el proceso de pérdida forestal en los municipios de estudio .....	111
6.2.1	Relevancia en las relaciones espaciales en la pérdida de bosque y bosque abierto .....	111
6.2.1.1	Asentamientos humanos .....	112
6.2.1.2	Cultivo anual.....	112
6.2.1.3	Cultivo permanente .....	113
6.2.1.4	Caminos .....	114
6.2.1.5	Matorral pastizal .....	114
6.2.1.6	Altitud .....	115
6.2.1.7	Pendiente .....	115
6.2.1.8	Orientación de la pendiente.....	116
6.2.1.9	Suelos .....	116
6.2.1.10	Tenencia de la tierra.....	116
6.3	Resultados del análisis paramétrico .....	117
6.4	Resultados del análisis sintético.....	119
6.5	Muestras de campo en algunas zonas para verificar resultados.....	120
6.6	Validación del modelo DEFORELATIONS.....	125
6.6.1	Evaluación del modelo sintético.....	126
6.6.2	Evaluación de los modelos paramétricos.....	132
6.6.2.1	Evaluación de probabilidad de pérdida forestal por proximidad a asentamientos humanos .....	133
6.6.2.2	Evaluación de probabilidad de pérdida forestal por proximidad a cultivos permanentes.....	134
6.6.2.3	Evaluación de probabilidad de pérdida forestal por proximidad a cultivos anuales .....	136
6.6.2.4	Evaluación de probabilidad de pérdida forestal por proximidad a caminos. ....	138
6.7	Aplicabilidad del Modelo DEFORELATIONS en otras áreas de estudio .....	140
CAPÍTULO VII .....		143
CONCLUSIONES.....		143
Referencias bibliográficas y cartográficas .....		148

## Índice de Figuras

Figura 1.- Pérdida forestal en Michoacán de 2007 a 2014. ....	10
Figura 2.- Ubicación del área de estudio.....	18
Figura 3.- Zonas de cambio. ....	108
Figura 4.-Pérdida forestal.....	108
Figura 5.- Imagen SPOT 5 del mes enero del 2014 de una zona sur de Zinapécuaro. ..	109
Figura 6.- Imagen SPOT 5 del mes enero del 2014 de una zona sur de Queréndaro ....	110

## Índice de Gráficos

Gráfico 1.- Estructura del modelo DEFORELATIONS, modificado a partir de Morales (2013). ....	32
Gráfico 2.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de asentamientos humanos a zonas de pérdida de bosque. ....	64
Gráfico 3.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de asentamientos humanos a zonas de pérdida de bosque.....	65
Gráfico 4.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos permanentes a zonas de pérdida de bosque. ....	66
Gráfico 5.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos permanentes a zonas de pérdida de bosque.....	67
Gráfico 6.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos anuales a zonas de pérdida de bosque.....	69
Gráfico 7.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos anuales a zonas de pérdida de bosque. ....	70
Gráfico 8.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de caminos a zonas de pérdida de bosque.....	71
Gráfico 9.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de caminos a zonas de pérdida de bosque. ....	72
Gráfico 10.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la coincidencia de la orientación de la pendiente con las zonas de pérdida de bosque.....	74
Gráfico 11.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de asentamientos humanos a zonas de pérdida de bosque abierto.....	77
Gráfico 12.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de asentamientos humanos a zonas de pérdida de bosque abierto.....	78

Gráfico 13.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos permanentes a zonas de pérdida de bosque abierto.....	80
Gráfico 14.-Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos permanentes a zonas de pérdida de bosque abierto.....	81
Gráfico 15.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos anuales a zonas de pérdida de bosque abierto.....	82
Gráfico 16.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos anuales a zonas de pérdida de bosque abierto.....	83
Gráfico 17.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la coincidencia de la orientación de la pendiente con las zonas de pérdida de bosque abierto.....	85
Gráfico 18.- Función de probabilidad de pérdida de bosque para el parámetro proximidad a asentamientos humanos.....	88
Gráfico 19.- Función de probabilidad de pérdida de bosque para el parámetro proximidad a cultivos permanentes.....	89
Gráfico 20.- Función de probabilidad de pérdida de bosque para el parámetro proximidad a cultivos anuales.....	90
Gráfico 21.- Función de probabilidad de pérdida de bosque para el parámetro proximidad a caminos.....	91
Gráfico 22.- Función de probabilidad de pérdida de bosque abierto para el parámetro proximidad a asentamientos humanos.....	93
Gráfico 23.-Función de probabilidad de pérdida de bosque abierto para el parámetro proximidad a cultivos permanentes.....	94
Gráfico 24.- Función de probabilidad de pérdida de bosque abierto para el parámetro proximidad a cultivos anuales.....	95

### **Índice de Fotografías**

Fotografía 1.- Punto de verificación 1 en la zona sur del municipio de Zinapécuaro. ....	122
<i>Fotografía 2.- Punto de verificación 2 en el municipio de Zinapécuaro. ....</i>	122
Fotografía 3.- Otro punto de verificación 2 en el municipio de Zinapécuaro.....	123
Fotografía 4.- Punto de verificación 3 en el municipio de Queréndaro.....	124
Fotografía 5.- Otro punto de verificación 3 en el municipio de Queréndaro.....	124
Fotografía 6.- Punto de verificación 4 en una zona de Queréndaro.....	125
Fotografía 7.- Otro punto de verificación 4 en Queréndaro.....	125

## Índice de Mapas

Mapa 1.- Pérdida forestal en el período del 2000 al 2012. ....	12
Mapa 2.- Tipos de suelo en el área de estudio.....	20
Mapa 3.- Clima. ....	21
Mapa 4.- Cubierta vegetal y uso de suelo 2013. ....	22
Mapa 5.- Buffer de 2 kilómetros para obtener el área base de análisis para el modelo....	47
Mapa 6.- Cubiertas y uso de suelo del área de estudio para el año 2015. ....	48
Mapa 7.- Cubiertas y uso de suelo del área de estudio para el año 1994. ....	49
Mapa 8.- Caminos de 1994 en el área de estudio.....	50
Mapa 9.- Caminos de 2015 en el área de estudio.....	51
Mapa 10.- Cambios de cubierta y uso de suelo en el período de 1994 a 2015. ....	56
Mapa 11.- Pérdida de bosque en el período de 1994 a 2015.....	57
Mapa 12.- Pérdida de bosque abierto de 1994 a 2015.....	58
Mapa 13.- Probabilidad de pérdida de bosque por el parámetro de proximidad a asentamientos humanos.....	98
Mapa 14.- Probabilidad de pérdida de bosque por el parámetro de proximidad a cultivos permanentes.....	99
Mapa 15.- Probabilidad de pérdida de bosque por el parámetro proximidad a cultivos anuales.....	100
Mapa 16.- Probabilidad de pérdida de bosque por el parámetro proximidad a caminos. ....	101
Mapa 17.- Probabilidad de pérdida de bosque abierto por el parámetro de proximidad a asentamientos humanos.....	102
Mapa 18.- Probabilidad de pérdida de bosque abierto por el parámetro de proximidad a cultivos permanentes.....	103
Mapa 19.- Probabilidad de pérdida de bosque abierto por el parámetro de proximidad a cultivos anuales.....	104
Mapa 20.- Modelo sintético, probabilidad de pérdida de bosque.....	105
Mapa 21.- Modelo sintético, probabilidad de pérdida de bosque abierto.....	106
Mapa 22.- Puntos de verificación en las zonas con probabilidad de pérdida de bosque. ....	121
Mapa 23.- Datos de referencia para pérdida forestal en los años 2015 a 2019 (Hansen et al 2013, actualizados hasta el 2019).....	127
Mapa 24.- Probabilidad de pérdida forestal según el modelo DEFORELATIONS, correspondiente a la cubierta forestal del año 2015.....	128

Mapa 25.- Probabilidad de pérdida según el modelo DEFORELATIONS para los datos de pérdida de Hansen et al. (2013) reportados para el período 2015 – 2019.....	129
Mapa 26.- Probabilidad de pérdida forestal por proximidad a asentamientos humanos para los datos de pérdida de Hansen et al (2013) reportados para el período 2015 – 2019...	133
Mapa 27.- Probabilidad de pérdida forestal por proximidad a cultivos permanentes para los datos de pérdida de Hansen et al. (2013) reportados para el período 2015 – 2019..	135
Mapa 28.- Probabilidad de pérdida forestal por proximidad a cultivos anuales, para los datos de pérdida de Hansen et al (2013) reportados para el período 2015 – 2019. ....	137
Mapa 29.- Probabilidad de pérdida forestal por proximidad a caminos, para los datos de pérdida de Hansen et al. (2013) reportados para el período 2015 – 2019.....	139

### Índice de Tablas

Tabla 1.- Insumos cartográficos.....	28
Tabla 2.- Determinación de cambios en las usos y cubierta de uso de suelo.....	30
Tabla 3.- Insumos cartográficos para el modelo DEFORELATIONS.....	35
Tabla 4.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo. ....	52
Tabla 5.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Charo. ....	53
Tabla 6.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Indaparapeo. ....	53
Tabla 7.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Queréndaro. ....	54
<i>Tabla 8.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Zinapécuaro. ....</i>	<i>55</i>
Tabla 9.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Hidalgo. ....	55
Tabla 10.- Resultado de la determinación de la relevancia de las relaciones espaciales para bosque.....	60
Tabla 11.- Resultado de determinación de la relevancia de las relaciones espaciales para bosque abierto.....	61
Tabla 12.- Resumen estadístico de la proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque.....	62
Tabla 13.- Resumen estadístico de la proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque.....	65
Tabla 14.- Resumen estadístico de la proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque .	68
Tabla 15.- Resumen estadístico de la proximidad de caminos a pérdida de bosque.....	70
Tabla 16.- Resumen estadístico de coincidencia de la orientación de la pendiente en pérdida de bosque. ....	73

Tabla 17.- Comparación de la desviación estándar de la coincidencia de la orientación de la pendiente con la pérdida de bosque. ....	74
Tabla 18.- Resumen estadístico de la proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto.....	76
Tabla 19.- Resumen estadístico de la proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto.....	78
Tabla 20.- Resumen estadístico de la proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque abierto. ....	81
Tabla 21.- Resumen estadístico de la relación de coincidencia de la orientación de la pendiente con la pérdida de bosque abierto. ....	84
Tabla 22.- Comparación de la desviación estándar de la coincidencia de la orientación de la pendiente con la pérdida de bosque abierto.....	85
Tabla 23.- Relaciones espaciales con su función de probabilidad para el caso de pérdida de bosque.....	87
Tabla 24.-Relaciones espaciales con su función de probabilidad para el caso de pérdida de bosque abierto. ....	92
Tabla 25.- Parámetros con su respectivo peso en relación con la pérdida de bosque ....	96
Tabla 26.-Parámetros con su respectivo peso en relación con la pérdida de bosque abierto .....	96
Tabla 27.- Probabilidad de pérdida de bosque.....	117
<i>Tabla 28.- Probabilidad de pérdida de bosque abierto.</i> .....	117
Tabla 29.- Probabilidad muy alta y alta de pérdida de bosque y bosque abierto. ....	119
Tabla 30.-Clases de probabilidad de pérdida de cubierta forestal empleadas para la evaluación de la fiabilidad.....	129
Tabla 31.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida dado por el modelo DEFORELATIONS para los años 2015-2019 tomados en conjunto.....	130
Tabla 32. Superficie de pérdida forestal para los años 2015 a 2019 según Hansen (2013) con datos actualizados a 2019.....	131
Tabla 33. Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida dado por el modelo DEFORELATIONS para los años 2015-2019 tomados en forma desagregada.....	132

Tabla 34.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a asentamientos humanos, para los años 2015-2019 tomados en conjunto. ....	134
Tabla 35.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos permanentes, para los años 2015-2019 tomados en conjunto. ....	136
Tabla 36.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos anuales, para los años 2015-2019 tomados en conjunto. ....	138
Tabla 37.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos anuales, para los años 2015-2019 tomados en conjunto. ....	140

## Resumen

A nivel mundial los bosques han sido deteriorados y deforestados. En el estado de Michoacán, se ha incrementado la pérdida de superficie forestal por el cambio de uso de suelo y la expansión de cultivos permanentes, en particular el cultivo de aguacate. El fenómeno del cambio de uso del suelo es multifactorial y muchos de estos factores tienen una representación espacial; por ello, los modelos espacio-temporales permiten conocer cuáles son las interacciones que influyen en la ocurrencia de este fenómeno y visualizar los patrones espaciales resultantes.

En la presente investigación se identificaron los cambios de uso de suelo de 1994 a 2015 (21 años) en los municipios de Charo, Hidalgo Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro del estado de Michoacán. Con esta información se construyó el modelo DEFORELATIONS, con el que se analizaron diversas relaciones espaciales presentes en el área de estudio, se identificaron los factores que han influido en la pérdida de dos categorías de cubierta forestal, bosque y bosque abierto; por último, se hizo una predicción de las áreas susceptibles a la pérdida forestal y su grado de probabilidad a la pérdida forestal.

De la aplicación del modelo, de diez relaciones espaciales analizadas sólo la proximidad de la cubierta forestal a los asentamientos humanos, proximidad a los caminos, y proximidad a los cultivos permanentes y anuales resultaron estadísticamente relevantes para la pérdida de bosque. Para el caso de la pérdida de bosque abierto resultaron relevantes estas mismas relaciones, con excepción de la proximidad a los caminos.

La proximidad de los cultivos permanentes a los bosques fue el parámetro que determinó una probabilidad muy alta de pérdida de bosque en 56,089 hectáreas, seguido por la proximidad a los asentamientos humanos con una probabilidad muy alta en 60,715 hectáreas; en tercer lugar, la proximidad a los caminos, con una probabilidad muy alta en 56,089 hectáreas y por último la proximidad a los cultivos anuales con una probabilidad muy alta en 30,180 hectáreas de bosque.

En cambio, la probabilidad muy alta de pérdida de bosque abierto está relacionada con la cercanía de asentamientos en 4,686 hectáreas; en segundo lugar, con la proximidad a zonas de cultivos anuales con una probabilidad muy alta en 4,580 hectáreas, seguido por la proximidad a cultivos permanentes con una probabilidad alta en 5,237 hectáreas.

**Palabras clave:** Pérdida de cubierta forestal, relaciones espaciales, DEFORELATIONS

### **Abstract**

The global forests have been degraded and deforested. In the state of Michoacán, the forest loss has increased due to the change in land use caused by the expansion of permanent crops, particularly avocado cultivation. The phenomenon of land use change is multifactorial and many of these factors have a spatial representation; therefore, spatio-temporal models allow us to know what are the interactions influencing the occurrence of this phenomenon and help to visualize the resulting spatial patterns.

In this research, changes in land use were identified from 1994 to 2015 (21 years) in the municipalities of Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro and Zinapécuaro in the state of Michoacán. Within the above context, a DEFORELATIONS model was built, where the spatial relationships present in the study area were analyzed, and those factors that have influenced the loss of forest and open forest were identified. Finally, a prediction was done of the areas susceptible to forest loss and their degree of probability of forest loss.

From the application of the model, from the 10 spatial relationships analyzed, only proximity of forest cover to human settlements, proximity to roads, and proximity to permanent and annual crops, were relevant to forest loss. In the case of the loss of open forest, the same relationships were relevant, with exception of proximity of forest to roads.

The proximity of the permanent crops to the forests was the parameter that determined the highest probability of loss 56,089 hectares of forest, followed by proximity to human settlements with a very high probability in 60,715 hectares; thirdly, the proximity to roads with a very high probability in 56,089 hectares, and lastly, the proximity of forests to annual crops with a very high probability in 30,180 hectares.

Complementary, a very high probability of loss of open forest is related to the proximity of settlements in 4,686 hectares; in second place with the proximity to areas of annual crops with a very high probability in 4,580 hectares, followed by proximity to permanent crops with a high probability in 5,237 hectares.

Keywords: forest cover loss, spatial relations, DEFORELATIONS

# **CAPÍTULO I**

## 1.1 Introducción

Desde su aparición, las comunidades humanas han modificado constantemente su entorno para satisfacer sus necesidades. Sin embargo, las actividades humanas han impactado y alterado de alguna manera el sistema natural, trayendo consigo contaminación, degradación de recursos naturales, cambios de uso de suelo, entre otras problemáticas.

Uno de los problemas globales que se ha incrementado en la actualidad es el cambio de uso de suelo, el cual ha transformado el medio natural disminuyendo superficies forestales, para establecer áreas agrícolas, y zonas urbanas. A nivel mundial, la superficie de bosques continúa contrayéndose a medida que el crecimiento de las poblaciones humanas y la demanda de alimentos y tierras se intensifica, de 1990 a 2015 la tasa de pérdida neta de bosques ha disminuido en más de un 50 por ciento, se tiene el registro de una pérdida neta de unos 129 millones de hectáreas de bosque, que representa una tasa anual de pérdida de 0,13 por ciento, una superficie total del tamaño aproximado de Sudáfrica (FAO, 2016). Desafortunadamente, la visión sobre la problemática es corta, puesto que en algunos casos los intereses económicos suelen ser más relevantes que la protección de los ecosistemas naturales como son los bosques.

Los ecosistemas forestales cada vez se ven más perjudicados por cambios como la conversión de la cobertura del terreno, degradación del terreno e intensificación en el uso del terreno. Estos procesos, que usualmente se engloban en lo que se conoce como deforestación o degradación forestal, se asocian a impactos ecológicos importantes en prácticamente todas las escalas (Lambin 1997, citado en Rosete *et. al*, 2008).

Los bosques son un ecosistema esencial para la vida en la Tierra que contribuyen a la regularización del clima, además de que sirven como recarga de acuíferos y albergan una gran riqueza biológica. En la actualidad estas áreas se han visto

afectadas por deforestación debida a actividades de tala inmoderada e ilegal del arbolado para el mercado de madera, el cambio de uso de suelo, incendios, sobrepastoreo y problemas fitosanitarios dentro de estos lugares.

La deforestación se ha tomado como un tema prioritario dentro de la Agenda 21 en la Cumbre de Río 1992, donde se mencionó que la deforestación es un factor determinante en el calentamiento global y el efecto invernadero. Cabe señalar que es una de las causas principales del cambio climático, esto se señaló en el Protocolo de Kyoto 1997 (Varela, 1998:169).

En el caso de México, respecto a su superficie forestal, ocupa el doceavo lugar a nivel mundial, así como el tercero en América (Morabak, 2012), sin embargo, este se ha visto afectado por la deforestación donde la principal causa es el cambio de uso de suelo y por la tala ilegal. De acuerdo con el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI, 2013), México se encuentra entre los primeros países con mayor deforestación en el mundo, la estimación más reciente de deforestación durante el periodo 2005-2010 es de alrededor de 155 mil hectáreas por año.

El estado de Michoacán es una de las entidades federativas que posee una superficie forestal importante. De acuerdo con las cifras de la serie V de uso de suelo y vegetación de INEGI del 2011, el estado tenía una superficie forestal de 3,405,824 hectáreas que representaban el 2% de la superficie de bosque en México, donde en el país en el año 2011 se registró 140,581,638 hectáreas (INEGI, 2013). No obstante, este recurso se ha visto afectado por diferentes factores, entre ellos, la tala clandestina, los incendios forestales, y en los últimos años, por el desarrollo acelerado del cultivo del aguacate. Para el 2011 se estimó una cifra de 153,018 hectáreas de superficie cultivada de aguacate en el estado, de las cuales al menos 50,000 has pueden atribuirse a la introducción del cultivo en zonas forestales (Morales et al., 2012).

Respecto al tema de pérdida forestal se han realizado investigaciones donde el principal análisis es la identificación de cambios de cubierta y de uso suelo. Un ejemplo de ello es un proyecto de investigación de Mas et al., (2016) en el que realizó un monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el estado, donde su metodología se basa en utilizar un modelo híbrido de análisis de imágenes satelitales que combina la identificación de los usos de manera digital e interpretación visual. No obstante, se tienen otros estudios que también involucran análisis estadísticos como regresiones múltiples para la comprensión de cómo se dan los procesos de cambio de cobertura y uso de suelo a través del tiempo, tal es el caso de estudio que realizarn Bocco *et al.*, (2001) de la dinámica del cambio de uso de suelo en Michoacán.

Se tienen otros estudios como el Reyes (2014) y Vizcaino (2013), donde su priorización es identificar cuáles son los factores o usos de suelos que contribuyen a que la pérdida forestal se presente en un determinado lugar a través del tiempo, ellos aplicaron el modelo espacial DEFORELATIONS basado en relaciones estadísticas con herramientas de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, pero cada uno lo adaptó a las necesidades específicas para sus áreas de estudio.

Con el modelo DEFORELATIONS (Morales, 2013), es posible investigar las interacciones espaciales entre las zonas de pérdida forestal y los factores mencionados, si se modelan las distribuciones de las relaciones espaciales que guardan las zonas forestales y las áreas de pérdida forestal respecto a elementos del paisaje tales como la pendiente del terreno, la presencia de caminos y la cercanía a zonas agrícolas, entre otros. Con esa información se puede construir un modelo DEFORELATIONS específico para la zona de estudio mediante el cual sea posible mejorar el entendimiento de cómo estos elementos influyen en este proceso de pérdida y cuál podría ser el escenario futuro del mismo.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Conocer de qué manera se ha dado el proceso de pérdida forestal en una región es indispensable para poder realizar recomendaciones sobre la manera de frenar o reducir este proceso. En general, los procesos de pérdida forestal obedecen en muchos casos a factores locales relacionados con las condiciones de desarrollo socioeconómico de la población en la región de interés.

Los patrones históricos de pérdida forestal ofrecen información importante sobre estos factores locales, ya que la manera en que las áreas forestales han sido transformadas depende en gran medida de factores tales como la accesibilidad vial y topográfica, la expansión de la frontera agrícola y pecuaria, el crecimiento de las zonas urbanas, etc.

## **1.3 Justificación**

Además del papel que tienen los bosques en la mitigación del cambio climático, es necesario también resaltar que los bosques brindan otros beneficios ambientales a la sociedad, incluso en la percepción y estética del paisaje. La existencia de zonas forestales en el mundo, son indispensables para los seres vivos, es por ello que el identificar y caracterizar dichas zonas, y entender cuál ha sido y es la dinámica de cambio, puede contribuir a su manejo integral y preservación.

Por otra parte, en los municipios de Charo, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro, e Hidalgo el proceso de pérdida forestal se está expandiendo cada vez más y es necesario hacer una investigación respecto a los factores que han influido en esta pérdida. Sería muy útil desarrollar un modelo que explore esta dinámica de cambio y con ello facilitar la predicción de las áreas forestales que se encuentran en peligro de ser deforestadas. Los resultados pueden contribuir a identificar cuáles son las zonas que podrían llegar a deforestarde de continuar la tendencia de este proceso.

## 1.4 Antecedentes

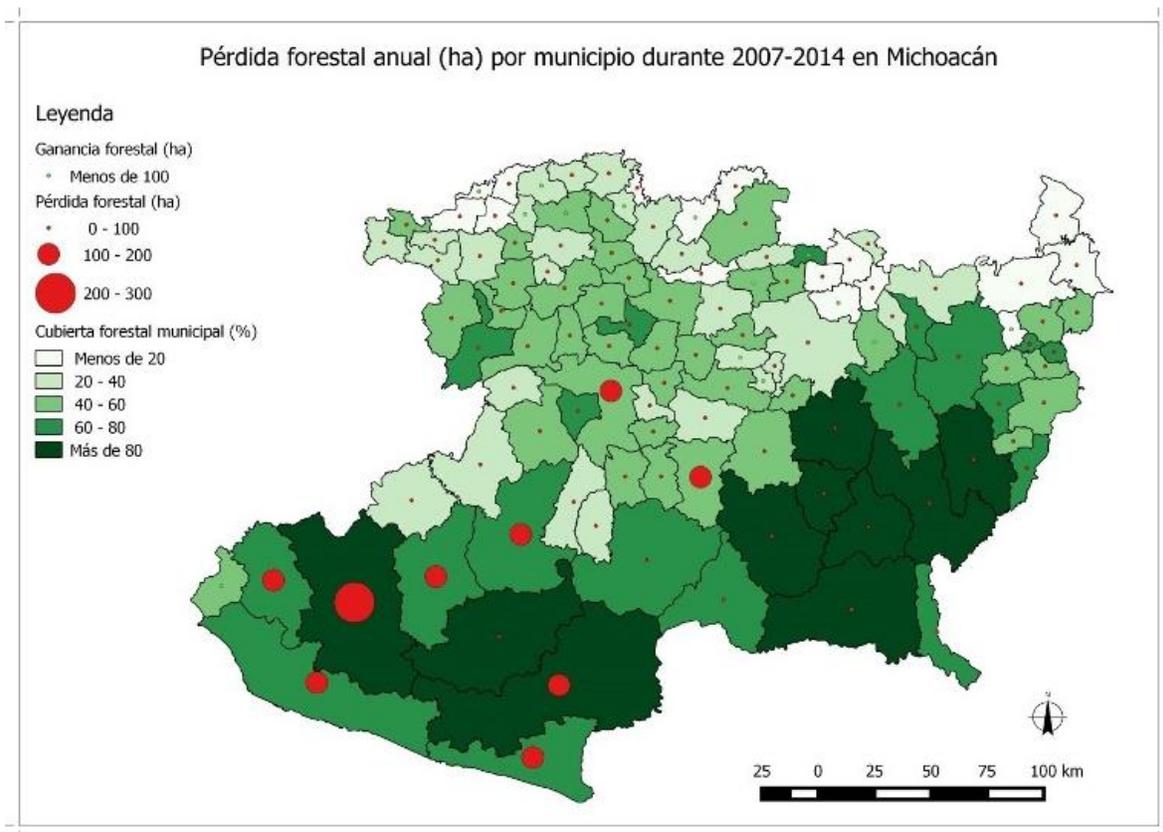
A nivel estatal se tiene el estudio sobre “La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación”, donde Bocco *et al.* (2001) evaluaron los cambios de uso de suelo a partir de la medición de los cambios en la cobertura vegetal y no vegetal, con el objetivo de contribuir a mejorar la comprensión de los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo en el tiempo, a nivel regional.

Bocco *et al.* (2001) tomaron como base el periodo de los años setenta a noventa y mediante el cálculo de un índice compuesto por municipio determinaron las matrices de transición de cambio de uso del suelo y la regionalización del proceso de deforestación. Adicionalmente, exploraron las posibles causas de los procesos de cambio de uso del suelo por medio de un análisis de regresión múltiple entre los cambios de la cobertura por municipio y los cambios en variables socioeconómicas y demográficas. Sus resultados arrojaron que los procesos de cambio de uso del suelo en Michoacán no pueden explicarse de manera simple por variables socioeconómicas y demográficas. Concluyen que se requiere de estudios más finos, por regiones y por municipios para poder entender mejor la problemática.

Este estudio deja claro que es relevante realizar investigaciones a nivel municipal y regional, para contemplar de mejor manera las posibles causas de la deforestación. Por lo tanto, el desarrollar un análisis espacio-temporal de pérdida forestal en una región compuesta por cinco municipios, como se hace en este trabajo, puede llevar a obtener resultados significativos que permitan explicar cuáles relaciones dentro del espacio influyen en el proceso de pérdida forestal.

Otro estudio que se tiene a escala de región es el monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el estado de Michoacán de Mas *et al.* (2016). Como se mencionó en párrafos anteriores, el objetivo de este estudio principalmente era la identificación de los cambios del uso y cubierta del suelo en diferentes

temporalidades por medio de un modelo híbrido de análisis de imágenes satelitales SPOT 5, obteniendo tasas de cambio que describen la pérdida de cubierta forestal dentro del Estado. En la figura 1 se aprecia que la escala de los resultados permite comparar a nivel regional la situación de la deforestación en Michoacán. Esto nos da un acercamiento de lo relevante que es estudiar un área de interés más pequeña, y con ello identificar de manera más precisa cuáles podrían ser los usos de suelo o factores que podrían contribuir al proceso de pérdida forestal.



*Figura 1.- Pérdida forestal en Michoacán de 2007 a 2014.*

*Fuente: Mas et al., (2016).*

El análisis espacio-temporal del proceso de deforestación es el tema central de esta investigación. Este campo de estudio ha sido trabajado desde diferentes perspectivas y metodologías. Encontramos diversos autores entre ellos Hansen et al., (2013); Hiraes et al., (2010); Mas y Flamenco (2011); Molnar *et al.*, (2004); Pineda et al., (2009); Velázquez et al., (2011), Morales (2013), Vizcaino (2013);

Reyes (2014), que muestran diversos estudios realizados en el tema de deforestación, solo por mencionar unos pocos.

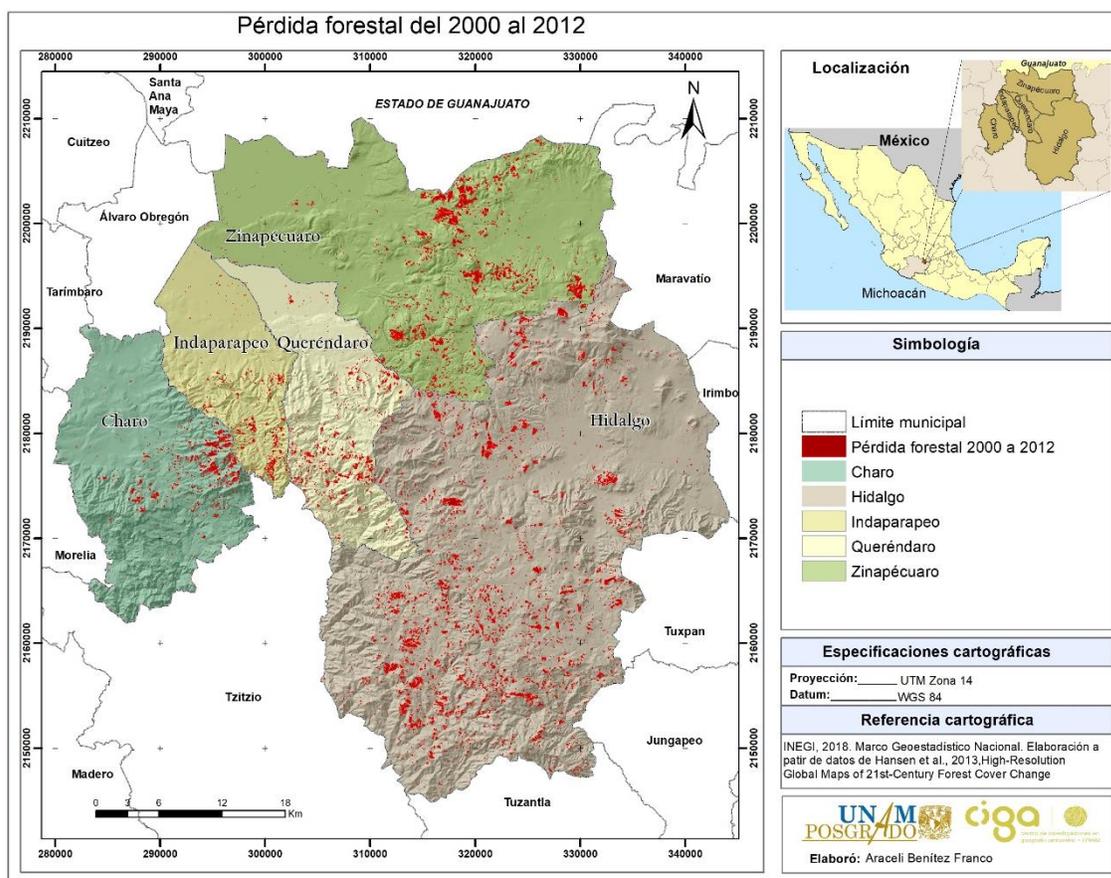
Molnar et al., (2004) en el estudio de “¿Quién conserva los bosques del mundo?”, mostraron un panorama general de cuál es la situación de la conservación de la biodiversidad forestal en los países en vía de desarrollo, presentaron los diversos tipos de conservación, e identificaron cómo algunas poblaciones indígenas han contribuido a la conservación forestal por medio de propiciar su supervivencia cultural. Señalan que condiciones pueden facilitar, fomentar y apoyar la conservación de los bosques. Molnar *et al.* (2004) hacen hincapié en que la conservación comunitaria tiene cada vez más sentido como estrategia clave para la conservación de la biodiversidad, sin embargo, se necesita atención en términos de políticas gubernamentales o acciones internacionales y locales.

En el año 2011 se presentó una “Propuesta metodológica para normar la evolución de la evaluación de la tasa de deforestación y degradación forestal en México”, ésta fue realizada por Velázquez et al., (2011). En ella los autores publican elementos básicos relativos para la medición robusta de los procesos de deforestación y degradación para la preparación nacional e inserción de México en los posibles mercados internacionales relacionados con los planteamientos actuales REDD+, resultantes del marco internacional post-Kioto (2012 en adelante) de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). Hacen referencia que el uso de tecnología de percepción remota combinada con mediciones en el terreno son un método práctico para llevar a cabo el monitoreo de la deforestación a nivel nacional.

Precisamente, con técnicas de percepción remota, se tiene un estudio relativamente reciente sobre el estado de la pérdida forestal a nivel global para el período 2000 - 2012 (Hansen et al., 2013), en el cual, para poder cartografiar esta pérdida forestal se basaron en datos satelitales con una resolución espacial de 30 metros. Se llegó a la conclusión de que la silvicultura intensiva practicada en los bosques

subtropicales resultó la mayor tasa de cambio de los bosques a nivel mundial. También señalan que la pérdida de bosques boreales en gran parte se debe a causa de los incendios forestales. Cabe señalar que la investigación de Hansen et al., 2013 esta publicada en línea y es de acceso público.

En la zona de estudio de este trabajo, hasta hace relativamente poco tiempo, estos procesos de deforestación no habían tenido un impacto significativo. Sin embargo, a raíz del estudio sobre el cambio global forestal de la Universidad de Maryland en los Estados Unidos (Hansen et al., 2013), fue posible observar que en la última década hubo una pérdida forestal importante en los municipios de Charo, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro, e Hidalgo (Mapa 1), obteniendo la capa de pérdida forestal del 2000 al 2012.



Mapa 1.- Pérdida forestal en el período del 2000 al 2012.

Otra herramienta que se utiliza para detectar la deforestación es la percepción remota, un ejemplo de esto es el estudio que realizaron Mas y Flamenco (2011) en cual llevaron a cabo la modelación de los cambios de uso de suelo en una región del trópico mexicano. Por medio de tres imágenes Landsat de diferentes fechas en la época seca detectaron las áreas deforestadas y al mismo tiempo evaluaron el modelo utilizado en su investigación. Con el programa DINAMICA EGO modelaron los cambios pasados para evaluar las tasas de cambio entre los diferentes tipos de cobertura y uso de suelo, tomando en cuenta la relación espacial entre la localización de estos cambios y variables “explicativas” que influyen la distribución espacial de los cambios, y para el análisis estadístico utilizaron el paquete R. Como resultado señalan que hay una limitación de la información espectral de las imágenes ya que en algunos casos no pudieron distinguir algunos usos de suelo. Por último, mencionan que los modelos que integran conocimiento experto son más adecuados que los modelos basados en calibraciones automáticas, los cuales, a veces, utilizan métodos que permiten reproducir los patrones del periodo de calibración con mucha precisión, y como ventaja es que el programa DINAMICA permite trabajar estos dos tipos de modelos.

El uso de las tecnologías geoespaciales permite realizar análisis de la deforestación en un cierto lugar, tal es el caso de la investigación “Agentes de deforestación de manglar en Mahahual–Xcalak, Quintana Roo, sureste de México”, los autores (Hirales et al., 2010) estimaron la pérdida de cobertura manglar en este lugar por medio de un análisis multi-temporal usando imágenes satelitales de 1998 y 2007, con lo cual concluyeron que “el análisis de las imágenes por el periodo de 12 años demostró que se han perdido 1070 hectáreas de bosque de manglar, con una tasa anual de deforestación de 0.85%”.

Otro ejemplo claro de la utilidad de estas tecnologías es la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis de la cubierta forestal y otros usos de suelo. Pineda et al. (2009) hacen uso de un SIG, donde analizaron el cambio de uso de suelo en el Estado de México en un periodo de 1993-2002,

usando técnicas de regresión multivariantes con la finalidad de ver cuáles son los factores de los procesos de deforestación dentro del estado.

En el año 2013, Morales construyó un modelo general para estudiar los factores que son relevantes en el proceso de deforestación, con el nombre de DEFORELATIONS, el cual permite identificar áreas con tendencia a este proceso. Este modelo se aplicó a dos zonas de estudio, considerando dos fechas para identificar los patrones espaciales de deforestación. Este modelo se basa principalmente en identificar las relaciones espaciales relevantes en el proceso de deforestación en un determinado lugar, y para su validación hace uso de pruebas estadísticas.

En la tesis de maestría de Vizcaino (2013) utilizó el modelo anteriormente mencionado para investigar de manera comparativa cuáles han sido los patrones de pérdida forestal en la Reserva de la Biósfera de los Tuxtlas, en México, y el Corredor Ecológico de Muriquí, en Brasil. Para lograr su objetivo tomó en cuenta la información de uso y cubierta de suelo de dos fechas de cada una de las zonas de estudio, esto con la finalidad de identificar el cambio de la cubierta forestal. Al emplear el modelo, identificó las relaciones espaciales locales que se presentan en ambos lugares, encontró en ambos casos que la probabilidad de que haya deforestación está estrechamente relacionada con la proximidad de zonas forestales a zonas agropecuarias, y por otra parte la pendiente del terreno influye en que haya una baja probabilidad de deforestación en la Reserva de la Biósfera de los Tuxtlas, en cambio en el Corredor Ecológico de Muriquí, la accesibilidad vial cercana a zonas forestales de pendiente alta tienen una alta probabilidad a deforestarse.

Por otro lado, Reyes (2014) también construyó un modelo DEFORELATIONS, para estudiar de manera comparativa los patrones espaciales de la deforestación en una zona templada y una tropical en el estado de Michoacán, y adicionalmente predecir la susceptibilidad de pérdida forestal en las zonas de estudio. Además, para

complementar el modelo utilizó un instrumento cualitativo para identificar percepciones locales que pudieran dar explicación a las relaciones espaciales que influyen en la pérdida forestal en sus áreas de estudio. Reyes concluye que el modelo DEFORELATIONS identificó dos relaciones espaciales dentro de sus áreas estudio, indicando que no explica completamente el proceso de deforestación, y para ello es necesario el análisis de la percepción local como complemento para encontrar explicaciones más precisas para aquellas relaciones espaciales que resultaron relevantes y no relevantes.

## **1.5 Objetivos.**

### **1.5.1 Objetivo general**

Realizar un análisis de las zonas forestales en los municipios de Charo, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro, e Hidalgo para determinar los cambios que han sucedido en dichas superficies de 1994 a 2015, con el propósito de identificar los factores espaciales que han influido en el cambio de la cubierta forestal a otro tipo de uso de suelo. Por último, con esta información se construye un modelo para definir factores, y con ello predecir áreas susceptibles a la pérdida forestal.

### **1.5.2 Objetivos particulares**

1. Determinar cómo se han transformado las zonas forestales a través del tiempo (1994 – 2015) en estos municipios.
2. Identificar las interacciones espaciales que han sido más influyentes en el proceso de pérdida de las áreas forestales.
3. Construir un modelo de interacción espacial que pueda ser empleado para predecir la localización y el grado de probabilidad de las áreas forestales susceptibles a la pérdida forestal.

## **1.6 Preguntas de investigación**

¿Cuáles han sido los cambios la cubierta forestal en el área de estudio?,

¿Qué relaciones espaciales han influido en el proceso de pérdida forestal?

¿En qué condiciones de susceptibilidad de pérdida forestal se encuentran actualmente estas áreas?

## **CAPÍTULO II**

### **2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

## 2.1 Ubicación del área de estudio

Los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro, área de estudio, están ubicados en la parte noreste del estado de Michoacán, tienen en conjunto una superficie de 2,457 km<sup>2</sup>, la cual ocupa el 4.21 % de la superficie del estado de Michoacán (INEGI, 2013). El área de estudio está localizada geográficamente con las coordenadas entre los paralelos 19°59'0" y 19°22'0" de altitud norte; los meridianos 101°6'0" y 100° 26'0" de longitud oeste; una altitud entre 1400 y 3400 m.s.n.m. Colinda al norte con el estado de Guanajuato; al este con los municipios michoacanos de Maravatío, Irimbo, Tuxpan, Jungapeo; al sur con los municipios michoacanos de Tuzantla y Tzitzio; al oeste con los municipios michoacanos de Tzitzio, Morelia, Tarímbaro y Álvaro Obregón (Figura 2).

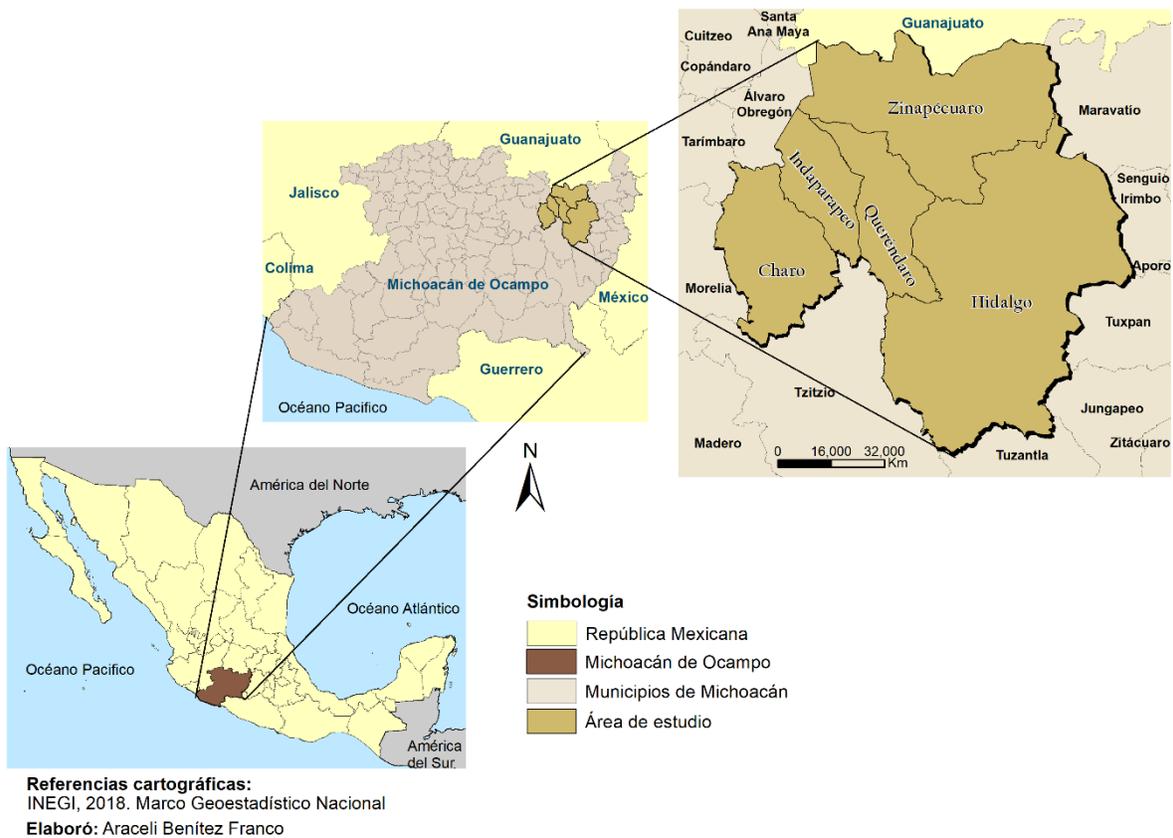


Figura 2.- Ubicación del área de estudio.

## 2.1 Tipos de suelos

En el área de estudio se tienen 11 tipos de suelos (Mapa 2), donde los que predominan es el Andosol, el Vertisol y Luvisol, y en poca concentración se tiene el Planosol, Durisol y Solonchak.

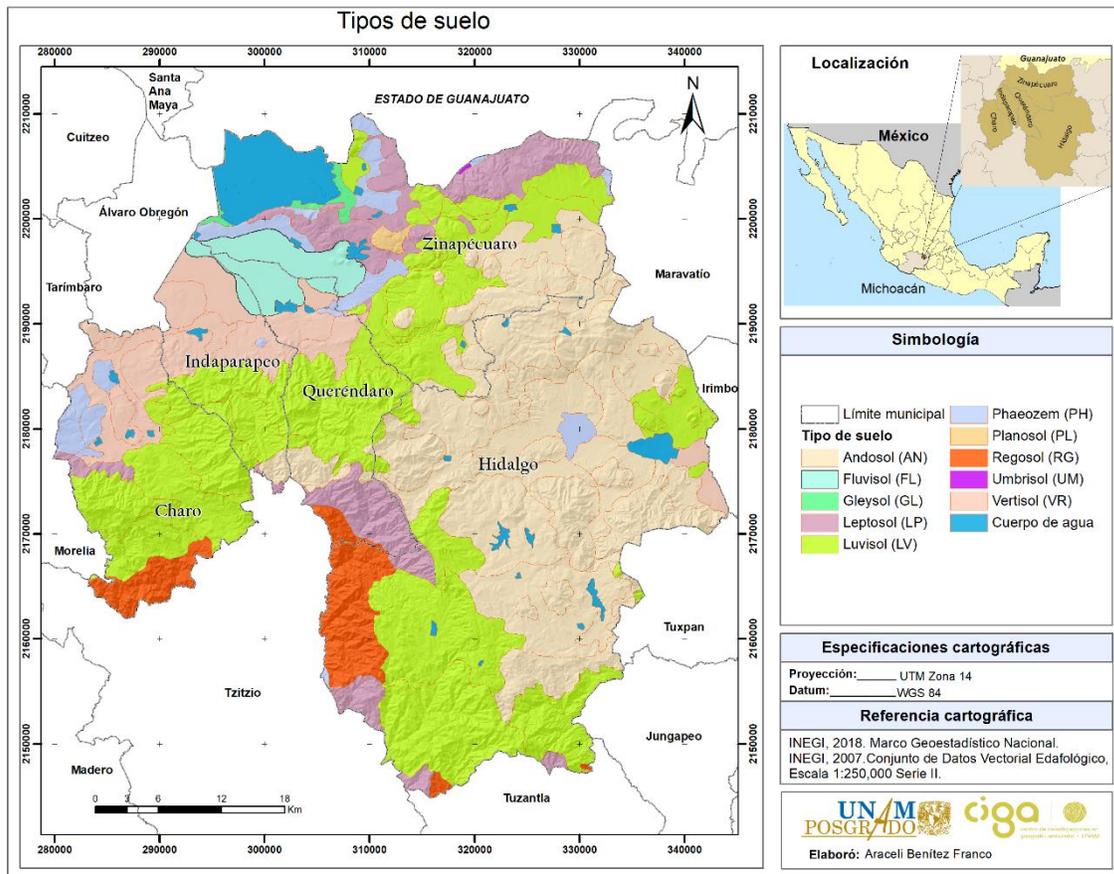
A continuación, se describen las características de los suelos que predominan en la zona de estudio con base a la guía para la interpretación de cartografía de INEGI (2004):

**Andosoles:** son de origen volcánico, lo cual da condiciones para que se tenga la presencia de vegetación de bosque o selva. En su mayoría son de colores oscuros y cuentan con una alta capacidad de retención de humedad. Tienen generalmente bajos rendimientos agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo y éste no puede ser absorbido por las plantas, con excepción del cultivo del aguacate. El uso más favorable para su conservación es el forestal.

**Vertisoles:** son suelos que se revuelven o que se voltean, se encuentran en climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. En ellos se puede encontrar vegetación que va desde selvas bajas a pastizales y matorrales. Son muy fértiles pero su dureza dificulta la labranza, sin embargo, en estos suelos se logra producir la mayor parte de caña, cereales, hortalizas y algodón. Tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización.

**Luvisoles:** suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas y en algunas ocasiones también pueden encontrarse en climas más secos. La vegetación es generalmente de bosque o selva y se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Se destinan principalmente a la agricultura con rendimientos moderados como cultivos de café y frutales en zonas tropicales, de aguacate en zonas templadas, donde

registran rendimientos muy favorables. Con pastizales cultivados o inducidos pueden dar buenas utilidades en la ganadería.



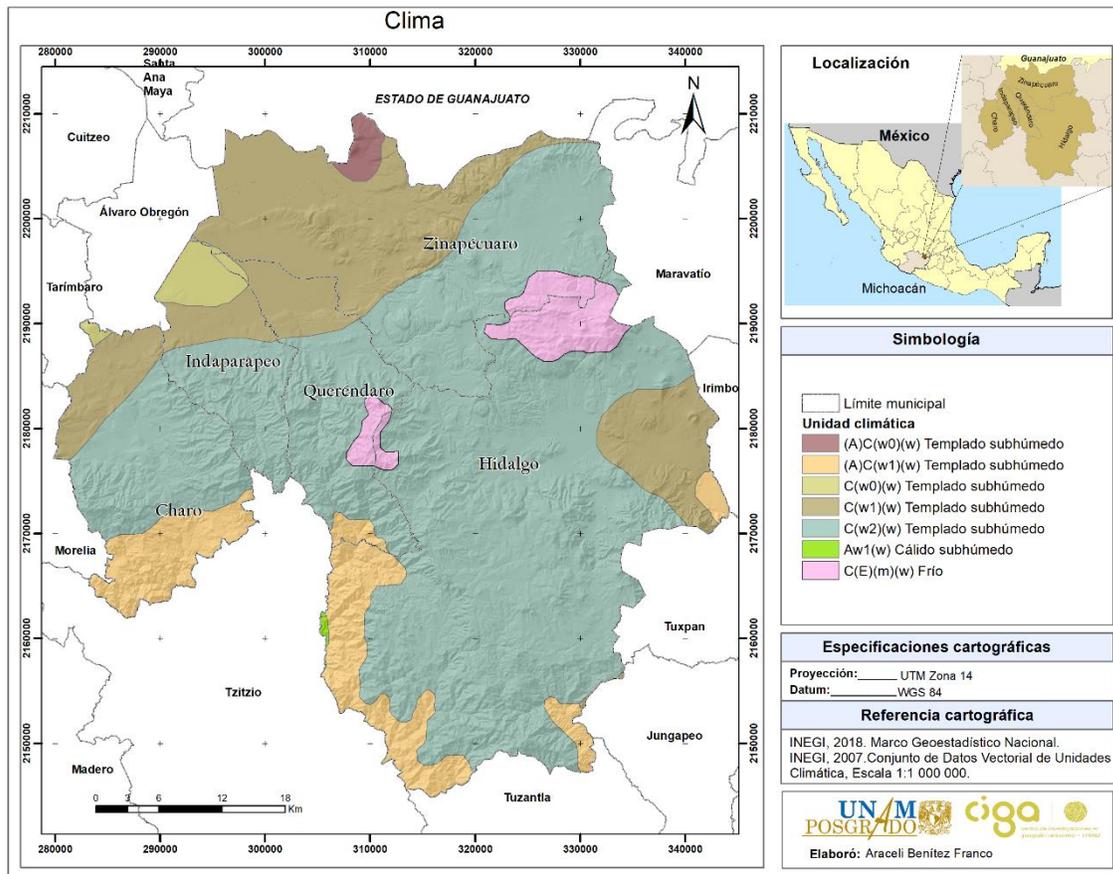
Mapa 2.- Tipos de suelo en el área de estudio.

## 2.2 Clima

El clima está determinado por varios factores, entre los que se encuentran la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica, las diversas condiciones atmosféricas y la distribución existente de tierra y agua (Servicio Meteorológico Nacional, 2010).

En el área de estudio cuenta con 7 unidades climáticas (Mapa 3), en general el clima es templado subhúmedo es el que más se presenta, en este tipo de clima las temperaturas van entre 10° y 18° C y de 18° a 22°C. Sin embargo, en algunas regiones puede disminuir a menos de 10°C; registra precipitaciones de 600 a 1,000

mm en promedio durante el año (Servicio Meteorológico Nacional, 2010). Solo en pequeñas proporciones del territorio se tiene un clima frío y cálido.



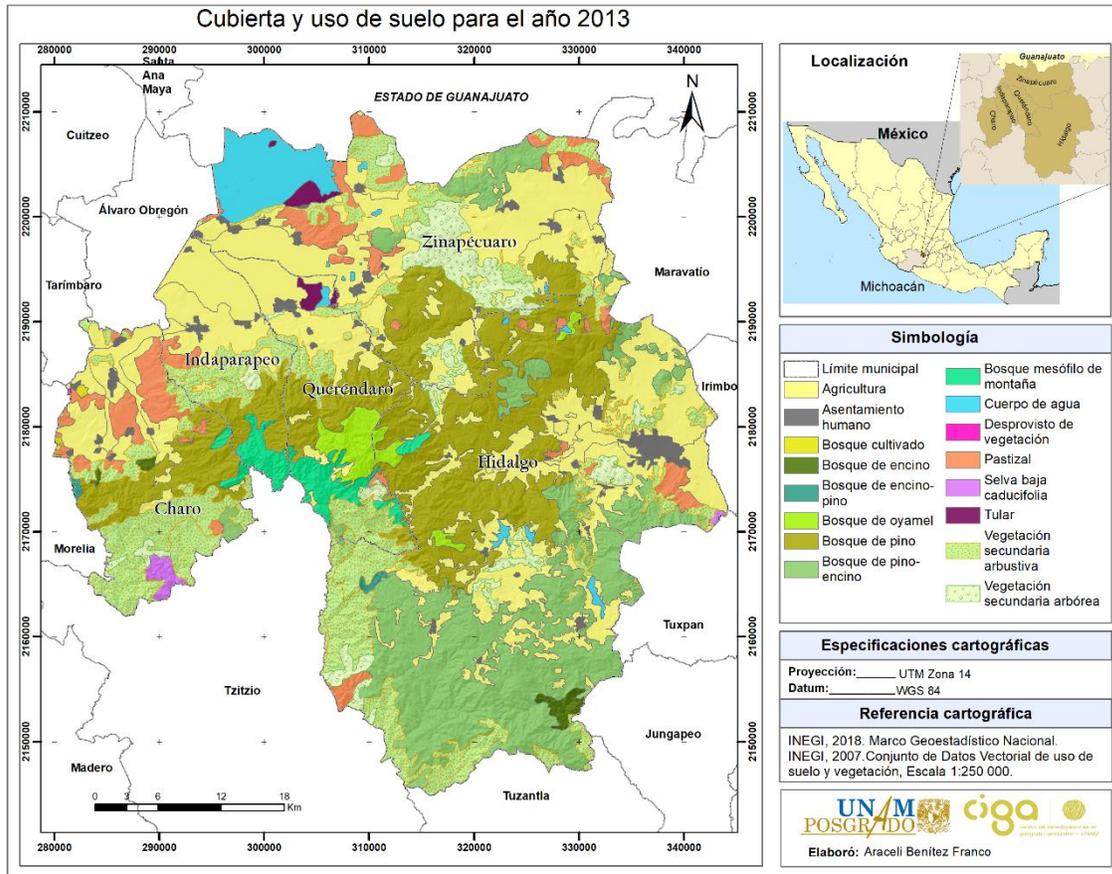
Mapa 3.- Clima.

## 2.3 Vegetación

La vegetación del área de estudio (Mapa 4) se compone de bosque de encino, pino, oyamel, pino-encino, encino-pino; también cuenta con una gran variedad de vegetación secundaria arbustiva, vegetación secundaria arbórea, pastizales y con pequeñas áreas de tulares (INEGI, 2013).

Existe en la parte norte del área de estudio la concentración de agricultura tanto temporal como permanente, cabe señalar que el mapa muestra como la cubierta

forestal es la que se encuentra en mayor proporción respecto a otras cubiertas vegetales.



Mapa 4.- Cubierta vegetal y uso de suelo 2013.

## **CAPÍTULO III**

### **3. . MARCO CONCEPTUAL**

### **3.1 La importancia de los bosques**

Para este estudio es necesario resaltar la importancia de los bosques, puesto que además de ser beneficiosos para el medio ambiente y la sociedad, también influyen en la percepción y estética del paisaje.

Los bosques brindan importantes beneficios ambientales como la reducción de la contaminación atmosférica; aumentan la absorción de agua y la recarga de acuíferos, controlando posibles inundaciones en tiempo de lluvias, regulan la calidad del agua por medio de sus raíces y evitan la erosión de suelo. Este ecosistema ofrece un hábitat a fauna, vegetación y ofrece oxígeno a los seres vivos a cambio de dióxido de carbono. Su presencia en el planeta contribuye al equilibrio del clima y de otros ecosistemas.

Los usuarios de los bosques han reconocido que éstos suministran un amplio rango de beneficios ambientales, adicionalmente a los bienes valiosos como madera, fibras, leña, plantas comestibles y medicinales y recreación (Franquis *et al.*, 2003). La existencia de zonas forestales en el mundo, son indispensables para los seres vivos, es por ello por lo que al ubicar dichas zonas y ver en qué situación se encuentran, se podría dar un adecuado manejo y preservarlas.

### **3.2 Las causas de la deforestación**

La deforestación en términos generales se define como la conversión de tierras forestales a otros usos, como los agrícolas, actividades mineras, y el desarrollo de infraestructura (Keipi, 2000).

Las causas de la deforestación cambian a lo largo del tiempo y de las regiones. La deforestación y el abandono de la selva surgieron con los sistemas agrícolas nómadas (tumba-roza-quema), más tarde apareció el monocultivo de especies

introducidas, el cultivo de pastos para alimentación de ganado y el cultivo tecnificado de grandes extensiones (Guevara *et al.*, 2004).

En la actualidad la deforestación tiene que ver con la explotación forestal, la apertura de campos de cultivo y potreros, el desarrollo de infraestructura urbana y de comunicaciones, como la construcción de carreteras, de presas, caminos, explotación petrolera, viviendas, y desde luego los fenómenos naturales entre los cuales destacan los incendios, las inundaciones, los deslizamientos de tierra y los huracanes, entre otros (Geist y Lambin, 2001, 2002, citado por Franquis *et al.*, 2003). Cabe señalar que los incendios también pueden ser de origen antrópico, provocados para aumentar la productividad de los pastos del sotobosque que se utilizan para el pastoreo de ganado o para reclamar los árboles como madera muerta en áreas que no tienen permisos de aprovechamiento. La tala clandestina de madera y la apertura de tierras para la agricultura comercial son también factores importantes de pérdida del recurso forestal (Maser, 1996).

La deforestación es una problemática global, sin embargo, en los últimos años se le ha dado importancia significativa al tema y existen programas que se realizan acciones para un manejo forestal sustentable, un ejemplo de ello REDD+, el cual tiene como objetivo reducir, detener y revertir, la pérdida de bosques y la pérdida de carbono.

### **3.3 La deforestación como proceso espacial**

En Geografía, el estudio de la interacción espacial ha servido como pieza clave para entender el funcionamiento de diversos procesos geográficos en los que participa la actividad humana. En particular las interacciones entre las áreas forestales y las actividades que ocasionan la pérdida de la cubierta forestal (tala ilegal, expansión de la frontera agrícola, entre otras.), pueden ser estudiadas con base al análisis de la evolución en el tiempo de las relaciones espaciales (Morales, 2013), entre estas áreas de cubierta forestal, y la accesibilidad vial y topográfica, la proximidad a

asentamientos humanos, la pendiente del terreno, la proximidad a zonas con actividades agropecuarias, los niveles de desarrollo económico y la tenencia de la tierra, entre otros elementos del paisaje geográfico .

# **CAPÍTULO IV**

## **4. MARCO METODOLÓGICO**

## 4.1 Metodología

Para abordar el estudio de las interacciones espaciales y dar respuesta a las preguntas de investigación se realiza el siguiente procedimiento metodológico en tres etapas generales:

1. Determinación de la ubicación y características de las zonas forestales que han experimentado deforestación, mediante un estudio de cambio de la cubierta forestal con fotografías aéreas e imágenes satelitales desde 1994 a 2015.
2. Construcción del modelo DEFORELATIONS (Morales, 2013) para la exploración de las relaciones espaciales que intervienen en el proceso de deforestación.
3. Aplicación del modelo DEFORELATIONS para la determinación de la probabilidad de pérdida forestal a futuro.

## 4.2 Materiales utilizados

Para llevar a cabo esta investigación se utiliza software de sistemas de información geográfica y análisis estadístico.

Dentro de los insumos cartográficos se necesita información vectorial, raster y satelital. Enseguida se enlistan cada uno de ellos con su respectiva finalidad de uso:

*Tabla 1.- Insumos cartográficos.*

Insumos			Finalidad de su uso	Fuente
Ortofotos escala 1:75,000 1994:				
E14A13F	E14A14A	E14A14B	Digitalización de las ortofotos para obtener de las capas de caminos, cubiertas y uso de suelo de 1994.	Proporcionadas por el CIGA, UNAM las cuales las adquirieron de INEGI.
E14A14C	E14A14D	E14A14E		
E14A14F	E14A15A	E14A15D		
E14A15E	E14A23B	E14A23C		
E14A23F	E14A24A	E14A24B		
E14A24C	E14A24D	E14A24E		
E14A24F	E14A25A	E14A25B		
E14A25D	E14A25E	E14A34B		
E14A34C	E14A34F	E14A35A		

Insumos	Finalidad de su uso	Fuente
Imágenes spot 5 y 6 de 2014 febrero y marzo: E55843101403072J3A09001 E55843101403072T3A08001 E55843111402252J3A01001 E55843111402252T3A00001 E55853101401092J3A00002 E55853111302152J3A05003 E55853101401092T3A03001 E55853111302152T3A04003	Digitalización de las imágenes para obtener de las capas de caminos, cubiertas y uso de suelo de 2014.	Solicitud de imágenes a la Marina por medio del CIGA, UNAM.
Capa de ríos	Para la construcción la capa de efecto barrera los ríos.	Red hidrográfica escala 1:50 000, INEGI, 2010.
DEM ASTER GDEM	Del modelo digital de elevación se obtiene la capa de pendientes y orientación del terreno.	NASA, 2018.
Imágenes LANDSAT (abarcán la proporción de los 5 municipios para este estudio)	Actualización de las capas del 2014 teniendo como referencia la visualización en Google Earth.	NASA, 2015.

Fuente: *Elaboración propia.*

#### 4.3 Determinación del cambio de uso y cobertura del suelo en zonas forestales

Se elabora la cartografía de los usos y cubierta de suelo de 1994 y de 2015 para identificar los cambios que se han tenido en el transcurso de estas fechas.

Para la clasificación de uso y cobertura del suelo se tienen diferentes criterios para definir las clases. Sin embargo, se debe seleccionar el tipo de clasificación que más convenga a nuestros intereses (PRODEFO, 2003). En este caso particular se considera las siguientes Este último se distingue por la distribución discontinua de los árboles y generalmente hay una cubierta continua de pasto que permite el pastoreo y la propagación de incendios (FAO, 1998).

Estas clases se digitalizan en pantalla (interpretación visual) donde la textura, la forma y resolución de la imagen u ortofoto son elementos claves para este procedimiento. La digitalización de los polígonos se realiza en las ortofotos áreas de INEGI de 1994 y en las imágenes SPOT 5 del 2014 a una escala de 1:20,000,

donde se identificaron las diferentes cubiertas y uso de suelo, esto se realizó en el software de ArcMap. Cuando algunas zonas estaban cubiertas de nubes se utilizó las de SPOT 6 del 2014. En una segunda etapa se actualiza la capa obtenida de las imágenes SPOT con imágenes de Landsat 7 del año 2015, teniendo como referencia la visualización en Google Earth.

Una vez que se tienen estas dos capas de cubierta y uso de suelo se prosigue a determinar el cambio ocurrido entre las dos fechas. Este análisis se realiza poniendo valores a cada tipo de usos y cubiertas de suelo para ambas fechas (Tabla 2), enseguida se realiza una intersección de las dos temporalidades y sumamos los valores que se les asignaron a cada fecha, el resultado de dicha suma muestra si realmente hubo un cambio o no dentro de cada cubierta o uso de suelo.

*Tabla 2.- Determinación de cambios en las usos y cubierta de uso de suelo*

Cubierta o uso de suelo	Valor asignado a la capa de 1994	Valor asignado a la capa de 2015	No se tiene cambio	Si hay un cambio
Asentamiento humano	10	1	11	Si el valor es distinto a la columna anterior se tiene un cambio en la cubierta o uso de suelo
Bosque	20	2	22	
Bosque abierto	30	3	33	
Cuerpo de Agua	40	4	44	
Cultivo anual	50	5	55	
Cultivo permanente	60	6	66	
Lirio acuático	70	*	70	
Matorral-pastizal	80	7	88	
Sin vegetación aparente	90	8	98	
Tular	100	9	109	
* En esta no se le asigno valor ya que en el año 2015 no se tuvo esta cubierta de suelo				

*Fuente: Elaboración propia.*

Después se efectúa la agrupación de cada categoría de cubierta y uso de suelo con base a los resultados de las sumatorias, para obtener las zonas de cambio en las cubiertas y usos de suelo dentro del área de estudio, principalmente en las cubiertas forestales que son el enfoque en esta investigación.

#### **4.4 Construcción del modelo DEFORELATIONS**

El modelo DEFORELATIONS es un modelo exploratorio y predictivo que estima la probabilidad de deforestación considerando como parámetros las relaciones espaciales locales identificadas como relevantes a partir de los patrones de cambio en la cubierta forestal (Morales, 2013). Este modelo se debe de construir dependiendo del contexto de la zona de estudio, puesto que cada lugar tiene sus características geográficas particulares, y por lo tanto la estimación de la probabilidad de deforestación dependerá de los patrones que se estén presentando en dicho lugar. Por lo tanto, no puede haber un solo modelo de DEFORELATIONS aplicable a todos los lugares (y complementariamente, ni un solo modelo aplicable a cualquier período de tiempo).

El siguiente gráfico ilustra síntesis de la estructura del modelo DEFORELATIONS que se emplea en esta investigación y se enmarcan las fases importantes para su desarrollo que son relevancia, influencia y ponderación.

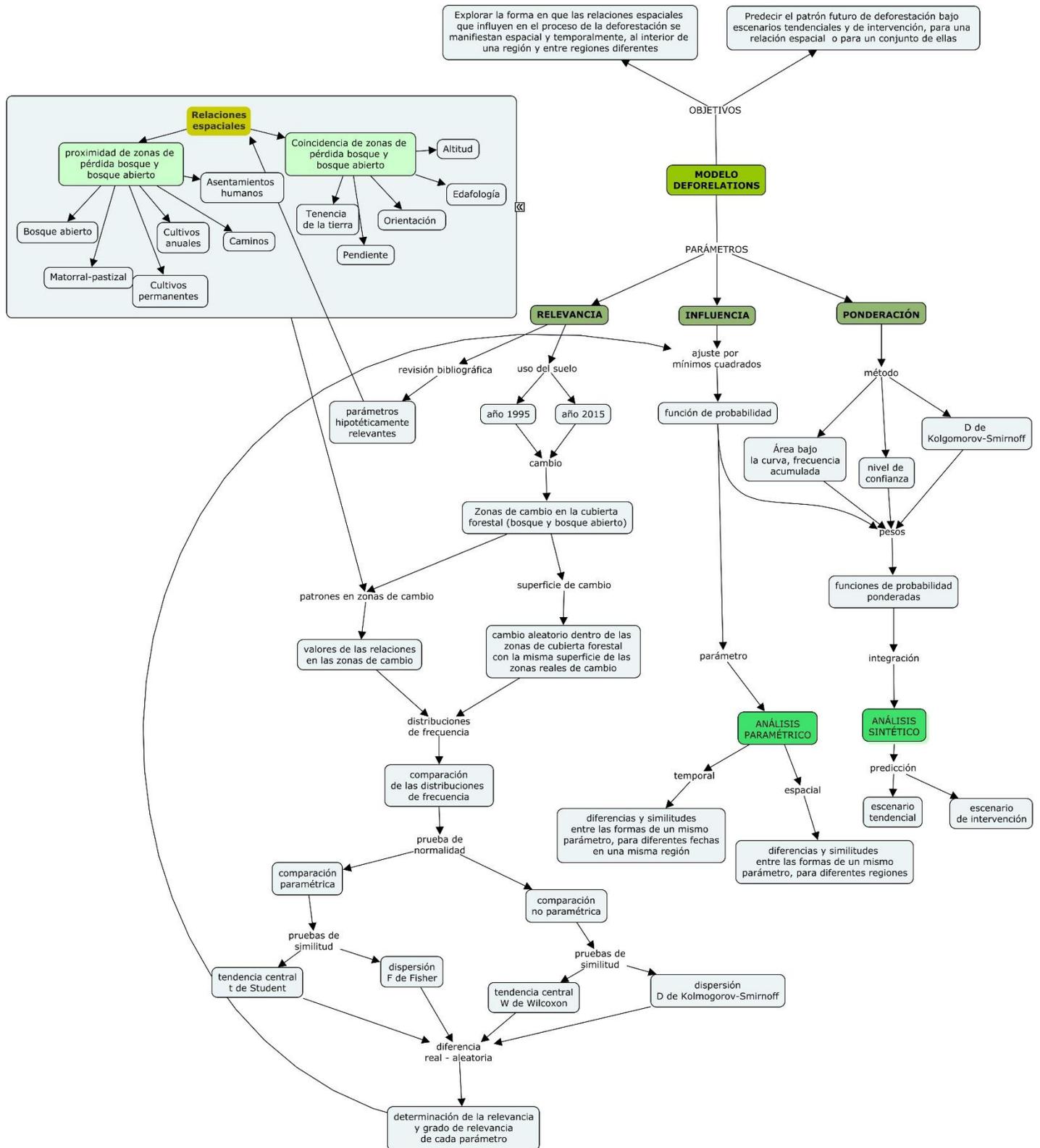


Gráfico 1.- Estructura del modelo DEFORELATIONS, modificado a partir de Morales (2013).

A continuación, los siguientes apartados describen a detalle el gráfico anterior.

#### 4.4.1 Etapas del modelo DEFORELATIONS

Para llevar a cabo la aplicación del modelo DEFORELATIONS es importante el desarrollo de las siguientes fases:

- Determinación de la relevancia de las relaciones espaciales para la identificación de los parámetros del modelo.
- Definición de los parámetros del modelo a partir de las relaciones espaciales que resulten *relevantes* en el proceso de pérdida forestal.
- Determinación de las funciones de probabilidad de cada factor, o relación espacial definida como relevante, es decir, las funciones que definen la forma en que *influyen* los valores de los parámetros en la probabilidad de deforestación.
- Especificación de los pesos (*ponderación* de las relaciones espaciales) que establecen el grado de contribución de cada parámetro en el proceso de pérdida.
- Aplicación del modelo: modo paramétrico (un parámetro a la vez) y modo sintético (todos los parámetros en conjunto y ponderados).

Por lo tanto, las etapas del modelo en general, se resumen en tres fases: relevancia de las relaciones espaciales para el proceso de deforestación, influencia de los valores de las relaciones espaciales en el proceso de deforestación, y ponderación de las relaciones con base a que tanto contribuyen a la pérdida forestal.

Es pertinente mencionar que en el estudio en particular se considera la deforestación en bosque y bosque abierto, por lo cual la metodología del modelo DEFORELATIONS se aplica para ambos casos.

#### 4.4.1.1 Determinación de la relevancia

Para determinar las relaciones espaciales relevantes para el modelo DEFORELATIONS, es necesario generar los siguientes insumos:

- Obtención de la capa de pérdida forestal real mediante interpretación del cambio de uso del suelo a partir de imágenes y fotografías, y la generación de un raster con píxeles aleatorios mediante simulación de la posición de la misma cantidad de superficie con pérdida forestal, pero con una distribución teórica (aleatoria con distribución uniforme).
- Elección *a priori* de las relaciones espaciales a utilizar, basada en literatura o en conocimiento propio.
- Para las relaciones de proximidad, construcción de la capa de costo-distancia que permita el cálculo de distancias efectivas en lugar de euclidianas.
- Cálculo de distancia mínima desde cualquier lugar dentro de una zona de cubierta forestal a cada uno de los elementos con los cuales existen relaciones espaciales hipotéticas: asentamientos humanos, caminos, zonas con agricultura permanente, zonas con agricultura de cultivos anuales, zonas con cubierta de matorral-pastizal.
- Combinación de las capas de proximidad obtenidas anteriormente con las capas de información sobre las distribuciones real y aleatoria de la pérdida forestal.
- Para las relaciones de coincidencia, combinación de las capas de las distribuciones real y aleatoria de pérdida forestal con las capas de los elementos con los cuales existen relaciones espaciales hipotéticas: pendiente, orientación de laderas, edafología, altitud, tenencia de la tierra.

En la siguiente tabla se resume estos insumos cartográficos y su obtención. modelo, se obtuvo los siguientes insumos base:

Tabla 3.- Insumos cartográficos para el modelo DEFORELATIONS.

Insumo cartográfico	Descripción	Fuente y explicación de cómo se obtiene	Escala de interpretación /Resolución
<b>Pérdida de bosque y bosque abierto real</b>	Es el resultado de la resta de cubierta de 1994 menos lo que se tiene en año de 2015.	Elaboración propia a partir de fotografías áreas de 1994 de INEGI e imágenes SPOT 2014 con actualización de LANDSAT 2015.	Fotointerpretación a 1:20,000 / Convertidas a raster con un tamaño de celda de 30 m.
<b>Pérdida de bosque y bosque abierto aleatoria</b>	Estas capas representan una simulación donde la deforestación se diera en cualquier parte del bosque o bosque abierto sin que dependa de algún factor detonante.	Elaboración propia a partir de cada capa raster de pérdida de bosque y bosque abierto convirtiendo en punto cada celda y distribuyendo aleatoriamente en las capas de bosque y bosque abierto de 1994.	Raster con una celda de 30 m.
<b>Capa de costo</b>	Es la barrera natural que se presenta en la superficie de un territorio en este caso se tomó los ríos como barrera la cual se combinó con la capa de caminos para establecer en donde estas barreras se vuelven franqueables y con ello obtener la capa de costo.	Elaboración propia a partir de los ríos de la red hidrográfica, INEGI, 2010 y de la capa de caminos de 1994 elaborada por medio de fotografías áreas de 1994. Para la construcción de la capa de costo se condicione que solo de valor No Data a lo que funcione como barrera en este caso a los ríos y con valor 0 donde no represente una barrera como lo es la superficie del área de estudio y a la intersección de caminos con ríos.	Raster con una celda de 30 m.
<b>Asentamientos humanos, cultivo permanente, cultivo anual, matorral pastizal, caminos</b>	Son las capas con las que se aplicará la relación espacial de proximidad a zonas deforestadas.	Elaboración propia a partir de fotografías áreas de 1994 de INEGI.	Fotointerpretación a 1:20,000 / Convertidas a raster con un tamaño de celda de 30 m.
<b>Orientación</b>	Representa hacia donde están orientadas las pendientes.	Elaboración propia a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) del satélite ASTER, 2018. Se mide en el sentido de las agujas del reloj en grados de 0 (hacia el norte) a 360 (hacia el norte, nuevamente), formando un círculo completo. Las áreas planas que no tienen dirección de pendiente descendente tienen un valor de -1.	Raster con una celda de 30 m.
<b>Altitud</b>	Es la distancia vertical que existe entre cualquier punto de la superficie de nuestra área estudio en relación al nivel del mar.	Elaboración propia a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) del satélite ASTER.	Raster con una celda de 30 m.
<b>Suelos</b>	Diferentes tipos de suelo que se tienen el área de estudio	Capa vectorial de INEGI, 2007.	Raster con una celda de 30 m.
<b>Tenencia de la tierra</b>	El régimen legal en el que se encuentra la propiedad de una tierra.	Registro Agrario Nacional, 2018.	Raster con una celda de 30 m.

Fuente: Elaboración propia.

Los insumos anteriores se obtienen en primera instancia en formato vectorial, pero para realizar los cálculos de las relaciones espaciales es necesario convertir todos ellos en raster con un tamaño de celda de 30 metros.

Con todo lo anterior mencionado, se prosigue a elegir las relaciones relevantes por medio de pruebas estadísticas. Enseguida se describe cada paso para realizar esta fase del modelo.

#### **4.4.1.1.1 Obtención de las capas de las distribuciones de la pérdida forestal real y aleatoria**

Según el modelo DEFORELATIONS se debe crear una capa de la distribución de zonas de pérdida forestal real y una capa de distribución aleatoria correspondiente. La primera se obtiene haciendo una resta espacial de la fecha anterior de una capa de cubierta forestal (bosque) a una capa de cubierta forestal de la fecha más actual que se tenga. La capa de pérdida forestal aleatoria se obtiene creando una simulación de la posición aleatoria (con distribución uniforme y no con distribución gaussiana) de la misma cantidad de superficie de pérdida forestal, esto es como si la deforestación se diera en cualquier parte del bosque sin que dependa de algún factor específico. Este procedimiento se obtiene contando el total de celdas (en una capa raster) que se tiene de pérdida forestal en la distribución real y el dato de superficie total de bosque de la fecha de 1994. Enseguida se calcula para cada polígono en la capa de bosque de 1994 su superficie, y se procede a realizar la obtención de cuántos puntos aleatorios de pérdida forestal deberían ser distribuidos aleatoriamente en cada polígono de bosque, con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{área de cada polígono de bosque} * \text{número de celdas de pérdida de bosque}}{\text{área total de bosque}}$$

Posteriormente, se genera la capa de puntos distribuidos, con una herramienta SIG de creación de puntos aleatorios, en toda la extensión de nuestro bosque de 1994.

Con los puntos distribuidos de manera aleatoria, el paso siguiente es convertirlos a una capa raster, y así es como se obtiene la capa de distribución de pérdida forestal aleatoria requerida en el modelo.

#### **4.4.1.1.2 Elección de las relaciones espaciales que hipotéticamente influyen en el proceso de pérdida forestal**

Cuando consideramos el tiempo para un análisis de cambio, es esencial incorporar técnicas que enfatizan no solo los efectos que producen un cambio, si no también el análisis de los patrones que se presentan en donde este cambio sucede.

Para el análisis a partir de patrones es necesario determinar, a priori, cuáles son las relaciones espaciales que podrían explicar la interacción entre los eventos en un determinado lugar. Esto se puede hacer mediante una búsqueda en literatura sobre el tema o con la experiencia y el conocimiento propio al respecto.

Las relaciones espaciales sirven principalmente para investigar la magnitud o intensidad de una interacción entre diferentes eventos espaciales, ya sea para medir, calcular o estimar el nivel de interacción entre estos mismos.

Las clases de relaciones espaciales que podemos encontrar en el espacio-tiempo son proximidad, orientación, exposición, adyacencia, contención, coincidencia, conectividad, agregación y asociación (Morales, 2014). En cada situación, dependiendo los objetivos de un estudio en determinado espacio, es posible que no todas estas clases de relaciones espaciales sean relevantes. De ahí la importancia de considerar inicialmente en los alcances o resultados que se plantean obtener.

Para esta investigación se utilizaron relaciones espaciales de proximidad, que se utilizan para analizar el efecto de la separación entre eventos espaciales. En lo que respecta a las relaciones de proximidad, se calculan con la distancia existente entre las zonas de pérdida forestal y los asentamientos humanos, los caminos, los cultivos

anuales y los permanentes, las zonas de matorral- pastizal y las de bosque abierto, de manera individual este último solamente para el caso de pérdida de bosque estrictamente hablando.

También se emplean relaciones de la clase de relaciones espaciales de coincidencia, con las que se investiga la posible interacción entre eventos que comparten el mismo espacio al mismo tiempo.

Las relaciones de coincidencia para la zona de estudio se analizan mediante la combinación de las capas de zonas de pérdida de bosque con las capas de los elementos espaciales de altitud, pendiente y orientación del terreno, suelos y tenencia de la tierra, de manera individual.

#### **4.4.1.1.3 Construcción de la capa de costo**

En el cálculo de las relaciones por proximidad se debe considerar que el espacio en donde se calcula la separación entre eventos no es lineal, es decir el espacio no es euclidiano, sino que existen varios elementos geográficos, algunos de los cuales actúan como elementos de fricción, incrementando la distancia, y otros actúan como barreras, limitando de forma absoluta la posibilidad de movimiento a través de ellas, con lo que el valor de la distancia se incrementa todavía más. Uno de estos elementos del espacio geográfico que actúan como barreras para muchas de las actividades humanas son los ríos con régimen hidrológico perenne. En este caso los ríos funcionan como barreras para que no se presente o en cierta manera se limite el proceso de deforestación. Por ello es necesario construir una capa de costo donde se condicione que únicamente existan valores de distancia en las porciones de terreno en donde no existan ríos, mientras que en donde hay un río se requiere analizar si existe un camino con un puente que facilite el movimiento a través de esas zonas. Este procedimiento es importante para obtener la distancia mínima efectiva para cada relación de proximidad a analizar y así las distancias mínimas efectivas dentro de cada zona con pérdida forestal.

#### 4.4.1.1.4 Cálculo de distancia mínima y multiplicación

Ya obtenida la capa de costo de accesibilidad, con ella se procede a realizar el cálculo de distancia mínima para cada una de las variables de la fecha anterior, el año 1994 en este estudio, (asentamientos humanos, caminos, cultivos anuales y permanentes, matorral- pastizal y bosque abierto) a analizar, para así obtener las capas de costo-distancia de cada variable. Esta distancia mínima está calculada desde todas las porciones de territorio en el área de interés (celdas raster) a los límites de las zonas que representan a los elementos para los cuales se calculan las relaciones de proximidad antes mencionados. Es importante que todos los insumos estén en formato raster con un tamaño de celda de 30 metros.

El segundo procedimiento es hacer una multiplicación de cada una de las capas resultantes con la capa de la pérdida forestal real y con la de pérdida forestal aleatoria (estas últimas dos capas son capas raster con valores de celda de 1 para las zonas en donde hay pérdida forestal real o hipotética). Enseguida se muestra un ejemplo:

$$\begin{aligned} & \textit{Pérdida forestal real} * \textit{costo distancia mínima a asentamientos humanos} \\ & = \textit{Proximidad de zonas de pérdida forestal real a asentamientos humanos} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \textit{Pérdida forestal aleatoria} * \textit{costo distancia a asentamientos humanos} \\ & = \textit{Proximidad de zonas de pérdida forestal aleatoria a asentamientos humanos} \end{aligned}$$

Es importante destacar que la obtención de la distancia mínima solo se utiliza para obtener las relaciones de proximidad. En el caso de las relaciones de coincidencia, solamente se obtiene con la multiplicación directa de las capas de pérdida forestal real y aleatoria con cada una de las variables (altitud, pendiente y orientación del terreno, suelos y tenencia de la tierra) a analizar para obtener esta relación espacial.

Con las capas resultantes para ambas clases de relaciones espaciales se hace una reclasificación de manera que los intervalos de clases de cada relación espacial tanto en la capa aleatoria como real sean los mismos rangos, ya que esto servirá para comparar las distribuciones de cada evento en histogramas de frecuencia.

#### **4.4.1.2 Elección de las relaciones espaciales relevantes (parámetros)**

En esta etapa se evalúa la relevancia de las relaciones espaciales analizadas mediante pruebas estadísticas, con la finalidad de identificar cuáles se incluirán en el modelo como parámetros, es decir que tan significativa parece ser su contribución al proceso de deforestación.

El primer paso es la generación de histogramas de frecuencia para las relaciones espaciales de las capas de pérdida forestal real y aleatoria con los diferentes elementos espaciales. En la comparación de los histogramas para las distribuciones real y aleatorio es posible distinguir inicialmente si la relación analizada tiene posibilidades de ser relevante o no dentro del proceso de deforestación. Si los histogramas de frecuencia de ambas distribuciones son muy similares, esto quiere decir que, hipotéticamente, la distribución de pérdida forestal dada por la relación analizada probablemente no sea relevante; si por el contrario ambas distribuciones difieren notoriamente, entonces la posibilidad de que la relación en cuestión sea relevante será muy fuerte, puesto que no se parece a un proceso aleatorio de pérdida forestal.

Enseguida, se realizan pruebas de normalidad de las distribuciones de frecuencia real y aleatoria, para conocer si la comparación estadística de ambas debe hacerse con pruebas estadísticas paramétricas (si ambas resultan normales) o no paramétricas (si ambas o una de las dos no tienen distribuciones normales). Para determinar si la distribución es normal se utilizan los estadísticos de sesgo y curtosis estandarizados. Los valores de estadísticos fuera del rango entre -2 a +2 indican negativa prueba, es decir la distribución no puede considerarse como normal.

Dependiendo el resultado de las pruebas de normalidad, serán las pruebas estadísticas de comparación de distribuciones que se apliquen. Para el caso de que ambas distribuciones sean normales, se comparan tanto las tendencias centrales como las dispersiones de las distribuciones mediante la prueba T de Student la cual distingue si las tendencias centrales son similares (es decir que tanto se asimilan en las medias), y la prueba F de Fisher, que sirve para detectar si el cociente de la desviación estándar es igual o diferente en las distribuciones.

En el caso de que las pruebas de normalidad resultan ser negativas para una o ambas distribuciones, se efectúan las pruebas W de Mann – Whitney (Wilcoxon), para comparar si las medianas de las distribuciones de los datos son similares, y DN de Kolmogorov – Smirnov, para determinar si son similares en la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas.

Con estas pruebas se evalúa la similitud de los valores de la distribución real y aleatoria de cada relación, esto para comprobar su relevancia para el modelo. Sí en los resultados obtenidos se encuentran diferencias significativas en las dos pruebas, es decir se rechaza la hipótesis nula (el nivel de confianza usualmente es de 95 %, aunque puede alejarse), la relación se toma como un parámetro para nuestro modelo DEFORELATIONS.

Cuando la diferencia significativa solo se da en una de las dos pruebas estadísticas, se puede optar por elegir o no la relación espacial para considerarla como parámetro. En la práctica esto quiere decir que la contribución de esta relación al proceso de deforestación no es tan clara, o espacialmente si lo es en algunas porciones del territorio bajo estudio, pero en otras no.

En este caso particular se tomarán los niveles de relevancia:

- 95 % si  $P \leq 0.05$ , la relación es muy relevante.
- 85% si  $P \geq 0.05$  pero  $P \leq 0.15$ , la relación es relevante.

- 75 % si  $P \geq 0.15$  pero  $P \leq 0.25$ , la relación es suficientemente relevante.

P = significancia estadística de un evento o probabilidad de que la hipótesis nula sea falsa.

Por último, en el caso que no haya diferencias estadísticamente significativas en las distribuciones real y aleatoria de la relación espacial (al nivel de confianza mínimo definido arriba), ésta se considera no relevante, y definitivamente se descarta del modelo. De aquí en adelante, las relaciones espaciales que resultan relevantes se consideran como parámetros del modelo.

#### **4.4.1.3 Determinación de la influencia**

Para determinar la influencia se considera solo aquellas relaciones espaciales que resultaron relevantes (parámetros del modelo). El siguiente paso es designar a cada parámetro una función matemática que mejor describa la probabilidad de deforestación.

La influencia de los valores de un parámetro tiene la forma de una función de probabilidad, y se obtiene mediante un procedimiento de ajuste de una curva por mínimos cuadrados. De este modo se encuentra la ecuación que se ajuste más a la distribución probabilística del parámetro relevante que se esté analizando, es decir aquella que describa de mejor manera la distribución de los datos y su tendencia.

Como es posible elegir múltiples funciones con ajuste aceptable, se selecciona la de mínimo número de términos y con el mayor  $R^2$  ajustado, de manera que la ecuación se pueda ejecutar con relativa facilidad en el modelo mediante un SIG.

#### **4.4.1.4 Ponderación de los parámetros relevantes**

Una vez estimada la influencia, o bien las funciones matemáticas que la describen, se asignan pesos a cada uno de los parámetros relevantes de modo que la suma

de los pesos de igual a 1. Estos pesos indican que cada una de las relaciones contribuyen en magnitudes diferentes en el proceso de deforestación.

Los pesos se asignan en las ecuaciones, utilizando los estadísticos DN de una prueba de Kolmogorov – Smirnov (ya sea que ya se haya obtenido previamente en el caso de que las pruebas aplicadas anteriormente fueron no paramétricas, o que se apliquen para cuando ambas distribuciones resultaron normales), de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Valor del estadístico DN de cada parámetro relevante}}{\text{suma total de los estadísticos DN de todos los parámetros relevantes}}$$

Los valores estadísticos de DN se obtienen con las pruebas estadísticas de Kolmogorov-Smirnov, las cuales se obtuvieron de comparar las distribuciones real y aleatoria de la pérdida forestal en las pruebas no normales. Pero, si las distribuciones de los parámetros relevantes resultaron normales, entonces se realiza el análisis para obtener dicho valor estadístico de DN. La lógica de ponderar mediante este procedimiento se basa en que mientras mayor sea la distancia entre las distribuciones estadísticas acumuladas de las distribuciones real y aleatoria de pérdida forestal, la contribución de la relación es menos aleatoria y por lo tanto mayor contribución o peso debe tener en el modelo de predicción de la pérdida forestal.

#### **4.4.1.5 Aplicación del modelo**

Con la obtención de dichos pesos para cada parámetro, el paso final es la construcción del modelo de probabilidad de deforestación de bosque y otro para la deforestación de bosque abierto. Para esta construcción del modelo se tiene dos modos de obtener resultados:

- Modo paramétrico
- Modo sintético

#### **4.4.1.5.1 Modo paramétrico**

Con las funciones matemáticas ya elegidas que establecen la probabilidad de deforestación según cada parámetro de forma individual, se aplican para cada parámetro relevante en el programa de SIG, obteniendo como resultante un mapa de probabilidad de deforestación específico de cada parámetro.

Puesto que, en este trabajo, solamente resultaron relevantes algunas de las relaciones de proximidad y ninguna de las de coincidencia, es importante resaltar que en esta etapa se tiene que hacer el cálculo de cada capa de los parámetros del modelo para obtener una capa de distancia 2015, puesto que se trata de predecir la probabilidad de deforestación de áreas de bosque o bosque abierto en ese año o a futuro.

Específicamente son solo estos dos casos:

Distancia a bosque 2015 a cada parámetro del modelo del 2015

Distancia a bosque abierto 2015 a cada parámetro del modelo del 2015

El número y tipo de los parámetros dependerá del resultado de la relevancia de cada relación espacial. Además, se usa una capa de costo, pero ahora utilizando los caminos del 2015 conjuntamente con una capa de ríos 2010.

#### **4.4.1.5.2 Modo sintético**

Para el modo sintético se realiza una suma, mediante el procedimiento de combinación lineal ponderada, de todos los parámetros relevantes considerando la ponderación de cada parámetro relevante es decir el resultante de cada ecuación e integrando a cada uno sus pesos correspondientes:

$$PD = WiPi + Wi_{+1}Pi_{+1} \dots WnPn$$

$PD$  = Probabilidad de deforestación de la cubierta forestal

$W_i$  = Peso del parámetro  $i$ ,  $i = 1 \dots n$

$P_i$  = Parámetro (es decir la relación espacial relevante para el modelo resultante de la ecuación elegida)

Obteniendo como resultados finales un mapa de probabilidad integral de pérdida forestal tanto para el bosque como para el bosque abierto.

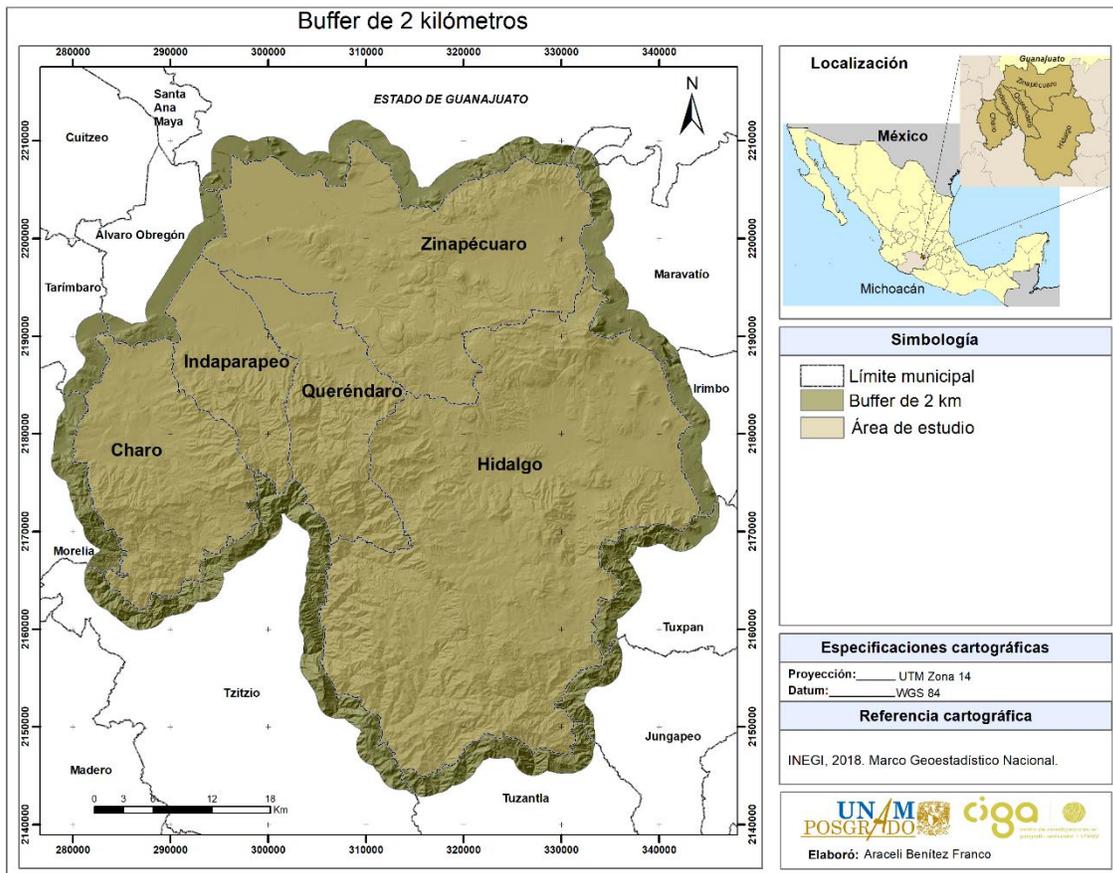
# CAPITULO V

## 5. Resultados

## 5.1 Áreas de cambio en los bosques de 1994 a 2015

Para la obtención de las áreas de cambio en los bosques primeramente se elaboró la cartografía base de la zona de estudio, sobre la cual se representa la evolución de las zonas forestales en el período de estudio, y la situación actual de la cubierta forestal.

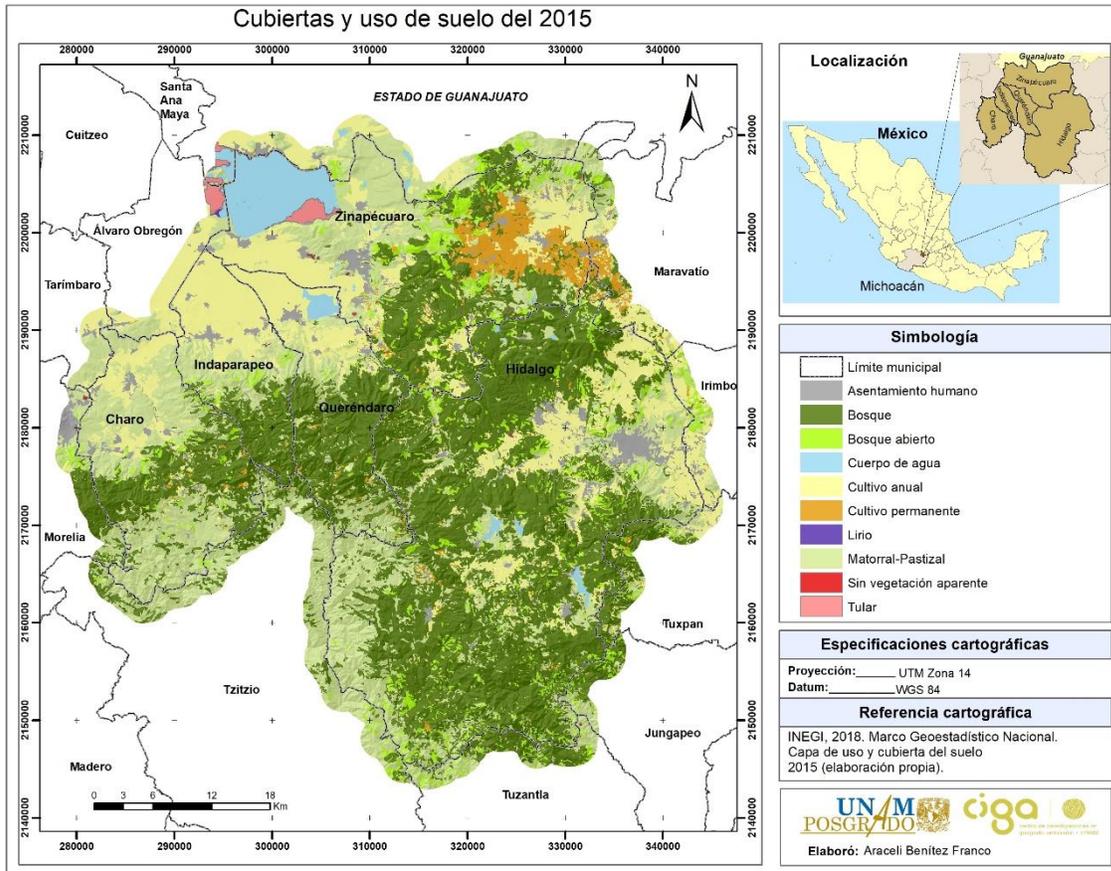
Es importante señalar que para los cinco municipios del área de estudio se generó un buffer de 2 kilómetros (Mapa 5), con la finalidad de que al momento de realizar los análisis para el modelo tener un margen de confiabilidad y evitar el error del efecto límite del análisis espacial.



Mapa 5.- Buffer de 2 kilómetros para obtener el área base de análisis para el modelo.

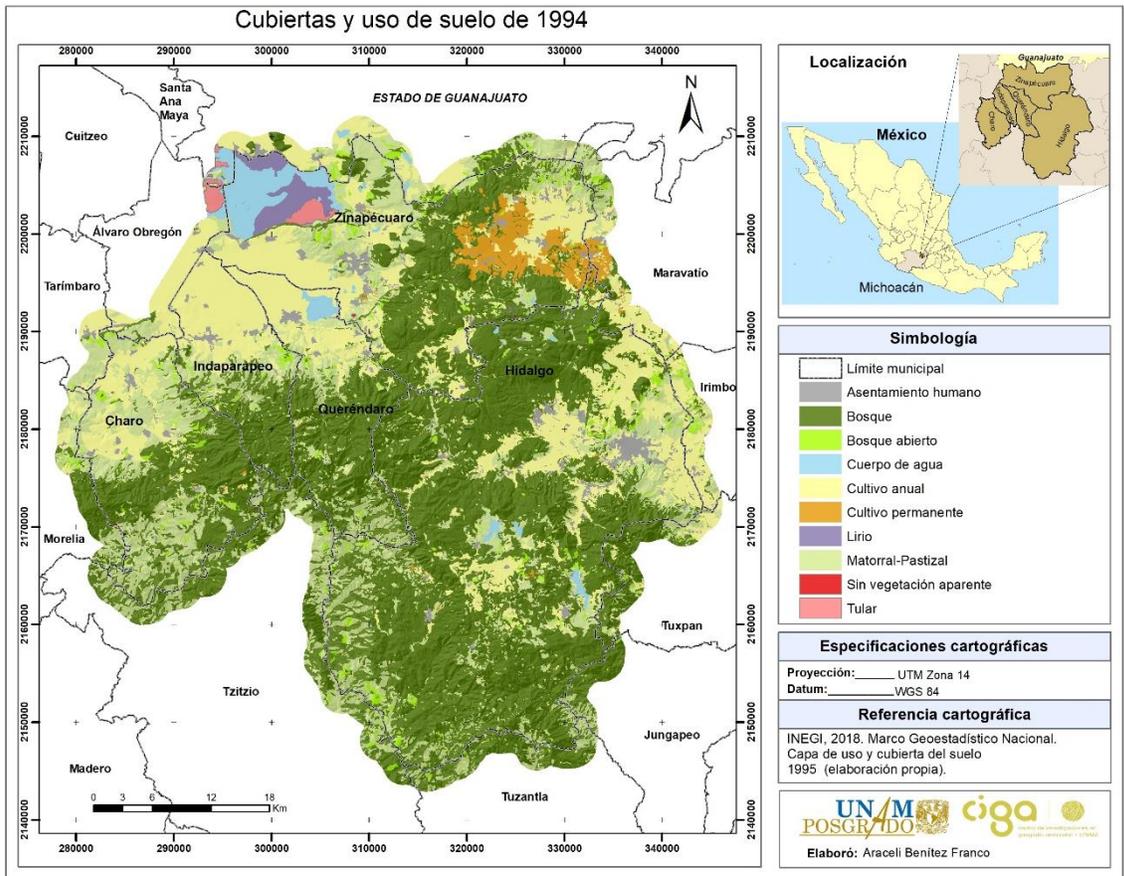
### 5.1.1 Obtención de la cubierta y uso de suelo y caminos

Con los insumos de diferentes imágenes satelitales se logró identificar cada cubierta y uso para el año 2015. Es importante destacar que esta capa se tomó como base para digitalizar la de 1994. Enseguida se muestra el mapa de las cubiertas y uso del suelo del 2015.



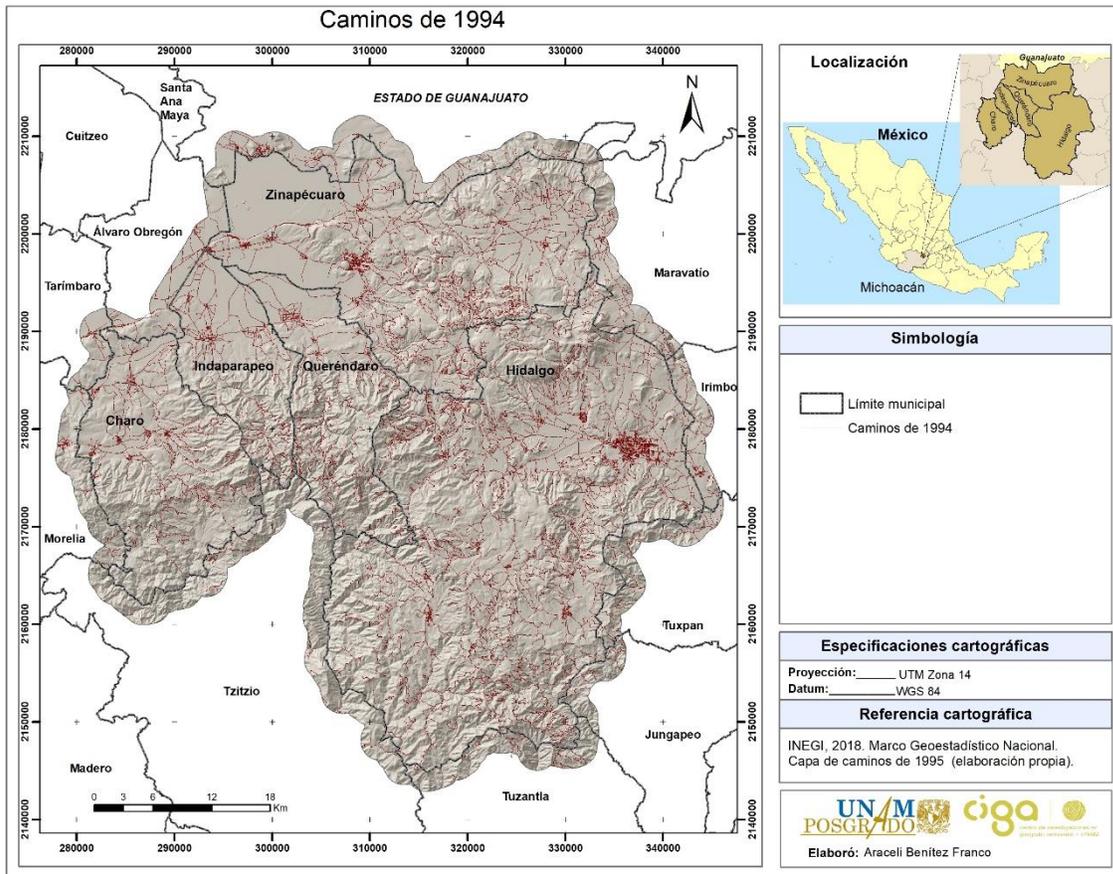
Mapa 6.- Cubiertas y uso de suelo del área de estudio para el año 2015.

En el caso de las cubiertas y uso de suelo de 1994 (ver Mapa 7), la interpretación se efectúa con las ortofotos de INEGI, de igual manera que en las imágenes SPOT, se interpretan las mismas categorías y con la misma escala, esto para tener un punto de comparación entre ambas capas.

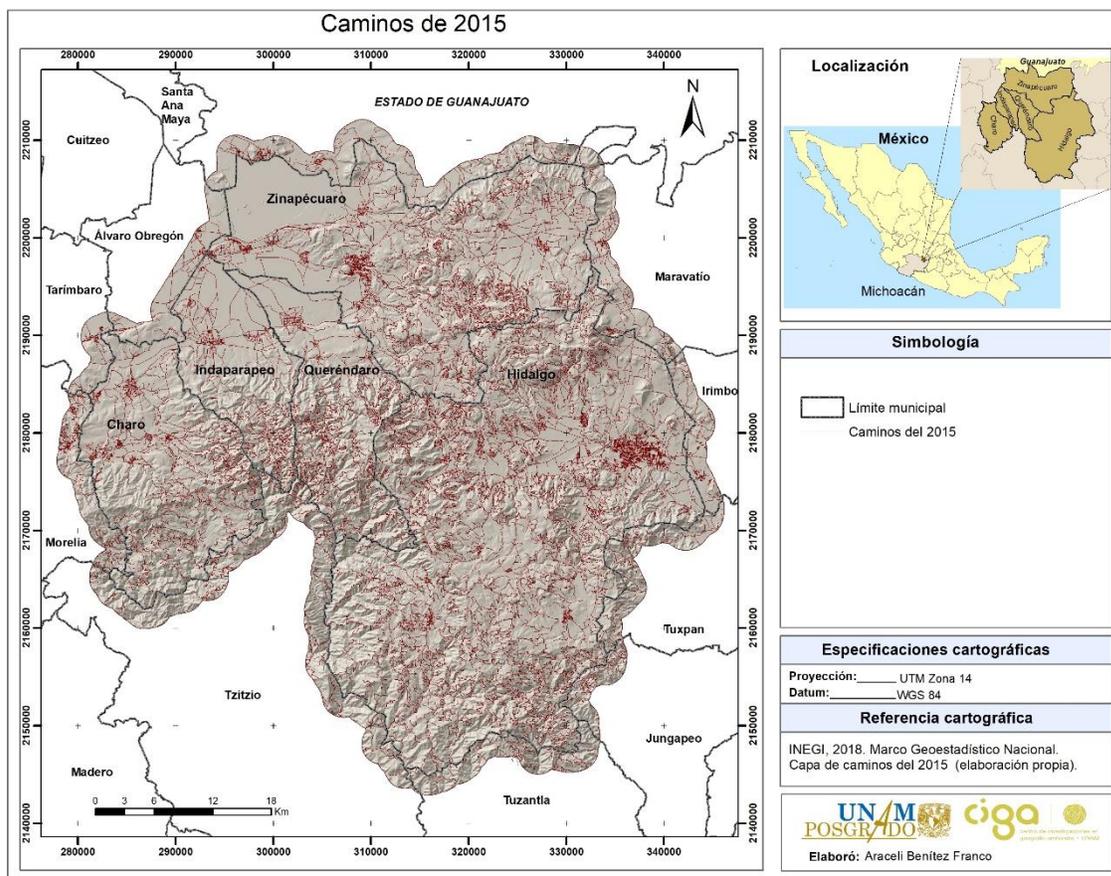


Mapa 7.- Cubiertas y uso de suelo del área de estudio para el año 1994.

De la misma manera que se obtuvieron las capas anteriores, se utilizan los mismos insumos en imágenes satelitales, para obtener la red de caminos de 1994 y 2015 (ver Mapas 8 y 9).



Mapa 8.- Caminos de 1994 en el área de estudio.



Mapa 9.- Caminos de 2015 en el área de estudio.

### 5.1.2 Cambios en las cubiertas y uso de suelo

En el área de estudio, los caminos en el año de 1994 tenían una longitud de 7,046.39 km, y para el 2015 fue de 11,520.28 km lineales. Las vialidades en 21 años se incrementaron en un 63 % (4,473 km) de lo que ya se tenía en 1994. Este aumento está relacionado con el incremento de los asentamientos humanos y las actividades económicas, ya que los caminos funcionan como interconectores de una localidad a otra y permiten la accesibilidad a la población para desplazarse en el territorio.

Lo que respecta a los cambios en las cubiertas y uso de suelo en la tabla siguiente se aprecia que en el año 2015 el bosque disminuye en superficie un 16% de lo que se tenía en 1994, otra disminución de un 12% se da para los cultivos anuales. En contraposición, en 21 años se aumentó la superficie de los asentamientos humanos, los matorrales y pastizales y los cultivos permanentes (cultivo de aguacate, zarzas

y guayaba). En lo que respecta a los bosques abiertos de igual manera se presentó un aumento en la superficie, pero es importante resaltar que también en estas zonas se tuvieron cambios en sentido de pérdida, dado en algunos casos se ubicaron asentamientos humanos y cultivos (Tabla 4).

*Tabla 4.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo.*

Tipo de uso/cubierta	Superficie de 1994 (Ha.)	Superficie de 2015 (Ha.)	Aumento de superficie	Disminución de superficie
Asentamiento humano	6,222.36	8,451.79	2,229.43	0.00
Bosque	128,243.37	106,733.13	0.00	21,510.24
Bosque abierto	4,617.81	11,525.55	6,907.73	0.00
Cuerpo de agua	5,423.49	7,880.34	2,456.85	0.00
Cultivo anual	46,959.17	41,223.47	0.00	5,735.70
Cultivo permanente	5,659.57	7,317.85	1,658.28	0.00
Lirio	2,550.07	0.00	0.00	0.00
Matorral- pastizal	46,945.38	63,354.77	16,409.39	0.00
Sin vegetación aparente	55.42	159.48	104.06	0.00
Tular	764.28	794.55	30.26	0.00
<b>Total</b>	<b>247,440.93</b>	<b>247,440.93</b>	<b>29,796.01</b>	<b>27,245.94</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

La Tabla 5 muestra los cambios que se tuvieron para el municipio de Charo, en donde los matorrales aumentaron en 42% de lo que se tenía en el año de 1994, otros usos que aumentaron fueron los asentamientos humanos en un 52% y los cultivos permanentes aumentaron el quíntuple para el 2015. Justamente la disminución se tiene mayormente en un 31% los bosques, seguidos de los cultivos anuales y bosques abiertos.

Tabla 5.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Charo.

Tipo de uso/cubierta del municipio de Charo	Superficie de 1994 (Ha.)	Superficie de 2015 (Ha.)	Aumento de superficie	Disminución de superficie
Asentamiento humano	597.54	913.85	316.31	0.00
Bosque	13,555.49	9,262.75	0.00	4,292.74
Bosque abierto	957.94	922.75	0.00	35.19
Cuerpo de agua	4.11	12.92	8.81	0.00
Cultivo anual	5,377.45	4,165.36	0.00	1,212.09
Cultivo permanente	44.42	235.34	190.92	0.00
Lirio	0.00	0.00	0.00	0.00
Matorral- pastizal	11,773.73	16,797.83	5,024.10	0.00
Sin vegetación aparente	3.41	3.29	0.00	0.12
Tular	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>32,314.10</b>	<b>32,314.10</b>	<b>5,540.14</b>	<b>5,540.14</b>

Fuente: Elaboración propia.

Para el municipio de Indaparapeo el bosque abierto entre el periodo de 1994 a 2015 tuvo un aumento en la superficie de un 59%; seguido por los matorrales y pastizales con un 39%, después los asentamientos humanos en un 28% y un incremento pequeño de cuerpos de agua. Es interesante observar que en este municipio surgen dos usos de suelo el cultivo permanente y áreas sin vegetación aparente.

En lo que respecta a la disminución de superficie los bosques se pierden en un 23%, los matorrales y pastizales con un 38% y los cultivos anuales en 4% (ver Tabla 6).

Tabla 6.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Indaparapeo.

Tipo de uso/cubierta del municipio de Indaparapeo	Superficie de 1995 (Ha.)	Superficie de 2015 (Ha.)	Aumento de superficie	Disminución de superficie
Asentamiento humano	489.96	625.51	135.55	0.00
Bosque	5,985.68	4,596.30	0.00	1,389.38
Bosque abierto	314.22	500.29	186.07	0.00
Cuerpo de agua	1.05	2.84	1.79	0.00
Cultivo anual	7,431.75	7,122.77	0.00	308.98
Cultivo permanente	0.00	34.31	34.31	0.00
Lirio	0.00	0.00	0.00	0.00
Matorral- pastizal	3,427.78	4,749.44	1,321.66	0.00
Sin vegetación aparente	0.00	18.98	18.98	0.00
Tular	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>17,650.43</b>	<b>17,650.43</b>	<b>1,698.36</b>	<b>1,698.36</b>

Fuente: Elaboración propia.

Los cultivos permanentes en el municipio de Queréndaro aumentaron de manera súbita elevando la cantidad de superficie de 1994 catorce veces más, en un 24 % los asentamientos humanos crecieron y un 10% los matorrales y pastizales. En la disminución de superficie se tienen los bosques con una pérdida del 5% y los cultivos anuales con 4% (ver Tabla 7).

*Tabla 7.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Queréndaro.*

Tipo de uso/cubierta del municipio de Queréndaro	Superficie de 1994 (Ha.)	Superficie de 2015 (Ha.)	Aumento de superficie	Disminución de superficie
Asentamiento humano	440.67	548.43	107.76	0.00
Bosque	12,071.95	11,434.62	0.00	637.34
Bosque abierto	196.66	183.40	0.00	13.26
Cuerpo de agua	714.88	716.32	1.44	0.00
Cultivo anual	5,307.90	5,078.27	0.00	229.62
Cultivo permanente	17.06	269.06	251.99	0.00
Lirio	0.00	0.00	0.00	0.00
Matorral- pastizal	4,740.21	5,259.24	519.03	0.00
Sin vegetación aparente	0.00	0.00	0.00	0.00
Tular	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>23,489.34</b>	<b>23,489.34</b>	<b>880.22</b>	<b>628.22</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

En la Tabla 8 se observa que en el municipio de Zinapécuaro aumentaron su superficie los cuerpos de agua, matorrales y pastizales; pero se apreció que los bosques abiertos en esta zona aumentaron al doble de lo que se tenía en 1994. Los asentamientos humanos tuvieron un incremento del 25% y cultivos con un 13%. Lo que respecta con la disminución se ve claramente que el bosque es el más afectado en este municipio en un 29%.

Tabla 8.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Zinapécuaro.

Tipo de uso/cubierta del municipio de Zinapécuaro	Superficie de 1994 (Ha.)	Superficie de 2015 (Ha.)	Aumento de superficie	Disminución de superficie
Asentamiento humano	1,986.20	2,492.05	505.85	0.00
Bosque	20,661.17	14,668.36	0.00	5,992.80
Bosque abierto	1,018.19	3,889.83	2,871.64	0.00
Cuerpo de agua	4,108.97	6,559.40	2,450.43	0.00
Cultivo anual	13,479.85	11,359.16	0.00	0.00
Cultivo permanente	5,305.01	6,000.80	695.79	0.00
Lirio	2,550.07	0.00	0.00	0.0
Matorral- pastizal	9,730.05	13,784.60	4,054.55	0.00
Sin vegetación aparente	42.18	97.23	55.05	0.00
Tular	764.28	794.55	30.26	0.00
<b>Total</b>	<b>59,645.97</b>	<b>59,645.97</b>	<b>10,663.56</b>	<b>5,992.80</b>

Fuente: Elaboración propia.

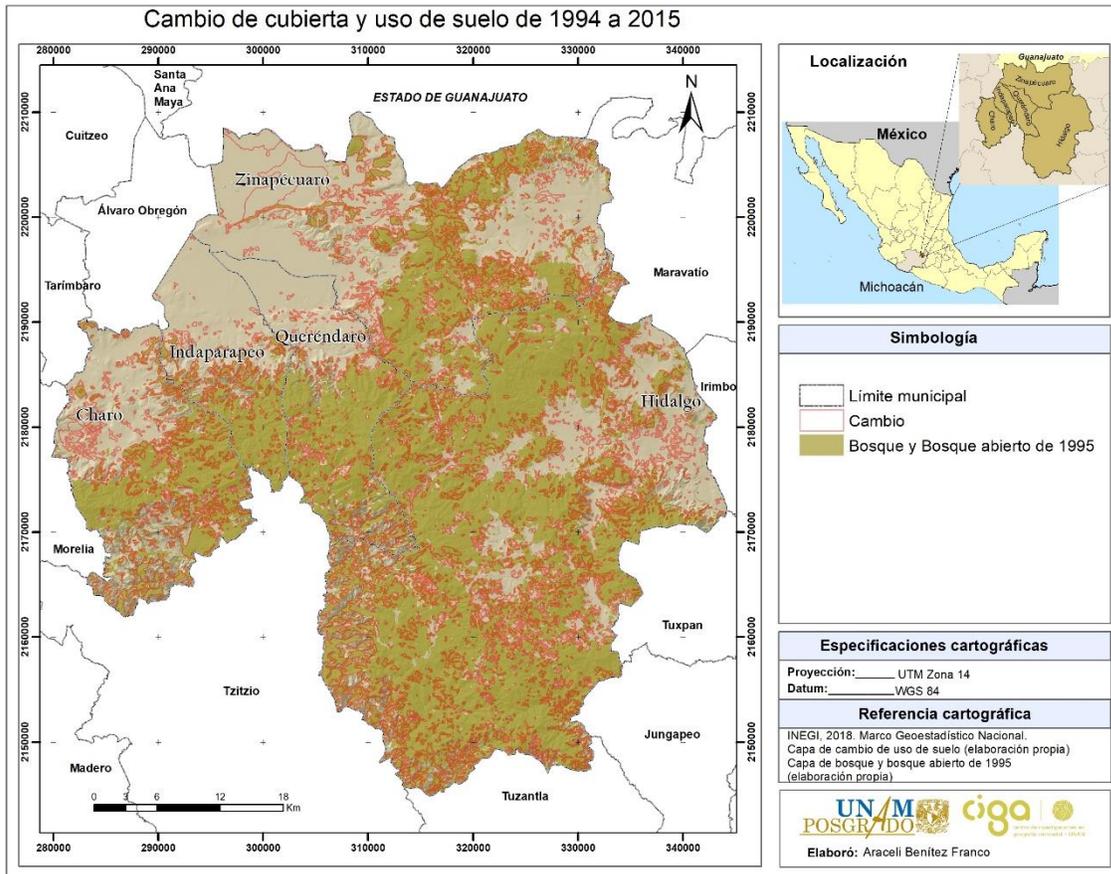
La siguiente tabla ilustra que en el municipio de Hidalgo de 1994 a 2015 aumento casi al doble la superficie de bosque abierto y los cultivos permanentes, seguidos por los asentamientos en un 42 % y los matorrales y pastizales con un 32 % de incremento en su superficie; en menor medida aumenta las zonas sin vegetación aparente. En un 12% los bosques y cultivos anuales disminuyen su superficie en este municipio.

Tabla 9.- Cambios en las cubiertas y uso de suelo en el municipio de Hidalgo.

Tipo de uso/cubierta del municipio de Hidalgo	Superficie de 1994 (Ha.)	Superficie de 2015 (Ha.)	Aumento de superficie	Disminución de superficie
Asentamiento humano	2,707.98	3,871.95	1,163.97	0.00
Bosque	75,969.07	66,771.09	0.00	9,197.98
Bosque abierto	2,130.81	6,029.28	3,898.48	0.00
Cuerpo de agua	594.47	588.85	0.00	5.62
Cultivo anual	15,362.23	13,497.92	0.00	1,864.31
Cultivo permanente	293.08	778.34	485.26	0.00
Lirio	0.00	0.00	0.00	0.00
Matorral- pastizal	17,273.62	22,763.66	5,490.05	0.00
Sin vegetación aparente	9.83	39.99	30.16	0.00
Tular	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>114,341.09</b>	<b>114,341.09</b>	<b>11,067.91</b>	<b>11,067.91</b>

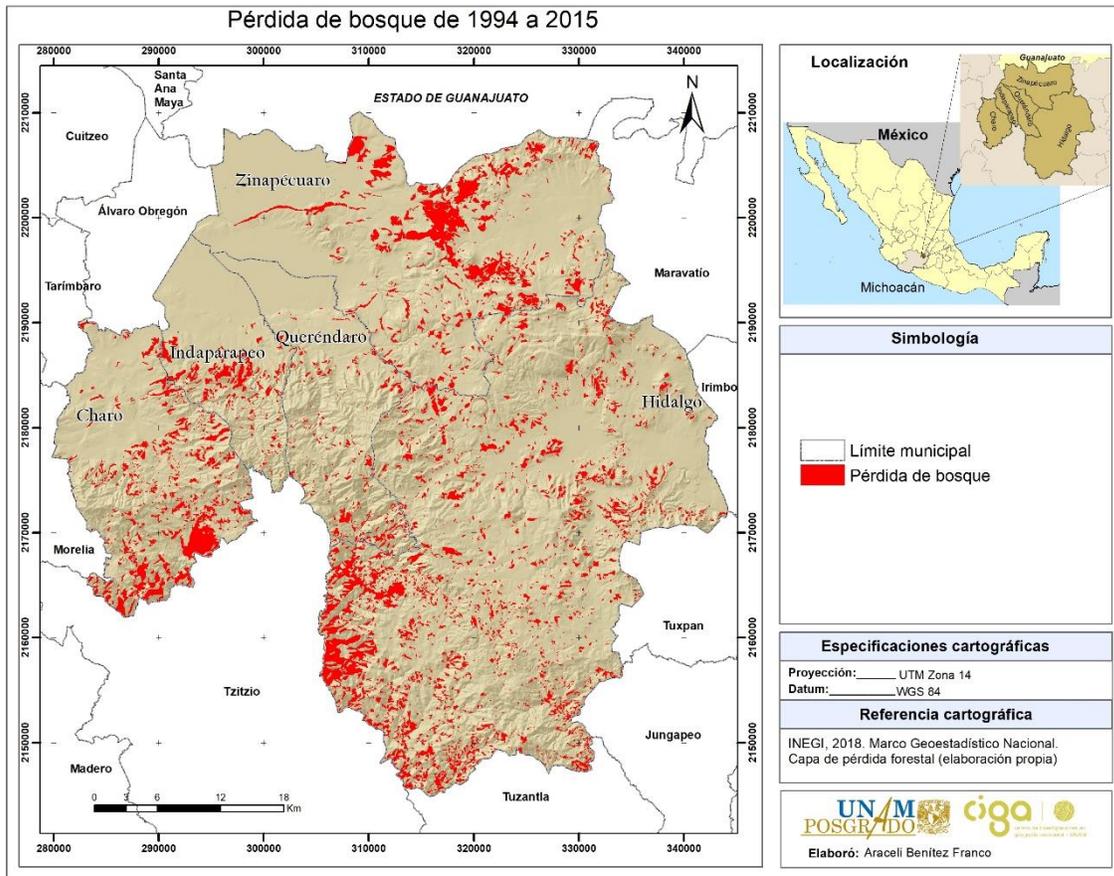
Fuente: Elaboración propia.

En el mapa 10 se muestra espacialmente donde se presentaron cambios en las cubiertas y uso de suelo en el lapso de 21 años, debajo de esta capa se integra la de bosque y bosque abierto de 1994, lo cual nos permite identificar que justo los cambios se concentran en, o bien son cercanos a, estas áreas.



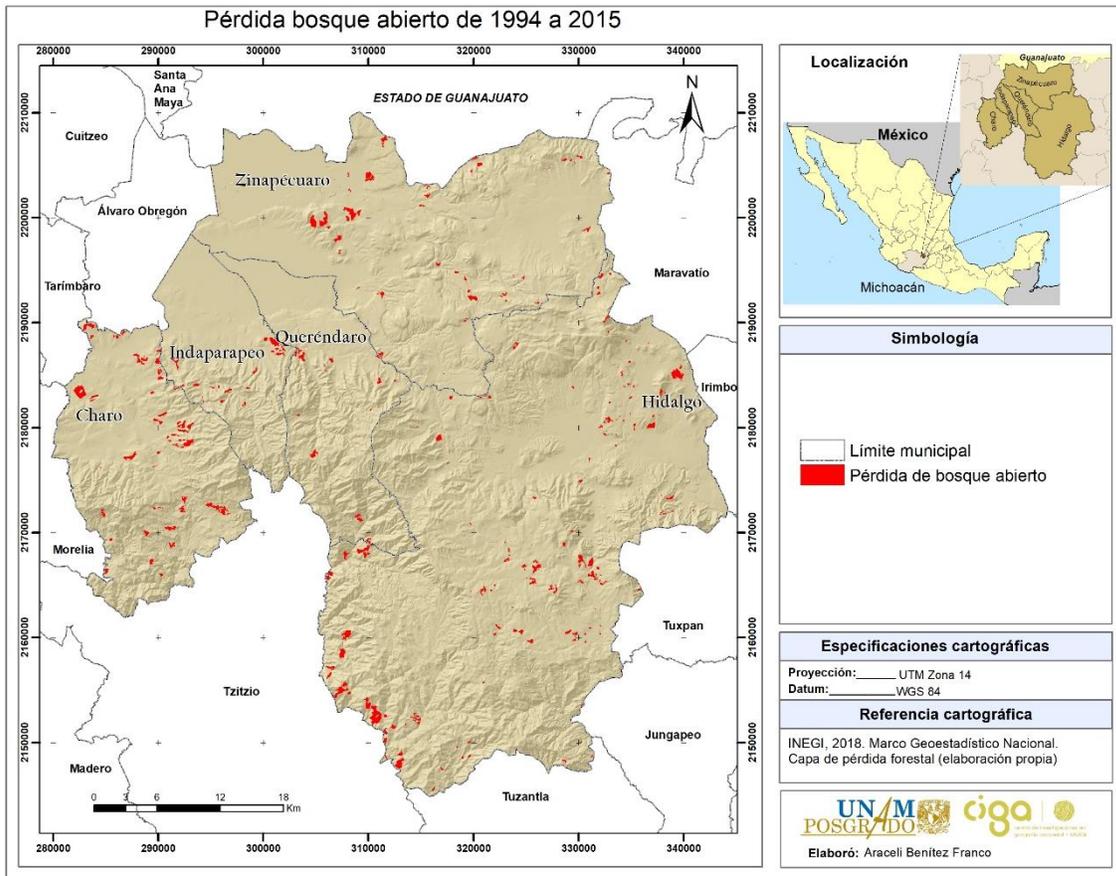
Mapa 10.- Cambios de cubierta y uso de suelo en el período de 1994 a 2015.

Ya obtenidas las zonas de cambio, es importante mostrar la pérdida de bosque y bosque abierto (ver Mapas 11 y 12), puesto que estas dos capas son parte fundamental de este estudio, esto se obtuvo de una simple resta espacial de bosque y bosque abierto del 2015, menos lo que se tenía en el año 1994.



Mapa 11.- Pérdida de bosque en el período de 1994 a 2015.

Se puede observar en el mapa anterior que la pérdida de bosque se da principalmente en la zona norte y suroeste de nuestra área de estudio. En el caso del bosque abierto son pequeñas concentraciones de pérdida en diferentes ubicaciones de la zona de estudio.



Mapa 12.- Pérdida de bosque abierto de 1994 a 2015.

## 5.2 Construcción del modelo

Como se mencionó en la metodología para la construcción del modelo DEFORELATIONS, se realiza una serie de procedimientos (fases). Enseguida se explica los resultados obtenidos de cada fase y los insumos cartográficos realizados.

### 5.2.1 Análisis de la relevancia

Con los insumos cartográficos para el modelo DEFORELATIONS (Tabla 3 en metodología), se prosiguió a generar las capas de las relaciones espaciales de proximidad y de coincidencia, tanto para la pérdida bosque y bosque abierto, en sus

distribuciones real y aleatoria. Enseguida se enlistan las capas obtenidas que juegan un papel importante en el análisis del modelo.

Relación con pérdida de bosque:

- Proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque.
- Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque.
- Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque.
- Proximidad de caminos a pérdida de bosque.
- Proximidad de matorral – pastizal a pérdida de bosque.
- Proximidad de caminos a pérdida de bosque.
- Proximidad de bosque abierto a pérdida de bosque.
- Coincidencia de la altitud con pérdida de bosque.
- Coincidencia de la pendiente con pérdida de bosque.
- Coincidencia de la orientación de la pendiente con pérdida de bosque.
- Coincidencia de suelos con pérdida de bosque.
- Coincidencia de la tenencia de la tierra con pérdida de bosque-

Relación con pérdida de bosque abierto:

- Proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto.
- Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque abierto.
- Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque abierto.
- Proximidad de caminos a pérdida de bosque abierto.
- Proximidad de matorral – pastizal a pérdida de bosque abierto.
- Proximidad de caminos a pérdida de bosque abierto.
- Proximidad de bosque a pérdida de bosque abierto.
- Coincidencia de la altitud con pérdida de bosque abierto.
- Coincidencia de la pendiente con pérdida de bosque abierto.
- Coincidencia de la orientación de la pendiente con pérdida de bosque abierto.
- Coincidencia de suelos con pérdida de bosque abierto.
- Coincidencia de la tenencia de la tierra con pérdida de bosque abierto.

Para determinar si una relación espacial es relevante para nuestro modelo recordemos que se tomaron en cuenta los siguientes niveles de confianza estadística:

- 95 % si  $P \leq 0.05$ : muy relevante
- 85% si  $P \geq 0.05$  pero  $P \leq 0.15$ : relevante
- 75 % si  $P \geq 0.15$  pero  $P \leq 0.25$ : suficientemente relevante

### 5.2.1.1 Relevancia de las relaciones espaciales para pérdida de bosque

Según la metodología descrita en la sección correspondiente, se presenta una tabla resumida de los resultados y los tipos de pruebas estadísticas que se realizaron.

Tabla 10.- Resultado de la determinación de la relevancia de las relaciones espaciales para bosque.

Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque a:	Pruebas estadísticas realizadas	Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medias) P	Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ DN de Kolmogorov Smirnov) P	Relevancia
Asentamiento humano	No paramétrica	0.078339	0.002499	Muy relevante
Cultivo permanente	No paramétrica	0.920459	0.080465	Relevante
Cultivo anual	No paramétrica	0.077822	0.004958	Muy relevante
Caminos	No paramétrica	0.003373	0.000094	Muy relevante
Matorral - pastizal	No paramétrica	0.693585	0.993356	No
Bosque abierto	No paramétrica	0.728258	0.952478	No
Relación espacial de coincidencia de pérdida de bosque con	Pruebas estadísticas realizadas	Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medias) P	Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ DN de Kolmogorov Smirnov) P	Relevancia
Altitud	No paramétrica	0.934359	0.722234	No
Orientación de la pendiente	Paramétrica	0.398170	0.109554	Relevante*
Suelos	No paramétrica	0.645761	0.993356	No
Tenencia de la tierra	No paramétrica	0.930227	0.997230	No
Pendiente	No paramétrica	0.821076	0.728805	No

\*Este caso es muy particular y se explica más adelante por qué no se toma finalmente como relevante dicha relación espacial

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.1.2 Relevancia de las relaciones espaciales para pérdida de bosque abierto

De igual manera los pasos metodológicos que se aplicaron para obtener las relaciones espaciales con pérdida de bosque, se utilizó las mismas capas, pero ahora relacionándolas con la pérdida de bosque abierto. En la tabla siguiente se observan el resumen de las pruebas aplicadas para este caso.

Tabla 11.- Resultado de determinación de la relevancia de las relaciones espaciales para bosque abierto

Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque abierto a	Pruebas estadísticas realizadas	Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medianas) P	Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ DN de Kolmogorov Smirnov) P	Relevancia
Asentamiento humano	No paramétrica	0.028208	0.087401	Muy relevante
Cultivo permanente	No paramétrica	0.047941	0.103137	Muy Relevante
Cultivo anual	No paramétrica	0.038337	0.036631	Muy relevante
Caminos	No paramétrica	0.470484	0.532016	No
Matorral - pastizal	No paramétrica	1.000000	1.000000	No
Bosque	No paramétrica	0.798294	1.000000	No
Relación espacial de coincidencia de pérdida de bosque abierto con	Pruebas estadísticas realizadas	Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medianas) P	Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ DN de Kolmogorov Smirnov) P	Relevancia
Altitud	No paramétrica	0.529412	0.892778	No
Orientación de la pendiente	Paramétrica	0.034924	0.403839	Muy relevante*
Suelos	No paramétrica	0.540881	0.409487	No
Tenencia de la tierra	No paramétrica	0.979237	0.945991	No
Pendiente	No paramétrica	0.431249	0.273418	No

\*Este caso es muy particular y se explica más adelante por qué no se toma finalmente como relevante dicha relación espacial

Fuente: Elaboración propia.

Es interesante hacer notar que, en el caso de la pendiente, el valor de P en la prueba de Kolmogorov Smirnov, está muy cerca del límite de 75% de nivel de confianza establecido para considerar una relación suficientemente relevante. Probablemente, esto indica que en algunas porciones del territorio de estudio si puede ser relevante, pero en otras no.

### 5.2.1.3 Relaciones espaciales relevantes en la pérdida de bosque

Con la aplicación de pruebas estadísticas se obtuvieron aquellas relaciones espaciales relevantes, y a partir de este momento se convierten en parámetros del modelo. Se especifica enseguida con mayor detalle los resultados de las pruebas estadísticas para dichas relaciones que resultaron relevantes.

#### 5.2.1.3.1 Proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque

Una vez realizados todos los cálculos espaciales en el sistema de información geográfica para obtener las distribuciones tanto real como aleatoria de la relación espacial de asentamientos humanos a pérdida de bosque, se procede a realizar los cálculos correspondientes estadísticos para comparar el comportamiento de los datos. A continuación, se aprecia el resumen estadístico para las dos muestras de datos.

Tabla 12.- Resumen estadístico de la proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque

<b>Estadística</b>	<b>Pérdida de bosque real</b>	<b>Pérdida de bosque aleatoria</b>
Recuento	54	54
Promedio	5305.98	5800.35
Desviación Estándar	6580.84	9013.54
Sesgo Estandarizado	4.77969	5.08769
Curtosis Estandarizada	1.72466	2.19998

Fuente: Elaboración propia.

En este caso particular, es de interés el sesgo estandarizado ya que sirve para comparar si las muestras provienen de distribuciones normales (paramétricas). Los resultados de los sesgos de la relación de proximidad real como aleatoria nos indican que no se encuentra dentro del rango -2 a +2, lo que se interpreta como que las distribuciones de los datos no son normales.

Por ello, es necesario realizar las pruebas estadísticas para distribuciones no paramétricas a estas relaciones espaciales. La primera prueba consiste en comparar sus medianas, para ello se hace la prueba de W de Mann Whitney.

### Comparación de Medianas

Mediana de distribución real: 2510.5

Mediana de distribución aleatoria: 1482.0

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana de distribución real = mediana de distribución aleatoria

Hipótesis Alt.: mediana de distribución real  $\neq$  mediana de distribución aleatoria

Rango Promedio de muestra 1: 59.8148

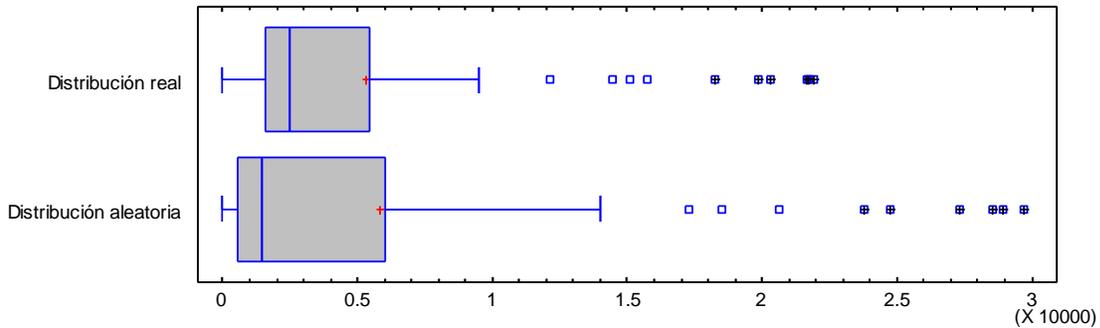
Rango Promedio de muestra 2: 49.1852

$W = 1171.0$  valor-P = 0.078339

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.25$ .

Esta prueba combina las dos muestras ordenando de menor a mayor y compara los rangos promedio de estas dos distribuciones en los datos combinados. Debido a que el valor-P es menor que 0.25, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 75.0%, incluso la relación es significativa con un nivel de confianza de 92%. Esto quiere decir que, si hay un patrón significativo en los datos de la relación, y que de alguna forma la proximidad de asentamientos humanos a bosque influye en la pérdida forestal.

En el siguiente gráfico se representa la diferencia de las dos distribuciones espaciales, donde se observa dentro de las cajas que la mediana no coincide y en los bigotes finales de la cola derecha se tiene una gran diferencia de valores atípicos de cada muestra.



*Gráfico 2.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de asentamientos humanos a zonas de pérdida de bosque.*

Si se quiere identificar si realmente esta relación espacial es relevante se hace una segunda prueba que la de comparar si las distribuciones acumuladas son similares a su máxima distancia. En este caso se procede con la prueba siguiente.

#### **Prueba de Kolmogorov-Smirnov**

Estadístico DN estimado = 0.351852

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 1.82828

Valor P aproximado = 0.00249857

En este caso, la distancia máxima es 0.351852, que puede verse gráficamente en el gráfico 3 de cuantiles –P es menor que 0.05, por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un nivel de confianza más del 95.0%. Esto último indica que existe una diferencia significativa y por ello se vuelve muy relevante para el modelo.

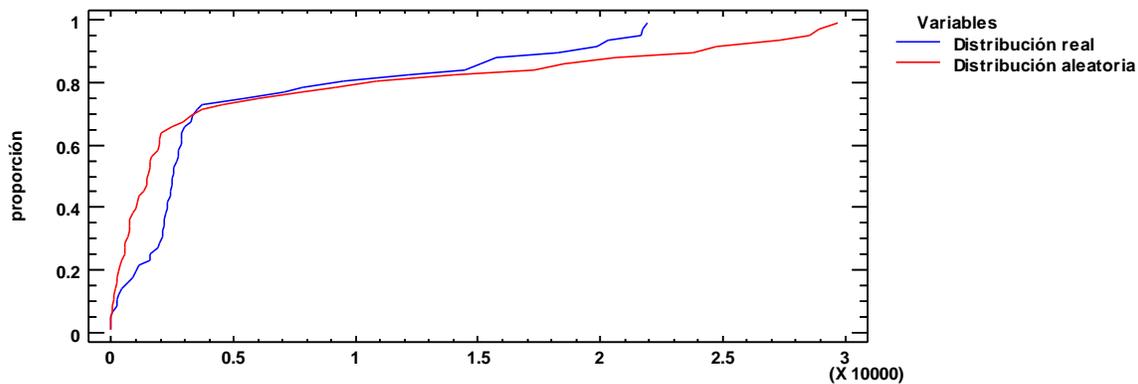


Gráfico 3.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de asentamientos humanos a zonas de pérdida de bosque.

### 5.2.1.3.2 Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque

De igual manera que la prueba anterior de los asentamientos humanos, en esta relación espacial de proximidad de cultivos permanentes a pérdida de bosque real y aleatoria, se realiza el mismo procedimiento para ver cómo se comportan las distribuciones de cada muestra estadísticamente.

Tabla 13.- Resumen estadístico de la proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque.

<b>Estadística</b>	<b>Pérdida de bosque real</b>	<b>Pérdida de bosque aleatoria</b>
Recuento	61	61
Promedio	4697.1	5134.75
Desviación Estándar	4021.1	544613.00%
Sesgo Estandarizado	0.842358	1.46062
Curtosis Estandarizada	-2.46093	-2.53362

Fuente: Elaboración propia.

En la anterior tabla se observa que los sesgos de ambas distribuciones si se encuentran dentro rango -2 a +2, pero los valores de Curtosis no, lo que es suficiente para no considerarlas como distribuciones normales. Por ello se aplican las pruebas no paramétricas. Para ver los comportamientos de los datos respecto a sus medianas se aplica la siguiente prueba estadística.

### Comparación de Medianas

Mediana de distribución real: 3526.0

Mediana de distribución aleatoria: 1428.0

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana de distribución real = mediana de distribución aleatoria

Hipótesis Alt.: mediana de distribución real  $\neq$  mediana de distribución aleatoria

Rango Promedio de muestra 1: 61.8279

Rango Promedio de muestra 2: 61.1721

$W = 1840.5$  valor-P = 0.920459

No se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

En este caso se ejecuta la prueba W de Mann-Whitney para comparar las medianas de dos muestras, combinándolas y ordenando los datos de menor a mayor, compara los rangos promedio de las dos distribuciones en los datos combinados. Debido a que el valor-P es mayor ó igual que 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95.0%. Aquí quizás la relación pudiera ser no relevante, probablemente solo en algunas proporciones del área de estudio. Los gráficos de caja de bigotes nos muestran los comportamientos similares en sus medianas a pesar de tener diferentes datos en cada una de ellas.

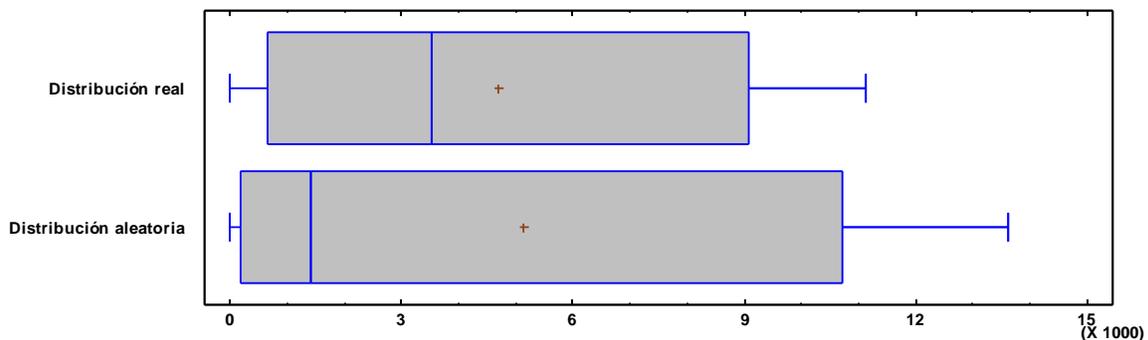


Gráfico 4.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos permanentes a zonas de pérdida de bosque.

Como en esta prueba estadística no se encontró alguna diferencia en las medianas ahora seguimos con la de comparación de las distribuciones acumuladas.

### Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Estadístico DN estimado = 0.229508

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 1.2675

Valor P aproximado = 0.0804648

La prueba de Kolmogorov-Smirnov calcula la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las dos muestras. El resultado en este caso, la distancia máxima es 0.229508, que puede verse en la gráfica 5 de cuantiles. En lo que respecta de interés es el resultado del valor-P que es mayor que 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un 95.0% pero si con un 92%.

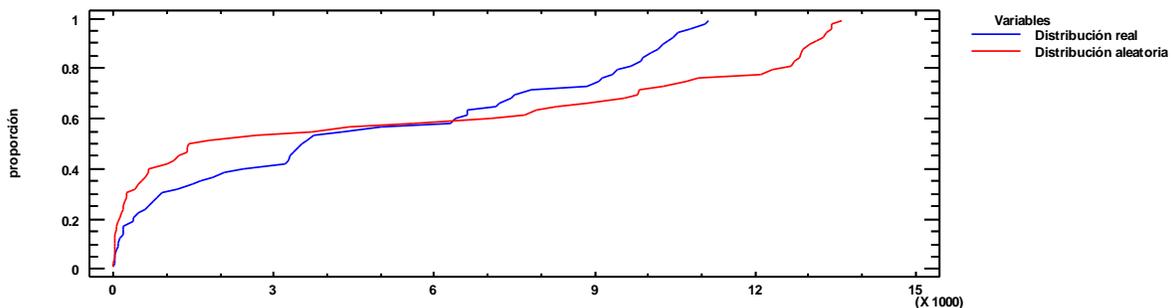


Gráfico 5.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos permanentes a zonas de pérdida de bosque.

En la primera prueba las medianas resultaron estadísticamente similares, pero en la segunda prueba el valor de  $-P$  es significativo con un nivel de confianza más del 85 % de una diferencia significativa por ello se decide tomar esta relación espacial como parámetro (relevante) del modelo.

### 5.2.1.3.3 Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque

Para la proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque real y aleatoria, se aplicaron las pruebas estadísticas para comparar las distribuciones de sus datos. En la tabla siguiente se muestra el resumen estadístico.

Tabla 14.- Resumen estadístico de la proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque

<b>Estadística</b>	<b>Pérdida de bosque real</b>	<b>Pérdida de bosque aleatoria</b>
Recuento	54	54
Promedio	5305.98	5800.69
Desviación Estándar	9339.87	10287.3
Sesgo Estandarizado	8.99586	6.96072
Curtosis Estandarizada	13.9234	7.23338

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla contiene el resumen estadístico para las dos muestras de datos. Tanto los sesgos estandarizados como las curtosis de cada relación espacial en sus valores estadísticos están fuera del rango de -2 a + 2, por lo tanto, son distribuciones no normales.

Por consiguiente, se aplican las siguientes pruebas estadísticas no paramétricas, la primera prueba compara las medianas de cada distribución.

#### **Comparación de Medianas**

Mediana de distribución real: 3526.0

Mediana de distribución aleatoria: 1428.0

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana de distribución real = mediana de distribución aleatoria

Hipótesis Alt.: mediana de distribución real  $\neq$  mediana de distribución aleatoria

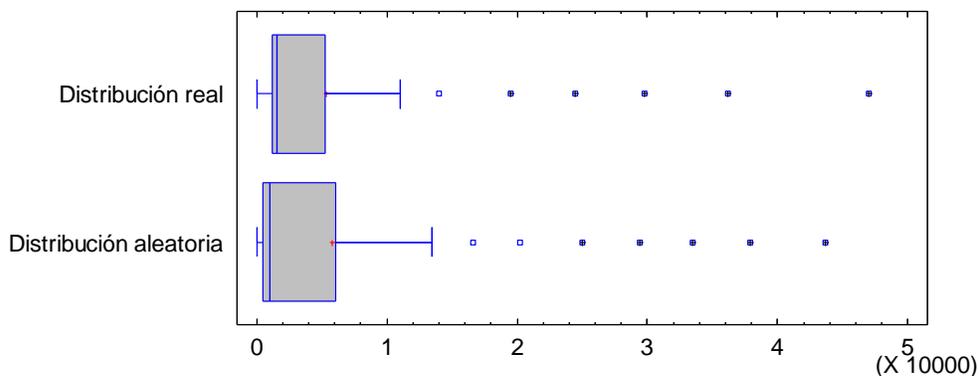
Rango Promedio de muestra 1: 59.8241

Rango Promedio de muestra 2: 49.1759

W = 1170.5 valor-P = 0.0778219

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.25.

Esta prueba W de Mann-Whitney sirve para comparar las medianas, combinando y ordenando los datos de menor a mayor. Compara los ranqueos promedio de las dos muestras en los datos combinados. Con esto se obtuvo los resultados del valor-P el cual es menor que 0.25, esto indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 85.0% e incluso con uno de 92.0%. En el gráfico de caja de bigotes, se aprecia como las medianas de ambas relaciones espaciales tienen comportamientos distintos y los valores atípicos en la cola de la caja de la distribución aleatoria son más amplios a comparación de la otra muestra.



*Gráfico 6.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos anuales a zonas de pérdida de bosque.*

Con esto se puede considerar que tiene relevancia para nuestro modelo, y esto se sustenta con otra prueba que es la de Kolmogorov- Smirnov.

### **Prueba de Kolmogorov-Smirnov**

Estadístico DN estimado = 0.333333

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 1.73205

Valor P aproximado = 0.0049575

En esta prueba se calcula la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las dos relaciones espaciales. De particular interés es el valor-P que es menor de 0.05, lo que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un nivel de confianza del 95.0%, con esto se confirma

que efectivamente esta relación espacial es muy relevante para el modelo. La distancia máxima es 0.333333 entre las dos distribuciones, para comparar esta distribución de los datos se puede apreciar en el gráfico 7 de cuantiles.

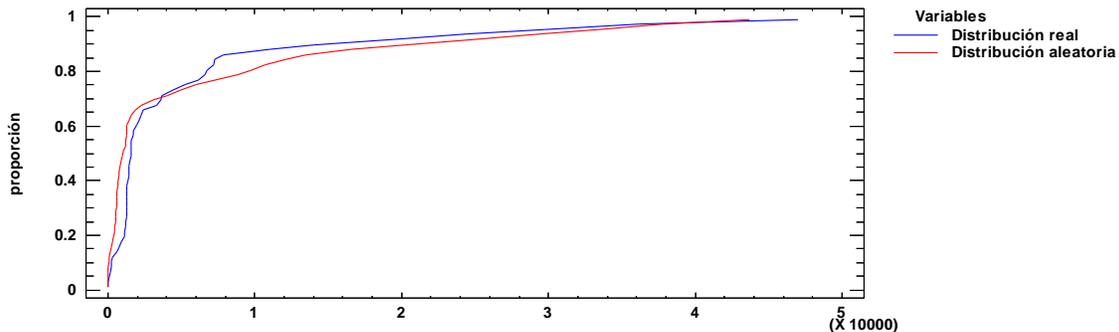


Gráfico 7.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos anuales a zonas de pérdida de bosque.

#### 5.2.1.3.4 Proximidad de caminos a pérdida de bosque

Los valores obtenidos de cada proximidad de caminos a pérdida de bosque real y aleatoria se sometieron también a pruebas estadísticas para ver si la distribución de sus datos es normal, en el siguiente recuadro se despliegan sus resultados.

Tabla 15.- Resumen estadístico de la proximidad de caminos a pérdida de bosque.

<b>Estadística</b>	<b>Pérdida de bosque real</b>	<b>Pérdida de bosque aleatoria</b>
Recuento	29	29
Promedio	9880.48	2136.31
Desviación Estándar	28107.4	6074.44
Sesgo Estandarizado	8.92413	8.94467
Curtosis Estandarizada	19.6458	19.7409

Fuente: Elaboración propia.

Con lo anterior, se demuestra que los sesgos y las curtosis de ambas relaciones espaciales tienen valores mayores al rango de -2 a +2, por ello se define que ambas muestras sus distribuciones no son normales.

El siguiente paso es ver cómo se comparan sus medianas, para ello se aplica la prueba de W de Mann-Whitney (Wilcoxon).

### Comparación de Medianas

Mediana de distribución real: 398.0

Mediana de distribución aleatoria: 90.0

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana de distribución real = mediana de distribución aleatoria

Hipótesis Alt.: mediana de distribución real  $<>$  mediana de distribución aleatoria

Rango Promedio de muestra 1: 36.0172

Rango Promedio de muestra 2: 22.9828

$W = 231.5$  valor-P = 0.00337283

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

En este caso la prueba se construye combinando las dos relaciones espaciales, se ordenan los datos de menor a mayor, y se comparan los rangos promedio de las dos muestras en los datos combinados. Los resultados de esto es el valor-P de 0.00337283, lo cual es menor que 0.05, en esto existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95.0%.

El gráfico que se muestra a continuación se aprecia que efectivamente sus medianas no son similares y además cada una tiene su distribución extrema de valores en el bigote.

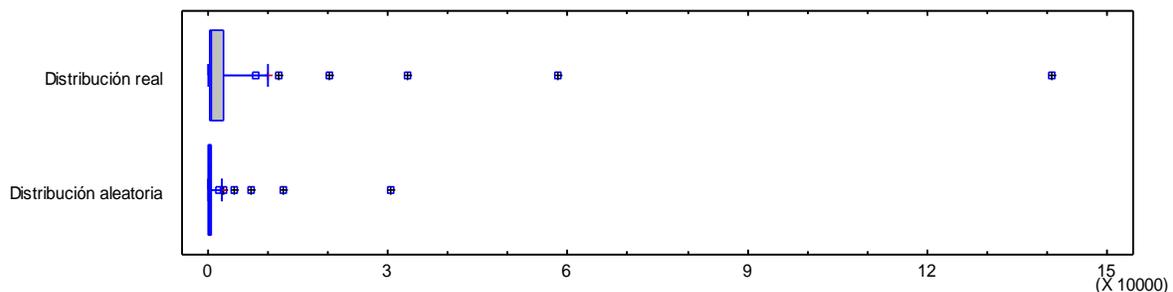


Gráfico 8.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de caminos a zonas de pérdida de bosque.

Esta prueba señala que esta relación espacial es muy relevante para nuestro modelo, pero se tiene que hacer una segunda prueba para sustentar más el resultado. La siguiente prueba compara sus distribuciones acumuladas.

### Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Estadístico DN estimado = 0.586207

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 2.23221

Valor P aproximado = 0.0000939855

La prueba de Kolmogorov-Smirnov dio el resultado de que la distancia máxima es 0.586207, que puede verse gráficamente en el esquema de cuantiles 9. En lo que respecta al valor-P resultó ser muy menor que 0.05, esto indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un nivel de confianza del 95.0%, e incluso casi un 100%. Esto confirma que la relación es muy relevante.

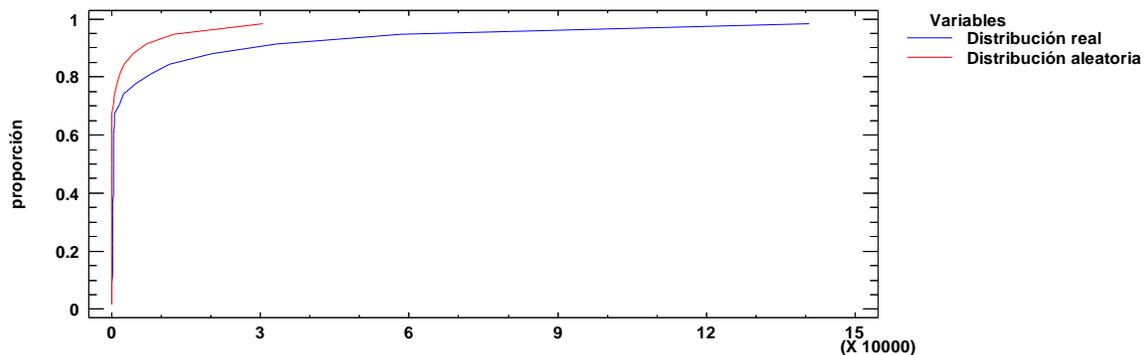


Gráfico 9.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de caminos a zonas de pérdida de bosque.

### 5.2.1.3.5 Coincidencia de la orientación de la pendiente en pérdida de bosque.

Otra de las relaciones a realizar su resumen estadístico fue la de coincidencia de orientación de la pendiente con pérdida bosque, en esta fue la única relación en la que las distribuciones de los datos fueron normales.

Tabla 16.- Resumen estadístico de coincidencia de la orientación de la pendiente en pérdida de bosque.

<b>Estadística</b>	<b>Pérdida de bosque real</b>	<b>Pérdida de bosque aleatoria</b>
Recuento	8	8
Promedio	36086.9	39429.5
Desviación Estándar	9609.55	5033.76
Sesgo Estandarizado	0.214123	-0.157642
Curtosis Estandarizada	-1.06524	-0.745163

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la tabla anterior sugieren que es posible aplicar pruebas estadísticas paramétricas, ya que los sesgos y las curtosis están entre los rangos -2 a +2 para ambas relaciones espaciales. La primera prueba es la comparación de medias, enseguida se muestran los resultados.

#### Comparación de Medias (prueba T de Student)

Prueba t para comparar medias

Hipótesis nula: media de distribución real = media de distribución aleatoria

Hipótesis Alt.: media de distribución real  $\neq$  media de distribución aleatoria

suponiendo varianzas iguales:  $t = -0.87152$  valor-P = 0.39817

No se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.25$ .

La prueba T de Student se ejecuta para comparar las medias de dos distribuciones y construye intervalos de confianza para cada media y para la diferencia entre las medias. De interés particular es el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde -7945.65 hasta 1260.4. Puesto que el intervalo contiene el valor  $-P$  de 0.39817, no hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras de datos, con un nivel de confianza del 75.0%. En el gráfico 10 se

muestra en puntos rojos las medias de cada relación espacial, donde se aprecia que las medias son similares.

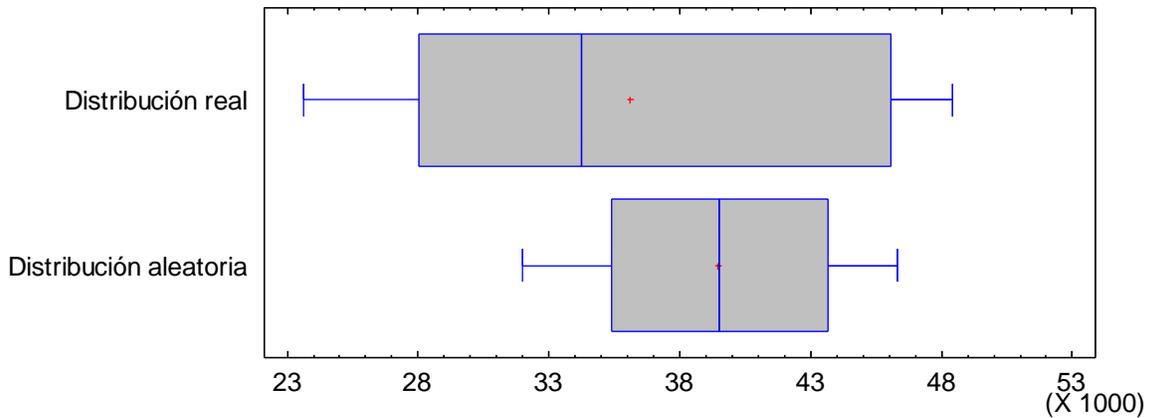


Gráfico 10.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la coincidencia de la orientación de la pendiente con las zonas de pérdida de bosque.

En lo que respecta al resultado del valor-P, éste es mayor a 0.25, con esto se puede inferir que la relación podría no ser relevante para el modelo, pero se necesita confirmar con una prueba más, la cual es la prueba F de Fisher, a continuación, se presentan los resultados.

Tabla 17.- Comparación de la desviación estándar de la coincidencia de la orientación de la pendiente con la pérdida de bosque.

Prueba estadística	Distribución real	Distribución aleatoria
Desviación Estándar	<b>9609.55</b>	<b>5033.76</b>
Varianza	9.23434E7	2.53387E7
Gl	7	7

Fuente: Elaboración propia.

Razón de Varianzas= 3.64436

Intervalos de confianza del 95.0%

Desviación Estándar de la distribución real: [6353.58, 19558.0]

Desviación Estándar de la distribución aleatoria: [3328.19, 10245.1]

Razones de Varianzas: [0.729614, 18.2032]

Prueba-F para comparar Desviaciones Estándar

Hipótesis Nula:  $\sigma$  de la distribución real =  $\sigma$  distribución aleatoria

Hipótesis Alt.:  $\sigma$  de la distribución real  $\neq$   $\sigma$  distribución aleatoria

$$F = 3.64436 \quad \text{valor-P} = 0.109554$$

No se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

En la prueba F de Fisher se compara las varianzas de las dos relaciones espaciales y construye intervalos o cotas de confianza para cada desviación estándar y para la razón de varianzas. También puede ejecutarse una prueba-F para evaluar una hipótesis específica acerca de las desviaciones estándar de las poblaciones de las cuales provienen las dos muestras. En este caso, la prueba se ha construido para determinar si el cociente de las desviaciones estándar es igual a 1.0 versus la hipótesis alternativa de que el cociente no es igual a 1.0. Puesto que el valor-P calculado no es menor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza de 95.0% pero si se rechaza con un nivel de confianza de 85%. Esto quiere decir que existe una diferencia comparando las dos distribuciones respecto a su dispersión. De este modo se considera esta relación espacial como relevante.

#### **5.2.1.4 Relaciones espaciales relevantes en la pérdida de bosque abierto**

También se construyó un modelo DEFORELATIONS para analizar la pérdida de bosque abierto. Se aplicaron las pruebas estadísticas correspondientes a cada relación espacial, para de ahí identificar aquellas relevantes para el modelo. A continuación, se detalla cada prueba para aquellas relaciones espaciales que se consideran parámetros para el modelo.

##### **5.2.1.4.1 Proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto**

Para la relación de proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto real y aleatoria se aplicaron los respectivos análisis estadísticos, con la finalidad de decidir si el comportamiento de los datos es normal. En la tabla 13 se muestra un resumen estadístico de ambas muestras.

Tabla 18.- Resumen estadístico de la proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto.

Estadística	Pérdida de bosque abierto real	Pérdida de bosque abierto aleatoria
Recuento	46	46
Promedio	722.348	512.348
Desviación Estándar	916.605	727.675
Sesgo Estandarizado	4.96446	5.03225
Curtosis Estandarizada	2.76308	2.7166

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los resultados de ambas relaciones se observa que tanto el sesgo como de la curtosis de los datos es mayor -2 a +2, con esto se decide realizar pruebas estadísticas no paramétricas, ya que la distribución de los datos no es normal. A continuación, se realiza la prueba de comparación de medianas.

### Comparación de Medianas

Mediana de muestra 1: 318.5

Mediana de muestra 2: 189.0

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) p ara comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana de distribución real = mediana de distribución aleatoria

Hipótesis Alt.: mediana de distribución real  $\neq$  mediana de distribución aleatoria

Rango Promedio de muestra 1: 52.6196

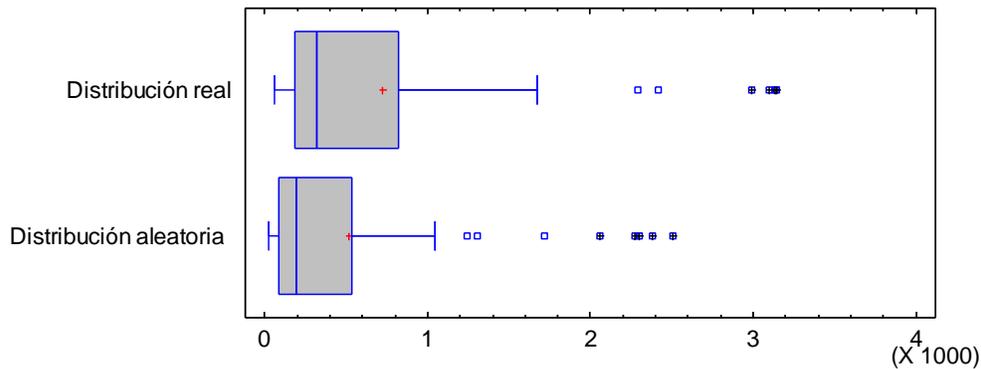
Rango Promedio de muestra 2: 40.3804

$W = 776.5$  valor-P = 0.0282076

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.25.

Se ejecuta la prueba W de Mann-Whitney para comparar las medianas de las relaciones de proximidad, los datos de estas se combinan, se ordenan de menor a mayor y se comparan los rangos promedio de las dos muestras. Debido a que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95.0%. Aquí, ya se tiene un indicio que

la proximidad de los asentamientos está relacionada con la pérdida de bosque abierto. El gráfico 11 sustenta los resultados de esta prueba estadística, se observa que las medianas de ambas distribuciones son distintas.



*Gráfico 11- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de asentamientos humanos a zonas de pérdida de bosque abierto.*

Después de tener una prueba que da el indicio de que la relación espacial es muy relevante, se tiene que sustentar con una prueba más que es la de Kolmogorov-Smirnov, la cual compara las distribuciones acumuladas de las dos distribuciones, a continuación, se muestran los resultados.

### **Prueba de Kolmogorov-Smirnov**

Estadístico DN estimado = 0.26087

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 1.25109

Valor P aproximado = 0.0874012

Esta prueba se realiza calculando la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las dos muestras. En este caso, la distancia máxima es 0.26087, que puede verse en el gráfico 12. De particular interés es el valor-P aproximado para la prueba que es menor que 0.15, con ello se prueba que hay diferencia estadísticamente significativa relevante entre las dos distribuciones con un 85.0%.

Con esta prueba, la relación resultó relevante, pero se tomará como muy relevante esta relación espacial ya que en la anterior prueba si fue muy significativa.

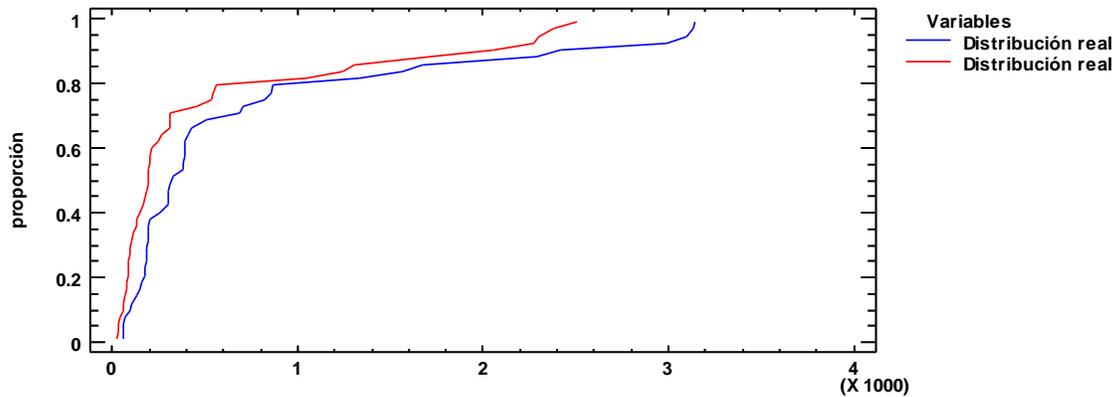


Gráfico 12.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de asentamientos humanos a zonas de pérdida de bosque abierto.

#### 5.2.1.4.2 Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque abierto

En el caso de proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque abierto, se hace el mismo procedimiento que para las anteriores relaciones espaciales. En la tabla 19, se presentan los resultados puntuales del resumen estadístico de las dos distribuciones.

Tabla 19.- Resumen estadístico de la proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto.

<i>Estadística</i>	<i>Pérdida de bosque abierto real</i>	<i>Pérdida de bosque abierto aleatoria</i>
Recuento	57	57
Promedio	582.947	413.491
Desviación Estándar	450.799	307.906
Sesgo Estandarizado	2.67243	1.3205
Curtosis Estandarizada	0.484375	-1.14824

Fuente: Elaboración propia.

El sesgo de la distribución real es mayor al rango de -2 a +2 lo que la hace calificar como una distribución no normal, en cambio la aleatoria entra en el rango de una distribución de datos normales, tanto por su sesgo como por su curtosis. Pero al

resultar una de las relaciones espaciales no normal, las pruebas estadísticas que se deben aplicar para ver si estas relaciones son relevantes son no paramétricas.

### **Comparación de Medianas**

Mediana de distribución real: 391.0

Mediana de distribución aleatoria: 426.0

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana de distribución real = mediana de distribución aleatoria

Hipótesis Alt.: mediana de distribución real  $\neq$  mediana de distribución aleatoria

Rango Promedio de muestra 1: 63.6316

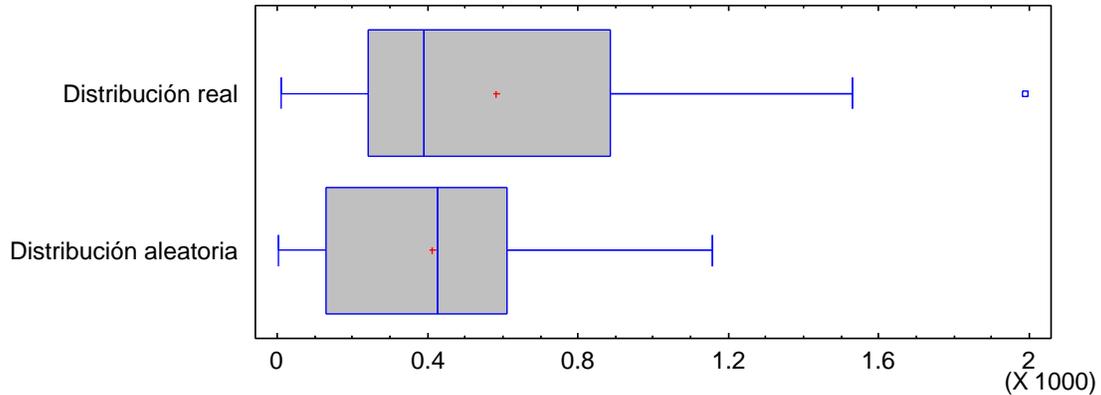
Rango Promedio de muestra 2: 51.3684

$W = 1275.0$  valor-P = 0.0479405

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

Esta opción ejecuta la prueba W de Mann-Whitney para comparar las medianas de dos muestras. Esta prueba se construye combinando las dos muestras, ordenando los datos de menor a mayor, y comparando los rangos promedio de las dos muestras en los datos combinados. Debido a que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95.0%.

Justamente el gráfico siguiente ilustra que los datos de ambas muestras en sus medianas tienen poca similitud.



*Gráfico 13.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos permanentes a zonas de pérdida de bosque abierto.*

Lo anterior confirma que esta relación espacial es muy relevante para nuestro modelo. Ahora se aplica una segunda prueba, donde se analiza la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las distribuciones real y aleatoria.

#### **Prueba de Kolmogorov-Smirnov**

Estadístico DN estimado = 0.22807

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 1.21756

Valor P aproximado = 0.103137

En la prueba de Kolmogorov-Smirnov el resultado de la distancia máxima entre las muestras es 0.22807 (ver gráfico 14). El valor-P resulto ser menor que 0.15, lo que indica que hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un 85.0% de nivel de confianza. Este valor nos confirma que la relación espacial es relevante para nuestro modelo.

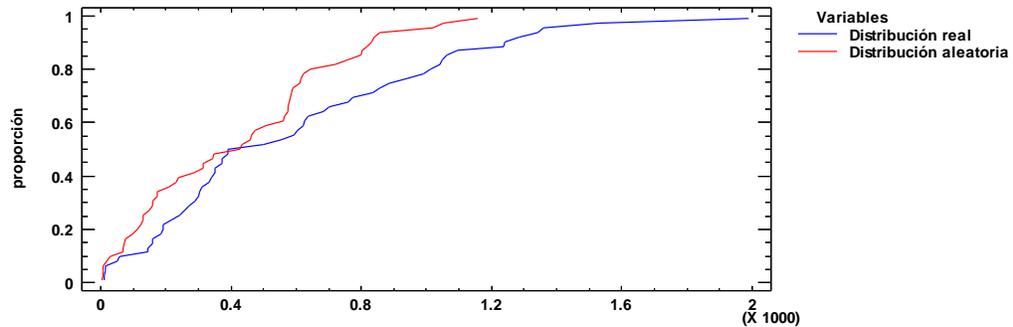


Gráfico 14.-Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos permanentes a zonas de pérdida de bosque abierto.

### 5.2.1.4.3 Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque abierto

Otra de las relaciones que se tomaron como parámetro del modelo es la proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque abierto. En seguida se describe las pruebas que sustentan esta decisión. Lo primero que se analizó fue las estadísticas de sesgo y curtosis de cada distribución, en la tabla 15 se aprecia que ambas distribuciones tienen un sesgo y curtosis mayor al rango de -2 a +2, siendo sus distribuciones no normales.

Tabla 20.- Resumen estadístico de la proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque abierto.

<b>Estadística</b>	<b>Pérdida de bosque abierto real</b>	<b>Pérdida de bosque abierto aleatoria</b>
Recuento	49	49
Promedio	678.122	480.98
Desviación Estándar	1450.77	1160.27
Sesgo Estandarizado	9.70565	10.4674
Curtosis Estandarizada	16.6583	20.0887

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior nos lleva a la decisión de realizar pruebas no paramétricas, en seguida se muestran los resultados de la prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar las medianas de cada distribución.

## Comparación de Medianas

Mediana de distribución real: 204.0

Mediana de distribución aleatoria: 97.0

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana de distribución real = mediana de distribución aleatoria

Hipótesis Alt.: mediana de distribución real  $\neq$  mediana de distribución aleatoria

Rango Promedio de muestra 1: 55.4592

Rango Promedio de muestra 2: 43.5408

$W = 908.5$  valor-P = 0.0383366

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

Esta prueba se construye combinando las dos muestras, ordenando los datos de menor a mayor, y comparando los rangos promedio de las dos muestras en los datos combinados. Debido a que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95.0%. Este resultado nos da una primera certeza de que la relación espacial es muy relevante. En el gráfico se aprecia esta diferencia de las medianas en las muestras.

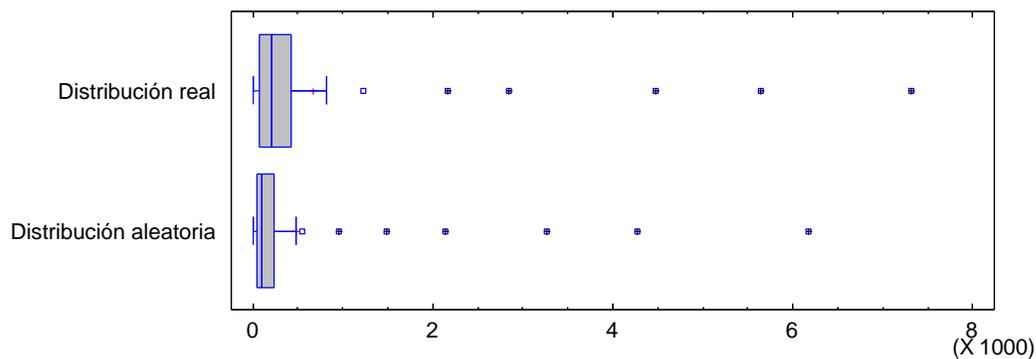


Gráfico 15.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos anuales a zonas de pérdida de bosque abierto.

Enseguida se realiza la segunda prueba para comparar las distribuciones de los datos y con ello poder comprobar si realmente la relación espacial es relevante para el modelo.

### Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Estadístico DN estimado = 0.285714

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 1.41421

Valor P aproximado = 0.0366314

En esta prueba se realiza calculando la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las dos proximidades espaciales. En este caso, la distancia máxima es 0.285714, esta se puede verificarse en el gráfico de cuantiles 16. De particular interés es el valor-P aproximado para la prueba que es menor que 0.05, por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un nivel de confianza del 95.0%. Por lo tanto, esta relación espacial es muy relevante para nuestro modelo.

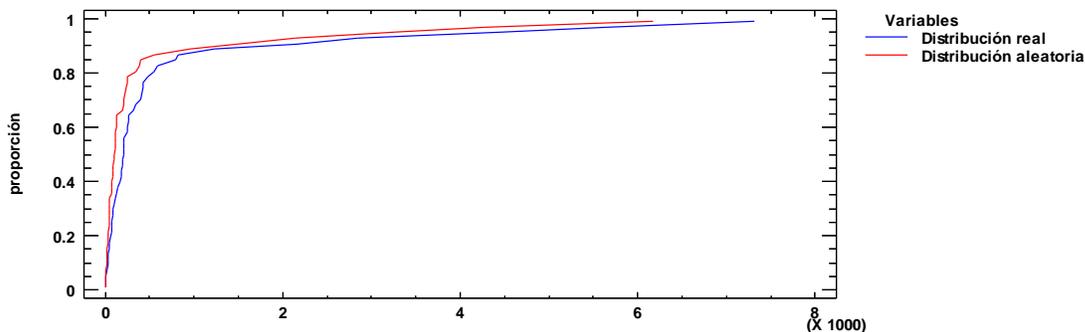


Gráfico 16.- Cuantiles que muestra la distribución real y aleatoria de la relación proximidad de cultivos anuales a zonas de pérdida de bosque abierto.

#### 5.2.1.4.4 Coincidencia de la orientación de la pendiente en bosque abierto

Los datos estadísticos de la relación espacial de coincidencia de orientación de la pendiente en bosque abierto resultaron tener una distribución de sus datos normales, en la siguiente tabla se pueden apreciar las estadísticas generales de las distribuciones real y aleatoria.

Tabla 21.- Resumen estadístico de la relación de coincidencia de la orientación de la pendiente con la pérdida de bosque abierto.

<b>Estadística</b>	<b>Pérdida de bosque abierto real</b>	<b>Pérdida de bosque abierto aleatoria</b>
Recuento	8	8
Promedio	4163.13	2960.88
Desviación Estándar	1182.16	850.091
Sesgo Estandarizado	-0.366422	-0.169585
Curtosis Estandarizada	-0.80624	-1.07254

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se prueba que el sesgo y la curtosis de ambas distribuciones están en el rangos -2 a +2, y por ello las siguientes pruebas estadísticas son paramétricas. En la primera se comparan las medias con la prueba de T de Student.

### **Comparación de Medias (prueba T de Student)**

Prueba t para comparar medias

Hipótesis nula: mediana de distribución real = mediana de distribución aleatoria

Hipótesis Alt.: mediana de distribución real  $\neq$  mediana de distribución aleatoria

suponiendo varianzas iguales:  $t = 2.33536$  valor-P = 0.0349235

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

Esta prueba construye los intervalos, o cotas, de confianza para cada media y para la diferencia entre las medias. De interés particular es el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde 98.1075 hasta 2306.39. Puesto que el intervalo no contiene el valor 0, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras, con un nivel de confianza del 95.0%. Gráficamente se puede apreciar sus medias en los puntos rojos que aparecen en el siguiente gráfico, donde efectivamente se aprecia que la posición de sus medias no es similar.

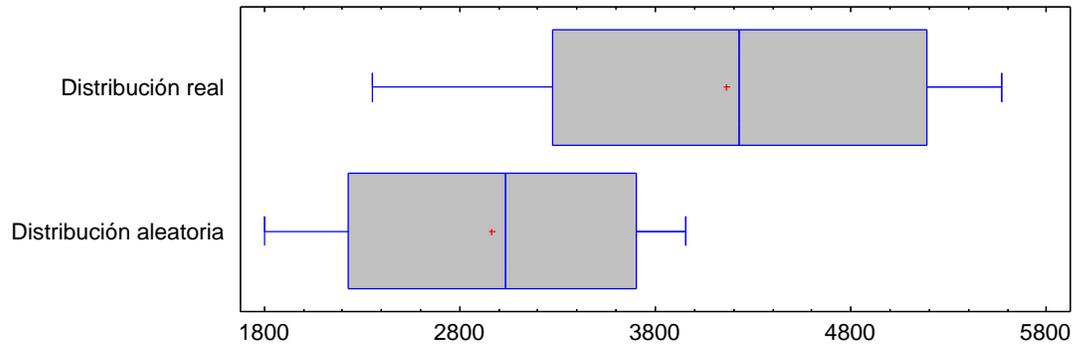


Gráfico 17.- Caja y bigotes que muestra la distribución real y aleatoria de la coincidencia de la orientación de la pendiente con las zonas de pérdida de bosque abierto.

En este caso, la prueba se ha construido para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la diferencia no es igual a 0.0. Puesto que el valor-P calculado es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna. Esto nos da pauta a considerar que la relación es muy relevante para el modelo. Para sustentar más esta conclusión se hace una segunda prueba para comparar la desviación estándar de ambas distribuciones.

Tabla 22.- Comparación de la desviación estándar de la coincidencia de la orientación de la pendiente con la pérdida de bosque abierto

Prueba estadística	Distribución real	Distribución aleatoria
Desviación Estándar	<b>1182.16</b>	<b>850.091</b>
Varianza	1.39751E6	722654.
Gl	7	7

Fuente: Elaboración propia.

Razón de Varianzas= 1.93386

Intervalos de confianza del 95.0%

Desviación Estándar de la distribución real: [781.616, 2406.03]

Desviación Estándar de la distribución aleatoria: [562.058, 1730.17]

Razones de Varianzas: [0.387166, 9.65946]

Prueba-F para comparar Desviaciones Estándar

Hipótesis Nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

Hipótesis Alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

$$F = 1.93386 \quad \text{valor-P} = 0.403839$$

No se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.25$ .

Esta opción ejecuta una prueba-F de Fisher para comparar las varianzas de las dos muestras. Se construye intervalos de confianza para cada desviación estándar y para la razón de varianzas. En este caso, la prueba determina si el cociente de las desviaciones estándar es igual a 1.0 versus la hipótesis alternativa de que el cociente no es igual a 1.0. Puesto que el valor-P no es menor que 0.25, no se puede rechazar la hipótesis nula, es decir que las distribuciones real y aleatoria son similares.

La relación no es lo suficientemente relevante para nuestro modelo en esta prueba, sin embargo, se considerará como parámetro del modelo por ser muy relevante en la prueba de comparación de medias.

### **5.3 Análisis de influencia de los valores de los parámetros**

El cálculo de probabilidad de pérdida de bosque y de bosque abierto, se determina por medio de funciones matemáticas ajustadas para cada uno de los parámetros relevantes para el modelo DEFORELATIONS. Para ello se realizó un procedimiento de ajuste de mínimos cuadrados, y se eligió aquella ecuación que describiera de mejor manera la distribución de los datos tanto para la pérdida de bosque y como para la de bosque abierto.

Es importante señalar que la relación espacial de coincidencia de la orientación de pendiente con bosque y bosque abierto no se consideró en la determinación de la influencia debido a que en una de las etapas del modelo se necesita el valor de DN que se obtiene de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y este resulta muy dispar en comparación de las otras relaciones. Posiblemente esto se debe a que, a diferencia de las otras relaciones, sus valores tienen una distribución circular en lugar de lineal (los valores de 0 y 360 grados representan la misma orientación, debido a que el concepto de ángulo azimutal es circular) y esto requiere de otra clase de pruebas

estadísticas. En el apartado de ponderación se explicará con más detalle dicha determinación de no considerarlo como parámetro para el modelo.

### 5.3.1 Funciones de probabilidad empírica para los valores de las relaciones espaciales en la pérdida de bosque

La tabla que enseguida se presenta contiene las relaciones espaciales para bosque que se consideraron como parámetros relevantes con su respectiva ecuación.

Tabla 23.- Relaciones espaciales con su función de probabilidad para el caso de pérdida de bosque.

Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque a:	Parámetro	Función de Probabilidad (Ecuación)
Asentamiento humano	Relevante	$y^{(-1)} = a + bx^2 + \frac{c}{\ln x}$
Cultivo permanente	Relevante	$\ln y = a + bx^{(1.5)} + cx^{(0.5)}$
Cultivo anual	Muy relevante	$Y^{(-1)} = a + bx^2$
Caminos	Muy relevante	$\ln y = a + b^2$
Matorral - pastizal	No relevante	Relación no relevante
Bosque abierto	No relevante	Relación no relevante
Relación espacial de coincidencia de pérdida de bosque con:	Parámetro	Función de Probabilidad (Ecuación)
Altitud	No relevante	Relación no relevante
Orientación de la pendiente	No relevante	Relación no relevante
Suelos	No relevante	Relación no relevante
Tenencia de la tierra	No relevante	Relación no relevante
Pendiente	No relevante	Relación no relevante

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, las ecuaciones se presentan de manera gráfica en relación a la probabilidad de pérdida de bosque.

### 5.3.1.1 Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a asentamientos humanos

En el gráfico 18 se muestra la ecuación de la función de probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a asentamientos humanos en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro es el siguiente.

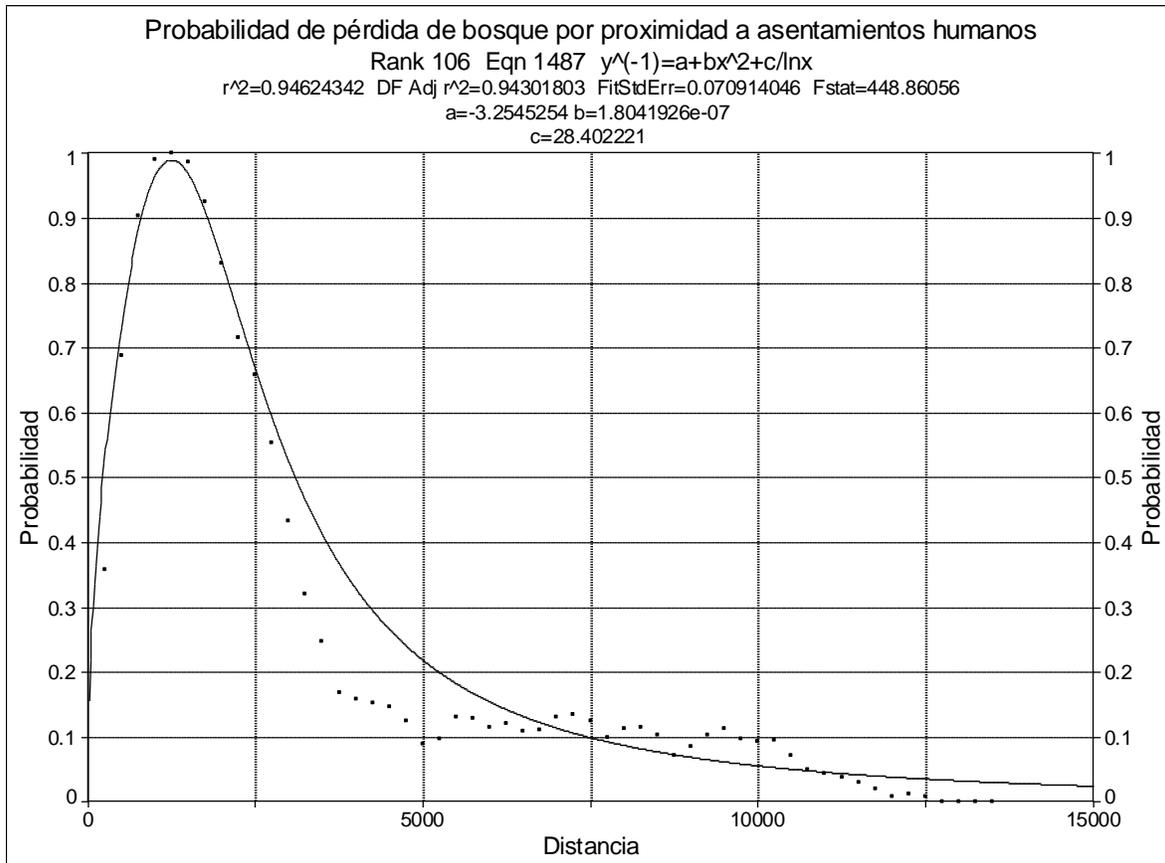


Gráfico 18.- Función de probabilidad de pérdida de bosque para el parámetro proximidad a asentamientos humanos.

### 5.3.1.2 Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a cultivos permanentes

A continuación, en el gráfico 19 se muestra la ecuación de la función de probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a cultivo permanentes en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro.

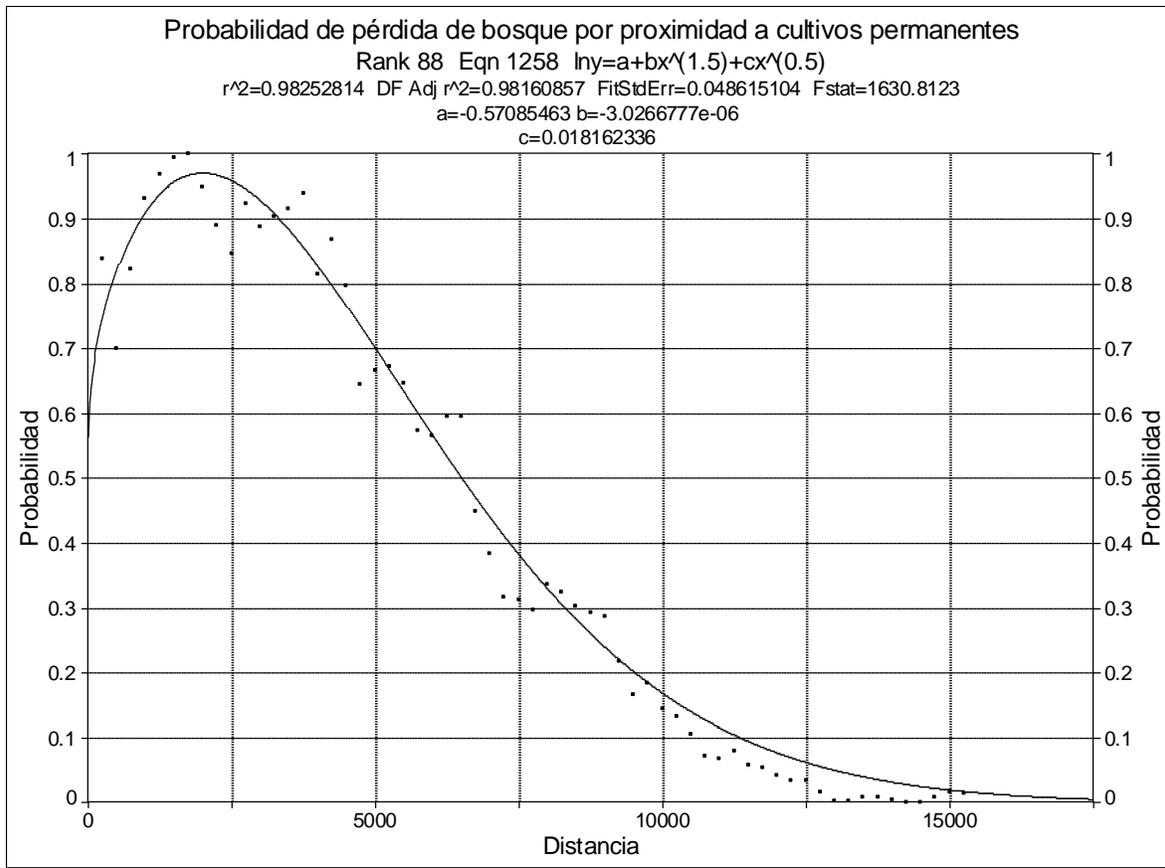


Gráfico 19.- Función de probabilidad de pérdida de bosque para el parámetro proximidad a cultivos permanentes.

### 5.3.1.3 Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a cultivos anuales

Se presenta en el grafico 20 la ecuación de la función de probabilidad seleccionado para la pérdida de bosque por proximidad a cultivo anuales en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro.

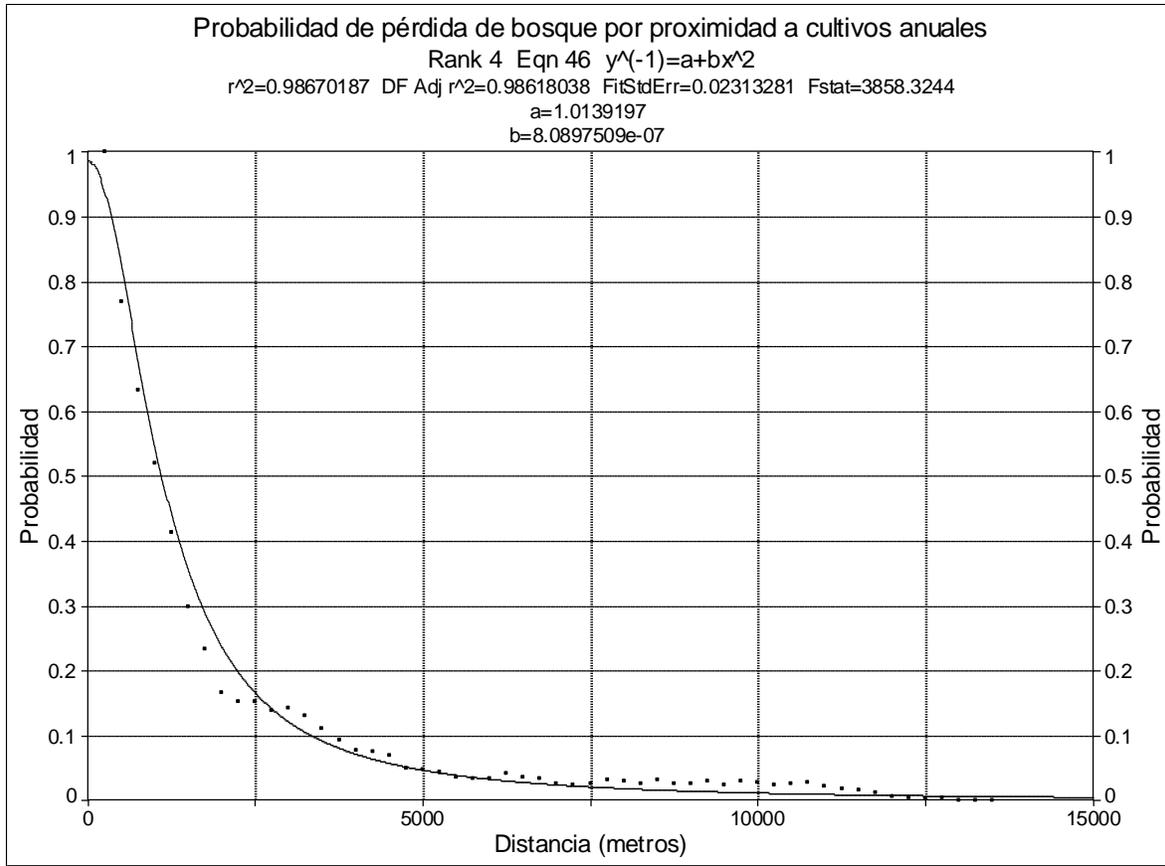


Gráfico 20.- Función de probabilidad de pérdida de bosque para el parámetro proximidad a cultivos anuales.

### 5.3.1.4 Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a caminos

Se presenta el gráfico y ecuación de la función de probabilidad seleccionado para la pérdida de bosque por proximidad a caminos en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro.

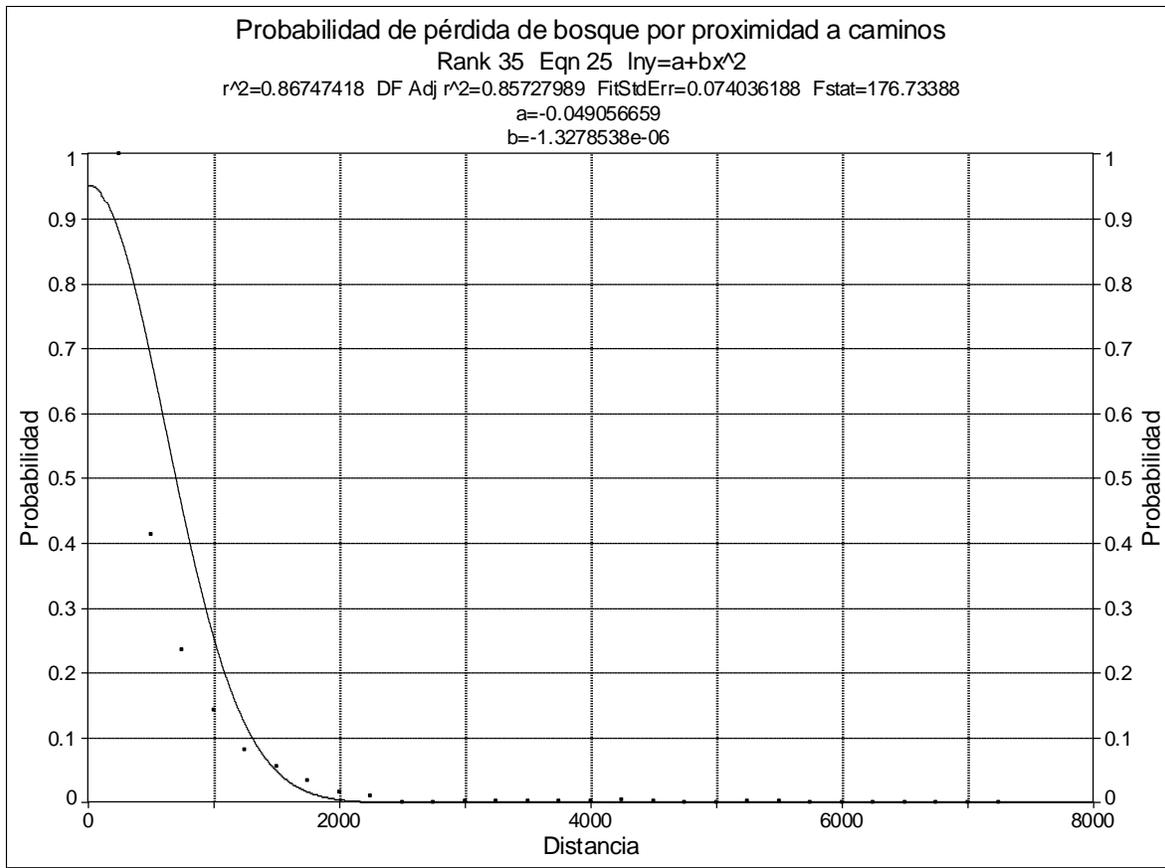


Gráfico 21.- Función de probabilidad de pérdida de bosque para el parámetro proximidad a caminos.

### 5.3.2 Funciones de probabilidad paramétrica para los valores de las relaciones espaciales en relación a la pérdida de bosque abierto

En el caso de bosque abierto, también se eligieron aquellas ecuaciones que representan adecuadamente la probabilidad de pérdida de bosque abierto, en la siguiente tabla se muestran dichas ecuaciones.

Tabla 24.-Relaciones espaciales con su función de probabilidad para el caso de pérdida de bosque abierto.

Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque abierto a	Parámetro	Función de Probabilidad (Ecuación)
Asentamiento humano	Muy relevante	$\ln y = a + b(\ln x)^2 + c \ln x / x$
Cultivo permanente	Relevante	$y = a + b \ln x + c x^3 + d x(0.5) \ln x$
Cultivo anual	Muy relevante	$y^{(-1)} = a + b x^2$
Caminos	No relevante	Relación no relevante
Matorral - pastizal	No relevante	Relación no relevante
Bosque	No relevante	Relación no relevante
Relación espacial de coincidencia de pérdida de bosque abierto con:	Parámetro	Función de Probabilidad (Ecuación)
Altitud	No relevante	Relación no relevante
Orientación de la pendiente	No relevante	Relación no relevante
Suelos	No relevante	Relación no relevante
Tenencia de la tierra	No relevante	Relación no relevante
Pendiente	No relevante	Relación no relevante

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se observan los gráficos de cada ecuación correspondiente a los parámetros del modelo para el caso de pérdida de bosque abierto.

### 5.3.2.1 Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a asentamientos humanos

Para el caso de pérdida de bosque abierto por proximidad a asentamientos humanos real en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro, se obtuvo la siguiente ecuación de la función de probabilidad con su respectivo gráfico.

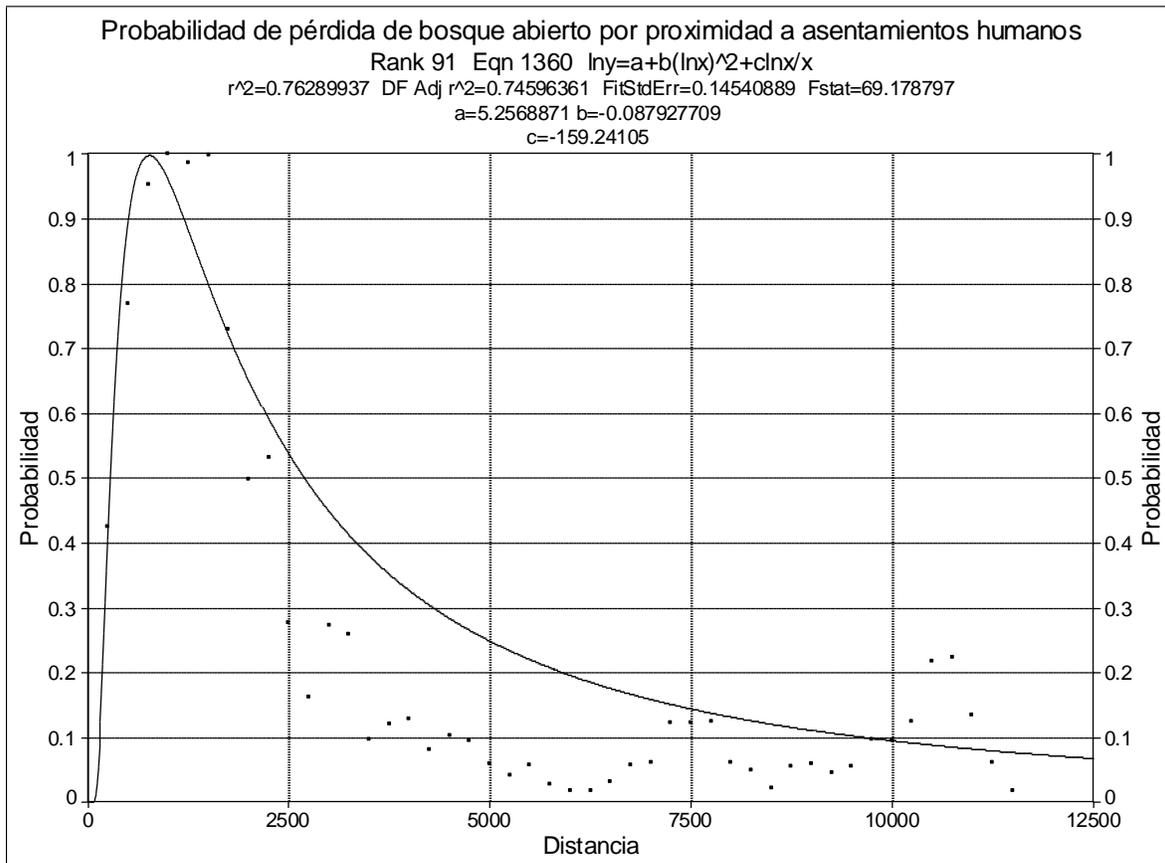


Gráfico 22.- Función de probabilidad de pérdida de bosque abierto para el parámetro proximidad a asentamientos humanos.

### 5.3.2.2 Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a cultivos permanentes

Para la probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a cultivos permanentes en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro, se eligió la ecuación siguiente con su respectivo gráfico.

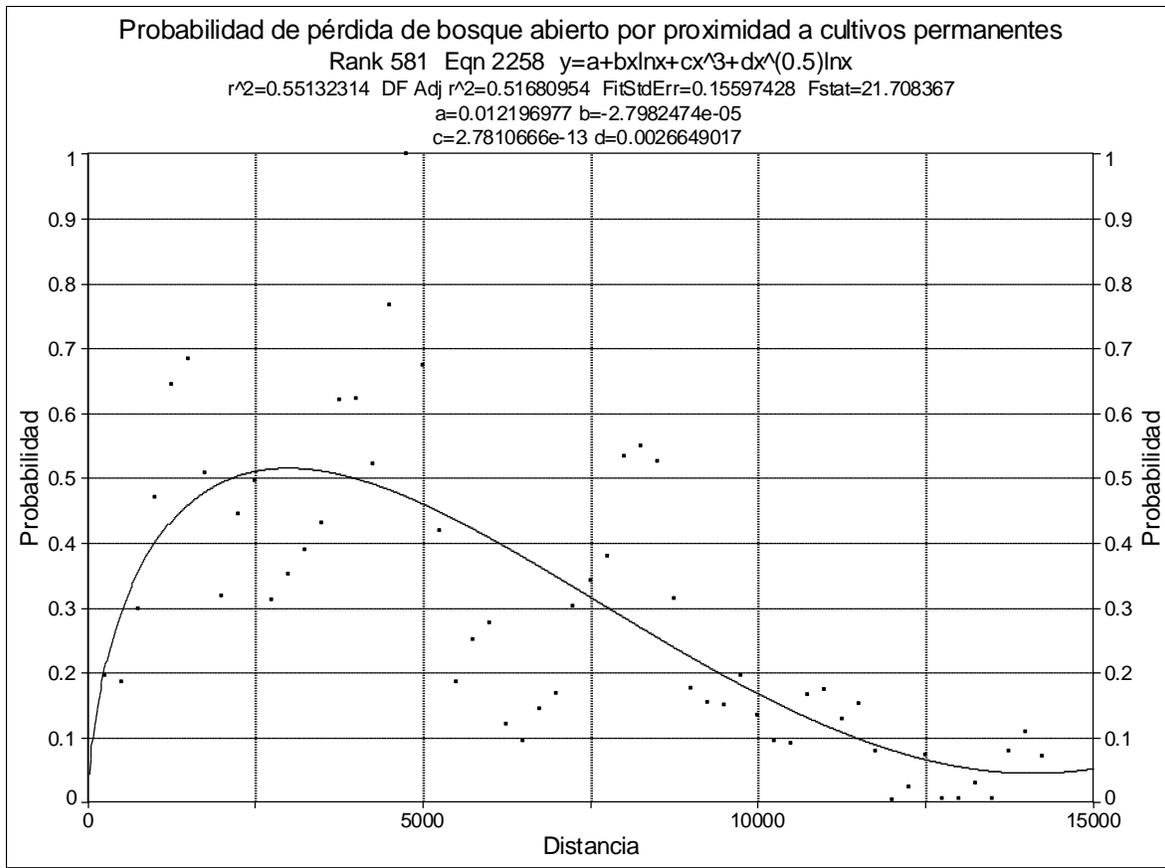


Gráfico 23.-Función de probabilidad de pérdida de bosque abierto para el parámetro proximidad a cultivos permanentes.

### 5.3.2.3 Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a Cultivos anuales

Para la probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a cultivos anuales en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro, se eligió la ecuación siguiente con su respectivo gráfico.

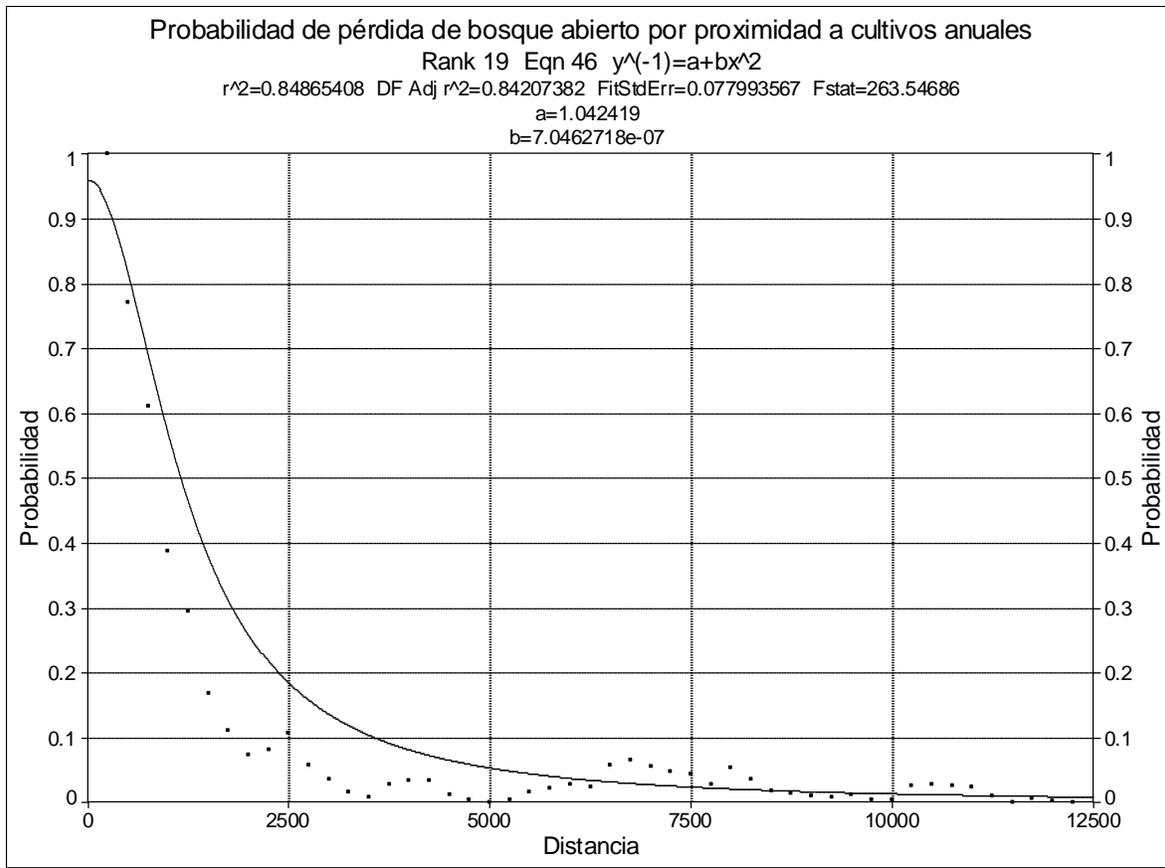


Gráfico 24.- Función de probabilidad de pérdida de bosque abierto para el parámetro proximidad a cultivos anuales.

#### 5.4 Análisis de Ponderación

Para determinar la contribución de cada relación en la pérdida forestal, se utilizan los valores de DN obtenidos con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y con estos valores se calcula el peso de cada parámetro del modelo.

Es importante explicar que la orientación de la pendiente no se tomó como parámetro para pérdida de bosque y bosque abierto, puesto que al calcular dicha prueba de Kolmogorov-Smirnov el valor -P salió mayor 0.25, esto confirma que esta relación espacial no es relevante para este modelo. Si se incluyera en la ponderación haría que la diferencia entre los pesos de los otros parámetros y éste fuera muy grande.

#### 5.4.1 Ponderación de factores en pérdida de bosque

En la tabla 25 se muestra cada parámetro con su respectivo peso. La relación de los caminos y las zonas de pérdida forestal es la que tuvo el mayor peso, y la de menor peso fue la de los cultivos permanentes.

Tabla 25.- Parámetros con su respectivo peso en relación con la pérdida de bosque

Municipios de estudio	Parámetro	DN	Peso
Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro	Proximidad de asentamientos Humanos a pérdida de bosque	0.351852	0.23
	Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque	0.229508	0.15
	Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque	0.333333	0.22
	Proximidad de caminos a pérdida de bosque	0.586207	0.39
	suma		1

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.2 Ponderación de factores en relación con la pérdida de bosque abierto

Siguiendo un procedimiento similar al anterior, a los parámetros relativos a la pérdida de bosque se les calculó su respectivo peso, donde la relación con cultivos anuales resultó la de mayor peso, y la relación con cultivos permanentes fue la de menor peso, en la tabla siguiente se muestran dichos valores.

Municipios de estudio	Parámetro	DN	Peso
Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro	Proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto	0.26087	0.34
	Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque	0.22807	0.29
	Cultivo Anual	0.285714	0.37
	<b>Suma</b>	0.774654	1

Tabla 26.-Parámetros con su respectivo peso en relación con la pérdida de bosque abierto

## 5.5 Análisis paramétrico

En esa fase, se tomaron las funciones matemáticas anteriormente definidas para ejecutarlas en un SIG y así obtener la probabilidad de pérdida de forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Esto se realizó con cada uno de los parámetros de manera individual para observar claramente cómo influyen cada uno de ellos en la probabilidad de pérdida de bosque y bosque abierto. Para facilitar la interpretación de los mapas los valores resultantes se reclasificaron en rangos de probabilidad.

### 5.5.1 Probabilidad de pérdida de bosque por cada parámetro

A continuación, se muestran los resultados de cada parámetro obtenidos con su respectiva ecuación e implementada en un SIG para obtener el mapa de probabilidad de pérdida de bosque.

#### 5.5.1.1 Probabilidad de pérdida de bosque por asentamientos humanos

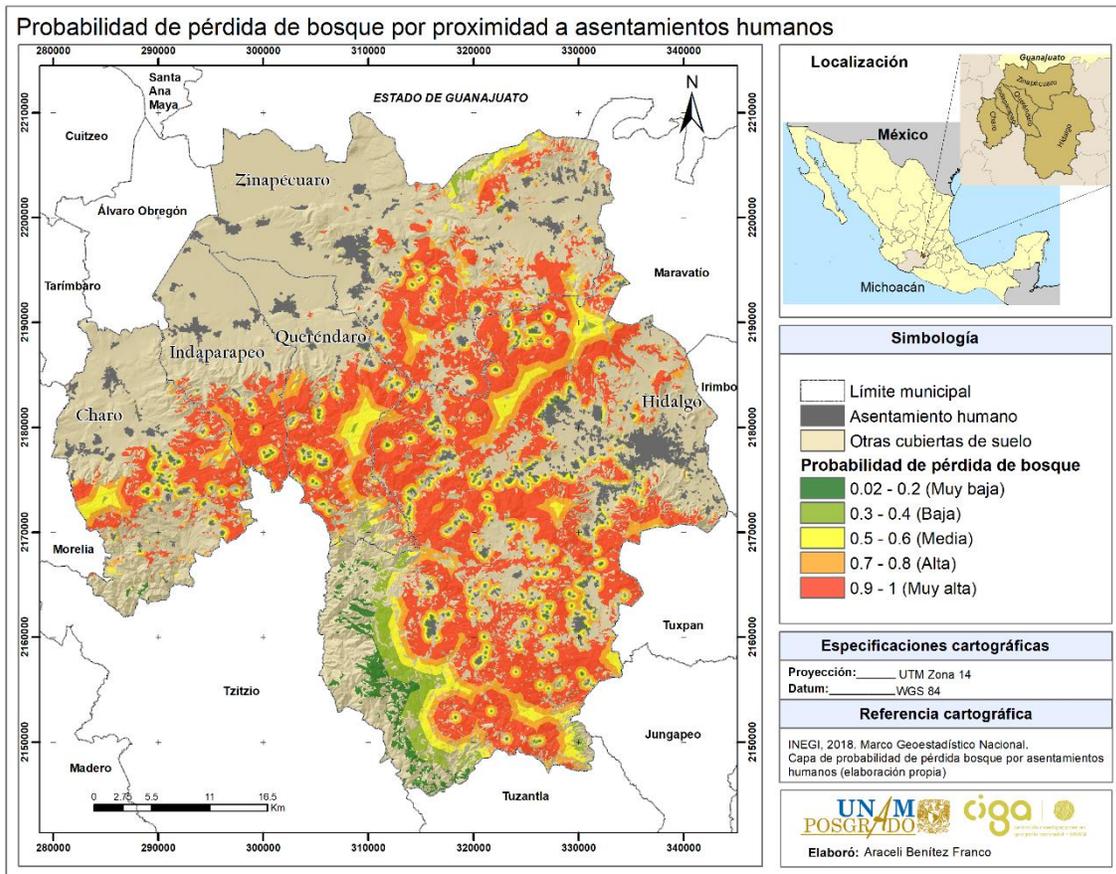
La operación matemática introducida al sistema de información geográfica fue la ecuación abajo indicada y que se sustituyó con los valores correspondientes a cada término, de la siguiente manera:

$$y^{(-1)} = a + bx^2 + \frac{c}{\ln x} =$$

---

$$\frac{1}{-3.2545254 + 1.8041926e - 07 * Square(xahb15) + \frac{28.402221}{Ln(xahb15)}}$$

Los valores introducidos para las constantes a, b y c han sido sustituidos por los valores de los coeficientes obtenidos de la función de la probabilidad. En el caso de la variable x se utiliza el nombre de la capa raster de proximidad bosque 2015 a asentamientos humanos 2015. Enseguida se muestra el mapa 13 resultante de esta ecuación el cual es la probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a asentamientos humanos.



Mapa 13.- Probabilidad de pérdida de bosque por el parámetro de proximidad a asentamientos humanos.

### 5.5.1.2 Probabilidad de pérdida de bosque por cultivos permanentes

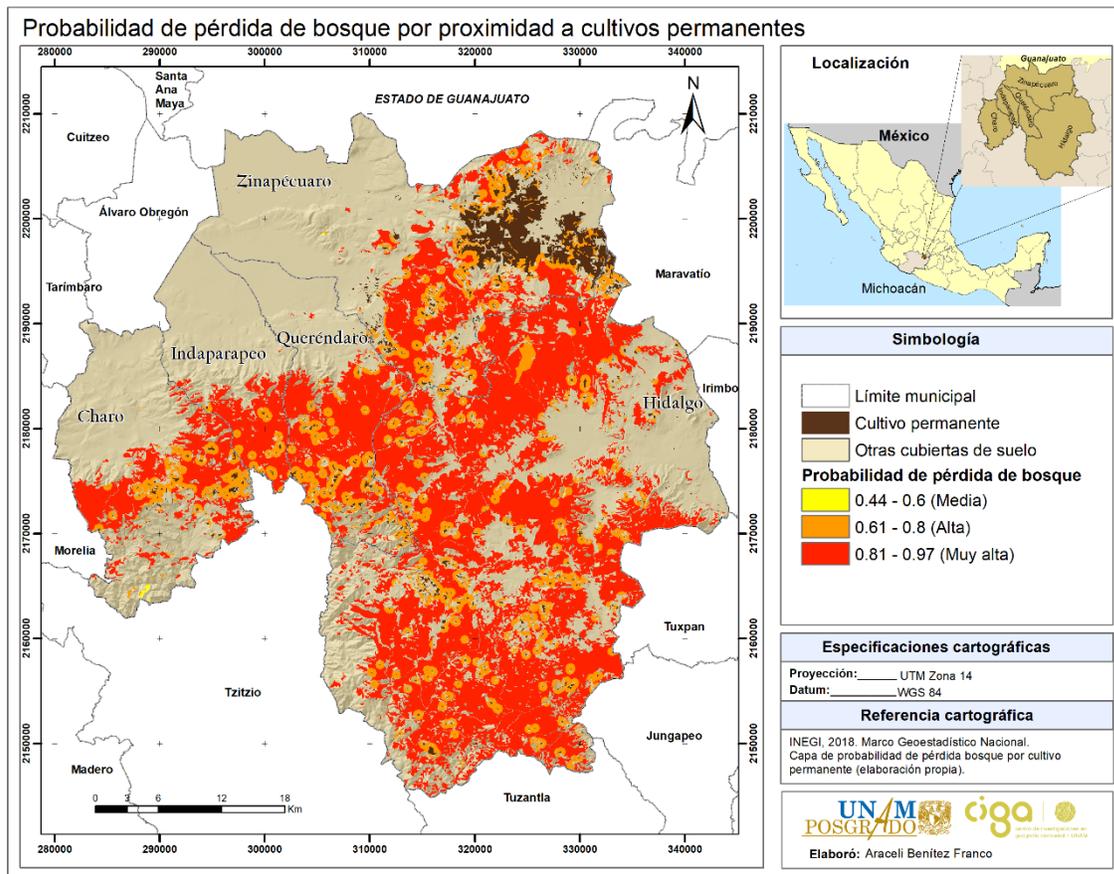
En cuanto a la ecuación de probabilidad de pérdida de bosque por cultivos permanentes se utilizó la función matemática correspondiente y se sustituyeron los símbolos con los valores respectivos.

$$\ln y = a + bx^{1.5} + cx^{0.5} =$$

$$\text{Exp}(-0.57085463 + -3.0266777e - 06 * xcpcb15 ** 1.5 + 0.018162336 * xcpcb15 ** 0.5)$$

Las constantes a, b y c son sustituidas por los coeficientes obtenidos de la función de la probabilidad. En el caso de la variable x se sustituyó con el nombre de la capa de proximidad bosque 2015 a cultivos permanentes 2015. Enseguida se muestra

el mapa de la probabilidad de pérdida de bosque por cercanía a cultivos permanentes.



Mapa 14.- Probabilidad de pérdida de bosque por el parámetro de proximidad a cultivos permanentes.

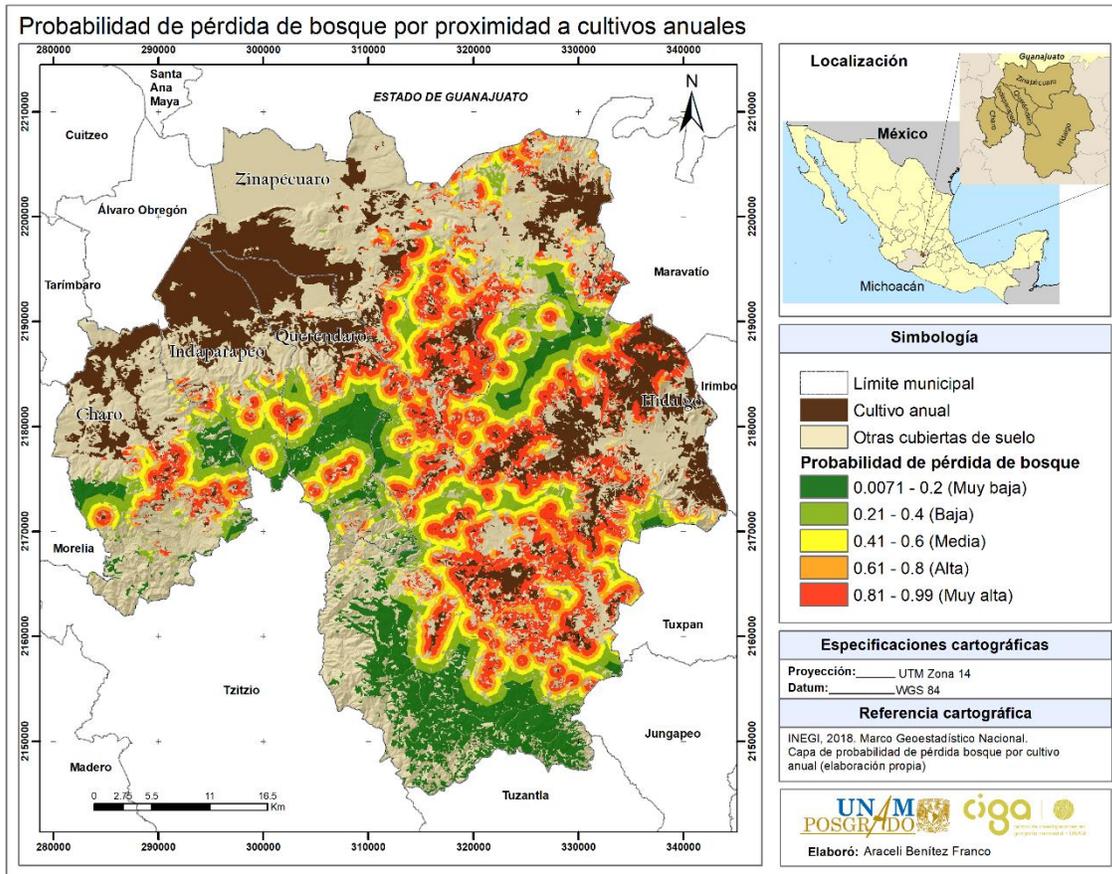
### 5.5.1.3 Probabilidad de pérdida de bosque por cultivo anual

La función matemática correspondiente se aplicó como se muestra a continuación.

$$Y^{-1} = a + bx^2 = \frac{1}{1.0139197 + 8.0897509e - 07 * Square(xcab15)}$$

Los datos de las constantes a y b se sustituyeron por los coeficientes obtenidos de la función de la probabilidad (los valores se pueden apreciar en los gráficos de cada parámetro). La x es el nombre de la capa raster de proximidad bosque 2015 a

cultivos anuales 2015. En el mapa 15 se aprecia de la probabilidad de pérdida de bosque por cercanía cultivos anuales.



Mapa 15.- Probabilidad de pérdida de bosque por el parámetro proximidad a cultivos anuales.

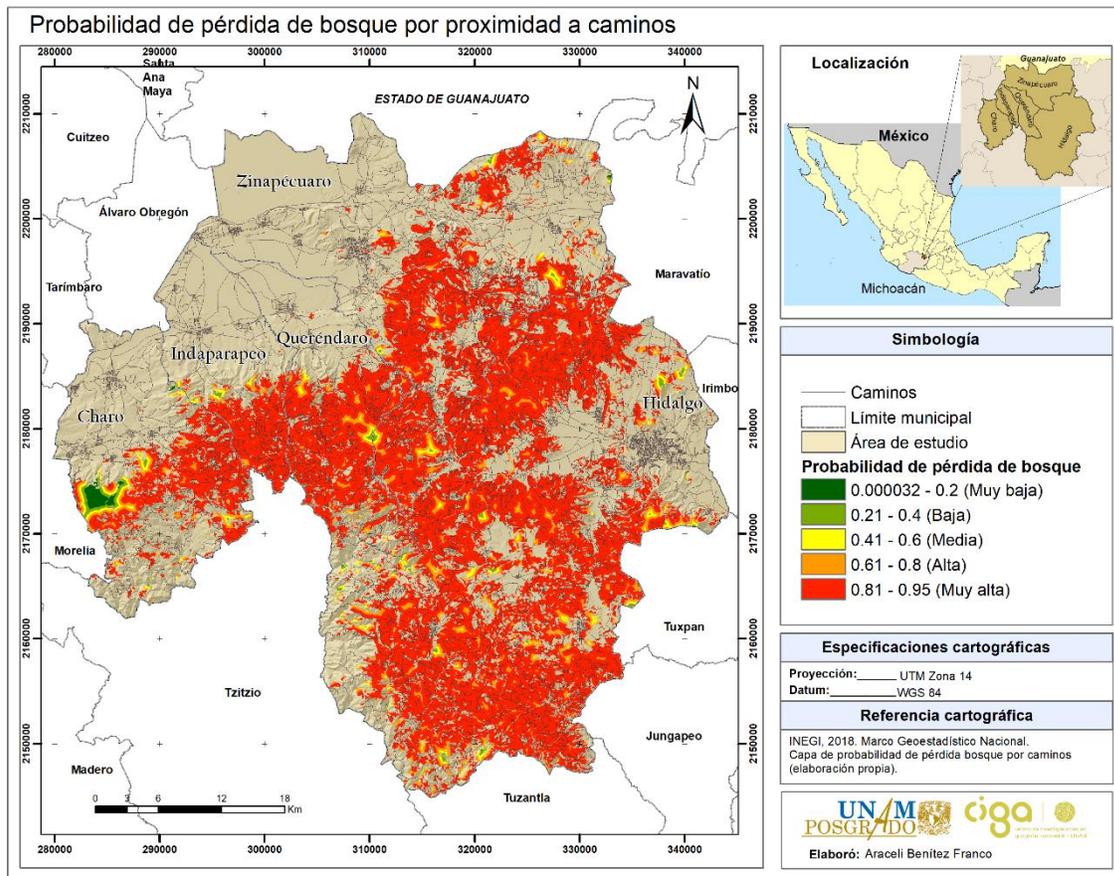
#### 5.5.1.4 Probabilidad de pérdida de bosque por caminos

Para este parámetro se utilizó la ecuación correspondiente, la cual se sustituyó de la siguiente manera:

$$\ln y = a + b^2 = \text{Exp}(-0.049056659 \pm 1.3278538e - 06 * \text{Square}("xcamib15"))$$

Los coeficientes obtenidos de la función de la probabilidad se colocaron en lugar de las constantes a y b. El nombre de la capa de proximidad bosque 2015 a caminos

2015 representa el valor de x. El mapa 16 es la probabilidad de pérdida de bosque por cercanía a caminos.



Mapa 16.- Probabilidad de pérdida de bosque por el parámetro proximidad a caminos.

## 5.5.2 Probabilidad de pérdida de bosque abierto

De igual manera que para la probabilidad de pérdida de bosque, en este caso se lleva a cabo la implementación de cada ecuación para su respectivo parámetro. Enseguida se muestra cada uno de los resultados.

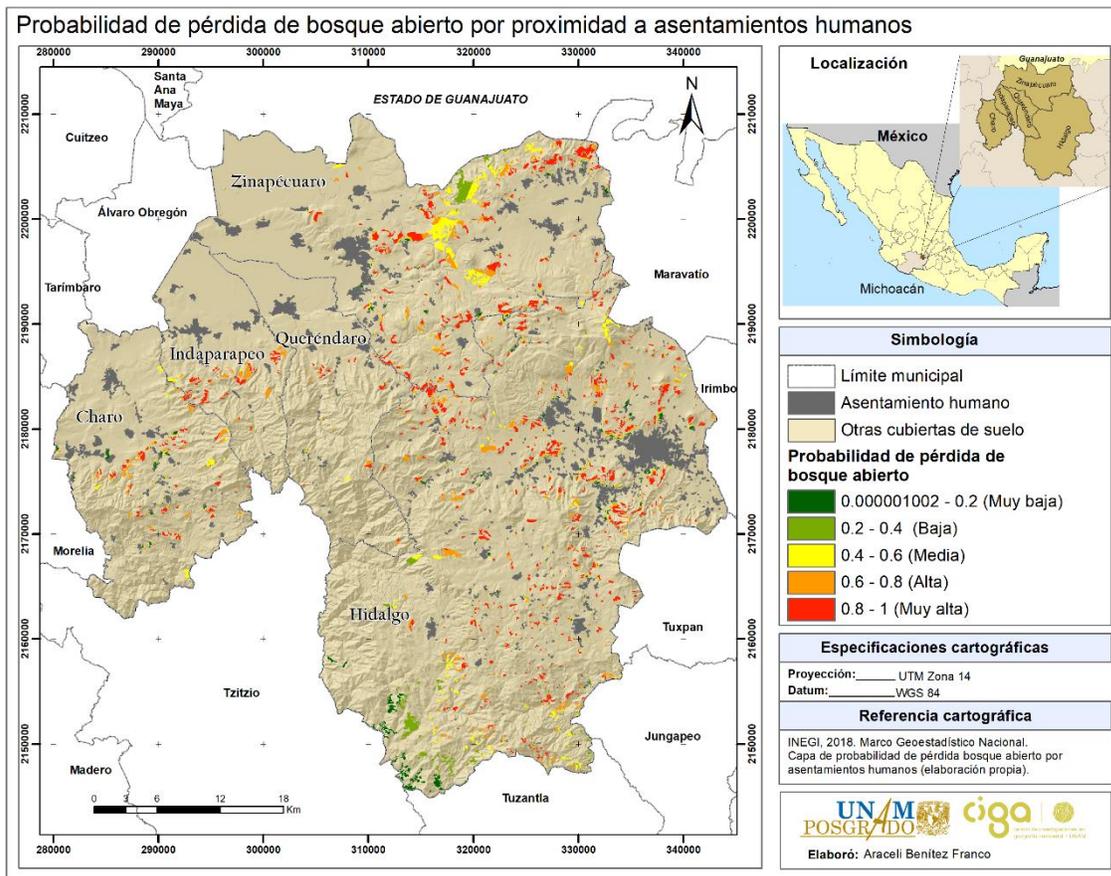
### 5.5.2.1 Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a asentamientos humanos

La función matemática introducida al sistema de información geográfica para este parámetro se sustituyó de la siguiente manera:

$$\ln y = a + b(\ln x)^2 + c \ln x / x =$$

$$\text{Exp}(5.2568871 + -0.087927709 * \text{Square}(\text{Ln}("xahba15")) + -159.2405 * \text{Ln}("xahba15") / "xahba15")$$

Los valores de las constantes a, b y c son los coeficientes obtenidos de la función de la probabilidad. El valor de x es el nombre de la capa raster de proximidad bosque abierto 2015 a asentamientos humanos 2015. El mapa 17 es la probabilidad de pérdida de bosque abierto por asentamiento humanos.



Mapa 17.- Probabilidad de pérdida de bosque abierto por el parámetro de proximidad a asentamientos humanos.

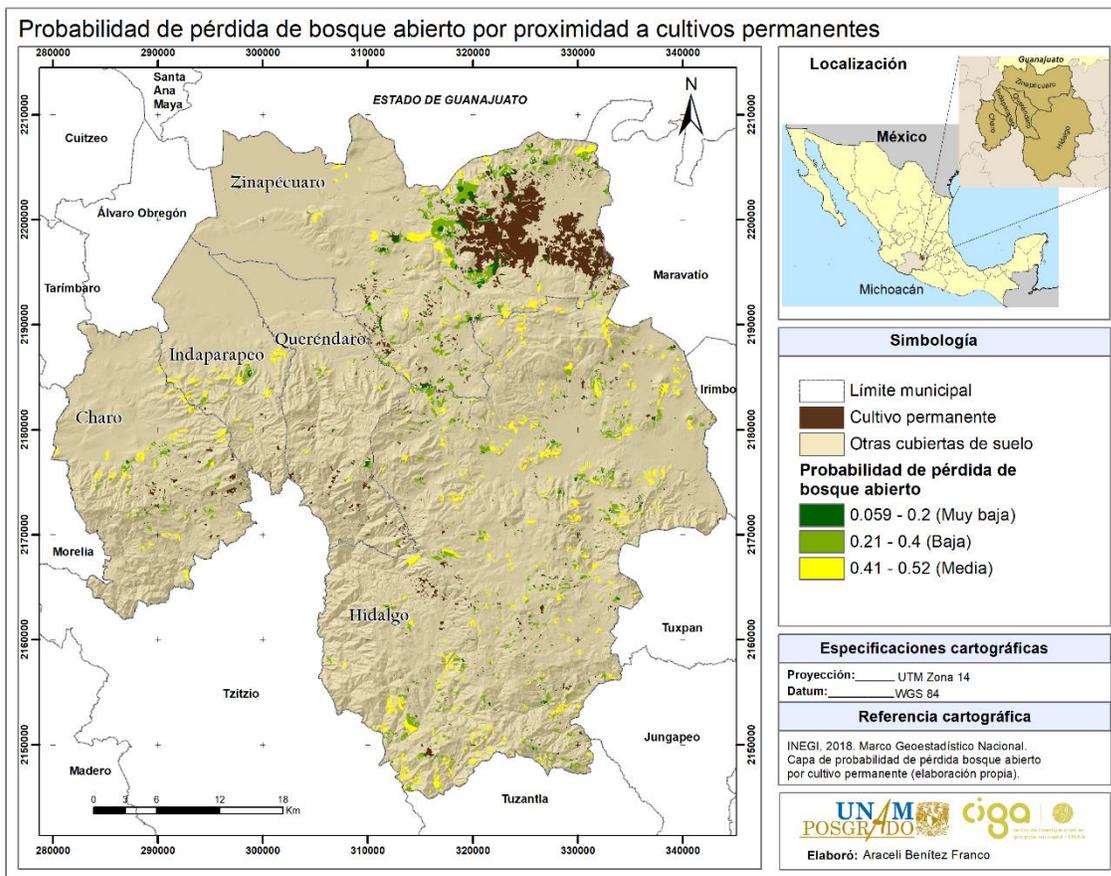
### 5.5.2.2 Probabilidad de pérdida de bosque abierto por cultivos permanentes

Para este parámetro se eligió la ecuación correspondiente, esta función matemática se ejecutó en un software de un sistema de información geográfica de la siguiente manera:

$$y = a + b \ln x + c x^3 + d x(0.5) \ln x =$$

$$(0.012196977 + -2.798247e - 05 * "xcpba15" * \ln("xcpba15")) + 2.7810666e - 13 * "xcpba15" ** 3 + 0.0026649017 * "xcpba15" ** 0.5 * \ln("xcpba15"))$$

Los coeficientes obtenidos de la función de la probabilidad son los que sustituyeron las constantes a, b, c y d en la ecuación. El nombre de la capa de proximidad bosque abierto 2015 a cultivos permanentes 2015 representa el valor de la variable x. La probabilidad de pérdida de bosque abierto por cercanía cultivos permanentes se aprecia en el mapa siguiente.



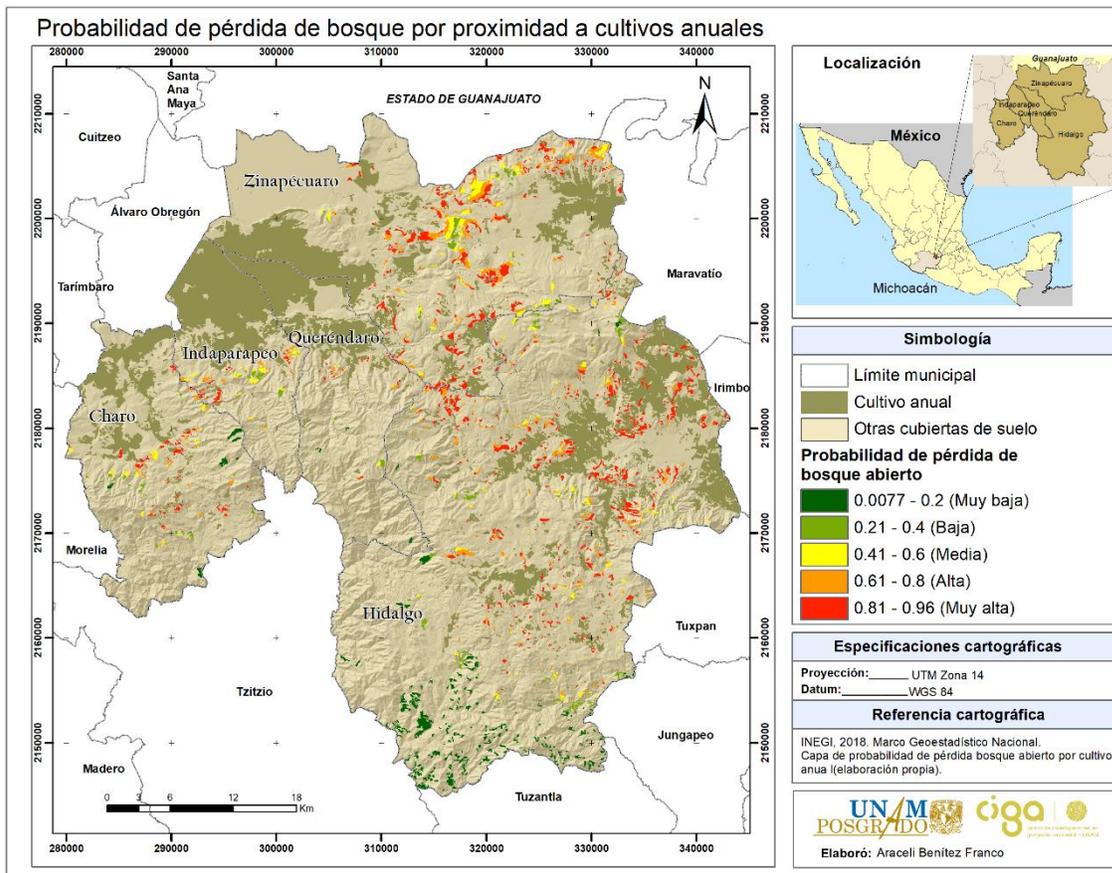
Mapa 18.- Probabilidad de pérdida de bosque abierto por el parámetro de proximidad a cultivos permanentes.

### 5.5.2.3 Probabilidad de pérdida de bosque abierto por cultivos anuales

La función matemática para este parámetro se sustituyó en un SIG de la siguiente manera:

$$y^{(-1)} = a + bx^2 = \frac{1}{(1.042419 + (7.0462718e - 07 * Square("xcaba15")))}$$

Los datos para las constantes a y b son los valores de los coeficientes obtenidos de la función de probabilidad. La variable x es el nombre de la capa raster de proximidad bosque abierto 2015 a cultivos anuales 2015. En el mapa 19 se aprecia de la probabilidad de pérdida de bosque abierto por cercanía cultivos anuales.



Mapa 19.- Probabilidad de pérdida de bosque abierto por el parámetro de proximidad a cultivos anuales.

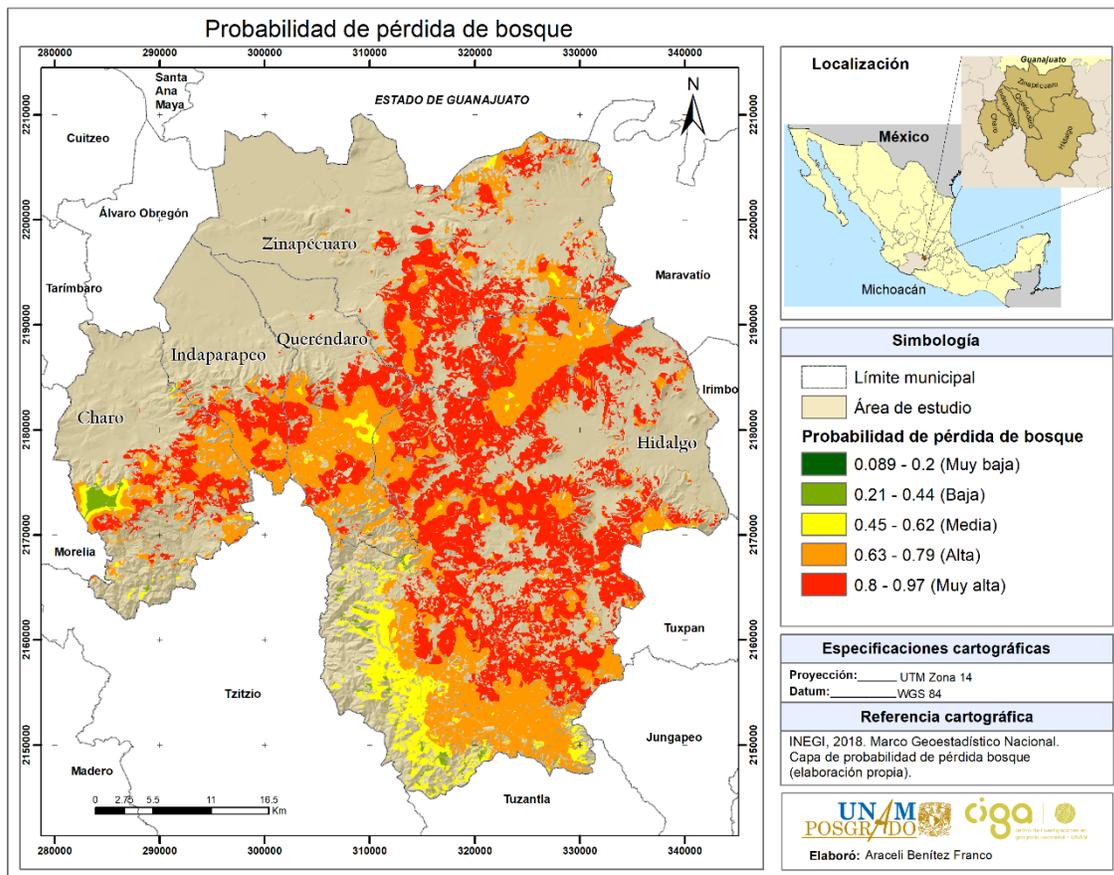
## 5.6 Análisis sintético

Para finalizar la aplicación del modelo DEFORELATIONS, se efectuó la suma, mediante combinación lineal ponderada, de todos los parámetros relevantes, pero

considerando el peso de cada uno de ellos. De este modo se obtiene la probabilidad integral de pérdida de bosque y bosque abierto en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Posteriormente se observan los dos resultados para nuestra área de estudio.

### 5.6.1 Probabilidad de pérdida de bosque

En la probabilidad de pérdida de bosque se tomó en cuenta el resultado de la función matemática de cada parámetro, ponderado por su peso, y se hizo una suma de todos ellos para obtener el mapa siguiente.



Mapa 20.- Modelo sintético, probabilidad de pérdida de bosque.



# **CAPÍTULO VI**

## **6. Discusión**

## 6.1 Cambios en la cubierta forestal en los municipios Charo, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro, e Hidalgo

Al primer objetivo planteado, que fue determinar cómo se han transformado las zonas forestales a través del tiempo (1994 – 2015) en los municipios de estudio, se le dio respuesta con los datos obtenidos de la fotointerpretación de cubiertas y uso de suelo de 1994 y 2015 y el análisis de cambio. Además, también dio contestación a la pregunta de investigación ¿Cuáles han sido los cambios la cubierta forestal en el área de estudio?

En el análisis de los resultados en relación con la pérdida forestal, se identifica que, en estos años, el cambio de uso de suelo fue el principal factor que detonó la disminución del bosque, y que en algunas zonas este comenzará también a ser bosque abierto. Principalmente la ubicación de nuevos asentamientos, es uno de los factores que detonan la proliferación de otros usos suelo como son los cultivos y caminos nuevos para tener accesibilidad a otras poblaciones o actividades económicas. En las figuras 3 y 4 se aprecia que la pérdida de bosque se dio en las zonas periféricas de la cubierta forestal, y en mayores proporciones en los municipios de Zinapécuaro e Hidalgo.

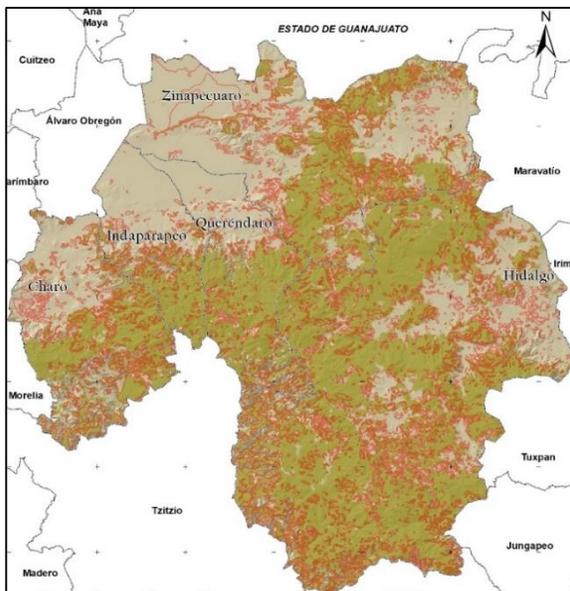


Figura 3.- Zonas de cambio.

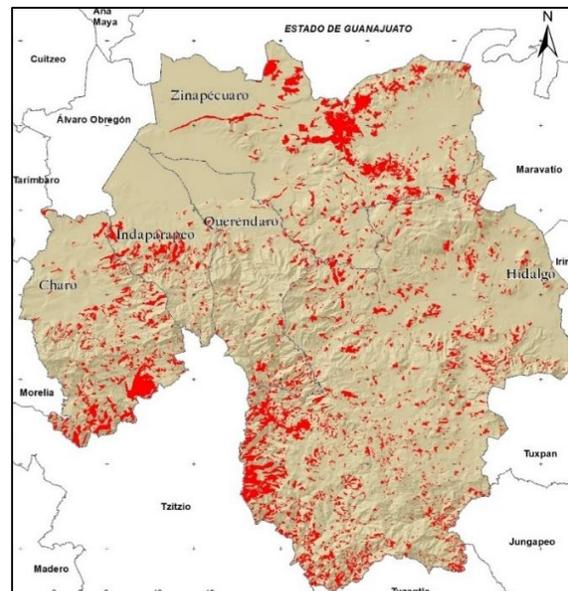
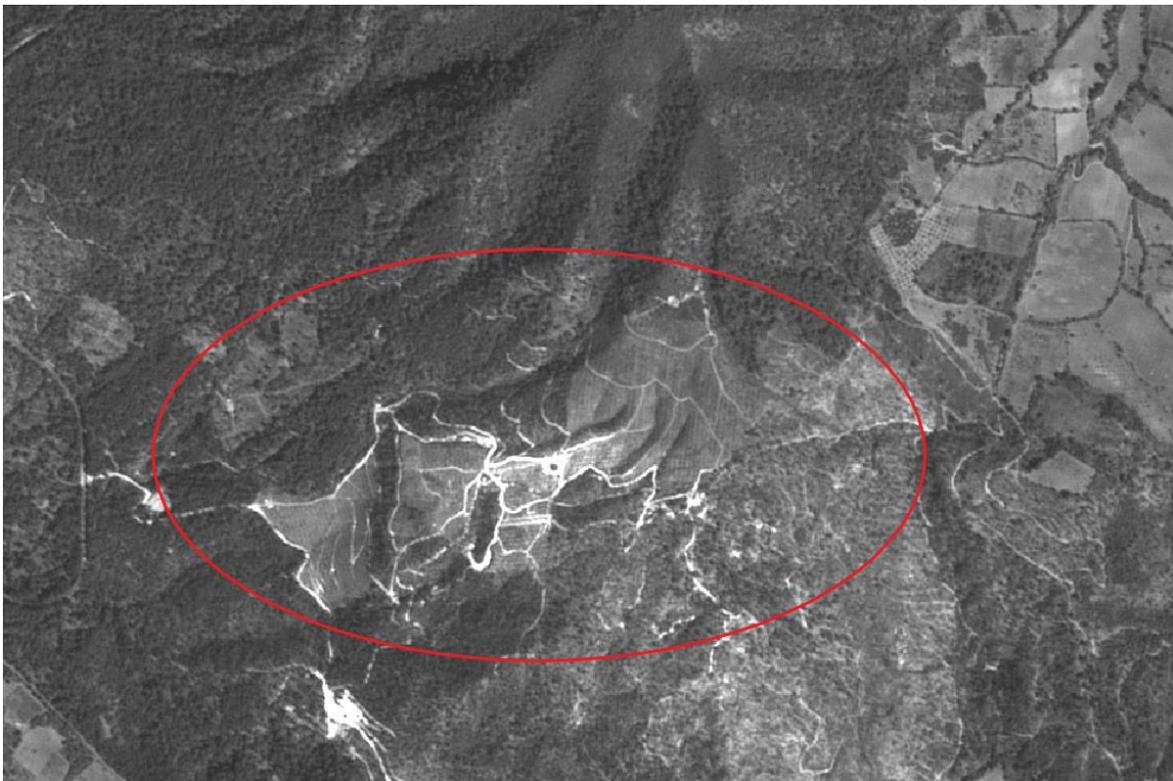


Figura 4.-Pérdida forestal.

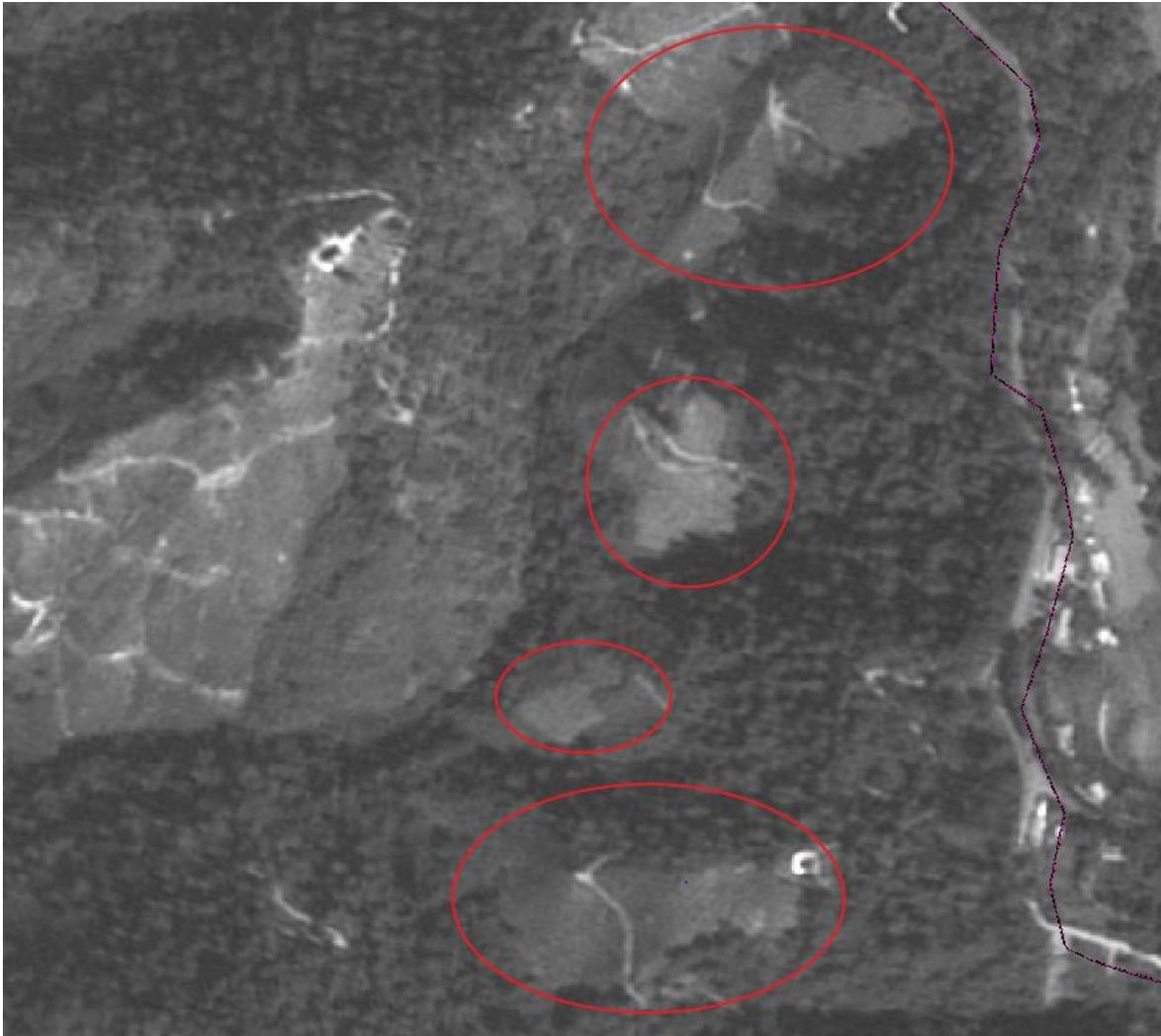
En el municipio de Zinapécuaro la deforestación está relacionada con el incremento de cultivos permanentes, donde principalmente se ha dado la producción de durazno y aguacate. En una publicación de octubre de 2018, la secretaría de agricultura y desarrollo rural hace mención de que efectivamente este municipio tiene la mayor producción de durazno a nivel estatal. En la figura 5 se aprecia como en la parte sur del municipio se extiende el cultivo de aguacate.



*Figura 5.- Imagen SPOT 5 del mes enero del 2014 de una zona sur de Zinapécuaro.*

En la parte oeste del municipio de Hidalgo es donde se dio más la pérdida forestal, aquí principalmente tiene que ver con la cercanía a caminos y a indicios de que las zonas fueron deforestadas para darle un uso de cultivo. Pero al analizar los datos obtenidos del uso del 2015 resulta que son matorrales. Esto nos lleva a inferir que estas zonas se abandonaron y por subsiguiente comenzó a crecer vegetación de matorral. En la parte este del municipio, la pérdida forestal se relaciona con los cultivos anuales que predominan en esta zona.

La pérdida forestal en Queréndaro está en su mayor parte relacionada con la inserción del cultivo de aguacate y otros cultivos permanentes, y también se tienen indicios de zonas abandonadas. En la figura siguiente se muestra un ejemplo de la presencia de aguacate en una imagen pancromática SPOT 5 del mes enero del 2014.



*Figura 6.- Imagen SPOT 5 del mes enero del 2014 de una zona sur de Queréndaro*

Lo que respecta a los municipios de Charo e Indaparapeo, se aprecia que la deforestación está más relacionada con la cercanía a caminos y en algunos casos a la presencia de cultivos anuales.

Estos resultados del análisis de los cambios de cubierta y uso de suelo, nos proporcionaron un indicio de que clases de relación espacial podrían resultar relevantes para el modelo DEFORELATIONS. Lo primero que se esperaba, es que la relación de proximidad de asentamientos humanos a bosque y a bosque abierto fuera un parámetro importante, y un segundo lo fuera la proximidad a cultivos permanentes y anuales y en tercera la proximidad a caminos. Pero para cada caso fue distinto, y en los resultados de la relevancia se demostró que cada cubierta tiene factores detonantes de pérdida de diferente manera a lo largo del tiempo.

## **6.2 Relaciones espaciales que influyen en el proceso de pérdida forestal en los municipios de estudio**

El segundo objetivo de nuestro caso de estudio fue Identificar las interacciones espaciales que han sido más influyentes en el proceso de pérdida de las áreas forestales, el cual también está relacionado con la segunda pregunta de esta investigación ¿Qué relaciones espaciales han influido en el proceso de pérdida forestal? En este caso particular se realizaron dos análisis: para bosque y bosque abierto. A continuación, se explican brevemente los resultados de la relevancia o no relevancia de cada relación espacial.

### **6.2.1 Relevancia en las relaciones espaciales en la pérdida de bosque y bosque abierto**

Los primeros análisis de relevancia realizados fueron para la proximidad a bosque, en los resultados se obtuvo que las relaciones relevantes fueron la proximidad de bosque a asentamientos humanos, a cultivos permanentes, a cultivos anuales y a caminos, el resto de las relaciones espaciales no tuvieron una relevancia significativa.

En lo referente a la pérdida de bosque abierto, las relaciones espaciales relevantes fueron las mismas que las que fueron para el bosque solo la única que no resultó relevante fue la proximidad a caminos, así como el resto de las relaciones analizadas. Enseguida se describe por qué fueron relevantes o no.

### **6.2.1.1 Asentamientos humanos**

Se consideraron los asentamientos humanos como un factor detonante importante de la pérdida bosque, a medida que las poblaciones comienzan a aumentar se expanden a lo largo del territorio o bien ocupan otros espacios y con ello modifican los usos o cubiertas de suelo. Esto es un patrón que se ha dado a lo largo del tiempo en todos los lugares del mundo, los seres humanos buscan un espacio apto para establecerse. Sin embargo, estos procesos no siempre son planeados o van de por medio intereses económicos y es ahí donde se comienzan a hacer los cambios de uso suelo. Por ello, se infirió inicialmente que esta relación espacial de proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque y bosque abierto pudiera ser un parámetro para el modelo. El análisis estadístico presentado en los resultados respalda esta hipótesis tanto en la relación con bosque como para el bosque abierto.

Además, el bosque abierto tiene más probabilidad a ser deforestado, según este parámetro, puesto que el no tener una densidad arbórea importante los vuelve más vulnerables y da más facilidad a acceder a ellos. En los mapas de probabilidad de cada uno de los dos casos de cubierta de bosque, se aprecia que efectivamente entre más cercanía tengan los asentamientos humanos a las zonas boscosas más probabilidad de deforestación, esto puede ser por la expansión poblacional o bien por las mismas actividades económicas de los habitantes de la región.

### **6.2.1.2 Cultivo anual**

Los cultivos anuales se siembran en diferentes temporadas del año, pero estos no son permanentes y se cosechan solo una vez al año, normalmente se producen en climas templados, en pendientes suaves y suelos fértiles. Por lo tanto, es de esperarse que se tomará los cultivos anuales como una relación espacial que está involucrada con la pérdida de bosque.

En los análisis estadísticos para ambos casos de pérdida de bosque y bosque abierto, los resultados fueron acertados en el supuesto planteado de que la

proximidad de los cultivos anuales está involucrada de manera importante en la pérdida forestal.

Se infiere que en el área de estudio en 21 años que transcurrieron (1994 a 2015) se incrementó este tipo de cultivos, y sobre todo en la parte noreste de la región estudiada se aprecia la inserción de estos dentro de la cubierta forestal.

### **6.2.1.3 Cultivo permanente**

En lo que se refiere a los cultivos permanentes, éstos se caracterizan por durar varias temporadas., En este caso particular, es importante destacar que en el estado de Michoacán el auge del cultivo de aguacate ha sido uno de los principales factores de cambio de uso de suelo dentro de las zonas forestales, ya que este tipo de plantas necesitan suelos fértiles para su crecimiento y condiciones aptas tanto de suelo y clima para su crecimiento que coinciden con las encontradas en las zonas de bosque. Era de esperarse que estos cultivos estuvieran presentes en el área de estudio junto con otros tipos de cultivos permanentes, y por ello se decidió tomarlo como una variable para el modelo.

Se ha mencionada en párrafos anteriores que se aprecian zonas de abandono de cultivos, y sobre todo de aguacate, por falta de conocimiento de los pobladores al momento de ubicar sus cultivos. Además, es notorio que la pendiente y la altitud no es un impedimento para que se comiencen a insertar este tipo de cultivos, por lo que en ocasiones no se desarrollan las plantas en buenas condiciones y terminan siendo abandonadas.

Con los análisis estadísticos se fundamenta dicha idea, considerándose un parámetro relevante para la pérdida de bosque y bosque abierto, Justamente, en la interpretación de las imágenes de satélite se aprecia que los cultivos permanentes proliferaron en las zonas forestales del área de estudio de manera desordenada.

#### **6.2.1.4 Caminos**

El incremento en la red de caminos durante el período analizado para la zona de estudio se apreció claramente al momento de realizar el mapa de uso de suelo de 2015, donde los caminos no solo conectaron asentamientos humanos si no que continuaron su crecimiento hacia las zonas de cubierta forestal para facilitar la accesibilidad a los cultivos o bien para incrementarlos. Con este primer indicio, se consideró que los resultados estadísticos sí podrían fortalecer la premisa de que esta relación espacial está estrechamente involucrada en la pérdida forestal.

Los resultados confirmaron la hipótesis inicial, de manera contundente, para el caso de pérdida de bosque. La presencia de caminos dentro del bosque es una prueba más que fortalece la observación de que la altitud y la pendiente no es un impedimento para deforestar en estos lugares, más adelante se describirá particularmente cada variable en su relación con la pérdida forestal.

En lo que se refiere a pérdida de bosque abierto, la relación de proximidad a caminos no resultó ser relevante, lo cual se interpreta que es debido a que en estas zonas ya estaban cercanas a caminos o por tener una densidad baja de árboles, son más accesibles, y por lo tanto el hecho de que se incrementaran los caminos no haría la gran diferencia en fragmentar más estas zonas.

#### **6.2.1.5 Matorral pastizal**

Para esta relación los análisis estadísticos demostraron que la relación de proximidad del bosque a estas zonas no es relevante para la deforestación de bosque y bosque abierto. En este caso particular, la presencia de estas cubiertas de suelo dentro de las zonas forestales es meramente por el abandono de cultivos, lo cual ha dado pie al crecimiento de plantas arbustivas o bien una forma regenerativa del mismo bosque, los pastizales no se han incrementado de manera sustancial, y por ello no son causantes de la pérdida de bosque y bosque abierto.

#### **6.2.1.6 Altitud**

En el caso de la altitud como ya se ha mencionado no ha sido un impedimento a la hora de que se establecen nuevos cultivos y caminos para acceder a ellos. Justamente los resultados nos demostraron que la coincidencia de altitud es una relación no relevante para la pérdida de bosque y bosque abierto. Antes de identificar el uso de suelo para ambas fechas, se esperaba que realmente la altitud fuera un parámetro relevante, ya que se consideraba que ciertos cultivos no se pueden desarrollar en altitudes elevadas por las condiciones climáticas extremas que se pueden llegar a presentar. Sin embargo, se tienen indicios de que se intentó establecer cultivos de aguacate fallidos, además de una traza de caminos típicos de estos cultivos.

#### **6.2.1.7 Pendiente**

Se consideró la pendiente hipotéticamente con la idea de que la inclinación del terreno es una limitante para la accesibilidad y para establecer un cambio de uso dentro del bosque, suponiendo que en aquellas zonas con menos pendiente se pudiera presentar la deforestación. Estos supuestos se refutaron al hacer los análisis estadísticos para ambos casos (bosque y bosque abierto), teniendo como resultado que no importa el grado de inclinación de la pendiente, la pérdida de forestal se presenta en cualquier clase de pendiente en el área de estudio.

Nuevamente se fortalece la idea de que al parecer los habitantes de la región no tienen el conocimiento necesario al momento de establecer nuevos cultivos, o el interés económico es muy fuerte, o bien tienen las suficientes maquinarias para poder acceder a lugares con gran declive. Como se ha mencionado anteriormente se observan cultivos en abandono o indicios de plantíos de aguacate o zonas deforestadas con patrones a ser cultivos, algunos de ellos se sitúan en pendientes pronunciadas.

En el caso del bosque abierto la pendiente no está estrechamente relacionada justo por la ubicación del bosque abiertos, el cual no están en pendientes de grados de inclinación altos. La pérdida de estos bosques está más relacionada a otras relaciones espaciales.

#### **6.2.1.8 Orientación de la pendiente**

Además del grado de inclinación de la pendiente se consideró que su orientación estaba relacionada al momento de que se establecieran los cultivos, pero también resultó ser otra relación no relevante para la pérdida de bosque y bosque abierto. Esto nuevamente es a causa de lo que se ha mencionado en lo variable pendiente y altitud, una falta de conocimiento experto al momento de situar los cultivos. Por lo tanto, la orientación vuelve a ser una relación que no da limitación o de un patrón al momento de deforestar un lugar.

#### **6.2.1.9 Suelos**

Los suelos como una limitante al aumento de cultivos, se consideró que podrían resultar una relación relevante puesto que los diferentes tipos de suelos tienen diferentes aprovechamientos. De igual manera que las relaciones espaciales anteriores que están relacionados con la ubicación de cultivos, resultó no ser relevante para la pérdida de bosque y bosque abierto, ya que no actúa como un factor limitativo para el establecimiento de cultivos dentro de las zonas de cubierta forestal.

#### **6.2.1.10 Tenencia de la tierra**

En lo que respecta a la tenencia de la tierra se tenía la hipótesis de que, por ser ejidal o comunal, se pudiera prestar para ciertos cambios de uso de suelo o bien para conservación la cubierta forestal en las zonas comunales. Sin embargo, los resultados estadísticos nos mostraron que es de las relaciones menos relevantes para nuestro modelo, que su presencia no establece algún patrón para que se presente o no la deforestación en estas zonas.

Esto está ligado a que la distribución la tenencia de la tierra, en su forma de propiedad social, en el territorio de nuestro interés no se concentran en las zonas con bosque, por ello puede ser que no haya sido relevante esta relación espacial.

### 6.3 Resultados del análisis paramétrico

Otro de los objetivos logrados en este estudio fue la construcción del modelo DEFORELATIONS, con la finalidad de obtener la probabilidad de las áreas forestales susceptibles a la pérdida forestal. Los resultados obtenidos fueron primeramente los mapas de probabilidad de cada parámetro para la pérdida de bosque y bosque abierto. Los resultados para los niveles de probabilidad alta y muy alta de pérdida de bosque se observan en la tabla 27, así mismo en la tabla 28 se aprecian lo referente a pérdida de bosque abierto.

Tabla 27.- Probabilidad de pérdida de bosque.

Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a:	Superficie con Probabilidad alta (Has.)	% de superficie respecto al total de bosque 2015	Superficie con Probabilidad muy alta (Has.)	% de superficie respecto al total de bosque 2015
Asentamiento humano	24,058.27	23	60,714.73	57
Cultivo permanente	21,121.99	20	84,620.68	79
Cultivo anual	17,490.90	16	30,179.79	28
Caminos	40,952.91	38	56,088.82	53

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28.- Probabilidad de pérdida de bosque abierto.

Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a:	Superficie con Probabilidad alta (Has.)	% de superficie respecto al total de bosque abierto 2015	Superficie con Probabilidad muy alta (Has.)	% de superficie respecto al total de bosque abierto 2015
Asentamiento humano	2,699.11	23	4,685.66	41
Cultivo anual	2,335.84	20	4,580.75	40
Cultivo permanente	5,237.17	45		

Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a la probabilidad muy alta de pérdida de bosque, la proximidad de cultivos permanentes resultó ser el factor de mayor importancia, continuando con la proximidad a los asentamientos humanos y a la proximidad de caminos. En cambio, en la probabilidad alta de pérdida de bosque sobresale la proximidad de

caminos seguida de la proximidad de asentamientos humanos y finalmente la proximidad a cultivos permanentes.

Es importante mencionar que se esperaba que la probabilidad de pérdida forestal fuera en su mayor parte a causa de la proximidad de cultivos permanentes. Con los resultados obtenidos se comprueba que efectivamente la probabilidad muy alta de pérdida de bosque es en mayor parte debida a la proximidad a cultivos permanentes. En lo que respecta a la probabilidad alta, la proximidad a caminos es la que está más presente en esta clase de probabilidad de pérdida de bosque, debido a que funcionan como conectores y dan accesibilidad de una zona a otra, además recordemos que la ampliación de la red de caminos también se dio por los intentos fallidos de establecer cultivos en zonas no aptas.

Para la probabilidad muy alta de pérdida de bosque abierto los parámetros que contribuyen en mayor medida a esta pérdida son la proximidad a los asentamientos humanos seguidos por la proximidad a cultivo anual. En lo que respecta a la probabilidad alta de pérdida de bosque abierto, la proximidad a asentamientos humanos es la que más detona la probabilidad de pérdida seguida por la proximidad a cultivo anual. El parámetro de proximidad de cultivos a bosque abierto en comparación a los otros parámetros, solo alcanza una probabilidad media de pérdida de bosque abierto.

Es notorio que la proximidad de asentamientos humanos fueran los que tienen mayor grado de probabilidad muy alta que los cultivos permanentes para la pérdida forestal en los bosques abiertos, ya que en general se sitúan en las inmediaciones de los asentamientos humanos y la degradación de estos bosques permite más a que se sigan deteriorando ya sea para expandir más cultivos o bien para expandir los asentamientos humanos. En lo que respecta a la probabilidad alta si cambiaron las expectativas, ya que se esperaba que fuera también la proximidad a los cultivos permanentes el principal factor de pérdida, pero fueron los asentamientos humanos, sin embargo, lo que se puede justificar si se considera que estos cultivos comienzan

a adentrarse más al bosque cerrado que al bosque abierto y quizás esta sea causa de ese resultado.

#### 6.4 Resultados del análisis sintético

Los resultados de esta clase análisis del modelo DEFORELATIONS se utilizaron para obtener la probabilidad integrada de las áreas forestales susceptibles a la pérdida de bosque y bosque abierto. Enseguida se muestra los datos de la probabilidad muy alta y alta de pérdida de bosque y bosque abierto.

Tabla 29.- Probabilidad muy alta y alta de pérdida de bosque y bosque abierto.

	Superficie con Probabilidad alta (Has.)	% de superficie respecto al total de bosque y bosque abierto 2015	Superficie con Probabilidad muy alta (Has.)	% de superficie respecto al total de bosque y bosque abierto 2015
Probabilidad de pérdida de bosque	40,952.9095	38.37	56,089.3932	52.55
Probabilidad de pérdida de bosque abierto	5,713.81618	49.58		

Fuente: Elaboración propia.

Nuestro tercer objetivo se cumple al obtener estos dos mapas de probabilidad integrada de pérdida de bosque y bosque abierto. En la tabla anterior se aprecia que en ambos casos el porcentaje de áreas con probabilidad de pérdida alta son similares, áreas con probabilidad muy alta solamente existen para el bosque cerrado. Se esperaría que los bosques abiertos tuvieran una pérdida con mayor grado de probabilidad que los bosques cerrados, por estar más cerca de asentamientos humanos y por estar degradados. Pero, comparando la proporción de superficie de cada una de ellas, la superficie del bosque del 2015 es de 106,733.13 hectáreas y para el bosque abierto es de 11,525.55, por lo que la pérdida de bosque abierto será más significativa en términos de superficie.

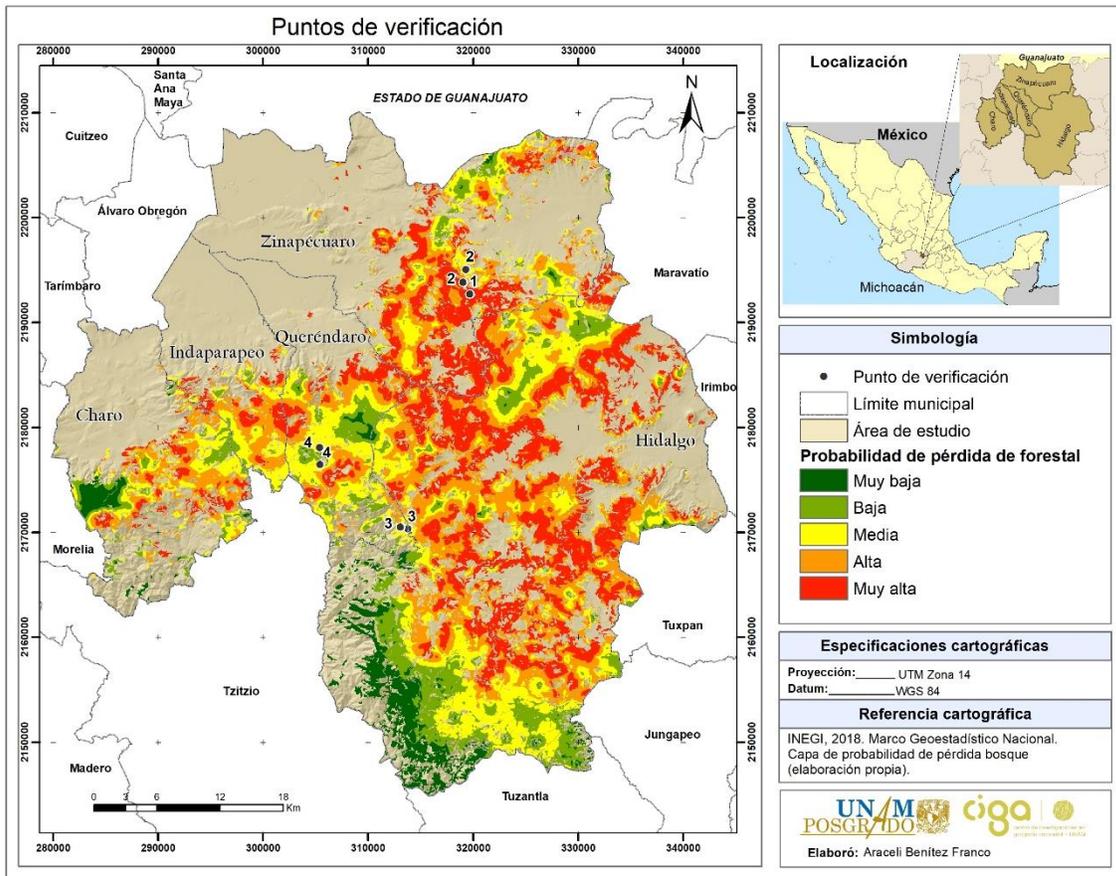
El patrón de probabilidad de pérdida forestal encontrada según el modelo sintético elaborado para esta región va a depender de que los parámetros analizados

continúen también con los mismos patrones que se encuentran actualmente. Sin embargo, puede haber otros factores que no se puedan analizar en este modelo, como son las decisiones o el comportamiento de las poblaciones al momento de elegir un lugar para hacer el cambio de uso de suelo. Otro factor que quizá pueda contribuir es el de existencia de la ganadería extensiva o alguna otra variable que no se haya considerado para el modelo.

### **6.5 Muestras de campo en algunas zonas para verificar resultados**

En febrero del 2020 se realizó una salida con algunos puntos de verificación, solo para tener una idea aproximada de si en los últimos 5 años se tuviera algún cambio importante en la cubierta forestal no observado previamente durante el período estudiado. Además, que estas muestras dieron aporte a la respuesta a la pregunta de investigación ¿En qué condiciones de susceptibilidad de pérdida forestal se encuentran actualmente estas áreas?

La toma de fotografías en los puntos de verificación se hizo con un dron. En el mapa 22 se señalan los puntos verificados en campo, en algunas zonas aparecen dos puntos con la misma etiqueta considerando que se tomaron dos fotos del lugar.



Mapa 22.- Puntos de verificación en las zonas con probabilidad de pérdida de bosque.

El primer punto se verificó en la parte sur del área de estudio en el municipio de Zinapécuaro. En la fotografía 1 se puede observar que se tiene la presencia de cultivos permanentes en este caso aguacate. Además, se comienzan a apreciar partes con deforestación y caminos nuevos para ingresar a estos lugares, justamente se aprecia el patrón de que los pobladores ingresan en las partes altas del bosque sin ninguna limitante en altitud del terreno.



*Fotografía 1.- Punto de verificación 1 en la zona sur del municipio de Zinapécuaro.*

En las fotografías 2 y 3 corresponden al punto 2, aquí nuevamente se observa cómo se está incrementando los cultivos de aguacate y caminos. También, se distingue nuevamente el patrón de que pendiente del terreno no es una limitante para la inserción de cultivos permanentes.



*Fotografía 2.- Punto de verificación 2 en el municipio de Zinapécuaro.*



*Fotografía 3.- Otro punto de verificación 2 en el municipio de Zinapécuaro.*

El punto 3, ilustrado en la fotografía 4 y 5, es en una zona del sur de Queréndaro, y es un claro ejemplo que la orientación de laderas, que justo en modelo no resultó relevante, no es un parámetro importante porque no hay un conocimiento de que orientación de laderas son más favorables para los cultivos permanentes.



*Fotografía 4.- Punto de verificación 3 en el municipio de Queréndaro*



*Fotografía 5.- Otro punto de verificación 3 en el municipio de Queréndaro*

Por último, en el punto 4 se aprecia en la fotografía 6 un incendio justo para cambiar el uso del suelo en esa zona, y por otro lado se observan nuevamente zonas ya con deforestación (fotografía 7) y con indicios de nuevamente ser zonas para cultivo de aguacate.



*Fotografía 6.- Punto de verificación 4 en una zona de Queréndaro.*



*Fotografía 7.- Otro punto de verificación 4 en Queréndaro.*

## **6.6 Validación del modelo DEFORELATIONS**

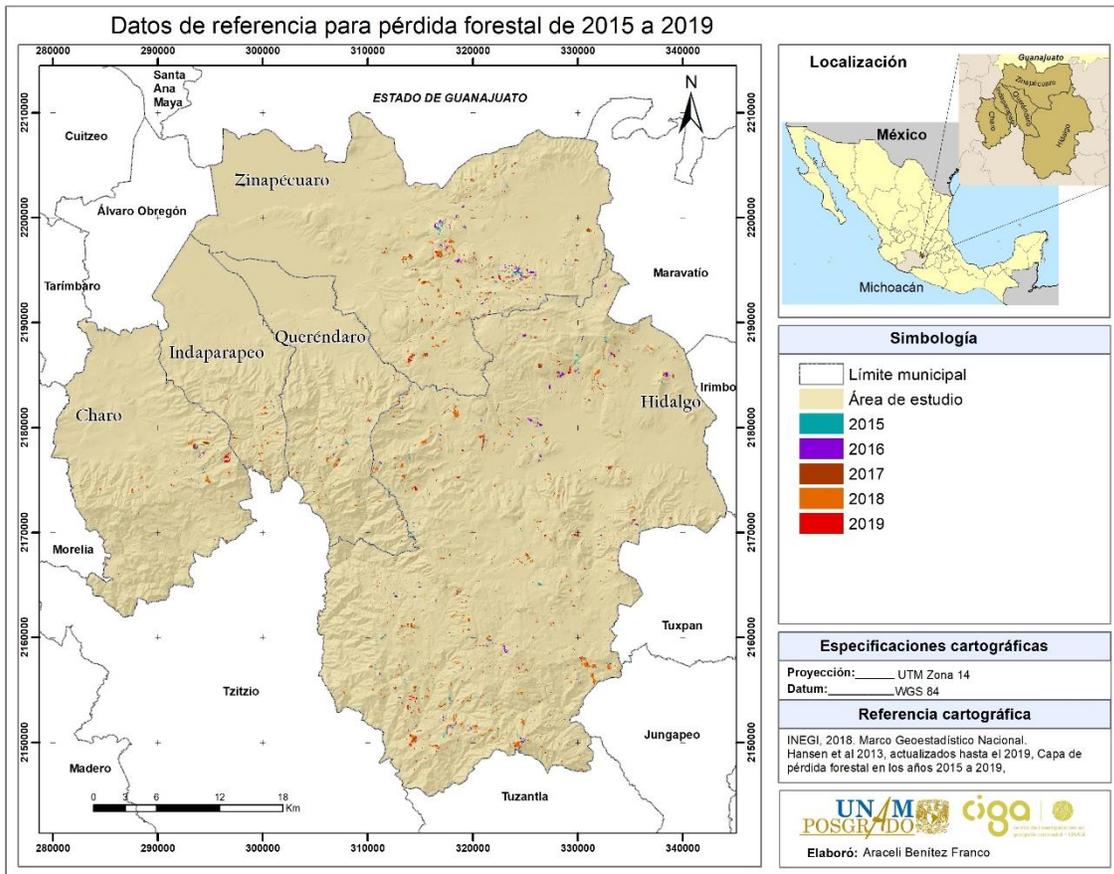
El ejercicio de validación consiste en evaluar la capacidad predictiva del modelo DEFORELATIONS utilizando como referencia datos de pérdida de cubierta forestal de años subsecuentes a los usados para la construcción del modelo. Puesto que el modelo se construyó con datos de pérdida forestal del período 1994-2015, se emplean como datos de referencia para la evaluación, los datos de cambio en la

cubierta forestal de Hansen et al (2013), actualizados anualmente por los mismos autores hasta el año 2019 inclusive. Específicamente se utilizaron los datos anuales para el período 2015-2019. Los datos de Hansen son buen referente por la rigurosidad de la metodología utilizada para la detección de zonas con pérdida forestal a nivel global, y poseen una resolución espacial comparable a los resultados generados en esta tesis.

Se escogió hacer una validación simple, en términos de la proporción de hectáreas de pérdida forestal observadas por Hansen, que fueron etiquetadas con alguna probabilidad de pérdida por el modelo DEFORELATIONS. Esto se hace tanto para el modelo sintético como para los modelos paramétricos, a fin de evaluar que tan fiable es la predicción hecha por el modelo. Una buena capacidad predictiva del modelo estaría representada por una proporción significativa de pérdida forestal detectada por Hansen y categorizada con valores de probabilidad Alta (0.6 – 0.8) y Muy Alta (0.8 – 1.0) por el modelo DEFORELATIONS.

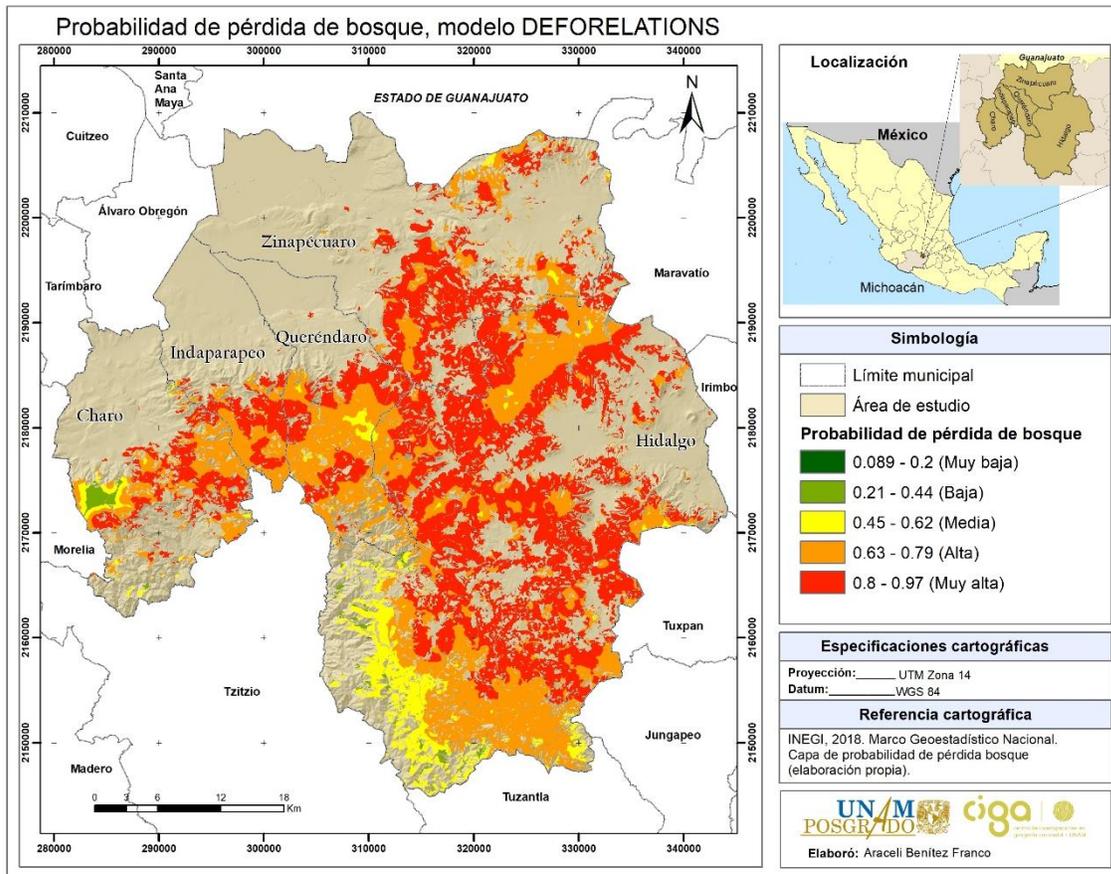
### **6.6.1 Evaluación del modelo sintético**

En el mapa 23 se ilustra el conjunto de datos de referencia utilizado. Estos señalan las áreas de pérdida forestal detectadas por Hansen para los años 2015 – 2019. Los datos están representados por celdas con resolución de 27 metros, cuyos valores indican el año de detección de la pérdida.



Mapa 23.- Datos de referencia para pérdida forestal en los años 2015 a 2019 (Hansen et al 2013, actualizados hasta el 2019).

Los resultados del modelo sintético a evaluar se muestran en el mapa 24. Aquí están agrupados en 5 clases de probabilidad de pérdida de cubierta forestal entre 0 y 1, con intervalos de 0.2. Los datos están representados por una capa raster con resolución de 30 metros.



Mapa 24.- Probabilidad de pérdida forestal según el modelo DEFORELATIONS, correspondiente a la cubierta forestal del año 2015.

Una primera evaluación de la fiabilidad del modelo se obtiene agregando los datos anuales 2015-2019 de pérdida forestal de Hansen para darles el valor de 1, y a continuación multiplicando esta agregación por el mapa de probabilidad sintética del modelo DEFORELATIONS, para extraer la probabilidad de pérdida para cada celda del mapa de Hansen. El total de superficie de pérdida para este período reportada por Hansen para el área de estudio es de 2,719.08 Has.

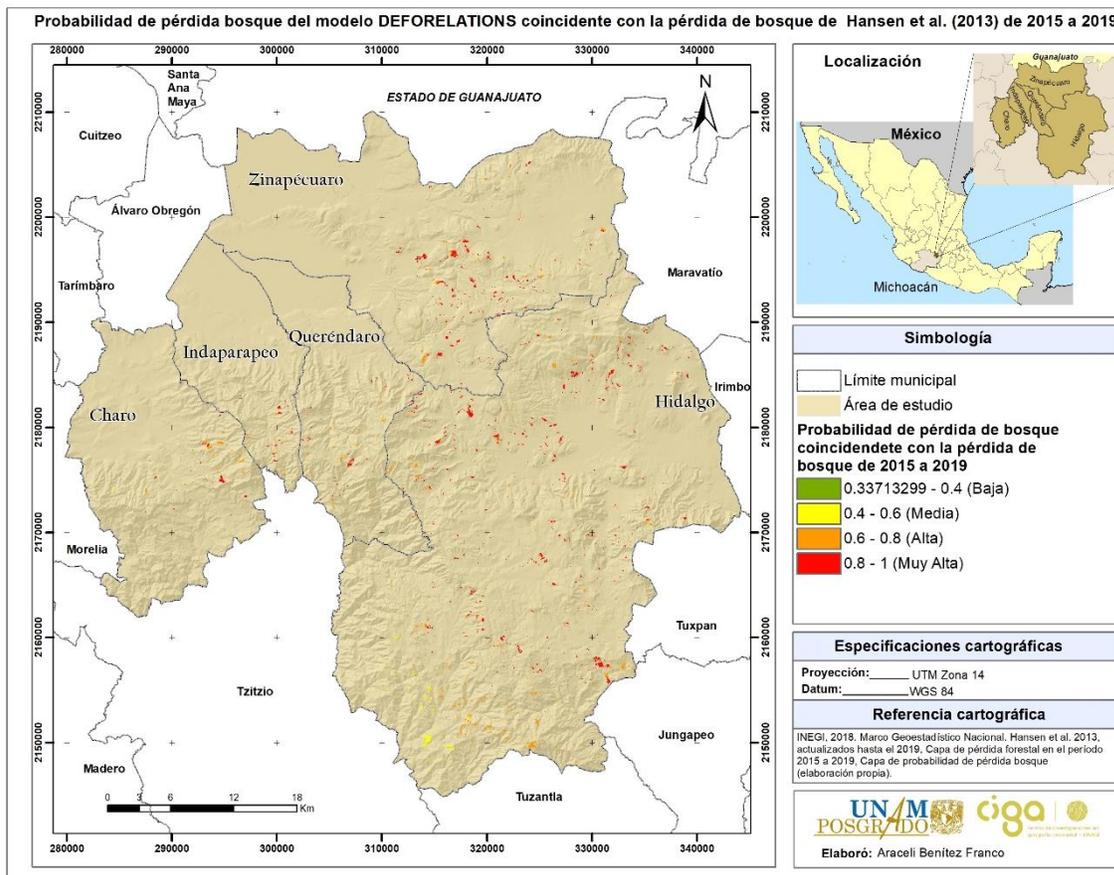
A fin de facilitar la interpretación se agruparon los datos de probabilidad, así obtenidos, en las cinco clases de probabilidad de pérdida mostradas en la Tabla 30.

Tabla 30.-Clases de probabilidad de pérdida de cubierta forestal empleadas para la evaluación de la fiabilidad.

Probabilidad	Clase
0.0 a 0.2	Muy baja
0.2 a 0.4	Baja
0.4 a 0.6	Media
0.6 a 0.8	Alta
0.8 a 1.0	Muy alta

Fuente: Elaboración propia.

El mapa 25, muestra el resultado de esta combinación de datos reales de pérdida con las probabilidades de pérdida arrojadas por el modelo DEFORELATIONS en su modalidad sintética, es decir considerando todos los parámetros que resultaron relevantes según nuestro estudio.



Mapa 25.- Probabilidad de pérdida según el modelo DEFORELATIONS para los datos de pérdida de Hansen et al. (2013) reportados para el período 2015 – 2019.

Estos resultados se clasificaron según las cinco clases de probabilidad de pérdida del modelo DEFORELATIONS (Tabla 30), y se calculó la superficie en hectáreas para cada clase y el porcentaje que representan cada una de ellas respecto al total de hectáreas de pérdida reportadas por Hansen para el período 2015 – 2019.

*Tabla 31.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida dado por el modelo DEFORELATIONS para los años 2015-2019 tomados en conjunto.*

Clase de pérdida	Hectáreas	Porcentaje
Muy baja	0	0
Baja	1.62	0.08
Media	165.6	7.65
Alta	884.7	40.92
Muy alta	1,110.51	51.35
TOTAL (Hansen)	2,162.43	100

*Fuente: Elaboración propia.*

Del análisis de los datos de la Tabla 31 se observa que el modelo DEFORELATIONS, en su modalidad sintética, tiene muy buena capacidad predictiva, ya que, para las áreas que se perdieron en el período 2015-2019 la predicción de Muy Alta probabilidad fue acertada en poco más del 50% de los casos, y para las áreas de cubierta forestal que se perdieron en ese mismo período el porcentaje de acierto fue de 92.27%, si se suman los resultados de Alta y Muy Alta probabilidad de pérdida.

La diferencia observada entre el total de hectáreas con pérdida forestal reportado por Hansen et al. (2,719.08 has) y el total de hectáreas con alguna clase de probabilidad de pérdida según el modelo DEFORELATIONS (2,162.43 has) se debe a que el mapa del modelo DEFORELATIONS utiliza la extensión de cubierta forestal del 2014, según interpretación propia mediante imágenes de satélite SPOT, con una resolución de 2.5 metros, mientras que el mapa de pérdida de Hansen emplea imágenes Landsat 8 para la detección, con una resolución nominal de 27 metros, por lo que en estas últimas la saturación del pixel para detectar áreas de cambio en

la cubierta está levemente sobreestimada, debido a que aun cuando toda la extensión de un pixel en la imagen Landsat solo haya tenido una porción menor de pérdida de bosque, es probable que haya sido clasificado como de pérdida en su totalidad, aun cuando el área de pérdida haya sido menor a un pixel. Esta sobreestimación, sin embargo, no afecta la precisión en la predicción del modelo, puesto que es proporcional a todas las clases de probabilidad, sino solo a la cantidad de superficie de pérdida forestal.

Para complementar la validación del modelo sintético DEFORELATIONS, se hace una evaluación anual para el mismo período 2015-2019. En la Tabla 32 se presentan los datos desagregados por año para la pérdida forestal según Hansen et al.

*Tabla 32. Superficie de pérdida forestal para los años 2015 a 2019 según Hansen (2013) con datos actualizados a 2019*

<b>Año de pérdida</b>	<b>Hectáreas</b>
2015	329.76
2016	398.61
2017	448.47
2018	1,192.95
2019	349.29
TOTAL	2,719.08

*Fuente: Elaboración propia.*

Con el mismo procedimiento descrito arriba, pero realizado para cada año, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida dado por el modelo DEFORELATIONS para los años 2015-2019 tomados en forma desagregada.

Clase de pérdida	Porcentaje 2015	Porcentaje 2016	Porcentaje 2017	Porcentaje 2018	Porcentaje 2019
Muy baja	0	0	0	0	0
Baja	0	0	0	0.2	0.1
Media	7.5	4.2	6	7.3	13.7
Alta	45.1	40.1	40.3	42	35.8
Muy alta	47.4	55.7	53.7	50.5	50.4
TOTAL	100	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente se confirma la capacidad de predicción del modelo DEFORELATIONS, ya que, de los 5 años analizados, cuatro de ellos muestran que la probabilidad Muy Alta de pérdida de cubierta forestal es de poco más del 50% y el otro año está muy cerca de esta cifra. Asimismo, si se suman las clases de Alta y Muy Alta probabilidad, en todos los años el porcentaje de acierto en la predicción es superior al 90%, llegando hasta el 95% para el año 2016.

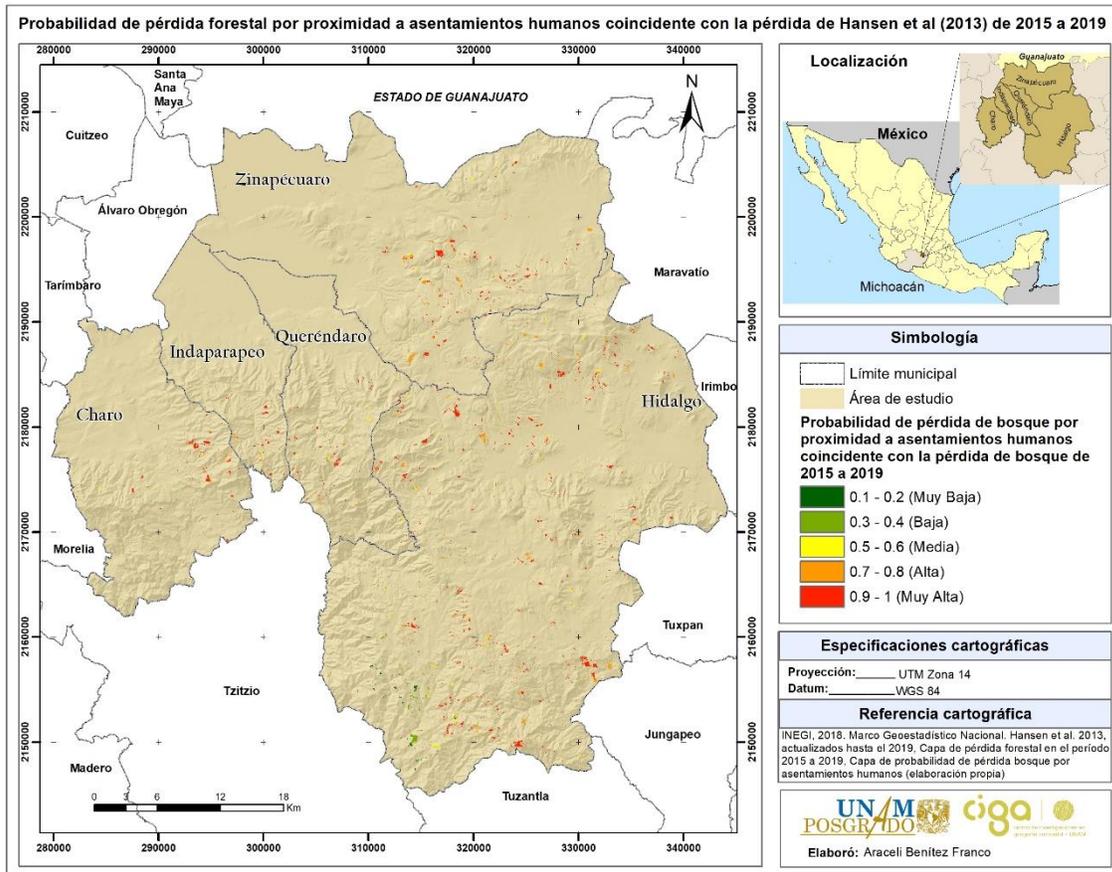
### 6.6.2 Evaluación de los modelos paramétricos

De la misma manera en que se evaluó el modelo sintético, se realizó el mismo procedimiento utilizando las áreas de pérdida forestal detectadas por Hansen para los años 2015 – 2019, para la evaluación del modelo paramétrico. A continuación, se desglosa la evaluación para cada una de las probabilidades de pérdida forestal por proximidad del bosque a asentamientos humanos, proximidad a cultivos permanentes, proximidad a cultivos anuales y proximidad a caminos.

Comparando las hectáreas de pérdida forestal de bosque reportadas por Hansen et al. (2,719.08 has) con la superficie resultante de la probabilidad de pérdida de bosque para cada uno de los parámetros (2006.86 has), la diferencia justamente se debe a las diferentes fuentes de información que se utilizaron para cada estudio, esta diferencia ya se explicó en la evaluación del modelo sintético.

### 6.6.2.1 Evaluación de probabilidad de pérdida forestal por proximidad a asentamientos humanos

En el mapa 26, se aprecia el resultado de la combinación de los datos de Hansen de la pérdida forestal para los años 2015 -2019 con la probabilidad de pérdida forestal por proximidad a asentamientos humanos.



Mapa 26.- Probabilidad de pérdida forestal por proximidad a asentamientos humanos para los datos de pérdida de Hansen et al (2013) reportados para el período 2015 – 2019.

Tabla 34.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a asentamientos humanos, para los años 2015-2019 tomados en conjunto.

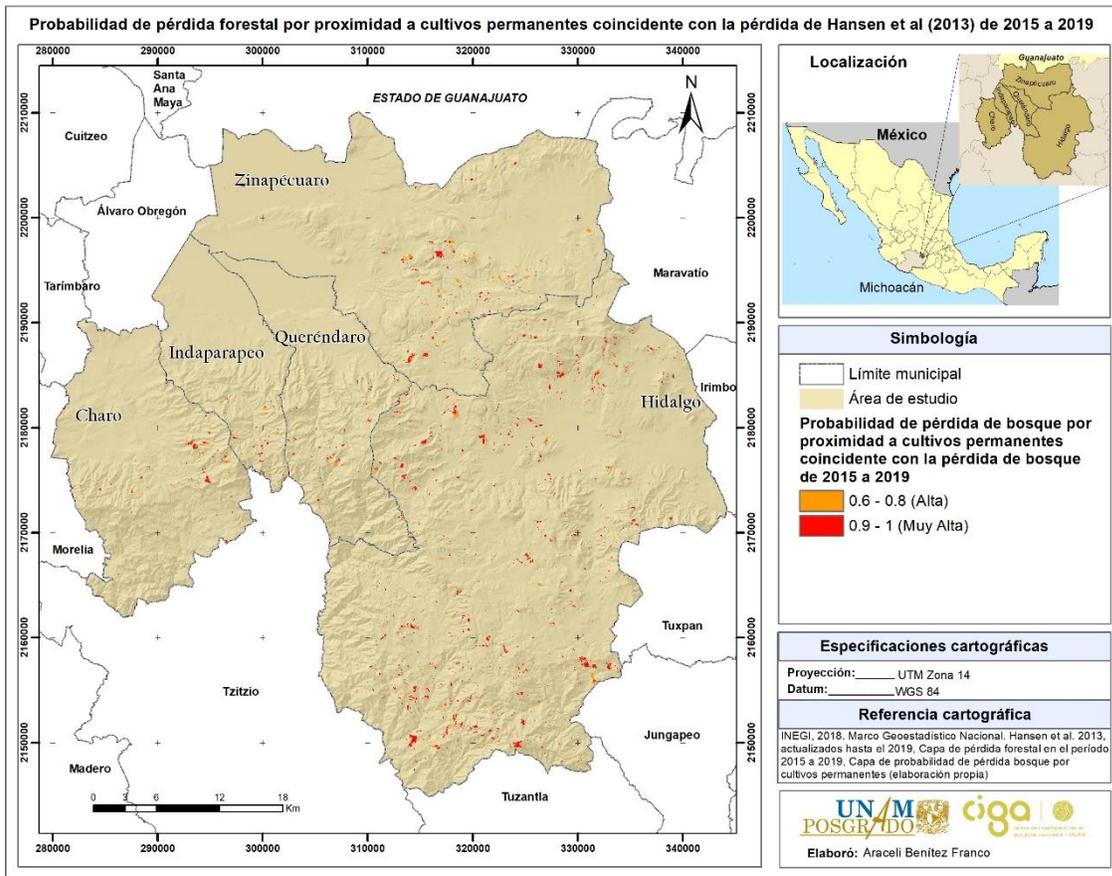
Probabilidad de pérdida	Hectáreas	Porcentaje
Muy baja	43.30	2.16
Baja	131.34	6.54
Media	189.35	9.43
Alta	507.31	25.28
Muy alta	1135.56	56.58
TOTAL (Hansen)	2006.86	100

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 34, se muestra que para la clase de probabilidad Muy Alta de pérdida de bosque el porcentaje de acierto es de 56%, mientras que para la clase Alta de probabilidad de pérdida de bosque, el porcentaje de acierto es de 25%; sumadas ambas clases se tiene un total de 81% del área de pérdida forestal identificada por Hansen, lo cual manifiesta una muy buena capacidad predictiva del modelo DEFORELATIONS para este parámetro, y pone de relieve la importancia de este factor en el proceso de pérdida forestal.

#### 6.6.2.2 Evaluación de probabilidad de pérdida forestal por proximidad a cultivos permanentes

El mapa 27, muestra la combinación de los datos de Hansen et al. de la pérdida forestal 2015-2019 con la probabilidad de pérdida forestal por proximidad a cultivos permanentes según el modelo DEFORELATIONS.



Mapa 27.- Probabilidad de pérdida forestal por proximidad a cultivos permanentes para los datos de pérdida de Hansen et al. (2013) reportados para el período 2015 – 2019.

Para este parámetro, nuevamente se utiliza la misma clasificación de los niveles de probabilidad de pérdida de bosque del modelo DEFORELATIONS. En la tabla 35, se tiene el cálculo de superficie en hectáreas para cada clase de probabilidad, y el porcentaje que representa del total de hectáreas de pérdida reportadas por Hansen et al. para el período de 2015 – 2019.

Tabla 35.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos permanentes, para los años 2015-2019 tomados en conjunto.

Probabilidad de pérdida	Hectáreas	Porcentaje
Muy baja	0.00	0.00
Baja	0.00	0.00
Media	0.00	0.00
Alta	492.87	24.49
Muy alta	1519.68	75.51
TOTAL (Hansen)	2012.56	100.00

Fuente: Elaboración propia.

El resultado que emerge de la tabla anterior, es que en la clase Muy Alta de probabilidad de pérdida de bosque, el acierto en la predicción es todavía más alto que para el parámetro anterior, con un 76 %, y que sumado al porcentaje de área para la clase de probabilidad Alta, que es de poco más de 24%, permite establecer que el modelo DEFORELATIONS para este parámetro tiene la capacidad de predecir que la pérdida forestal es prácticamente una realidad si la proximidad del bosque a una zona con cultivos permanentes es de menos de 5,000 m (Gráfico 19), en concordancia con la hipótesis establecida *a priori* de que el incremento de áreas con cultivos permanentes es uno de los factores de pérdida forestal más importantes en esta región de Michoacán.

### 6.6.2.3 Evaluación de probabilidad de pérdida forestal por proximidad a cultivos anuales

El mapa 28 ilustra el resultado de la combinación de los datos de Hansen de la pérdida forestal para el período 2015-2019 con la probabilidad de pérdida forestal por proximidad a cultivos anuales según el modelo DEFORELATIONS para este parámetro.



Tabla 36.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos anuales, para los años 2015-2019 tomados en conjunto.

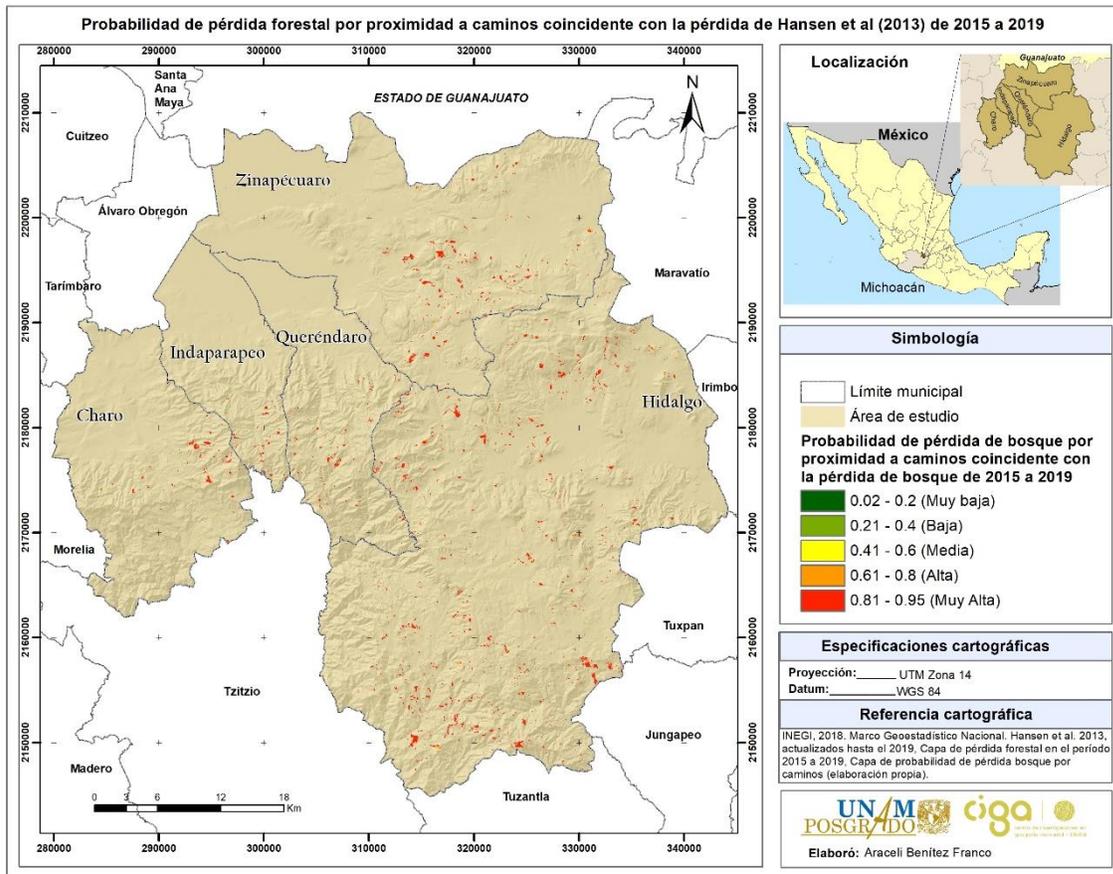
Probabilidad de pérdida	Hectáreas	Porcentaje
Muy baja	521.20	25.95
Baja	268.49	13.37
Media	339.43	16.90
Alta	319.66	15.91
Muy alta	560.03	27.88
TOTAL (Hansen)	2008.81	100

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la tabla anterior señalan que en la clase de Muy Alta probabilidad de pérdida de bosque el acierto en la predicción es de 28 %, seguido por un 16.6% para la clase Alta de pérdida de bosque, lo que en total arroja menos de 50% de acierto para estas dos clases, lo que indica que este parámetro no contribuye de manera tan significativa en la fiabilidad de la predicción como el resto de los parámetros.

#### 6.6.2.4 Evaluación de probabilidad de pérdida forestal por proximidad a caminos.

En el mapa 29, se aprecia la combinación de los datos de Hansen et al. de la pérdida forestal para el período 2015 - 2019 con la probabilidad de pérdida forestal por proximidad a caminos.



Mapa 29.- Probabilidad de pérdida forestal por proximidad a caminos, para los datos de pérdida de Hansen et al. (2013) reportados para el período 2015 – 2019.

Nuevamente, para la tabla 37 se utilizó las mismas clases de pérdida que en las anteriores evaluaciones.; Se calculó la superficie en hectáreas y el porcentaje que representa cada clase de probabilidad de pérdida del total de hectáreas de pérdida de bosque reportadas por Hansen et al. para el período de 2015 – 2019.,

Tabla 37.- Proporción de pérdida forestal según Hansen, clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos anuales, para los años 2015-2019 tomados en conjunto.

Probabilidad de pérdida	Hectáreas	Porcentaje
Muy baja	0.66	0.03
Baja	6.18	0.31
Media	8.21	0.41
Alta	67.55	3.36
Muy alta	1929.53	95.89
TOTAL (Hansen)	2012.13	100.00

Fuente: Elaboración propia.

La clase de probabilidad de pérdida Muy Alta tuvo un 96 % de acierto, es decir que casi el 100% de las áreas de pérdida detectadas por Hansen en el período se encuentran dentro de las áreas de bosque que tienen esta probabilidad de pérdida según el modelo DEFORELATIONS, por lo que este parámetro es, en la práctica, el mejor predictor. Complementariamente, la clase de Alta probabilidad de pérdida de bosque registra casi el 4% del área de pérdida restante. Este resultado demuestra que efectivamente la proximidad a los caminos es uno de los principales factores detonantes de la pérdida forestal.

Es interesante observar que los parámetros que se tomaron para el modelo sintético en la evaluación si dieron respuesta a la su muy buena capacidad predictiva en los años del 2015 al 2019, dejando en claro que para nuestra zona de estudio si dieron los resultados acertados para la probabilidad de pérdida forestal.

## 6.7 Aplicabilidad del Modelo DEFORELATIONS en otras áreas de estudio

El modelo es por necesidad específico a cada región geográfica a estudiar, por ello en cada zona de estudio no se debe aplicar considerando las mismas variables o el mismo comportamiento de las variables. Cada variable se comporta de manera diferente en cada área de estudio debido ya sea a aspectos culturales o las condiciones de desarrollo socioeconómico del lugar. Un claro ejemplo de estas diferencias al aplicar el modelo se puede apreciar en otras dos investigaciones realizadas con el modelo DEFORELATIONS. A continuación, se describe los

resultados que ellos obtuvieron y las variables que consideraron pertinente para analizar, y que ponen de manifiesto la importancia de elaborar un modelo DEFORELATIONS específico a una zona geográfica e incluso a un período de tiempo en particular.

Vizcaino (2013) utilizó el modelo DEFORELATIONS para dos zonas de estudio, en dos países diferentes (México y Brasil). La autora evaluó las relaciones espaciales implicadas en la pérdida de bosque en términos de la proximidad a las vías de comunicación, a las zonas agropecuarias, a las zonas urbanas y su coincidencia con la inclinación del terreno. En la primera zona, que fue en la reserva de biósfera de los Tuxtlas en Veracruz, las relaciones relevantes fueron la pendiente del terreno y la proximidad a zonas agropecuarias, mientras que, en la otra zona, que fue un corredor ecológico, resultaron relevantes la proximidad a las vías de comunicación y a las zonas agropecuarias.

En el caso de la investigación de Reyes (2014), el autor realizó un estudio con el modelo DEFORELATIONS para dos zonas de distinto clima y cubierta forestal (bosque templado y selva baja), y las relaciones espaciales relevantes para la zona templada fue solamente la altitud y para la zona tropical solo la proximidad a los caminos. Es importante señalar que solo aplicó el modelo a las relaciones espaciales de zonas de pérdida forestal con pendiente, altitud, proximidad a caminos, proximidad a asentamientos humanos y proximidad hacia áreas agrícolas.

Con lo anterior se confirma que cada investigador elige las relaciones espaciales considera pertinentes o que hipotéticamente piensan que están relacionadas con la pérdida forestal en una cierta región geográfica. Además de que las zonas de estudios son diferentes, las relaciones relevantes son diferentes en cada lugar. En el caso particular de esta investigación se tomaron más relaciones espaciales que en los otros estudios y no se realizó en dos zonas distintas si no en la misma región, con la diferencia adicional de desagregar el modelo para dos tipos de cubierta forestal, el bosque y bosque abierto. También, de que los insumos básicos para esta

investigación en su mayoría fueron obtenidos por elaboración propia, por interpretación de imágenes de ambas fechas a escala 1: 20,000, mientras que los otros estudios utilizaron cartografía existente del uso y cubierta del suelo a escala 1: 250,000. Esto último lleva a considerar que también la escala del estudio es un factor importante en la forma que se obtienen resultados del modelo.

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSIONES**

La zona de estudio tiene características particulares en el tema de pérdida forestal, y esto se pone de manifiesto en los patrones de los elementos de ese espacio geográfico que más están relacionados a ella, y que son aquellos que resultaron relevantes según las pruebas estadísticas realizadas para construir el modelo DEFORELATIONS.

Los resultados de estas pruebas estadísticas, dieron la pauta para determinar la relevancia de cada relación espacial y así obtener los parámetros para el modelo. La evidencia estadística indica que la proximidad de las zonas forestales a los asentamientos humanos, la proximidad a caminos, y a las zonas de cultivos anuales en las pruebas estadísticas tuvieron un nivel de confianza de 95% o superior, siendo relaciones espaciales categorizadas como muy relevantes estadísticamente; en los parámetros catalogados como relevantes, con un nivel de confianza entre el 85 % y el 95%, se encuentra solo la proximidad a cultivos permanentes. Estas relaciones espaciales demostraron estadísticamente estar relacionadas con la pérdida de bosque.

En el caso de la pérdida de bosque abierto, la proximidad a asentamientos humanos, a cultivos permanentes y a cultivos anuales resultaron parámetros muy relevantes con un nivel de confianza superior al 95 %.

La validación realizada para la probabilidad de pérdida de bosque según el modelo DEFORELATIONS, en comparación con la pérdida forestal registrada por Hansen et al (2013) en el periodo de 2015 a 2019, demostró que fiabilidad del resultado del modelo sintético, coincidiendo un 92 % de las áreas de pérdida con las clases de probabilidad Alta y Muy Alta probabilidad de pérdida.

En el caso de la fiabilidad de los modelos paramétricos, la coincidencia de la pérdida forestal según Hansen (2015 a 2019) con cada una de las clases de probabilidades de pérdida de los parámetros, señalan que, espacialmente, los parámetros pueden tener una importancia ligeramente diferente a aquella indicada por la relevancia

estadística. En esta validación paramétrica, los modelos resultaron nuevamente muy acertados para las clases de probabilidad Alta y Muy Alta pérdida forestal: la proximidad a asentamientos humanos tuvo un 81% de acierto, la proximidad a los cultivos permanentes un 94 %, la proximidad a los cultivos anuales un 94 % y la proximidad a los caminos un 98%. Los hallazgos de este estudio son consistentes con la validación, además que muestra que efectivamente el nivel de relevancia estadística de cada una de las relaciones coincide en la manera en que éstas pueden ser empleadas en la predicción de la pérdida forestal en esta región. Cabe destacar que la proximidad de las zonas forestales a las zonas de cultivo permanente en las pruebas estadísticas resultó un parámetro estadísticamente relevante (92% de confianza), pero al parecer en este transcurso de los años empleados para la validación, su importancia se está incrementando, y es por esta razón que este parámetro resulta un mejor predictor espacial de lo que su relevancia estadística indicaba para los años 1994-2015 que se emplearon para la construcción del modelo.

En general, se puede afirmar que, tras revisar la evidencia aportada por las evaluaciones para los resultados del modelo sintético y los modelos paramétricos, el objetivo de la predicción tanto en la localización como en el grado de probabilidad de las áreas forestales susceptibles a la pérdida forestal, se ve cumplido de manera sobresaliente, y que aparentemente la ocurrencia de pérdida forestal en la región está muy relacionada con los parámetros que resultaron relevantes en la construcción del modelo . Además, es pertinente mencionar que, espacialmente, los parámetros que ofrecen una mejor capacidad predictiva, en la clase de probabilidad de pérdida forestal Muy Alta, son la proximidad a caminos, la proximidad a cultivos permanentes, la proximidad a asentamientos humanos y en menor medida la cercanía a cultivos anuales.

En este contexto, el hallazgo más interesante que se puede extraer de este resultado, es que la proximidad a los cultivos permanentes expandiéndose se está convirtiendo en un factor todavía más importante que el de la proximidad a los

asentamientos humanos, ya que en el resultado estadístico que se obtuvo fue que la de pérdida por cercanía a asentamientos humanos era estadísticamente un poco más significativa, que la pérdida por cercanía a cultivos permanentes.

Uno de los hallazgos a nivel municipio es que la pérdida de bosque, entre el período de 1994 - 2015, fue mayor en el municipio de Hidalgo con 9,198 hectáreas de pérdida y en Zinapécuaro con 5,993 hectáreas.

A pesar de que no se realizó trabajo de campo extensivo para la verificación de resultados, la verificación visual realizada en el municipio de Zinapécuaro identificó que en la actualidad hay un incremento significativo de las zonas de cultivo permanente, observación confirmada por la evaluación de la fiabilidad predictiva del parámetro de proximidad a cultivos permanentes el de nuestro modelo.

El modelo DEFORELATIONS construido para esta región no es un modelo único aplicable indistintamente en diferentes zonas de estudio, se tiene que adaptar de acuerdo con las condiciones geográficas existentes en el lugar en donde se va a aplicar. Esto se aprecia en estudios anteriores que ya han usado dicho modelo, pero con diferentes relaciones espaciales. Sin embargo, la metodología para construir un modelo DEFORELATIONS si es aplicable para cualquier caso.

Entre más relaciones espaciales se incluyen en el modelo es posible detectar más factores que están influyendo en la pérdida forestal, aunque en esta investigación no todas resultaron relevantes, pero si se aplican a otra zona de estudio podrían resultar con un nivel de relevancia significativo.

Hay algunos factores que el modelo no puede incluir, como es el comportamiento de la población al tomar decisiones para hacer un cambio de uso de suelo, tal como se comprueba que al momento de situar ciertos cultivos dentro de zonas forestales no se sigue un patrón común, y la falta de conocimiento de las condiciones tanto

climáticas como de topografía y suelos que requieren ciertos cultivos es una causa de que se deforeste sin un beneficio permanente.

El estudio ha demostrado con éxito que el modelo DEFORELATIONS para nuestra zona de estudio predice de manera sobresaliente, en la mayoría de los casos, la pérdida forestal. Esto nos lleva a concluir que los parámetros del modelo tienen una serie de implicaciones importantes para la futura práctica de la conservación del bosque y es ahí donde se podrían aplicar medidas de intervención.

## Referencias bibliográficas y cartográficas

Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2016) Evaluación de los recursos naturales 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4793s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura (FAO) (1998) Términos y definiciones. Clasificación de la tierra. Disponible en: [http://www.fao.org/3/ae217s/ae217s02.htm#P78\\_4608](http://www.fao.org/3/ae217s/ae217s02.htm#P78_4608)

Franquis, F.R. & Infante, A.M. (2003) Los bosques y su importancia para el suministro de servicios ambientales. Revista Forestal Latinoamericana, vol 34, pp. 17-30. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/24124/articulo2.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Guevara, S.S.; Laborde D. J. & Sánchez R. G. (2004) La deforestación'. Instituto de Ecología.

Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justicia, C.O. & Townshend. (2013) High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, vol 342, no. 6160, pp. 850-853. Disponible en: <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>

Hirales-Cota, M., Espinoza-Avalos, J., Shomook, B., Ruiz-Luna, A. & Ramos-Reyes, R. (2010) Agentes de deforestación de manglar en Mahahual–Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. Scielo, vol 36, no. 2. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-38802010000200004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-38802010000200004)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1994) Ortofotos.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2004) Guía para la interpretación de cartografía. Edafología.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2007) Conjunto de datos vectoriales de Edafología, serie II.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2007) Conjunto de datos vectoriales de Unidades Climáticas.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010) Red hidrográfica edición 2.0.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013) Anuario estadístico de Michoacán.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013) Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, serie V.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (2013) ‘Estadísticas a propósito del día mundial forestal’ 12 pp. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2013/forestal0.pdf>

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (2018) Marco geoestadístico nacional.

Keipi, K. (2000) Introducción en Keipi, K. (edit.), *Políticas forestales en América Latina*, Banco Internacional de Desarrollo, Washington, D.C.

Mas, J.F. & Flamenco S.A. (2011) Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTropico*, 5 (1), Artículo 1, 24 pp. Disponible en: [http://www.geotropico.org/NS\\_5\\_1\\_Mas-Flamenco.pdf](http://www.geotropico.org/NS_5_1_Mas-Flamenco.pdf)

Mas, J.F., Bocco-Verdinelli, G., Burgos-Tornadu, A., Cuevas, G., Navarrete-Pacheco, J. A., Ramírez-Ramírez, I. & Velázquez-Montes, J. A. (2016) Proyecto de Investigación Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el Estado de Michoacán: un análisis de cambios mediante sensores remotos a escala regional. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. Morelia, MICH. Disponible en: <https://www.ciga.unam.mx/wrappers/proyectoActual/monitoreo/index.html>

Masera R. O. (1996) Deforestación y degradación forestal en México. Documentos de trabajo núm. 19. GIRA A. C. Pátzcuaro, Michoacán, México.

Molnar, A., Scherr J. S. & Khare. A. (2004) ¿Quién conserva los bosques del mundo? [En Línea], *Forest Trends*, Washington, D.C. Disponible en: [http://www.rightsandresources.org/espanol/publication\\_details.php?publicationID=](http://www.rightsandresources.org/espanol/publication_details.php?publicationID=)

Morabak G. Del Á. (2012) (coord.) La Comisión Nacional Forestal en la historia y el futuro de la política forestal de México. 345 pp. Disponible en: [http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/Conafor\\_en\\_la\\_historia\\_y\\_futuro\\_de\\_Mexico.pdf](http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/Conafor_en_la_historia_y_futuro_de_Mexico.pdf)

Morales-Morales, L.M, Reyes-García, A., Cuevas-Garcia, G. & M. Onchi R. (2012) Inventario 2011 del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM – COFUPRO. Morelia, MICH. 89 pp.

Morales-Manilla, L.M. (2013) Using spatial relations as parameters to explain and predict the loss of forest cover, the DEFORELATIONS model.

Morales-Manilla, L.M. (2014). Definition of a minimum set of spatial relations. Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México

NASA (2015) Imágenes LANDSAT.

NASA (2015) Modelo Digital de Elevación. DEM ASTER GDEM.

Pineda, J. N. B.; Bosque, S. J. Gómez, D. M. & Plata, R. W. (2009) Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, no. 69, pp. 33-55. Disponible en:

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112009000200004&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112009000200004&lng=es&nrm=iso)

Programa de Desarrollo Forestal (PRODEFO) (2003) Sistema de clasificación de las coberturas de suelo para el estado de Jalisco. Documento técnico 36. Guadalajara, Jalisco, México.

Reyes- González, A. (2014) Análisis comparativo de los patrones espaciales de la deforestación en una zona tropical y una templada de Michoacán. Maestro en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.

Rosete V.F., Pérez D. J. & Bocco G, (2008) Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. Rev. Inst. investig. Geog. Física, no.67, pp. 39-58, consultado: 17 noviembre 2013, Disponible en:  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112009000200004&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112009000200004&script=sci_arttext)

Servicio Meteorológico Nacional (2010) Clima en México. Consultado: 20 de agosto 2014, Disponible en:  
[http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=103&Itemid=80](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80)

Varela, H. S. (1998) Cifras sobre la deforestación en México. Ponencia presentada en el ciclo de conferencias el sector forestal de México, avances y perspectivas, Dirección General de Comunicación Social, de la Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAP, Coyoacán, México, 169-180, 1998.

Velázquez, A.; Nuñez, H. J. M.; André, C. S. & Bocco V. G. (2011) Propuesta metodológica para normar la evaluación de la tasa de deforestación y degradación forestal en México. WWF, CCMSS, TNC, Centro Geo y CIGA UNAM. Disponible en:  
<http://www.ccmss.org.mx/biblioteca/747-propuesta-metodologica-para-normar-la-evolucion-de-la-evaluacion-de-la-tasa-de-deforestacion-y-degradacion-forestal>

Vizcaino, G.M.J. (2013) Comparación de los patrones de deforestación en dos regiones de Latinoamérica. Maestra en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.