



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



"La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra"

EVALUACIÓN DE LA NEUTRALIDAD EN LA DEGRADACIÓN DE LAS TIERRAS EN EL MUNICIPIO DE IXTACAMAXTITLAN, PUEBLA.

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ITZEL FABIOLA ARROYO ORTEGA

Directora de tesis:

DC Rosalía del Carmen Castelán Vega



Septiembre 2022



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

EVALUACIÓN DE LA NEUTRALIDAD EN LA DEGRADACIÓN DE LAS TIERRAS EN EL MUNICIPIO DE IXTACAMAXTITLAN, PUEBLA.

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ITZEL FABIOLA ARROYO ORTEGA

Comité Tutorial:

Directora	DC Rosalía del Carmen Castelán Vega
Tutor	DC José Víctor Tamariz Flores
Integrante Comité Tutorial	DC Edith Chávez Bravo
Integrante Comité Tutorial	DC Eduardo Torres Ramírez
Integrante Comité Tutorial	DC Anabella Handal Silva

Septiembre 2022



BUAP

C. ITZEL FABIOLA ARROYO ORTEGA

Por este conducto me permito comunicarle que los miembros del jurado integrado por:

*D.C FERNANDO AYALA NIÑO PRESIDENTE
D.C JOSÉ VÍCTOR ROSENDO TAMARIZ FLORES SECRETARIO
D.C RICARDO PÉREZ AVILÉS PRIMER VOCAL
D.C LUCIA LÓPEZ REYES SEGUNDO VOCAL
D.C EDUARDO TORRES RAMÍREZ TERCER VOCAL
D.C LAURA MORALES LARA PRIMER SUPLENTE
D.C MARÍA ELENA RAMOS CASSELLIS SEGUNDO SUPLENTE*

Designado para la defensa de su tesis **"Evaluación de la Neutralidad en la Degradación de las Tierras en el municipio de Ixtacamaxtitlán, Puebla"** han manifestado mediante su voto que ésta cumple con los méritos suficientes para ser defendida como tesis de grado de Doctora en Ciencias Ambientales, por lo que este Posgrado le autoriza la impresión de la misma.

Sin otro asunto en lo particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

"Pensar bien, para vivir mejor"
Puebla de Z; 08 de septiembre de 2022

Dra. Rosalía del Carmen Castela
Coordinadora
Posgrado en Ciencias Ambientales



A mi padre, David

Quien siempre ha sido un soporte en la tormenta.

A la memoria de mi madre, Graciela†

Por hacerme ver que yo podía más.

A mi hermano, David

Porque sus palabras me abren nuevos panoramas.

A mis amigos, Erica Altieri† y Alejandro González Gatica†

Porque siempre creyeron en mí y me impulsaron a seguir mis sueños.

Ojalá estuvieran aquí.

AGRADECIMIENTOS

Finalizar este proyecto de investigación ha sido posible gracias a diversas instituciones que financiaron mi formación, la publicación de artículos y la provisión de recursos necesarios para el desarrollo del proyecto. Así mismo, ha sido posible gracias a la guía, apoyo y contribución de muchas personas que han intervenido en diferentes etapas de este proceso.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de posgrado con No. de beca 712144.

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrados por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del Eje IV. Modelo de Investigación abierta y compartida. Objetivo 13. Formar recursos humanos que impacten positivamente el contexto social y científico como consecuencia de su accionar en una comunidad para lograr una educación desarrolladora de la transformación. Indicador establecido en el Plan de Desarrollo Institucional 2021-2025. Con No. de oficio VIEP/2305/2022.

Al Posgrado en Ciencias Ambientales, al Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas y al Instituto de Ciencias por el apoyo administrativo, de gestión y de recursos que me brindaron.

Al jurado revisor y evaluador de este proyecto conformado por el Dr. Fernando Ayala Niño, el Dr. Víctor Tamariz Flores, el Dr. Ricardo Pérez Avilés, la Dra. Lucía López Reyes, el Dr. Eduardo Torres, la Dr. Laura Morales Lara y la Dra. María Elena Ramos Cassellis. Gracias por sus comentarios y sugerencias para la mejora del escrito, así como por su tiempo, disposición y apoyo en la conclusión de esta etapa.

A las comunidades de San José Providencia y Analco por brindarme todo el apoyo posible; especialmente agradezco a Fernando Guzmán, Don Ignacio y su familia y a Don Sergio y su familia, por acompañarme, atenderme y darme el espacio para realizar los estudios de campo en aquellos bosques tan maravillosos. Estoy en deuda con ustedes.

A la Dra. Rosalía Castelán, por haber aceptado dirigir este proyecto, por su aliento en todo el proceso, pero sobre todo, por creer en mí y compartir conmigo la pasión por este tema. Gracias por apoyarme y gestionar cada plan, cada idea y cada sueño para que fueran posibles. Mi admiración y cariño, siempre.

Al Dr. Víctor Tamaríz, por su guía a lo largo de esta travesía; por su confianza, consejos y enseñanzas y aún más, por integrarme en sus proyectos para animarme a enfrentar mis temores. Gracias por ser una base y un apoyo en todo mi proceso.

Al Dr. Eduardo Torres, por impulsarme siempre a aprender más allá de lo que me es dado, por sus consejos, su disponibilidad y su invaluable acompañamiento en todo el camino. Gracias por alentarme a seguir avanzando y creciendo como persona, investigadora y científica.

A la Dra. Virginia Cervantes, por su seguridad en mí, el tiempo que me dedicó a pesar de la lejanía y por no quitar nunca el dedo del renglón. Gracias por su cariño y atención.

A la Dra. Anabella Handal y a la Dra. Edith Chávez, por su disposición, ánimos, colaboración y comprensión.

A Abel Cruz y César Calderón, por su apoyo desinteresado tanto en campo como en laboratorio. Gracias también por su paciencia, cariño y amistad.

A Mariel y Miriam por su atención, cariño y apoyo administrativo.

A Maricarmen, Mariana, Paulina, Yas, Canek y José Luis por su amistad, su empatía, sus ánimos y su apoyo, siempre sin condiciones.

A mis compañeros de generación Mildred, Marco, Aurora, Andrés y David, por compartir conmigo este camino. Gracias por su amabilidad y cariño.

A mi padre y a mi hermano, por siempre estar, animarme y alentarme a dar cada paso. Gracias por ser mi lugar seguro y mi luz en días oscuros.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto, que creyeron en mí y me apoyaron en el trayecto. Me disculpo de antemano si cometí alguna omisión.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	14
1.1. INTRODUCCIÓN	14
1.2. MARCO TEÓRICO	15
1.2.1. Degradación de Tierras (DT)	15
1.2.2. Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT)	15
1.2.3. Línea Base	16
1.2.4. Indicadores ambientales de la NDT	17
1.2.4.1. Indicadores globales base de la NDT	18
Cubierta Terrestre (CT).....	18
Dinámica de la Productividad de la Tierra (DPT)	19
Reservas de Carbono Orgánico en Suelo (COS)	19
1.2.4.2. Indicadores complementarios	19
1.2.5. Modelos Conceptuales: Marco de Referencia DPSIR	20
1.2.5.1. Enfoques participativos	22
1.2.5.2. Actores sociales.....	23
1.3. ANTECEDENTES SOBRE LA DEGRADACIÓN DE TIERRAS (DT)	24
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	26
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	27
1.6. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	28
1.7. OBJETIVOS.....	28
1.7.1. General	28
1.7.2. Particulares.....	28
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	29
2.1. METODOLOGÍA.....	29
2.1.1. Caracterización de la zona de estudio.....	29
2.1.1.1. Caracterización biofísica	29
2.1.1.2. Caracterización socioeconómica.....	30
2.1.1.3. Indicadores complementarios	31
Modelo digital de elevación	31
Pendientes	31
Erosión Potencial Hídrica	32
Erosividad de la lluvia (R).....	32
Erodabilidad del suelo (K)	33
Longitud (L) y Grado (S) de pendiente.	34
Densidad de drenaje	35
2.1.2. Metodología con base en los objetivos.....	36
2.1.2.1. O1. Generación de la línea base y determinación de las tendencias de degradación	37
Recopilación de información geográfica espacial.	37
Generación de mapas de la línea base.	38
Análisis de cambios y tendencias en los indicadores evaluados.	39
Cubierta terrestre (CT)	39
Dinámica de la Productividad de la Tierra (DPT).....	39
Carbono Orgánico del Suelo (COS).....	41

Análisis estadísticos	42
Validación de la Cubierta Terrestre.....	42
Mapeo e identificación de puntos críticos.	42
2.1.2.2. O2: Evaluación de indicadores bajo distintos escenarios.	43
Elección de sitios de muestreo.....	43
Identificación de puntos y muestreo.....	44
Análisis fisicoquímicos del suelo	45
Contenido de Carbono Orgánico del Suelo	45
Productividad Primaria	45
Cobertura arbórea	46
Análisis estadísticos.	46
2.1.2.3. O3: Identificación y análisis de los factores que causan la degradación.....	47
Identificación de actores sociales.....	47
Identificación de los indicadores.....	47
Aplicación del marco DPSIR	48
CAPÍTULO 3. RESULTADOS.....	50
3.1. <i>Caracterización del municipio de Ixtacamaxtitlán</i>	50
3.1.1. Caracterización biofísica	50
3.1.1.1. Fisiografía	51
3.1.1.2. Geología	52
3.1.1.3. Clima.....	53
3.1.1.4. Edafología.....	55
3.1.1.5. Hidrología.....	57
Balance hídrico.....	57
3.1.1.6. Uso de suelo y vegetación	59
3.1.2. Caracterización socioeconómica	60
3.1.2.1. Población.....	60
3.1.2.2. Vivienda.....	61
3.1.2.3. Educación	62
3.1.2.4. Salud.....	63
3.1.2.5. Población económicamente activa	63
3.1.2.6. Población indígena	63
3.1.2.7. Migración	64
3.1.2.8. Marginación, pobreza y rezago social.....	64
3.1.2.9. Estructura agraria	65
3.1.3. Indicadores complementarios	67
3.1.3.1. Modelo Digital de Elevación (MDE)	67
3.1.3.2. Pendiente del municipio.....	67
3.1.3.3. Erosión Potencial Hídrica.....	68
3.1.3.4. Densidad de drenaje.....	70
3.1.3.5. Fenómenos hidrometeorológicos.....	71
3.1.3.6. Conflictos socioambientales.....	72
3.2. <i>O1. Línea Base del Municipio.</i>	74
3.2.1. Cambios en la Cubierta Terrestre (2000-2015)	74
3.2.2. Dinámica de la Productividad de la Tierra (2000-2015)	81
3.2.3. Carbono Orgánico del Suelo.....	86
3.2.4. Proporción de tierra degradada.....	91
3.3. <i>O2: Evaluación de indicadores bajo distintos escenarios</i>	93
3.3.1. Ubicación y caracterización de los sitios de Muestreo.....	93
3.3.1.1. Localidad de San José Providencia.	93
3.3.1.2. Bienes Comunales Analco.....	97

3.3.2.	Resultados de los análisis fisicoquímicos por escenario	101
3.3.3.	Indicadores de la NDT “ <i>in situ</i> ”	103
3.4.	O3: Identificación y análisis de factores de la degradación	107
3.4.1.	Actores sociales.	107
3.4.2.	Factores relevantes en el proceso de Degradación de Tierras.	109
3.4.3.	Relaciones causa-efecto en proceso de Degradación de Tierras.....	111
CAPÍTULO 4.	DISCUSIÓN	115
4.1.	O1. LÍNEA BASE DE TIERRAS DEGRADADAS	115
4.1.1.	Cubierta Terrestre.....	115
4.1.2.	Dinámica de la Productividad de la Tierra	116
4.1.3.	Carbono Orgánico del Suelo.....	117
4.1.4.	Línea base de Degradación de las Tierras en Ixtacamaxtitlán, Puebla, México.	118
4.2.	O2. EVALUACIÓN DE INDICADORES BAJO DISTINTOS ESCENARIOS	118
4.2.1.	Bosques Conservados	118
4.2.2.	Bosques con Aprovechamiento	119
4.2.3.	Bosques Reforestados	120
4.2.4.	Pastizales	120
4.2.5.	Evaluación de indicadores bajo distintos escenarios en Ixtacamaxtitlán, Puebla, México.	121
4.3.	O3: ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y LAS INTERRELACIONES	122
4.3.1.	Factores que promueven la Degradación de Tierras.....	122
4.3.2.	Interrelaciones implicadas en la Degradación de Tierras.....	123
4.4.	NEUTRALIDAD EN LA DEGRADACIÓN DE TIERRAS, IXTACAMAXTITLÁN, PUEBLA	125
4.4.1.	Evitar la degradación	125
4.4.2.	Reducir la degradación	126
4.4.3.	Revertir la degradación.....	126
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES	127
ANEXOS		128
ANEXO 1		128
ANEXO 2		129
ANEXO 3		131
ANEXO 4		132
ANEXO 5		133
ANEXO 6		134
ANEXO 7		135
ANEXO 8		136
ANEXO 9		142
BIBLIOGRAFÍA		143

Figura 3.44: Imágenes del pastizal reforestado (APR)	100
Figura 3.45: Imagen de la zona de pastizal en los Bienes Comunales de Analco.....	101
Figura 3.46: Contenido de COS en los primeros 30 cm por escenario.	104
Figura 3.47: Promedio de la producción anual de hojarasca (2020-2021) por escenario.	105
Figura 3.48: Gráfica de cajas del porcentaje de cobertura arbórea en 2000 y 2020.	106
Figura 3.49: Presentación del proyecto ante asamblea comunal.....	108
Figura 3.50: Diagrama DPSIR de los factores y las relaciones presentes en el proceso de Degradación de Tierras del municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.	109
Figura 3.51: Diagrama de las relaciones causa-efecto dentro del marco DPSIR en el proceso de Degradación de Tierras del municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.	112
Figura 3.52: Diagrama de la influencia de las respuestas sobre los factores del modelo DPSIR para evitar, reducir y revertir la Degradación de Tierras del municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Cartas y escalas de mapas cartográficos.....	30
Tabla 2.2: Ubicación de las estaciones meteorológicas dentro del municipio.	30
Tabla 2.3: Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el Índice Modificado de Fournier	32
Tabla 2.4: Asignación de valores y tabulación cruzada para determinación de cambios en CT (2000-2015).	39
Tabla 2.5: Clasificación de los valores de NDVI.	40
Tabla 2.6: Clases de Dinámica de la Productividad de la Tierra (DPT).	40
Tabla 2.7: Asignación de Clases de DPT de acuerdo con la categoría de CT que no presentó cambios en 2015. ...	40
Tabla 2.8: Asignación de Clases de DPT de acuerdo con el cambio en la categoría de CT.	41
Tabla 2.9: Clasificación del contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS).	42
Tabla 2.10: Principales factores directos e indirectos de la degradación de las tierras.....	48
Tabla 2.11: Rúbrica para evaluar la relevancia de los factores	49
Tabla 2.12: Rúbrica para evaluar la relación causa-efecto de los factores	49
Tabla 3.1: Población total y estructura por sexo y edad del municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.	61
Tabla 3.2: Situación de viviendas en el municipio 2000-2015.	62
Tabla 3.3: Situación de la educación en el municipio 2000-2015.	62
Tabla 3.4: Situación de salud en el municipio 2000-2015.....	63
Tabla 3.5: Población económicamente activa del municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.	63
Tabla 3.6: Carencias sociales y rezago educativo del municipio 2000-2015.	65
Tabla 3.7: Cobertura de las categorías de Erosión Potencia Hídrica.	69
Tabla 3.8: Cobertura de las categorías de Densidad de drenaje.	71
Tabla 3.9: Periodos de sequía en el municipio de Ixtacamaxtitlán.	71
Tabla 3.10: Correspondencia entre las clases de CCI-LC, ESA y las clases de LC presentes en la zona de estudio. .	74
Tabla 3.11: Estadísticas anuales de CT y cambios netos de la superficie entre 2000-2015.	76
Tabla 3.12: Matriz de Cambios de la Superficie 2000-2015.....	80
Tabla 3.13: Cambios y flujos en la CT 2000-2015 (km ²).	80
Tabla 3.14. Precisión y error del mapa de CT 2015.	81
Tabla 3.15: Distribución de las clases de NDVI (área y %) para 2000 y 2015 en el municipio de Ixtacamaxtitlán. .	83
Tabla 3.16: Dinámica de la Productividad de la Tierra entre 2000 y 2015 en el municipio de Ixtacamaxtitlán.....	85
Tabla 3.17: Distribución de las clases de DPT en el municipio de Ixtacamaxtitlán.	86
Tabla 3.18: Contenido promedio de COS por categoría de CT 2015 en el municipio de Ixtacamaxtitlán.....	87
Tabla 3.19: Pérdidas de COS en el municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.	89
Tabla 3.20: Distribución de las clases de COS para el año 2015 en el municipio de Ixtacamaxtitlán.	89
Tabla 3.21: Distribución en km ² y % del estado de cada indicador evaluado en el Municipio de Ixtacamaxtitlán.	91
Tabla 3.22: Degradación en el municipio de Ixtacamaxtitlán en el periodo 2000 a 2015.....	91
Tabla 3.23: Agrupación de las zonas de muestreo	101
Tabla 3.24: Resultados de los análisis fisicoquímicos del suelo en los escenarios evaluados (0-30 cm).	102
Tabla 3.25: Estadísticas descriptivas de los indicadores evaluados por escenario	103
Tabla 3.26: Prueba de Mann-Whitney ($\alpha = 0.05$) para la cobertura arbórea (2000 y 2020)	105
Tabla 3.27: Acciones de contacto y acercamiento con los actores sociales.	107
Tabla 3.28: Lista de expertos que participaron en la construcción del modelo DPSIR	108
Tabla 3.29: Listado final de los factores del modelo DPSIR.....	110

LISTADO DE ABREVIATURAS

ASSOD	Metodología de Evaluación de la Degradación del Suelo en el Sur y el Sudeste de Asia
CCI	Centro Común de Investigación de la Comisión Europea
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (México)
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal (México)
CONAPO	Consejo Nacional de Población (México)
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (México)
COS	Indicador de Carbono Orgánico del Suelo
CT	Indicador de Cubierta Terrestre
DPSIR	Marco de Drivers-Presiones-Estado-Impacto-Respuesta
DPT	Indicador de Dinámica de la Productividad de la Tierra
DSM	Cartografía Digital del Suelo
DT	Degradación de Tierras
ESA	Agencia Espacial Europea
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GLAD	Laboratorio de Análisis y Descubrimiento Global de la Tierra
GLASOD	Evaluación Global de la Degradación del Suelo
ISRIC	Centro Internacional de Información y Referencia en Suelos
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México)
LADA	Evaluación de la Degradación de las Tierras en las Zonas Áridas
LCCS	Sistemas de Clasificación de la Cubierta de la Tierra
MDE	Modelo Digital de Elevación
NDT	Neutralidad en la Degradación de las Tierras
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
ODS	Objetivos del Desarrollo Sostenible
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
PNACDD	Programa Nacional de Manejo Sustentable de Tierras
PPN	Productividad Primaria Neta
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social (México)
SMN	Servicio Meteorológico Nacional (México)
UNCDD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
WOCAT	Reseña Mundial de Enfoques y Tecnologías de la Conservación

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

La degradación de tierras, catalogada como uno de los problemas ambientales actuales más relevantes del planeta (FAO, 2011, 2021; UNCCD, 2015c), es producida por la acción de un conjunto de factores naturales y antrópicos (Aynekulu *et al.*, 2017; SEMARNAT, 2014). Entre los factores naturales se encuentran las variaciones del clima y desastres naturales como tormentas, huracanes, inundaciones o incendios forestales; mientras que entre los antrópicos destacan actividades como la deforestación, el sobrepastoreo, las prácticas agrícolas poco o nada sustentables, y la falta y/o deficiencia de las políticas públicas (Cowie *et al.*, 2018; Pulido & Bocco, 2011). La degradación de tierras presenta consecuencias directas sobre el equilibrio ecológico, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos; es también un factor importante en el cambio climático al provocar la emisión de gases de efecto invernadero y reducción en el potencial de secuestro de carbono del suelo (Emanuelli *et al.*, 2016). Además, la degradación de tierras afecta los medios de vida de millones de personas al provocar la disminución de la productividad agrícola, pecuaria y forestal, lo que agrava la pobreza, la marginación y la migración (SEMARNAT, 2011; UNCCD, 2015a).

Las estimaciones apuntan a que entre el 23 y 25 % de las tierras en el planeta se encuentran altamente degradadas, con tasas anuales que oscilan entre 5 y 10 millones de hectáreas, situación que afecta a alrededor de 1 500 millones de personas a nivel mundial (FAO, 2011; Orr *et al.*, 2017; Stavi & Lal, 2015; UNCCD, 2015b). De acuerdo con el Programa Nacional de Manejo Sustentable de Tierras (PNACDD) (SEMARNAT, 2015), el 90.7 % de la superficie de México presenta algún tipo de degradación en sus diferentes categorías, lo que equivale a alrededor de 177 millones de hectáreas.

Ante esta problemática global, en el 2015 la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas introdujo el concepto de “Neutralidad en la Degradación de las Tierras” (NDT), que pasó a formar parte de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) (Akhtar-Schuster *et al.*, 2017; Orr *et al.*, 2017; UNCCD, 2015b, 2016a). Posteriormente, en la 12ª Conferencia de las Partes, la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés) propuso a la NDT como programa prioritario para la recuperación de tierras degradadas, creando así un Marco Científico y Metodológico para dicho Programa (decisión3/COP.12) (UNCCD, 2015b).

De acuerdo con la UNCCD, la finalidad de la NDT es alcanzar un estado de equilibrio que mantenga o aumente el nivel de salud ecosistémica y que garantice la seguridad alimentaria para las generaciones futuras, esto con relación a un estado de referencia o línea base, la cual es la meta mínima a la que se quiere llegar para el año 2030 (Cowie *et al.*, 2018; UNCCD, 2015b). La línea base es determinada por medio de la estimación y monitoreo de indicadores ambientales establecidos a nivel mundial, para con esto encontrar una manera de contrarrestar los cambios negativos que son generados por las actividades antrópicas; lo que supone compensar anticipadamente las pérdidas con una serie de medidas para alcanzar ganancias equivalentes, esto con el fin de alcanzar un “efecto neutro en la degradación de las tierras” (Orr *et al.*, 2017).

Con el propósito de buscar estrategias acordes de conservación, prevención y manejo que sirvan para evitar, reducir y revertir la degradación de las tierras en el contexto de la planificación ambiental, es necesario comenzar a realizar acciones bajo el Marco del Programa de la NDT, para conocer el estado de los recursos naturales y los efectos de la degradación sobre las dimensiones ambientales, sociales y económicas, sobre todo a niveles locales, en donde la información es escasa. Para ello se tomó como sistema de estudio el municipio de Ixtacamaxitlán, Puebla; el cual presenta diversos contrastes entre vegetación, relieve y clima que lo hacen vulnerable a la degradación. Además, una serie de fenómenos hidrometeorológicos, procesos antrópicos, conflictos socioambientales y pobreza han sido documentados para el área de estudio todo ello sin que exista una cuantificación detallada de su estado ni de su riesgo potencial de degradación.

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1. Degradación de Tierras (DT)

De acuerdo con FAO (2008), el “suelo” se define como *“el medio natural para el crecimiento de las plantas”*, que consiste en capas compuestas de minerales, materia orgánica, agua y aire. El suelo es un componente esencial de la “tierra”. En este sentido, el concepto de “tierra” se establece como la superficie del planeta que comprende la tierra y los recursos de la misma (López-Santos, 2016); se refiere al área terrestre que abarca todos los atributos de la biosfera por arriba y por debajo de esa superficie, incluyendo a los atributos climáticos, el suelo, las formas del terreno y la hidrología; las poblaciones animales y vegetales; y los resultados físicos de la actividad humana pasada y presente, así como sus interacciones espaciales y temporales (FAO/UNEP, 1997; López-Santos, 2016; Mas *et al.*, 2009). Entonces, la tierra se concibe como la entidad mayor donde están contenidos tres componentes primordiales: recursos edáficos, hídricos y bióticos en los que se incluye al humano (López-Santos, 2016). Cuando uno o más de estos recursos han estado sometidos a un deterioro progresivo se habla de Degradación de Tierras (DT) (GEF, 2006).

La DT es uno de los principales problemas ambientales del siglo XXI (SEMARNAT, 2011; UNCCD, 2015b). Según lo define la UNCCD: *“La degradación de la tierra es la reducción o pérdida de la capacidad productiva biológica o económica de los recursos de la tierra, generalmente causada por actividades humanas, exacerbada por procesos naturales y a menudo, magnificada por el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad”* (UNCCD, 2013, 2015a); aunado a esto se ha reconocido que la pobreza es un factor que incrementa la degradación de tierras, lo que provoca un esquema de repetición que genera más pobreza (CEPAL, 2005; SEMARNAT, 2007, 2011, 2015).

La degradación de tierras es considerada como un fenómeno complejo y dinámico que es difícil de evaluar, pero la determinación y el monitoreo de la tierra degradada desempeña un papel importante en la toma de decisiones para la rehabilitación y restauración de zonas degradadas (Baskan *et al.*, 2017; Sommer *et al.*, 2011).

1.2.2. Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT)

El concepto de NDT se mencionó formalmente en 2011, en la 10ª sesión de la Conferencia de las Partes (UNCCD, 2015b), desde entonces se han buscado herramientas para implementar el programa de Neutralidad y así prevenir, detener y revertir el ritmo de degradación de tierras. Es en septiembre del 2015, cuando la Asamblea General de las Naciones Unidas adopta formalmente los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) resultado del documento *“El futuro que queremos”*, elaborado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (2012). Entre dichos objetivos se encuentra el objetivo 15, específicamente el ODS 15.3 que menciona: *“De aquí a 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con efecto neutro en la degradación de las tierras”*.

Posteriormente, en la 12ª Conferencia de las partes, la NDT fue oficialmente reconocida por la UNCCD, la cual la define como *“El estado en el cual la cantidad y la calidad de los recursos de las tierras necesarios para apoyar las funciones y servicios ecosistémicos y mejorar la seguridad alimentaria se mantiene estable o se incrementa en una escala espacial y temporal en los ecosistemas”* (decisión 3/COP.12) (Laina, 2016; UNCCD, 2015b). Es así como, con la finalidad de utilizar una metodología universal para conocer el estado de degradación de las tierras en el mundo, se selecciona a la cubierta terrestre, productividad de la tierra y reservas de carbono en suelo como los indicadores globales centrales de la NDT y sus criterios de medición asociados. Así mismo, se recomienda la adición de indicadores complementarios que traten especificidades locales, regionales o nacionales (Global Support Program, 2016; Orr *et al.*, 2017).

1.2.3. Línea Base

Una línea base es una investigación que se realiza con la finalidad de describir la situación inicial del objeto de estudio de un proyecto, así como su contexto. Su propósito es comparar esta información con mediciones posteriores que funcionen para poder evaluar objetivamente la magnitud de estos cambios, lo que la constituye como un instrumento esencial para mejorar los procesos de gestión del conocimiento y toma de decisiones (Medianero, 2014).

Lo que diferencia a la NDT de otros esfuerzos para luchar contra la degradación es la elección de la Neutralidad como objetivo. Para verificar que este objetivo sea alcanzado se debe establecer una línea de referencia, es decir una línea base con respecto a la cual se pueda evaluar el cambio del estado en el tiempo, y el monitoreo del avance o retroceso de la degradación en caso de intervención. De esta forma, para observar si se ha logrado el objetivo, y en concordancia con la introducción del concepto de Neutralidad, se toma como tiempo inicial (t_0) al año 2015 para su posterior evaluación al año 2030 (t_1) (Figura 1.1). Así, la línea base es el valor inicial de los indicadores globales base, seleccionados por el programa de la NDT (Orr *et al.*, 2017) y el objetivo de Neutralidad es que los valores de estos indicadores sean igual o mayor a los valores iniciales.

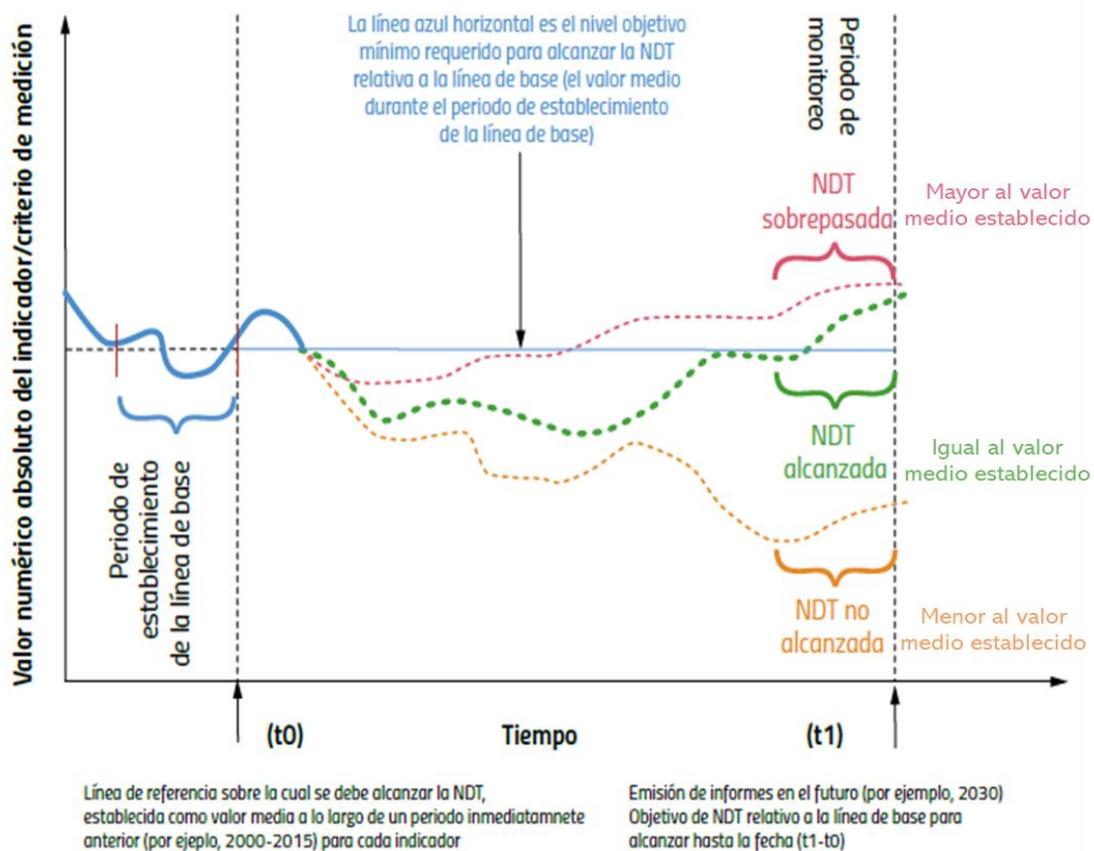


Figura 1.1: Diagrama de trayectorias alternativas de los indicadores. Cuyo objetivo en el t_1 deberá ser mayor o igual al t_0 .

Fuente: Modificado de Orr *et al.* (2017).

1.2.4. Indicadores ambientales de la NDT

Con la finalidad de mejorar el conocimiento y poder entender, describir y analizar fenómenos o problemas ambientales se han desarrollado herramientas como los indicadores. Un indicador se define como un parámetro que puede ser medido u observado, este provee información y una descripción simplificada del estado y tendencia de un fenómeno o proceso con la finalidad de hacerlos cuantificables, de forma que la información pueda ser comunicada. Los indicadores deben ser claros, específicos, relevantes y fáciles de interpretar y deben evaluarse mediante el uso de criterios de medición aplicables y reproducibles (Becerril-Piña *et al.*, 2015; Silva, 2017).

Los indicadores ambientales son considerados como medidas indirectas para el seguimiento de factores clave que reflejan la capacidad del sistema para suministrar bienes y servicios ecosistémicos, y deben ser capaces de identificarse dentro de modelos conceptuales que permitan la descripción de factores, vínculos e impactos de un problema ambiental complejo (Orr *et al.*, 2017).

Estos han sido utilizados a niveles internacionales, nacionales, regionales y locales para diversos propósitos, entre los que destacan: esclarecer un tema, descubrir relaciones entre los componentes de un sistema, informar sobre el estado del ambiente, evaluar el desempeño de políticas ambientales, monitorear y evaluar el progreso de intervenciones positivas al ambiente, entre otros. Así mismo, son ampliamente utilizados para que los tomadores de decisiones y la sociedad obtengan una visión más completa del estado del ambiente, los factores directos o indirectos que lo amenazan y los cambios producidos en este (López & Rodríguez, 2009).

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, por sus siglas en inglés) (2001) para que un indicador ambiental sea confiable e interpretable deberá cumplir con ciertas características importantes entre las que destacan:

- Ofrecer una visión de las condiciones ambientales, presiones ambientales y respuestas de la sociedad o gobierno.
- Ser capaces de mostrar tendencias a través del tiempo.
- Responder a cambios en el ambiente y las actividades humanas relacionadas.
- Proporcionar una base para las comparaciones internacionales
- Ser aplicables a distintas escalas
- De preferencia, tener un valor con el cual puedan ser comparados.
- Estar teórica y científicamente bien fundamentados.
- Estar basados en consensos internacionales.
- Ser capaces de relacionarse con modelos económicos y/o de desarrollo, así como con sistemas de información.
- Estar disponibles con una razonable relación costo/beneficio.

Como se mencionó anteriormente, el programa de la Neutralidad, dentro de su Marco Científico y Metodológico establece el uso de tres indicadores globales científicamente aceptados para definir la línea base de degradación de tierras, los cuales deberán ser complementados con otros indicadores para qué, en conjunto, describan y expliquen el fenómeno de degradación de tierras, los cambios que provoca, su impacto sobre los bienes y servicios ecosistémicos y las acciones que deberían realizarse para evitar, reducir y revertir este fenómeno dentro de un contexto local, regional o nacional (Orr *et al.*, 2017).

1.2.4.1. Indicadores globales base de la NDT

La Conferencia de las Partes de la UNCCD seleccionó tres indicadores ambientales basados en la tierra: Cubierta Terrestre (CT), Dinámica de la Productividad de las Tierras (DPT) y Carbono Orgánico del Suelo (COS), y son representantes de lo que la NDT busca mantener, ofrecen una amplia visión de los procesos en los ecosistemas y juntos pueden evaluar la cantidad y calidad de la mayoría de los bienes y servicios ecosistémicos (**Figura 1.2**) (Orr *et al.*, 2017; UNCCD, 2018).



Figura 1.2: Relación entre los servicios ecosistémicos y los indicadores globales de la NDT.

Fuente: Elaboración propia, modificado de Orr *et al.*, 2017.

Cubierta Terrestre (CT)

La cubierta terrestre hace referencia a la cubierta biofísica observada en la superficie de la tierra. Esta incluye características de la vegetación, rocas, suelos desnudos y cuerpos de agua continentales, así como zonas artificiales, específicamente áreas urbanas. Apunta a una superficie de tierra que se ha clasificado según la firma espectral de su cubierta física, la cual es captada con una tecnología de teledetección (UNCCD, 2018). La CT ofrece un primer indicio de la reducción o aumento de la vegetación, de la fragmentación del hábitat y de la conversión de tierras (UNCCD, 2016b). Un cambio concreto de la cubierta terrestre puede ser considerado como positivo o negativo y se refiere a cuando una categoría específica de cubierta pasa a otra categoría de cubierta terrestre.

La CT es un parámetro que puede cambiar generalmente rápido, por lo que es un indicador importante de la dinámica de la tierra generada por una serie de factores naturales y antrópicos (UNCCD, 2018). Este indicador cumple dos funciones; un cambio negativo puede señalar degradación de la tierra cuando hay pérdida o disminución de los bienes y servicios ecosistémicos al proporcionar los medios para evaluar las perturbaciones resultantes de actividades antropogénicas, como la agricultura y la expansión de las zonas urbanas (Brink *et al.*, 2016) y, además, puede emplearse para desglosar a los otros indicadores (Dinámica de la Productividad de la Tierra y Reservas de carbono orgánico en el suelo).

Dinámica de la Productividad de la Tierra (DPT)

La productividad de la tierra es definida como la energía fijada por las plantas menos su respiración y se refiere a su capacidad productiva biológica (UNCCD, 2016b). La determinación del estado de la cobertura vegetal, su cambio y evolución a lo largo del tiempo es utilizada generalmente como una representación de la productividad de la tierra. A nivel global, el estado de la cobertura vegetal se evalúa a través de series temporales de índices de vegetación que son capturados por medio de teledetección y representan la actividad fotosintética a lo largo del tiempo.

Los índices de vegetación han resultado adecuados para el estudio de la dinámica de la vegetación a diversas escalas y de los cambios que se presentan en la superficie terrestre asociados a procesos de degradación o recuperación. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) ha sido el índice más utilizado y es considerado como una opción sólida para los análisis de la productividad de la tierra; ofrece series temporales de mayor duración y datos a diferentes escalas espaciales, por lo que resulta adecuado para proporcionar información sobre la condición de la vegetación y la biomasa (UNCCD, 2018; Yengoh *et al.*, 2014). Sin embargo, los cambios en el estado de la vegetación no pueden evaluarse únicamente como una medida lineal, sino que se debe tomar en cuenta la capacidad del sistema para hacer frente a las perturbaciones que en ella se presentan, es decir su dinámica temporal (UNCCD, 2018). Por lo que es necesario basarse en cambios a través del tiempo y analizar las tendencias en periodos definidos; en este sentido, y comprendiendo la naturaleza dinámica de la productividad, se utiliza la medida cualitativa de DPT, que representa una trayectoria de tendencia de intensidad y persistencia de la vegetación, así como sus cambios a lo largo de un periodo definido de observación (UNCCD, 2017).

Reservas de Carbono Orgánico en Suelo (COS)

La reserva de carbono es la cantidad total de carbono que existe en un ecosistema, y puede ser la biomasa, materia orgánica muerta y Carbono Orgánico del Suelo. El carbono orgánico es uno de los elementos más importantes del suelo debido a su facultad para estimular el desarrollo y crecimiento de las plantas, reciclar nutrientes, conservar la fertilidad del suelo y limpiar y almacenar agua dulce (UNCCD, 2018). El COS es el indicador más utilizado y representativo para evaluar el proceso de acumulación de carbono, ya que está íntimamente relacionado con la calidad de suelo, indica cambios a largo plazo y su reducción es considerada como un efecto común de todas las formas de degradación de la tierra, ya que la disminución del aporte de materia orgánica y el uso inadecuado del suelo modifican su estructura, reducen la biodiversidad y conducen a la erosión (FAO, 2017). Cuando se mantienen las reservas del COS por medio de la aportación de materia orgánica, que a su vez depende de la cantidad y calidad de la productividad primaria, genera beneficios adicionales a través de la mitigación del cambio climático y la conservación de la biodiversidad (UNCCD, 2018).

1.2.4.2. Indicadores complementarios

A pesar de que los indicadores globales de la NDT abordan a la mayoría de los servicios ecosistémicos, es necesaria la adición de indicadores que complementen la información de las tendencias de degradación o de los servicios ecosistémicos y que, además, traten especificidades nacionales, regionales o locales para contextualizar la situación ambiental. Los indicadores complementarios pueden incluir indicadores a diversas escalas espaciales (local, regional o nacional), temporales (cambios en el tiempo) y dimensionales (sociales, económicos o biofísicos); indicadores de otros ODS o indicadores enmarcados dentro de modelos conceptuales que expliquen las causas de la degradación (Orr *et al.*, 2017).

1.2.5. Modelos Conceptuales: Marco de Referencia DPSIR

El marco Drivers-Presiones-Estado-Impacto-Respuesta (DPSIR, por sus siglas en inglés) es un modelo conceptual que está soportado por el pensamiento sistémico. El pensamiento sistémico es un enfoque utilizado para la resolución de problemas, el cual se basa en la afirmación de que los componentes de un sistema se entienden mejor en el contexto de sus relaciones, e interacciones entre sí y con otros sistemas (Bradley & Yee, 2015; Meadows, 2009; Von Bertalanffy, 1972). El pensamiento sistémico es considerado como una manera de desarrollar un conjunto de habilidades analíticas que son utilizadas para mejorar la capacidad de identificar y comprender a los sistemas, predecir su comportamiento e idear modificaciones que sirvan para producir efectos deseados, tomando en cuenta los elementos, las interacciones y la función del sistema (Arnold & Wade, 2015; Meadows, 2009).

Con la finalidad de integrar el conocimiento generado y reducir la complejidad de un problema se utilizan los modelos conceptuales, los cuales tienen como objetivo desarrollar una comprensión amplia de la estructura, interacciones, procesos y funcionamiento que ocurren en los ecosistemas (Garay *et al.*, 2018). Consisten en diagramas que ayudan a documentar, visualizar, comprender, organizar y describir los vínculos entre los elementos y las conexiones clave (Bradley & Yee, 2015; Orr *et al.*, 2017). Así mismo, contribuyen a la comunicación entre tomadores de decisiones, científicos, partes interesadas y la sociedad en general, permitiendo elaborar estrategias que ayuden a estos actores a implementar y planificar acciones de manejo coordinadas.

El modelo conceptual DPSIR proporciona un marco de referencia integrado para el análisis y gestión de los problemas ambientales complejos, lo que permite describir las relaciones entre los orígenes y las consecuencias de dichos problemas para entender su dinámica y complejidad (**Figura 1.3**) (Touré *et al.*, 2015). Además, funciona como base conceptual para el desarrollo de predicciones, modelos matemáticos y otras herramientas que apoyen la toma de decisiones (Bradley & Yee, 2015).

El Marco DPSIR fue diseñado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA, 1999) y se fundamenta en una lógica según la cual, el desarrollo socioeconómico (Fuerzas motrices/Drivers(D)), origina una serie de Presiones(P) sobre el medio, provocando cambios dentro del Estado(E) del ambiente, lo cual, a su vez induce a la aparición de Impactos(I) sobre los bienes y servicios ecosistémicos (Díaz-Martín, 2015). Posteriormente, la sociedad toma conciencia y actúa sobre estos cambios generando una serie de Respuestas(R) que pueden afectar a cualquier parte de la cadena entre los drivers y los impactos.

Los problemas ambientales incluyen aspectos sobre salud y bienestar humano, sin embargo, muchas veces estos aspectos no son debidamente documentados, por lo que el modelo DPSIR se ha desarrollado de manera más explícita para tomarlos en cuenta (Bradley & Yee, 2015). Este desarrollo del modelo ha sido adoptado por la UNCCD para el monitoreo de los logros de dicha convención (UNCCD, 2013) e inspirado en la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2005) y considera cómo, la degradación ambiental puede afectar al bienestar humano (Bradley & Yee, 2015; Orr *et al.*, 2017).

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) (Bradley & Yee, 2015), los Drivers(D) son factores que motivan a las actividades humanas y satisfacen las necesidades humanas, se clasifican en económicas y sociales. Estos Drivers(D) producen Presiones(P) que provocan cambios en el ecosistema o en el comportamiento humano, modificando sus atributos o sus componentes. El Estado(S) por su parte, es la condición del sistema biofísico y social cuantificado en un determinado momento y cuyo diagnóstico es producido por las Presiones(P). Los Impactos(I) son las consecuencias de los cambios en el sistema, es decir los efectos que se han tenido sobre los ecosistemas o la salud humana. Finalmente, las Respuestas(R) son acciones para prevenir, compensar, aminorar o adaptarse a los cambios producidos en los estados biofísico y socioeconómico, estas acciones pueden realizarse sobre cualquier elemento del marco.

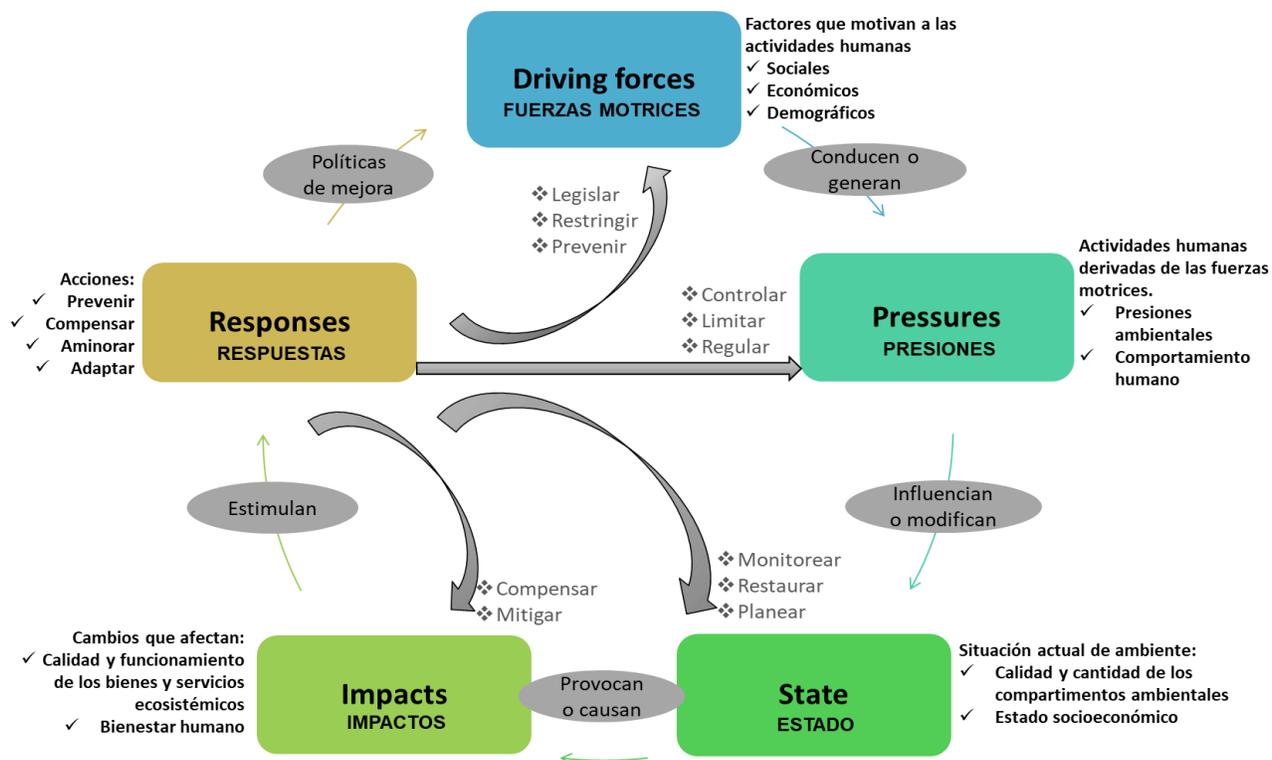


Figura 1.3: Diagrama de relaciones entre los elementos del Marco DPSIR.

Fuente: Elaboración propia con información de Bradley y Yee (2015).

Dentro del Marco Conceptual y Científico de la NDT, se propone al modelo DPSIR como base para la implementación de la Neutralidad (UNCCD, 2017) en donde las Respuestas(R) se enfoquen sobre todo a los Drivers(D), Presiones(P) y al Estado(E) del ecosistema. También se recomiendan Respuestas(R) como políticas propicias para la NDT, planificación integrada del uso de las tierras, contrapesos e intervenciones para la NDT y monitoreo de la Neutralidad (Orr *et al.*, 2017). Es decir, el marco DPSIR sirve para proponer las Respuestas(R) con base en la jerarquía “evitar>reducir>revertir” que se basa en el fundamento de que prevenir es mejor que remediar (**Figura 1.4**). Para dicho proceso del marco es necesario desarrollar indicadores adicionales útiles enfocados no solo Estado(S), sino a los demás componentes del marco.

Los indicadores globales base propuestos por el programa de la Neutralidad serán incorporados al marco DPSIR, y, adicionalmente se incorporarán indicadores complementarios que sirvan para contextualizar el problema socioeconómico y ecológico del sistema con la finalidad de que aporten información suplementaria que ayude a mejorar la comprensión de las tendencias de la degradación de la tierra (Orr *et al.*, 2017).

Los indicadores deberán ser nacionales y subnacionales con datos cualitativos y/o cuantitativos que permitan comprender la interconexión de los componentes del marco DPSIR (Agyemang *et al.*, 2007). Adicionalmente, para una mejor comprensión compartida de la dinámica del sistema es necesaria la participación colaborativa de tomadores de decisiones, los actores y las partes interesadas (Arnold & Wade, 2015). Así, la aplicación del marco DPSIR con los enfoques participativos proporciona una mejor comprensión de la dinámica de las interacciones entre la sociedad y naturaleza asociadas con la degradación y regeneración de la tierra (Gichenje, Pinto-Correia, *et al.*, 2019).

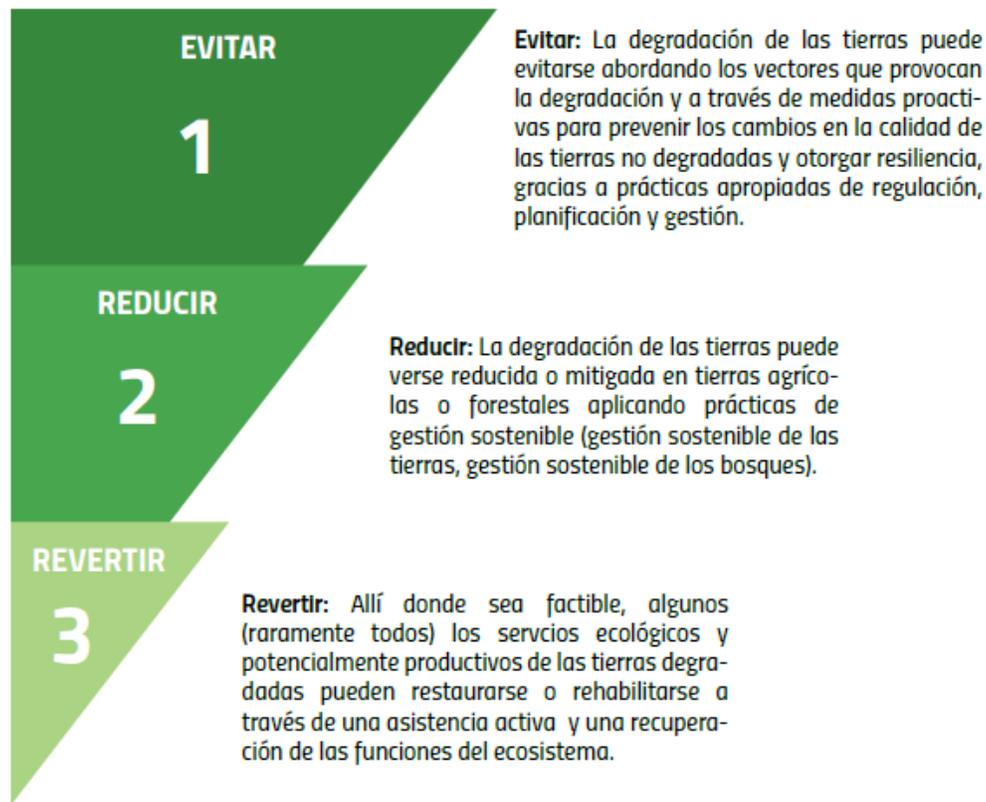


Figura 1.4: Jerarquía de respuesta de la Neutralidad de la Degradación de la Tierra.

Fuente: (Orr et al., 2017).

1.2.5.1. Enfoques participativos

El fomento del uso sostenible de los recursos de la tierra requiere de la participación de una multitud de sectores y partes interesadas como son los usuarios de la tierra, los proveedores de servicios privados, las agencias gubernamentales, los institutos de investigación nacionales e internacionales y las organizaciones de la sociedad civil (UNCCD, 2016b). La participación debe ser vista como una construcción colectiva, donde no se limita a la consulta de los actores, sino más bien donde se articulen una serie de tácticas como la planificación de propuestas, gestión de recursos, evaluación de proyectos que sean construidos desde, por y para las comunidades (Soliz & Maldonado, 2012).

Al ejecutar una investigación científica dentro de un marco conceptual, es necesario el acceso, la colaboración y la participación de los actores sociales involucrados, con el fin de organizar y desarrollar el modelo de una forma que permita rastrear los factores y las interacciones de estos (Bradley & Yee, 2015), a su vez, ofrece una oportunidad para proporcionar empoderamiento e involucramiento de la comunidad que otras aproximaciones tradicionales no han podido conseguir (Fraser et al., 2006; Ruizpalacios et al., 2019; Vázquez-Valencia & García-Almada, 2018). En este sentido, Romero (2009) menciona: “Esto no quiere decir que la opción científico tecnocrática que ha constituido la base para la toma de decisiones durante todo el siglo XX sea apartada del discurso actual, sino que en sistemas complejos en los que intervienen diferentes perspectivas sobre un mismo tema, las opciones deben ampliarse” por lo que se debe tener un lenguaje y un marco común para compartir el conocimiento especializado y la experiencia con la comunidad para actuar responsablemente (Richmond, 1994).

Los enfoques participativos resultan de mayor importancia a nivel regional o local, ya que la distancia entre los actores, las partes interesadas y los especialistas se vuelve más corta, provocando que la interacción entre estos sea más sencilla y efectiva (Romero, 2009), aunado a esto, permite ampliar la visión sobre el sistema, donde no solo se establecen diferentes puntos de vista sino que los mismos conocimientos que son expuestos por las distintas partes se incorporan en la construcción y reconceptualización de un problema y la posición que ocupa y ocupan dentro del sistema socioecológico, esto a su vez coadyuva a cambios que promueven procesos de transformación hacia trayectorias sostenibles del sistema (Romero, 2009; Ruizpalacios *et al.*, 2019).

1.2.5.2. Actores sociales

Un enfoque participativo dentro de una investigación necesita la disposición activa de un conjunto de actores sociales que sean relevantes para la elaboración, seguimiento y aplicación de estrategias (Campos-Serrano, 2005). En este sentido, un actor social es un “sujeto colectivo o un grupo, estructurado a partir de una conciencia de identidad propia” (Touraine, 1998), portador de valores y que es entendido como un generador de estrategias y de acciones que contribuyen a la gestión y transformación de la sociedad (Castro-Medina, 2018).

La identificación de los tipos de actores sociales que se pueden considerar en un estudio está en función del objetivo de este y se debe determinar en forma precisa a partir de la consideración de que los actores involucrados serán aquellos con responsabilidades y que además resultan beneficiados o perjudicados por el estado actual de una situación determinada. Para su identificación se deben tomar en cuenta cuestiones como ¿Quién hace qué?, ¿En nombre de quién?, ¿Cómo y con qué objetivo?, ¿Con quién? Y finalmente ¿Con qué resultados? De forma general, los actores sociales deberán tener las siguientes características (Ponce, 2004):

- Personas influyentes por su poder decisión, representatividad o convocatoria.
- Grupos, organizaciones o instituciones que tienen alguna relación el núcleo social de interés para su entorno.
- Personas o grupos que contribuyen con su aporte a una localidad y que actúan con transparencia para la ejecución planificación y/o elaboración de un proyecto.

De acuerdo con la acción que realizan, existen tres categorías de actores: los ligados a la toma de decisiones (político-institucionales), los ligados a la acción sobre el terreno (la población y todas las expresiones activas) y los ligados a técnicas particulares (expertos, científicos y profesionales). Así mismo, su diversidad también depende del nivel al que se requiera llegar, ya sea local, municipal, estatal o nacional.

De acuerdo con Ponce (2004), para realizar un análisis de los actores sociales y determinar el tipo de actores que se considerarán, se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Conocer y caracterizar las relaciones de poder e influencia entre los actores sociales y de estos sobre la comunidad.
- Identificar a aquellos actores sociales con mayor conocimiento de los problemas comunitarios.
- Identificar sus intereses, percepciones y expectativas.
- Relacionar los intereses vinculando actores con intereses complementarios y manejando acuerdos entre actores con intereses en conflicto.

1.3. ANTECEDENTES SOBRE LA DEGRADACIÓN DE TIERRAS (DT)

Una serie de estudios internacionales se han dedicado a evaluar el estado de los recursos y las tierras en distintas regiones, así como a identificar las causas de su degradación. Los métodos generalmente utilizados son modelos matemáticos, ecuaciones paramétricas, teledetección, observación directa y mediciones de diversos parámetros sobre el terreno (De Pina Tavares *et al.*, 2015; Ramirez-Garcia, 2017).

Uno de los estudios de mayor relevancia a nivel mundial es la Evaluación Global de la Degradación del Suelo (GLASOD, por sus siglas en inglés) financiado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) y coordinado por ISRIC (International Soil Reference and Information Center), cuyo resultado fue el Mapa del estado actual de la degradación del suelo inducida por el hombre escala 1:10 millones (Oldeman *et al.*, 1991); en este estudio se desarrolló un conjunto de unidades de mapeo y se estimó la degradación del suelo en términos del tipo, extensión, grado, tasa y causas de degradación. Aunque las estimaciones son uniformes, en el sentido de que se basan en unidades definidas de mapeo y estructuradas cuidadosamente, no considera a los demás recursos de la tierra (Huaico-Malhue *et al.*, 2018), así mismo, varios autores lo consideran moderadamente consistente, difícilmente reproducible y subjetivo al basarse únicamente en juicios de diversos expertos, por lo que la hace incomparable entre regiones (Gibbs & Salmon, 2015; Vogt *et al.*, 2011). Posteriormente se creó el sistema ASSOD (Assessment of Soil Degradation in South and Southeast Asia) el cual se basó en la metodología utilizada en GLASOD pero ajustada a las condiciones regionales de Asia y mejorada en términos de tendencia de la degradación e impactos en la productividad con relación al manejo, adicionalmente, se incorporan elementos de conservación y rehabilitación; no obstante, los criterios siguen siendo cualitativos y no cuantitativos y su enfoque es únicamente hacia el recurso suelo (Comisión Europea, 2013; Pulido & Bocco, 2011; van Lynden & Oldeman, 1997).

Otro estudio distinguido a nivel mundial es el Esquema LADA (Land Degradation Assessment in Drylands) realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) el cual se hace por primera vez a través de la cuantificación de diversos indicadores, además combina el uso de datos como sensores remotos, mapas temáticos, datos socioeconómicos y saberes locales. Otro de sus grandes avances respecto a los otros esquemas, es que LADA adopta el hecho esencial de definir un periodo durante el cual se deberían considerar los procesos de degradación de la tierra, es decir, recalca la importancia de definir una línea base respecto a la cual se establezca el estado actual de la tierra, así, el factor tiempo brinda un marco para comprender procesos que causan la situación actual (Comisión Europea, 2013; Koohafkan *et al.*, 2003). Sin embargo, su aplicación a nivel local es costosa y compleja ya que los indicadores utilizados son de carácter combinado y su separación resulta complicada, al mismo tiempo se encuentran limitados a condiciones ambientales únicas, en este caso a tierras secas (Koohafkan *et al.*, 2003; Pulido & Bocco, 2011).

Una mejora a la metodología LADA se dio en el proyecto GLADA (Global Land Degradation Assessment) el cual evalúa la DT de forma indirecta por medio de los cambios en la Productividad Primaria Neta (PPN) a través de la estimación del NDVI. Una de las ventajas de esta metodología es que se considera de bajo costo e incorpora la participación social activa. A pesar de ello sigue contando con limitaciones al no incluirse aspectos socioeconómicos y no es confiable en zonas húmedas, teniendo resultados considerados como defectuosos y engañosos. Sin embargo, los resultados de este esquema se consideran como los más actuales a nivel mundial (Bai *et al.*, 2008; Gibbs & Salmon, 2015; Pulido & Bocco, 2011).

Existen también estudios a nivel regional que utilizan los esquemas antes mencionados, ejemplo de esto es la investigación realizada por De la Colina *et al.* (2016), quienes evalúan el estado de DT en el Archipiélago Sabana-Camagüey en Cuba, mediante la metodología LADA/WOCAT por medio de modelación espacial y una serie de indicadores de presión, estado y respuesta; los resultados de este estudio identifican el tipo, intensidad y tendencia de la Degradación de las Tierras en dicho sistema.

Otros estudios realizados (Gaitán *et al.*, 2015; Salcedo & Solorza, 2010) evalúan el estado de degradación en regiones de Argentina mediante técnicas de teledetección, aplicando índices de vegetación, indicadores de campo y datos climáticos; se encontró que con esta metodología se pueden monitorear las tierras a gran escala. Así mismo, Fensholt *et al.* (2013) evalúan la Degradación de Tierras en Sahel, África mediante teledetección, proponiendo como indicador la correlación entre la PPN y la precipitación anual, sin embargo, los resultados no son concluyentes al no encontrarse una relación significativa entre estos. Por otro lado, Le Polain De Waroux y Lambin (2012), realizaron el monitoreo de degradación en un bosque de Marruecos mediante la determinación de cambio forestal a través de imágenes satelitales, encontrando disminución de la cobertura vegetal del 44.5 % en el periodo de 1979- 2007.

Específicamente en México, son pocos los estudios dedicados a cuantificar la DT. Un proyecto elaborado a escala nacional es la Evaluación de la Degradación de los Suelos causada por el hombre en la República Mexicana (SEMARNAT-CP, 2002), realizada por la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Universidad Autónoma de Chapingo y el Colegio de Posgraduados, y cuyo resultado es un mapa a escala 1:250 000, elaborado por medio de valoración directa de los suelos y la metodología ASSOD antes mencionada; de nuevo, esta evaluación queda reducida al recurso suelo y su ejecución a escala local es limitada, con todo siguió siendo útil para propósitos de planes generales de acción para revertir la degradación del suelo a nivel nacional y regional (Pulido & Bocco, 2011).

En cumplimiento con los compromisos adquiridos en materia de Lucha contra la Desertificación, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) junto con la Universidad Autónoma de Chapingo realizaron la primera Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación (CONAFOR-UACH, 2013). En este caso se integran 17 indicadores de DT y desertificación agrupados en seis componentes, los cuales fueron analizados mediante la sobreposición de capas temáticas. Esta línea base resulta de gran importancia al tomar en cuenta no sólo el recurso edáfico, sino también los recursos hídricos y biológicos, además de aspectos socioeconómicos (López-Santos, 2016); sin embargo, la problemática recae en que el número de indicadores es excesivo, además de que el periodo de análisis de los indicadores difiere entre sí.

Estudios a nivel regional en México se centran en índices de degradación de la cobertura vegetal mediante el uso de imágenes satelitales (Pérez-Morales, 2014; Ramírez-Carballo & Pedroza-Sandoval, 2007). Otros como Martínez-Santiago *et al.* (2015) y Casabella-González (2015), utilizan métodos de campo para determinar las características edáficas y evaluar el grado de erosión del suelo. También se evalúan las implicaciones que presenta la erosión del suelo sobre el almacenamiento del carbono orgánico (Bolaños-González *et al.*, 2016). Un estudio más completo es el realizado por Bravo-Peña *et al.* (2017) quienes identifican áreas con riesgo de degradación mediante la superposición de capas de información geográfica biofísicas y socioeconómicas en el oeste de Chihuahua, ellos encuentran que el modelo utilizado presenta un buen poder predictivo para la determinación de la degradación de tierras.

En el estado de Puebla, las investigaciones sobre la degradación de los recursos naturales son escasas, la información sobre su estado únicamente se presenta a nivel nacional y a una escala geográfica menor (1:1 000 000) (SEMARNAT-UACH, 2003) y se reducen a estudios de suelo y vegetación (Ramírez-García, 2017), tal es el caso de algunas investigaciones de Muñoz-Iniestra *et al.* (2013) y Rivero-Ramos *et al.* (2013), que se enfocan en conocer el estado de degradación de suelos en diversas partes de Puebla.

Finalmente, en el área de estudio, específicamente en la localidad de Texocuiapan se presentó un incendio forestal de gran magnitud ocasionando graves afectaciones a los recursos bióticos, edáficos e hídricos, por lo que en 1998 por decreto oficial fue declarada como Zona de Restauración Ecológica, sin embargo, esta restauración se extendió a áreas aledañas no incendiadas y los resultados biofísicos y sociales fueron favorables, además de evitar el cambio de uso de suelo (Carabias *et al.*, 2007; Cervantes *et al.*, 2008), posteriormente, Sánchez-Ramón (2004) realizó la revisión a la aplicación de las obras de restauración. Esta intervención resulta como el único trabajo de restauración ecológica documentado en la zona de estudio.

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

No existe una metodología única que permita estimar el estado actual de degradación de las tierras (Morales, 2012); los estudios realizados y reportados presentan diversas técnicas por lo que muestran discrepancias en cuanto a la magnitud de esta problemática, en este sentido, no existe un consenso en cuanto al conocimiento sobre el estado de degradación de las tierras a nivel mundial y regional. Asimismo, la mayoría de las metodologías son costosas y no son aplicables a escala regional y local. Además, la alta variedad y complejidad de los indicadores utilizados y su uso dependiente de las condiciones ambientales hace que los resultados no sean comparables (Pulido & Bocco, 2011).

Sumado a lo anterior, la atención a la degradación de las tierras se ha centrado en el deterioro de los recursos hídricos, edáficos o biológicos por lo que se perciben de manera aislada, sin tomar en cuenta sus interacciones y los impactos que sobre la economía y la sociedad se presentan (Ramirez-Garcia, 2017; SEMARNAT, 2014). Por esta razón, a pesar de los esfuerzos por parte de organismos internacionales para detener y revertir el deterioro sobre el ambiente, las tierras degradadas prevalecen en muchas áreas y otras continúan en proceso de degradación.

Además, al ser la NDT un programa reciente, las investigaciones referentes se han enfocado en revisar el concepto de neutralidad y en advertir la falta de resultados en los intentos que hasta ahora se han hecho para evitar la degradación (Cowie *et al.*, 2018; López-Santos, 2016; Safriel, 2017). O bien, han aplicado la metodología a escalas nacionales o en cuencas mayores a 1 000 km², por lo que a pesar de que la NDT forma parte de los ODS y es un mecanismo global de acción, hay un vacío de información sobre la metodología aplicada a escalas locales.

En México existen solo dos proyectos que determinan la degradación, el primero (SEMARNAT-CP, 2002) se enfoca únicamente en el recurso suelo y, en el caso del segundo, (CONAFOR-UACH, 2013) aunque es más integral al tomar en cuenta los recursos hídricos, edáficos y bióticos, así como aspectos socioeconómicos, la metodología es complicada y su uso a escala estatal o municipal es limitado, por lo que en estos niveles la información es escasa.

Asimismo, a nivel estatal la información del estado de degradación de las tierras es casi nula, obteniéndose de estudios realizados a nivel nacional y a una escala geográfica menor, que no aporta la información suficiente para el conocimiento de la degradación, por lo que la toma de decisiones se dificulta.

La región de la Sierra Norte de Puebla ha sufrido un constante deterioro a causa del inadecuado manejo de los recursos naturales, particularmente el municipio de Ixtacamaxitlán -el cual es uno de los municipios más grandes del estado de Puebla- presenta procesos de deforestación y erosión de suelos a causa de la agricultura, la ganadería y la explotación forestal (Bautista *et al.*, 2007; Perez-Munoz, 2021; Sanchez-Ramón, 2004), socioeconómicamente presenta altos niveles de pobreza, marginación y rezago social (CONAPO, 2010; CONEVAL, 2010), así como una serie de conflictos socioambientales asociados a actividades mineras.

Pese a lo anterior, cuenta con grandes zonas de bosque dispersas por su territorio y con proyectos de restauración tanto públicos como privados; sin embargo, no se cuenta con información del estado de degradación de sus tierras, ni con una estrategia integradora para evitar el deterioro de los recursos naturales con los que cuenta, lo que compromete el futuro de las tierras forestales y productivas, los recursos hídricos, edáficos y bióticos y, sobre todo, a su población actual y futura.

1.5. JUSTIFICACIÓN

La degradación de tierras es un problema que requiere de una atención inmediata, la extensa severidad que presenta alrededor del mundo, combinada con los efectos negativos del cambio climático, el crecimiento poblacional y el aumento de la demanda de alimentos y recursos naturales, requieren los conocimientos necesarios para promover acciones asertivas y políticas públicas que tengan la finalidad de contrarrestarla (Orr *et al.*, 2017). Esta problemática debe ser concebida como un sistema complejo, por lo que se debe tratar desde un punto de vista holístico e integrador y no unidireccional (García, 2011).

En este sentido, la presente investigación puede contribuir a proveer herramientas para lograr un equilibrio entre sociedad-naturaleza y degradación de tierras presente-futura en el municipio de Ixtacamaxitlán, Puebla; por medio de la investigación y aporte de información del estado de degradación de las tierras, a través de una metodología actualizada y reciente basada en la evaluación de indicadores clave y universales que sirven como referente para la mayoría de los servicios ecosistémicos (Orr *et al.*, 2017; UNCCD, 2018).

Así mismo, la comparación de estos indicadores bajo distintos escenarios de manejo forestal es de suma importancia para determinar la viabilidad para evitar, reducir y revertir la degradación de las tierras y así considerar las acciones necesarias de prevención, mantenimiento y restauración en el marco de la NDT.

Al ser la degradación de tierras una problemática compleja, no puede juzgarse fuera de su contexto espacial, temporal, económico y cultural (Warren, 2002), por lo que en esta investigación se determinaron los factores directos e indirectos, y las interrelaciones que favorecen la degradación de tierras en Ixtacamaxitlán, con la finalidad de contar con los elementos suficientes para lograr una adecuada planeación hacia la neutralidad.

Existen vínculos directos entre la NDT y otros ODS referentes a la pobreza, seguridad alimentaria, protección ambiental y uso sostenible de los recursos naturales, por lo que este estudio constituirá un apoyo a nivel local y regional para encaminarse a dichos objetivos. Por otro lado, se buscaron sinergias entre los diferentes actores clave involucrados en la zona de estudio como son ejidatarios, sector privado, organizaciones de la sociedad civil y gobierno, por medio de un enfoque participativo, ya que para alcanzar la neutralidad y la aplicación de prácticas sostenibles es necesaria la participación de las partes interesadas en el uso de las tierras.

Ixtacamaxitlán es un asentamiento humano que data de la época prehispánica, forma parte de los municipios con mayor historia y tradición del estado de Puebla en donde se encuentra una gran cantidad de huellas prehispánicas y coloniales, así como una riqueza paisajística, geológica, turística y forestal importante. No obstante, presenta áreas deforestadas ubicadas a lo largo de las vías de comunicación y los ríos; las tierras dedicadas a la agricultura en muchos casos son de baja calidad y/o se encuentran erosionadas, la falta de vías de comunicación dificulta la movilidad, la accesibilidad y la comercialización. Así mismo, el municipio sufre la amenaza del asentamiento de los denominados “Proyectos de muerte”, en los cuales se explotan los recursos naturales en beneficio de la extracción de oro y plata. La propuesta de instalación de una minera transnacional en el municipio ha ocasionado el deterioro del medio ambiente, conflictos, protestas y la ruptura del tejido social debido a la diversidad de los puntos de vista entre quienes están a favor y en contra. En esta misma línea, la lejanía entre las localidades y la difícil movilidad complica la organización social en pro de la defensa del territorio, las tradiciones, la historia y los recursos naturales.

Por esta razón, resalta la importancia de la definición del estado de las tierras en el municipio, para que, en caso de la instalación de la minera o cualquier otro proyecto que promueva el deterioro del ambiente, se tenga la suficiente información y conocimiento, que permita compensar los daños, de tal manera que el efecto en el ambiente sea neutro.

1.6. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo plantea la siguiente pregunta de investigación.

- ¿Cuáles son los factores, las interrelaciones y los impactos que influyen en la degradación de las Tierras en el municipio de Ixtacamaxtitlán y cuáles son las respuestas viables para alcanzar la NDT al año 2030?

1.7. OBJETIVOS

1.7.1. General

- Evaluar la Neutralidad en la Degradación de Tierras en el municipio de Ixtacamaxtitlán, Puebla en el periodo del 2000 al 2015 y su viabilidad y alcance para el año 2030.

1.7.2. Particulares

- Determinar la línea base de tierras degradadas para el municipio de Ixtacamaxtitlán y las tendencias de degradación de tierras para el periodo 2000 a 2015, a través de los indicadores marco de la NDT.
- Cuantificar y comparar los indicadores marco de la NDT bajo distintos escenarios ya establecidos: (1) zonas naturales conservadas (2) zonas naturales con aprovechamiento, (3) zonas restauradas o en proceso de restauración ecológica y (4) zonas deforestadas.
- Identificar y analizar los factores que promueven la degradación de las tierras, los impactos y sus interrelaciones, involucrados en la planificación hacia la Neutralidad en la zona de estudio.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. METODOLOGÍA

El estudio tiene un enfoque mixto ya que cuantitativamente mide el fenómeno de la degradación de las tierras mediante indicadores numéricos, y cualitativamente explora y describe un fenómeno ambiental con datos no numéricos.

La presente investigación tuvo elementos de diferentes alcances: Descriptivo porque se describió el fenómeno de la degradación de las tierras en el municipio de Ixtacamaxtitlán, en donde se seleccionó una serie de cuestiones y se midió o recolectó información sobre cada una de ellas. Correlacional en el sentido en que se buscó comparar indicadores bajo diferentes estados y se determinó su relación (Hernández-Sampieri *et al.*, 2010). Sin embargo su alcance final fue explicativo, ya que se buscó establecer los factores y las interrelaciones (causas) que promueven la degradación de las tierras para determinar los impactos (consecuencias) que provoca dicho fenómeno y explicar el contexto específico (unidad administrativa) en el que ocurren. Esto con la finalidad de brindar un mejor entendimiento del fenómeno que permita generar respuestas viables para alcanzar la NDT en el municipio de Ixtacamaxtitlán.

El presente proyecto tiene enfoque de pensamiento sistémico ya que se aboga por una visión holística y de identificación de procesos y estados en el estudio de los sistemas como entidades que han conducido a la estructuración de la situación actual, por lo que la estructura del trabajo de investigación permaneció en un estado constante de replanteamiento y reformulación hasta llegar a una explicación coherente que diera cuenta de los hechos observados y estuviera dirigida a identificar los procesos que han significado un progresivo deterioro del sistema (García, 2011).

2.1.1. Caracterización de la zona de estudio

Se realizó la caracterización de las condiciones biofísicas y socioeconómicas del municipio con la finalidad de conocer y describir las particularidades, alcances y limitaciones de los recursos naturales y las condiciones de los pobladores en la zona de estudio. Así mismo se determinaron particularidades para complementar los indicadores de la línea base del municipio.

2.1.1.1. Caracterización biofísica

La recopilación bibliográfica y cartográfica de las condiciones biofísicas de la zona, se basó en la búsqueda de toda la información disponible, obtenida de diversos medios como publicaciones, informes, mapas cartográficos a diferentes escalas (1: 50 000, 1:250 000 y 1:1000 000) y mapas temáticos de fisiografía, geología, edafología, clima, vegetación y uso de suelo, así como datos básicos hidrológicos, climáticos y geológicos; estadísticas y Sistemas de Información Geográfica (SIG) publicados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO) y el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL).

La información de las cartas utilizadas se encuentra en la **Tabla 2.1**. Esta información se procesó por medio de un SIG a través del programa Arc View Gis 10.4 (ESRI, 2016) a partir del cual se elaboraron los mapas temáticos del municipio.

Tabla 2.1: Cartas y escalas de mapas cartográficos.

Mapa	Año	Escala	Referencia
Topográfico a nivel estatal	2004	1:250 000	(CONABIO, 2004)
Fisiográfico. Sistema de topoformas	2001	1:1 000 000	(INEGI, 2001)
Geológico	2005	1:250 000	(INEGI, 2005)
Climatológico	2008	1:1 000 000	(CONABIO, 1998)
Edafológico	2014	1:250 000	(INEGI, 2014b)
Hidrológico	2010	1:50 000	(INEGI, 2010)
Uso de suelo y vegetación	2016	1:250 000	(INEGI, 2016b)

Fuente: Elaboración propia.

Para la caracterización climática se consultó la red de estaciones meteorológicas ubicadas dentro del municipio (**Tabla 2.2**) donde se obtuvieron los registros históricos de precipitación promedio mensual y promedio anual; temperatura máxima, mínima y promedio. Con la información se realizó el climograma correspondiente de cada estación meteorológica.

El balance hídrico se calculó por medio del método directo propuesto por Thornthwaite (1948), el cual utiliza la información obtenida de las estaciones meteorológicas para determinar el exceso y déficit de humedad a partir del estudio de la precipitación y su relación con la necesidad de evaporación y transpiración, que constituyen un factor limitante de la vegetación (Gloria-Cogliati *et al.*, 2018).

Tabla 2.2: Ubicación de las estaciones meteorológicas dentro del municipio.

Estación	Coordenadas	Altura (m s. n. m.)	Periodo de datos
Ixtacamaxtitlán	19° 37.308'N 97° 48.876'O	2 472	1954-2016
San Antonio Arroyo Prieto	19° 32.772'N 97° 49.854'O	3 065	1980-2009
La Gloria	19° 37.197'N 97° 58.845'O	2 750	1978-1996

Fuente: Elaboración propia.

2.1.1.2. Caracterización socioeconómica

La caracterización socioeconómica se realizó a partir de la adquisición de las estadísticas e indicadores sobre datos de la población: distribución, estructura, migración, educación, vivienda y marginación; de acuerdo con las bases de datos realizadas por el INEGI mediante los Censos de Población y Vivienda 2000 y 2015 a nivel municipal y los informes del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2010) y el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2010).

Se obtuvieron estadísticas de tenencia de la tierra en el municipio a través del IX Censo Ejidal (INEGI, 2007a) para obtener información del número de ejidos y el porcentaje que representan en la superficie del territorio. Así mismo, se incluyeron datos que provienen del último censo agrícola, ganadero y forestal realizado en el país (VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal) (INEGI, 2007b), para obtener información del número de unidades de producción agrícola y la estructura agraria en la zona de estudio.

Si bien existen actualizaciones como son las encuestas agropecuarias de los años 2012, 2014, y 2017, estas son a nivel nacional, enfocadas a presentar información estadística básica sobre la producción de especies agrícolas, pecuarias y forestales más importantes para el país, por lo que la información a nivel municipal es limitada.

2.1.1.3. Indicadores complementarios

Se evaluaron indicadores biofísicos que influyen en el estado del ecosistema, así mismo se realizó una investigación bibliográfica sobre otros factores que pudieran estar contribuyendo a la degradación de las tierras en el municipio, tales como fenómenos hidrometeorológicos: sequías, granizadas, deslaves, inundaciones, heladas, ciclones y huracanes; otros desastres naturales -incendios forestales- y conflictos socioambientales.

Modelo digital de elevación

Se realizó el análisis del terreno mediante el mapa de Modelo Digital de Elevación (MDE). El MDE se generó a través de la superposición de una malla de puntos en el software Google Earth PRO © (Google, 2022) que permitió recabar la altura de cada punto. La información se procesó en el programa ArcGis 10.4 para obtener las curvas de nivel del territorio a cada 20 m, posteriormente se obtuvo un archivo *raster* del relieve del municipio donde se pueden observar las diversas condiciones del terreno.

Pendientes

Por medio del MDE realizado, se generó un mapa de pendientes en unidad de porcentaje, esta es aquella que en una distancia de 100 metros horizontales experimenta un desnivel de cierto número de metros, donde el desnivel son los metros de inclinación (subida o bajada) y la distancia horizontal son los metros recorridos de forma horizontal.

El mapa se generó a través del programa ArcGis 10.4, el cual define la pendiente como la tasa máxima de cambio de valor de altura almacenada en una celda presente en un MDE con respecto al muestreo *nearest neighbor algorithm* (Corradine & Moreno, 2017).

La determinación de la pendiente en porcentaje se realizó a través de la siguiente fórmula (Corradine & Moreno, 2017; ESRI, 2018):

$$\theta(\%) = 100 \times \frac{(h_2 - h_1)}{DH} \quad (\text{eq. 1})$$

Donde:

h1: Altura en la primera celda evaluada.

h2: Altura en la segunda celda evaluada.

DH: Distancia entre las celdas.

θ : Tasa de cambio o Pendiente.

Obtenido el mapa de pendientes, se procedió a reclasificar los rangos de pendiente de acuerdo con los que mejor representaron la situación del municipio, la interpretación de cada rango se definió con base en las interpretaciones realizadas por Oropeza-Orozco (2010) y Corradine y Moreno (2017), ya que se ajustan mejor a los rasgos del relieve observados.

Las categorías definidas fueron: llano (0-15 %), inclinado (15-30 %), fuertemente inclinado (30-45 %), empinado (45 a 60 %) y fuertemente empinado (>60 %).

Erosión Potencial Hídrica

Se estimó la pérdida potencial de suelos por erosión hídrica. El análisis de la erosión se realizó en el programa Arcgis 10.4 mediante la fórmula universal de pérdida de suelo USLE/RUSLE (Wischmeier & Smith, 1978):

$$A = R K L S \quad (\text{eq. 2})$$

Donde:

A: Pérdida de suelo ($\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

R: Erosividad de la lluvia ($\text{MJmm ha}^{-1} \text{ h}$)

K: Erodabilidad del suelo (adimensional)

L: Longitud de pendiente (adimensional)

S: Grado de pendiente (adimensional)

Erosividad de la lluvia (R)

La erosividad de la lluvia expresa la capacidad de las precipitaciones para erosionar el suelo, es decir, la energía cinética de la precipitación necesaria para remover y transportar las partículas del suelo cuando el agua excede la capacidad de infiltración del suelo, promoviendo el escurrimiento superficial. La estimación de R se realiza generalmente mediante la lectura de bandas o fajas pluviográficas que indican la energía cinética de un evento de lluvia con una intensidad máxima constante en 30 minutos (EI_{30}). Sin embargo, debido a la falta de registros pluviógrafos en muchas regiones, se utiliza el Índice Modificado de Fournier (IMF) (Arnoldus *et al.*, 1980) como herramienta de fácil acceso para determinar el factor R. El IMF se determina a partir de las precipitaciones mensuales por lo que el primer paso fue consultar la red de estaciones meteorológicas ubicadas dentro del municipio y a una distancia de 15 km o menos fuera de este (Tabla 2.3) donde se obtuvieron los registros históricos de precipitación.

Tabla 2.3: Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el Índice Modificado de Fournier

Estación	Coordenadas	Altura (m. s n m)
Ixtacamaxtitlán	19° 37.308'N, 97° 48.876'O	2 472
San Antonio Arroyo Prieto	19° 32.772'N, 97° 49.854'O	3 065
La Gloria	19° 37.197'N, 97° 58.845'O	2 750
Terrenate	19° 28.614'N, 97° 55.032'O	2 693
El Epazote	19° 34.836'N, 97° 57.498'O	2 493
Aquixtla	19° 47.736'N, 97° 56.136'O	2 189
Santiago Zautla	19° 42.864'N, 97° 40.368'O	1 978
Loma Alta	19° 49.782'N, 97° 59.586'O	2 328
San Nicolas Tetela	19° 48.936'N, 97° 48.414'O	1 782
Tlaxco	19° 35.550'N, 98° 07.536'O	2 538
Toluca de Guadalupe	19° 27.882'N, 97° 57.486'O	2 640
Altzayanca	19° 25.686'N, 97° 47.934'O	2 632
Capuluaque	19° 47.502'N, 97° 45.666'O	2 302
Libres	19° 30.018'N, 97° 45.486'O	2 744
Chignahuapan	19° 50.364'N, 98° 01.968'O	2 291

Fuente: Elaboración propia.

Con la información de la precipitación mensual obtenida de los diferentes años se obtuvo el promedio mensual de precipitación (enero a diciembre) de cada estación. En el programa Arcgis 10.4 se realizó una interpolación a través del método de *kriging* a una escala de 20 m para modelar cada uno de los meses, obteniendo una capa *raster* para cada mes; posteriormente, se realizó la suma de cada capa para obtener un *raster* de la precipitación anual.

El IMF se determinó mediante algebra de mapas aplicando la siguiente formula (Arnoldus *et al.*, 1980):

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} \quad (\text{eq. 3})$$

Donde:

IMF = Índice modificado de Fournier

Pi = Precipitación media mensual (mm)

Pt = Precipitación media anual (mm)

i = Mes

Finalmente, para obtener el factor R, el IMF se sustituyó en la siguiente ecuación (Rivera-Posada *et al.*, 2010):

$$EI_{30} = 30.4(IMF) + 28.3 \quad (\text{eq.4})$$

Donde:

EI30 = Erosividad en MJ.mm.ha⁻¹h

IMF = Índice Modificado de Fournier

Erodabilidad del suelo (K)

La erodabilidad del suelo se refiere a la vulnerabilidad inherente que tiene este a la acción del agua y depende de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Este factor requiere datos sobre porcentaje de limo, arena, arcilla y Carbono Orgánico (CO). En este sentido, a través de la Cartografía Digital del Suelo (DSM por sus siglas en inglés) (CONABIO, 2020) se obtuvieron capas *raster* de los contenidos (%) de partículas del suelo y del contenido (%) de materia orgánica (MO) a tres profundidades de suelo (0-5 cm, 5- 15 cm y 15-30 cm) y a una resolución de 1 km².

Para obtener el %CO, el contenido de %MO se dividió por el factor de conversión de Von Bemmelen (0.1724). Mediante algebra de mapas se promediaron las tres capas de profundidad por contenido (limo, arena, arcilla y CO) para obtener una única capa por propiedad que tuviera la información de los primeros 30 cm de profundidad del suelo. Posteriormente, con la herramienta *raster calculator*, los datos se sustituyeron en la siguiente ecuación (Sharpley & Williams, 1990):

$$K = (0.2 + 0.3e^{-0.0256Ar(1-Li/100)}) \times \left(\frac{Li}{Ac+Li}\right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25CO}{CO+e^{(3.72-2.95CO)}}\right) \times \left(1 - \frac{0.7Ar_1}{Ar_1+e^{(22.9Ar_1-5.51)}}\right) \quad (\text{eq. 5})$$

Donde:

Ar = % de contenido de arena

Li = % de contenido de limo

Ac = % de contenido de arcilla

CO = % de contenido de Carbono Orgánico

$$Ar_1 = (1-Ar/100)$$

Finalmente, para convertir el resultado a unidades métricas se multiplicó por el factor de conversión a 0.1317 (Wang *et al.*, 2016).

Longitud (L) y Grado (S) de pendiente.

El factor topográfico (LS) definido por la longitud y grado de pendiente, afecta la velocidad de los escurrimientos superficiales. La longitud (L) expresa la relación entre la pérdida de suelo de una pendiente con cierta longitud y la pérdida de suelo con una pendiente estándar de 22.13 m y se define como la distancia horizontal donde se origina un flujo superficial a un punto donde la escorrentía fluye a un canal definido. La longitud se obtiene mediante las siguientes ecuaciones (Foster *et al.*, 1977):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad \text{(eq. 6)}$$

$$m = \frac{F}{(1+F)} \quad \text{(eq. 7)}$$

$$F = \frac{\sin\beta/0.0896}{3(\sin\beta)^{0.8+0.56}} \quad \text{(eq. 8)}$$

Donde:

L = Longitud de pendiente

λ = Longitud de la pendiente m

m = Exponente de la longitud de la pendiente

F = Factor del ángulo de la pendiente

β = Angulo de pendiente

Con el MDE obtenido anteriormente se creó un nuevo *raster* de pendiente en grados, el cual mediante la herramienta *raster calculator* se multiplicó por 0.01745 para convertir el ángulo de grados sexagesimales a radianes y obtener el factor β .

El resultado de β se sustituyó en la ecuación 8 para determinar el factor F . Con esto, se procedió a obtener el factor m mediante la sustitución del resultado anterior (factor F) en la ecuación 7.

Sin embargo, para obtener la longitud a través de Sistemas de Información Geográfica tomando en cuenta el área de acumulación de flujo a nivel de píxel, la ecuación 6 se cambió por la fórmula propuesta por Desmet y Govers (1996) y su expresión matemática es la siguiente:

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)}+D^2)^{m+1}-A_{(i,j)}^{m+1}}{x^{m*D}m+2*(22.13)^m} \quad \text{(eq. 9)}$$

Donde:

L = longitud de la pendiente

$A_{(i,j)}$ = acumulación de flujo a nivel de píxel (celda)

D = Lado del píxel (20 m)

X = Coeficiente de forma = 1 para sistemas de píxel (celda)

m = Exponente de la longitud de la pendiente calculada con la ecuación 7.

El factor $A_{(i,j)}$ se obtuvo determinando la dirección del flujo mediante el mapa de pendiente generado con anterioridad y por medio de la herramienta *Hydrology*. Con el *raster* derivado se aplicó la herramienta *Flow accumulation*.

El Grado de pendiente (S) expresa la pérdida de suelo en un gradiente de pendiente dada y la pérdida de suelo de una pendiente con gradiente estándar del 9 %. El grado de pendiente se define como el efecto de

la inclinación de la pendiente sobre la pérdida de suelo por una unidad de área y se determina mediante la siguiente expresión matemática aplicada a Sistemas de Información Geográfica (McCool *et al.*, 1987):

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin\beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan\beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin\beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan\beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases} \quad \text{(eq. 10)}$$

Donde:

$S_{(i,j)}$ = Pendiente del factor de coordenadas (i,j)

$\beta_{(i,j)}$ = Pendiente en grados con las coordenadas (i , j)

Finalmente, por medio de la herramienta *raster calculator* se realizó la multiplicación de los cuatro factores (R, K, L, S) de acuerdo con la ecuación 1 y se obtuvo el mapa de erosión potencial hídrica del municipio expresado en toneladas por hectárea al año de pérdida de suelo de tipo laminar cuando no existe ningún tipo de cobertura vegetal.

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje proporciona orientación sobre el grado de disección del paisaje y refleja la dinámica de un área, su estabilidad y el tipo de escorrentía superficial. Esta se define como la relación entre la longitud total de los cauces y su superficie (km/km²), su expresión matemática es:

$$Dd = \frac{Le}{A} \quad \text{(eq. 11)}$$

Donde:

Dd = Densidad de drenaje

Le = Longitud total de los escurrimientos (km)

A = Área (km²).

La longitud de los escurrimientos se determinó a través de la capa de hidrología del municipio realizando la sumatoria de la longitud de cada escurrimiento presente y dividiendo entre el área total del municipio para obtener un valor general de la Dd del territorio municipal.

Por otro lado, a la capa de escurrimientos se le aplicó la herramienta *density* para obtener el mapa de Dd y localizar las superficies en donde se presenta una mayor densidad de escurrimientos.

2.1.2. Metodología con base en los objetivos

Se estableció una metodología que responde a cada uno de los objetivos del presente estudio (**Figura 2.1**) y que tuvo la finalidad de establecer las bases de referencia para la evaluación de la NDT, así como establecer y evaluar las tendencias de degradación de tierras (O.1).

Evaluar el funcionamiento de los diversos manejos forestales realizados dentro del municipio y las tendencias de recuperación y restauración de las tierras que se presentó en cada uno de ellos (O.2).

Y, finalmente, determinar los factores directos e indirectos causantes de la degradación, los impactos y sus interrelaciones, mediante un modelo conceptual y un enfoque participativo (O.3), para determinar con toda la información obtenida la planeación hacia la neutralidad.

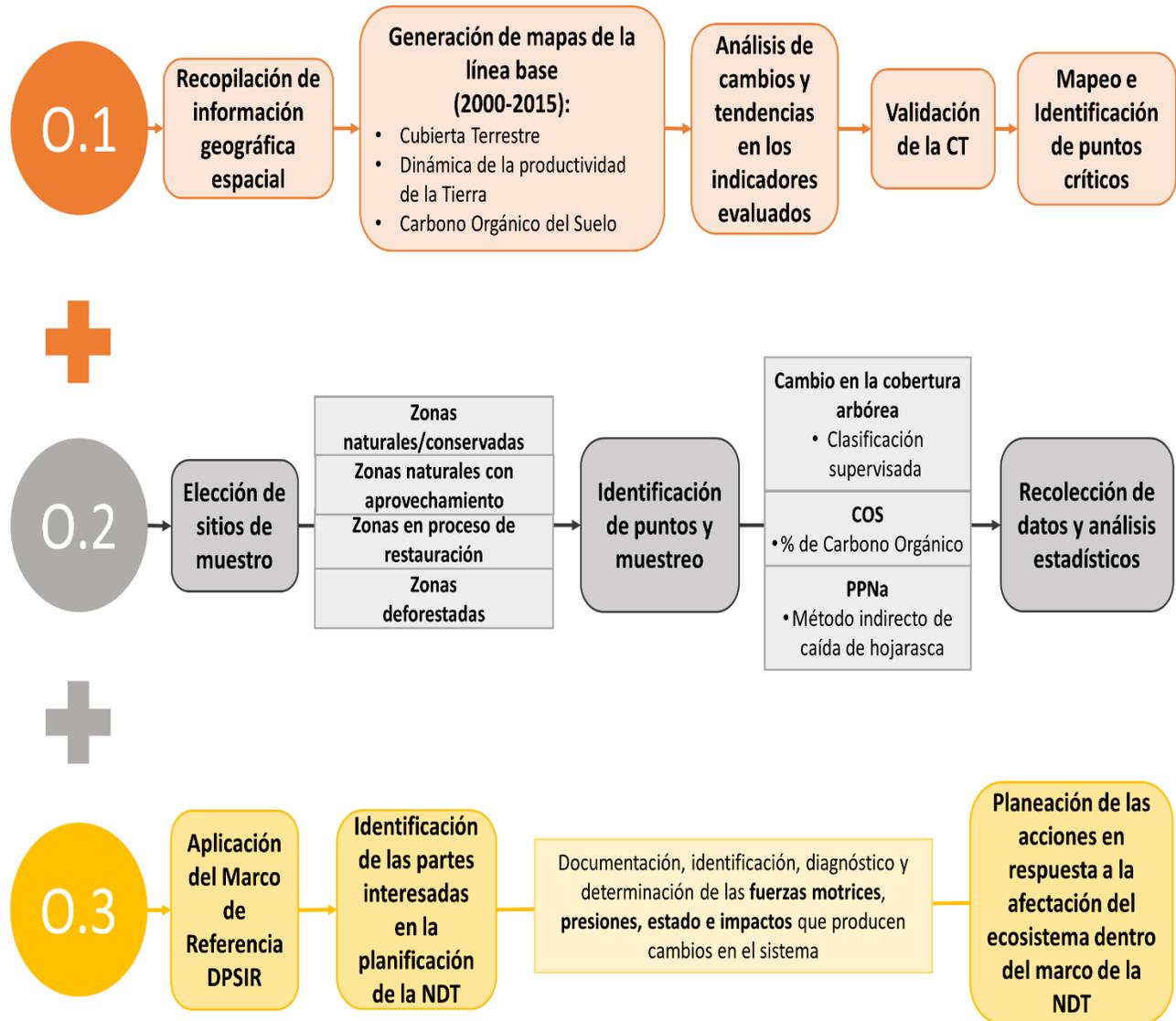


Figura 2.1: Diagrama metodológico de acuerdo con los objetivos de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2.1.01. Generación de la línea base y determinación de las tendencias de degradación

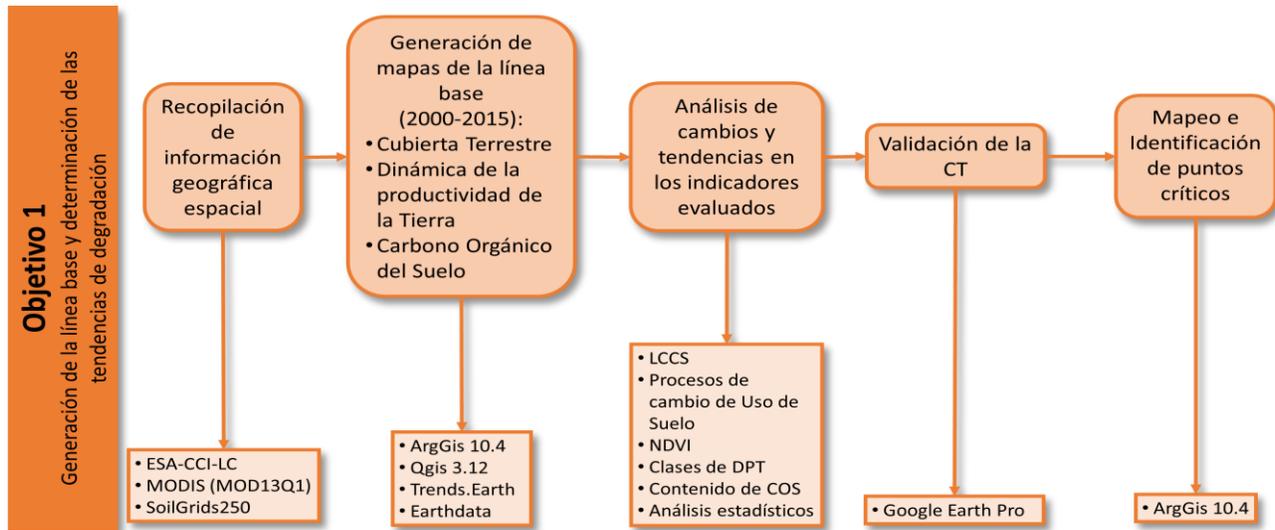


Figura 2.2: Diagrama metodológico del objetivo 1.
Fuente: Elaboración propia.

En consonancia con la adopción de los ODS en 2015, el periodo de referencia es por defecto un tiempo de análisis de 10-15 años (Orr *et al.*, 2017), en este sentido para generar la línea base se tomaron los datos de cada uno de los indicadores para el periodo 2000 al 2015.

Los indicadores fueron calculados utilizando fuentes de datos globales ya que permite utilizar métodos coherentes con las capacidades, recursos y disponibilidad de datos, además de facilitar la comparabilidad a nivel global (CONAF, 2017). Los conjuntos de datos han sido provistos y recomendados por la UNCCD (2018) para el seguimiento y evaluación de la DT (Sims *et al.*, 2019).

En la **Figura 2.2** se muestran los pasos a seguir para el logro de este objetivo y se describen a continuación:

Recopilación de información geográfica espacial.

Para determinar la cubierta terrestre del municipio de Ixtacamaxtitlán se utilizaron los datos prefijados que ofrecen los Programas en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA, según sus siglas en inglés), el Centro Común de Investigación (CCI) de la Comisión Europea y el Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos (ISRIC), este conjunto de datos se utiliza como recurso por defecto para obtener información sobre la cubierta de la tierra y se encuentra disponible desde 1992 hasta 2015 a una resolución espacial de 300 m (UNCCD, 2016a).

La información de estos mapas se produjo por ESA-CCI-LC a partir del reprocesamiento e interpretación de datos satelitales de resolución moderada como la Transmisión de Imágenes de Alta Resolución con Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (HRPT AVHRR-NOAA), el Espectrómetro de Imágenes de Resolución Media (MERIS) del Envisat, el Radar de Apertura Sintética Avanzada (ASAR) del Envisat, el Satellite Pour l'Observation de la Terre Vegetation (SPOT VGT) y Proba-V (Defourny *et al.*, 2017; Gichenje & Godinho, 2019; UNCCD, 2018).

Para el cálculo de Dinámica de la productividad de la tierra se utilizó el conjunto de datos del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada de Terra (MODIS, MOD13Q1) (Didan *et al.*, 2015), el cual es una serie temporal de imágenes generadas a intervalos de 16 días e integradas anualmente a una resolución espacial de 250 m. Los datos se encuentran disponibles desde el año 2000 a 2019 (23 datos por año). MOD13Q1 proporciona una capa del Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) y se deriva del Radiómetro de Muy Alta Resolución Avanzado (NOAA-AVHRR) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).

El NDVI se calcula a partir de la reflectancia en las secciones del rojo (RED) e infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético (Rouse *et al.*, 1974). El índice es adimensional y sus valores van de -1 a +1 donde el valor más alto indica mayor abundancia, densidad o salud de la vegetación (Baskan *et al.*, 2017).

Su expresión matemática es:

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (\text{eq. 12})$$

Donde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

NIR = Luz infrarroja cercana

Red = Luz roja visible.

La estimación del contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS), se obtuvo a través de la cobertura SoilGrids desarrollada por la International Soil Reference Information Center (ISRIC). SoilGrids250 es una capa *raster* mundial con una resolución espacial de 250 m y estima el stock de COS en toneladas por hectárea. Esta fuente de datos compila un gran número de observaciones locales de aproximadamente 150 000 perfiles de suelos y otras fuentes de información especializada que funcionan como covariables obtenidas de forma remota para la estimación del COS hasta los 30 cm de profundidad del suelo (Hengl *et al.*, 2017). La capa predice las reservas de carbono existentes tomando en cuenta información de la densidad aparente, la fracción de grava y la profundidad del suelo hasta la roca firme, además modeliza la relación entre los perfiles de suelos y 158 covariables (CONAF, 2017).

Generación de mapas de la línea base.

Los mapas anuales de Cubierta Terrestre (2000-2015) se obtuvieron directamente desde la página de la Universidad Católica de Lovaina, Instituto de la Tierra y la Vida, Iniciativa contra el Cambio Climático (UCLouvain, 2017).

Los datos de NDVI de 2001 a 2015 y los de COS de 2000 a 2015 se obtuvieron a través del complemento Trends.Earth (Conservation International, 2018) para el programa QGIS 3.12. El NDVI anual del año 2000 se determinó a partir de la obtención 20 mapas descargados del servidor Earthdata de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) (USAGov, 2019). Los cuales fueron procesados para determinar su media y obtener la cobertura anual de NDVI para el año en cuestión.

A partir de las bases de datos obtenidas para cada uno de los indicadores (16 mapas por indicador), se realizaron los procesos correspondientes de conversión a los formatos compatibles del programa ArcGIS10.4, reproyección al sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) zona 14N, reclasificación, y ajuste y empate de celdas.

Análisis de cambios y tendencias en los indicadores evaluados.

Se realizaron los mapas de Cubierta Terrestre, contenido de Carbono Orgánico del Suelo y cobertura de NDVI del año inicial y final del periodo de estudio; el mapa Dinámica de la Productividad de la Tierra para el año 2015 y los mapas de los cambios producidos en el tiempo, esto por medio de los programas ArcGis 10.4 y QGis 3.12.

Cubierta terrestre (CT)

La clasificación de la cubierta de la tierra que se utilizó fue la de Sistemas de Clasificación de la Cubierta de la Tierra de la FAO (LCCS, por sus siglas en inglés) (Di Gregorio, 2016), la cual cuenta con 22 categorías que funcionan para todo el planeta y se alinearon con las 7 categorías de uso de las tierras recomendadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2003) y la UNCCD (2018). Se obtuvo el tamaño en km² de cada una de las categorías por año y se determinaron las pérdidas y ganancias (tendencias) de cada una de éstas a través del tiempo.

Con los mapas de inicio y el final del periodo de estudio se realizó una superposición de capas y algebra de mapas, asignando a cada categoría presentada en la zona un valor para el año 2000 y uno para el 2015 (**Tabla 2.4**). Se obtuvo un número de dos dígitos, en donde el primer dígito representa el código de la categoría de CT para el año 2000 y el segundo dígito representa el código de la categoría de CT para el año 2015. Por medio de una tabulación cruzada se determinaron los valores finales que representan cambios en la CT (2000-2015). Se elaboró el mapa de la distribución de esos cambios, así como un mapa de flujos. Los flujos identifican las pérdidas y ganancias de cada categoría de CT (UNCCD, 2018).

Tabla 2.4: Asignación de valores y tabulación cruzada para determinación de cambios en CT (2000-2015).

Valor asignado a 2000	Valor asignado a 2015	1	2	3	5
		Superficies arboladas	Pastizales	Tierras de cultivo	Superficies artificiales
10	Superficies arboladas	11	12	13	15
20	Pastizales	21	22	23	25
30	Tierras de cultivo	31	32	33	35
50	Superficies artificiales	51	52	53	55

Fuente: Elaboración propia.

Dinámica de la Productividad de la Tierra (DPT)

Se obtuvieron los mapas anuales de NDVI del periodo 2000 a 2015 en formato *raster*, en donde cada celda de 250 m presentaba un valor de NDVI. El valor se mostraba como valor de NDVI integrado (NDVI * 10 000), por lo que para determinar el valor exacto se dividió cada *raster* (2000-2015) entre 10 000 unidades mediante algebra de mapas en el programa ArcGis 10.4. Con estos valores, se realizó el promedio del total de celdas del territorio municipal con el propósito de obtener el valor de NDVI promedio anual y determinar su tendencia a lo largo del periodo de estudio. Posteriormente, con base en la información de la cobertura de NDVI (2000 y 2015), se realizó una clasificación de los valores para cada mapa. Esta clasificación corresponde a escalas de densidad y abundancia de la vegetación (Baskan *et al.*, 2017; Dogan, 2014) y fue adaptada de CONAF (2017) (**Tabla 2.5**).

Clase	Rango
Sin datos	< 0.18
Muy Débil	0.18 – 0.40
Débil	0.40 – 0.63
Moderada	0.63 – 0.80
Intensiva	> 0.80

Fuente: Elaboración propia adaptado de CONAF (2017).

Para obtener el mapa de la distribución espacial de los cambios en NDVI, se realizó una superposición de capas de los mapas procesados y clasificados del año 2000 y 2015. Los cambios fueron considerados positivos o negativos de acuerdo con el paso de una clase de NDVI a otra de mayor o menor rango, respectivamente. Se determinó el área para cada clase y año y se detectaron los cambios (km² y %) que se presentaron entre el año 2000 y 2015, así mismo se determinó si la tendencia de estos cambios fue positiva o negativa (+/-).

La DPT describe las variaciones en la tasa, porcentaje de vegetación y tiempo de producción de la biomasa con relación a su máximo potencial del rango de NDVI y a su estratificación con la CT (Baskan *et al.*, 2017; CONAF, 2017) y se categoriza en 5 clases cualitativas (**Tabla 2.6**) (Retiere *et al.*, 2015).

Valor	Clases
1	En declinación
2	Primeros signos de declinación
3	Estable pero estresada
4	Estable, no estresada
5	Creciente

Fuente: (Baskan *et al.*, 2017; Retiere *et al.*, 2015).

El mapa de distribución de DPT se realizó a partir de una matriz de doble entrada con las clases de NDVI anteriormente determinadas y las categorías de CT del año 2015, en las que a cada categoría de CT que permaneció sin cambios en el periodo de estudio y de acuerdo con el rango de NDVI que presentó, les fue asignada una clasificación de DPT con base en los criterios de la **Tabla 2.7** (Baskan *et al.*, 2017).

	En declinación	Primeros signos de declinación	Estable pero estresada	Estable no estresada	Creciente
Superficies arboladas			Muy débil	Débil y moderada	Intensiva
Pastizales		Muy débil	Débil y moderada	Intensiva	
Tierras de cultivo	Muy débil	Débil y moderada	Intensiva		
Superficies artificiales	Muy débil, débil, moderada e intensiva				

Fuente: Elaboración propia modificado de Baskan *et al.*, (2017).

De la misma forma, a cada cambio en la CT que se presentó en el periodo de estudio se le asignó una categoría de DPT, la cual depende de su clasificación de NDVI. La clasificación fue asignada de acuerdo con los criterios de la **Tabla 2.8** (Baskan *et al.*, 2017).

Mediante el mismo proceso que se empleó para el cambio en la CT, se determinó la superficie de cada clase de DPT asignada a cada categoría de CT y cambio de CT.

Tabla 2.8: Asignación de Clases de DPT de acuerdo con el cambio en la categoría de CT.

2015 2000	Superficies Arboladas	Pastizales	Tierras de cultivo	Superficies artificiales
Superficies Arboladas	Véase Tabla 2.7	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiva: Estable, no estresada • Moderada: Estable pero estresada • Débil y muy débil: Primeros signos de declinación 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiva: Estable pero estresada • Moderada: Primeros signos de declinación • Débil y muy débil: En declinación 	Todas las categorías de DPT: En declinación
Pastizales	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiva y moderada: Creciente • Débil: Estable no estresada • Muy débil: Estable pero estresada 	Véase Tabla 2.7	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiva: Estable pero estresada • Moderada y débil: Primeros signos de declinación • Muy débil: En declinación 	Todas las categorías de DPT: En declinación
Tierras de cultivo	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiva y moderada: Creciente • Débil: Estable no estresada • Muy débil: Estable pero estresada 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiva: Creciente • Moderada: Estable, no estresada • Débil: Estable pero estresada • Muy débil: Primeros signos de declinación 	Véase Tabla 2.7	Todas las categorías de DPT: En declinación
Superficies artificiales	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiva y moderada: Creciente • Débil: Estable no estresada • Muy débil: Estable, pero estresada 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiva y moderada: Creciente • Débil: Estable pero estresada • Muy débil: Primeros signos de declinación 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiva y moderada: Estable pero estresada • Débil: Primeros signos de declinación • Muy débil: En declinación 	Véase Tabla 2.7

Fuente: Elaboración propia con información de Baskan *et al.*, (2017).

Carbono Orgánico del Suelo (COS)

A partir de la cobertura mundial de SoilGrids, se obtuvieron los mapas anuales de COS del periodo 2000 a 2015 en formato *raster*. Los mapas presentan un tamaño de celda de 300 m, por lo que fueron procesados y ajustados al tamaño de celda de 250 m, en donde cada celda representa un valor de contenido de COS. Con los 16 mapas procesados, se determinó el promedio anual del contenido de COS para el territorio municipal y su tendencia en el periodo de 2000 a 2015. Así mismo se obtuvo la distribución espacial del contenido de COS para el año de inicio y final del periodo.

Posteriormente, con base en la categorización de CT y la determinación de los cambios de cobertura, se determinó el promedio de las reservas de COS por categoría, así como la pérdida de carbono asociada a los cambios negativos en la cubierta terrestre.

Con la información de cobertura de COS, se realizó una superposición de capas (2000 y 2015) para obtener la distribución espacial de los cambios presentes en el territorio municipal y conocer el área (km²) que abarcan dichos cambios. El criterio para determinar los cambios como positivos o negativos fue el aumento o disminución, respectivamente, de concentración de COS entre el año inicial y final del periodo objeto de estudio. Sin embargo, para identificar un cambio como significativo, se calcularon las diferencias relativas en COS, es decir, las zonas que experimentaron pérdidas de COS del 10 % o más se consideraron como degradación, mientras las que experimentaron una ganancia del 10 % se consideraron como mejora (Conservation International, 2018).

Adicionalmente, se clasificó el contenido de COS en el municipio de Ixtacamaxtitlán de acuerdo con los criterios de Vela-Correa *et al.* (2012) (**Tabla 2.9**) y se determinó la superficie a la que pertenece cada clase.

Tabla 2.9: Clasificación del contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS).

Clase	Contenido de COS (t ha ⁻¹)
Bajo	< 50
Medio	50 – 100
Alto	100 – 150
Muy alto	> 150

Fuente: Vela et al. (2012).

Análisis estadísticos

Los valores medios de NDVI anuales y la concentración media de COS de 2000 y 2015 se compararon con un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas ($p < 0.05$) en la NDVI y el COS entre esos años. Los análisis estadísticos se realizaron con el software Minitab.

Validación de la Cubierta Terrestre

Para conocer la precisión en el mapa de CT del año 2015, este se verificó por medio de la generación de una malla sistemática de puntos de control con la herramienta *Create fishnet* del programa ArcGis 10.4 (Emanueli *et al.*, 2017), con la finalidad de conocer la confiabilidad e incertidumbre del conjunto de datos utilizado.

Los puntos de control se encontraban distribuidos de manera equidistante uno de otro a 1000 m de separación y cada uno de ellos fue verificado mediante fotointerpretación a través de la herramienta Google Earth Pro® con una imagen satelital del mismo año (2015). Posterior al análisis individual de los puntos, se clasificó y registró la categoría de CT que le correspondía a cada punto de la malla. Con la validación de los puntos se realizó una intersección entre la malla y el mapa de CT 2015 para determinar el acierto o desacierto de los puntos de control y establecer su precisión.

Mapeo e identificación de puntos críticos.

Finalmente, como resultado de la evaluación de los procesos de cambio producidos sobre la superficie del territorio se obtuvo el mapa final de puntos críticos de degradación. En los indicadores de CT y COS, se clasificaron como “degradación” los cambios negativos, como “mejora” los cambios positivos y como “estable” las áreas que no presentaron ningún tipo de transformación (UNCCD, 2018). En el caso de la DPT,

se establecieron como degradación las áreas de tierras de cultivo y superficies artificiales con una DPT en declive; las áreas de pastizales con primeros signos de degradación y las áreas de superficies arboladas con una DPT considerada como estable, pero estresada. Posteriormente, se realizó una intersección con los mapas de cambios de los tres indicadores para obtener un mapa final de proporción de tierra degradada y reconocer las áreas donde se presentó la degradación.

Con base en el marco científico conceptual de la NDT (Cowie *et al.*, 2018), un área se considera como en proceso de degradación si por lo menos uno de los tres indicadores evaluados presenta un cambio negativo; tomando en cuenta el principio “uno fuera, todos fuera” el cual es aplicado como una medida para reconocer y prevenir la degradación en ciertas áreas. Dicho principio se considera de esta manera ya que la mejora o estabilidad en alguno de los tres indicadores no puede compensar la degradación en otro indicador (Orr *et al.*, 2017; UNCCD, 2018).

Finalmente, el porcentaje de las áreas identificadas como degradación, mejora o estabilidad, definieron el objetivo de neutralidad para su posterior comparación al año 2030.

2.1.2.2. O2: Evaluación de indicadores bajo distintos escenarios.

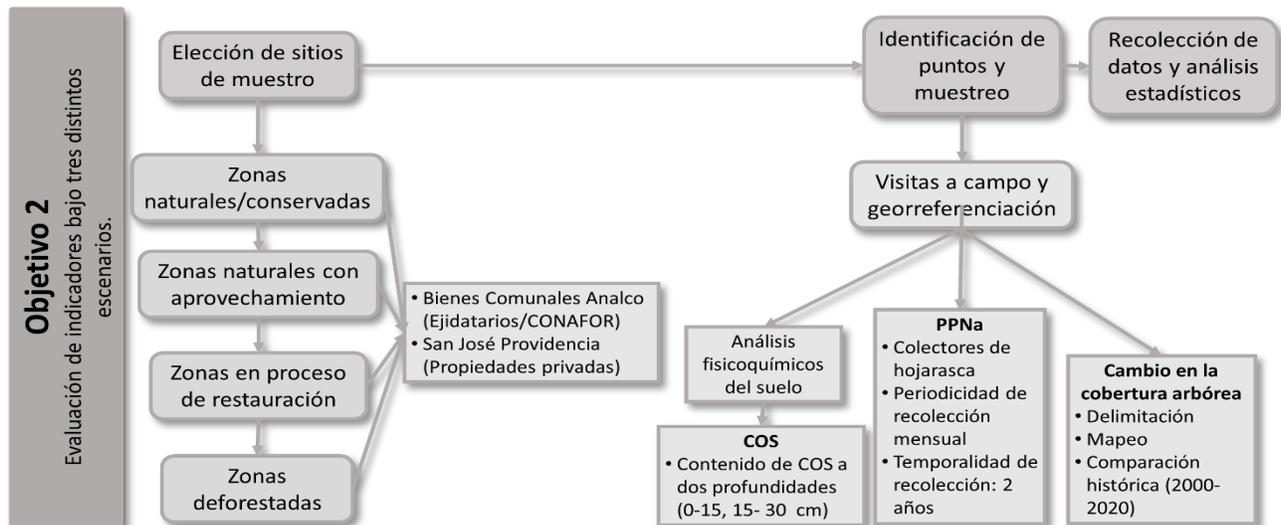


Figura 2.3: Diagrama metodológico del objetivo 2.

Fuente: Elaboración propia.

Se evaluaron los indicadores de: Productividad Primaria Neta aérea (PPNa), contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS) y cambio en la cobertura arbórea en los diferentes manejos forestales delimitados (Figura 2.3).

Elección de sitios de muestreo.

Se realizaron recorridos a campo para reconocer el municipio e identificar áreas de interés (Figura 2.4), así mismo se realizó una investigación con diversos actores sociales e instancias gubernamentales como CONAFOR. Con esto, se obtuvo información sobre ejidos y predios en el municipio que han participado en programas de reforestación o han sido de iniciativa privada. Así mismo, se tomó en cuenta la ubicación de los predios y la facilidad de contacto con los encargados. Con esta base, se eligieron los Bienes Comunales de Analco y la localidad de San José Providencia.

Los indicadores fueron determinados en estos dos sitios, los cuales están distribuidos en partes representativas del municipio y cuentan con distintos escenarios: zonas primarias/naturales, zonas con aprovechamiento, zonas en proceso de restauración y zonas deforestadas.

Los escenarios de zonas naturales y zonas deforestadas se determinaron por medio de los recorridos a campo; se seleccionaron privilegiando el acceso y tomando en cuenta que las condiciones naturales de relieve, geología, edafología y clima fueran similares a las zonas en proceso de restauración y aprovechamiento.

Dentro de los dos sitios se establecieron nueve zonas, cinco zonas en los Bienes Comunales de Analco y cuatro zonas en la localidad de San José Providencia, las cuales se delimitaron por medio de un GPS y con la información de “Tierras de Uso Común”, obtenidas a través del Registro Agrario Nacional (RAN, 2018). Los datos adquiridos fueron incorporados a la plataforma Google Earth Pro donde se rectificaron los puntos y se formaron los polígonos de los sitios y las zonas de muestreo, posteriormente fueron exportadas al programa ArcGis 10.4 para su manejo y análisis.

Para conocer mejor la historia de la deforestación y/o forestación de las zonas de estudio y tener mejor contexto de la situación, se realizaron nueve cuestionarios a actores sociales clave (**ANEXO 1**).



Figura 2.4: Identificación de áreas de interés.

(a) Zona reforestada en el ejido de Analco **(b)** Bosque conservado en el ejido de Analco **(c)** Zona reforestada en San José Providencia.

Fuente: Elaboración propia.

Identificación de puntos y muestreo.

Dentro de cada una de las nueve zonas elegidas y delimitadas se establecieron tres puntos de muestreo. Estos puntos se eligieron considerando el total de la parcela, el primero se colocó al centro y los otros dos donde hubiera mayor vegetación representativa de la parcela y a aproximadamente 20 m del punto central, alejados de las orillas para evitar efecto de borde. Cada uno de estos puntos se georreferenció y posteriormente se extrajeron muestras de suelo por medio de una barrena a dos profundidades de 0 a 15 cm y de 15 a 30 cm (N=54), se determinó la densidad aparente y se colocaron los colectores de hojarasca para la determinación de la producción de hojarasca.

Las muestras de suelo recolectadas con la barrena se introdujeron en bolsas de plástico, se rotularon y se trasladaron al Laboratorio del Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, BUAP, donde se procedió a secarlas a temperatura ambiente y posteriormente se tamizaron en malla de 2 mm.

Análisis fisicoquímicos del suelo

La densidad aparente (DA) del suelo se evaluó *in situ* en muestras no alteradas de suelo mediante el método del cilindro propuesto por Blake y Hartge (1986) utilizando cilindros de 10 cm de altura y 6 cm de diámetro.

De cada una de las muestras de suelo se determinó el pH mediante el Método AS-02 (NOM-021-RECNAT-2000, 2002), la conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$) a través de un conductímetro en una disolución acuosa suelo:agua 1:5 y el porcentaje de materia orgánica (MO) por medio del método volumétrico de combustión húmeda propuesto por Walkley y Black (AS-07 de la NOM-021-RECNAT-2000, 2002).

Contenido de Carbono Orgánico del Suelo

El contenido de COS se calculó con base en la siguiente ecuación (Paz-Pellat & Ortiz-Solorio, 2019):

$$COS = (DA)(p)(COSp) \left(1 - \frac{FG}{100}\right) \quad (\text{eq. 13})$$

Dónde:

COS = Carbono en suelo (tC ha^{-1})

DA = Densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

COSp = Concentración de carbono (%)

FG = Porcentaje de la masa de fragmentos gruesos ($> 2 \text{ mm}$)

P = Profundidad de muestreo (cm).

Productividad Primaria

La PPN en áreas con vegetación arbórea se determinó a través del método indirecto de caída de hojarasca, lo que representa la producción primaria aérea. Este método se utilizó ya que no requiere la destrucción del material bajo evaluación y permite el análisis estadístico de los resultados obtenidos (Salas & Infante, 2006). Se distribuyeron colectores hojarasca los cuales fueron circulares para minimizar los efectos de borde. Los colectores se hicieron con tela de malla fina para evitar la acumulación de agua y tuvieron una superficie de 1 m^2 .

La determinación de la productividad primaria en las zonas deforestadas se realizó mediante la colocación de aros de poliducto anclados al suelo con una superficie de 1 m^2 . La fitomasa en pie se obtuvo mediante el corte de la vegetación dentro del aro y a un centímetro de altura sobre el suelo.

La temporalidad de recolección fue de dos periodos anuales (abril 2019-marzo 2020 y mayo 2020-abril 2021). El primer año la periodicidad de muestreo fue semestral y el segundo año fue mensual. La hojarasca y la fitomasa se separaron por componentes (hojas, ramas y troncos, estructuras reproductivas, vegetación asociada y restos no identificados) en bolsas de papel debidamente etiquetadas y, posteriormente, secadas a 65° durante 24 horas o hasta peso constante seco, medido con una balanza de precisión. Los resultados se expresaron en gramos de materia seca por área de colector y por periodo de muestreo ($\text{g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$).

Cobertura arbórea

El cambio en la cobertura arbórea de los sitios de muestreo se conoció mediante el análisis de los Mapas Globales de Alta Resolución del Cambio de la Cubierta Forestal (Hansen *et al.*, 2013) del año de inicio del presente estudio (2000) y el año de muestreo final de los dos indicadores anteriores evaluados *in situ* (2020).

El análisis se llevó a cabo con el uso del mapa de porcentaje de cobertura arbórea del año 2000, el cual evalúa la cobertura de las copas de los árboles, definida como el cierre del dosel de toda la vegetación de más de 5 m de altura y está codificado como el porcentaje por celda (30x30 m) de la cuadrícula de salida, en el rango 0-100. Así mismo, se utilizaron dos imágenes satelitales de los años 2000 y 2020, las cuales son imágenes compuestas y sin nubes de Landsat 7 (2000) y Landsat 8 (2020). El mapa y las imágenes se obtuvieron por medio del Laboratorio de Análisis y Descubrimiento Global de la Tierra (GLAD, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Maryland (Hansen *et al.*, 2021).

Debido a que no se encontraban disponibles datos del porcentaje de cobertura arbórea para el año 2020, el primer paso fue la creación de una firma espectral a partir de la clasificación de los valores de porcentaje de cobertura arbórea del año 2000 y la imagen satelital del mismo año. Esta firma espectral crea una descripción estadística de las clases que se derivaron de las muestras identificadas en el *ráster* de entrada (Imagen satelital año 2000) y los datos de muestra de la entidad (Mapa de porcentaje de cobertura arbórea año 2000). Posteriormente, la firma espectral fue utilizada para realizar una clasificación supervisada sobre la imagen satelital del año 2020. El resultado fue la creación de dos mapas (2000 y 2020) que indican el porcentaje de cobertura arbórea en celdas de 30x30 m.

Para conocer el cambio en las zonas de estudio, se realizó una malla de puntos de 4x5 a una equidistancia de 30 m. Finalmente se obtuvieron los valores de cada punto por zona (N=20x9) y por mapa (2000 y 2020).

Análisis estadísticos.

Se determinaron diferencias significativas entre los parámetros fisicoquímicos del suelo, el contenido de carbono orgánico del suelo, la producción de hojarasca y el porcentaje de cobertura arbórea y su cambio en el tiempo (2000 y 2020) entre los diferentes escenarios establecidos.

Se realizaron pruebas de normalidad y análisis de medias (ANOM) para determinar las diferencias entre las medias de los escenarios evaluados frente a la media general ($p < 0.05$). Posteriormente, se analizaron las diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los escenarios; para los datos que cumplieron la normalidad se utilizó la prueba estadística ANOVA de un factor ($p < 0.05$), mientras que para los datos que no cumplieron se utilizó la prueba estadística de Kruskal Wallis.

Una vez que se determinó la existencia de las diferencias significativas entre las medias, se realizó una prueba post-hoc a través del método de Mínima Diferencia Significativa (LSD, por sus siglas en inglés) de Fisher para determinar en cuál de los manejos existen estas diferencias ($p < 0.05$). Este método fue utilizado debido a su sensibilidad ante un número de comparaciones pequeñas. Para los datos anormales se realizó una prueba de Mann Whitney. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa estadístico Minitab 2019.

2.1.2.3. O3: Identificación y análisis de los factores que causan la degradación.

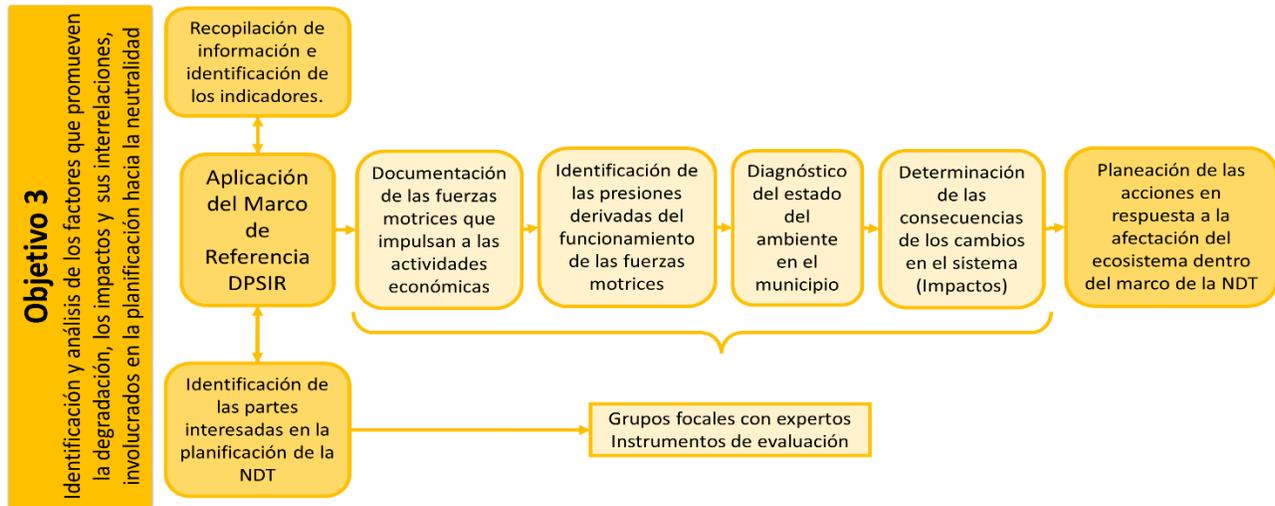


Figura 2.5: Diagrama metodológico del objetivo 3.

Fuente: Elaboración propia.

Después de haber determinado y cuantificado el estado y tendencias de la degradación de tierras mediante los indicadores marco de la NDT, se realizó el análisis de la información obtenida en la caracterización socioambiental y la de los indicadores complementarios, con la finalidad de identificar y seleccionar los factores que se relacionan con el proceso de degradación. Los factores se analizaron y ubicaron dentro de los componentes del Marco de referencia DPSIR, el cual ofrece una estructura dentro de la cual considerar los vínculos entre los drivers, las presiones, el estado y sus efectos sobre los bienes y servicios ecosistémicos (Orr *et al.*, 2017) (Figura 2.5).

Identificación de actores sociales.

La identificación de los actores sociales resulta de gran importancia para la planeación hacia la Neutralidad, por lo que el primer paso fue recopilar información sobre la población en la zona de estudio, organizaciones de la sociedad civil, autoridades de gobierno, instituciones y expertos.

El contacto con los actores sociales que participaron en el proceso se realizó por medio de la técnica de muestreo no probabilístico intencional en donde se contactó con expertos en el tema y autoridades de diversos órdenes de gobierno, quienes brindaron información sobre los pobladores en la zona de estudio que pudieran participar en el proceso. Posteriormente, se realizó un muestreo no probabilístico de bola de nueve con actores sociales quienes identificaron a otros actores sociales con las características necesarias para incluirse en el estudio de acuerdo con los objetivos que alcanza la investigación.

Identificación de los indicadores

Varios tipos de actividades humanas y causas naturales pueden llevar a la degradación de las tierras, las cuales normalmente son el resultado de una compleja interacción entre diferentes tipos de factores. Los factores se determinaron y seleccionaron mediante el análisis de la información regional y local anteriormente recopilada.

Una de las bondades del marco de referencia DPSIR es que es posible iniciar la construcción del modelo desde de cualquiera de sus componentes (Drivers, Presiones, Estados, Impactos y Respuestas), por lo que, el primer paso fue cuantificar las zonas degradadas y las tendencias de esta degradación a partir de la información recopilada en la línea base (O.1), la cual junto con la investigación de otros indicadores proporcionó la información del componente Estado(E) del modelo, es decir, el diagnóstico actual del municipio de cada uno de los tres indicadores globales de la NDT y los indicadores complementarios.

Los Drivers(D) que impulsan a las actividades económicas y las Presiones(P) derivadas del funcionamiento de los Drivers(D), son entendidas dentro del programa de la NDT como factores indirectos y directos de la degradación respectivamente, y se propone su definición de acuerdo con la Reseña Mundial de Enfoques y Tecnologías de la Conservación (WOCAT, 2011) (**Tabla 2.10**), por lo que se determinaron los factores indirectos(D) de la degradación a nivel local, municipal y estatal; estos incluyen circunstancias demográficas, económicas y sociopolíticas (UNCCD, 2016a) y factores directos(P), vinculados directamente al sistema del uso de la tierra a nivel municipal. El efecto de los Drivers(D), Presiones(P) y Estado(E) en la tierra, son consecuencias de los cambios en el ambiente, es decir, son Impactos(I) en el ecosistema que afectan directamente a los bienes y servicios ecosistémicos y a la sociedad en general. Los impactos se determinaron con base en el Marco Conceptual de la NDT (Orr *et al.*, 2017).

Para el componente Respuesta(R), se realizó una revisión documental de las políticas públicas vigentes en el periodo de estudio a nivel municipal, estatal, regional y nacional con la finalidad de localizar las acciones (Respuestas) que se han realizado dentro del municipio y que tienen por objetivo disminuir la afectación al ecosistema y a la sociedad. Así mismo se tomaron en cuenta las acciones que han instaurado de forma interna en las localidades de la presente investigación determinadas en el O.2 (Gichenje, Muñoz-Rojas, *et al.*, 2019).

Tabla 2.10: Principales factores directos e indirectos de la degradación de las tierras.

Factores indirectos de la DT (Fuerzas motrices)	Factores directos de la DT (Presiones)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presión demográfica ▪ Titularidad de la tierra ▪ Pobreza/riqueza ▪ Disponibilidad de mano de obra ▪ Aportaciones e infraestructura (incluido el acceso a crédito/financiación) ▪ Educación, acceso al conocimiento y servicios de apoyo ▪ Guerras y conflictos ▪ Gobernanza, sistemas institucionales y políticas (incluidos los impuestos, subsidios e incentivos) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ordenación inadecuada del suelo ▪ Ordenación inadecuada de los cultivos anuales, perennes, de matorrales y arbóreos ▪ Deforestación y eliminación de la vegetación natural ▪ Sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico ▪ Sobrepastoreo ▪ Actividades industriales, depósito de residuos y minería ▪ Urbanización y desarrollo de infraestructuras ▪ Descargas ▪ Liberación de contaminantes atmosféricos ▪ Perturbación del ciclo de agua ▪ Extracción excesiva de agua

Fuente: Elaboración propia con base en Orr *et al.* (2017).

Aplicación del marco DPSIR

Después de haber obtenido el listado preliminar de los indicadores enmarcados como factores dentro del modelo DPSIR, se contactó a un grupo de expertos con la finalidad de seleccionar los factores más relevantes de acuerdo con la influencia que presentan en la degradación de tierras en el municipio de Ixtacamaxitlán. En este sentido, se aplicó un cuestionario a los expertos (**ANEXO 2**), en donde a partir del listado preliminar, se realizó una depuración de los factores más relevantes en el proceso de degradación de tierras en el municipio.

El método para realizar la selección de los factores relevantes se basó en la técnica de los mil puntos (Point Rating) (Díaz-Martín, 2015; Lott, 1926). Este método se fundamenta en la asignación de valores numéricos a cada factor, los cuales se suman para obtener un valor total por componente del modelo. En este sentido, se proveyó de una rúbrica a los expertos en la que pudieron guiarse para calificar la relevancia del factor asignando un valor de 0 a 10 (**Tabla 2.11**).

Tabla 2.11: Rúbrica para evaluar la relevancia de los factores	
Escala numérica	Escala verbal
0-1	No relevante
2-3	Poca relevancia
4-5	Clara relevancia
6-7	Fuerte relevancia
8-10	Extrema relevancia

Fuente: Elaboración propia con base en Díaz-Martín, (2015).

Posteriormente, se seleccionaron los valores numéricos de los factores de mayor a menor cuya suma representara el 50 % del valor total de relevancia por componente. En caso de que el valor del último factor considerado haya sobrepasado el 50 %, este se tomó en cuenta para la siguiente etapa, así mismo, si dentro del límite existieron dos factores con el mismo valor se incluyeron ambos.

Para determinar la relevancia de las interacciones entre los factores de los componentes del DPSIR se realizó una matriz de correlación (**ANEXO 3**), en donde el experto determinó, mediante una escala numérica, la relevancia causa-efecto entre (D) y (P), (P) Y (E), (E) sobre (I) y el efecto de las respuestas ante los demás componentes (**Tabla 2.12**).

Tabla 2.12: Rúbrica para evaluar la relación causa-efecto de los factores	
Escala numérica	Escala verbal
0-1	No hay relación causa-efecto
3	Poca relación causa-efecto
5	Clara relación causa-efecto
7	Fuerte relación causa-efecto
9	Extrema relación causa-efecto

Fuente: (Díaz-Martín, 2015).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE IXTACAMAXTILÁN

Para lograr una adecuada planeación hacia la Neutralidad es necesario obtener la información sobre las características y los atributos de la zona (Jardel-Peláez, 2015), así como el estado, la cantidad y la calidad de los recursos de las tierras y de esta manera tener un primer acercamiento al conocimiento del municipio. La caracterización es un inventario detallado de las condiciones y recursos biofísicos y socioeconómicos, así como sus interrelaciones y está dirigida a cuantificar las variables que tipifican al sitio, constituyendo una base sobre la cual se edificará la planeación (López-Teloxa, 2017).

3.1.1. Caracterización biofísica

El municipio de Ixtacamaxitlán se encuentra en la parte norte del estado de Puebla, entre los paralelos 19° 27' y 19° 45' de latitud norte y los meridianos 97° 41' y 98° 03' de longitud oeste (**Figura 3.1**). Colinda al norte con los municipios de Aquixtla, Chignahuapan y Tetela de Ocampo; al sur con Libres y el Estado de Tlaxcala; al oeste con Zautla, Cuyoaco, Ocoatepec y Libres; y al poniente con el estado de Tlaxcala y Chignahuapan. Tiene una superficie de 56 767 ha, lo que ocupa aproximadamente el 1.62 % del estado de Puebla. Su altitud varía de entre los 2 000 y 3 400 m s. n. m. en donde existen una gran cantidad de cerros aislados entre los que se encuentran, al norte, Los Ameles, El Campanario, Pílon, Los Cerritos, Techachala, La Clavera; al sur, Cerro Grande; al oriente, Teotzín; y al poniente, Clananá (INEGI, 2009). Ixtacamaxitlán presenta una geología de origen volcánico, su altitud mayor a los 2 000 m s. n. m. genera un clima templado subhúmedo con la presencia de bosques templados y agricultura de temporal. La zona rural ha crecido sobre rocas ígneas y laderas escarpadas (Sanchez-Ramón, 2004).

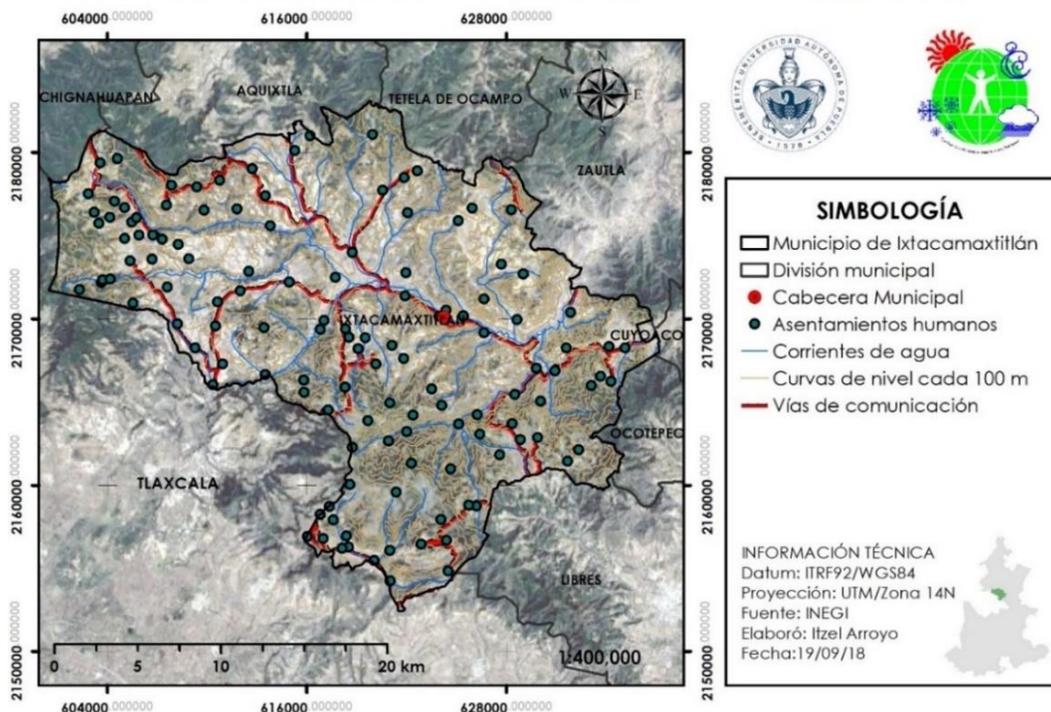


Figura 3.1: Mapa topográfico del municipio de Ixtacamaxitlán.

3.1.1.1. Fisiografía

Es de suma importancia la caracterización y explicación de las formas del relieve, teniendo en cuenta su origen, su formación, edad relativa y en general los procesos erosivos naturales que inciden sobre él. La fisiografía hace referencia a cómo diversos factores como el clima, la geología, la morfología, el origen y edad de los materiales rocosos, la hidrología e indirectamente los aspectos bióticos y sus interrelaciones, inciden en el origen de los suelos y/o en su aptitud de uso y manejo del suelo.

El municipio se encuentra prácticamente en su totalidad dentro del Eje Neovolcánico, el cual se caracteriza por constituir una franja volcánica del Cenozoico Superior que cruza transversalmente la República Mexicana, está formado por una variedad de rocas volcánicas, así como una serie de sierras, lomeríos y cuencas desarrolladas por la acumulación de lavas, brechas y cenizas volcánicas. Así mismo la zona pertenece a la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac. Sin embargo, en la parte oriente del municipio existen laderas formadas sobre materiales sedimentarios, las cuales están asociadas a la Sierra Madre Oriental (INEGI, 2009; Sanchez-Ramón, 2004).

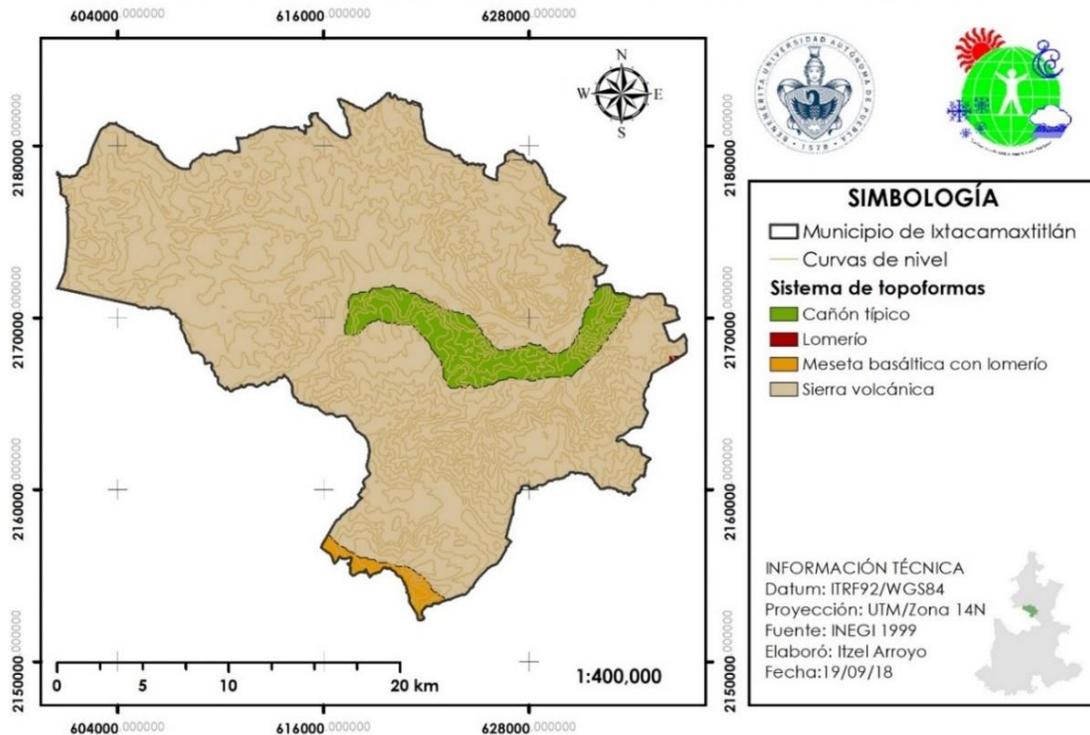


Figura 3.2: Mapa fisiográfico del municipio de Ixtacamaxtitlán.

La geomorfología de Ixtacamaxtitlán es resultado de la confluencia de dos grandes eventos geotectónicos: la actividad del Sistema Volcánico Transversal y la conformación de la Sierra Madre Oriental, cuyas formas son de tipo endógeno (volcánicas), estructurales (sedimentarias) y en un porcentaje muy bajo, exógeno (valles fluviales). Su sistema de topofomas es de Sierra volcánica de laderas escarpadas en un 92 % del territorio, Cañón típico en 7 % y Meseta basáltica escalonada con lomerío en 1 % (**Figura 3.2**) (INEGI, 2009).

3.1.1.2. Geología

Las interrelaciones e interacciones entre la forma de la geología, el material parental y el relieve, repercuten en la formación, desarrollo y procesos de evolución de los suelos, determinando así la cobertura vegetal y su condición para la explotación agropecuaria, la forma y localización de los asentamientos humanos y su infraestructura. Así mismo, es un factor de importancia para determinar el tipo y grado de una cierta amenaza natural, como por ejemplo, su susceptibilidad a la erosión por escorrentía o el arrastre de sedimentos.

La litología del municipio de Ixtacamaxtitlán está dominada por rocas de origen volcánico, tanto del Cuaternario como del Terciario, y rocas sedimentarias con menor cobertura cuya formación es de origen marino y se remonta al Jurásico y Cretácico, las cuales están representadas en la mayoría de las montañas, con un alto grado generalizado de erosión, principalmente fluvial y con estratos de profundidad variable. Las expresiones volcánicas en el relieve, en su mayoría del Cuaternario, están representadas por depósitos piroclásticos y andesíticos, mismos que cubren parcialmente las rocas sedimentarias, complementados por múltiples domos de amplitud y altura variable (**Figura 3.3**).

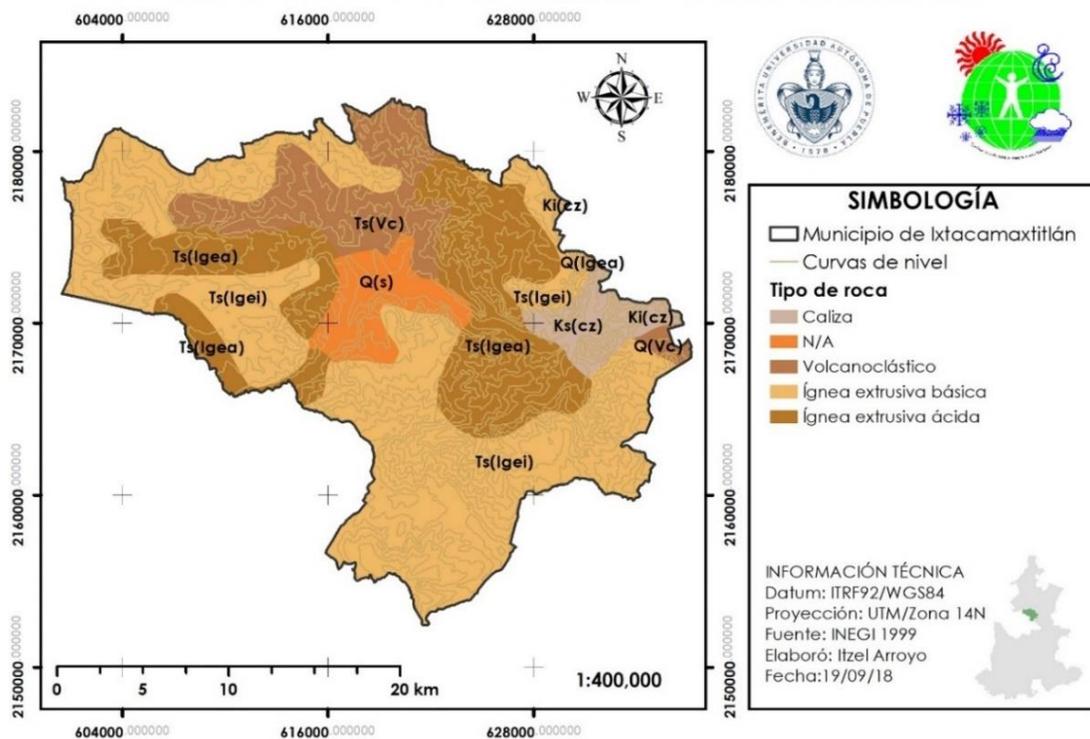


Figura 3.3: Mapa geológico del municipio de Ixtacamaxtitlán.

Las rocas sedimentarias del municipio se caracterizan por sus plegamientos y alta densidad de cauces fluviales, cubren más del 6 % del área de Ixtacamaxtitlán, lo que representan menos de 4 000 ha en su conjunto, siendo la mayor parte de estas rocas las calizas intercaladas con lutitas con altos valores de permeabilidad y susceptibles a la erosión, particularmente la fluvial. Las zonas de contacto entre los materiales volcánicos y los sedimentarios están bien definidas, pues el cambio de pendiente es notable y el piedemonte no es muy amplio e incluso en ciertas zonas es mínimo en su extensión.

En cuanto a las rocas de origen volcánico dominan las andesitas sobre las demás rocas ígneas y sobre las sedimentarias, ya que abarcan el 58 % de la extensión superficial del municipio. Estas rocas se distribuyen espacialmente a lo largo de toda la región oeste y suroeste del municipio, en donde forman tanto laderas como zonas semiplanas, con valores de pendiente bajos en comparación con la región noreste del municipio (Sanchez-Ramón, 2004).

Las unidades de rocas ígneas originadas durante el Terciario están constituidas por derrames andesíticos, cuyo espesor llega a alcanzar los 300 m. Por su parte, las unidades más jóvenes, correspondientes al Cuaternario, yacen sobre rocas volcánicas terciarias y rocas sedimentarias de origen marino originadas en los períodos antecedentes.

3.1.1.3. Clima

El clima es un factor primordial en la conservación o degradación de las formas geológicas. Éste incide directamente sobre los demás factores del ambiente y sobre la actividad antropogénica; el clima influye en alto grado en los procesos de formación del suelo, determinando así su aptitud de uso y aprovechamiento.

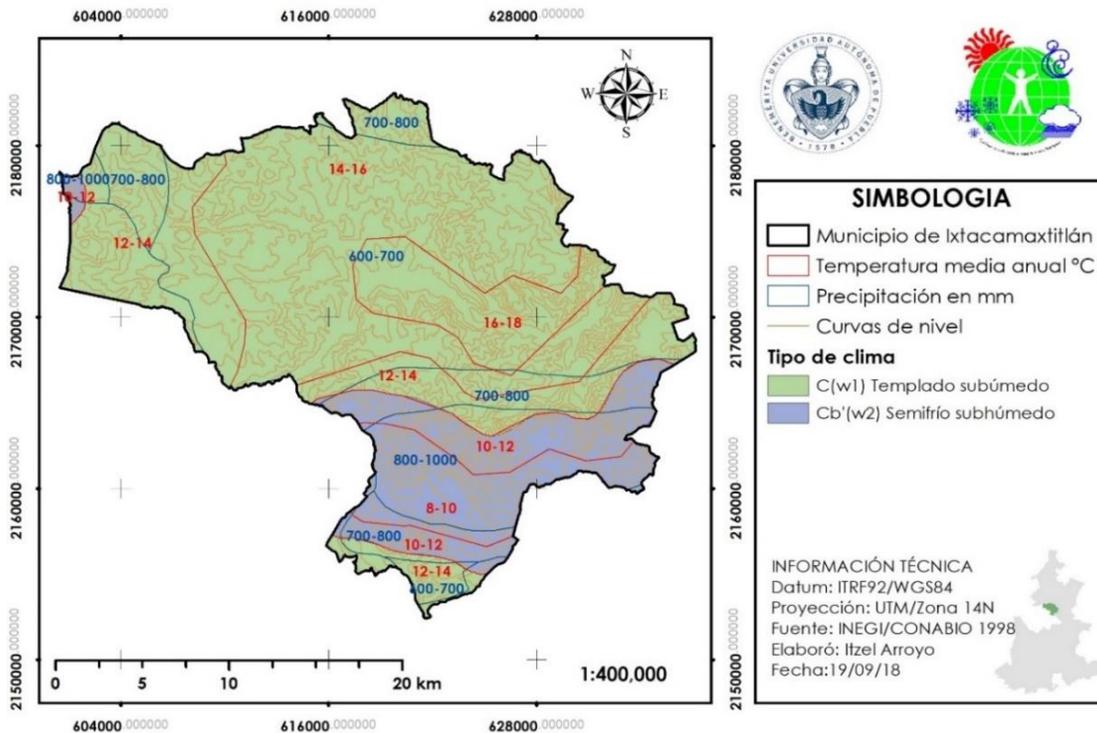


Figura 3.4: Mapa climatológico del municipio de Ixtacamaxtitlán.

La precipitación media anual del municipio de acuerdo con INEGI (2009) es de 800 mm; sin embargo, se presenta una franja en el sur del municipio, que va de este a oeste, cuya precipitación anual es igual o inferior a los 1 000 mm (Figura 3.4). Se identifican dos tipos de climas, clima templado subhúmedo con lluvias en verano, presentando temperaturas de entre 12 y 18 °C y con temperaturas de entre -3 a 18 °C en el mes más frío. Este tipo de clima se encuentra localizado al centro, norte y parte del sur del municipio, el periodo de lluvias se encuentra marcado en los meses de mayo a octubre, con lluvias dispersas en el mes de noviembre. Lo anterior concuerda con los datos obtenidos de la estación climatológica “Ixtacamaxtitlán” (Figura 3.5) y

“La Gloria” (**Figura 3.6**) localizadas al centro y oeste del municipio respectivamente, en donde el periodo de menores precipitaciones es en los meses de diciembre a febrero con lluvias que oscilan entre los 8.2 y los 13 mm. Los meses con mayor precipitación se observan entre junio y septiembre, sin embargo, en el caso de la estación “Ixtacamaxtitlán” se observa una reducción considerable entre julio y agosto comparada con junio y septiembre, lo que probablemente se deba al periodo canicular que puede ser exacerbado por la baja altitud de esta zona centro considerada como cañón típico y en donde los cerros que la rodean sirven como barrera provocando el efecto pantalla orográfica.

En la porción noroeste de la entidad existe una región en la cual se mantiene un régimen subhúmedo con lluvias de verano, pero cuya diferencia estriba en la precipitación invernal, la cual asciende a más del 10.2 %. Esta misma condición se presenta al sur del primer clima descrito, la cual se puede considerar una zona de transición hacia los climas semifríos subhúmedos con lluvias de verano y lluvias invernales de entre 5 y 10 %.

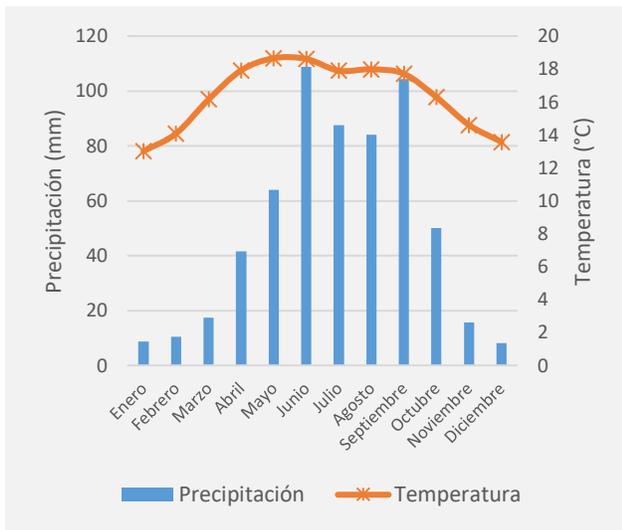


Figura 3.5: Climograma Estación Ixtacamaxtitlán. Temperatura y precipitación promedio mensual registrada para el periodo 1955-2016.
Fuente: Elaboración propia con datos de SMN

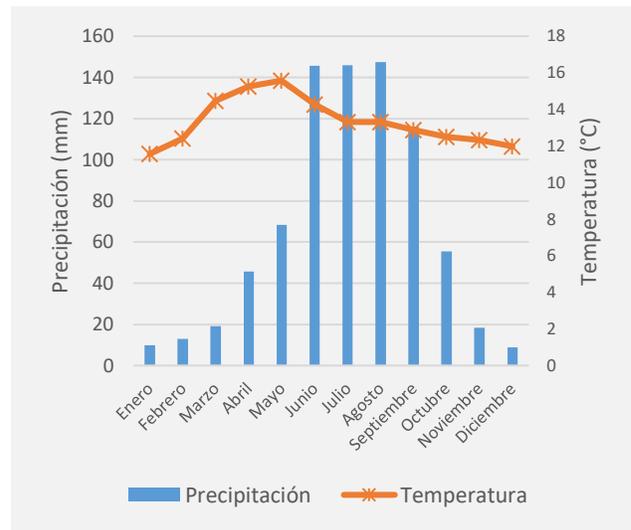


Figura 3.6: Climograma Estación La Gloria. Temperatura y precipitación promedio mensual registrada para el periodo 1961-1996.
Fuente: Elaboración propia con datos de SMN

El segundo tipo de clima es semifrío subhúmedo con lluvias en verano, cuya temperatura media anual oscila entre los 5 y 12 °C, presente en las partes altas de la sierra que cruza el sur y poniente del municipio. De acuerdo con los datos de 1955-1999 de la estación climatológica “San Antonio Arroyo Prieto”, se presentó una precipitación media anual de casi 1 000 mm acumulada en los meses de mayo a octubre, con un 84 % de las precipitaciones totales (**Figura 3.7**). Su temperatura media anual fue de 10 °C. El mes de mayo se registró como el más caluroso mientras que el mes más frío fue diciembre con una temperatura promedio mensual de 8 °C.

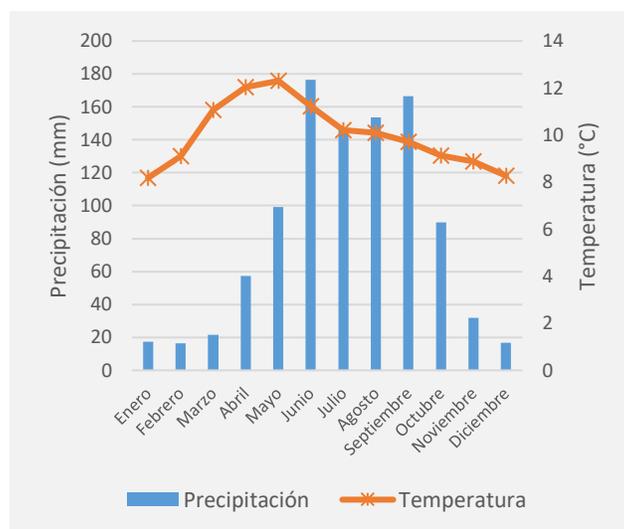


Figura 3.7: Climograma Estación San Antonio Arroyo Prieto. Temperatura y precipitación promedio mensual registrada para el periodo 1955-1999. Fuente: Elaboración propia con datos de SMN.

3.1.1.4. Edafología

Los suelos son componente fundamental de evaluación y estudio para la planeación, ya que muestran el potencial agropecuario y la cobertura vegetal que pueden sustentar, así como su estabilidad y resistencia. El suelo es un importante recurso natural con gran influencia sobre el medio ambiente, la economía local, regional y mundial (Blaikie, 1985; Gardi *et al.*, 2014). El municipio presenta diversos tipos de suelos (**Figura 3.8**) entre los que destacan litosoles, feozem, regosoles, luvisoles y andosoles, resultado de la combinación de materiales volcánicos con rocas sedimentarias y procesos erosivos fluviales.

Litosoles

Son suelos muy delgados, con una profundidad menor a 10 cm limitada por el estrato rocoso y se debe a las condiciones de relieve de las zonas donde se desarrollan, sobre todo a causa de las pendientes abruptas. Estos suelos son los de mayor cobertura relativa en el municipio, con casi el 40 % de área municipal, los cuales se presentan acompañados de feozem háplico y andosol húmico, la pendiente sobre la que se desarrollan oscila entre los 12° y los 32°, lo que impide la retención de material por efecto de la gravedad, principalmente en las laderas ubicadas sobre caliza-lutita.

Regosoles

Este tipo de suelos se caracterizan por ser la etapa inicial de suelos en transformación, presentan poco desarrollo, por lo que no existen capas diferenciadas entre sí, son de matiz claro o escasos en materia orgánica. Se han desarrollado al centro-sur del municipio, sobre rocas de tipo andesita del Terciario y sobre laderas de pendiente media, donde existe la franja de clima templado subhúmedo con lluvias en verano. Cubren aproximadamente 16 100 ha, ocupando el segundo tipo de suelos de mayor extensión en cuanto a cobertura edáfica. Estos suelos pueden ser útiles para actividades agrícolas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, no presentan suficientes cantidades de nutrientes además de ser considerablemente susceptibles a la erosión.

Feozem

Estos suelos se caracterizan por tener un horizonte superficial oscuro, son opimos en materia orgánica y con estructura permeable. Se encuentran sobre todo en regiones templadas subhúmedas (Gardi *et al.*, 2014). Estos suelos son los terceros más desarrollados en el municipio con porciones en el centro y suroeste, y que incrementan su presencia en dirección sur pero fuera de los límites municipales. Son suelos altos en nutrientes y de estructura más gruesa que otros suelos, por ejemplo, los andosoles. Su presencia está asociada en parte, a la franja relativamente delgada, de clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano.

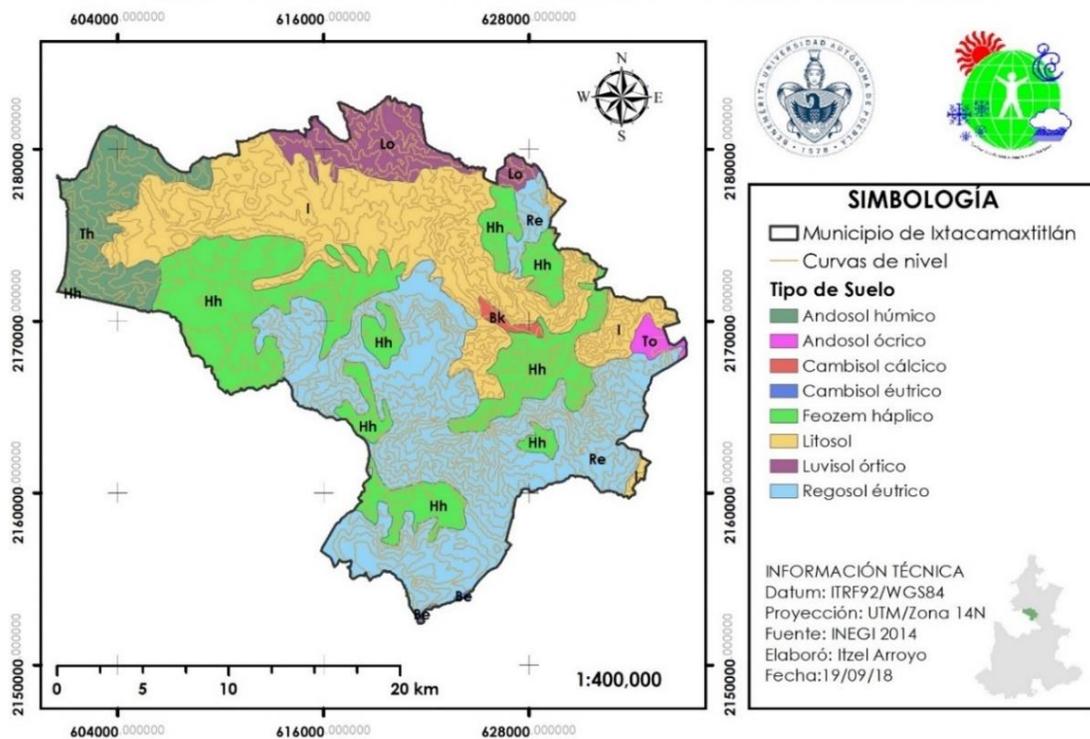


Figura 3.8: Mapa edafológico del municipio de Ixtacamaxtitlán.

Andosoles

Son suelos condicionados por el material original, de matiz oscuro, desarrollados a partir de materiales volcánicos, de vocación forestal a causa de su fragilidad a la erosión. Estos se localizan en puntos extremos, uno de ellos en el este, cerca de Tateno, y el otro al occidente, entre las localidades de La Rosa y La Joya. Se hallan en combinación con Litosoles y Regosoles, resultado de la actividad volcánica regional, principalmente de la caldera de Los Humeros. Son suelos fértiles.

Luvisoles

Están presentes en la parte norte del municipio, con una superficie amplia que se desarrolla en la Sierra Norte de Puebla, resultado del incremento en los niveles de precipitación. A la presencia de dichos suelos se añaden porciones de regosoles y feozems. No se caracterizan por contenido alto de nutrientes y su desarrollo sobre laderas inclinadas limita su uso en las actividades agrícolas, sin embargo, se han documentado estas actividades económicas sobre estos suelos (Sanchez-Ramón, 2004).

3.1.1.5. Hidrología

El municipio pertenece a la vertiente hidrográfica septentrional del Estado de Puebla, formada por las distintas cuencas parciales de los ríos que desembocan en el Golfo de México caracterizada por ríos jóvenes.

El municipio pertenece a la cuenca del Tecolutla en un 91 % y a la cuenca del río Atoyac en solo un 9 % (**Figura 3.9**). Es recorrido por diversos ríos cuyo destino es la Subcuenca del río Apulco, el cual cruza aproximadamente 30 km del municipio. Los ríos que alimentan al río Apulco son: Clanalá, El Tule, Alhujoyuca, La Ciénaga, Las Vegas, Los Lobos, Los Hoyos y la Galera originados al poniente del municipio; Los ríos Cotepalzoca, Hacienda Vieja y Tuligtic originados al norte y finalmente los ríos Minatitlán, Tepetzalán, Dos Aguas, Tlazontic e Itzamanca originados en el sur. Todos estos ríos son alimentados por diversas corrientes principalmente intermitentes. Existen además algunas corrientes intermitentes en la zona sur del municipio cuyo cauce se dirige al estado de Tlaxcala.

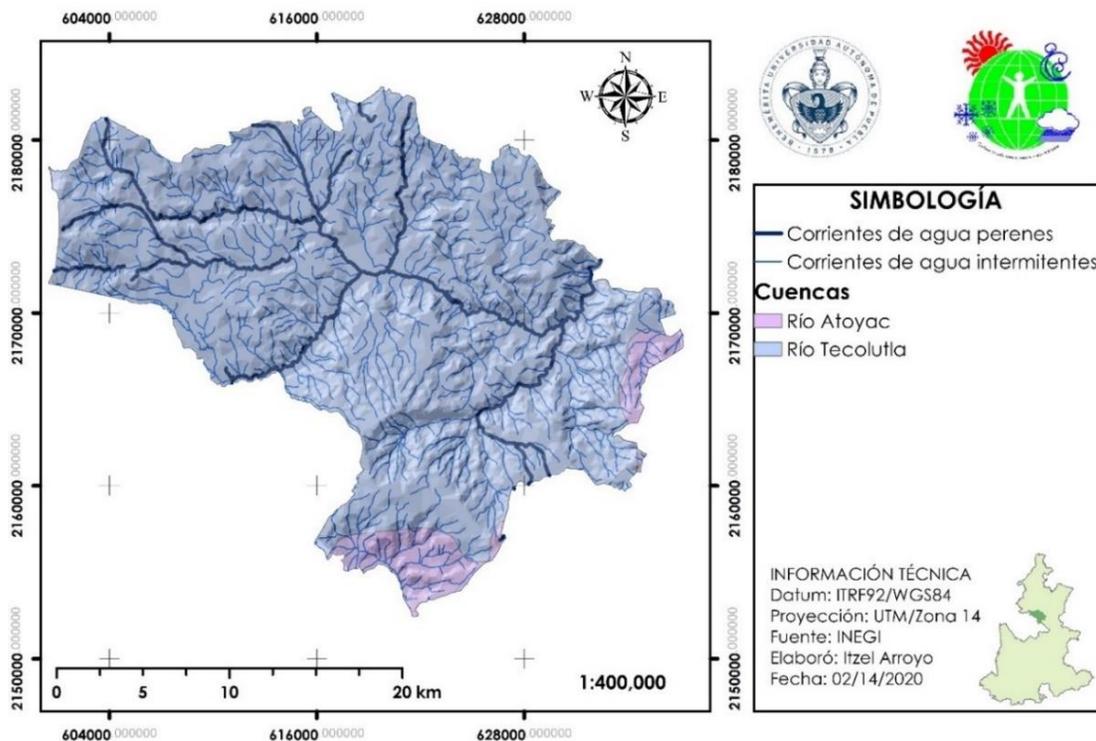


Figura 3.9: Mapa hidrológico del municipio de Ixtacamaxitlán.

Balance hídrico

Un aspecto importante es la evaluación de la humedad disponible para el desarrollo y mantenimiento de los seres vivos, de manera particular, las plantas (Castelán-Vega, 2009). Se determinó el balance hídrico a partir de las tres estaciones presentes en la zona de estudio para tener un mejor conocimiento de las condiciones húmedas, deficiencias y excedentes de la zona de estudio, tomando en cuenta que el suelo se satura o puede almacenar hasta 100 mm de humedad, la cual se considera la reserva útil para la vegetación y a partir de la cual los mm sobrantes pasan a ser excesos (Gómez, 2015).

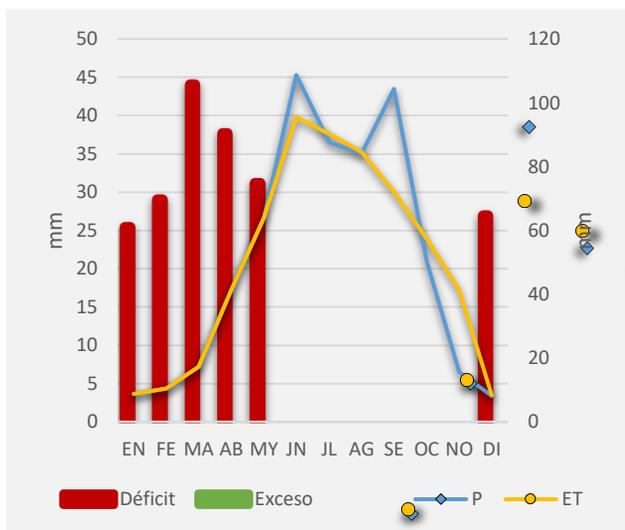


Figura 3.10: Balance hídrico Estación Ixtacamaxtitlán. (P)Precipitación, (ET)Evapotranspiración (1955-2016).
Fuente: Elaboración propia con datos de SMN

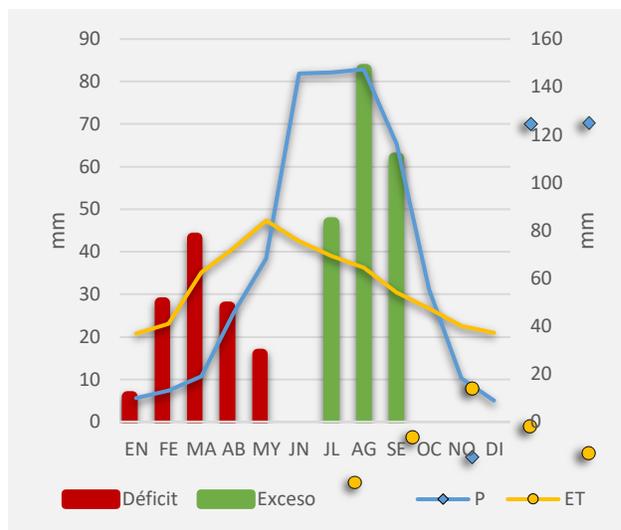


Figura 3.11: Balance hídrico Estación La Gloria. (P)Precipitación, (ET)Evapotranspiración(1961-1996).
Fuente: Elaboración propia con datos de SMN

En la zona centro del municipio, y de acuerdo con los datos de la estación “Ixtacamaxtitlán” localizada a 2 472 m s. n. m., se puede observar que el mayor nivel de evapotranspiración sucede en el mes de junio con 95.57 mm (**Figura 3.10**), esta evapotranspiración disminuye hasta alcanzar su menor nivel en el mes de diciembre con 8.37 mm donde se presenta un déficit de humedad de 26.96 mm. El déficit de humedad continua hasta el mes de mayo con 31.18 mm. El mayor déficit se observa en el mes de marzo con 44.05 mm, por lo que, de acuerdo con la clasificación de Thornthwaite, se presenta un régimen de humedad en suelo considerado como árido con poco o nulo exceso de agua en invierno.

Con los datos disponibles de la estación “La Gloria” (1961-1996), localizada en el oeste del municipio a 2 750 m s. n. m. se observó una menor evapotranspiración que en la estación descrita anteriormente, en donde su punto más alto se presentó en el mes de mayo con 84.16 mm (**Figura 3.11**) y va disminuyendo hasta el mes de enero con 36.89 mm, en esta zona se observó un exceso de humedad en los meses de julio, agosto y septiembre de hasta 82.89 mm, mientras que el déficit de humedad se observó en los meses de enero a mayo. En este caso de acuerdo con la clasificación, el régimen de humedad se considera como ústico con falta moderada de agua en verano.

Finalmente, de acuerdo con la estación San Antonio Arroyo Prieto (**Figura 3.12**) localizada al sur del municipio a una altura de 3 065 m s. n. m., se observa que el mes de mayo presenta el punto más alto de evapotranspiración con 76.20 mm y va disminuyendo hasta el mes de diciembre considerándose como el punto más bajo con 31.51 mm. Los excesos de humedad están acumulados en los meses de junio a septiembre, siendo este último el de mayor exceso (117.39 mm). Por otro lado, los déficits se presentan de febrero a abril, en este caso es en marzo cuando se presenta el déficit mayor con 34.21 mm. En esta zona el régimen de humedad se considera como údico.

Sin embargo, es en esta zona en donde el déficit de humedad es menor con 47.34 mm comparado con la información de las estaciones de Ixtacamaxtitlán y La Gloria (194.30 y 120.24 mm respectivamente). Así mismo es en esta zona donde el exceso de humedad es mayor con un total de 325.44 mm comparado con la información de la estación La Gloria. En el caso de la estación Ixtacamaxtitlán no se presenta ningún exceso de humedad.

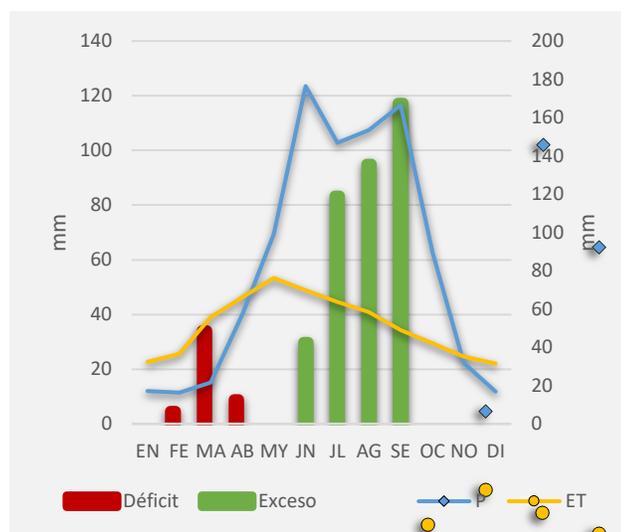


Figura 3.12: Balance hídrico Estación San Antonio Arroyo Prieto (P)Precipitación, (ET)Evapotranspiración registradas para el periodo 1955-1999.
Fuente: Elaboración propia con datos de SMN.

3.1.1.6. Uso de suelo y vegetación

El municipio concentra sus principales actividades económicas en agrícolas, pecuarias y forestales (**Figura 3.13**). De acuerdo con el Inventario Estatal Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2014), el municipio de Ixtacamaxtitlán, junto con Zacatlán, Xicotepec y Aquixtla, concentran el 25 % de la vegetación forestal primaria del estado. Alrededor de la mitad del municipio está compuesto por zonas forestales, con bosques de pino, oyamel, táscate y la asociación pino-encino; de la superficie forestal total, el 50 % es vegetación primaria de bosque, un 34 % es vegetación secundaria de alguno de los tipos de bosque y el 14 % restante son áreas de matorrales desértico rosetófilo.

La presencia de bosques de pino son resultado del clima con regímenes húmedos y subhúmedos, con temperaturas que oscilan entre los 8 y los 16 °C, y precipitaciones entre los 800 y los 1 000 mm anuales, así como la facilidad de este tipo de vegetación de desarrollarse sobre laderas de pendiente media a alta, además de la riqueza de los suelos asociados a materiales volcánicos presentes en gran parte del municipio.

La mayor parte del uso de los recursos forestales en el municipio es para uso doméstico, aun cuando en la porción central del municipio, la más activa económicamente, se realiza el uso de recursos maderables con fines comerciales llevando al municipio a ser el cuarto productor a nivel estatal de productos forestales (INEGI, 2016a).

Por otro lado, el porcentaje territorial destinado a actividades agrícolas equivale a casi el 40 %, la distribución espacial de esta actividad se da en todo el municipio, aunque en la porción sur los niveles de producción tienden a disminuir por la acidez del suelo, condición que limita el rendimiento agrícola. Los principales cultivos son de papa, maíz, haba, cebada y avena (INEGI, 2009).

La zona de pastizal inducido se presenta en un 8 % de la superficie, lo que, junto con el elevado porcentaje de zonas con vegetación secundaria, evidencia el potencial cambio de uso de suelo que provoca el decremento de áreas boscosas originales que se concentran en las partes de laderas y montañas de mayor altura relativa, las cuales se observan espacialmente en porciones aisladas y sin una continuidad. La porción noroeste es la más alterada de la región, en donde las zonas de bosque se aprecian más fragmentadas respecto a las porciones boscosas del centro y sur, debido a la influencia directa de las actividades humanas, pues en esta parte del municipio se incrementa la densidad de localidades.

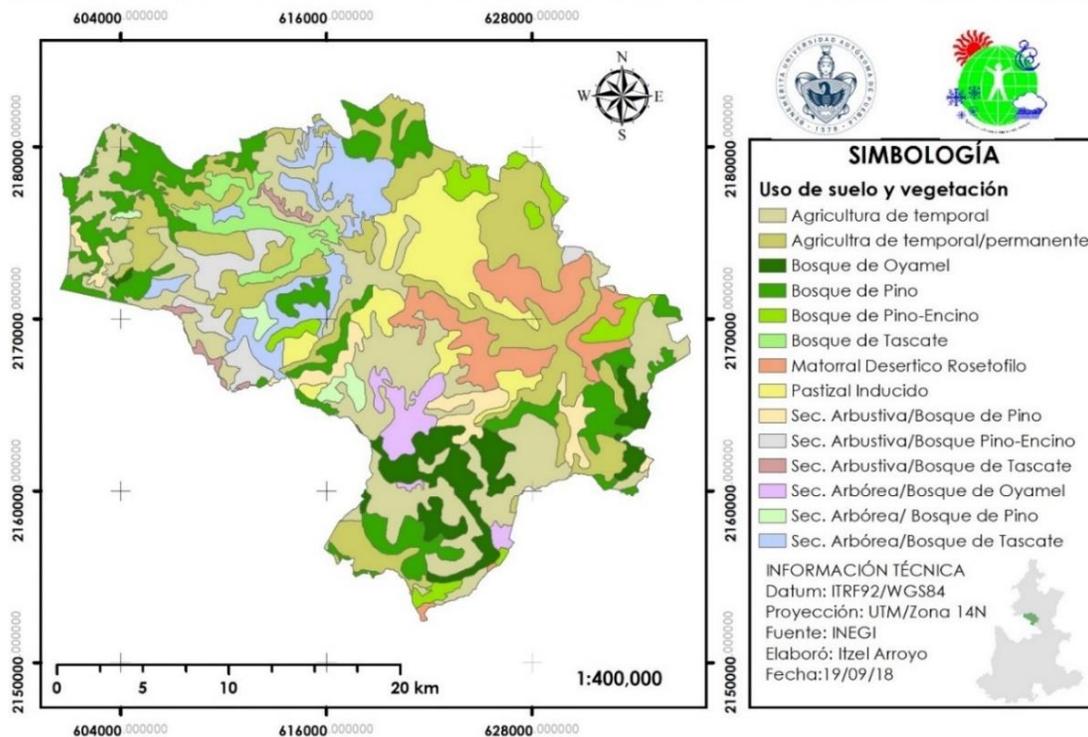


Figura 3.13: Mapa de Uso de suelo y Vegetación del municipio de Ixtacamaxtitlán.

3.1.2. Caracterización socioeconómica

3.1.2.1. Población

De acuerdo con los datos obtenidos de la Encuesta Intercensal de INEGI (2015b), en el área de estudio se registró una población de 24 512 habitantes, de los cuales 11 937 fueron hombres (48.8 %) y 12 539 mujeres (51.2 %). La densidad poblacional fue de 43.7 habitantes por km². La dispersión de localidades pequeñas en áreas de difícil comunicación es una situación frecuente en el territorio mexicano, así también en el municipio de Ixtacamaxtitlán, ya que la población se encontró distribuida en 126 localidades. En este sentido, la población del municipio se considera como rural, ya que no se reportó alguna localidad con una población mayor a 2 500 habitantes. De las 126 localidades, 61 registraron menos de 100 habitantes, 51 localidades entre 100 y 499 habitantes y sólo 14 entre 500 a 1 500 habitantes (INEGI, 2015b). En otras palabras, en 14 localidades habita el 41 % de la población y en las 112 localidades restantes habita el 58.4 %. Las principales localidades son El Mirador, La Unión Ejido Mexcaltepec, Calpanería, Atezquilla, Cuatexmola, La Caldera, Texocuixpan, Tateno, Lagunilla Pedernales, Cristalaco y Tonalapa.

En la **Figura 3.14** se muestra la localización de los asentamientos humanos de carácter indígena y mestizo. De las 126 localidades que forman parte del municipio, 71 de estas tuvieron presencia indígena y de estas, 45 localidades presentaron un porcentaje de presencia indígena menor al 40 % y el resto (26) un porcentaje igual o mayor al 40 %.

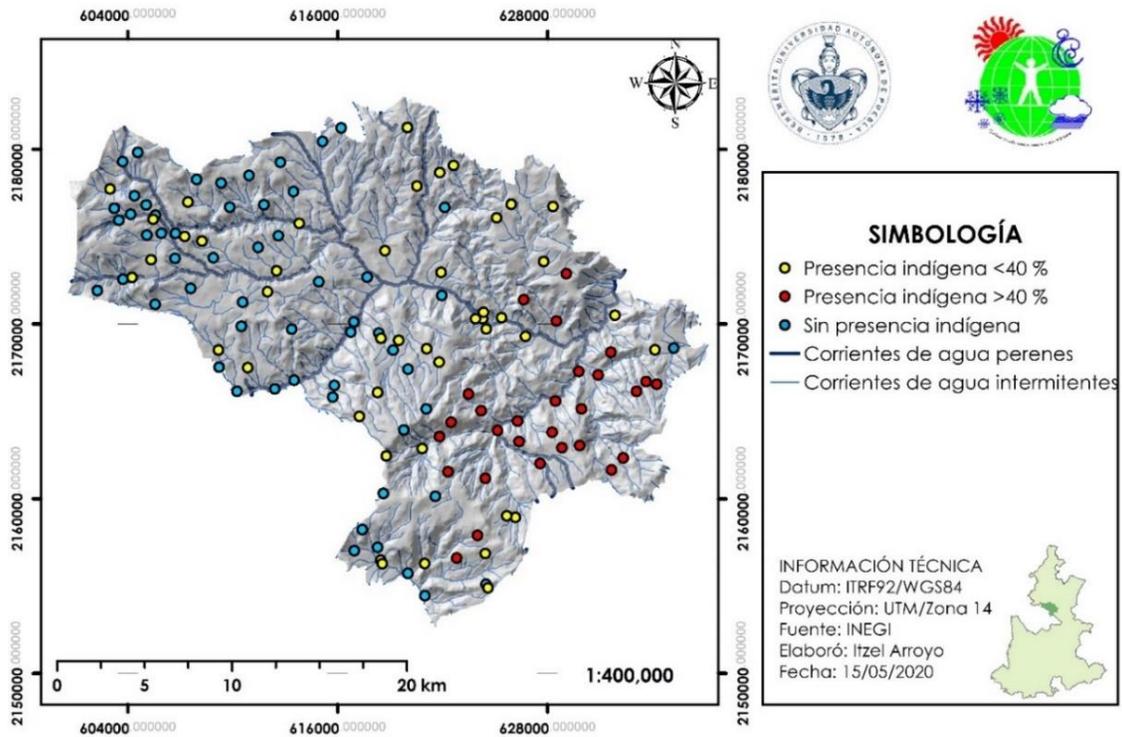


Figura 3.14: Mapa de distribución de las localidades presentes en el municipio de Ixtacamaxtitlán.

El XII Censo General de Población y Vivienda (INEGI, 2000), registró un total de 28 358 habitantes; por lo que se reporta una disminución de 3 846 habitantes (**Tabla 3.1**), así mismo, se observa una disminución de la población menor a 14 años en 2015, comparado con el año 2000. En contraposición, la población mayor a 65 años aumentó, pasando en términos porcentuales de 6.8 % en el a 10.2 % en 2015.

Tabla 3.1: Población total y estructura por sexo y edad del municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.

		2000	%	2015	%
Población Total		28 358		24 512	
Densidad poblacional hab/km ²		46.1		43.7	
Estructura por sexos	Población masculina	14 253	50.3	11 937	48.8
	Población femenina	14 105	49.7	12 539	51.2
Estructura por edad	0-14	11 455	40.4	7 868	32.1
	15-64	14 976	52.8	14 127	57.6
	65 y +	1 927	6.8	2 517	10.3

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (2000, 2015b).

3.1.2.2. Vivienda

Para el año 2015 se registraron 5 868 viviendas particulares habitadas, de las cuales 879 hogares fueron de jefatura femenina. El tamaño promedio de los hogares fue de 4.4 integrantes. A pesar de que hubo una mejora en la situación de vivienda en el municipio en 2015 respecto al año 2000, se puede observar que estos indicadores representaron avances menores a nivel estatal (**Tabla 3.2**).

Los datos que más resaltan son los de las viviendas con piso de tierra que tuvieron una disminución de casi 44 puntos porcentuales (de 2 802 a 604) y las viviendas que no disponen de drenaje (4 263 a 1 750), es decir, una reducción de más del 50 %. A pesar de este avance en el municipio, el 58.6 % de las viviendas no disponía de alguno de los bienes básicos y el 43.1 % presentó carencia de los servicios de vivienda básicos.

Tabla 3.2. Situación de viviendas en el municipio 2000-2015.

	2000	%	2015	%	Estatad (%)
Total de viviendas particulares habitadas	5 234		5 868		
Con piso de tierra	2 802	53.5	604	10.3	5.5
No disponen de excusado o sanitario	625	11.9	202	3.4	2.4
No disponen de agua entubada de la red pública	1 794	34.3	577	9.8	6.7
No disponen de drenaje	4 263	81.5	1 760	30	8.3
No disponen de energía eléctrica	503	9.6	195	3.3	1.0
No disponen de lavadora	5 049	96.5	4 430	75.5	47.9
No disponen de refrigerador	4 824	92.1	3 437	58.6	31.2

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (2000, 2015b).

3.1.2.3. Educación

En Ixtacamaxtitlán existen un total de 225 escuelas, de las cuales 80 son de preescolar, 85 de primaria, 39 de secundaria y 21 de bachillerato. No existe ninguna unidad académica de estudios profesionales a pesar de que de acuerdo con el Plan Municipal de Desarrollo de Ixtacamaxtitlán 2014-2018 (Gobierno Municipal de Ixtacamaxtitlán, 2014) se mencionó la instalación de la Universidad para el Desarrollo del Estado de Puebla, Campus Ixtacamaxtitlán, así como la Universidad Tecnológica de Ixtacamaxtitlán, sin embargo, no se tiene registro de ninguna de las dos.

De las 80 escuelas de educación preescolar, 11 son preescolar indígena y 59 son preescolares comunitarios rurales del Consejo Nacional de Fomento Educativo (CONAFE), el cual apoya a la población para continuar los estudios. Este tipo de escuelas se encuentran en localidades rurales dispersas con alto o muy alto grado de marginación y están enfocadas a la población con algún tipo de discapacidad, que habita en localidades predominantemente indígenas o bien, en campamentos agrícolas migrantes. En el caso de las escuelas primarias, de las 85 presentes en el municipio, 12 son escuelas primarias indígenas y 25 son primarias comunitarias rurales CONAFE. En el año 2015 -respecto al año 2000- se presentó una disminución en la población de 15 años o más analfabeta o con educación básica incompleta; sin embargo, estos datos son mayores comparados con la media estatal para el año 2015 (**Tabla 3.3**).

Tabla 3.3. Situación de la educación en el municipio 2000-2015.

	2000	%	2015	%	Estatad 2015(%)
Población de 15 años o más y analfabeta	4 184	26.8	2 517	15.1	8.3
Población de 15 años y más con educación básica incompleta	12 801	81.9	9 465	56.9	43.6

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (2000, 2015b).

3.1.2.4. Salud

El número de unidades médicas en el municipio fue de 21, con un total de personal médico de 41, es decir aproximadamente 2 médicos por unidad. Alrededor de 1 357 personas en el municipio presentó alguna limitante que incide en las capacidades para realizar actividades cotidianas.

La implementación del seguro popular por el gobierno federal disminuyó notablemente la cantidad de población sin seguridad social; en el mismo periodo, la tasa mortalidad infantil disminuyó por debajo de la media estatal (**Tabla 3.4**).

Tabla 3.4: Situación de salud en el municipio 2000-2015.

	2000	%	2015	%	Estatal 2015 (%)
Población sin derechohabencia	22 160	78.14	1 358	5.54	19.8
Tasa de mortalidad infantil*	2000	Categoría	2015	Categoría	Estatal 2015
	35.2	Muy alta	11.88	Baja	14.2

*Tasa de mortalidad infantil definida como el número de defunciones de menores de un año por cada mil nacidos vivos
Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (2000, 2015b).

3.1.2.5. Población económicamente activa

El conocimiento de la principal actividad económica de la población es de gran importancia, ya que nos puede ofrecer un primer acercamiento sobre las presiones ambientales que se ejercen sobre los ecosistemas y los recursos naturales.

La población económicamente activa general tuvo una disminución del 0.5 % (**Tabla 3.5**), sin embargo, la población económicamente activa dedicada al sector primario aumentó 3.4 puntos porcentuales. Por otro lado, se observa una disminución de casi 4 puntos porcentuales en las actividades del sector secundario, que es representado por actividades como minería, extracción, industria manufacturera, electricidad, agua y construcción. En el sector terciario se observa una disminución de más de 3 % en actividades como comercio; transporte y comunicaciones; servicios financieros de administración pública y defensa; servicios comunales, sociales, profesionales y técnicos; restaurantes y hoteles y otros (INEGI, 2015b).

Tabla 3.5: Población económicamente activa del municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.

	2000	%	2015	%	
Población económicamente activa	7 642	27.0	6 508	26.5	
Sector	Primario	5 306	69.4	4 738	72.8
	Secundario	992	18.7	674	14.2
	Terciario	1 132	14.8	741	11.4

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (2000, 2015b).

3.1.2.6. Población indígena

La principal lengua de la población indígena en el municipio es el náhuatl y en segundo lugar, con menos del 1 %, totonaca.

Para el año 2000, se tenían registrados un total de 6 852 habitantes indígenas dentro del municipio -el 24.2 % de la población total- este registro disminuyó para el año 2015 de acuerdo con la Encuesta Intercensal (2015b), en donde se registran un total de 4 841 indígenas (19.8 % de la población total); sin embargo, de acuerdo con datos del oficio CGPE/2019/ OF/0477, emitido por el Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas (INPI, 2019), para el año 2015, además, se tienen registrados por autoadscripción a 7 608 personas (31 %) de población indígena, ubicadas en 71 de las 126 localidades del municipio. Las localidades con mayor presencia indígena son Analco, Tagcotepec, Xonacatla, Escuinapa, El Sabinal, Tatoxcac y Zaragoza, con más del 90 % de población indígena.

3.1.2.7. Migración

El municipio se encuentra en la categoría migratoria de expulsión, lo que indica que la intensidad de emigración es alta, dicho fenómeno, de acuerdo con CONAPO (2012), se presenta cuando la emigración es internacional y está asociado a la incapacidad de la economía mexicana para incorporar al mercado laboral a la población, así como al alto grado de marginación que caracteriza a algunos municipios y regiones al interior de las entidades federativas del país.

Otro factor es la cultura migratoria fuertemente arraigada en muchas entidades, que incentiva y facilita los flujos migratorios internacionales (CONAPO, 2012). Por otro lado, cuando la migración es interna, el fenómeno se presenta por la necesidad de ampliar las oportunidades de desarrollo económico y social.

En el año 2000 se registró un total de 528 personas del municipio mayores de 5 años habitaban en otra entidad o país (INEGI, 2000), mientras que para el año 2015 el registro fue de 597 personas.

3.1.2.8. Marginación, pobreza y rezago social

El municipio atraviesa por grandes deficiencias en los servicios básicos, la dispersión poblacional de sus localidades ha impactado el proceso de crecimiento urbano lo que se refleja en el bajo proceso de desarrollo económico de sus habitantes. Asimismo, la falta de vialidades causada por la ubicación geográfica dificulta la movilidad tanto de los habitantes, como de sus productos.

En este sentido, el grado de marginación en el municipio se consideró como alto, ocupando el lugar 52 en el contexto estatal y 520 en el contexto nacional. Seis localidades del municipio presentaron un grado de marginación muy alto y 106 un grado de marginación alto, en estas 112 localidades habitaba el 84 % de la población; el restante presentó un grado de marginación medio o no determinado (INEGI, 2015b).

Por otro lado, el 80.3 % del total de la población (16 650 habitantes) que se encontraban en pobreza, 14 221 presentaron pobreza moderada, mientras que el restante (2 429) presentó pobreza extrema. El rezago social en el municipio se consideró como alto (INEGI, 2015b).

En el año 2015 se registró que el 30.20 % de la población presentó rezago educativo (**Tabla 3.6**), una disminución de casi 9 puntos porcentuales respecto al 2000; tanto este caso como los de: carencia por material de vivienda, por material de techos de la vivienda, por acceso al agua entubada, por servicio de drenaje y por servicio de electricidad fueron mayores en comparación con la media estatal.

Sin embargo, se refleja un impacto positivo de todos los indicadores de carencia comparados con el año 2000, posiblemente debido a la mejor focalización de los recursos y de los programas introducidos en el municipio como Programa de Coinversión Social, Comedores Comunitarias, Programa de Atención a Jornaleros Agrícolas, Programa de empleo Temporal, Programa de Apoyo a la Vivienda, por mencionar algunos.

Tabla 3.6: Carencias sociales y rezago educativo del municipio 2000-2015.

	Municipal (%)		Estatal (%)
	2000	2015	2015
Por acceso a los servicios de salud	90.9	5.7	19.4
Por material de pisos en la vivienda	63.6	9.4	5.7
Por material de muros en la vivienda	0.5	0.2	3.7
Por material de techos de la vivienda	12.3	3.6	1.0
Por hacinamiento en la vivienda	35.5	12.1	12.3
Por acceso al agua entubada en la vivienda	46.9	9.8	6.9
Por servicio de drenaje en la vivienda	90.3	26	10.7
Por servicio de electricidad en la vivienda	14.3	2.6	0.9
Rezago educativo	38.8	30.2	23.2

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (2000, 2015b).

3.1.2.9. Estructura agraria

Propiedad social

En la zona de estudio de acuerdo con el IX Censo Ejidal (INEGI, 2007a) había 24 ejidos y comunidades ubicados en 17 973 ha, lo que equivale a 31.7 % de la superficie de la zona de estudio. De este total de tierras ejidales, 9 151 ha (51 %) eran superficies parceladas de uso agrícola y del 49 % restante (8 514 ha), el 94 % eran tierras de uso común.

Las tierras de uso común, según lo establecido en el artículo 73 de la Ley Agraria (DOF, 1992), son aquellas que constituyen el sustento económico de la vida en comunidad del ejido y están conformadas por aquellas tierras que no fueron reservadas por la Asamblea para el asentamiento del núcleo de población, ni sean tierras parceladas. En este sentido, de las 8 062 ha de uso común, 409 ha eran utilizadas para la agricultura comunitaria, mientras que 1 732 ha eran de vegetación natural de pastos, arbustos, hierbas o matorral aprovechadas para la alimentación del ganado o para actividades de recolección, es decir, son pastos no cultivados usados como agostadero o enmontada.

Unidades de producción Agropecuaria (UPA)

Una Unidad de Producción Agropecuaria (UPA) es un conjunto formado por terrenos con o sin actividad agropecuaria o forestal en el área rural, o bien, terrenos con actividad agropecuaria en un área urbana, ubicados en un mismo municipio (INEGI, 2007b). Dentro de estas UPA se consideran a los animales que se poseen o se crían por su carne, leche, huevo, piel, miel o para trabajo, independientemente del lugar donde se encuentre; así como los equipos maquinarias y vehículos destinados a las actividades agrícolas, pecuarias o forestales.

En este sentido, de acuerdo con el Censo (INEGI, 2007b), en el municipio había 7 607 UPA. De estas, 4 792 unidades tenían actividad agropecuaria o forestal; lo que en superficie representó un total de 22 511 ha. En cuanto al tipo de tenencia de las UPA, 29 793 ha se designaron como tierras de propiedad privada, 14 376 ha del tipo ejidal, 971 ha unidades como tierras comunales, y solo 6 ha públicas.

La superficie total captada por el censo es aquella destinada a cultivos, independientemente de si se realizó o no la siembra, así como las tierras con pastos naturales, de agostadero o enmontada que fueron sembradas al menos una vez en los últimos 5 años. En el municipio, la superficie de labor en la que se

encontraban las UPA fue de 17 344 ha, mientras que 26 338 ha se dispusieron sobre pastos de agostadero o enmontada; 1 802 ha estaban ubicadas sobre bosques y finalmente 1 193 ha eran superficies sin vegetación.

El 98 % de las superficies de labor se registró como agricultura de temporal, en donde se sembraron 14 061 ha con cultivos anuales y perenes. 13 354 ha se sembraron en el ciclo de primavera-verano, con cultivos como frijol, haba, maíz amarillo, maíz blanco, entre otros. 438 ha en el ciclo otoño-invierno con cultivos como avena forrajera, cebada grano, frijol y maíz blanco principalmente. Por último, 259 ha correspondieron a cultivo perenes, entre los que destacan alfalfa verde, café cereza, naranja y pasto cultivado para venta.

La producción obtenida en el ciclo de primavera-verano fue de 30 048 toneladas, con rendimientos promedio principalmente en el maíz blanco (0.79 t ha^{-1}), haba (0.58 t ha^{-1}), maíz amarillo (0.57 t ha^{-1}) y frijol (0.28 t ha^{-1}). El haba presentó rendimientos mayores a la media estatal, la cual tiene reportados para el mismo año 0.53 t ha^{-1} ; mientras que el frijol, el maíz amarillo y el maíz blanco tuvieron rendimientos inferiores a la media estatal en un 31.7, 62.6 y 46.2 %, respectivamente. En el ciclo otoño-invierno, la producción fue de 1 607 toneladas. Principalmente con cultivos como avena forrajera (6.9 t ha^{-1}), cebada grano (0.39 t ha^{-1}), frijol (0.44 t ha^{-1}) y maíz blanco con 0.62 t ha^{-1} . En este ciclo corto, el frijol presentó mejores rendimientos comparado con el de primavera-verano, sin embargo, todos los cultivos tuvieron rendimientos menores comparados con los presentados a nivel estatal. Cultivos como la cebada y el frijol presentaron rendimientos inferiores al 60 % (86.5 y 68.4 %, respectivamente), y en el caso de la avena y el frijol, los rendimientos fueron inferiores en un 40.9 y 18.5 %, respectivamente.

Los cultivos de ciclo largo (perenes), tuvieron una producción de 4 832 toneladas, con rendimientos de 72.39 t ha^{-1} de alfalfa verde, 2.12 t ha^{-1} de café cereza, 9.66 t ha^{-1} de naranja y 4.31 t ha^{-1} de pasto cultivado. Estos cultivos presentaron mejores rendimientos, algunos incluso mayores a la media estatal, como es el caso de la alfalfa verde y la naranja, que presentaron rendimientos a nivel estatal de 72.05 y 9.60 t ha^{-1} , respectivamente. Los rendimientos de los cultivos de café cereza y el pasto cultivado fueron inferiores a la media estatal en un 1.4 y 32.6 %, respectivamente.

De acuerdo con el destino de la producción agrícola, el 95 % lo utilizó para el autoconsumo familiar, 81.9 % para la producción de semilla, 26.9 % para el consumo ganadero y finalmente la venta local, regional o nacional representó el 26.5 % del destino de producción, del cual, menos del 1 % fue al mercado nacional. La tracción utilizada para las actividades agrícolas fue en su mayoría a través de animales de trabajo (72.6 %), en el 22.2 % se utilizó tracción mecánica y animales de trabajo, en el 2.4 % tracción mecánica y en menor medida se utilizaron herramientas manuales (1.2 %).

La ganadería en el municipio es parte de las principales actividades, en el ciclo 2007 contaba con un total de 71,676 animales de granja. Mientras que en las unidades de producción con bosque o selva, se reforestaron 93 ha con 170 880 pinos y 100 encinos, así como 8 011 205 árboles y arbustos de otras divisiones. Del aprovechamiento forestal, se obtuvieron 1712.25 toneladas, de las cuales el 47.4 % era madera en rollo, 40.8 % madera para arrerrijo y 11.6 % leña.

En 4 611 UPA se presentaron problemas para el desarrollo de las actividades por: pérdidas a causa del clima (4 418), pérdida de la fertilidad del suelo (1 303), falta de acceso a créditos para la compra de insumos (842), problemas en la comercialización de sus productos (268), falta de organización (205), falta de infraestructura para el desarrollo de la producción (305); así mismo, 2 010 reportaron problemas por alto costo de insumos y servicios y en 1 201 la problemática se debió a la falta de capacitación.

El origen de los ingresos, en su mayoría provienen de la misma actividad agropecuaria o forestal que realiza el productor, como es el caso de 4 367 UPA; mientras que en 561 unidades, el ingreso es a través de apoyo gubernamental y por último en 175 unidades, el origen es de dinero enviado desde el extranjero por familiares de los productores, ya sea hijos/as, esposos/as, hermanos/as u otro familiar.

3.1.3. Indicadores complementarios

3.1.3.1. Modelo Digital de Elevación (MDE)

Los MDE sirven como archivos base para el análisis de la morfología terrestre que ayudan a generar información sobre otras variables de interés a través de datos de elevación del terreno. Ejemplo de ello son variables como la pendiente, la red de drenaje y otros análisis hidrológicos o superficiales. La pendiente juega un papel importante en la condición del suelo, ya que a mayor pendiente, mayor es la erodabilidad. Así mismo, la degradación de las tierras es exacerbada por la erosión por lo que los atributos del terreno y la profundidad de suelo inciden sobre el rendimiento de los cultivos y la cobertura vegetal.

El municipio de Ixtacamaxitlán presenta un relieve de 1 519 m s. n. m., una elevación mínima de 1 977 m s. n. m., y una máxima de 3 472 ídem. En la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (**Figura 3.15**), se puede observar cómo las altitudes menores dentro del municipio que van de los 2 000 a los 2 300 m s. n. m. corresponden al sistema de topofomas denominado cañón. Mientras que las altitudes mayores corresponden a sierra volcánica.

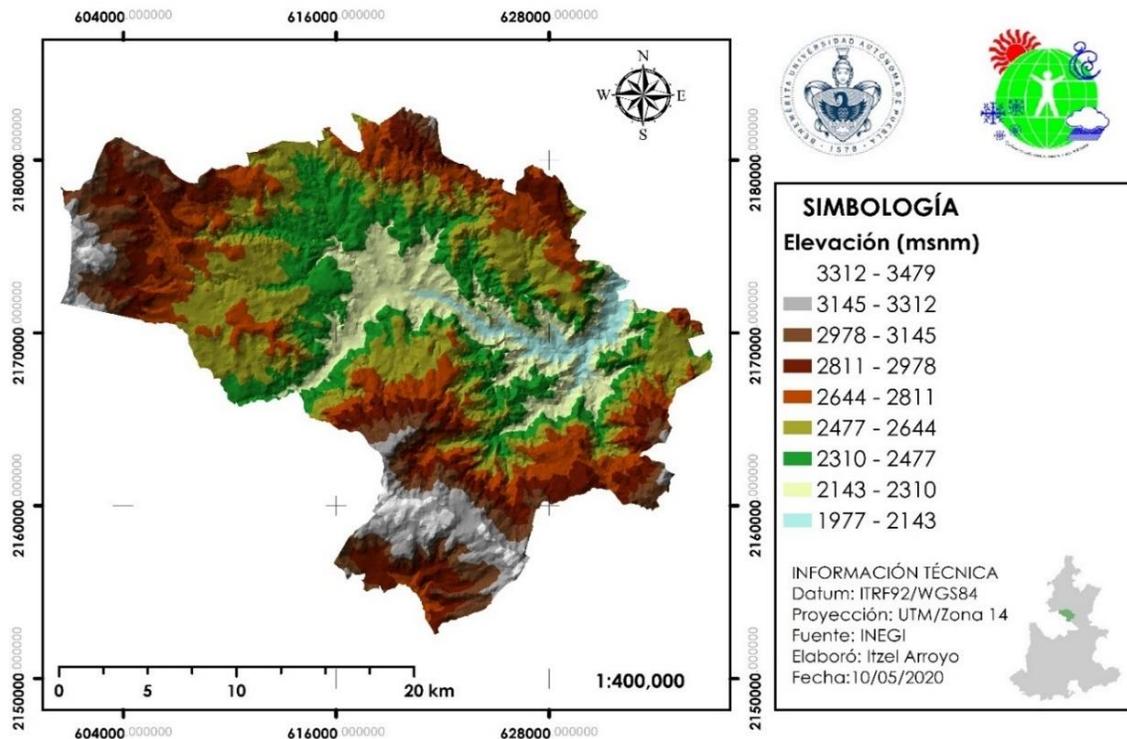


Figura 3.15: MDE del municipio de Ixtacamaxitlán.

3.1.3.2. Pendiente del municipio

La inclinación del terreno constituye un factor importante para determinar la vulnerabilidad del suelo a ser erosionado o degradado, sobre todo en la temporada con precipitaciones más altas, esto debido al arrastre de las partículas y nutrientes del suelo por escorrentía, este problema se ve magnificado por la falta y/o pérdida de la cobertura vegetal. La pendiente media del municipio es de 33.71 %, lo que indica que el tipo de terreno es escarpado y corresponde una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal. La pendiente de la cuenca también tiene importancia y relación con la infiltración y la humedad del suelo.

La distribución espacial de los diferentes grados de pendiente en la superficie del municipio se presenta en la **Figura 3.16**. Las áreas de pendiente llana (0-15 %) se presentan en el 30 % del área de estudio, ubicadas en su mayoría en el centro, centro-oeste del municipio en elevaciones menores a los 2 800 m s. n. m. La distribución más amplia de pendiente se sitúa en el rango que va de 15 a 30 % y es definida como pendiente inclinada. Este tipo de pendiente cubre el 39.9 % de la superficie del territorio y se encuentra en franjas asociadas generalmente al inicio de pendientes mayores.

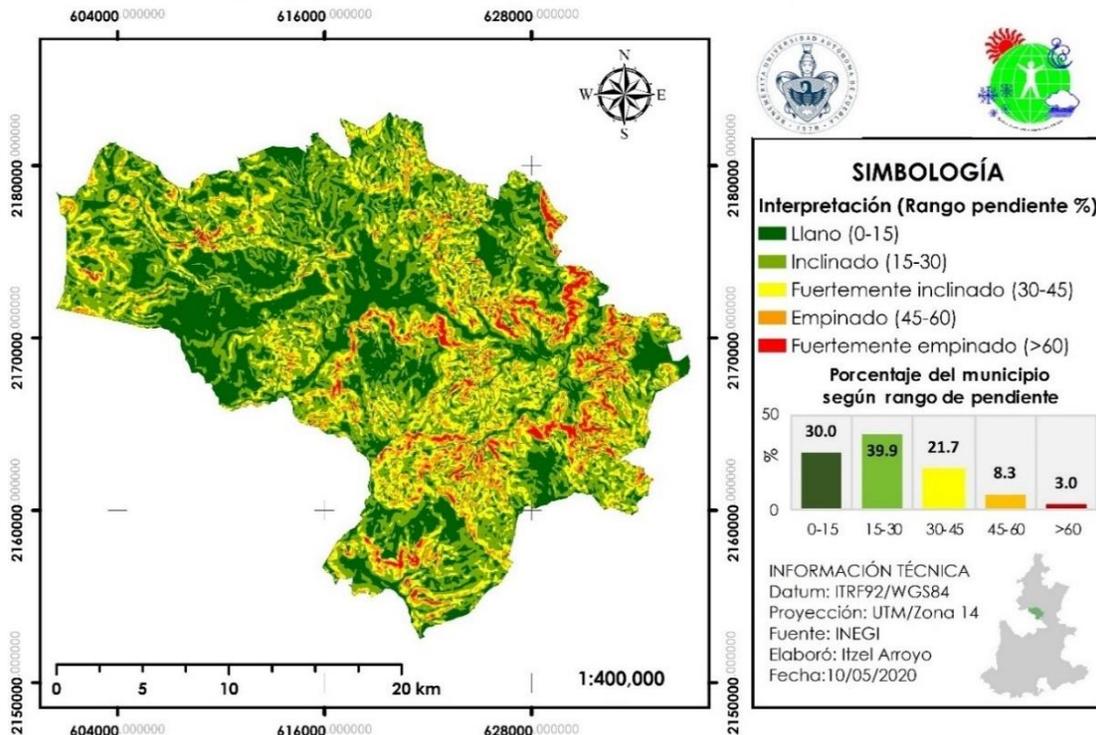


Figura 3.16: Mapa de pendientes y su distribución total sobre el municipio de Ixtacamaxtitlán.

Las áreas de pendiente fuertemente inclinada (30 a 45 %), cubren el 21.7 % del municipio, y se encuentran ubicadas al centro-sur y al centro-oeste del municipio, donde la altura sobrepasa los 2 800 m s. n. m., al igual que el tipo de pendiente empinada, la cual cubre el 8.3 % del municipio. Finalmente el rango de pendiente que sobrepasa el 60 % definida como fuertemente empinada presenta un porcentaje de distribución sobre el territorio de 3 % y se ubica al noroeste y al centro, centro-sur del municipio en laderas y escarpes donde el relieve es más discontinuo y abrupto.

3.1.3.3. Erosión Potencial Hídrica

Uno de los procesos que promueven la degradación de las tierras es la degradación del suelo debido a la erosión hídrica, esta depende de diversos factores como la pendiente, el clima y la cobertura del suelo. Los factores que determinan la tasa de erosión potencial muestran valores que favorecen la erosión hídrica en Ixtacamaxtitlán.

La erosividad de la lluvia en el municipio oscila entre 1 855 a 3 965 MJmm ha⁻¹ h con una media de erosividad para el municipio de R = 2 908 MJmm ha⁻¹ h, considerada como erosividad moderada (Vega & Febles, 2008). La erodabilidad (K) por su parte oscila entre 0.019 y 0.031 t ha h⁻¹ ha MJ, siendo el valor medio

del territorio de $K = 0.026 \text{ t ha h}^{-1} \text{ ha MJ}$ lo que es considerado como erodabilidad media, es decir suelos medianamente susceptibles a la remoción. En cuanto a la longitud y grado de la pendiente, esta tuvo valores que van desde < 1 hasta 297.

La erosión potencial hídrica presenta una tasa de pérdida de suelo con valores mayores a $250 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que se observan en las zonas altas del municipio, así como en zonas donde se observan mayores escurrimientos y pendientes (**Figura 3.17**).

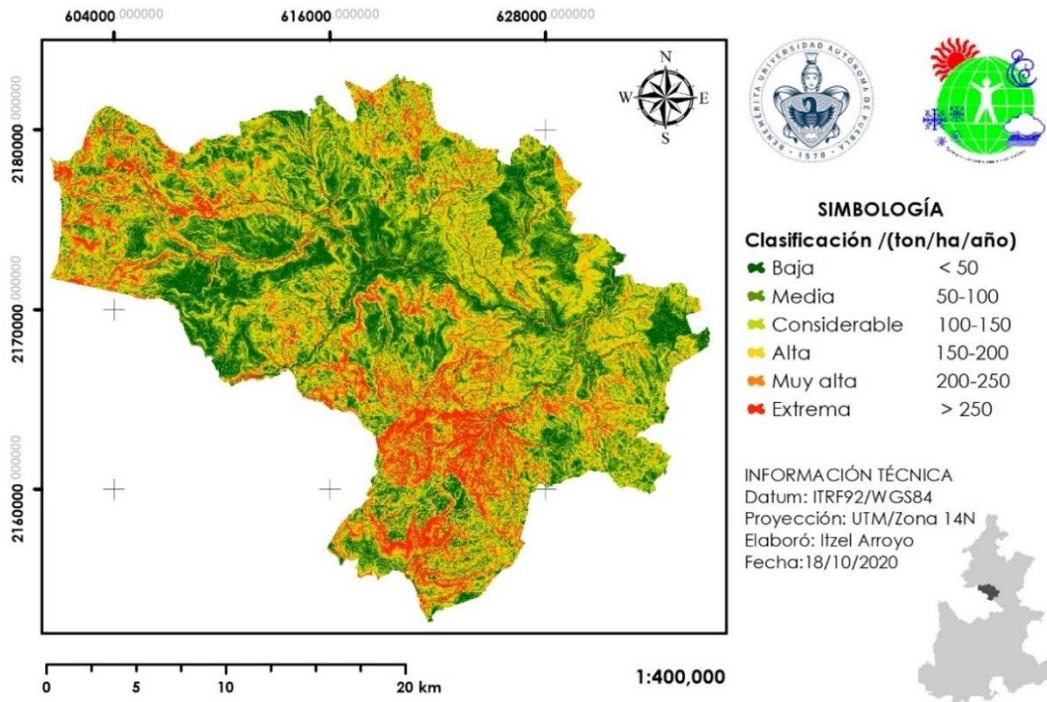


Figura 3.17: Mapa de Erosión Potencial Hídrica sobre el municipio de Ixtacamaxitlán.

Gran parte del municipio presenta erosión hídrica potencial media y considerable (entre 50 y $150 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (**Tabla 3.7**). Si se considera que un 1 mm de suelo es igual a 10 t ha^{-1} de suelo, hay zonas en el territorio municipal que podrían perder una capa de 5 a 15 mm de suelo. En otras palabras, si se perdiera toda la cobertura vegetal de la zona y no existieran prácticas de conservación, la tasa de pérdida de suelo sería mayor a la tasa permisible, que en algunas regiones de México es de $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Tabla 3.7: Cobertura de las categorías de Erosión Potencia Hídrica.

Categoría	Rango ($\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Área	
		(km^2)	(%)
Baja	< 50	101.90	17.99
Media	50-100	135.63	23.94
Considerable	100-150	127.93	22.58
Alta	150-200	95.07	16.78
Muy alta	200-250	55.55	9.81
Extrema	> 250	50.42	8.90

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.4. Densidad de drenaje

El municipio de Ixtacamaxtitlán presenta cauces hasta del orden número 6, lo que indica que existen varias ramificaciones en la red de drenaje, por lo que es probable que exista un mayor potencial erosivo, así como un mayor transporte de sedimentos.

Hay presentes 1 154 escurrimientos con cauces del orden uno hasta el orden 6 los cuales tienen una longitud total de 1 047 km. La longitud del cauce principal es de 45 km y recorre el municipio por el centro.

La densidad de drenaje (Dd) presentó un valor medio de 1.84 km/km² lo que refleja una red de drenaje eficiente; sin embargo, también refleja una fuerte escorrentía que puede contribuir a la erosión y arrastre de sedimentos. Las clases de Dd presentes en el municipio van de muy baja hasta muy alta (**Figura 3.18**). Los valores más altos se observan en donde hay pendientes mayores al 30 %.

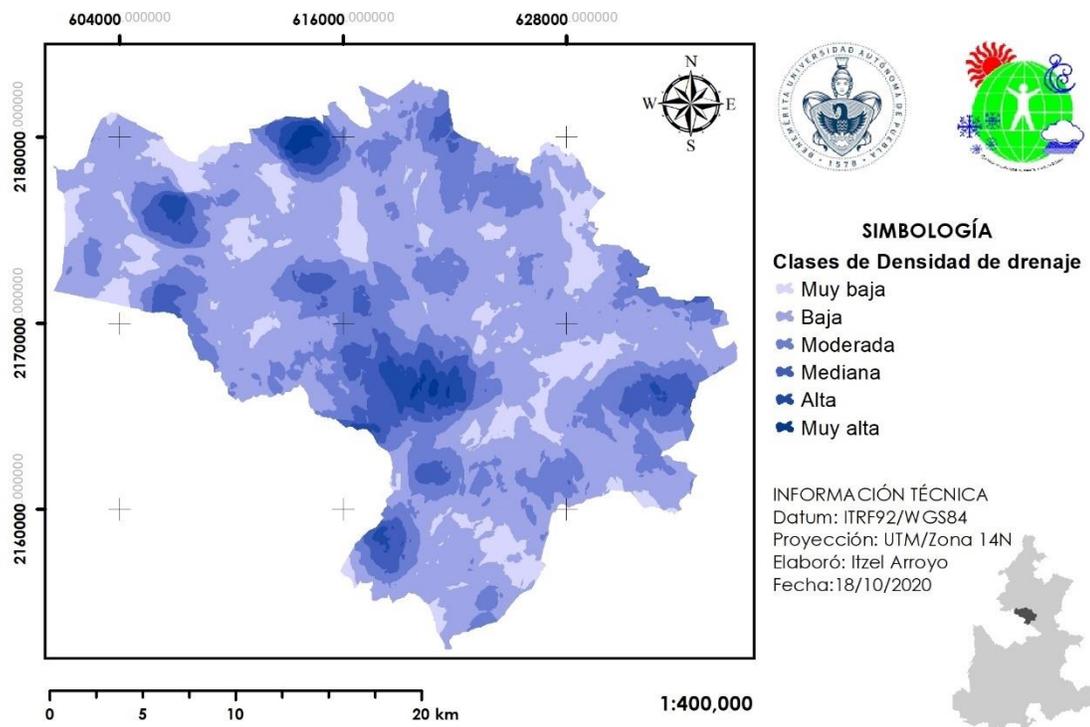


Figura 3.18: Mapa de Densidad de drenaje de Ixtacamaxtitlán.

La clase de Dd que mayor cobertura tiene en la superficie es la de baja, presente en más del 54 % del municipio como se puede observar en la **Tabla 3.8**, seguida de Dd moderada en el 23.1 %. Empero, existen áreas que superan los 4 km/km² considerados como altos y muy altos, las cuales podrían estar promoviendo una mayor escorrentía y generación de sedimentos ya que originan respuestas geomórficas rápidas a eventos de perturbación.

La cobertura vegetal y el uso del suelo influyen en la densidad del drenaje ya que una escasa cobertura deja al suelo expuesto a eventos hidrometeorológicos que promueven la erosión y la disección de paisaje, lo que a su vez favorecería un aumento de la densidad de drenaje (Gaspari *et al.*, 2012).

Tabla 3.8: Cobertura de las categorías de Densidad de drenaje.

Clases	Rango (km/km ²)	Área (km ²)	Área (%)
Muy baja	0-1	64.9	11.4
Baja	1.01-2	310	54.6
Moderada	2.01-3	131.1	23.1
Mediana	3.01-4	44.2	7.8
Alta	4.01-5	14.8	2.6
Muy alta	>5	2.6	0.5

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.5. Fenómenos hidrometeorológicos

El municipio ha presentado diversos fenómenos de origen natural a lo largo del periodo de estudio, en este sentido se han emitido declaratorias de contingencia, emergencia y desastre debido a la afectación que han tenido los diversos fenómenos hidrometeorológicos en el sector agrícola, pecuario, forestal y en las viviendas e infraestructura del municipio.

Los fenómenos más recurrentes son frentes fríos, ciclones tropicales, nevadas, heladas, granizadas, así como ciclones tropicales. Las heladas han afectado al municipio en los años 2004, 2011 y 2013 mientras que una fuerte afectación se dio en el 2007 debido al huracán “Dean”, el cual provocó deslaves y derrumbes; así mismo, en 2011 se declaró emergencia por lluvias intensas que provocaron inundaciones y pérdidas de cultivos (SEDESOL, 2012). Sin embargo, el fenómeno que se han presentado en mayor medida en el municipio es la sequía. De acuerdo con el Monitor de Sequia en México del Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN, s.f.), el municipio de Ixtacamaxtitlán ha presentado categorías que van desde anormalmente seco hasta sequia severa (**Tabla 3.9**).

Tabla 3.9: Periodos de sequía en el municipio de Ixtacamaxtitlán.

Año	Mes	Categoría de sequía
2002	Agosto	Sequia atípica*
2003	Enero a julio	Anormalmente seco
2004	Noviembre y diciembre	Anormalmente seco
2005	Abril, julio, septiembre, noviembre y diciembre	Anormalmente seco
2006	Enero, febrero, mayo, junio- agosto, octubre	Anormalmente seco
	Marzo, abril,	Sequia moderada
2007	Marzo, abril	Anormalmente seco
	Julio	Sequia moderada
2008	Abril, junio-agosto	Anormalmente seco
	Mayo, septiembre- diciembre	Sequia moderada
2009	Enero-octubre	Sequia moderada
	Noviembre, diciembre	Anormalmente seco
2011	Abril, julio, agosto	Sequia moderada
	Mayo, junio	Sequia severa
2013	Febrero	Anormalmente seco

**Declaratoria de Sequia atípica considerada como desastre.*

Fuente: Elaboración propia con información de SMN (s.f.) y SEDESOL (2012).

La sequía con estas categorías afecta directamente las actividades productivas, causando retraso en la siembra de los cultivos anuales; un crecimiento limitado, daño o pérdida total de pastizales y cultivos; déficit de agua, disminución de los caudales de flujos y escasez de agua (SMN, n.d.).

Aunado a esto, las sequías provocan una mayor vulnerabilidad a incendios forestales; en este sentido, de acuerdo con la información de los Anuarios Estadísticos del Estado de Puebla (INEGI, 2012, 2013, 2014a) en el periodo de 2011 a 2013 se presentaron un total de 21 incendios forestales que afectaron una superficie de 573 ha de árboles, pastos y matorrales.

3.1.3.6. Conflictos socioambientales

En 2003 el gobierno federal, a través de la Secretaría de Economía otorgó tres concesiones mineras a la compañía canadiense Almaden Minerals y a sus subsidiarias mexicanas Minera Galván y Minera Gorrión, las cuales tendrán una vigencia de 50 años. El proyecto se encuentra ubicado en la zona noroeste del municipio de Ixtacamaxtitlán (**Figura 3.19**) a solo tres kilómetros de la localidad de Santa María Zotoltepec, ubicada en la cabecera de la cuenca del río Apulco.

Hasta el cierre de la presente investigación se encuentra en etapa de exploración avanzada, sin embargo, existen diversas ilegalidades documentadas por distintas organizaciones, entre ellas la Unión de Ejidos y Comunidades en Defensa de la Tierra, el Agua y la Vida (Arellano, 2017). Una de estas irregularidades es que la minera ha ocultado información sobre la invasión de tierras en la localidad nahua de Tecoltemic (Rappo et al., 2015). Así mismo, la empresa ha comenzado con la perforación de pozos y extracción de agua sin previa autorización y sin que las autoridades correspondientes intervengan ante tal hecho (EIDH, 2017).

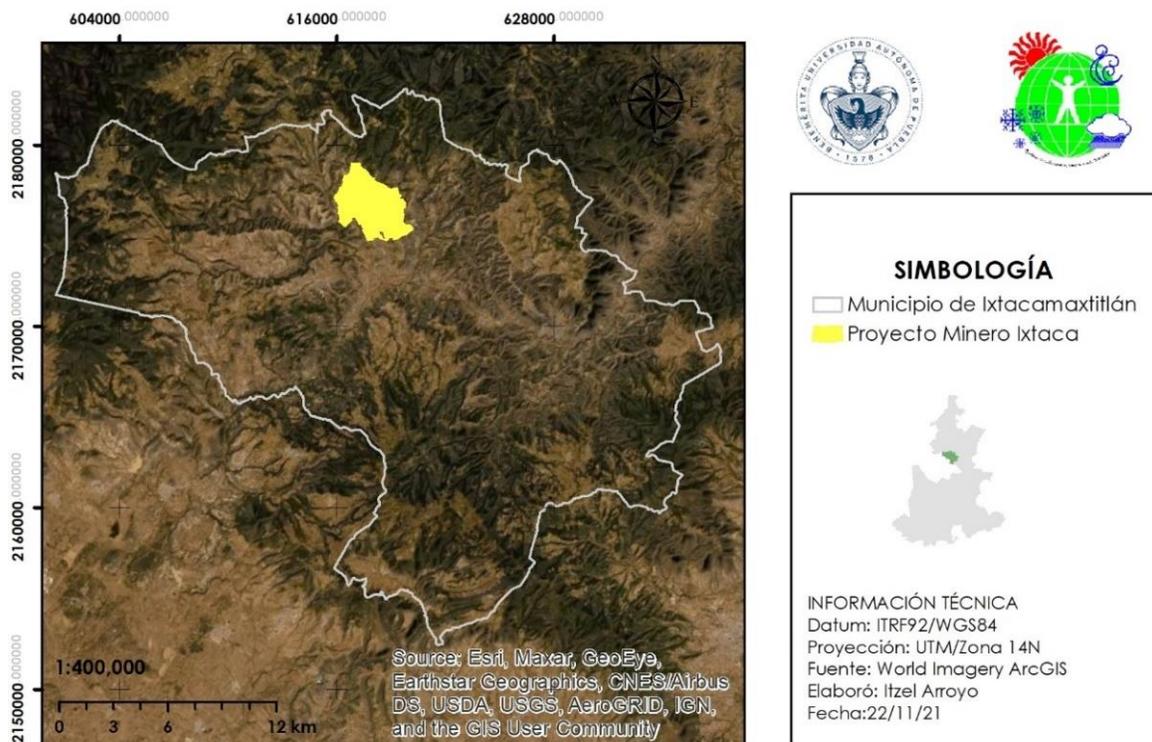


Figura 3.19: Ubicación y polígono del proyecto minero "Ixtaca"

De acuerdo con la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) de “Proyecto de explotación y beneficio de minerales Ixtaca” (CAM, 2018) el proyecto tiene por objeto el aprovechamiento de minerales con contenido de oro y plata, mediante el desarrollo de un tajo abierto con una superficie de 133 ha, sin embargo, el área ocupada por la minera tendrá una superficie total de 1 049 ha.

Los impactos al ambiente son amplios ya que afecta a todos los compartimientos ambientales (suelo, agua y aire), la flora, fauna y al humano (EIDH, 2017); así mismo provoca un riesgo de degradación y contaminación en tierras de cultivo a causa de las 38 mil toneladas de explosivos que la minera pretende utilizar para la extracción de dichos materiales a una profundidad de 700 m, así como la acumulación de jales provenientes de la lixiviación de materiales por medio de cianuro.

En el documento “Minería Canadiense en Puebla y su impacto en los derechos humanos. Por la vida y el futuro de Ixtacamaxtitlán y la Cuenca del Río Apulco” (EIDH, 2017), se menciona que al final de la vida útil de la minera, la cual está calculada a 14.5 años, se dejará un tajo de aproximadamente 1 000 metros de diámetro ya que de acuerdo con la MIA del Proyecto “Ixtaca”, se procesarán 7 500 toneladas por día para la extracción de 49.7 millones de onzas de oro y plata, equivalente a más de 20 mil millones de dólares de los cuales, menos del 1 % llegará al municipio (**Figura 3.20**). La información sobre la minera es desconocida para los pobladores del municipio (EIDH, 2017) ya que el 90 % de la población cercana a la minera no conoce los impactos por lo que no están al tanto de la magnitud de los efectos negativos que trae consigo la minera, no sólo a nivel local, sino regional y nacional.



Figura 3.20: Folleto entregado a la población por parte de la subsidiario Minera Gorrión

3.2. 01. LÍNEA BASE DEL MUNICIPIO.

3.2.1. Cambios en la Cubierta Terrestre (2000-2015)

El cambio en cubierta terrestre es uno de los factores más importantes implicados en problemáticas ambientales como el cambio climático, ya que genera procesos de transformación y una marcada afectación a los servicios ecosistémicos; así mismo, es una primera indicación del cambio en la cubierta vegetal, que, en cierto sentido, actúa como un sustitutivo del uso subyacente que se le da a la tierra, de la conversión de las tierras y de la resultante fragmentación del hábitat (Orr *et al.*, 2017).

Las clases de cubierta terrestre pertenecientes al municipio obtenidas a través de los mapas proporcionados por la Agencia Espacial Europea (CCI-LC, ESA) se presentan en la **Tabla 3.10** y se encuentran recategorizadas a las clases propuestas por la Convención de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, 2018).

Tabla 3.10: Correspondencia entre las clases de CCI-LC, ESA y las clases de LC presentes en la zona de estudio.

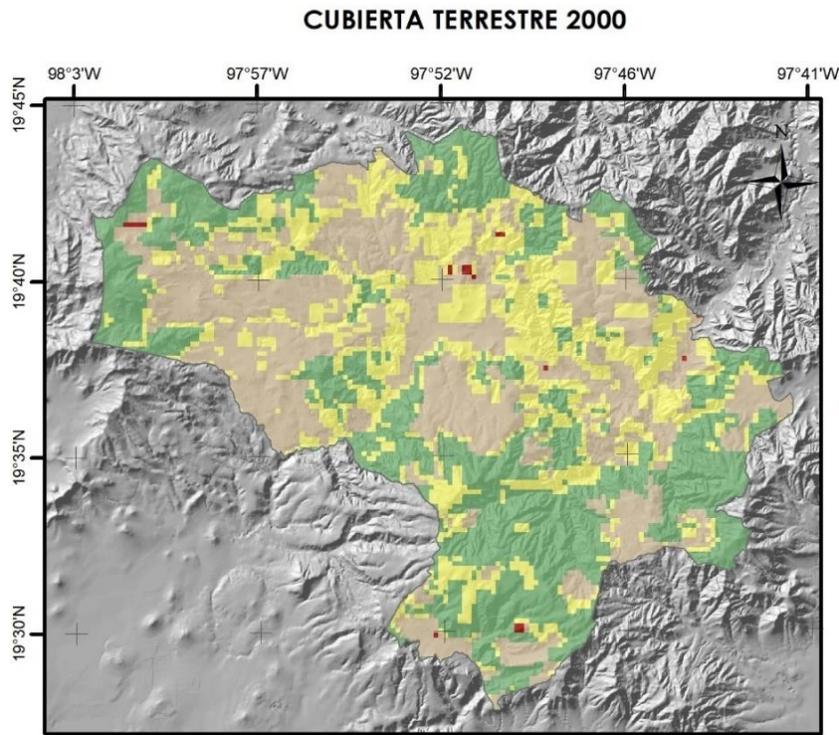
Denominación UNCCD	Código UNCCD	Código CCI-ESA	Denominación CCI-ESA
Superficies arboladas	1	60	Cobertura arbórea, hoja ancha, caduca, cerrada a abierta (>15 %)
		70	Cobertura arbórea, hoja acicular, perenne, cerrada a abierta (>15 %)
		90	Cobertura arbórea, hojas mixtas (ancha y acicular)
Pastizales	2	120	Monte bajo
		130	Pastizales
Zonas de cultivo	3	11	Cobertura herbácea
		40	Mosaico en vegetación natural (cobertura arbórea, arbustiva y herbácea) (>50 %) / tierras de cultivo (<50 %)
Superficies artificiales	4	190	Áreas urbanas

Fuente: Elaboración propia con información de UNCCD (2016b, 2018).

La distribución de las categorías de cubierta terrestre sobre el territorio municipal en el año 2000 y la distribución perteneciente a 2015 se pueden observar en la **Figura 3.21**. Las superficies arboladas con una mayor extensión se ubicaron en pendientes mayores a 50 % de inclinación, a alturas superiores a los 2 700 m s. n. m. y de difícil acceso, distribuidas hacia el centro-sur del municipio, con fragmentos al norte y noreste.

En el caso de las áreas de cultivo y los pastizales su presencia se encuentra marcada en zonas con pendientes menores al 25 % y altura menor a 2 500 m s. n. m., así como en la planicie ubicada al centro del municipio, sin embargo; en general, hay fragmentos de estas áreas en todo el territorio.

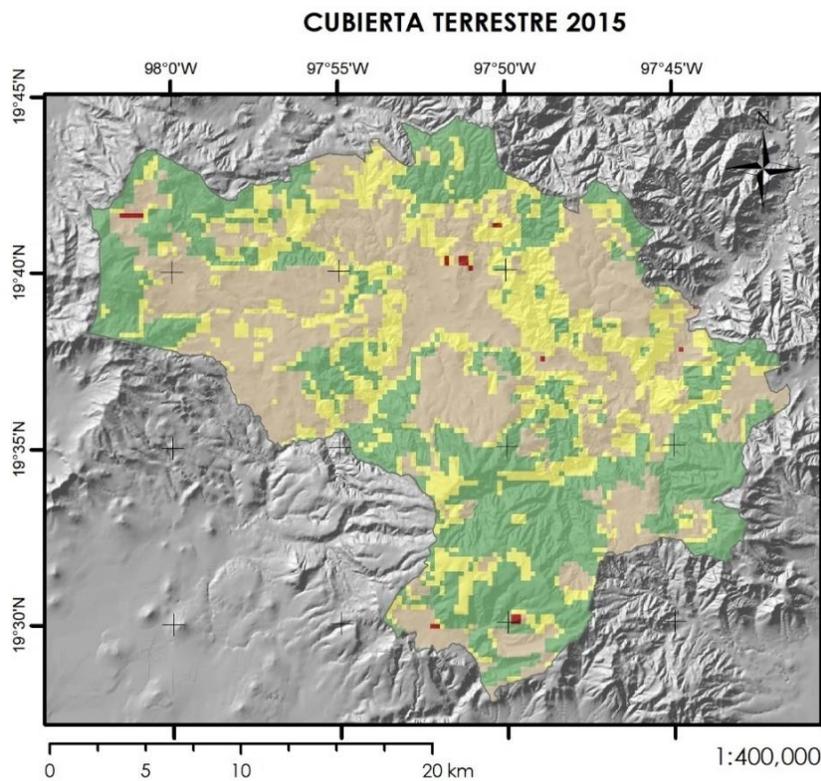
Si bien los cambios no son notables, se muestra una disminución en el área de los pastizales y pequeños aumentos en las superficies artificiales.



LEYENDA

Categoría

- Superficies arboladas
- Pastizales
- Tierras de cultivo
- Superficies artificiales



INFORMACIÓN TÉCNICA
 Datum: WGS84
 Proyección: UTM/Zona 14
 Fuente: ESA-LC
 Elaboró: Itzel Arroyo
 Fecha: 12/11/19



Figura 3.21: Distribución espacial de las categorías de CT sobre el territorio municipal 2000 y 2015.

La estimación del aumento o disminución de cada clase de cubierta terrestre del periodo 2000 a 2015 se muestran en la **Tabla 3.11**. Los datos indican que la mayor pérdida se presentó en la CT de pastizales con 13.96 km², mientras que la mayor ganancia se observó en la CT de tierras de cultivo con 14.15 km². La categoría de superficies arboladas presentó una pérdida menor a 1 km² (-0.26 km²), por otro lado, el aumento en superficies artificiales no exhibió mayor crecimiento (0.06 km²).

Tabla 3.11: Estadísticas anuales de CT y cambios netos de la superficie entre 2000-2015.

Año	Cubierta terrestre (km ²)			
	Superficies arboladas	Pastizales	Tierras de cultivo	Superficies artificiales
2000	207.61	153.44	205.26	1.36
2001	206.63	152.93	206.76	1.36
2002	206.63	152.93	206.76	1.36
2003	206.31	153.12	206.88	1.36
2004	206.31	153.12	206.88	1.36
2005	206.50	153.06	206.76	1.36
2006	207.94	151.68	206.69	1.36
2007	208.10	151.57	206.64	1.36
2008	208.60	146.46	211.26	1.36
2009	208.60	145.99	211.73	1.36
2010	208.60	141.74	215.98	1.36
2011	208.60	139.74	217.98	1.36
2012	207.72	139.49	219.10	1.36
2013	207.35	139.49	219.48	1.36
2014	207.35	139.49	219.48	1.36
2015	207.35	139.49	219.41	1.42
Cambio (km²)	-0.26	-13.96	+14.15	+0.06

Fuente: Elaboración propia.

La distribución en términos porcentuales de cada categoría de CT presente en el municipio en el año 2000 fue mayor para las zonas de superficies arboladas (**Figura 3.22**) y a pesar de que no presentó una disminución significativa, para 2015 la mayor presencia de CT fue la de tierras de cultivo, convirtiéndose en la categoría con mayor distribución espacial al final del periodo de estudio (**Figura 3.23**).

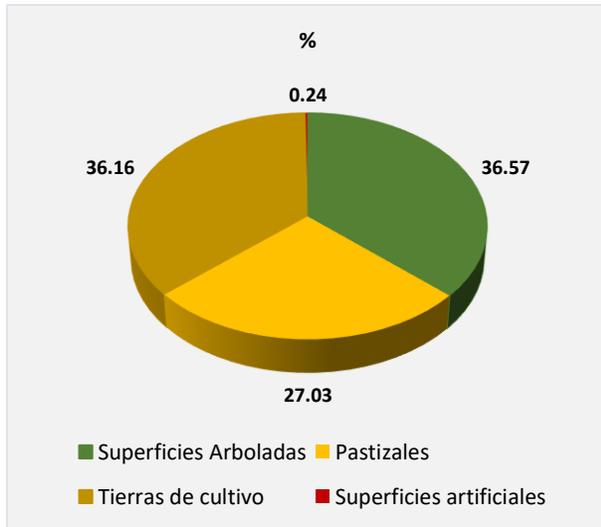


Figura 3.22: % de CT del año 2000, Ixtacamaxtitlán.
Fuente: Elaboración propia.

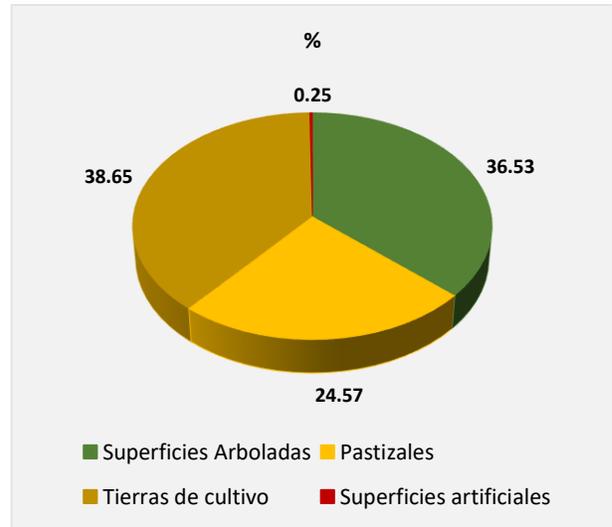


Figura 3.23: % de CT del año 2000, Ixtacamaxtitlán.
Fuente: Elaboración propia.

La tendencia anual de los cambios (**Figura 3.24**) presentes en el municipio mostró una marcada ganancia de tierras de cultivo principalmente en los años de 2001, 2008, 2010, 2011 y 2012. Es solo en el año 2005 donde se observó una pérdida de esta categoría (menor a 0.5 km²).

La pérdida de pastizal mayor a 1 km² se presentó en casi los mismos años (2006, 2008, 2010 y 2011) cuando se obtienen ganancias de tierras de cultivo o de superficies arboladas. Otras ganancias de superficies arboladas menores se presentaron en los años 2005, 2007 y 2008.

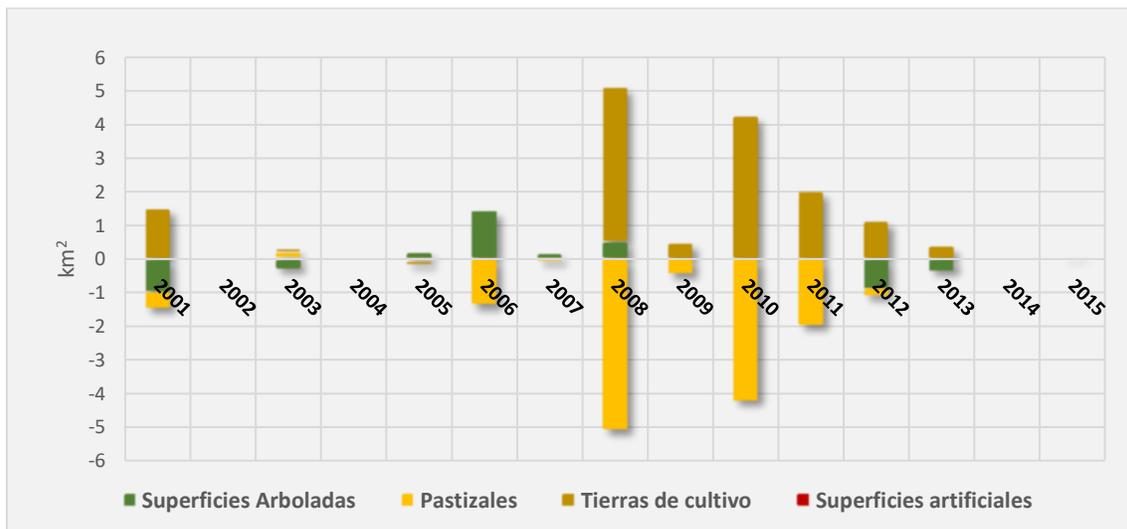


Figura 3.24: Tendencia anual de los cambios en CT en el municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.
Fuente: Elaboración propia.

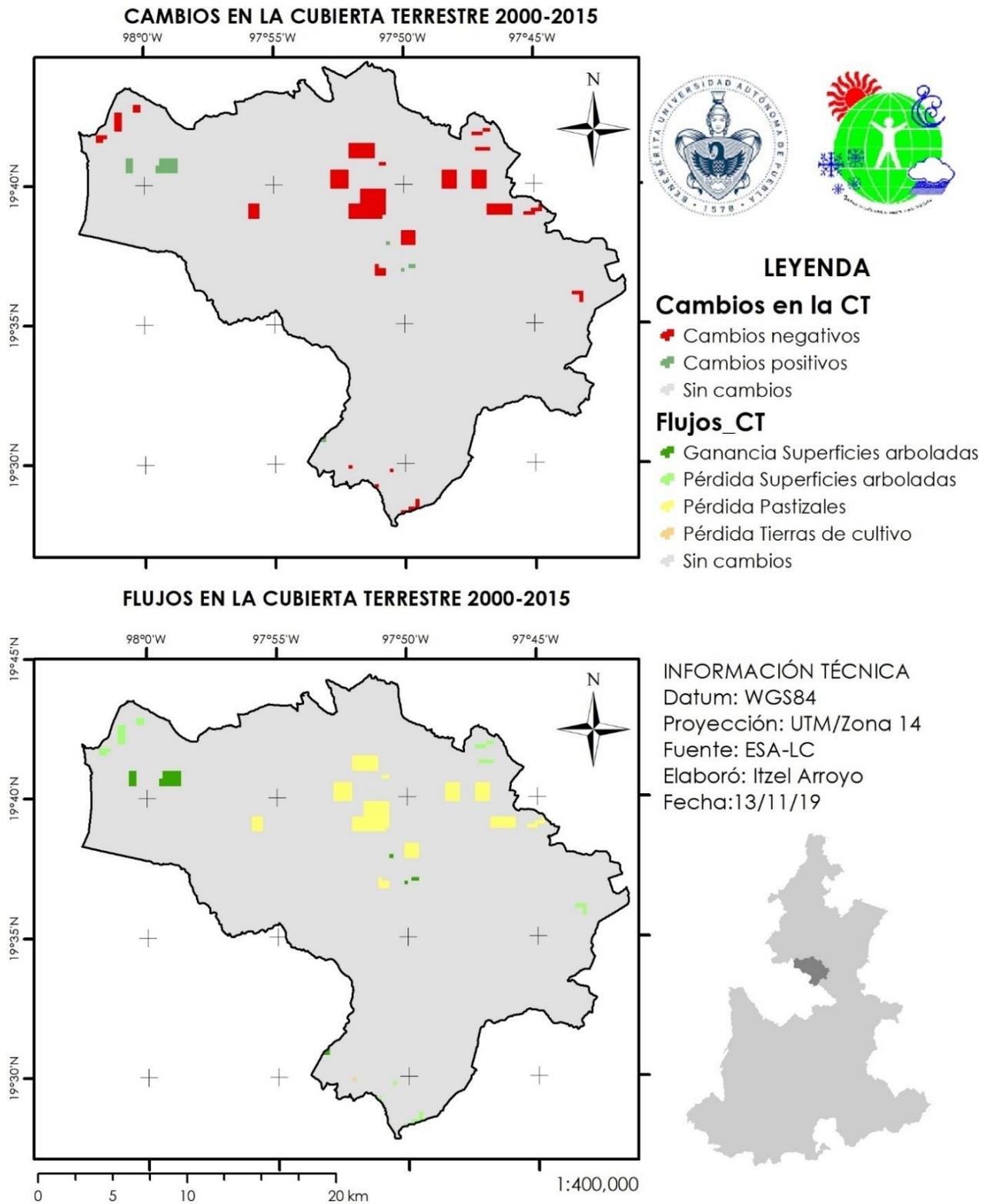


Figura 3.25: Distribución espacial de cambios en la CT y flujos en la CT sobre el territorio municipal 2000-2015.

En la **Figura 3.25** se observa el mapa de cambios y flujos que se presentaron sobre el territorio municipal en el periodo de estudio (2000-2015). Los cambios fueron tanto positivos como negativos y fueron considerados de acuerdo con el paso de una categoría a otra con base en los criterios de la **Figura 3.26**. Por otro lado, los flujos, fueron considerados como ganancias o pérdidas por categoría de CT.

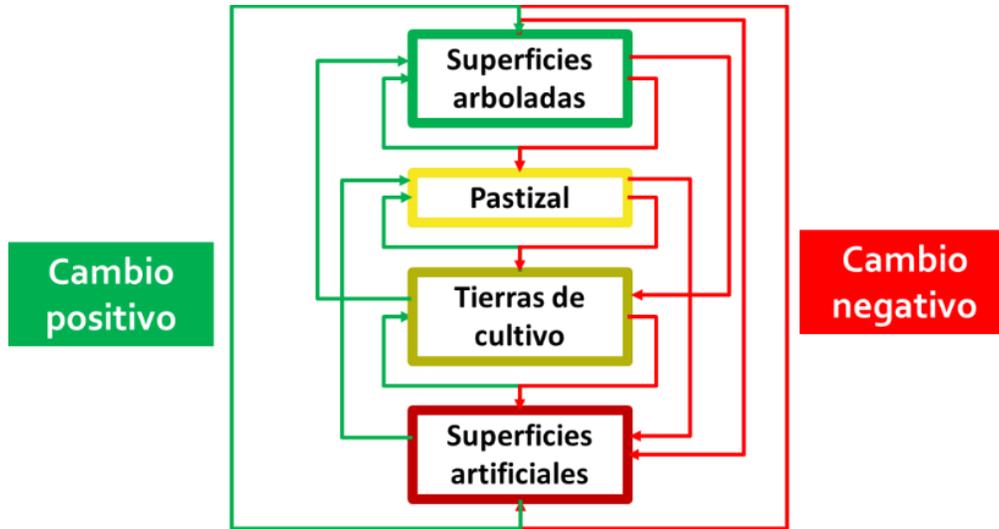


Figura 3.26: Diagrama de cambios de CT presentes en el municipio (2000-2015).
Fuente: Elaboración propia con información de SEMARNAT (2014).

Los cambios negativos que se presentaron dentro del municipio del año 2000 al 2015 fueron en total 16.69 km², mientras que los cambios positivos sumaron un total de 2.28 km². La superficie que no presentó cambio, es decir, que permaneció estable en el periodo de estudio fue de 548.70 km².

Los datos se ordenaron en una matriz donde se puede observar el paso de una clase de CT a otra entre el año inicial y el año final de la línea base. La matriz de cambios de la superficie (**Tabla 3.12**) expresa los datos de tabulación cruzada entre las clases de CT en 2000 y 2015, y muestra la superficie total de tierra en km² asociada con cada cambio. En esta matriz, la suma de las celdas de cada fila, sin tomar en cuenta la diagonal o celda sombreada, representa las reducciones totales por categoría; mientras que la suma de celdas en cada columna, sin tomar en cuenta la diagonal o celda sombreada representa los incrementos totales por categoría.

El mayor incremento se observó en las tierras de cultivo con 15.58 km², seguida de las superficies arboladas con 2.28 km². Las categorías con menor incremento en el periodo de estudio fueron los pastizales y las superficies artificiales con 1.05 y 0.06 km², respectivamente. Las reducciones totales por categorías de mayor a menor fueron 15.01 km² de pastizales, 2.54 km² de superficies arboladas y 1.43 km² de tierras de cultivo.

Respecto a las ganancias o pérdidas, éstas se refieren al cambio positivo o negativo por categoría, respectivamente, tomando en cuenta los criterios descritos en la figura 3.26. Por ejemplo, en el caso de los pastizales su incremento total fue de 1.05 km², y es registrado como pérdida ya que tal área de superficies arboladas cambio a pastizal.

Tabla 3.12: Matriz de Cambios de la Superficie 2000-2015.

		CT 2015 (km ²)				Reducción	Pérdida
		Superficies Arboladas	Pastizales	Tierras de cultivo	Superficies artificiales		
CT 2000 (km ²)	Superficies Arboladas	205.06	1.05	1.49	0.00	2.54	2.54
	Pastizales	0.92	138.44	14.09	0.00	15.01	14.09
	Tierras de cultivo	1.37	0.00	203.83	0.06	1.43	0.06
	Superficies artificiales	0.00	0.00	0.00	1.36	0.00	0.00
Incremento		2.28	1.05	15.58	0.06	Sin cambios	
Ganancia		2.28	0.00	0.00	0.00		

Fuente: Elaboración propia.

Así, la reducción total por categoría también puede significar la pérdida o ganancia de otra, en el caso de las superficies arboladas siempre su reducción será considerada como pérdida, mientras que en el caso de los pastizales, si su reducción significa el incremento de las superficies arboladas, el cambio será ganancia para esta superficie, lo que en este caso significa que 0.92 km² de los 15.01 km² totales de reducción de pastizal fueron en realidad ganancias de Superficies arboladas.

En cuanto a las zonas de cultivo, de los 1.43 km² que se redujeron, solo 0.06 km² son pérdidas para esta categoría, el restante se consideró como ganancia para las superficies arboladas o los pastizales. En resumen, los cambios y flujos que se dieron en el periodo de 2000 a 2015 se pueden observar en la **Tabla 3.13**.

Tabla 3.13: Cambios y flujos en la CT 2000-2015 (km²).

	Superficies Arboladas	Pastizales	Tierras de cultivo	Superficies artificiales
Cubierta terrestre inicial (2000)	207.61	153.44	205.26	1.36
Incrementos de la cubierta terrestre	2.28	1.05	15.58	0.06
Reducciones en la cubierta terrestre	2.54	15.01	1.43	0.00
Cubierta terrestre final (2015)	207.35	139.49	219.41	1.42
Incrementos o reducciones totales	-0.26	-13.96	14.15	0.06
Ganancias	2.28	0.00	0.00	0.00
Pérdidas	2.54	14.09	0.06	0.00

Fuente: Elaboración propia.

El análisis comparativo entre los puntos validados y el mapa de CT de 2015 mostró una precisión del 85.64 % y un error del 14.36 %, de un total de 564 puntos evaluados (**Tabla 3.14**).

Si bien la resolución espacial puede perder algunos de los detalles importantes para niveles estatales y municipales (subnacionales), el conjunto de datos de CCL-LC de ESA presentó un buen nivel de precisión a escala municipal, ya que rebasa el porcentaje mínimo permitido para la validación cartográfica, la cual corresponde a 80 % (Camacho-Sanabria *et al.*, 2017; Emanuelli *et al.*, 2017) y que, en el caso de los Series de Uso de suelo y vegetación de INEGI ubican su precisión a escala nacional entre 74 y 89 % (Mas *et al.*, 2009).

Estadístico	Conteo
Aciertos	483
Desaciertos	81
Total de puntos	564
Precisión (%)	85.64
Error (%)	14.36

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Dinámica de la Productividad de la Tierra (2000-2015)

De acuerdo con el valor promedio anual de NDVI obtenido para el territorio municipal, se observó una tendencia significativamente positiva ($p=0.000$) a lo largo del periodo de estudio. En el año 2000, el valor promedio de NDVI fue de 0.43 (**Figura 3.27**), presentando un valor mínimo de 0.18 y máximo de 0.76; mientras que en el 2015, su valor promedio fue de 0.54, con un valor mínimo de 0.21 y un máximo de 0.83.

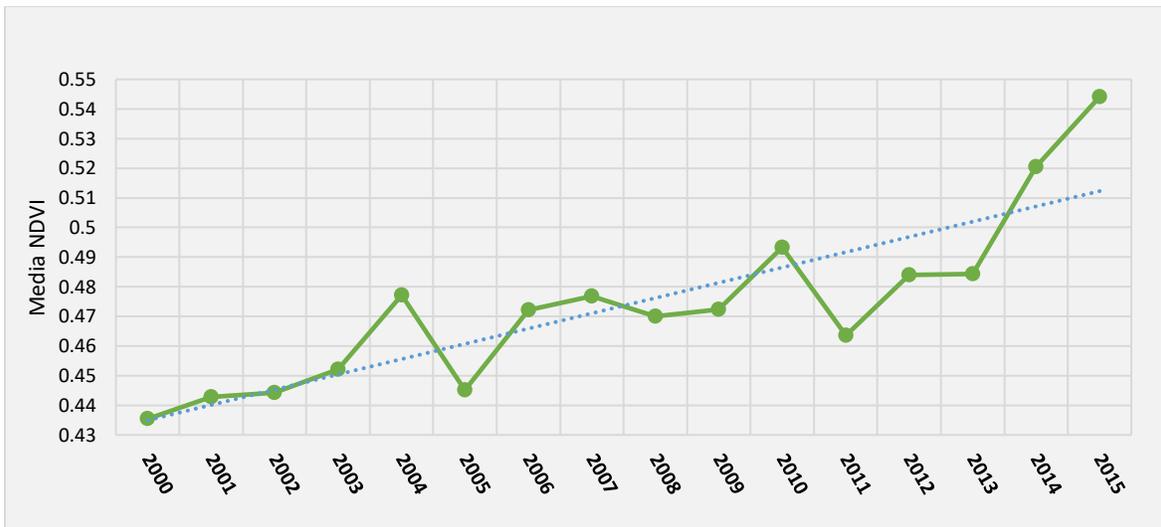
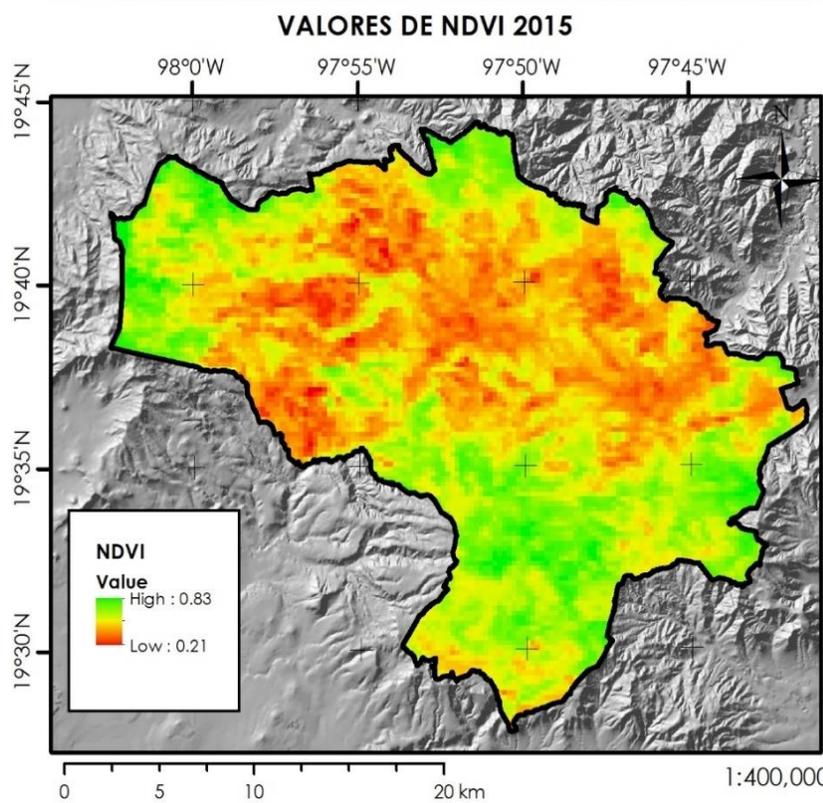
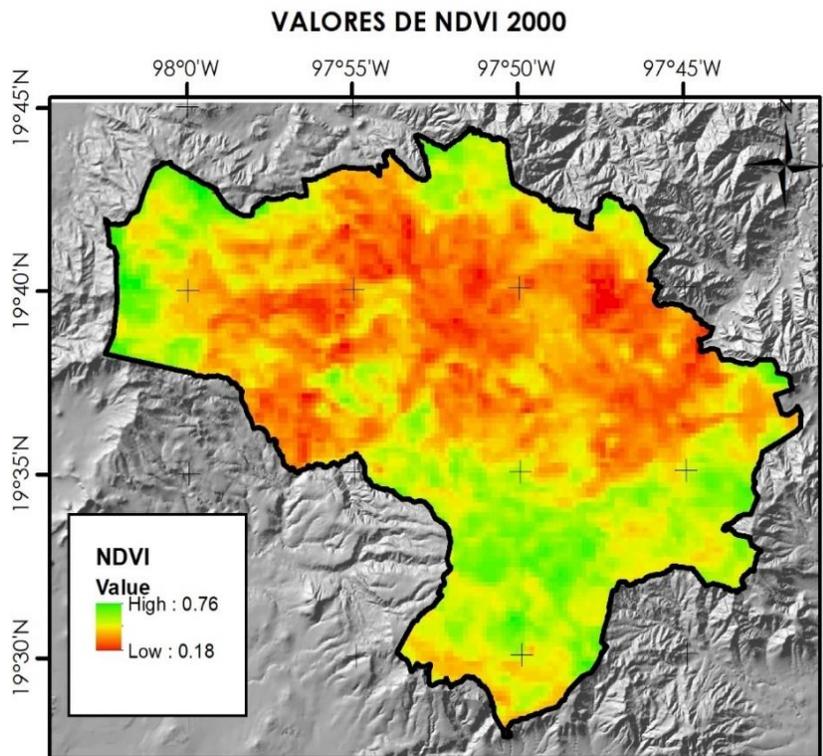


Figura 3.27: Tendencia anual promedio de NDVI en el municipio de Ixtacamaxitlán 2000-2015.

La línea punteada representa un ajuste lineal ($p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

La distribución espacial de NDVI para los años 2000 y 2015 se muestra en la **Figura 3.28**, en donde se observa que los valores menores de NDVI para cada año se presentaron en el centro del municipio, superficie en la que existe mayor densidad de tierras de cultivo y pastizales. Los valores más altos de NDVI se presentaron en las regiones montañosas del municipio, a alturas mayores a los 2500 m s. n. m. y con una mayor distribución de superficies arboladas.



INFORMACIÓN TÉCNICA
 Datum: WGS84
 Proyección: UTM/Zona 14
 Fuente: MOD13Q1/Trends.Earth
 Elaboró: Itzel Arroyo
 Fecha: 01/11/2020



Figura 3.28: Distribución espacial de NDVI sobre el territorio municipal 2000-2015

Las áreas y las proporciones de las clases de NDVI se encuentran en la **Tabla 3.15**. En el año 2000 la densidad y abundancia de la vegetación considerada como débil fue la que presentó mayor distribución en el territorio municipal (49.7 %), seguida de muy débil (44.6 %). La clase Intensiva no presentó distribución en este año ya que la vegetación no rebasó un valor de NDVI de 0.80.

Para el año 2015, la clase “débil” presentó un cambio del 10.2 % con una tendencia considerada como negativa. Las áreas que presentaron una clase de NDVI moderada incrementaron en más de 350 puntos porcentuales (26.5 % de la superficie total) y 8.98 km² pasaron a una clase NDVI intensiva.

Tabla 3.15: Distribución de las clases de NDVI (área y %) para 2000 y 2015 en el municipio de Ixtacamaxtitlán.

Clases de NDVI	2000		2015		Cambio		Tendencia (+/-)
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	
Muy Débil	253.15	44.6	97.16	17.1	155.99	61.6	Positiva
Débil	282.31	49.7	311.21	54.8	28.90	10.2	Negativa
Moderada	32.22	5.7	150.34	26.5	118.20	366.9	Positiva
Intensiva	-	-	8.98	1.6	8.98*	100*	Positiva

*Aumento positivo

Fuente: Elaboración propia.

Del área total del municipio, el 51.4 % presentó cambios en el estado de la vegetación, lo que equivale a 291.57 km², de los cuales, 291.18 km² correspondieron a cambios positivos, es decir, más de la mitad del municipio presentó aumento en la densidad y abundancia de la vegetación. La distribución espacial de estos cambios se muestra en la **Figura 3.29**.

El análisis de la DPT calculada a partir de la CT y las clases de NDVI (**Tabla 3.16**) muestra la dinámica de la vegetación dada por los cambios en la cubierta terrestre. En este sentido, podemos observar por ejemplo, que 8.91 km² de superficies arboladas que permanecieron sin cambios en el periodo de estudio presentaron una DPT creciente, con densidad y abundancia de la vegetación considerada como intensiva. Este porcentaje de la superficie total del territorio (1.57 %) podría considerarse como el área con las mejores condiciones de la vegetación, tanto por la CT a la que pertenece, como su clase de NDVI y DPT.

Se observa que el 34.78 % de esta CT (superficies arboladas) que permaneció sin cambios en el periodo de estudio, presentó clases de NDVI débil (11.25 %) y moderada (23.23 %), por lo que su DPT fue estable, no estresada. Mientras que solo el 0.08 % (0.44 km²) de esta CT sin cambios, tuvo una vegetación considerada como muy débil, indicando una tendencia negativa al presentar una menor abundancia y densidad de la vegetación.

Otras dinámicas crecientes se presentaron en las áreas con abundancia y densidad de la vegetación moderada, con cambios en la CT que han significado una mejora; ejemplos de esta situación están en la CT de pastizales o tierras de cultivo que se convirtieron en superficies arboladas al año 2015; sin embargo, esto representó menos del 1 % de la superficie total del territorio.

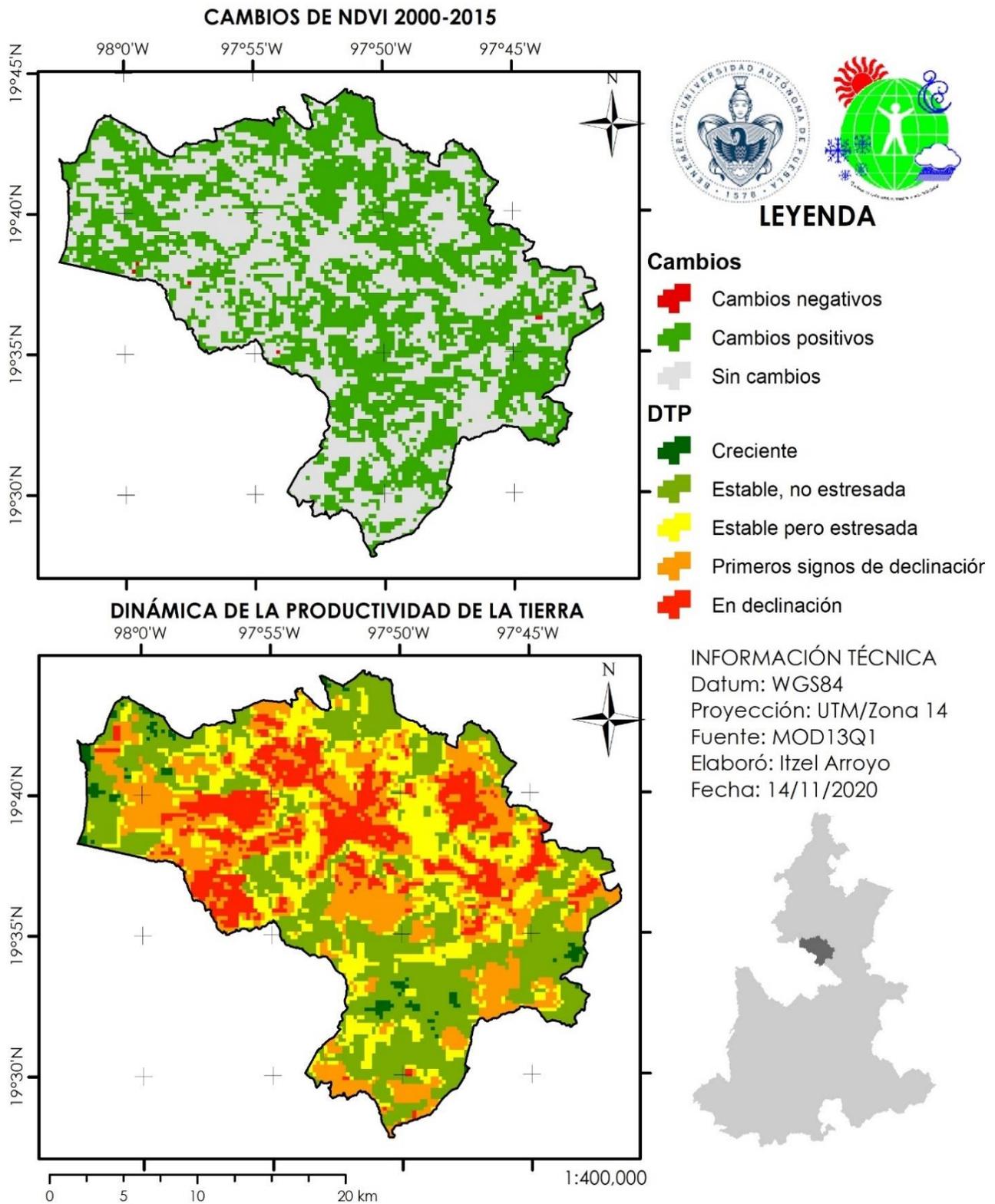


Figura 3.29: Distribuci3n de los cambios de NDVI y mapa de DPT sobre el territorio municipal 2000-2015.

Tabla 3.16: Dinámica de la Productividad de la Tierra entre 2000 y 2015 en el municipio de Ixtacamaxtitlán.

CT 2000	CT 2015	Cambio		Clase de NDVI	DPT	Cambio en la CT (+/-)
		km ²	%			
Superficies arboladas	Superficies arboladas	8.91	1.57	Intensiva	Creciente	Sin cambio
Pastizales	Pastizales	0.06	0.01	Intensiva	Estable, no estresada	Sin cambio
Superficies arboladas	Superficies arboladas	131.85	23.23	Moderada	Estable, no estresada	Sin cambio
Superficies arboladas	Pastizales	0.06	0.01	Moderada	Estable pero estresada	Negativo
Superficies arboladas	Tierras de cultivo	0.25	0.04	Moderada	Primeros signos de declinación	Negativo
Pastizales	Pastizales	12.40	2.18	Moderada	Estable pero estresada	Sin cambio
Pastizales	Superficies arboladas	0.19	0.03	Moderada	Creciente	Positivo
Tierras de cultivo	Tierras de cultivo	5.21	0.92	Moderada	Primeros signos de declinación	Sin cambio
Tierras de cultivo	Superficies arboladas	0.38	0.07	Moderada	Creciente	Positivo
Superficies arboladas	Superficies arboladas	63.86	11.25	Débil	Estable, no estresada	Sin cambio
Superficies arboladas	Pastizales	0.99	0.17	Débil	Primeros signos de declinación	Negativo
Superficies arboladas	Tierras de cultivo	1.21	0.21	Débil	En declinación	Negativo
Pastizales	Pastizales	114.30	20.13	Débil	Estable pero estresada	Sin cambio
Pastizales	Superficies arboladas	0.73	0.13	Débil	Estable no estresada	Positivo
Pastizales	Tierras de cultivo	7.21	1.27	Débil	Primeros signos de declinación	Negativo
Tierras de cultivo	Tierras de cultivo	120.98	21.31	Débil	Primeros signos de declinación	Sin cambio
Tierras de cultivo	Superficies arboladas	0.99	0.17	Débil	Estable no estresada	Positivo
Tierras de cultivo	Superficies artificiales	0.06	0.01	Débil	En declinación	Negativo
Superficies artificiales	Superficies artificiales	0.88	0.15	Débil	En declinación	Sin cambio
Superficies arboladas	Superficies arboladas	0.44	0.08	Muy débil	Estable pero estresada	Sin cambio
Superficies arboladas	Tierras de cultivo	0.04	0.01	Muy débil	En declinación	Negativo
Pastizales	Pastizales	11.67	2.06	Muy débil	Primeros signos de declinación	Sin cambio
Pastizales	Tierras de cultivo	6.87	1.21	Muy débil	En declinación	Negativo
Tierras de cultivo	Tierras de cultivo	77.65	13.68	Muy débil	En declinación	Sin cambio
Superficies artificiales	Superficies artificiales	0.49	0.09	Muy débil	En declinación	Sin cambio

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se observa que menos del 1 % de los pastizales tuvo una NDVI intensiva, en este caso la tendencia fue positiva con una vegetación estable, no estresada. La mayor parte de los pastizales que permanecieron sin cambios en el periodo de estudio presentó una DPT estable pero estresada (20.13 %) y con una NDVI débil; mientras que pastizales provenientes de cambios negativos con esta categoría de NDVI presentaron primeros signos de declinación.

Las tierras de cultivo obtuvieron valores menores a 0.63 en el NDVI, por lo que su DPT presentó primeros signos de declinación (23.54 %) o una dinámica de la vegetación en declive (15.11 %). Mientras que todas las superficies artificiales presentaron una DPT en declive, esto representó sólo el 0.25 % del municipio.

Las distribuciones por área (km²) y porcentuales de la DPT se pueden observar en la **Tabla 3.17**. Del área total de la zona de estudio, 1.67 % muestra un aumento en la productividad de la tierra considerado como creciente para el periodo evaluado de 2000 a 2015, esta tendencia positiva sólo se presentó en las categorías de superficies arboladas. El 34.79 % del territorio permaneció estable sin estrés. Sin embargo, un porcentaje alto -25.77 % de la superficie- presentó los primeros signos de declinación en las categorías de tierras de cultivo y pastizal.

Cabe resaltar que este análisis y mapeo del NDVI y la DPT está centrado en un periodo de 15 años, por lo que se están evaluando los procesos presentes en dicho periodo, de esta manera, aunque la tendencia anual de NDVI indica ser positiva el aumento se da a partir de una baja productividad.

Tabla 3.17: Distribución de las clases de DPT en el municipio de Ixtacamaxitlán.

Categoría de CT	En declinación		Primeros signos de declinación		Estable pero estresada		Estable, no estresada		Creciente	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Superficie arbolada	-	-	-	-	0.44	0.08	197.44	34.78	9.48	1.67
Pastizal	-	-	12.66	2.23	126.76	22.33	0.06	0.01	-	-
Tierra de cultivo	85.77	15.11	133.65	23.54	-	-	-	-	-	-
Superficies artificiales	1.43	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	87.19	15.36	146.31	25.77	127.20	22.41	197.50	34.79	9.48	1.67

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Carbono Orgánico del Suelo

El promedio anual de stock de COS en el periodo de estudio mostró una tendencia negativa, sin embargo esta no fue significativa ($p=0.486$). En el año 2000 el valor promedio de carbono orgánico del suelo fue de 84.95 t ha⁻¹, con un valor mínimo de 47 t ha⁻¹ y un valor máximo de 172 t ha⁻¹, mientras que en el año 2015, el promedio presentó un valor de 84.71 t ha⁻¹, con un valor mínimo de 46 t ha⁻¹ y un valor máximo de 172 t ha⁻¹ (**Figura 3.30**).

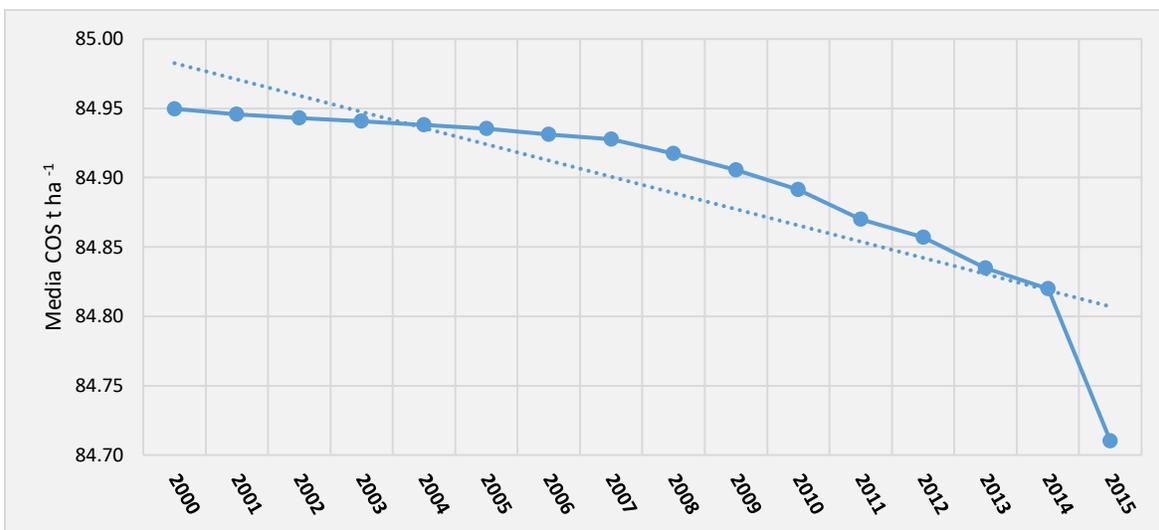


Figura 3.30: Tendencia anual en la concentración de COS sobre el territorio municipal 2000-2015.

La distribución espacial del contenido de COS sobre la superficie municipal (**Figura 3.31**) muestra que los contenidos más bajos de COS se presentaron en la franja central del municipio, donde existe mayor superficie de áreas de cultivo, pastizales y menores altitudes. Mientras que contenidos mayores de COS se presentaron en las zonas con mayores altitudes y con cubierta vegetal de bosque ubicadas en el sur y el noroeste del territorio.

En la **Tabla 3.18** se muestra el resultado de contenido promedio de CO en el suelo por categoría de CT (2015), en donde se observa que los valores más altos pertenecieron a las superficies arboladas, mientras que en las tierras de cultivo se presentaron los valores más bajos.

Categoría de CT	Contenido de COS (t ha ⁻¹)
Superficies arboladas	104.29
Pastizales	77.86
Tierras de cultivo	70.73
Superficies artificiales	76.35

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los cambios en la CT identificados como negativos, las pérdidas de COS en esas áreas ascendieron a más de 7 068 toneladas de C (**Tabla 3.19**). La mayor pérdida se observa en la conversión que se presentó de pastizales a tierras de cultivo, con una disminución en la reserva de carbono del más del 83 % del total de pérdida, seguido de la conversión de superficies arboladas a tierras de cultivo (15.42 %).

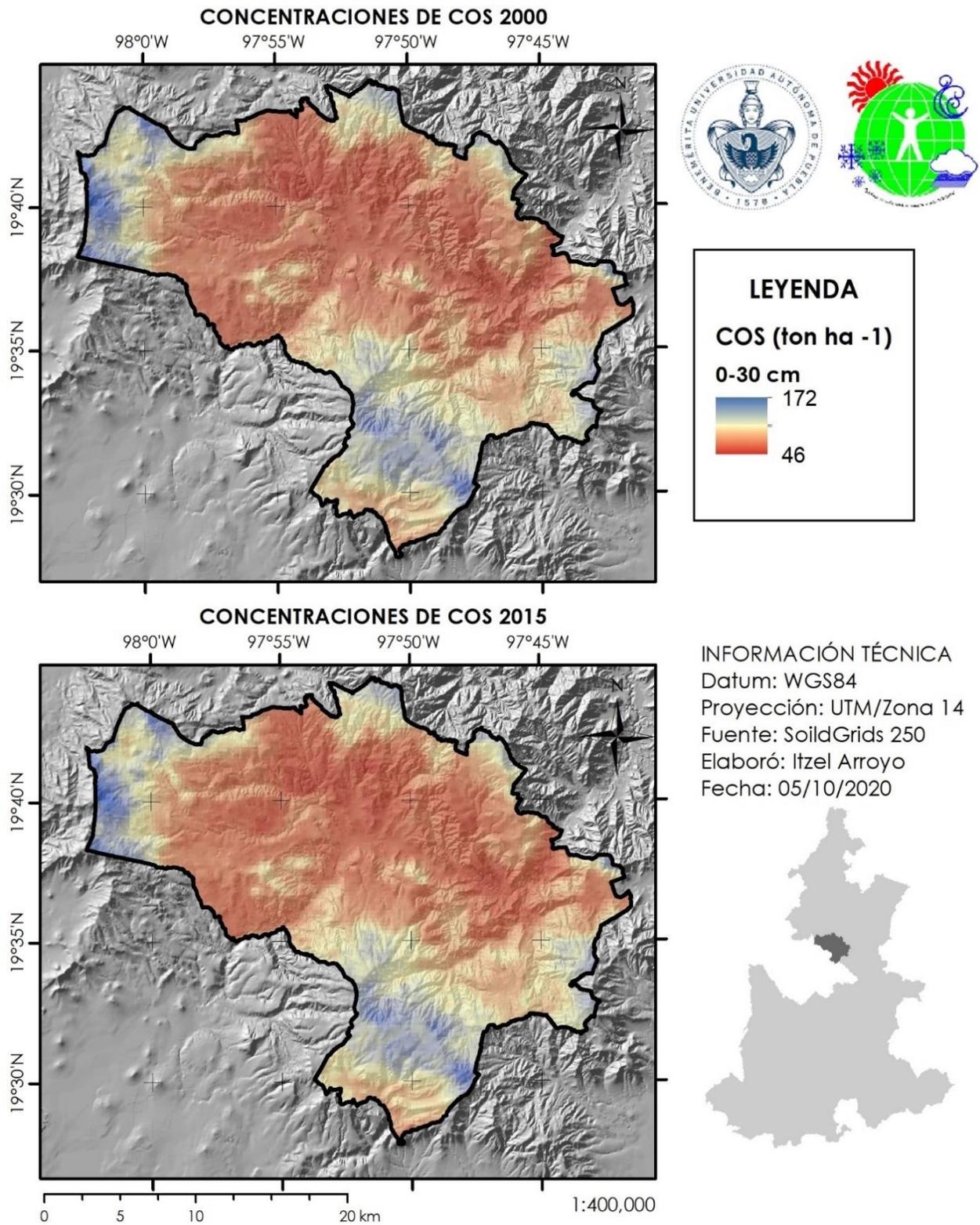


Figura 3.31: Distribución espacial del contenido de COS sobre el territorio municipal 2000-2015.

Aunque la superficie afectada por la conversión de superficies arboladas a pastizales es similar a la conversión de superficies arboladas a tierras de cultivo, el carbono perdido es menor al 2 % del total, por lo que la pérdida se asociada en mayor medida a la disminución del contenido de C y en menor medida a la superficie de cambio.

Tabla 3.19: Pérdidas de COS en el municipio de Ixtacamaxitlán 2000-2015.

Cambios negativos en la CT		Área de cambio km ²	Contenido de COS 2000 (t ha ⁻¹)	Contenido de COS 2015 (t ha ⁻¹)	Contenido inicial de COS 2000 (t)	Contenido final de COS 2015 (t)	Cambio en el contenido de COS (t)
CT 2000	CT 2015						
Superficies arboladas	Pastizales	1.05	96.35	95.94	10 117.06	10 073.82	-43.24
Superficies arboladas	Tierras de cultivo	1.49	96.87	89.35	14 433.57	13 312.83	-1 120.74
Pastizales	Tierras de cultivo	14.09	62.69	58.50	88 330.58	82 432.73	-5 897.85
Tierras de cultivo	Superficies artificiales	0.06	80.00	79.00	504.00	479.70	-6.30

Fuente: Elaboración propia.

La distribución espacial de los cambios en el contenido de COS se puede observar en la **Figura 3.32**. Las ganancias en las reservas de Carbono Orgánico representaron tan solo el 0.44 % del total de la superficie del municipio, del cual únicamente el 0.06 % (0.32 km²) se consideró como un cambio significativamente positivo (> 10 %). Los cambios negativos en el contenido de COS representaron una proporción del 4.25 %, del cual, sólo en 0.30 % (1.69 km²) se consideró como disminución significativa (pérdida mayor al 10 %). Finalmente, más del 95 % de la superficie del territorio permaneció estable (565.67 km²).

En la **Figura 3.32** también se observa la distribución de las clases de contenido de carbono en el suelo. La clase con mayor presencia en la superficie del municipio es la que tiene un contenido medio de carbono orgánico en el suelo (73.33 %), presentándose en 416.30 km² de la superficie, seguida por aquella que tiene un contenido alto (25.91 %). Los valores extremos se presentan en menos del 1 % de la superficie cada uno (**Tabla 3.20**).

Tabla 3.20: Distribución de las clases de COS para el año 2015 en el municipio de Ixtacamaxitlán.

Clases	Rango	Área	
		(km ²)	(%)
Bajo	< 50	2.19	0.39%
Medio	50 - 100	416.30	73.33%
Alto	100 - 150	147.11	25.91%
Muy alto	> 150	2.08	0.37%

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Proporción de tierra degradada

La clasificación de “degradación, mejora o estabilidad” de cada uno de los indicadores fue, en el caso de la CT, la transición de una categoría a otra. En la productividad de la tierra se determinó por el cambio del valor de NDVI a una clase de mayor o menor rango y adicionalmente se agregó como degradación la clase de DPT considerada como “en declinación” para las tierras de cultivo; primeros signos de declinación para los pastizales; y estable, pero estresada para las superficies arboladas. Finalmente, en el COS se determinó por el aumento o disminución del 10 % de su contenido en el periodo final de estudio respecto al periodo inicial. Los datos finales por indicador, utilizados para obtener la proporción de tierra potencialmente degradada del municipio de Ixtacamaxtitlán se observan en la **Tabla 3.21**.

Tabla 3.21: Distribución en km² y % del estado de cada indicador evaluado en el Municipio de Ixtacamaxtitlán.

Estado	CT		DPT		COS		TOTAL	
	Área (km ²)	%						
Degradación	16.69	2.94	100.29	17.67	1.69	0.30	107.88	19.00
Mejora	2.28	0.40	9.48	1.67	0.32	0.06	0.69	0.12
Estable	548.7	96.66	457.91	80.66	565.67	99.65	459.11	80.88

CT: Cubierta Terrestre. DPT: Dinámica de la Productividad de la Tierra. COS: Carbono Orgánico del Suelo.

Fuente: Elaboración propia.

La degradación en el municipio de Ixtacamaxtitlán en el periodo de estudio (2000-2015) como resultado de los cambios negativos que se presentaron en cada uno de los indicadores se muestra en la **Tabla 3.22**.

Tabla 3.22: Degradación en el municipio de Ixtacamaxtitlán en el periodo 2000 a 2015.

CT	DPT	COS	Final	Área (km ²)	%
Degradación	Degradación	Degradación	Degradación	1.13	0.20
Degradación	Degradación	Estable	Degradación	8.04	1.42
Degradación	Estable	Degradación	Degradación	0.50	0.09
Degradación	Estable	Estable	Degradación	7.02	1.24
Mejora	Estable	Mejora	Mejora	0.13	0.02
Mejora	Estable	Estable	Estable	1.59	0.28
Mejora	Mejora	Mejora	Mejora	0.19	0.03
Mejora	Mejora	Estable	Mejora	0.38	0.07
Estable	Degradación	Estable	Degradación	91.12	16.05
Estable	Estable	Degradación	Degradación	0.06	0.01
Estable	Estable	Estable	Estable	448.60	79.02
Estable	Mejora	Estable	Estable	8.91	1.57

CT: Cubierta Terrestre. DPT: Dinámica de la Productividad de la Tierra. COS: Carbono Orgánico del Suelo.

Fuente: Elaboración propia

A pesar de que existieron zonas que presentaron mejora en alguno de los indicadores, cuando fueron combinados con un indicador que presentó degradación se consideró como zona potencialmente degradada. En este sentido, el indicador que más áreas degradadas presentó en el municipio fue el de DPT, aportando un total de 100.29 km² de superficie degradada, mientras que el COS fue el que menor degradación presentó (1.69 km²). La mayor parte del municipio permanece estable (> 80 %) por lo que la proporción de tierra degradada es del 19 %, el equivalente a 107.88 km² de la superficie de Ixtacamaxtitlán.

La distribución espacial de las áreas que presentaron degradación se puede observar en la **Figura 3.33**, estas zonas se encuentran en su mayoría en tierras de cultivo y áreas de pastizal presentes en la franja centro-norte del municipio.

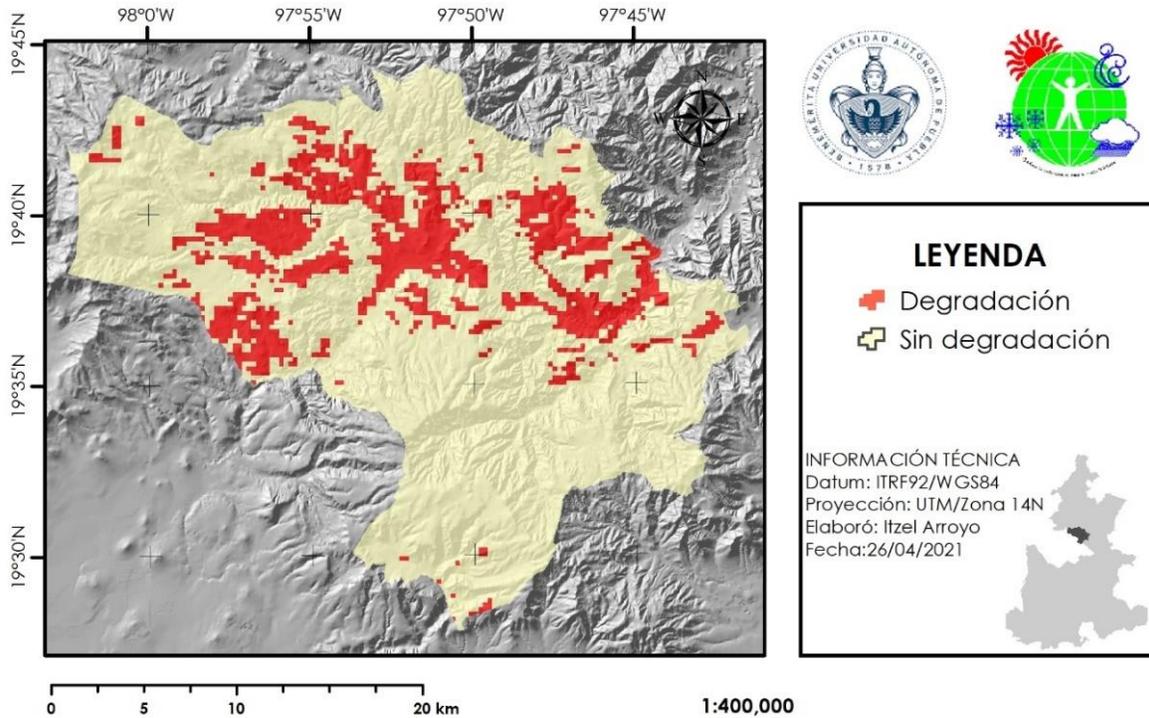


Figura 3.33: Distribución espacial de la degradación en el territorio municipal 2000-2015

3.3. O2: EVALUACIÓN DE INDICADORES BAJO DISTINTOS ESCENARIOS

3.3.1. Ubicación y caracterización de los sitios de Muestreo

Se realizó un muestreo dirigido dentro de dos sitios, la localidad de San José Providencia y los Bienes Comunales de Analco, localidad de Analco (**Figura 3.34**), los cuales se diferencian por sus condiciones socioambientales. En el caso del primero son terrenos de propiedad privada, mientras que los segundos son terrenos de bienes comunales.

Para la elección de estos sitios, se privilegió el manejo forestal que se ha dado, ya que el muestreo está encaminado a determinar la eficiencia de las diversas obras de restauración forestal tales como conservación y restauración de suelos, control de la erosión, reforestación y obras de captación de agua, así como el mantenimiento, aprovechamiento y protección de estas obras. La descripción de las nueve zonas se presenta a continuación:

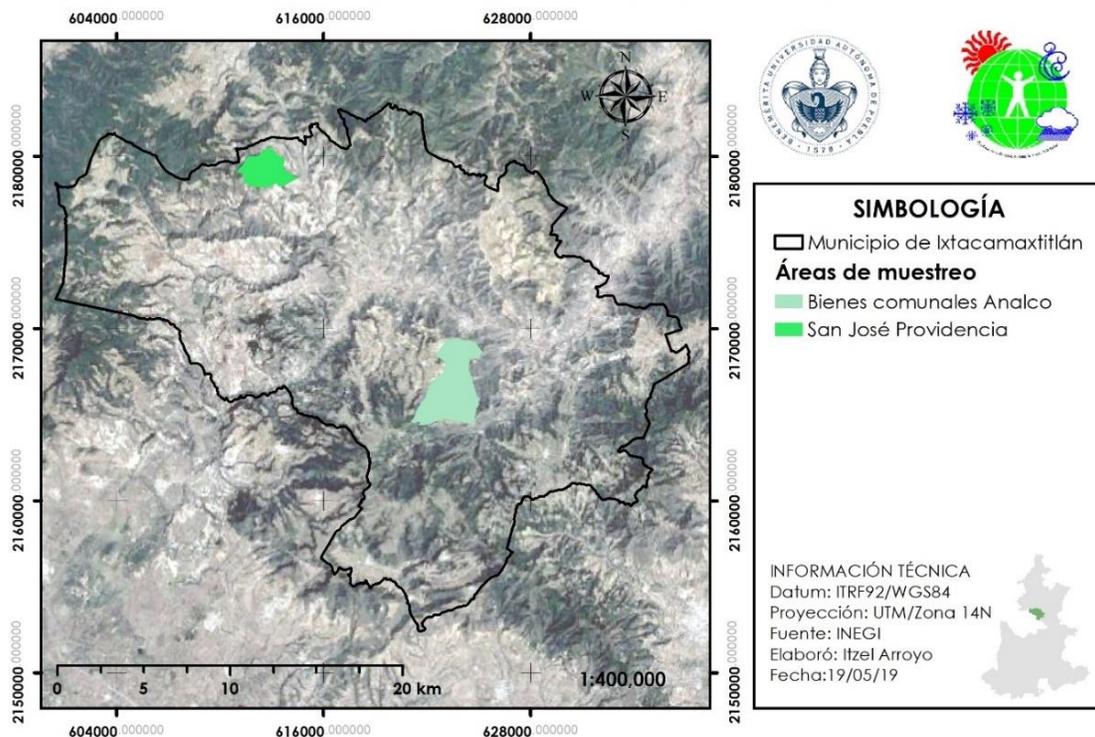


Figura 3.34: Localización de los sitios de muestreo dentro del municipio de Ixtacamaxitlán.

3.3.1.1. Localidad de San José Providencia.

El primer sitio está localizado al noroeste del municipio de Ixtacamaxitlán (**Figura 3.35**) en las coordenadas 19° 42.225' N y 97° 55.432' O. El sitio se encuentra dividido por terrenos de propiedad privada en donde diversos actores sociales y pequeños productores han realizado obras de protección, conservación y restauración de zonas forestales con obras como zanjas bordo, terrazas individuales, barreras de piedra acomodada, acomodo de vegetal muerto, cabeceo de cárcavas con piedra, barreras vivas y brechas cortafuego.

La reforestación de las zonas tiene un tiempo de 10 años y, en algunos casos, también se ha realizado el mantenimiento de esa reforestación con prácticas como reposición de planta muerta, control de malezas, fertilización, podas y aclareos, todo esto con recursos de los propietarios.

La altitud de la zona varía entre los 2500 y los 2800 m s. n. m., tiene una precipitación anual de entre 600 y los 700 mm y una temperatura media anual de 14 a 16 °C. Su clima se clasifica como templado subhúmedo con lluvias en verano e invierno seco. El suelo predominante es de tipo litosol con presencia de suelos regosoles.



Figura 3.35: Localización de las zonas de muestreo en la localidad de San José Providencia (Sitio 1).

ZONA 1 DE SAN JOSÉ PROVIDENCIA. BOSQUE NATURAL. (CLAVE: SJBN): Esta zona se presenta como una mancha forestal de aproximadamente cinco hectáreas y se encuentra rodeada de parcelas de cultivo, localizada en la parte alta de un cerro a 2700 m s. n. m. (Figura 3.36), en las coordenadas 19° 41.923' N, 97° 55.511' O. Existe la presencia de árboles de tásate (*Juniperus* spp.), encino (*Quercus* spp.) y pinos como el ocote (*Pinus montezumae*) y *Pinus patula*. El suelo en la zona es maduro, con erosión laminar considerada como leve y un relieve montañoso con pendientes de hasta el 30 %. La profundidad del suelo es de hasta 40 cm. No se observa la presencia de afloramientos rocosos.

En la zona no se han llevado a cabo obras de restauración forestal, es un ecosistema nativo que ha conservado sus características edáficas y florísticas. El sotobosque se encuentra bien desarrollado, se observa la presencia de líquenes, musgos, helechos y pastos. La capa de hojarasca presenta una profundidad de 10 a 15 cm lo que dota de protección al suelo ante los factores climáticos. La cobertura del dosel es de aproximadamente el 75 % con una altura de los árboles de más de 20 m.



Figura 3.36: Imágenes del bosque natural (SJBn).
(a) Amplia cobertura de hojarasca **(b)** Cobertura de dosel del 75 % **(c)** Árboles mayores de 20 m.
Fuente: Elaboración propia

ZONA 2 DE SAN JOSÉ PROVIDENCIA. BOSQUE REFORESTADO 10 AÑOS (a). (CLAVE: SJBra): La zona presenta una superficie aproximada de cinco hectáreas, con un rango altitudinal de entre 2500 a 2600 m s. n. m. y una pendiente del 35 %, está situado en las coordenadas 19° 42.324' N y 97° 55.302' O. La zona tiene una cobertura vegetal aproximada del 60 %, presenta una erosión del suelo de tipo laminar que va de ligera a fuerte en algunas zonas, existe además la presencia de cárcavas. El suelo es de tipo regosol con una profundidad aproximada de 50 cm.



Figura 3.37: Obras de conservación, restauración del suelo y captación de agua en la zona 2 (SJBra).
(a) Cabeceo de cárcavas con piedra **(b)** Siembra en terrazas para conservación del suelo **(c)** Barreras de piedra acomodada para retención de suelo **(d)** Obras de captación de agua
Fuente: Elaboración propia

Las obras de reforestación se han realizado con recursos privados del propietario del terreno, estas comenzaron en el año 2009, en donde se ha sembrado un aproximado de 10 mil ejemplares de *Pinus greggii*, *Pinus patula* y *Pinus cembroides*. Así mismo, cuenta con obras de conservación y restauración de suelos y obras de captación de agua (**Figura 3.37**). Las obras de mantenimiento incluyen la poda y la rehabilitación de

cajetes de forma anual, el control de malezas y rehabilitación de brechas cortafuego, así como el aclareo y fertilización; en los últimos dos casos estas actividades se han realizado cada tres años.

ZONA 3 DE SAN JOSÉ PROVIDENCIA. BOSQUE REFORESTADO 10 AÑOS (b). (CLAVE: SJBRb): Al igual que la zona anterior, esta zona fue reforestada en 2009 el espacio presenta una superficie aproximada de cinco hectáreas, con un rango altitudinal que va de los 2500 a los 2600 m s. n. m. y una pendiente del 35 %, está situado en las coordenadas 19° 42.358'N y 97° 55.184' O (**Figura 3.38**).

En este caso, la cobertura vegetal es mayor al 60 % con presencia de pastos y arbustos. Las obras de reforestación en la zona, al igual que en el terreno anterior provienen de recursos privados y comenzaron a finales del año 2009. Sin embargo, a diferencia de la zona SJBRa, el mantenimiento se ha dado únicamente con la habilitación de brechas cortafuego y se ha realizado una única poda en febrero de 2019. No se ha realizado ninguna otra actividad de conservación, mantenimiento y/o restauración. Las especies con las que se reforestó fueron *Pinus greggii*, y *Pinus patula*. El tipo de suelo es regosol con una profundidad de 40 cm.



Figura 3.38: Imagen del bosque con reforestación (SJBRb).

Se observa una pendiente pronunciada, árboles jóvenes de tronco delgado y con una altura de 4 m.

Fuente: Elaboración propia

ZONA 4 DE SAN JOSÉ PROVIDENCIA. PASTIZAL (CLAVE: SJP): El predio situado en las coordenadas 19° 42.230' N y 97° 55.294' O tiene una superficie aproximada de dos hectáreas, anteriormente fue dispuesto para uso agrícola con un uso aproximado de 15 años, donde se sembraba maíz, avena y cebada; desde el año 2000 se encuentra abandonado, actualmente es una zona con una cobertura de pastizal de aproximadamente el 50 % y con presencia de arbustos en un 10 % del área (**Figura 3.39**).

Presenta procesos erosivos avanzados, se observa la presencia de cárcavas y áreas desprovistas en su totalidad de cobertura vegetal. La pendiente es del 15 % lo que ha propiciado que la erosión no sea aún mayor. A pesar de que hace más de 20 años fue zona forestal, ésta ya no se considera así porque ha perdido las características y los elementos de bosque natural. Su degradación es resultado de una combinación de talas, pastoreo y labranza. Existe la presencia de afloramientos rocosos en un 10 % de la superficie, el suelo presenta baja fertilidad y alta compactación, el tipo de suelo en esta zona también es regosol.



Figura 3.39: Imágenes de la zona de pastizal con procesos de degradación (SJP).

(a) Exposición de la roca madre por pérdida de suelo (b) Cobertura de pastizal con la presencia de arbustos (c) Surcos sobre el terreno.

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2. Bienes Comunales Analco

El segundo sitio se encuentra localizado en el centro-sur del municipio en las coordenadas 19° 35.123' N y 97° 49.418' O. Este sitio es denominado como tierras de uso común, es decir son los Bienes Comunales de la localidad de Analco (**Figura 3.40**).

Presenta una superficie de 110 ha, en este caso sus habitantes han sido parte de programas pertenecientes a CONAFOR como el Programa de Apoyo para el Desarrollo Forestal Sustentable, por lo que los pobladores han realizado acciones de aprovechamiento, manejo, conservación y restauración de zonas forestales, con obras para el control de la erosión como barreras de piedra acomodadas, roturación, zanjas trincheras, terrazas de muro vivo, barreras vivas y presas de gaviones. En este sitio la reforestación comenzó hace 20 años en algunas zonas, en donde también se ha dado el mantenimiento de la reforestación con podas, aclareos y control de malezas.

Presenta una altitud que varía de entre los 2400 y los 2850 m s. n. m., se caracteriza por pendientes pronunciadas y cerros escarpados. La precipitación va de los 700 a los 900 mm y la temperatura se encuentra en el rango de 12 a 14 °C. Su clima se clasifica como templado subhúmedo con lluvias en verano y templado semifrío con lluvias en verano. El suelo es de tipo regosol con una profundidad de más de 80 cm.

En esta localidad habitan 350 personas, se cultiva haba y maíz criollo. Cabe señalar que en esta comunidad no existe el pastoreo, ya que a través de las asambleas se decidió evitar las prácticas agrícolas inadecuadas y la cría de ganado menor (cabras), esto debido a la afectación que causaban a la reforestación, específicamente a las plántulas de pino en crecimiento.

Así mismo dentro de la comunidad la participación de las mujeres se presenta a la par de los hombres, ya que forman parte de las asambleas y de los trabajos para mejora de la comunidad, como el mantenimiento de caminos, la siembra y cosecha, y las faenas en general.

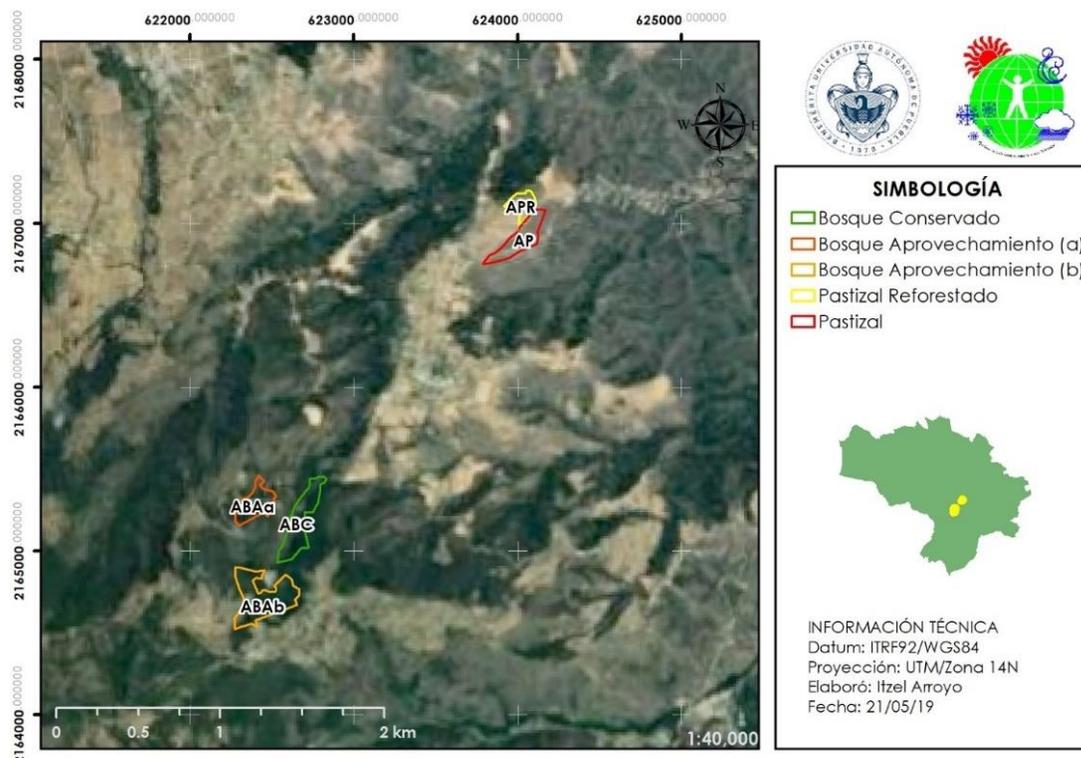


Figura 3.40: Localización de las zonas de muestreo en el sitio 2. Bienes Comunes de Analco.

ZONA 1 DE ANALCO. BOSQUE CONSERVADO (CLAVE: ABC): La zona se conoce como La Barranca (**Figura 3.41**), está situada en las coordenadas $19^{\circ} 34.726' N$ y $97^{\circ} 49.836' O$. Presenta especies nativas de pino como *Pinus greggi*, *Abies religiosa* (oyamel) y *Pinus ayacahuite*. Tiene una superficie aproximada de 5.5 hectáreas, con una pendiente de 35 %. La cobertura del dosel es del 90 % aproximadamente y los árboles presentan una altura mayor a 20 m. El sotobosque se encuentra altamente desarrollado con la presencia de helechos, musgo, líquen y otras herbáceas.



Figura 3.41: Imágenes del Bosque conservado (ABC).

(a) Pendiente pronunciada **(b)** Árboles con altura superior a 20 m **(c)** Cobertura del dosel del 90 %.

Fuente: Elaboración propia.

ZONA 2 DE ANALCO. BOSQUE NATURAL CON APROVECHAMIENTO (CLAVE: ABAa): Esta zona es un bosque natural de pino (*Pinus montezumae*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus patula*) de cuatro hectáreas, situado en las coordenadas 19° 34.723' N y 97° 49.956' O, el cual fue aprovechado durante 8 años para la obtención de leña (**Figura 3.42**) y terminó hace 4 años. El aprovechamiento en este caso se refiere a que los árboles talados con fines de subsistencia para leña son reemplazados por otros, por lo que la regeneración es producida tanto naturalmente como por reforestación. Los pinos que se han utilizado para la reforestación han sido de la especie *patula*.

La capa de hojarasca tiene una profundidad de al menos 15 cm producto de la caída de espículas de los pinos, el desarrollo del sotobosque es alto. En este caso no se considera una conversión o plantación, sino más bien es un bosque natural con manejo forestal. El suelo es profundo, mayor a 70 cm, con un ligero color café rojizo y no es compacto. El relieve es montañoso con una pendiente de hasta el 40 %.



Figura 3.42: Imágenes del bosque con aprovechamiento (ABAa).
(a) Capa profunda de hojarasca **(b)** Árboles de más de 20 m de altura **(c)** Sotobosque desarrollado.
Fuente: Elaboración propia.

ZONA 3 DE ANALCO. BOSQUE NATURAL CON APROVECHAMIENTO. (CLAVE: ABAb): Las características de este bosque son similares al anterior. Se encuentra situado en las coordenadas 19° 34.482' N y 97° 49.976' O. Es un bosque natural de pino, con presencia de pinos como *Pinus montezumae*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus patula* y algunos árboles de encino (*Quercus* spp.), tiene una superficie aproximada de ocho hectáreas, y, en este caso fue aprovechado durante cuatro años para la obtención de madera (**Figura 3.43**).

La zona se encuentra rodeada de parcelas para la agricultura. Presenta un amplio desarrollo de sotobosque en donde se puede observar la presencia de musgo, arbustos, hierbas y plántulas de pino. La hojarasca tiene una profundidad de 20 cm y los árboles una altura de aproximadamente 20 m. La pendiente es de entre 20 y 30 %, con un relieve considerado como fuertemente ondulado y montañoso.



Figura 3.43: Imágenes del bosque natural con aprovechamiento (ABAb).
(a) Presencia de regeneración forestal natural y artificial **(b)** Cobertura vegetal del 100 %
(c) Árboles con altura superior a 20 m.
Fuente: Elaboración propia.

ZONA 4 DE ANALCO. PASTIZAL REFORESTADO EN 2012 (CLAVE: APR): Esta zona es conocida como Tacuitlapilco (**Figura 3.44**), está ubicada en las coordenadas 19° 35.725' N y 97° 49.034' O, se reforestó en 2012 con especies como *Pinus pseudostrobus*, *Pinus montezumae* y *Juniperus* spp. (sabino), así mismo en zonas con menor profundidad del suelo se sembró *Agave* spp. (Maguey) y *Quercus* spp. (encino).

Al comienzo de la reforestación se roturó a una profundidad de 60 a 80 cm y se fertilizó con composta y residuos vegetales, colocando 400 g de abono por cepa. La distribución de los árboles se realizó con la técnica de tres bolillos. No se han realizado podas ni aclareo en esta zona. Los árboles presentan una altura de aproximadamente 3 m y la cobertura vegetal es del 70 % con presencia de áreas con erosión fuerte.



Figura 3.44: Imágenes del pastizal reforestado (APR)
(a) Especies de *Pinus patula* en zona reforestada **(b)** Cobertura vegetal de pasto **(c)** Se observan áreas desprovistas de vegetación.
Fuente: Elaboración propia.

ZONA 5 DE ANALCO. PASTIZAL (CLAVE: AP): Esta zona está ubicada en las coordenadas 19° 35.570' N y 97° 49.031' O, tiene una cobertura vegetal de pastizal de aproximadamente el 80 %, con presencia de arbustos y árboles (**Figura 3.45**). En esta zona se aplicaron obras de retención de suelo y se sembraron magueyes (*Agave sp*) en el año 2012. Sin embargo presenta cárcavas y una erosión laminar y en surcos considerada como fuerte. El relieve es de tipo montañoso con una pendiente del 45 %. Se observan áreas con suelo expuesto a la intemperie y con afloramientos de gravas, piedras y rocas en el 15 % de la superficie. Tiene alta compactación y baja fertilidad, el suelo es erodable con una profundidad de más de 60 cm.



Figura 3.45: Imagen de la zona de pastizal en los Bienes Comunes de Analco.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Resultados de los análisis fisicoquímicos por escenario

Los resultados de los análisis de las muestras de suelo se encuentran en el **Anexo 4**. Las zonas de muestreo se agruparon de acuerdo con el escenario evaluado en bosques conservados (BC), bosques con aprovechamiento (BA), bosques reforestados (BR) y, finalmente, áreas deforestadas ahora convertidas en pastizal (P) (**Tabla 3.24**).

Tabla 3.23: Agrupación de las zonas de muestreo			
Clave Escenario	Descripción escenario	Clave zona	Descripción zona
BC	Bosques conservados	ABC	Bosque conservado de Analco.
		SJBN	Bosque natural conservado de San José Providencia
BA	Bosques con aprovechamiento	ABAa	Bosque natural con aprovechamiento de Analco (a)
		ABAb	Bosque natural con aprovechamiento de Analco (b)
		SJBRa	Bosque reforestado 10 años de San José Providencia(a)
BR	Bosques reforestados	SJBRb	Bosque reforestado 10 años de San José Providencia (b)
		APR	Pastizal reforestado de Analco
P	Pastizales	AP	Pastizal de Analco
		SJP	Pastizal de San José Providencia

Fuente: Elaboración propia.

Las estadísticas descriptivas de los análisis fisicoquímicos del suelo de los cuatro escenarios evaluados se muestran en la **Tabla 3.24**. El pH, la densidad aparente, la MO y la concentración de CO presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los escenarios ($p < 0.05$).

El pH afecta directamente la disponibilidad de los nutrientes del suelo para las plantas y tiene gran influencia sobre las propiedades del suelo. El pH considerado como ideal para dicha disponibilidad es el neutro (6.6-7.3), dentro de este rango se encontraron los valores del escenario de pastizal (P), el cual presentó diferencias con el resto de los escenarios. Los bosques conservados (BC), los aprovechados (BA) y los reforestados (BR) presentaron un valor de pH considerado como moderadamente ácido (5.1-6.5). Sin

embargo, BR al tener un valor de pH mayor en comparación con BC y BA, presentó diferencias significativas con estos últimos.

Tabla 3.24: Resultados de los análisis fisicoquímicos del suelo en los escenarios evaluados (0-30 cm).

Escenario	N	pH					Materia Orgánica (%)						
		Media	*	DE	CV	Mín.	Máx.	Media	*	DE	CV	Mín.	Máx.
BC	6	5.83	a	0.34	5.80	5.26	6.22	12.04	a	7.76	64.46	5.14	23.92
BA	6	5.78	a	0.16	2.75	5.59	5.94	7.80	ab	1.90	24.35	5.22	10.28
BR	9	6.42	b	0.40	6.19	5.82	7.24	4.82	bc	1.92	39.95	1.66	8.31
P	6	6.75	c	0.11	1.65	6.66	6.96	1.82	c	0.92	50.50	1.10	3.28
		Densidad Aparente (g cm ⁻³)					Pedregosidad (1/100)						
BC	6	0.76	a	0.14	18.53	0.63	0.95	0.46	a	0.09	20.62	0.30	0.57
BA	6	0.79	a	0.13	16.09	0.56	0.94	0.43	a	0.03	7.99	0.37	0.47
BR	9	1.00	b	0.11	11.38	0.85	1.14	0.46	a	0.06	13.62	0.35	0.52
P	6	1.13	c	0.06	5.25	1.03	1.20	0.51	a	0.09	18.21	0.38	0.65
		Conductividad Eléctrica (dS m ⁻¹)					Carbono orgánico (%)						
BC	6	0.13	a	0.10	0.08	0.05	0.31	6.98	a	4.50	64.46	2.98	13.88
BA	6	0.13	a	0.05	0.04	0.07	0.22	4.53	ab	1.10	24.35	3.03	5.96
BR	9	0.09	a	0.02	0.02	0.07	0.13	2.79	bc	1.12	39.95	0.96	4.82
P	6	0.06	a	0.02	0.04	0.05	0.11	1.05	c	0.53	50.50	0.64	1.90

*Las medias en columna que no comparten una letra son significativamente diferentes. DE: Desviación estándar, CV: Coeficiente de varianza (ANOVA de una vía, $p < 0.05$). BC: Bosques conservados. BA: Bosques con aprovechamiento. BR: Bosques reforestados. P: Pastizal.

Fuente: Elaboración propia.

La Densidad Aparente (DA) es una propiedad que refleja la porosidad, la estructura y la MO del suelo, en este sentido conforme aumenta la profundidad del suelo lo hace la DA. Así mismo, frente a la pérdida de los horizontes superficiales debido a la erosión que promueve la exposición de los horizontes subsuperficiales, se presentan valores altos de DA. De acuerdo con los resultados P y BR presentaron diferencias significativas entre sí y con el resto de los escenarios, mientras que BC y BA no mostraron diferencias y tuvieron una DA menor a 1 g cm^{-3} , interpretado como tipo de suelo orgánico. Las zonas reforestadas o de pastizal presentaron una DA mayor a 1 g cm^{-3} lo que los clasifica como suelos minerales.

La MO se define como la fracción orgánica del suelo, incluye tanto residuos vegetales como animales en diversos estados de descomposición. El aporte de MO al suelo está ligado a factores como el clima, la precipitación, la vegetación y el manejo forestal de la zona. Un bajo contenido en MO puede ser un indicativo de procesos de degradación debido a que provoca un aumento de la vulnerabilidad del suelo a la erosión. Los bosques conservados presentaron los mayores contenidos de MO, seguido por los bosques con aprovechamiento. Los bosques reforestados mostraron contenidos promedio de MO mayor a 4 %, sin embargo, no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) con los pastizales ni con los bosques con aprovechamiento. El menor contenido de MO se presentó en los pastizales, con diferencias estadísticamente significativas en comparación con BC y BA. Este mismo análisis se replica para la concentración de CO. Las propiedades del suelo de pedregosidad y la conductividad eléctrica no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los escenarios.

3.3.3. Indicadores de la NDT “in situ”

Las estadísticas descriptivas de los indicadores evaluados *in situ* por escenario se observan en la **Tabla 3.25**.

Tabla 3.25: Estadísticas descriptivas de los indicadores evaluados por escenario						
Escenario	N	Contenido de COS (0-30 cm)				
		(Mg ha ⁻¹)				
		Media	DE	CV	Mín.	Máx.
BC	6	94.80	38.70	40.83	53.90	164.70
BA	6	62.94	15.99	25.4	47.39	82.91
BR	9	52.62	22.91	43.55	14.76	91.05
P	6	26.27	13.88	52.83	12.71	46.76
Promedio de la producción anual de hojarasca (2020-2021)						
(g m² año⁻¹)						
BC	6	520.80	156.80	30.11	219.90	634.00
BA	6	835.00	275.00	32.87	531.00	1285.00
BR	9	374.90	158.60	42.30	248.10	702.10
P	6	120.80	55.30	45.80	66.30	194.20
Cobertura Arbórea (2000)						
(%)						
BC	40	70.38	31.99	45.45	19.00	100.00
BA	40	57.63	36.12	62.68	0.00	99.00
BR	60	37.22	35.5	95.38	0.00	92.00
P	40	0.78	4.59	592.01	0.00	29.00
Cobertura Arbórea (2020)						
(%)						
BC	40	90.10	12.02	13.34	53.00	100.00
BA	40	80.97	23.16	28.61	1.00	99.00
BR	60	51.03	40.06	78.49	0.00	99.00
P	40	7.88	11.81	149.92	0.00	29.00

DE: Desviación estándar, **CV:** Coeficiente de varianza. **BC:** Bosques conservados. **BA:** Bosques con aprovechamiento. **BR:** Bosques reforestados. **P:** Pastizal.

Fuente: Elaboración propia.

El resultado del cálculo de COS por punto de muestreo se encuentra en el **Anexo 5**. El sistema suelo-vegetación desempeña un rol fundamental en el aumento o reducción de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, esto depende de la velocidad de formación y descomposición del COS, por lo que se considera al suelo como uno de los reservorios terrestres de carbono más grandes (Yescas-Coronado *et al.*, 2018). Los resultados del contenido de COS en los primeros 30 cm del suelo por escenario mostraron que los bosques conservados contienen casi 100 MgC ha⁻¹. Las áreas de pastizal presentaron un contenido de carbono menor a 27 MgC ha⁻¹, lo que se considera como bajo, mientras que en el escenario de aprovechamiento y en el de reforestación la diferencia fue de 10 MgC ha⁻¹, aproximadamente.

De acuerdo con el Análisis de medias (ANOM) del COS, los bosques conservados y los pastizales presentaron medias significativamente diferentes frente a la media general ($\bar{X}=58.4 \text{ MgC ha}^{-1}$). Por su parte el ANOVA arrojó diferencias estadísticamente significativas entre las medias del contenido de COS en los escenarios evaluados ($p=0.001$) (**Figura 3.46**). Específicamente, el contenido de COS promedio en los primeros 30 cm de los bosques conservados (BC) difirió del contenido del resto de los escenarios.

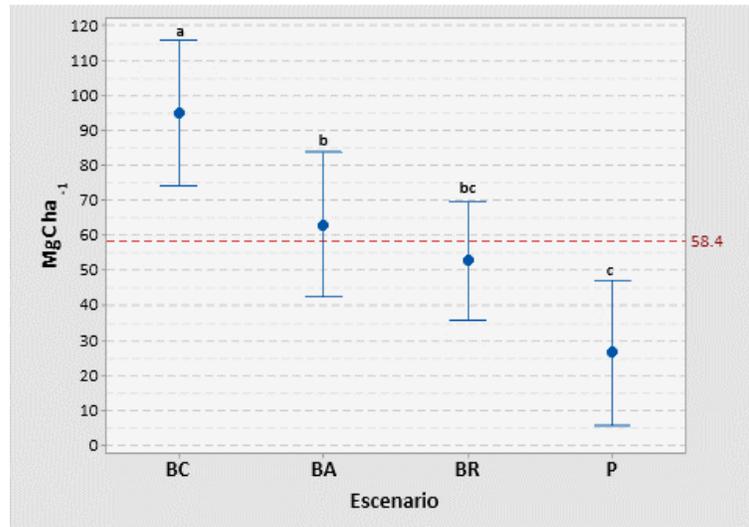


Figura 3.46: Contenido de COS en los primeros 30 cm por escenario.
 *Las medias en columna que no comparten una letra sobre la barra son significativamente diferentes. (ANOVA de una vía, $p<0.05$). **BC:** Bosques conservados. **BA:** Bosques con aprovechamiento. **BR:** Bosques reforestados. **P:** Pastizal.
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la producción anual de hojarasca, los bosques con aprovechamiento fueron el escenario que presentó la mayor producción con más de 8 Mg ha^{-1} (835 g m^2), mientras que los pastizales presentaron la menor con $< 1.21 \text{ Mg ha}^{-1}$. La producción en BC y BR se encuentra en el rango de 3 a 5 Mg ha^{-1} .

La producción mensual de hojarasca para los bosques conservados fue de 0.43 Mg ha^{-1} , la de bosques con aprovechamiento de 0.70 Mg ha^{-1} , y finalmente 0.31 y 0.10 Mg ha^{-1} para bosques restaurados y pastizales, respectivamente.

Con el análisis de medias (ANOM) se define que existen diferencias en la producción de hojarasca de BA y P frente a la media general ($\bar{X}=453.20 \text{ g m}^2$). Así mismo, el ANOVA arrojó diferencias estadísticamente significativas entre los manejos ($p=0.000$), pero estas diferencias no se presentaron en los bosques conservados frente a los bosques restaurados (**Figura 3.47**). Los resultados de la producción de hojarasca por muestreo y punto de muestreo se presentan en el **Anexo 6**.

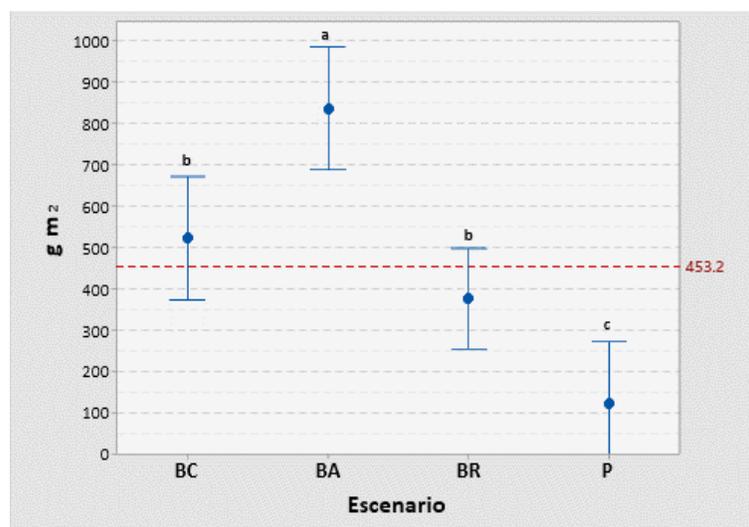


Figura 3.47: Promedio de la producción anual de hojarasca (2020-2021) por escenario.
 *Las medias en columna que no comparten una letra sobre la barra son significativamente diferentes. (ANOVA de una vía, $p < 0.05$). **BC:** Bosques conservados. **BA:** Bosques con aprovechamiento. **BR:** Bosques reforestados. **P:** Pastizal.
Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de cobertura arbórea en el año 2000 difirió entre los escenarios, siendo mayor al 70 % en los bosques conservados y menor al 1 % en los pastizales. BA y BR presentaron porcentajes de cobertura entre 30 y 60 % (Tabla 3.25). Cabe resaltar que en este año, algunas áreas (30x30 m) tuvieron porcentajes mayores al 90 % en BC, BA y BR, mientras que en P el máximo porcentaje fue del 30 %.

Para el año 2020 se pudo observar un aumento en el porcentaje de cobertura arbórea en los escenarios evaluados respecto al año 2000. La media en BC fue mayor al 90 % mientras que en BA fue del 80 %; en estos dos escenarios, el aumento respecto al año 2000 fue de aproximadamente 20 puntos porcentuales. Los bosques restaurados y las áreas de pastizal también presentaron un aumento en el periodo; sin embargo, este aumento fue de entre 7 y 14 puntos porcentuales. En algunas áreas, los máximos valores registrados en BC, BA y BR alcanzaron más del 99 %, mientras que los valores mínimos de cobertura arbórea en BR y P fueron de cero.

Para determinar las diferencias significativas entre el porcentaje de cobertura arbórea entre 2000 y 2020 se realizó una prueba de Mann-Whitney, encontrando diferencias entre todos los manejos. La mayor diferencia se observó en los bosques aprovechados y, aunque se encontraron diferencias en el área de pastizal, esta fue mínima (Tabla 3.26).

Escenario	N	Año 2000	Año 2020	Diferencia	p	Confianza lograda (%)	IC para la diferencia
BC	40	93.00	96.50	-5	0.009	95.09	(-33, -1)
BA	40	61.50	90.00	-15	0.003	95.09	(-36,-3)
BR	60	27.00	59.00	-6	0.017	95.00	(-26, -1)
P	40	0.00	2.00	-2	0.000	95.09	(-2, 0)

BC: Bosques conservados. **BA:** Bosques con aprovechamiento. **BR:** Bosques reforestados. **P:** Pastizal.
Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, el ANOM arrojó diferencias entre las medias de los escenarios frente a la media general tanto para el año 2000 ($\bar{X}=41.2\%$) como para el año 2020 ($\bar{X}=55.8\%$), siendo mayor a esta en BC, BA y menor en P en ambos años. Los bosques reforestados no mostraron diferencias en esta prueba, en ninguno de los años evaluados.

Mediante una prueba de Kruskal-Wallis se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de los escenarios, tanto para el año 2000 ($p=0.000$), como para el año 2020 ($p=0.000$). Los resultados del porcentaje de cobertura arbórea por celda evaluada y zona de muestreo se presentan en el **Anexo 7**.

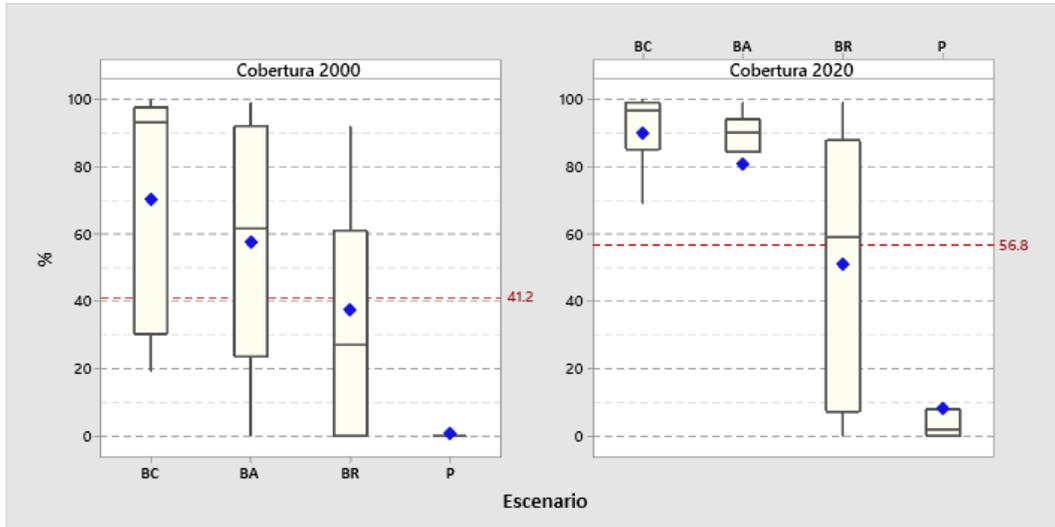


Figura 3.48: Gráfica de cajas del porcentaje de cobertura arbórea en 2000 y 2020.
BC: Bosques conservados. **BA:** Bosques con aprovechamiento. **BR:** Bosques reforestados.
P: Pastizal.

Fuente: Elaboración propia.

3.4. O3: IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE FACTORES DE LA DEGRADACIÓN

3.4.1. Actores sociales.

Se realizaron diversas acciones con la finalidad de contactar a los actores sociales que participaron en la investigación (**Tabla 3.27**), específicamente se realizaron juntas con autoridades de CONAFOR en Puebla, donde se expuso el proyecto, los objetivos de este, logrando la realización de un convenio de colaboración que se encuentra en desarrollo.

Tabla 3.27: Acciones de contacto y acercamiento con los actores sociales.		
Cargo	Acción llevada a cabo	Fecha
Subgerente Operativo. CONAFOR Puebla	Presentación de proyecto. Instalaciones CONAFOR	18/02/2019
Associate Programme Officer. LDN Target Setting Programme. Global Mechanism of the UNCCD	Presentación de proyecto.	21/08/2018
Técnico Forestal. CONAFOR Puebla	Presentación de proyecto. Instalaciones CONAFOR	18 /02/2019
Ingeniero Forestal. CONAFOR Puebla	Presentación de proyecto. Instalaciones CONAFOR	18 /02/2019
Propietario Bosque Natural. Localidad San José Providencia	Presentación de proyecto.	05/02/2019
Propietario Finca Admiel Localidad San José Providencia	Presentación de proyecto.	10/05/2018
Comisario Localidad Analco	Presentación de proyecto ante asamblea comunal. Analco	25/04/2019
Responsable. Programa de Reforestación Bienes Comunales de Analco	Presentación de proyecto ante asamblea comunal. Analco	25/04/2019
Encargado de Educación. Bienes Comunales de Analco	Presentación de proyecto ante asamblea comunal. Analco	25/04/2019

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el día 25 de abril del año 2019 en el Salón de Usos Múltiples de la localidad de Analco, se realizó una junta con los pobladores pertenecientes a los Bienes Comunales de Analco (**Figura 3.49**), donde se les presentó el proyecto de investigación y se plantearon los objetivos en una asamblea comunal. Las personas se interesaron y propusieron la incorporación de los niños de la comunidad a este con la finalidad de que conocieran y aprendieran sobre el trabajo forestal; sin embargo, debido a la pandemia no sé pudo realizar esta fase.



Figura 3.49: Presentación del proyecto ante asamblea comunal.

(a) Presentación del equipo de trabajo (b) Explicación de los objetivos y actividades a realizar (c) Documento del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la relevancia de los factores y sus interacciones en el proceso de degradación de tierras; se contactó con 7 expertos que participaron en estos instrumentos (ANEXO 2 y 3). Se convocaron tomando en cuenta su conocimiento sobre el tema, sobre la zona de estudio y sobre problemáticas socioambientales que promueven la degradación. Los expertos participantes se muestran en la **Tabla 3.28**.

Tabla 3.28: Lista de expertos que participaron en la construcción del modelo DPSIR		
Experto	Área	Institución o dependencia
Benito Ramírez Valverde.	Estudios y Estrategias en el Desarrollo Rural Sostenible.	Colegio de Postgraduados. Campus Puebla. Puebla, México.
Fernando Ayala Niño	Servicios Ambientales del Suelo	UBIPRO FES-Iztacala. Universidad Autónoma de México (UNAM). Ciudad de México, México.
Jorge David Fernández Medina.	Coordinación General de Planeación e Información.	Comisión Nacional Forestal. (CONAFOR). Ciudad de México, México.
José Luis Barrios Aguilar.	Asesor técnico forestal.	Comisión Nacional Forestal. (CONAFOR). Puebla, México.
Pedro Hernández Luna.	Jefe de Departamento de Protección y Restauración.	Comisión Nacional Forestal. (CONAFOR). Puebla, México.
Vicente Arriaga Martínez.	Director del Proyecto Agrobiodiversidad Mexicana	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Ciudad de México, México.
José Guadalupe Nolasco Espinosa.	Brigada de Educación para el Desarrollo Rural	Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria Y Ciencias Del Mar. Puebla, México.

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Factores relevantes en el proceso de Degradación de Tierras.

Con la información obtenida en el presente estudio se determinaron 60 factores que pudieran estar involucrados en el proceso de degradación en el municipio (**ANEXO 8**). Posterior a la fase de depuración de factores por parte de los expertos, se produjo una lista final de 25 factores. La **Figura 3.50** resume los resultados del análisis agrupado en los componentes del modelo -(D)drivers, (P)presiones, (E)estado, (I)impactos y (R)respuestas-, involucrados en el proceso de Degradación de Tierras en el municipio de Ixtacamaxtitlán, Puebla.



Figura 3.50: Diagrama DPSIR de los factores y las relaciones presentes en el proceso de Degradación de Tierras del municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.

Cabe resaltar que, a petición de los expertos y en común acuerdo, se redefinieron algunos factores para mejorar el entendimiento para la siguiente etapa del proceso. Así mismo, a partir de la elección de las respuestas más relevantes que se han presentado en el periodo de estudio, estas se reestructuraron de forma integral con la finalidad de que enfocaras a detener, reducir y revertir la degradación al año 2030 en el municipio. En la **Tabla 3.29** se presenta la lista final de factores y su explicación.

Se reconocieron 5 drivers como los más relevantes en el proceso de degradación de tierras. Estos drivers motivan las actividades humanas e incluyen las principales actividades productivas del municipio: (D1) actividades agrícolas, (D2) ganaderas y (D3) madereras. Así mismo, se incluye a la (D4) minería por su riesgo de asentamiento y a la (D5) marginación como factor socioeconómico. Estos drivers se reconocen como conductores o generadores de presiones en el ambiente.

Tabla 3.29: Listado final de los factores del modelo DPSIR

	Concepto	Explicación
Drivers	D1. Actividades agrícolas	Principal actividad productiva
	D2. Actividades ganaderas	Alimentación de pastoreo libre
	D3. Actividades madereras	Tercera actividad productiva en el municipio.
	D4. Minería	Amenaza de instalación de una minera transnacional
	D5: Marginación	Alto grado de marginación con un índice de 0.56
Presiones	P1. Inadecuadas prácticas agrícolas	Prácticas agrícolas poco sustentables
	P2. Deforestación o eliminación de la vegetación natural.	Cambios de uso de suelo y/o sobreexplotación
	P3. Sobrepastoreo	Pastoreo excesivo
Estado	E1. Tierras de cultivo con productividad en declive	Un amplio porcentaje de tierras de cultivo presenta una DPT en declive considerada como degradación
	E2. Pérdida de la cubierta vegetal natural	Pérdida o disminución de superficies arboladas y pastizales
	E3. Disminución o bajo contenido de COS	Cambios negativos o valores menores a 50 t ha ⁻¹ en el contenido de COS en el territorio
	E4. Tipos de suelos susceptibles a la erosión	Los suelos en zonas degradadas susceptibles a la erosión
	E5. Pendientes pronunciadas	Pendientes abruptas. Pendiente media del 27 %
Impacto	I1. Riesgo de desastres	Aumento del riesgo de desastres
	I2. Bajo rendimiento productivo en la vegetación	Limitado crecimiento de la vegetación
	I3. Disminución de los rendimientos agrícolas	Menores rendimientos agrícolas y disminución de la disponibilidad de alimento
	I4. Pérdida del suelo por erosión	Pérdida del suelo y sus nutrientes por efecto de la gravedad, percolación y escorrentía
	I5. Conflictos socioambientales	Ruptura del tejido social
	I6. Migración	Aumento de la migración
Respuestas	R1. Prácticas agrícolas sustentables	Capacitación a los usuarios de las tierras para la introducción e implementación de técnicas con enfoque de Manejo Sustentable de Tierras.
	R2. Reforestación y restauración forestal	Mejorar el acceso a los programas públicos para conservar, reforestar y restaurar los ecosistemas forestales; así como el mantenimiento de estas zonas.
	R3. Protección y conservación de suelos	Mejorar el acceso a los programas públicos para la implementación de obras para el control de la erosión, retención de suelo y captación de agua
	R4. Establecimiento de Zonas de Restauración Ecológica	Restauración de zonas con alto grado de degradación debido a factores antropogénicos y/o naturales.
	R5. Programas de empleo temporal	Reactivación de los programas de empleo temporal enfocados al aumento de ingresos por medio de la participación de proyectos de beneficio familiar y comunitario.
	R6. Revisión y rediseño de los programas públicos	Revisar y en su caso rediseñar las políticas públicas referentes al apoyo de las actividades productivas (agrícolas, pecuarias, forestales) desde un enfoque integrado, armonizado entre los tres niveles de gobierno y contextualizado a las necesidades reales del municipio

Fuente: Elaboración propia

Las presiones más relevantes fueron 3, derivadas de las actividades humanas y son: (P1) inadecuadas prácticas agrícolas, (P2) deforestación o eliminación de la vegetación natural y (P3) sobrepastoreo, las cuales influyen o modifican el estado del ambiente.

En la condición o estado del ambiente se identificaron 5 factores como los más relevantes, los cuales reflejan los aspectos que dan cuenta de la degradación de la tierra en la zona de estudio o bien que son inherentes al sistema; estos aspectos en conjunto provocan o causan impactos en los bienes y servicios ecosistémicos. Los factores identificados fueron: (E1) Tierras de cultivo con una productividad en declive, (E2) pérdida de la cobertura vegetal natural, (E3) disminución o bajos contenidos de COS, (E4) tipos de suelos susceptibles a la erosión y (E5) pendientes pronunciadas.

Los impactos identificados como relevantes fueron 6 y comprenden los procesos que afectan la calidad y el funcionamiento de los bienes y servicios ecosistémicos y el bienestar humano. Los impactos identificados fueron: (I1) riesgo de desastres, (I2) bajo rendimiento productivo en la vegetación, (I3) disminución de los rendimientos agrícolas, (I4) pérdida de suelos por erosión, (I5) conflictos socioambientales y (I6) migración.

Las respuestas más relevantes reconocidas fueron 6 y están dirigidas a evitar, reducir y revertir la degradación de tierras en el municipio. Estas fueron: (R1) prácticas agrícolas sustentables, (R2) reforestación y restauración forestal, (R3) protección y conservación de suelos, (R4) establecimiento de Zonas de Restauración Ecológica, (R5) programas de empleo temporal y (R6) revisión y rediseño de los programas públicos. Cabe destacar que la respuesta R6 fue añadida por recomendación de los expertos y es derivada de la importancia de armonizar las políticas públicas existentes y así evitar un solapamiento que promueva la competencia por el uso de suelo.

3.4.3. Relaciones causa-efecto en proceso de Degradación de Tierras.

Las relaciones causa-efecto entre los factores determinados dentro del marco DPSIR se calificaron por parte de los expertos dentro de una matriz cruzada como relación causa-efecto: nula, poca, clara, fuerte y extrema. Los resultados de esta matriz se pueden observar en el **ANEXO 9**.

En la **Figura 3.51** se representan los resultados de la identificación de las relaciones causa-efecto. Sobre dicho diagrama se resaltan los siguientes puntos:

- Las actividades agrícolas (D1) y la marginación (D5) presentan una fuerte relación con las inadecuadas prácticas agrícolas (P1). D1 en conjunto con las actividades ganaderas (D2) madereras (D3) y minería (D4) tienen una fuerte relación con la deforestación o eliminación de la vegetación natural (P2). Mientras que las actividades ganaderas (D2) presentan una relación extrema con el sobrepastoreo (P3).
- Las inadecuadas prácticas agrícolas (P2) a su vez tienen una relación fuerte con el estado del ambiente (E1, E2, E3, E4, E5). Sin embargo, resalta que la deforestación o eliminación de la vegetación natural (P2) de acuerdo con los expertos, presenta una relación extrema con suelos susceptibles a la erosión (E4), mientras que el sobrepastoreo, presenta una relación fuerte con la pérdida de cubierta vegetal natural (E2) y la susceptibilidad de los suelos a la erosión (E4).
- Las tierras de cultivo con productividad en declive (E1) y la pérdida de la cubierta vegetal natural (E2) promueven un impacto fuerte en la pérdida de suelo por erosión (I4). Mientras que la susceptibilidad de los suelos a la erosión (E4) y las pendientes pronunciadas (E5) presentan una relación extrema con este último impacto (I4). Por otro lado, E2 y E5, presentan relación fuerte con el riesgo de desastres (I1), el bajo rendimiento productivo de la vegetación (I2) y el bajo rendimiento agrícola (I3) -en el caso del segundo-.

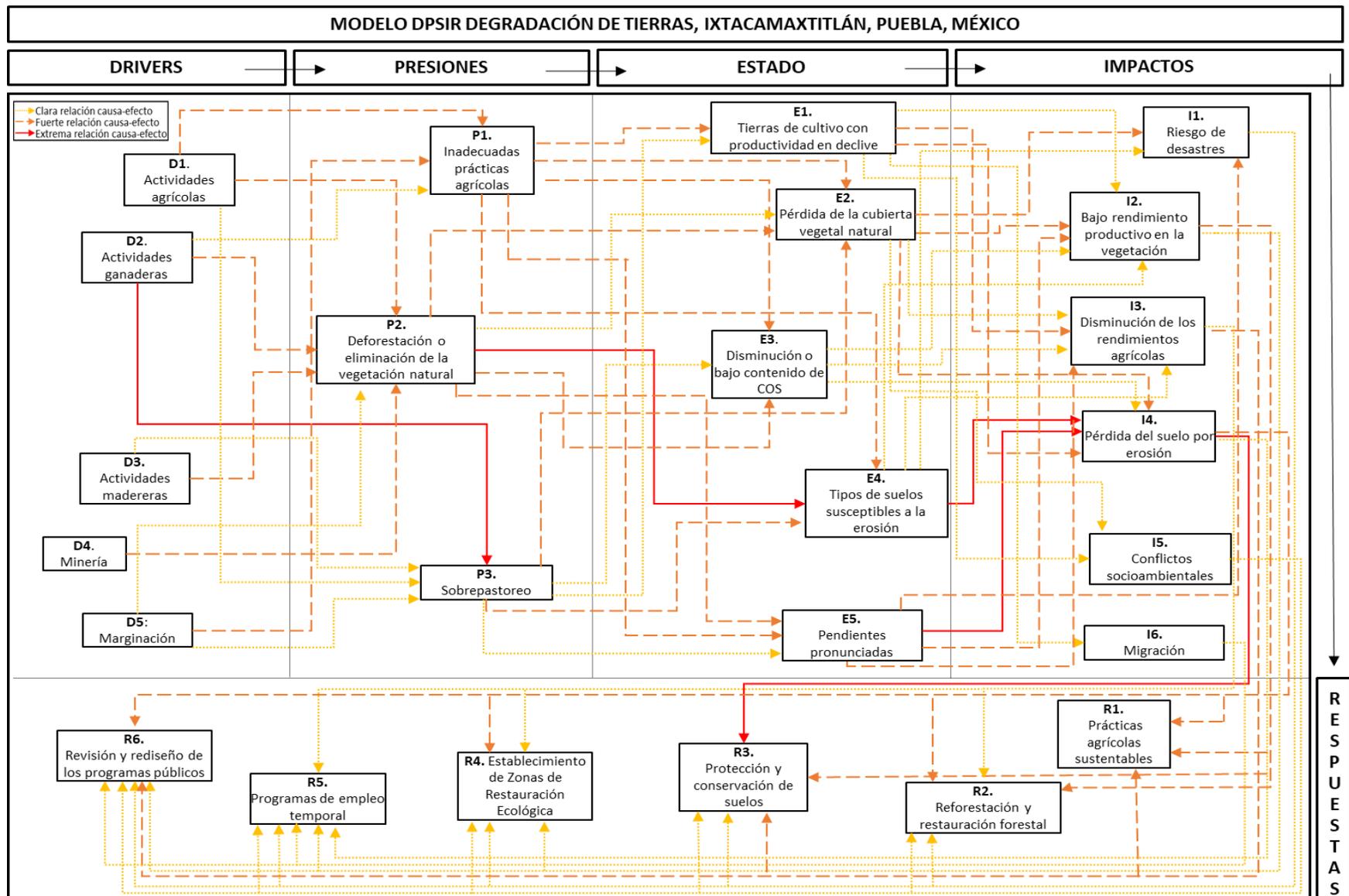


Figura 3.51: Diagrama de las relaciones causa-efecto dentro del marco DPSIR en el proceso de Degradación de Tierras del municipio de Ixtacamaxitlán 2000-2015.
 *Las relaciones causa-efecto identificadas como nula o poca, no fueron tomadas en cuenta en este diagrama

- Como consecuencia de los impactos, una serie de respuestas -tomando en cuenta las aplicadas en el periodo 2000 a 2015 y nuevas propuestas integrales-, han sido identificadas. El bajo rendimiento producto en la vegetación (I2), la disminución de los rendimientos agrícolas (I3) y la pérdida de suelo por erosión (I4), presentan una fuerte relación con las prácticas agrícolas sustentables como respuesta. Así mismo, I2 e I4, promueven fuertemente respuestas como la reforestación y la restauración forestal y, en el caso de I2 e I3, promueven fuertemente la protección y conservación de suelos, identificando que la pérdida de suelo por erosión promueve extremadamente esta respuesta. Finalmente, la disminución de los rendimientos agrícolas y la pérdida de suelo por erosión (I3 e I4) promueven la revisión y rediseño de los programas públicos.

Como se mencionó anteriormente, las complejas interacciones entre los factores de los componentes del DPSIR, han derivado en una serie de respuestas para frenar esta problemática. Sin embargo, estas respuestas a su vez presentan un grado de relación o influencia sobre los factores del modelo.

En la **Figura 3.52** se puede observar la representación de estas relaciones. Respecto a ello, se resalta lo siguiente:

- De acuerdo con los expertos, la mayor parte de las respuestas sobre los componentes (D), (P), (E) e (I) presentan una relación causa-efecto clara, fuerte y extrema.
- Las respuestas de prácticas agrícolas sustentables (R1), reforestación y restauración forestal (R2) y protección y conservación de suelos (R3), presentan una influencia extrema sobre el impacto de pérdida de suelo por erosión (I4).
- Las prácticas agrícolas sustentables influyen de forma extrema sobre las presiones de inadecuadas prácticas agrícolas (P1), la deforestación o eliminación de la vegetación natural (P2) y sobre el driver de la actividad económica agrícola (D1).
- Otras influencias extremas se pueden observar entre la reforestación y restauración forestal (R2) frente a las actividades madereras (D3).
- La reforestación y restauración forestal (R2) se presenta como la respuesta que tiene un mayor número de relaciones consideradas como fuerte sobre los diversos factores del modelo siendo en algunos casos extrema, como lo mencionado anteriormente.
- Por otro lado, los programas de empleo temporal (R5) presenta interacciones más débiles, siendo nula en el caso de la relación entre esta y el driver de minería (D4).
- Sobre factores socioeconómicos como el driver de marginación (D5) y el impacto de migración (I6), únicamente las respuestas de programas de empleo temporal (R5) y la revisión y rediseño de los programas públicos (R6) los influyen fuertemente.
- Solo la respuesta de revisión y rediseño de los programas públicos (R5) presenta una influencia fuerte sobre la problemática de la minería en la zona de estudio.
- Las respuestas establecidas presentan en todos los casos una influencia que va desde clara hasta extrema sobre las presiones determinadas en la presente investigación.
- En proporción, los impactos son el componente del modelo DPSIR que menor número de relaciones consideradas como fuerte presenta, seguido del componente de drivers.

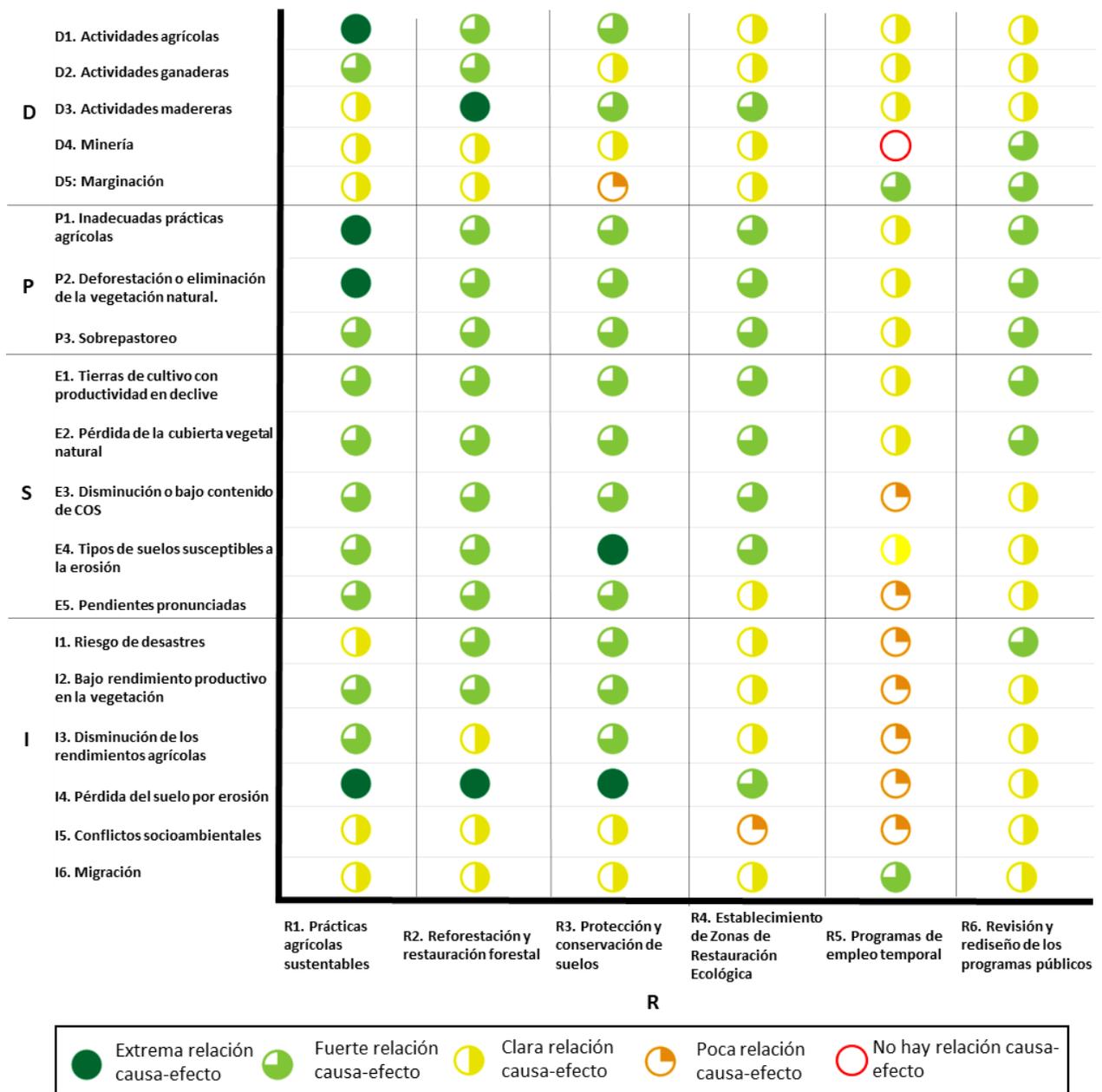


Figura 3.52: Diagrama de la influencia de las respuestas sobre los factores del modelo DPSIR para evitar, reducir y revertir la Degradación de Tierras del municipio de Ixtacamaxtitlán 2000-2015.

4.1. 01. LÍNEA BASE DE TIERRAS DEGRADADAS

La información reportada en este objetivo se obtuvo a partir de la metodología propuesta por la Convención de Lucha contra la Desertificación y se basa en la evaluación de tres indicadores clave: Cubierta Terrestre, Dinámica de la Productividad de la Tierra y Carbono Orgánico del Suelo.

4.1.1. Cubierta Terrestre

A nivel municipal, el 96.7 % del territorio permaneció sin cambios en el periodo de estudio en la Cubierta Terrestre (CT). Sin embargo, se encontró una tendencia negativa en este indicador debido a las reducciones de áreas con vegetación natural (superficies arboladas y pastizales) y a los incrementos de áreas productivas o antrópicas. La transición que se observó en mayor medida en el territorio se dio a causa del incremento de tierras de cultivo debido a la pérdida de pastizales en primer lugar, seguido por la pérdida de superficies arboladas.

Las superficies arboladas predominaron en zonas de difícil acceso, con pendientes mayores al 40 % y altitudes arriba de 2 800 m s. n. m. Los pastizales y las zonas de cultivo se presentaron en áreas más accesibles con porcentajes de pendiente menores al 23 % y altitudes de 2600 m s.n. m.

La baja pérdida de superficies arboladas puede responder tanto a los esfuerzos realizados por el Gobierno Estatal y Federal, como a la disposición de los habitantes para participar en contrarrestar los fenómenos de origen natural y antrópico que se han presentado en la región tales como sequías e incendios forestales los cuales han presentado impactos negativos en los bosques.

Entre los mencionados esfuerzos por la recuperación y preservación de los bosques destacan la declaración de Zonas de Restauración Ecológica (1.5 km²) y los programas de reforestación y restauración de suelos implementados en Ixtacamaxtitlán desde 1998 (Cervantes *et al.*, 2008; UACH-UNICEDER, 2002), algunos de los cuales continuaron hasta 2015. Se ha documentado las comunidades de la zona de estudio registraron una alta participación en el aprovechamiento de los apoyos enfocados a la mejora de los bosques, lo que promovió la recuperación y restauración de la vegetación y el suelo (UACH-UNICEDER, 2002); mientras que, tan solo en el periodo de 2013 a 2015 se reforestaron casi 3 km² utilizando 2 485 530 árboles (INEGI, 2014a, 2015a, 2016a). Así mismo, en el año 2000, el municipio de Ixtacamaxtitlán, junto con otros ocho municipios sumaron casi el 55 % de la reforestación estatal.

La principal actividad económica en el municipio es la agricultura cuyos cultivos principales son el maíz, la cebada, la papa, el frijol y el trigo (INEGI, 2002); sin embargo, aunque 95 % de la producción total es para autoconsumo (INEGI, 2009), se han impulsado actividades que han promovido una diversificación de cultivos entre los que se encuentran avena, alverjones, calabaza, ajo, sorgo, haba, alfalfa, café cereza y naranja; (INEGI, 2016a; Tapia-Guerrero, 2018), estos cultivos también se comercializan al interior de la región y en municipios cercanos, mostrando una actividad productiva variable (Bautista *et al.*, 2007; INEGI, 2007b; Lopez-Díaz, 2005; Tapia-Guerrero, 2018).

La migración es un fenómeno común en la zona (Bautista *et al.*, 2007) teniendo una disminución en su población del 13.4 % en el periodo de estudio, al pasar de 28 358 habitantes a 24 512; sin embargo, la población económicamente activa dedicada al sector primario aumentó 3.4 % entre 2000 y 2015 (INEGI, 2015b). Esto sugiere que la incidencia de estos factores ha contribuido al aumento de tierras de uso agrícola.

Algunos estudios apuntan a la urbanización como promotora importante de cambios en la CT (Abdullah *et al.*, 2019; Camacho-Sanabria *et al.*, 2017; Kędra & Szczepanek, 2019; Ren *et al.*, 2020) pero en Ixtacamaxtitlán no se presentó dicho fenómeno, de hecho, el bajo desarrollo urbano se reflejó claramente en la mínima expansión de los asentamientos humanos durante el periodo de estudio ya que representó menos de 1 % del territorio. Esto coincide con INEGI (2015b), quien cataloga al municipio como una zona rural con una densidad poblacional de 43.7 habitantes por km² y cuyo grueso de localidades presenta una población menor a los 2 500 habitantes.

4.1.2. Dinámica de la Productividad de la Tierra

En el periodo de estudio, el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) en el municipio de Ixtacamaxtitlán mostró una tendencia significativamente positiva debido al aumento en la superficie de clases de mayor rango, esto destaca una mejora en la abundancia y densidad de la vegetación. Así mismo los cambios negativos entre clases de NDVI únicamente representaron el 10 % del territorio.

Pese a lo anterior, a lo largo del periodo de estudio, se presentaron disminuciones anuales en NDVI que pudieron deberse a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos atípicos documentados en la presente investigación. Los fenómenos incluyen sequías sin precedentes, ciclones y frentes fríos (SEDESOL, 2012) que se presentaron en los años 2004 y 2005; así mismo, en 2011 se documentaron heladas que impactaron sobre todo al sector agrícola (SEDESOL, 2012) y en 2013 se incendiaron casi 4.5 km² en áreas de pastizales (INEGI, 2014a).

La Dinámica de la Productividad de la Tierra (DPT) determinada como resultado de la identificación de cambios en la CT y su relación con el NDVI, es considerado como un enfoque robusto para la evaluación y el seguimiento de la degradación de la tierra, esto porque toma en cuenta la variabilidad temporal del crecimiento de la vegetación, su adaptación y resiliencia a diversas condiciones inducidas por el hombre (Baskan *et al.*, 2017; UNCCD, 2016b). En este sentido, cabe resaltar que la tendencia positiva del NDVI en Ixtacamaxtitlán se presentó a partir de una baja productividad dada antes del periodo de estudio, la cual promovió tendencias negativas en la DPT que se manifestaron en procesos de degradación potencial en la intensidad y persistencia de la vegetación en el 17.7 % del territorio.

También es importante puntualizar que la determinación de las clases de DPT en áreas que permanecieron sin cambios estuvo dada por su clasificación de NDVI. Así, al comparar dos clases de dinámica de la productividad en superficies arboladas persistentes, podemos observar que 195.71 km² tuvieron una clase “estable, no estresada”, mientras que 8.91 km² una clase “creciente”. En el primer caso, se debe a que la NDVI estuvo clasificada como “moderada” y “débil”, mientras que, en el segundo caso, se determinó como “intensiva” por lo que se considera a esta como el área con mejores condiciones de vegetación, tanto por la clasificación de Cubierta Terrestre a la que pertenece, como por su clasificación de NDVI.

Respecto a los cambios negativos en la CT, se observan también diferencias en su clasificación de DPT, sin embargo, esta clasificación depende tanto de su clase de NDVI como del tipo de cambio en la CT que haya sucedido, ya sea de superficies arboladas a pastizal o tierras de cultivo, de pastizal a tierras de cultivo o de tierras de cultivo a superficies artificiales. Por ejemplo, a pesar de presentar una NDVI moderada, la transición de superficies arboladas a pastizales presentó una clase de productividad identificada como “estable pero estresada”, mientras que la transición de superficies arboladas a tierras de cultivo tuvo una productividad catalogada con “primeros signos de declinación” debido a la pérdida de biomasa que se origina en la transición.

La productividad “en declive” considerada como degradación potencial en las áreas de cultivo, afectó el 39 % de su área. Este fenómeno sugiere una disminución persistente de la productividad que se produce generalmente por la disminución o pérdida de materia orgánica debido al uso intensivo de la tierra de cultivo

(Baskan *et al.*, 2017). En áreas de pastizales, los “primeros signos de declinación” se presentaron en el 9 % de esta categoría, lo que podría ser atribuido a la disminución de la biomasa por sobrepastoreo (Lopez-Díaz, 2005), a los incendios forestales ocurridos en estas áreas y a la incidencia de sequías a lo largo del periodo de estudio. Finalmente, la productividad “en declive” identificada en las superficies artificiales se considera como degradación debido a la pérdida de la vegetación por la pérdida total del suelo debido al sellado de este (Akinyemi *et al.*, 2020).

La mayor parte del territorio de Ixtacamaxtitlán no presenta cambios negativos en la LC, sin embargo la dinámica de la productividad de la tierra presenta tendencias negativas que sugieren procesos degradativos en una extensión importante de pastizales y tierras de cultivo.

4.1.3. Carbono Orgánico del Suelo

La perturbación o eliminación de la vegetación debido a las transiciones de áreas naturales a áreas productivas promueve un decremento abrupto en el contenido de COS por la exposición del suelo a los factores naturales (Chappell *et al.*, 2019).

Los cambios negativos en el COS en Ixtacamaxtitlán fueron mínimos, representando 1.69 km² de la superficie del municipio y se encontraron asociados a la pérdida de superficies arboladas, mientras que los cambios positivos se asociaron con la ganancia de esta categoría (superficies arboladas) y representaron 0.32 km² del territorio.

Aunque no se presentó una tendencia negativa con diferencias estadísticamente significativas, el contenido de COS en el territorio tuvo una mínima pero constante disminución a lo largo del periodo de estudio, incluso en la zona central del territorio municipal con mayor extensión de tierras de cultivo y pastizales se presentaron áreas con valores menores a 50 t ha⁻¹ en el año 2015.

Las tierras de cultivo presentan bajas concentraciones de COS debido a la relación que existe con la productividad de la tierra (Akinyemi *et al.*, 2020; Gichenje & Godinho, 2018), y a que la agricultura acelera la pérdida de la capa superior del suelo por factores naturales y antropogénicos (Chappell *et al.*, 2019; Mitri *et al.*, 2019). En este sentido, Ixtacamaxtitlán es considerado como un municipio con alta vulnerabilidad al fenómeno de vientos fuertes, ya que se han registrado vientos de entre 100 y 130 km/h a 10 metros de altura sobre el terreno (SEDESOL, 2012), por lo que, la ausencia de vegetación en zonas agrícolas podría promover la pérdida de suelo; además, el relieve escarpado y las pendientes pronunciadas originan condiciones que favorecen el escurrimiento y la pérdida del suelo cuando la cubierta vegetal está disminuida.

Aunque los cambios negativos en la LC influyen directamente en los decrementos de COS (Cha *et al.*, 2020); en esta investigación se encontró que las pérdidas están asociadas principalmente al tipo de transición en la CT, y en menor medida a la superficie de transición. Por ejemplo, en el municipio la pérdida en el contenido de COS se observó sobre todo en la transición de superficies arboladas y pastizales a tierras de cultivo, y en menor medida de superficies arboladas a pastizales. Esto se explica porque a pesar de que se ha demostrado que la productividad no es la misma en superficies arboladas y pastizales, el contenido de COS en estas dos categorías presenta reservas de C similares (Cha *et al.*, 2020). En el caso de los pastizales esto se debe al alto contenido de raíces en la zona subsuperficial de suelo, mientras que en los bosques se debe a la producción y acumulación de hojarasca en la parte superficial del suelo; por lo que el decremento en esta transición (superficies arboladas a pastizales) no es tan pronunciado, sobre todo a largo plazo cuando el pastizal se encuentra establecido (Bojórquez-Serrano *et al.*, 2015; Zimmermann *et al.*, 2010).

4.1.4. Línea base de Degradación de las Tierras en Ixtacamaxtitlán, Puebla, México.

La identificación de áreas degradadas es de suma importancia para priorizar las posibles acciones de recuperación y restauración; también para mejorar las tierras en el contexto de su uso. Pese a que en algunas áreas de Ixtacamaxtitlán se presentaron cambios positivos en la evaluación de alguno de los tres indicadores, cuando estas áreas se combinaron con un indicador que presentó cambios negativos, se consideró como potencialmente degradada; esto debido a que de acuerdo con la UNCCD (2018), la mejora o estabilidad en alguno de los tres indicadores no puede compensar la degradación en otro indicador. En este sentido, pese a que la mayor parte del municipio permanece estable de acuerdo con la determinación de los indicadores en el periodo analizado, los cambios negativos considerados como potencial degradación de tierras en la zona de estudio ascienden a 107.88 km², lo que representa el 19 % del territorio

La degradación se presentó donde existen valores bajos en el COS y en el NDVI; en las transiciones de tierras de cultivo a áreas de pastizal y tendencias negativas en la DPT principalmente en la zona central del municipio, mientras que las áreas con “mejora” se observan con pequeños fragmentos al noroeste del territorio. Las tierras de cultivo presentaron una mayor extensión de áreas degradadas, seguida por los pastizales

El uso de datos globales a escalas locales puede promover una subestimación o sobreestimación de los valores de los indicadores (Akinyemi *et al.*, 2020; Nijbroek *et al.*, 2018). Validar los resultados obtenidos en este estudio resulta complicado debido a la ausencia de información de datos nacionales sobre los indicadores y a la escala espacial y temporal continua que se utilizó. Sin embargo, de acuerdo con la validación de la CT reportada anteriormente, el uso de los mapas de ESA-CCI-LC en la zona de estudio presentó una precisión mayor a 85 %.

Por otro lado, la determinación del estado de la tierra a nivel local permite tener la información primaria del estado de los recursos que pueda ser utilizada como una línea base, ello favorece establecer medidas de mitigación y compensación ambiental en caso de implantarse proyectos que promuevan la degradación del ambiente como es el caso de Ixtacamaxtitlán y la amenaza latente de la implantación de un proyecto transnacional de minería de oro a cielo abierto (Bastidas-Orrego *et al.*, 2019).

4.2. 02. EVALUACIÓN DE INDICADORES BAJO DISTINTOS ESCENARIOS

La información reportada en este objetivo se obtuvo a partir de la cuantificación y comparación de una serie de análisis fisicoquímicos del suelo y los indicadores de marco de la NDT bajo los escenarios de zonas naturales conservadas, zonas naturales con aprovechamiento, zonas restauradas o en proceso de restauración ecológica y zonas deforestadas ahora convertidas en zonas de pastizal.

4.2.1. Bosques Conservados

El bosque conservado del ejido de Analco (ACB) y el bosque conservado de San José Providencia (SJBN) son las áreas que comprenden el escenario de Bosques Conservados (BC). De acuerdo con la medición de los parámetros fisicoquímicos analizados, los valores obtenidos se encuentran dentro de los parámetros establecidos para el adecuado desarrollo de la vegetación, esto debido a la disponibilidad de nutrientes (Rodríguez-Balboa, 2020), la porosidad del suelo y el flujo de circulación de agua y aire, y que además, pudieran estar asociados a una mayor riqueza y abundancia de especies herbáceas (Díaz-Villa *et al.*, 2016) ya que en este escenario el sotobosque se encuentra bien desarrollado y la cobertura del dosel supera el 90 %.

En cuanto al Carbono Orgánico del Suelo (COS) determinado, se encontró que el escenario de BC presenta un mayor contenido almacenado respecto al resto de los escenarios, esto debido a que su contenido es casi

de 100 MgC·ha⁻¹. La cifra anteriormente reportada es superior a la obtenida para bosques de coníferas en México (Segura-Castruita *et al.*, 2005) (65.5 MgC·ha⁻¹) y ligeramente menor a la cifra reportada por Vela-Correa *et al.* (2012) para bosques de conservación de *pino sp* en México, cuyo contenido promedio es de 119 MgC·ha⁻¹. Así mismo, se encuentra dentro del rango reportado por Pérez-Ramírez *et al.* (2013) en bosques conservados de pino (103 ± 35 MgC·ha⁻¹).

La producción de hojarasca anual en BC fue de 5.2 Mg ha⁻¹, cifra menor a la determinada en BA, presentando diferencias estadísticamente significativas entre estos escenarios. Sin embargo, la producción mensual en este escenario fue 0.43 Mg ha⁻¹ mes⁻¹, igual a la reportada por Rocha-Loredo y Ramírez-Marcial (2009) en bosques conservados de pino (0.43 Mg ha⁻¹ mes⁻¹). Así mismo, a nivel internacional se reportan valores en bosques conservados y aprovechados de pino, los cuales rondan un rango de 0.42-0.73 Mg ha⁻¹ mes⁻¹ (Ferreira de Carvalho *et al.*, 2019; Viera & Schumacher, 2010).

El porcentaje de cobertura arbórea media en este escenario fue la mayor para los dos años evaluados (2000-2020), presentando diferencias estadísticamente significativas con respecto al resto de los escenarios. Así mismo, este porcentaje aumentó alrededor de 20 puntos porcentuales en ese periodo (2000 a 2020). Analizando los valores mínimos en ambos periodos se puede observar una diferencia significativa entre ellos, por lo que este aumento podría deberse a que en años anteriores, el borde de este escenario presentaba un impacto mayor en comparación con el último año evaluado.

4.2.2. Bosques con Aprovechamiento

Los Bosques naturales con aprovechamiento en la localidad de Analco (ABAa y ABAb) son las áreas que componen este escenario. En este, los valores de los análisis fisicoquímicos de pH, materia orgánica (MO), pedregosidad y % de carbono orgánico (CO) son ligeramente menores a los de los BC y sólo la MO presentó diferencias estadísticamente significativas. En el caso de la densidad aparente (DA) el valor obtenido es ligeramente mayor al de bosque conservado; a pesar de ello, estos valores se encuentran en niveles óptimos para el desarrollo de la vegetación, ya que la capa de hojarasca supera los 15 cm de profundidad, la cobertura del dosel es mayor al 80 % y el sotobosque también se encuentra bien desarrollado.

El contenido de COS en BA presenta diferencias estadísticas con los escenarios de BC y P, pero no con BR, cuyo contenido de COS es menor por 10 MgC·ha⁻¹. Diversos estudios han encontrado en bosques de pino con aprovechamiento, contenidos menores 50 MgC·ha⁻¹ (39 ± 20 MgC·ha⁻¹) (Campo *et al.*, 2016; Cantú-Silva & Yañez-Díaz, 2018; Pérez-Ramírez *et al.*, 2013), esto a causa de que el COS disminuye debido al manejo y la intervención antropogénica. Los valores reportados son menores a lo encontrado en la presente investigación; sin embargo, cabe resaltar que los contenidos de COS en bosques con aprovechamiento se ven influenciados por el tiempo de aprovechamiento y el tiempo en el que un bosque no ha tenido perturbación.

La mayor producción de hojarasca anual se reporta para este escenario con 8.3 Mg ha⁻¹, presentando diferencias estadísticamente significativas con el resto de los escenarios. Así mismo, la producción mensual en BA es de 0.70 Mg ha⁻¹ mes⁻¹, cifra mayor a los 0.38 Mg ha⁻¹ mes⁻¹ reportados por Gaspar-Santos *et al.* (2015) para bosques de pino con aprovechamiento, de la misma forma que en BC, la producción de hojarasca en BA está dentro del rango de bosques conservados y aprovechados (0.42-0.73 Mg ha⁻¹ mes⁻¹) (Viera & Schumacher, 2010).

La cobertura arbórea presenta diferencias con los demás escenarios así como en el periodo evaluado, esto indica un mayor crecimiento de la vegetación. Este escenario, al igual que BC, presenta un aumento de aproximadamente 20 puntos porcentuales en el periodo, lo cual podría deberse al tiempo en que estos bosques no han sido aprovechados y a que también se presenta un efecto reducido de borde que ha permitido la regeneración de la cobertura arbórea.

4.2.3. Bosques Reforestados

Este escenario lo componen los bosques reforestados de San José Providencia (SJB Ra y SJB Rb) y el pastizal reforestado de Analco (APR). Los resultados del pH muestran diferencias estadísticamente significativas con el resto de los escenarios. A pesar de ser considerado como moderadamente ácido, el pH en este escenario es mayor que en BC y BA; esta pequeña diferencia podría estar dada por un menor contenido de materia orgánica respecto a estos escenarios (Cruz-Macías *et al.*, 2020). La DA en este escenario es mayor que en BC y BA y también presenta diferencias estadísticamente significativas, lo que se asocia a un menor contenido de MO, la baja o nula presencia de sotobosque y la cobertura vegetal del 70 %. Así mismo cabe resaltar que en estas zonas, las pendientes superan el 30 %, por lo que a pesar del proceso de restauración en el que permanece el suelo de estas áreas, aún se encuentra expuesto a los factores climáticos que promueven la erosión hídrica y eólica.

El contenido de COS en BR se considera como medio; pese a ello, no presenta diferencias estadísticamente significativas con el escenario de pastizales. Tampoco presenta diferencias significativas con el escenario de BA; sin embargo, su valor promedio se encuentra más cercano a este escenario que a P, lo que podría indicar una paulatina recuperación del contenido de CO en el suelo debido a la reforestación.

La producción anual de hojarasca fue de 3.7 Mg ha^{-1} , presentando diferencias estadísticamente significativas con BA y P, por lo que la producción de este escenario es similar a la de BC. La producción mensual en BR fue de $0.31 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$, una cifra de $0.10 \text{ ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$ más a lo encontrado tanto en estudios nacionales ($0.20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$) (Rocha-Loredo & Ramírez-Marcial, 2009), como en estudios internacionales ($0.21 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$) (An *et al.*, 2017) en bosques reforestados de pino.

La cobertura arbórea en BR presentó también diferencias estadísticamente significativas entre el resto de los escenarios y en el periodo evaluado. En esta zona el aumento representó 15 puntos porcentuales en 2020 respecto a 2000. En este sentido, cabe resaltar que mediante el análisis de imágenes para determinar el porcentaje de cobertura arbórea se encontró que en el inter del periodo analizado, las áreas de bosques reforestados tuvieron diferentes impactos tanto naturales (incendios forestales) como antropogénicos (deforestación) por lo que el aumento en el porcentaje de cobertura arbórea no fue mayor. También resalta que la reforestación se dio a partir de 2009, por lo que, en este análisis solo en la mitad del periodo se dio la reforestación.

4.2.4. Pastizales

Las áreas que componen este escenario son el pastizal de Analco (APR) y el pastizal de San José Providencia (SJP). Los valores promedio obtenidos de los análisis fisicoquímicos en el escenario de pastizales presentan en su mayoría diferencias estadísticamente significativas con el resto de los escenarios, excepto en la pedregosidad y la conductividad eléctrica (CE). El contenido de materia orgánica es considerado como medio (NOM-021-RECNAT-2000, 2002) con diferencias significativas con BC y BA; así mismo, la densidad aparente es mayor a 1 g cm^{-3} , con diferencias significativas entre el resto de los escenarios. En este sentido se puede mencionar que este escenario presenta baja o nula cobertura arbórea y arbustiva con pendientes mayores al 15 % y con afloramientos rocosos en más del 10 % de la superficie, por esta razón la DA se ve alterada debido a la pérdida de MO a causa de la erosión (Hincapié-Gómez & Salazar-Gutiérrez, 2011).

Pese a que este escenario no presentó diferencias estadísticamente significativas en el contenido de COS respecto a BR, su contenido se determinó como bajo ya que es menor a 27 MgC ha^{-1} . Este valor difiere a lo encontrado por Cantú-Silva *et al.* (2018) en donde se reportan valores mayores a 50 MgC ha^{-1} en áreas de pastizal; sin embargo, estos valores se obtuvieron cuando estas áreas fueron producidas por cambios provenientes de bosque en los primeros años de cambio. Mientras que en este caso el pastizal lleva establecido por más de 20 años y su cambio provino de áreas agrícolas.

La menor producción de hojarasca en este escenario fue de menos de 1.21 Mg ha⁻¹ y presentó diferencias estadísticamente significativas con el resto de los escenarios. Por otro lado, su producción mensual (0.10 ha⁻¹ mes⁻¹) fue menor a lo reportado por estudios tanto nacionales como internacionales (Briones *et al.*, 2018; Lucrecia *et al.*, 2011; Mengui *et al.*, 2011) los cuales se presentan en un rango de 0.16-0.20 Mg ha⁻¹ mes⁻¹ en áreas de pastizal, esta diferencia posiblemente pueda deberse a factores como la pendiente y el clima que inciden en cubiertas vegetales herbáceas y al uso de suelo anterior dado antes del periodo analizado.

Como era de esperar, este escenario presentó el menor porcentaje de cobertura arbórea, pese a ello hay áreas (30x30 m) que tuvieron el 30 % de cobertura. En el año 2000 la media de cobertura no representó ni el 1 % de cobertura arbórea, por ello resalta el aumento de 7 puntos porcentuales para el año 2020. Esto también nos indica que la deforestación en estas áreas se dio hace más de 20 años y es probable que el sobrepastoreo no haya permitido la regeneración de árboles.

4.2.5. Evaluación de indicadores bajo distintos escenarios en Ixtacamaxtitlán, Puebla, México.

Con lo expuesto anteriormente, se define que existen diferencias entre los diferentes escenarios evaluados. Estas diferencias están dadas por el manejo forestal que se les ha dado.

Los bosques conservados presentan parámetros que se encuentran dentro de los rangos reportados para este tipo de ecosistemas; son bosques naturales con poco o nulo impacto antropogénico que han permanecido en periodo de desarrollo a lo largo del tiempo. Pese a ello, existen cambios positivos en el porcentaje de cobertura arbórea, por lo que es necesario continuar en esta línea y aplicar medidas de conservación en áreas de bosques naturales del municipio y así evitar su degradación.

Los bosques aprovechados también presentan parámetros adecuados para su desarrollo y permanecía; sin embargo, cabe resaltar que estos parámetros se encuentran cercanos a los de los bosques conservados e incluso en algunos casos lo sobrepasan (producción de hojarasca), esto posiblemente se deba a que el tiempo de aprovechamiento se detuvo hace al menos 8 años lo que ha permitido el crecimiento de la vegetación establecida aunado al crecimiento de la vegetación nueva. En este sentido resalta la importancia de promover medidas para un adecuado manejo y aprovechamiento que permitan periodos de recuperación de la vegetación y que eviten su degradación.

Los bosques reforestados presentan valores menores a BC y BA en los indicadores evaluados; sin embargo, en algunos casos no presentan diferencias estadísticamente significativas y las cifras son mayores a las reportadas en diversos estudios nacionales e internacionales. Lo anterior podría estar indicando una recuperación progresiva en estas áreas debido a la reforestación y a las medidas de protección y conservación de suelos que se han aplicado. En este sentido se resalta la necesidad de continuar con estas medidas para reducir y revertir la degradación.

Finalmente, los pastizales presentan parámetros menores al resto de los manejos, con bajo contenido de MO, producción de fitomasa en pie menor a la de estudios reportados con anterioridad y sin cobertura arbórea. Por un lado, esto nos da un panorama de la situación anterior de los bosques reforestados y por otro, resalta la necesidad de la aplicación de diversas medidas para revertir la degradación en estas áreas.

La cuantificación de los análisis fisicoquímicos de los suelos y los indicadores de producción de hojarasca, contenido de Carbono Orgánico del Suelo y porcentaje de cobertura arbórea en los escenarios evaluados permitió la comparación entre ellos para determinar sus diferencias y con ello enfocar de una mejor manera las acciones necesarias para evitar, reducir y revertir la degradación en la zona de estudio

4.3. O3: ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y LAS INTERRELACIONES

La información reportada en este objetivo se dio a partir de la Identificación y análisis de los factores y las interrelaciones que promueven la degradación de las tierras en el municipio de Ixtacamaxitlán, Puebla, México.

4.3.1. Factores que promueven la Degradación de Tierras

Aunque existen diversos marcos conceptuales para definir las causas y consecuencias de las problemáticas ambientales (Díaz-Martín, 2015), el marco conceptual DPSIR ha sido el sistema de organización más utilizado y al que se hace mayor referencia en la literatura (Sommer *et al.*, 2011; Yengoh *et al.*, 2014). Sin embargo, la definición de los factores dentro del modelo en diversos estudios ha sido una situación controvertida (Koochafkan *et al.*, 2003) ya que esta depende del objetivo del proyecto o evaluación, llegando en ocasiones a dificultarse debido a que los factores suelen encajar en uno o más componentes del modelo. En este sentido, la comparación de los resultados con otros estudios resulta complicada.

En la presente investigación, el modelo conceptual DPSIR proporcionó un marco de referencia para lograr la definición e integración de los factores causantes de degradación en el municipio con base en el Marco Científico-Conceptual de la NDT (UNCCD, 2018), el marco propio del modelo DPSIR (Bradley & Yee, 2015) y la consulta con expertos, lo que permitió describir las relaciones entre los orígenes y consecuencias de dichos factores para entender la dinámica y complejidad del presente objeto de estudio.

Similar a otros estudios que evalúan la degradación de tierras en diversas zonas (Kyere-Boateng & Marek, 2021; Obubu *et al.*, 2022; Weldemariam, 2017), resalta como driver principal las actividades agrícolas, aunado a las ganaderas y madereras en la zona de estudio; estas actividades primarias son el principal medio de subsistencia de los pobladores en el municipio. Las zonas agrícolas cubren un alto porcentaje del territorio, así mismo, el principal destino de la producción agrícola es el autoconsumo familiar. En esta misma línea, la actividad agrícola se realiza principalmente con animales, aunado a que la ganadería es la segunda principal actividad productiva de la zona de estudio se considera a esta como la segunda fuerza conductora. Por otro lado, Ixtacamaxitlán ocupa el cuarto sitio a nivel estatal en la producción forestal porque las actividades ganaderas son la tercera fuerza conductora en la zona de estudio.

Aunque la minería es considerada como un driver que mayores consecuencias presenta sobre la degradación de tierras (Batunacun *et al.*, 2019), no resalta en el municipio como actividad productiva; sin embargo, la amenaza continua de la instalación de una mina transnacional a cielo abierto ha causado diferentes problemas socioambientales en la zona, por lo que la amenaza puede ser considerada como driver (Marclint-Ediede, 2011). Por otro lado, la difícil movilidad promueve la baja participación social en pro de la defensa del territorio, por lo que esta situación se consideró como la cuarta fuerza motriz.

Como se documentó en la presente investigación, el municipio presenta altos niveles de pobreza, marginación y rezago social considerados como drivers principales de degradación de tierras (Agyemang *et al.*, 2007; CEPAL, 2005); sin embargo, los expertos consideraron únicamente a la marginación como fuerza impulsora de presiones en la zona de estudio.

La agricultura en la zona es principalmente realizada con labranza convencional, actividades de rosa tumba y quema y en diversas zonas con cultivos en pendiente, por lo que las inadecuadas prácticas agrícolas no solo en la zona de estudio, sino en general, se consideran como una presión recurrente en problemáticas de degradación (Obubu *et al.*, 2022). Aunado a ello, la sobreexplotación de los recursos y el crecimiento de la frontera agrícola, así como el crecimiento de la frontera ganadera y el sobrepastoreo también son una fuerte presión en Ixtacamaxitlán.

Aunque en la definición del objetivo 1 (O1) se tomaron en cuenta varios factores del estado del ambiente; los expertos definieron los más importantes y comprenden el declive en las tierras de cultivo, la pérdida de

la cobertura vegetal natural como las superficies arboladas y los pastizales y la disminución o el contenido menor a 50 MgC ha^{-1} del COS. En cuanto a los factores inherentes del sistema resaltaron los tipos de suelos en la zona (feozem, litosol y regosol), considerados como susceptibles a la erosión y las pendientes pronunciadas mayores al 27 %; cabe mencionar que, aunque estos dos últimos factores no son considerados como cambios en el estado debido a las presiones, la importancia de su anexión como parte del modelo radica en mejorar la comprensión del fenómeno de degradación, para con ello tomar en cuenta todas las causas que la promueven (Jin *et al.*, 2020).

Los impactos dados a partir de la definición del componente estado fueron diversos; resaltando como los más importantes: el aumento del riesgo de desastres como sequías, deslaves, incendios forestales; el limitado crecimiento de la vegetación debido a los cambios en los indicadores marco de la NDT; la reducción en los rendimientos agrícolas; la pérdida de suelo y sus nutrientes por efecto de la gravedad y la escorrentía; los conflictos socioambientales por la ruptura del tejido social debido a la diversidad de los puntos de vista entre quienes están a favor y en contra de la minera; y el aumento de la migración a causa de la falta de oportunidades y a los bajos rendimientos agrícolas. Cabe resaltar que en algunos estudios, tanto los conflictos socioambientales como la migración, son considerados como drivers y no como impactos (Agyemang *et al.*, 2007; Marclint-Ediede, 2011); empero, debido a la naturaleza dinámica de la relación pobreza-degradación-pobreza; diversos factores socioeconómicos también son considerados como impactos (Gedefaw *et al.*, 2020; Obubu *et al.*, 2022).

Las respuestas en los diversos estudios bajo el marco DPSIR y la degradación de las tierras son diversas. En algunos casos son más generalizadas, basadas sobre todo en fuentes bibliográficas y en guías definidas (Koohafkan *et al.*, 2003; Obubu *et al.*, 2022), mientras que en otros son puntuales a la problemática (Agyemang *et al.*, 2007; Diaz-Martín, 2015; Kyere-Boateng & Marek, 2021; Touré *et al.*, 2015) y realizan su definición a partir de enfoques participativos, siendo más contextuales como en la presente investigación. Las respuestas para Ixtacamaxitlán se enfocaron en la mejora, revisión y rediseño de las políticas públicas; las prácticas agrícolas sustentables; la aplicación, mejora y acceso a los diversos programas sociales enfocados a la restauración forestal y a la protección y conservación de los suelos; y la reactivación de los programas de empleo temporal.

4.3.2. Interrelaciones implicadas en la Degradación de Tierras

Las interacciones entre los factores se determinaron por medio de matrices de correlación. Las comparaciones entre causa-efecto comprendieron la evaluación por parte de los expertos entre los componentes del modelo DPSIR y el efecto de las respuestas sobre los Drivers(D), las Presiones(P), los Estados(E) y los Impactos(I); esto tomando en cuenta que, al tratarse de un sistema complejo; uno o más factores pueden producir uno o más efectos y también, que no todos los factores producen todos los efectos.

La agricultura como principal actividad productiva de Ixtacamaxitlán genera presiones como las inadecuadas prácticas agrícolas generalmente debido a la demanda de alimentos y productos para la subsistencia (Obubu *et al.*, 2022). Como consecuencia del continuo deterioro de la tierra para fines agrícolas el estado del ambiente se ve modificado (Agyemang *et al.*, 2007) disminuyendo su productividad, promoviendo la pérdida de la cobertura vegetal y bajos contenidos de COS que se ven exacerbados por la susceptibilidad de los suelos a la erosión sobre todo en pendientes pronunciadas (Obubu *et al.*, 2022). Esto genera procesos que afectan la calidad y el funcionamiento de los bienes y servicios ecosistémicos, causando sobre todo un limitado crecimiento de la vegetación y menores rendimientos agrícolas.

Aunado a lo anterior, la actividad ganadera, promueve la eliminación de la vegetación y un aumento presiones en estos ecosistemas debido a la carga continua del pastoreo sobre todo en áreas de pastizal (Batunacun *et al.*, 2019). Estas presiones modifican las condiciones del ecosistema por la pérdida de la

vegetación y la disminución del COS sobre todo en suelos susceptibles, promoviendo procesos negativos en la productividad de la vegetación y empobrecimiento o pérdida de las partículas del suelo. De la misma forma, las actividades madereras promueven la deforestación, presión que afecta directamente al estado del ambiente e impacta al sistema al provocar un aumento en el riesgo de desastres y la erosión del suelo (Weldemariam, 2017).

La minería es un factor socioambiental que presenta interacciones fuertes con la eliminación de la cubierta vegetal (Agyemang *et al.*, 2007); en este sentido, a pesar de que la minera no se ha establecido en el municipio, sí existe documentación de una serie de acciones de exploración que afectan el estado del ambiente pero que, sobre todo, promueven conflictos socioambientales entre los pobladores de la zona de estudio y en municipios aledaños (Bastidas-Orrego *et al.*, 2019). Por otro lado, la marginación como factor socioeconómico, aunque no presenta interacciones críticas con las presiones definidas en este estudio, sí presenta cierto grado de interacción que afecta el estado ambiental y promueve una serie de impactos como los ya mencionados, además de un aumento en el establecimiento de la población en sitios diferentes a Ixtacamaxtlán.

Como se puede observar, existen múltiples factores y presiones que conducen al deterioro ambiental y promueven la degradación en el municipio. Todo ello directa o indirectamente promovió una serie de respuestas en el periodo (**Anexo 8**) dentro de las cuales se definieron como las más importantes los apoyos para reforestación y restauración de zonas forestales, el establecimiento de Zonas de Restauración Ecológica y los programas de empleo temporal. Así mismo, resalta la necesidad de promover prácticas agrícolas sustentables mediante la capacitación a los diversos usuarios de las tierras; la reforestación y restauración de ecosistemas forestales y la implementación de obras para el control de la erosión, retención del suelo y captación de agua, acompañado de la mejora al acceso de los diversos programas públicos.

También es necesario la rápida respuesta para aplicar medidas que reviertan la degradación en áreas consideradas como focos rojos por su alto grado de degradación, así como la revisión y rediseño de las políticas públicas referentes al apoyo de las actividades productivas del municipio para con ello evitar el solapamiento y competencia de los apoyos enfocados a la promoción de dichas actividades, lo que junto con la aplicación de políticas de mejora como la reactivación de los programas de empleo temporal enfocados a los proyectos de beneficio familiar y comunitario promoverá al aumento de ingresos.

Las relaciones causa-efecto son de gran importancia para definir las interrelaciones entre los diversos factores que componen el modelo, lo que ayuda a identificar las sinergias que se producen dentro de este. Una de las desventajas del modelo es que es considerado como un modelo lineal y no multidireccional (Díaz-Martín, 2015); en este sentido, la mayoría de los trabajos que utilizan el marco DPSIR como modelo conceptual generan diagramas sencillos de relación lineal entre los componentes del modelo que no llegan a analizar los procesos de interacción entre los factores de los sistemas humano-ambientales (Agyemang *et al.*, 2007; Gedefaw *et al.*, 2020; Kyere-Boateng & Marek, 2021; Obubu *et al.*, 2022; Vázquez-Valencia & García-Almada, 2018); sin embargo, la relevancia de estos estudios radica en la generación de los indicadores y su asignación dentro de cada uno de los 5 componentes del modelo, generalmente a través de guías o marcos metodológicos o el conocimiento del evaluador.

Con respecto a lo anterior, la simplicidad o complejidad del desarrollo del modelo y su alcance depende generalmente del propósito de la investigación y de la accesibilidad o la posibilidad de desarrollo de los datos para los indicadores, por lo que se puede considerar como subjetivo (Sommer *et al.*, 2011). No obstante, para disminuir esa subjetividad y además reconocer las interacciones entre los factores se considera como recurso importante la opinión de expertos (Díaz-Martín, 2015), lo que además puede resultar eficaz para el desarrollo de modelos matemáticos en miras de predecir el comportamiento a futuro del fenómeno estudiado (Siwailam *et al.*, 2019).

4.4. NEUTRALIDAD EN LA DEGRADACIÓN DE TIERRAS, IXTACAMAXTITLÁN, PUEBLA

Cuando se logra la neutralidad, los servicios de los ecosistemas aumentan y se pueden catalizar otras metas de los ODS (Akhtar-Schuster *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2018), por ejemplo aquellos que se relacionan con la protección al ambiente, el uso sostenible de los recursos naturales y la seguridad alimentaria (Orr *et al.*, 2017). Sin embargo, aunque el objetivo de neutralidad ha sido un paso esencial en el consenso sobre una metodología para evaluar la DT (Akinyemi *et al.*, 2020; Barrio *et al.*, 2016; Gichenje & Godinho, 2018), ha supuesto un importante avance a nivel mundial para evitarla (Cowie *et al.*, 2018; Kust *et al.*, 2017; Retiere *et al.*, 2015) y la aplicación del marco científico-conceptual se promueve desde cualquier escala (local, regional, nacional) (Orr *et al.*, 2017); el principal apoyo se centra en el ámbito nacional, dejando en segundo término el aspecto local.

En este sentido, la DT como desafío global se sigue enfrentando a las realidades locales (Meyer *et al.*, 2017), en donde los análisis a escalas nacionales o regionales podrían no dilucidar el fenómeno hasta el punto en el que en muchas zonas, la degradación pueda no ser revertida. Por esta razón es necesario producir información relevante a escalas locales que permitan comprender y diagnosticar la problemática ambiental y con ello facilitar la toma de decisiones con miras a promover medidas contextualizadas de restauración, rehabilitación y gestión de los sistemas productivos y naturales desde un enfoque local (Kapović *et al.*, 2018; Meyer *et al.*, 2017).

El enfoque de la presente investigación fue el de evitar, reducir y revertir la DT a nivel local en el municipio de Ixtacamaxtitlán, Puebla, para con ello lograr un efecto neutro de la degradación para el año 2030, esto en consonancia con los ODS. Para ello, se definieron un conjunto de propuestas que se consideran como iniciativas de gestión de la tierra (Pena *et al.*, 2020) y que parten del mapeo, la investigación de las medidas de restauración del municipio y la identificación de los factores implicados en el proceso; siendo esto considerado relevante para el objetivo de neutralidad (Gonzalez-Roglich *et al.*, 2019; Sims *et al.*, 2019).

4.4.1. Evitar la degradación

De acuerdo con la línea base del municipio, se identificaron áreas que permanecieron sin cambios en el periodo de estudio, además de áreas que mostraron cambios positivos. En este sentido, las medidas deben ser aplicadas para que su estado de mejora o estabilidad permanezca, con el fin de igualar el valor medio establecido de neutralidad (91 % de la superficie sin degradación) al año 2030 (Dallimer & Stringer, 2018).

Como se pudo apreciar en las zonas boscosas conservadas, el impacto antropogénico mínimo o nulo, ha permitido que la cobertura vegetal, la producción primaria y el suelo, permanezcan en niveles óptimos o incrementen a lo largo del tiempo. Si bien hay factores inherentes al sistema que no se pueden modificar (precipitaciones, pendientes, tipos de suelo, fenómenos hidrometeorológicos), son considerados como factores de riesgo de degradación (Becerril-Piña *et al.*, 2015), por lo que las medidas de gestión de las tierras enfocadas a la prevención de cambios adversos en la calidad de las tierras no degradadas pueden ser aplicadas en estas zonas, otorgándoles resiliencia frente a los cambios (Cowie *et al.*, 2018; Orr *et al.*, 2017).

En este sentido, es necesario abordar vectores que pueden provocar la degradación, para ello, se propone legislar, restringir y prevenir sobre los drivers mediante la implementación de técnicas con un enfoque de manejo sustentable de tierras (Akhtar-Schuster *et al.*, 2017; UNCCD, 2015c) que promuevan prácticas agrícolas, pecuarias y forestales sustentables en las principales actividades económicas del municipio. Así mismo, es necesario facilitar y mejorar el acceso a programas públicos (Stavi & Lal, 2015), sobre todo aquellos enfocados a la conservación del recurso suelo para mantener o mejorar su calidad. Finalmente, la reactivación de los programas de empleo temporal y la revisión y rediseño de los programas públicos son necesarios, ya que las políticas gubernamentales, en algunos casos, pueden conducir a tasas de degradación no óptimas desde el punto de vista privado o social (Stavi & Lal, 2015) debido a la competencia por el recurso.

4.4.2. Reducir la degradación

Existen áreas en Ixtacamaxtitlán que presentan reducciones no significativas en uno de los tres indicadores evaluados o bien presentan tendencias negativas en el periodo (Orr *et al.*, 2017). Para alcanzar el objetivo de la neutralidad es necesario aplicar medidas que ayuden a reducir o mitigar la degradación; de lo contrario podrían contribuir al porcentaje de tierras degradadas del municipio y no alcanzar el propósito principal de neutralidad (Cowie *et al.*, 2019).

Las zonas de bosques aprovechados y las que se encuentran en proceso de restauración, han mostrado mejoras en los indicadores evaluados respecto a las áreas degradadas y en algunos casos, similitudes con las áreas conservadas. Por lo que se puede inferir que las diferentes medidas aplicadas para la gestión de los bosques (reforestación, protección y conservación del suelo, obras de captación de agua de lluvia, entre otras) por parte de los ejidatarios y los dueños de tierras están funcionando para reducir este fenómeno. Ello resalta la necesidad de continuar en esta línea para que a largo plazo los cambios resulten más significativos (Cha *et al.*, 2020). En este sentido y tomando en cuenta la alta participación de los habitantes del municipio (Carabias *et al.*, 2007; Cervantes *et al.*, 2008), se propone como respuesta mejorar el acceso a los programas públicos de atención a los bosques, enfocados en la reforestación y la restauración, así como la protección y conservación de los suelos.

De la misma forma, es necesario reducir las presiones que promueven cambios en el ambiente; las respuestas propuestas en la presente investigación, de acuerdo con los expertos tendrían una fuerte y extrema influencia sobre las presiones definidas ya que buscan controlar, limitar y regular las inadecuadas prácticas agrícolas, la deforestación, la eliminación de la vegetación natural y el sobrepastoreo; esto por medio de la aplicación de medidas de manejo sustentable de tierras (Pena *et al.*, 2020) basadas en principios agroecológicos (Stavi & Lal, 2015).

4.4.3. Revertir la degradación

Evitar o reducir la degradación de la tierra suele ser más rentable que los esfuerzos por revertir la degradación pasada (Cowie *et al.*, 2018; Orr *et al.*, 2017) debido a los altos costos para la rehabilitación de las tierras (Al Sayah *et al.*, 2019). Si bien, la mayor parte del municipio se encuentra estable, los cambios negativos cuantificados son mayores que los cambios positivos, por lo que se presenta como un punto relevante para atender y lograr sin altos costos, el objetivo de degradación neutral (Gilbey *et al.*, 2019; Retiere *et al.*, 2015). Así mismo el 19 % del territorio se considera como el valor medio de degradación para Ixtacamaxtitlán, por lo que para alcanzar la neutralidad al año 2030, la evaluación de los tres indicadores no debe sobrepasar esta medida.

Las áreas de pastizal presentan procesos de degradación principalmente por la falta de cobertura vegetal y su uso anterior agrícola, lo que promueve bajos contenidos de COS y una limitada producción primaria, por lo anterior es necesario recuperar los bienes y servicios que se ha perdido debido a la degradación, esto mediante medidas que limiten el impacto antropogénico y que promuevan la recuperación del suelo (Crossland *et al.*, 2018).

Entre las respuestas que se enfocan en el estado ambiental se encuentran el establecimiento de Zonas de Restauración Ecológica para revertir la degradación. Esta respuesta ha demostrado funcionar en el municipio (Sanchez-Ramón, 2004; UACH-UNICEDER, 2002) y además actúa como complemento de las anteriores para la mejora del ambiente y la identificación focos rojos de degradación. Para revertir los impactos se busca evitar los cambios que afecten la calidad y funcionamiento del bienestar humano y los bienes y servicios ecosistémicos a través de la mejora al acceso de los diversos programas públicos teniendo en cuenta que es necesario integrar las medidas de rehabilitación, restauración y gestión sostenible con políticas nacionales existentes (Akhtar-Schuster *et al.*, 2017).

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Con lo encontrado en este estudio, se concluye que existen tendencias negativas en los tres indicadores evaluados. Los cambios en la CT están representados por la pérdida de pastizales y superficies arboladas e incrementos en las zonas de cultivo y superficies artificiales. Las transformaciones en la superficie se deben en su mayoría a la transición de pastizales a tierras de cultivo, siendo los primeros los que han presentado mayores pérdidas.

Las tierras de cultivo presentaron clases de DPT consideradas como “en declive” o con “primeros signos de declinación”. Así mismo, el COS en estas categorías no sobrepasó los 80 MgC ha⁻¹. Las superficies arboladas no presentaron cambios notables en la CT en el periodo de estudio y generalmente mostraron clases de DPT “creciente” y “estable, no estresada” con contenidos promedio de COS que en algunas zonas superaron los 150 MgC ha⁻¹ por lo que se considera que esta categoría permanece estable.

Se encontró que las áreas degradadas ascienden al 19 % de la superficie total de Ixtacamaxtitlán y es la DPT el indicador en el que se observa mayor deterioro. El municipio presenta una degradación incipiente y solo una pequeña parte muestra mejora en el periodo de estudio (2000-2015), por lo que la identificación de áreas con procesos de degradación en este estudio es necesaria para la adecuada planeación y aplicación de medidas de restauración.

Los valores mayores de los indicadores evaluados *in situ* se observan en las zonas de bosques conservados y bosques con aprovechamiento; sin embargo, los bosques reforestados presentan valores similares a estos, lo que podría estar indicando una paulatina recuperación de estas áreas. Las áreas deforestadas, ahora pastizales solo presentan contenido similar a los bosques reforestados en el COS, indicando un efecto negativo en la vegetación debido a su condición actual. Por otro lado, existe un mayor porcentaje de cobertura arbórea en el año 2020, respecto al del año 2000, en todas las zonas evaluadas, mostrando una tendencia positiva en la vegetación que podría continuar a lo largo del tiempo.

La caracterización biofísica y socioeconómica del municipio, así como el diagnóstico de indicadores complementarios y la investigación bibliográfica de otras problemáticas socioambientales permitió identificar los factores que causan la degradación de tierras en el municipio de Ixtacamaxtitlán. Apoyado de la opinión de expertos, se pudo identificar los factores más relevantes implicados en el proceso, así como el peso de sus interacciones. A partir de ello fue posible proponer las respuestas más viables para evitar, reducir y revertir la degradación de tierras en la zona de estudio y alcanzar la neutralidad al año 2030.

La degradación de tierras es un fenómeno extremadamente complejo y es resultado de la interacción de múltiples factores; por esta razón es necesario la asistencia activa de todos los interesados en el uso de las tierras, así como aplicación de acciones asertivas que ayuden a frenar esta problemática a nivel mundial. Sin embargo, para esto, es necesario realizar un diagnóstico a escalas geográficas menores que ayuden al establecimiento de estrategias locales con efecto regional, nacional y global.

La relevancia de esta investigación consistió en la aplicación de la metodología de la NDT a nivel local a lo largo de un período de 15 años, obteniendo información sobre las tendencias y cambios en los indicadores evaluados a partir de datos globales, lo que permitirá el monitoreo de la degradación a lo largo del tiempo. Así mismo, el análisis de las estrategias de restauración aplicadas marca un camino de continuidad para reducir la degradación en zonas forestales. Finalmente, la identificación de los factores y las interacciones implicados en el proceso apoyará la toma de decisiones y la generación de las condiciones para establecer políticas públicas enfocadas al establecimiento de metas para la conservación, recuperación y restauración de recursos naturales.

ANEXO 1

CUESTIONARIO PARA CONOCER LA HISTORIA DE LA DEFORESTACIÓN Y/O REFORESTACIÓN DE LAS ZONAS EN EVALUACIÓN.

1. El predio es ejido o privado?
2. En caso de privado ¿Quién es el dueño?, en caso de Ejido ¿Cuál es el nombre del ejido?
3. ¿Cuántas hectáreas mide el predio?
4. ¿Cuál era el uso del predio hace 30 años? ¿y hace 15 años?
5. ¿En algún momento ocurrió un evento como por ejemplo, tala de árboles, incendio en la zona o extracción de madera sobre el predio? En caso de que sí, por favor díganos ¿cuál fue el evento?
6. ¿Si el evento fue extracción de madera o tala de árboles. ¿Cuál fue el destino final de la madera o quién fue el beneficiario?
8. ¿En el predio se han sembrado árboles? En caso de que sí ¿en qué año fue?
9. Si se han sembrado árboles ¿Cuántos árboles se sembraron y qué especies?
10. ¿Quién promovió la siembra de árboles (Gobierno, ONG, CONAFOR, iniciativa privada o propia)
11. ¿Cuál fue la finalidad de la siembra de árboles (Reforestación, plantación forestal, aprovechamiento)
12. Tuvieron algún tipo de capacitación para la siembra de los árboles? ¿Cuál?
13. Tuvieron apoyo para la siembra de árboles (por ejemplo, donación de árboles, pago, insumos)
14. ¿Cuánto tiempo duró el apoyo?
15. ¿Todavía tienen contacto con la entidad que los apoyó?
16. ¿Cómo se realizó la elección por parte de la entidad para darles el apoyo?
17. Se han hecho obras de conservación o retención de suelos. En caso de que sí ¿en qué año fue?
18. Si se han hecho obras ¿Cuáles han sido las obras de restauración del suelo?
19. Observa algún cambio en el suelo en este predio (color, textura, dureza, etc.)
20. ¿Cuál es su punto de vista sobre lo que ha pasado a lo largo del tiempo sobre el predio. Siéntase en la libertad de contarnos todo lo que ha visto, vivido o hecho en el predio.
21. ¿Han abandonado áreas de cultivo? En caso de que sí, cuéntenos ¿Por qué?

ANEXO 2

INSTRUMENTO PARA DETERMINAR LA RELEVANCIA DE LOS FACTORES

De acuerdo con la siguiente escala, evalué los factores enlistados según su relevancia en el proceso de Degradación de Tierras en el municipio de Ixtacamaxitlán, Puebla. Si tiene alguna duda sobre la información del factor, en el anexo de este instrumento encontrará más información.

Rúbrica para evaluar la relevancia de los factores	
Escala numérica	Escala verbal
0-1	No relevante
2-3	Poca relevancia
4-5	Clara relevancia
6-7	Fuerte relevancia
8-10	Extrema relevancia

DRIVERS	PUNTAJE
D1. Tierras de cultivo (Agricultura como principal actividad productiva, ≈40 % del territorio)	
D2. Tipo de agricultura (Autoconsumo como principal fuente de alimentación, ≈95 % de la producción)	
D3. Tipo de tracción (Animales de trabajo como principal uso de tracción, ≈73 % de siembra y cosecha)	
D4. Animales de pastoreo (Alimentación basada en el libre pastoreo, ≈23 mil cabezas de ganado)	
D5. Actividades madereras (Cuarto productor municipal de productos forestales)	
D6. Conflicto socioambiental por Minera (Amenaza latente de la instalación de minera transnacional)	
D7: Marginación (Alto grado de marginación, índice: 0.56)	
D8. Trabajo: Sector primario (≈72 % de la PEA se dedica al sector primario)	
D9. Población rural (La población que habita en las 124 localidades del mnpio. es considerada rural)	
D10. Comunidades indígenas (≈20 % de la población del mnpio. es indígena)	
Suma	
Presiones	
P11. Expansión agrícola (Aumento de áreas agrícolas, ≈14 km ² en el periodo)	
P12. Prácticas agrícolas poco sustentables (Disminución de la fertilidad en tierras de cultivo)	
P13. Deforestación o eliminación de la vegetación natural (Disminución de áreas naturales)	
P14. Sobrepastoreo (Sistema de manejo extensivo)	
P15. Sequías anormales a severas (Concurrencia de sequías en el territorio, registros desde 2002)	
P16. Incendios forestales (Concurrencia registrada desde año 2000)	
Suma	
Estado	
E17. Tierras de cultivo con DPT en declive (≈86 km ² presentan una productividad en declive)	
E18. Pastizales con primeros signos de declinación (≈13 % presenta primeros signos de declinación)	
E19. Pérdida de superficies arboladas (Disminución de ≈2.5 km ²)	
E20. Pérdida de pastizales (Disminución de ≈14 km ²)	
E21. Disminución o bajo contenido de COS (≈3.5 km ² de la superficie del mnpio.)	
E22. Bajas precipitaciones (Promedio de 700 mm anuales en áreas consideradas degradadas)	
E23. Suelos susceptibles a la erosión (Feozem, litosol y regosol)	
E24. Erosión potencial hídrica (Pérdida potencial de 10 mm de suelo/año en áreas degradadas)	
E25. Pendientes pronunciadas (Pendiente media de ≈27 % en áreas consideradas degradadas)	
E26. Baja densidad poblacional (Densidad poblacional de 43.7 Hab/km ²)	
E27. Rezago social alto (Índice de Rezago social Alto: 0.58)	
SUMA	

IMPACTO		
I28. Susceptibilidad a la erosión	(Por cambio en la CT, disminución de COS y suelos susceptibles)	
I29. Aumento de riesgo de desastres	(Por cambio en la CT y disminución de COS)	
I30. Disminución de la calidad del agua	(Por cambio en la CT y DPT)	
I31. Suelo como fuente de CO ₂	(Por erosión y disminución de COS)	
I32. Menor disponibilidad de alimento	(Por cambio en la CT, la DPT y disminución de COS)	
I33. Bajo rendimiento productivo	(Por cambio en la CT, la DPT y disminución de COS)	
I34. Disminución de los rendimientos agrícolas	(Por cambio en la DPT y el COS)	
I35. Disminución en la retención del suelo	(Por disminución de COS)	
I36. Compactación del suelo	(Por disminución de COS)	
I37. Pérdida de nutrientes	(Por disminución de COS)	
I38. Disminución estética del paisaje	(Por cambio en la CT)	
I39. Ruptura del tejido social por minera	(Diversidad de puntos de vista a favor y en contra)	
I40. Migración	(Disminución de la población, 3 846 habitantes menos de 2000 a 2015)	
SUMA		
RESPUESTAS A DRIVERS		
RD41. Aprovechamiento forestal sustentable	(Local)	
RD42. Prácticas agrícolas sustentables	(Local)	
RD43. Programa Estatal de Apoyos a Proyectos de Plantaciones Forestales	(Estatal/Nacional)	
RD44. Programa de Coinversión Social	(Nacional)	
RD45. Programa de Infraestructura Indígena	(Nacional)	
RD46. Programa de Atención a Jornaleros Agrícolas	(Nacional)	
RD47. Programa de Infraestructura	(Nacional)	
RESPUESTAS A PRESIONES		
RP48. Obras de reforestación	(Local)	
RP49. Brechas cortafuegos	(Local)	
RP50. Obras de captación de agua	(Local)	
RP51. Mantenimiento de caminos	(Local)	
RP52. Establecimiento de Zonas de Restauración Ecológica	(Nacional)	
RP53. Programa Nacional Forestal PRONAFOR (2013-2018) (Restauración)	(Nacional)	
RESPUESTAS A ESTADO		
RE54. Mantenimiento de zonas reforestadas	(Local)	
RE55. Programa Nacional Forestal (Protección y mantenimiento)	(Nacional)	
RE56. ProÁrbol	(Nacional)	
RE57. Programa de Empleo Temporal	(Nacional)	
RESPUESTAS A IMPACTOS		
RI58. Obras de protección y conservación de suelos	(Local)	
RI59. Programa de Compensación	(Nacional)	
RI60. Programa Nacional de Suelos Forestales	(Nacional)	
SUMA		

ANEXO 3

EJEMPLO DE INSTRUMENTO PARA DETERMINAR LA RELEVANCIA DE LAS RELACIONES CAUSA-EFECTO DE LOS FACTORES

De acuerdo con la siguiente escala, evalué las relaciones causa-efecto de los factores presentes en la matriz según su relevancia en el proceso de Degradación de Tierras en el municipio de Ixtacamaxtitlán, Puebla. Asigne los valores únicamente dentro de los cuadros que se encuentran en color gris.

Rúbrica para evaluar la relación causa-efecto de los factores	
Escala numérica	Escala verbal
0-1	No hay relación causa-efecto
3	Poca relación causa-efecto
5	Clara relación causa-efecto
7	Fuerte relación causa-efecto
9	Extrema relación causa-efecto

	D1	D2	D3	D4	D5	P1	P2	P3	P4	P5	E1	E2	E3	E4	E5	I1	I2	I3	I4	I5	R1	R2	R3	R4	R5	
D1																										
D2																										
D3																										
D4																										
D5																										
P1																										
P2																										
P3																										
P4																										
P5																										
E1																										
E2																										
E3																										
E4																										
E5																										
I1																										
I2																										
I3																										
I4																										
I5																										
R1																										
R2																										
R3																										
R4																										
R5																										

ANEXO 4

ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LAS MUESTRAS DE SUELO

Clave Zona	pH (1:2, H ₂ O)		Densidad aparente (g cm ⁻³)		Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)		Materia orgánica (%)		Pedregosidad (1/100)		Concentración de CO (%)	
	Profundidad cm											
	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30
ABC ₁	5.96	5.95	0.54	0.78	152.30	110.30	9.75	8.85	0.39	0.52	5.66	5.14
ABC ₂	5.91	5.84	0.38	0.88	74.30	60.30	27.45	20.39	0.46	0.39	15.93	11.83
ABC ₃	6.23	6.21	0.65	0.97	79.50	58.80	22.75	16.25	0.36	0.24	13.20	9.43
SJBN ₁	5.61	5.68	0.44	0.83	57.00	41.10	8.71	7.53	0.52	0.54	5.05	4.37
SJBN ₂	5.97	6.11	0.78	1.12	305.80	311.20	6.99	3.28	0.50	0.47	4.06	1.90
SJBN ₃	5.32	5.20	0.86	0.94	163.30	93.00	6.94	5.54	0.51	0.63	4.02	3.21
ABAA ₁	5.35	5.89	0.86	0.74	181.30	104.50	15.06	5.49	0.45	0.44	8.74	3.18
ABAA ₂	6.10	5.78	0.52	0.60	146.70	108.10	8.81	9.49	0.47	0.47	5.11	5.50
ABAA ₃	5.80	5.94	0.78	0.95	69.30	71.00	5.37	5.08	0.31	0.43	3.11	2.95
ABAb ₁	5.05	6.12	0.62	0.99	361.90	72.60	11.04	4.60	0.56	0.26	6.40	2.67
ABAb ₂	5.82	6.05	0.96	0.92	180.30	78.00	10.20	6.43	0.57	0.31	5.92	3.73
ABAb ₃	5.52	5.90	0.68	0.87	123.30	83.80	7.65	4.38	0.50	0.38	4.44	2.54
SJBRa ₁	5.89	6.21	1.01	0.70	116.70	59.40	5.59	5.06	0.45	0.29	3.24	2.93
SJBRa ₂	6.28	6.31	1.20	0.97	88.50	71.60	5.00	3.71	0.58	0.46	2.90	2.15
SJBRa ₃	6.54	6.60	0.90	0.79	99.10	70.50	7.80	4.84	0.36	0.33	4.52	2.81
SJBRb ₁	6.38	6.40	1.17	1.11	90.50	80.60	5.22	4.14	0.55	0.47	3.03	2.40
SJBRb ₂	5.54	6.09	1.05	1.12	108.10	56.50	5.70	3.17	0.63	0.28	3.31	1.84
SJBRb ₃	6.36	6.41	0.84	0.96	148.70	112.20	9.14	7.48	0.58	0.42	5.30	4.34
APR ₁	6.32	6.46	0.91	1.05	84.70	67.70	5.68	5.23	0.44	0.58	3.30	3.04
APR ₂	7.12	7.36	1.14	1.11	106.30	88.70	2.87	2.70	0.56	0.35	1.66	1.57
APR ₃	6.57	6.71	1.02	0.97	80.80	55.00	2.59	0.73	0.37	0.50	1.50	0.42
AP ₁	6.99	6.93	0.87	1.18	159.00	57.20	4.04	2.52	0.45	0.63	2.35	1.46
AP ₂	6.55	6.86	1.12	1.14	50.90	51.80	1.37	1.16	0.58	0.71	0.79	0.67
AP ₃	6.62	6.71	1.04	1.21	67.70	49.10	2.78	2.52	0.46	0.52	1.61	1.46
SJP ₁	6.75	6.81	1.21	1.16	50.60	51.30	1.57	0.94	0.29	0.47	0.91	0.54
SJP ₂	6.65	6.67	1.24	1.15	57.10	44.80	1.67	1.04	0.62	0.48	0.97	0.61
SJP ₃	6.69	6.80	1.15	1.08	49.10	45.80	1.36	0.83	0.56	0.32	0.79	0.48

ABC: Bosque conservado de Analco, **SJBN:** Bosque natural conservado de San José Providencia, **ABAA:** Bosque natural con aprovechamiento de Analco(a), **ABAb:** Bosque natural con aprovechamiento de Analco(b), **SJBRa:** Bosque reforestado 10 años de San José Providencia(a), **SJBRb:** Bosque reforestado 10 años de San José Providencia(b), **APR:** Pastizal reforestado de Analco, **AP:** Pastizal de Analco, **SJP:** Pastizal de San José Providencia.

ANEXO 5

CÁLCULO DE COS POR PUNTO DE MUESTREO

Clave Zona	Profundidad (cm)		
	0-15	15-30	0-30
ABC ₁	17.90	62.82	80.72
ABC ₂	41.41	123.27	164.69
ABC ₃	45.46	64.87	110.33
SJBN ₁	17.12	58.79	75.91
SJBN ₂	23.96	29.91	53.87
SJBN ₃	26.40	56.81	83.22
ABAA ₁	51.37	31.54	82.91
ABAA ₂	18.72	46.56	65.28
ABAA ₃	11.30	36.33	47.64
ABAb ₁	33.11	20.68	53.79
ABAb ₂	48.87	31.79	80.66
ABAb ₃	22.43	24.96	47.39
SJBRa ₁	21.80	17.53	39.32
SJBRa ₂	30.07	28.48	58.55
SJBRa ₃	22.36	22.32	44.68
SJBRb ₁	29.42	37.33	66.75
SJBRb ₂	32.79	16.98	49.77
SJBRb ₃	38.79	52.26	91.05
APR ₁	19.59	54.76	74.35
APR ₂	15.88	18.45	34.33
APR ₃	8.57	6.19	14.76
AP ₁	13.97	32.80	46.76
AP ₂	7.72	16.31	24.03
AP ₃	11.59	27.70	39.29
SJP ₁	4.78	8.87	13.65
SJP ₂	11.23	9.97	21.19
SJP ₃	7.64	5.08	12.71

ABC: Bosque conservado de Analco, **SJBN:** Bosque natural conservado de San José Providencia, **ABAA:** Bosque natural con aprovechamiento de Analco(a), **ABAb:** Bosque natural con aprovechamiento de Analco(b), **SJBRa:** Bosque reforestado 10 años de San José Providencia(a), **SJBRb:** Bosque reforestado 10 años de San José Providencia(b), **APR:** Pastizal reforestado de Analco, **AP:** Pastizal de Analco, **SJP:** Pastizal de San José Providencia.

ANEXO 6

PRODUCCIÓN DE HOJARASCA POR MUESTREO Y PUNTO DE MUESTREO

Clave Zona	2019-2020			2020-2021													Prom. Anual
	Abr-Nov	Oct-Mar	Anual	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual	
ABC ₁	127.91	114.47	242.38	14.99	5.51	5.13	9.00	9.10	11.13	13.84	14.08	16.57	16.72	30.42	50.88	197.37	219.88
ABC ₂	238.62	386.69	625.31	24.42	18.49	16.16	39.91	18.92	2.82	24.72	28.70	35.14	83.74	36.25	20.94	350.21	487.76
ABC ₃	313.26	516.88	830.14	34.88	28.44	21.62	26.78	20.47	22.35	23.54	29.95	41.53	85.73	82.25	20.26	437.80	633.97
SJBN ₁	291.94	367.08	659.02	45.20	41.07	18.58	27.12	40.80	47.27	49.52	59.87	71.43	62.61	22.57	26.86	512.90	585.96
SJBN ₂	218.24	545.86	764.10	47.17	76.46	24.56	40.63	28.66	64.22	36.60	35.12	36.10	35.68	40.37	33.20	498.77	631.44
SJBN ₃	216.60	349.75	566.35	63.87	41.32	28.30	49.71	36.25	76.52	28.45	42.13	45.70	56.99	13.12	82.55	564.91	565.63
ABAA ₁	329.31	247.09	576.40	34.45	35.87	30.18	21.09	41.42	51.38	33.46	28.27	36.45	38.00	41.28	94.04	485.89	531.15
ABAA ₂	728.90	644.99	1373.89	81.34	48.49	68.30	65.72	101.96	111.70	82.03	65.97	243.69	80.00	133.53	114.24	1196.97	1285.43
ABAA ₃	489.56	464.59	954.15	54.19	27.14	61.12	41.68	40.84	35.29	41.82	75.99	56.30	68.29	100.12	49.27	652.05	803.10
ABAb ₁	330.61	377.32	707.93	27.34	18.52	22.88	76.12	34.22	38.71	43.30	58.32	94.29	163.98	94.62	90.34	762.64	735.28
ABAb ₂	322.53	349.27	671.80	31.32	12.89	38.81	35.82	25.55	63.88	22.75	32.11	68.19	123.71	107.63	46.60	609.26	640.53
ABAb ₃	288.51	864.62	1153.13	52.13	44.34	49.61	37.38	23.69	34.17	115.30	114.65	93.21	97.08	57.88	161.03	880.47	1016.80
SJBRa ₁	528.28	315.40	843.68	60.16	9.05	37.98	29.32	21.46	23.60	17.98	31.78	26.96	100.35	96.09	105.69	560.42	702.05
SJBRa ₂	89.17	158.93	248.10	22.91	22.91	29.42	14.01	23.96	20.68	21.54	51.72	18.76	36.89	87.91	110.00	460.71	354.41
SJBRa ₃	371.50	191.99	563.49	36.58	15.64	20.78	8.88	18.56	24.20	16.11	52.13	21.43	16.04	41.80	78.69	350.84	457.16
SJBRb ₁	88.25	146.42	234.67	17.88	13.20	25.54	19.19	28.62	20.75	14.60	27.38	17.85	12.94	46.02	17.48	261.45	248.06
SJBRb ₂	100.07	177.11	277.18	26.60	18.94	12.80	18.63	21.35	10.32	25.94	29.65	14.61	17.19	26.99	18.59	241.61	259.40
SJBRb ₃	110.01	156.77	266.78	48.21	11.35	37.44	16.13	18.26	21.19	15.75	22.15	19.85	25.07	23.19	22.03	280.62	273.70
APR ₁	91.01	226.67	317.68	4.98	9.60	7.57	9.41	7.17	9.53	13.96	74.56	42.95	39.21	15.33	15.48	249.75	283.71
APR ₂	107.09	451.03	558.12	14.30	11.60	4.28	12.69	11.38	28.33	43.77	113.68	129.22	79.27	12.50	52.27	513.29	535.70
APR ₃	73.48	112.23	185.71	6.12	2.24	4.25	8.09	12.44	32.32	32.81	64.75	66.93	49.10	39.40	16.17	334.62	260.16
AP ₁	299.43	55.39	354.82	3.94	2.50	3.38	9.76	4.88	2.30	2.40	0.80	1.80	0.88	0.56	0.32	33.52	194.17
AP ₂	217.11	29.31	246.42	2.84	3.42	3.14	5.50	3.60	2.88	1.44	1.32	1.96	1.28	0.96	0.32	28.66	137.54
AP ₃	278.80	40.99	319.79	5.04	1.66	2.68	3.12	4.04	3.32	1.52	0.96	2.16	1.32	0.36	0.28	26.46	173.13
SJP ₁	59.23	32.98	92.21	3.95	3.26	4.75	3.79	7.44	7.95	1.84	0.78	1.34	2.00	1.47	1.77	40.34	66.28
SJP ₂	50.71	42.24	92.95	1.26	7.76	3.07	7.72	7.15	9.43	4.47	2.28	2.35	1.21	1.29	1.04	49.03	70.99
SJP ₃	73.20	53.20	126.40	2.75	4.64	2.26	5.62	7.13	6.44	2.70	3.23	1.15	1.33	1.07	0.72	39.04	82.72

ABC: Bosque conservado de Analco, **SJBN:** Bosque natural conservado de San José Providencia, **ABAA:** Bosque natural con aprovechamiento de Analco(a), **ABAb:** Bosque natural con aprovechamiento de Analco(b), **SJBRa:** Bosque reforestado 10 años de San José Providencia(a), **SJBRb:** Bosque reforestado 10 años de San José Providencia(b), **APR:** Pastizal reforestado de Analco, **AP:** Pastizal de Analco, **SJP:** Pastizal de San José Providencia.

ANEXO 7

RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE COBERTURA ARBÓREA POR CELDA (30x30 m) EVALUADA.

Clave celda	% Cobertura arbórea		Clave celda	% Cobertura arbórea		Clave celda	% Cobertura arbórea		Clave celda	% Cobertura arbórea	
	2000	2020		2000	2020		2000	2020		2000	2020
ABC ₁	96	100	SJBN ₁	19	53	ABAA ₁	19	94	ABAb ₁	38	38
ABC ₂	95	99	SJBN ₂	61	85	ABAA ₂	38	93	ABAb ₂	5	38
ABC ₃	95	99	SJBN ₃	61	85	ABAA ₃	10	93	ABAb ₃	37	23
ABC ₄	95	99	SJBN ₄	19	85	ABAA ₄	10	1	ABAb ₄	99	57
ABC ₅	99	99	SJBN ₅	19	85	ABAA ₅	0	38	ABAb ₅	99	99
ABC ₆	99	99	SJBN ₆	61	85	ABAA ₆	85	85	ABAb ₆	92	87
ABC ₇	95	99	SJBN ₇	63	94	ABAA ₇	85	85	ABAb ₇	51	87
ABC ₈	95	99	SJBN ₈	92	69	ABAA ₈	2	85	ABAb ₈	62	93
ABC ₉	99	100	SJBN ₉	92	94	ABAA ₉	2	85	ABAb ₉	99	94
ABC ₁₀	99	99	SJBN ₁₀	19	94	ABAA ₁₀	0	65	ABAb ₁₀	99	99
ABC ₁₁	95	99	SJBN ₁₁	61	69	ABAA ₁₁	61	98	ABAb ₁₁	92	93
ABC ₁₂	95	99	SJBN ₁₂	61	69	ABAA ₁₂	85	69	ABAb ₁₂	51	93
ABC ₁₃	94	100	SJBN ₁₃	34	69	ABAA ₁₃	54	98	ABAb ₁₃	62	93
ABC ₁₄	99	99	SJBN ₁₄	61	69	ABAA ₁₄	54	94	ABAb ₁₄	99	98
ABC ₁₅	99	99	SJBN ₁₅	19	85	ABAA ₁₅	2	93	ABAb ₁₅	99	99
ABC ₁₆	99	99	SJBN ₁₆	25	94	ABAA ₁₆	39	93	ABAb ₁₆	92	87
ABC ₁₇	98	99	SJBN ₁₇	27	83	ABAA ₁₇	61	93	ABAb ₁₇	81	87
ABC ₁₈	94	100	SJBN ₁₈	29	83	ABAA ₁₈	84	94	ABAb ₁₈	81	84
ABC ₁₉	100	99	SJBN ₁₉	27	85	ABAA ₁₉	84	85	ABAb ₁₉	95	65
ABC ₂₀	100	99	SJBN ₂₀	25	85	ABAA ₂₀	2	85	ABAb ₂₀	95	99
SJBRa ₁	2	8	SJBRb ₁	27	8	APR ₁	0	0	AP ₁	0	2
SJBRa ₂	29	8	SJBRb ₂	2	1	APR ₂	0	0	AP ₂	29	8
SJBRa ₃	61	2	SJBRb ₃	2	1	APR ₃	0	0	AP ₃	0	8
SJBRa ₄	88	7	SJBRb ₄	7	8	APR ₄	0	2	AP ₄	0	2
SJBRa ₅	27	8	SJBRb ₅	88	85	APR ₅	0	29	AP ₅	0	29
SJBRa ₆	61	57	SJBRb ₆	88	93	APR ₆	0	0	AP ₆	0	2
SJBRa ₇	63	85	SJBRb ₇	88	94	APR ₇	0	0	AP ₇	0	8
SJBRa ₈	92	85	SJBRb ₈	88	94	APR ₈	0	2	AP ₈	0	8
SJBRa ₉	19	22	SJBRb ₉	88	85	APR ₉	0	2	AP ₉	0	2
SJBRa ₁₀	19	85	SJBRb ₁₀	88	94	APR ₁₀	0	8	AP ₁₀	0	29
SJBRa ₁₁	59	53	SJBRb ₁₁	88	94	APR ₁₁	0	22	AP ₁₁	0	29
SJBRa ₁₂	49	85	SJBRb ₁₂	61	94	APR ₁₂	0	10	AP ₁₂	0	2
SJBRa ₁₃	55	53	SJBRb ₁₃	88	93	APR ₁₃	0	84	AP ₁₃	0	2
SJBRa ₁₄	55	61	SJBRb ₁₄	88	94	APR ₁₄	0	4	AP ₁₄	0	29
SJBRa ₁₅	19	53	SJBRb ₁₅	88	94	APR ₁₅	0	0	AP ₁₅	0	29
SJBRa ₁₆	59	88	SJBRb ₁₆	61	94	APR ₁₆	10	99	AP ₁₆	2	29
SJBRa ₁₇	55	85	SJBRb ₁₇	88	87	APR ₁₇	0	93	AP ₁₇	0	2
SJBRa ₁₈	55	65	SJBRb ₁₈	61	85	APR ₁₈	0	87	AP ₁₈	0	29
SJBRa ₁₉	19	85	SJBRb ₁₉	61	94	APR ₁₉	0	84	AP ₁₉	0	29
SJBRa ₂₀	26	53	SJBRb ₂₀	61	94	APR ₂₀	0	2	AP ₂₀	0	29
SJP ₁	0	0	SJP ₆	0	0	SJP ₁₁	0	0	SJP ₁₆	0	0
SJP ₂	0	0	SJP ₇	0	0	SJP ₁₂	0	0	SJP ₁₇	0	0
SJP ₃	0	0	SJP ₈	0	0	SJP ₁₃	0	0	SJP ₁₈	0	0
SJP ₄	0	0	SJP ₉	0	0	SJP ₁₄	0	0	SJP ₁₉	0	0
SJP ₅	0	0	SJP ₁₀	0	0	SJP ₁₅	0	0	SJP ₂₀	0	8

ABC: Bosque conservado de Analco, SJBN: Bosque natural conservado de San José Providencia, ABAA: Bosque natural con aprovechamiento de Analco(a), ABAb: Bosque natural con aprovechamiento de Analco(b), SJBRa: Bosque reforestado 10 años de San José Providencia(a), SJBRb: Bosque reforestado 10 años de San José Providencia(b), APR: Pastizal reforestado de Analco, AP: Pastizal de Analco, SJP: Pastizal de San José Providencia.

ANEXO 8

TABLA PRELIMINAR DE FACTORES QUE CAUSAN LA DEGRADACIÓN DE LAS TIERRAS EN EL MUNICIPIO DE IXTACAMAXTILÁN, PUEBLA, MÉXICO.

	DPSIR	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CONCEPTO	EXPLICACIÓN	DATOS
D1	Driver	Fuerzas Motrices Económicas	Alimentos y materias primas	Agricultura: Tierras de cultivo	La principal actividad productiva es la agricultura, un alto porcentaje del territorio son tierras agrícolas	39.7 % del territorio municipal son tierras agrícolas
D2	Driver	Fuerzas Motrices Económicas	Alimentos y materias primas	Agricultura: Tipo de agricultura	El autoconsumo es el principal destino de la producción agrícola.	95 % de la producción agrícola es de autoconsumo
D3	Driver	Fuerzas Motrices Económicas	Alimentos y materias primas	Ganadería: Tipo de tracción	La tracción utilizada para las actividades agrícolas se realiza con animales de trabajo	72.6 % de la siembra y cosecha es a través de tracción animal
D4	Driver	Fuerzas Motrices Económicas	Alimentos y materias primas	Ganadería: Animales de pastoreo	La alimentación de los animales se basa en el pastoreo	22 717 cabezas de ganado mayor y menor que se alimentan generalmente al libre pastoreo
D5	Driver	Fuerzas Motrices Económicas	Alimentos y materias primas	Silvicultura: Actividades madereras	Cuarto productor municipal de productos forestales hasta 2015	Producción maderera año 2015 de 15 296 m ³ /rollo
D6	Driver	Fuerzas Motrices Económicas	Alimentos y materias primas	Minería: Conflicto socioambiental	Amenaza de instalación de una minera transnacional	Minera canadiense Almaden Minerals
D7	Driver	Fuerzas Motrices Sociales	Equidad	Marginación	Alto grado de marginación y	Índice de marginación: 0.56.
D8	Driver	Fuerzas Motrices Sociales	Equidad	Trabajo: Sector primario	Población económicamente activa dedicada al sector primario	72.8 % de la población económicamente activa se dedica al sector primario (agricultura, ganadería y actividades forestales)
D9	Driver	Fuerzas Motrices Sociales	Identidad cultural	Población rural	La población del municipio es enteramente rural	Todas las localidades tienen una población menor a 2500 habitantes.
D10	Driver	Fuerzas Motrices Sociales	Identidad cultural	Comunidades indígenas	Hay presencia de población indígena	19.8 % de la población del municipio es indígena
	DPSIR	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CONCEPTO	EXPLICACIÓN	DATOS
P11	Presión	Presiones Ambientales	Cambios de uso de suelo	Expansión agrícola	Transiciones Superficies arboladas y pastizales a tierras de cultivo	14.15 km ² de áreas agrícolas nuevas

P12	Presión	Presiones Ambientales	Usos de contacto: Daño físico	Prácticas agrícolas poco sustentables	Disminución de la fertilidad en tierras de cultivo	(Información obtenida debido al cambio en la DPT)
P13	Presión	Presiones Ambientales	Usos de contacto: Daño físico	Deforestación o eliminación de la vegetación natural	Disminución de áreas naturales (bosques y pastizales)	(Información obtenida del cambio en la CT)
P14	Presión	Presiones Ambientales	Usos de contacto: Daño físico	Sobrepastoreo	Promovido por un sistema de manejo extensivo	(Reportes de la zona de estudio, sin dato específico)
P15	Presión	Presiones Ambientales	Naturales	Sequias anormales a severas	Concurrencia de sequias en el territorio	Eventos desde 2002 hasta 2013
P16	Presión	Presiones Ambientales	Natural/antropo génico	Incendios forestales	Desastre natural o promovido concurrente en al municipio	Eventos registrados desde 2000
	DPSIR	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CONCEPTO	EXPLICACIÓN	DATOS
E17	Estado	Estado Ambiental	Estado biótico	DPT: Tierras de cultivo en declive	La mayor parte de las tierras de cultivo presenta una DPT en declive considerada como degradación	De un total de 219 km ² de tierras de cultivo en el territorio, 85.76 km ² presenta una productividad (DPT) en declive (datos: línea base)
E18	Estado	Estado Ambiental	Estado biótico	DPT: Pastizales con primeros signos de declinación	Pastizales con primeros signos de declinación considerados como degradación debido a su NDVI débil.	12.66 km ² de los pastizales presenta primeros signos de declinación
E19	Estado	Estado Ambiental	Estado biótico	CT: Pérdida de superficies arboladas	Pérdida o disminución de superficies arboladas	Hubo una disminución de 2.54 km ² de superficies arboladas entre 2000 y 2015
E20	Estado	Estado Ambiental	Estado biótico	CT: Pérdida de pastizales	Pérdida o disminución de pastizales	Hubo una disminución de 14.09 km ² de áreas pastizales entre 2000 y 2015
E21	Estado	Estado Ambiental	Estado biótico	COS: Disminución o bajo contenido de COS	Cambios negativos o valores menores a 50 t ha ⁻¹ en el contenido de COS en el territorio	3.44 km ² de las categorías superficies arboladas, tierras de cultivo o pastizales tuvieron una disminución de COS o un contenido menor a 50 t ha ⁻¹ entre 2000 y 2015
E22	Estado	Estado Ambiental	Estado abiótico	Bajas precipitaciones	Precipitaciones menores en pastizales y tierras de cultivo consideradas degradadas	700 mm anuales en zonas consideradas degradadas

E23	Estado	Estado Ambiental	Estado abiótico	Suelos susceptibles a la erosión	Los suelos en zonas degradadas son en su mayoría susceptibles a la erosión	Las áreas consideradas degradadas tienen las siguientes proporciones de tipos de suelo: Feozem 48 %, Litosol 35 % y regosol 10 %
E24	Estado	Estado Ambiental	Estado abiótico	Erosión potencial hídrica	La erosión potencial en zonas degradadas es considerable con más de 100 t ha ⁻¹ año ⁻¹	107.18 t ha ⁻¹ año ⁻¹ de pérdida de suelo en áreas consideradas degradadas
E25	Estado	Estado Ambiental	Estado abiótico	Pendientes pronunciadas	Pendiente en zonas degradadas considerada inclinada	Pendiente media 27.23 %
E26	Estado	Estado Sistema Humano	Nivel comunidad	Baja densidad poblacional	Baja densidad poblacional	43.7 hab/km ²
E27	Estado	Estado Sistema Humano	Nivel comunidad	Rezago social alto	Rezago social: Medida ponderada que resume cuatro indicadores de carencias sociales (educación, salud, servicios básicos y calidad y espacios en la vivienda)	Índice de Rezago social Alto: 0.58
	DPSIR	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CONCEPTO	EXPLICACIÓN	
I28	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de regulación	CT y COS: Reducción de riesgo de desastres: Susceptibilidad a la erosión	Susceptibilidad a la erosión por escorrentía, deslaves e inundaciones.	
I29	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de regulación	CT y COS: Reducción de riesgo de desastres: Aumento de riesgo de desastres	Aumento en el riesgo de desastres por la pérdida de áreas naturales y la disminución del COS debido a incendios forestales	
I30	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de regulación	CT y DPT: Regulación de la calidad del agua: Disminución de la calidad del agua	Disminución de la calidad del agua por fuerte escorrentía que puede estar contribuyendo a la erosión y arrastre de sedimentos.	
I31	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de regulación	COS: Mitigación cambio climático: Suelo como fuente de CO₂	El inadecuado manejo agrícola y la erosión promueven que el suelo se convierta en una fuente de CO ₂	
I32	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de provisión	CT, DPT y COS: Alimento: Menor	Retraso de la siembra de los cultivos anuales debido a los cambios climáticos y desastres naturales	

				disponibilidad de alimento	
I33	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de provisión	CT, DPT y COS: Alimento: Bajo rendimiento productivo en la cubierta vegetal	Limitado crecimiento de los cultivos o pastos por cambios climáticos, disminución de la fertilidad y desastres naturales
I34	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de apoyo	COS y DPT: Producción primaria: Disminución de los rendimientos agrícolas	Menores rendimientos agrícolas debido a los cambios en el COS, la DPT y por erosión.
I35	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de apoyo	COS: Formación del suelo: Disminución en la retención de suelo	Falta de retención del suelo por efecto de gravedad debido a la disminución de COS
I36	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de apoyo	COS: Formación del suelo: Compactación del suelo	Compactación del suelo debido a la disminución de COS, erosión y manejo intensivo de tierras agrícolas
I37	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios de apoyo	COS: Formación del suelo: Pérdida de nutrientes	Pérdida de nutrientes debido a la disminución de COS y por arrastre debido a la erosión
I38	Impacto	Bienes Y Servicios Ecosistémicos	Servicios culturales	CT: Estética del paisaje: Disminución de la estética del paisaje	Disminución estética del paisaje por la pérdida y cambio de superficies arboladas
I39	Impacto	Bienestar humano	Bienestar cultural y social	Vitalidad comunitaria: Ruptura del tejido social	Ruptura del tejido social debido a la diversidad de los puntos de vista entre quienes están a favor y en contra de la minera.
I40	Impacto	Bienestar humano	Bienestar cultural y social	Vitalidad comunitaria: Migración	Aumento de la migración debido a la falta de oportunidades 3 846 habitantes menos de 2000 a 2015
	DPSIR	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CONCEPTO	EXPLICACIÓN
RD41	Respuesta	Respuestas basadas en drivers	Local	Aprovechamiento forestal sustentable	De acuerdo con información recabada del Ejido de Analco, se ha realizado aprovechamiento forestal sustentable mediante el corte de árboles viejos para la obtención de leña la cual es para autoconsumo y venta en este caso al municipio de Tlaxco.
RD42	Respuesta	Respuestas basadas en drivers	Local	Prácticas agrícolas sustentables	Entre las prácticas agrícolas sustentables resaltan el cultivo de rotación en donde se siembra maíz, avena y haba. Así mismo se evita la práctica de roza, tumba y quema.
RD43	Respuesta	Respuestas basadas en drivers	Estatal/Nacional	Programa Estatal de Apoyos a Proyectos de	Por conducto de SEMARNAT y CONAFOR, se han otorgado apoyos a 550 ha del municipio de Ixtacamaxtitlán en el periodo 2010-2015.

				Plantaciones Forestales Comerciales	
RD44	Respuesta	Respuestas basadas en drivers	Nacional	Programa de Coinversión Social	Programa que otorga recursos públicos para el desarrollo de proyectos que beneficien a municipios indígenas con alta y muy alta marginación, siendo Ixtacamaxtitlán beneficiario a 2015.
RD45	Respuesta	Respuestas basadas en drivers	Nacional	Programa de Infraestructura Indígena	El programa tiene como finalidad realizar acciones de infraestructura básica, para el bienestar de los pueblos y comunidades indígenas y afroamericanas elegibles, que contribuyan a la disminución de las carencias sociales, así como, a la integración territorial y el acceso de bienes y servicios básicos, siendo Ixtacamaxtitlán beneficiario a 2015.
RD46	Respuesta	Respuestas basadas en drivers	Nacional	Programa de Atención a Jornaleros Agrícolas	El programa tiene como objetivo contribuir a la reducción de la vulnerabilidad y exclusión social de la población jornalera agrícola. Está dirigido a personas de 16 años o más que laboran como jornaleros agrícolas, así como los integrantes de su hogar, siendo Ixtacamaxtitlán beneficiario a 2015.
RD47	Respuesta	Respuestas basadas en drivers	Nacional	Programa de Infraestructura	El Programa tiene como finalidad la mejora de la disponibilidad y calidad de la infraestructura básica y complementaria, así como del equipamiento, imagen y entorno de las áreas urbanas, suburbanas y en proceso de urbanización, que permita aumentar el grado de cohesión social, así como reducir la incidencia de marginación y atender las necesidades de vivienda de la población en situación de pobreza, siendo Ixtacamaxtitlán beneficiario a 2015.
RP48	Respuesta	Respuestas basadas en presiones	Local	Obras de reforestación	Existen acciones presentes en el municipio realizadas con recursos privados para la reforestación desde 2009.
RP49	Respuesta	Respuestas basadas en presiones	Local	Brechas cortafuegos	Existen acciones presentes en el municipio realizadas con recursos privados para la conservación de áreas reforestadas desde 2009.
RP50	Respuesta	Respuestas basadas en presiones	Local	Obras de captación de agua	Existen acciones presentes en el municipio realizadas con recursos privados para la captación de agua desde 2009.
RP51	Respuesta	Respuestas basadas en presiones	Local	Mantenimiento de caminos	A nivel ejidal se realizan faenas para el mantenimiento de caminos que permiten una adecuada movilidad de la población.
RP52	Respuesta	Respuestas basadas en presiones	Nacional	Establecimiento de Zonas de Restauración Ecológica	Ejidos del municipio fueron establecidos como Zonas de Restauración Ecológica debido a los incendios ocurridos en 1998-2000
RP53	Respuesta	Respuestas basadas en presiones	Nacional	Programa Nacional Forestal PRONAFOR	De acuerdo con CONAFOR, en Ixtacamaxtitlán se han otorgado apoyos para la reforestación de 2320 ha en el periodo de 2013 a 2015.

				(2013-2018) (Reforestación y/o restauración)	
RE54	Respuesta	Respuestas basadas en estado	Local	Mantenimiento de zonas reforestadas	Existen acciones presentes en el municipio realizadas con recursos privados para el mantenimiento de áreas reforestadas
RE55	Respuesta	Respuestas basadas en estado	Nacional	Programa Nacional Forestal PRONAFOR (2013-2018) (Componente protección y mantenimiento de zonas reforestadas y/o restauradas)	Protección de 1775 ha y mantenimiento de 1100 ha a áreas reforestadas y/o áreas restauradas en Ixtacamaxitlán (Información obtenida de base de datos de apoyos otorgados por CONAFOR a Ixtacamaxitlán (2013-2015))
RE56	Respuesta	Respuestas basadas en estado	Nacional	ProÁrbol (2004-2012)	El propósito del programa es contribuir a conservar y restaurar los ecosistemas forestales mediante el abastecimiento de planta a proyectos de conservación y restauración.
RE57	Respuesta	Respuestas basadas en estado	Nacional	Programa de Empleo Temporal	La finalidad es contribuir al bienestar de hombres y mujeres que enfrentan una reducción de sus ingresos, y de la población afectada por emergencias mediante apoyos económicos temporales por su participación en proyectos de beneficio familiar o comunitario, siendo Ixtacamaxitlán beneficiario (2015)
RI58	Respuesta	Respuestas basadas en impactos	Local	Obras de protección y conservación de suelos	Se han realizado obras de protección y conservación de suelos con recursos privados en áreas forestales.
RI59	Respuesta	Respuestas basadas en impactos	Nacional	Programa de Compensación Ambiental por Cambio de Uso de Suelo en Terrenos Forestales	Otorgamiento de apoyo en 2015 a 50 ha del municipio de Ixtacamaxitlán (Ejido Texocuixpan) como Compensación Ambiental. Entre las actividades destacan la producción de planta, obras de control de la erosión y captación de agua, protección del área donde se ejecuta el proyecto, asesoría técnica, incentivo a la restauración y reforestación. De acuerdo con datos de CONAFOR
RI60	Respuesta	Respuestas basadas en impactos	Nacional	Programa Nacional de Suelos Forestales: Restauración de suelos forestales	Se han otorgado apoyos a 2442 ha para la conservación, mantenimiento y restauración de suelos forestales en Ixtacamaxitlán en el periodo de 2013-2015, de acuerdo con CONAFOR

ANEXO 9

MATRIZ DE LAS RELACIONES CAUSA-EFECTO DE LOS FACTORES RELEVANTES EN EL PROCESO DE DEGRADACIÓN DE TIERRAS EN EL MUNICIPIO DE IXTACAMAXITLÁN, PUEBLA, MÉXICO.

	D1	D2	D3	D4	D5	P1.	P2.	P3.	E1.	E2.	E3.	E4.	E5.	I1	I2	I3	I4	I5	I6	R1	R2	R3	R4	R5	R6
D1.						7	7	5																	
D2.						5	7	9																	
D3.						3	7	5																	
D4.						3	7	3																	
D5.						7	5	5																	
P1.									7	7	7	7	7												
P2.									5	7	7	9	7												
P3.									5	7	5	7	5												
E1														3	5	7	7	5	5						
E2														7	7	5	7	5	1						
E3														3	5	5	5	3	1						
E4														5	5	5	9	3	3						
E5														7	7	7	9	3	3						
I1																				3	5	5	5	5	5
I2																				7	7	7	5	5	5
I3																				7	5	7	5	5	7
I4																				7	7	9	7	5	7
I5																				3	5	5	5	5	5
I6																				3	3	3	3	5	5
R1	9	7	5	5	5	9	9	7	7	7	7	7	7	5	7	7	9	5	5						
R2	7	7	9	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	5	9	5	5						
R3	7	5	7	5	3	7	7	7	7	7	7	9	7	7	7	7	9	5	5						
R4	5	5	7	5	5	7	7	7	7	7	7	7	5	5	5	5	7	5	5						
R5	5	5	5	1	7	5	5	5	5	5	3	5	3	3	3	3	3	3	7						

- Abdullah, H. M., Islam, I., Miah, M. G., & Ahmed, Z. (2019). Quantifying the spatiotemporal patterns of forest degradation in a fragmented, rapidly urbanizing landscape: A case study of Gazipur, Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 457–465. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.01.002>
- Agyemang, I., Mcdonald, A., & Carver, S. (2007). Application of the DPSIR framework to environmental degradation assessment in northern Ghana. *Natural Resources Forum*, 31(3), 212–225. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2007.00152.x>
- Akhtar-Schuster, M., Stringer, L. C., Erlewein, A., Metternicht, G., Minelli, S., Safriel, U., & Sommer, S. (2017). Unpacking the concept of land degradation neutrality and addressing its operation through the Rio Conventions. *Journal of Environmental Management*, 195, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.044>
- Akinyemi, F. O., Ghazaryan, G., & Dubovyk, O. (2020). Assessing UN indicators of land degradation neutrality and proportion of degraded land for Botswana using remote sensing based national level metrics. *Land Degradation and Development*, June, 1–15. <https://doi.org/10.1002/ldr.3695>
- Al Sayah, M. J., Abdallah, C., Khouri, M., Nedjai, R., & Darwich, T. (2019). Application of the LDN concept for quantification of the impact of land use and land cover changes on Mediterranean watersheds - Al Awali basin - Lebanon as a case study. *Catena*, 176(January), 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.023>
- An, J. Y., Park, B. B., Chun, J. H., & Osawa, A. (2017). Litterfall production and fine root dynamics in cool-temperate forests. *PLoS ONE*, 12(6), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180126>
- Arellano, M. (2017, July 24). Resistencia: Mujeres contra la mina. *Lado B*. <https://www.ladobe.com.mx/2017/07/resistencias-mujeres-contra-la-mina/>
- Arnold, R. D., & Wade, J. P. (2015). A definition of systems thinking: A systems approach. *Procedia Computer Science*, 44(C), 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.050>
- Arnoldus, H. M. J., Boodt, M. D., & Gabriels, D. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. *Assessment of Erosion*, 1, 127–132.
- Aynekulu, E., Lohbeck, M., Nijbroek, R. P., Ordóñez, J., Turner, K. G., Vågen, T.-G., & Winowiecki, L. A. (2017). *Review of methodologies for land degradation neutrality baselines Sub-national case studies from Costa Rica and Namibia* (p. 58). Publication No. 441. International Center for Tropical Agriculture (CIAT) and World Agroforestry Center (ICRAF). <http://hdl.handle.net/10568/80563>
- Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., & Schaepman, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24(3), 223–234. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>
- Barrio, G. del, Sanjuan, M. E., Hirche, A., Yassin, M., Ruiz, A., Ouessar, M., Valderrama, J. M., Essifi, B., & Puigdefabregas, J. (2016). Land degradation states and trends in the northwestern Maghreb drylands, 1998–2008. *Remote Sensing*, 8(7), 1998–2008. <https://doi.org/10.3390/rs8070603>
- Baskan, O., Dengiz, O., & Demirag, İ. T. (2017). The land productivity dynamics trend as a tool for land degradation assessment in a dryland ecosystem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(5), 189:212. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5909-3>
- Bastidas-Orrego, L. M., Ramírez-Valverde, B., Cesín-Vargas, A., Juárez-Sánchez, J. P., Martínez-Carrera, D., &

- Vaquera-Huerta, H. (2019). Socioenvironmental Conflicts and Open-Pit Mining in the Sierra Norte De Puebla, Mexico. *Textual*, 72, 35–66. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2017.72.003>
- Batunacun, Wieland, R., Lakes, T., Yunfeng, H., & Nendel, C. (2019). Identifying drivers of land degradation in Xilingol, China, between 1975 and 2015. *Land Use Policy*, 83(February), 543–559. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.013>
- Bautista, S., López, C., & Juárez, A. (2007). Producción avícola familiar en una comunidad del municipio de Ixtacamaxtitlán, Puebla. *Técnica Pecuaria En México*, 45(1), 41–60.
- Becerril-Piña, R., Mastachi-Loza, C. A., González-Sosa, E., Díaz-Delgado, C., & Bâ, K. M. (2015). Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 120, 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.04.006>
- Blaikie, P. (1985). *The political economy of soil erosion in developing countries* (D. J. Dwyer (ed.); First edit). Longman Development Studies.
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle density. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods* (Second edi, pp. 377-382.). SSSA Book Series.
- Bojórquez-Serrano, J. I., Castillo-Pacheco, L. A., Hernández-Jiménez, A., García-Paredes, J. D., & Madueño-Molina, A. (2015). Changes in organic carbon stocks in soils under different plant covers. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 63–69.
- Bolaños-González, M., Paz-Pellat, F., Cruz-Gaistardo, Carlos Argumedo-Espinoza, J., Romero-Benítez, V., & De La Cruz-Cabrera, J. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271–288.
- Bradley, P., & Yee, S. (2015). *Using the DPSIR Framework to Develop a Conceptual Model: Technical Support Document Coral reef biocriteria View project Adaptation Design Tool guide View project*. August, 82.
- Bravo-Peña, L. C., Torres-Olave, M. E., Alatorre-Cejudo, L. C., Castellanos-Villegas, A., Moreno-Murrieta, R. L., Granados-Olivas, A., Uc-Campos, M., González-León, M., & Wiebe-Quintana, L. (2017). Áreas probables de degradación-deforestación de la cubierta vegetal en Chihuahua, México. Una exploración mediante regresión logística para el período 1985-2013. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 20, 109–137. <https://doi.org/10.21138/gf.545>
- Brink, A. B., Martínez-López, J., Szantoi, Z., Moreno-Atencia, P., Lupi, A., Bastin, L., & Dubois, G. (2016). Indicators for assessing habitat values and pressures for protected areas-An integrated habitat and land cover change approach for the Udzungwa Mountains National Park in Tanzania. *Remote Sensing*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/rs8100862>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomass and productivity in mexican arid lands. *Madera y Bosques*, 24(Special Issue), e2401898. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- CAM. (2018). *Manifestación de Impacto Ambiental "Proyecto de explotación y beneficio de minerales Ixtaca."*
- Camacho-Sanabria, R., Camacho-Sanabria, J. M., Balderas-Plata, M. Á., & Sánchez-López, M. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: Estudio de caso en progreso hidalgo, estado de méxico. *Madera Bosques*, 23(3), 39–60. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331516>
- Campo, J., Oliva, F. G., Navarrete, A., & Siebe, C. (2016). Almacenes y dinámica del carbono orgánico en ecosistemas forestales tropicales de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 31–38.
- Campos-Serrano, A. (2005). *Ayuda, mercado y buen gobierno : los lenguajes del desarrollo en Africa en el cambio de milenio*. Icaria Editorial.

- Cantú-Silva, I., & Yañez-Díaz, M. I. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 122–151. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.138>
- Carabias, J., Arriaga, V., & Cervantes-Gutiérrez, V. (2007). Las políticas públicas de la restauración ambiental en México: limitantes, avances, rezagos y retos. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 80(80S), 85–100. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1759>
- Casabella-González, M. (2015). *Estudio de erosión hídrica en varias localizaciones de la Sierra de San Miguelito, SLP, México: Evaluación de erodibilidad de los suelos y modelado del proceso*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Castelán-Vega, R. (2009). *Estrategia de manejo integral de los recursos naturales de la subcuenca del río San Marcos, Puebla: enfoque para un desarrollo sustentable*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
- Castro-Medina, A. (2018). Economía popular y solidaria: ¿realidad o utopía?. Caracterización de las entidades de fomento. In *Economía popular y solidaria: ¿realidad o utopía?. Caracterización de las entidades de fomento*. Universidad Politécnica Salesiana, Editorial Abya-Yala. <https://doi.org/10.7476/9789978104903>
- CEPAL. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. In C. Morales & S. Parada (Eds.), *ONU* (Vol. 87, p. 274). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://www.redalyc.org/pdf/174/17412302006.pdf%0Ahttps://n9.cl/cq1aa%0Ahttp://observatorio.e-pacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2016/08/1-Aspectos-Ecologicos-BST.pdf%0Ahttp://www.ugt.es/sites/default/files/la_desertificacion_el_reto_medioambiental_mas_
- Cervantes, V., Carabias, J., & Arriaga, V. (2008). Evolución de las Políticas Públicas de Restauración Ambiental. In J. Sarukhan (Ed.), *Capital Natural de México, vol. III: Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad.: Vol. III* (pp. 155–226). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). <https://www.mendeley.com/catalogue/evolucion-las-politicas-publicas-restauracion-ambiental/>
- Cha, S., Kim, C., Kim, J., Lee, A. L., Park, K., Koo, N., Kim, Y. S., Cha, S., Kim, C., Kim, J., Lee, A. L., Park, K., Koo, N., & Kim, Y. S. (2020). Land-use changes and practical application of the land degradation neutrality (LDN) indicators: a case study in the subalpine forest ecosystems, Republic of Korea. *Forest Science and Technology*, 16(1), 8–17. <https://doi.org/10.1080/21580103.2019.1700831>
- Chappell, A., Webb, N. P., Leys, J. F., Waters, C. M., Orgill, S., & Eyres, M. J. (2019). Minimising soil organic carbon erosion by wind is critical for land degradation neutrality. *Environmental Science and Policy*, 93, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.020>
- Comisión Europea. (2013). *Cambio climático y degradación de suelos en América Latina: escenarios, políticas y respuestas*. (Segunda). Programa EUROCLIMA, Dirección General de Desarrollo y Cooperación – EuropeAid, Comisión Europea. http://euroclima.org/images/ET3_Web.pdf
- CONABIO. (1998). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- CONABIO. (2004). *Mapa base a nivel estatal. Formato vectorial, Touraine Escala de los datos 1:250 000*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- CONABIO. (2020). *Cartografía Digital del Suelo. Contenidos de Arcilla, Limo, arena y materia orgánica 0-30 cm (Mejor modelo), escala: 1:4000000. edición: 1.0*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

- CONAF. (2017). *Reporte de Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT) ante la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULD)*. Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales (UCCSA), Gerencia de Desarrollo y Fomento Forestal (GEDEFF), Corporación Nacional Forestal (CONAF).
- CONAFOR-UACH. (2013). *Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación* (p. 80). Comisión Nacional Forestal, Universidad Autónoma de Chapingo.
- CONAFOR. (2014). *Inventario Estatal Forestal y de Suelos - Puebla 2013* (p. 135). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).
- CONAPO. (2010). Índice de Marginación por Localidad. In *Secretaría de Gobernación*. Consejo Nacional de Población (CONAPO). http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010
- CONAPO. (2012). Índices De Intensidad Migratoria México - Estados Unidos. In *Índices Sociodemográficos* (p. 50). Consejo Nacional de Población (CONAPO). http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/intensidad_migratoria/pdf/Migracion_Mex_EU.pdf
- CONEVAL. (2010). Informe Anual sobre la situación de Pobreza y Rezago Social. In *Secretaría de Gobernación*. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). http://www.dof.gob.mx/SEDESOL/Chiapas_108.pdf
- Conservation International. (2018). *Trends.Earth*. Conservation International, Lund University, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Global Environment Facility (GEF). <https://trends.earth/en/v1.0.8/>
- Corradine, M. F., & Moreno, T. (2017). *Plan de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica. Actualización POMCA. Río Garagoa* (Issue 100, p. 131). Consorcio Río Garagoa.
- Cowie, A. L., Orr, B. J., Castillo Sanchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S., & Welton, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science and Policy*, 79(August 2017), 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011>
- Cowie, A. L., Waters, C. M., Garland, F., Orgill, S. E., Baumber, A., Cross, R., O'Connell, D., & Metternicht, G. (2019). Assessing resilience to underpin implementation of Land Degradation Neutrality: A case study in the rangelands of western New South Wales, Australia. *Environmental Science and Policy*, 100(May), 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.06.002>
- Crossland, M., Winowiecki, L. A., Pagella, T., Hadgu, K., & Sinclair, F. (2018). Implications of variation in local perception of degradation and restoration processes for implementing land degradation neutrality. *Environmental Development*, 28, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.09.005>
- Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., & Gordillo-Curiel, A. (2020). Effect of organic matter and cation exchange capacity on the acidity of soils cultured with corn in two regions of Chiapas, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 475–480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Dallimer, M., & Stringer, L. C. (2018). Informing investments in land degradation neutrality efforts: A triage approach to decision making. *Environmental Science and Policy*, 89(August), 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.004>
- de la Colina-Rodríguez, A., Luis-Machín, J., & Cuzán-Fajardo, Y. (2016). Cartografía De La Degradación De

- Tierras En El Ecosistema Sabana- Camaguey (Esc). Cuba. *Convención Trópico 2016, January*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.400592>
- De Pina Tavares, J., Baptista, I., Ferreira, A. J. D., Amiotte-Suchet, P., Coelho, C., Gomes, S., Amoros, R., Dos Reis, E. A., Mendes, A. F., Costa, L., Bentub, J., & Varela, L. (2015). Assessment and mapping the sensitive areas to desertification in an insular Sahelian mountain region Case study of the Ribeira Seca Watershed, Santiago Island, Cabo Verde. *Catena*, 128, 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.005>
- Defourny, P., Bontemps, S., Lamarche, C., Brockmann, C., Boettcher, M., Wevers, J., & Kirches, G. (2017). *Land Cover CCI: Product User Guide Version 2.0* (p. 87). UCL-Geomatics.
- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427–433.
- Di Gregorio, A. (2016). Land Cover Classification System: Classification Concepts. In *October* (Tercera ed, Issue October). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/x0596e/x0596e00.htm%0Ahttp://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.htm>
- Díaz-Martín, D. (2015). *Aplicación de las metodologías DPSIR, ANP y ARS en el Manejo y Conservación del Parque Nacional Waraira Repano, Venezuela*. (Issue 2). Universidad Politécnica de Valencia.
- Díaz-Villa, E., Madanes, N., Cristiano, P., & Goldstein, G. (2016). Composición del banco de semillas e invasión de *Ligustrum lucidum* en bosques costeros de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Bosque*, 37(3), 581–590. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000300015>
- Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., & Huete, A. (2015). *MODIS Vegetation Index User 's Guide: Vol. Version 3*. (p. 35). The University of Arizona.
- DOF. (1992). *Ley Agraria*. Diario Oficial de la Federación (DOF).
- Dogan, M. (2014). Tokat ili bitki yoğunluk sınıflarının LANDSAT-7 ETM+ uydu görüntüleri ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ile araştırılması. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*, 31(2014–1), 47–53. <https://doi.org/10.13002/jafag686>
- EEA. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview* (p. 19). European Environment Agency.
- EIDH. (2017). *Minería Canadiense en Puebla y su impacto en los Derechos Humanos: por la vida y el futuro de Ixtacamaxtitlán y la Cuenca del Río Apulco* (p. 140). Evaluacion de Impacto en Derechos Humanos (EIDH). Centro de Estudios para el Desarrollo Rural (CESDER). Instituto Mexicano para el Desarrollo Comunitario (IMDEC). Proyecto sobre Organización, Desarrollo, Educación e Investigación (PODER). https://www.colaboratorio.org/wp-content/uploads/2017/05/InformeMineríaCanadiense-2017_SNP.pdf?platform=hootsuite
- Emanuelli, P., Duarte, E., Milla, F., Orellana, O., & López, S. (2017). *Mapa de cobertura forestal y uso de la tierra año 2015, sitio piloto cantón de Puriscal* (p. 33). Programa Gestión del paisaje y de los recursos para aumentar las reservas de carbono en Centroamérica (REDD+ Landscape / CCAD). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32894.59204>
- Emanuelli, P., Garrido, C., Milla, F., Orellana, O., Duarte, E., López, S., Torrealga, J. A., & Colmenares, M. V. (2016). *Alineación de los contenidos del actual PANCD con la Estrategia Decenal de la Convención (CNUCLD), la iniciativa de Degradación Neutral de la Tierra y los Objetivos del Desarrollo Sostenible* (Vol. 65350, Issue 2, pp. 1–62). Sud-Austral Consulting SpA en el Marco de la Consultoría “Alineación de los

contenidos del actual Programa de acción nacional contra la desertificación.”

- ESRI. (2016). *ArcGis Desktop: Versión 10.4* (10.4). Environmental Systems Research Institute (ESRI).
- ESRI. (2018). *Cómo funciona Pendiente*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.5/tools/3d-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>
- FAO/UNEP. (1997). A Structural and Institutional basis for Land Resources Management in the 21st Century. Negotiating a sustainable future for land. In *Land and Water Development Division* (p. 60). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- FAO. (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional* (p. 128). Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO). <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30044a.html%0Ahttp://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>
- FAO. (2011). *The State Of The World's Land and Water Resources for Food and Agriculture Managing Systems at Risk* (p. 50). Food And Agriculture Organization Of The United Nations.
- FAO. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. (C. Lefèvre, F. Rekik, A. V, & L. Wiese (eds.)). Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org/publications
- FAO. (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point*. (2021st ed., p. 63). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fensholt, R., Rasmussen, K., Kaspersen, P., Huber, S., Horion, S., & Swinnen, E. (2013). Assessing land degradation/recovery in the african sahel from long-term earth observation based primary productivity and precipitation relationships. *Remote Sensing*, 5(2), 664–686. <https://doi.org/10.3390/rs5020664>
- Ferreira de Carvalho, F., Barreto-Garcia, P., Aquino, M., & Pereira das virgens, A. (2019). Litterfall and litter decomposition in pinus and native forests. *Floresta e Ambiente*, 26(2), 1–10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.016517>
- Foster, G. R., Meyer, L. D., & Onstad, C. A. (1977). Runoff Erosivity Factor and Variable Slope Length Exponents for Soil Loss Estimates. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 20(4), 683–687. <https://doi.org/10.13031/2013.35628>
- Fraser, E. D. G., Dougill, A. J., Mabee, W. E., Reed, M., & McAlpine, P. (2006). Bottom up and top down: Analysis of participatory processes for sustainability indicator identification as a pathway to community empowerment and sustainable environmental management. *Journal of Environmental Management*, 78(2), 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.04.009>
- Gaitán, J. J., Donaldo-Bran, D. E., & Azcona, C. (2015). Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: ventajas y limitaciones. *AgriScientia*, 32(2), 83–93. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v32.n2.16559>
- Garay, R., Garay, L., & Montenegro, C. (2018). *Modelamiento Conceptual y Cualitativo Recursos Huepo (Ensis macha), Navajuela (Tagelus dombeii) y Taquilla (Mulinia edulis), Golfo de Arauco , Región del Biobío Modelamiento Conceptual y Cualitativo Recursos Huepo (Ensis macha), Navajuela (Tagelu*. Instituto de Fomento Pesquero (IFOP).
- García, R. (2011). Interdisciplinarietà Y Sistemas Complejos. *Revista Latinoamericana de Metodología de Las Ciencias Sociales*, 1(1), 65–101.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz-Gaistardo, C., Encina-Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça-Santos-Brefin, M. L., Montanarella, L., Muñoz-Ugarte, O., Schad, P., Vara-Rodríguez, M. I., & Vargas, R. (2014). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. In L-2995. Comision Europea - Oficina

- de Publicaciones de la Unión Europea. <https://doi.org/10.1111/rda.12542>
- Gaspar-Santos, E. S., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., & Álvarez-Solís, J. D. (2015). Acumulación y descomposición de hojarasca en bosques secundarios del sur de la Sierra Madre de Chiapas, México. *Bosque*, 36(3), 467–480. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300013>
- Gaspari, F., Rodríguez-Vagaría, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGM Domus*, 4, 143–158.
- Gedefaw, A., Atzberger, C., Bauer, T., Agegnehu, S. K., & Mansberger, R. (2020). Analysis of land cover change detection in Gozamin district, Ethiopia: From remote sensing and DPSIR perspectives. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114534>
- GEF. (2006). *Combating Land Degradation in production landscapes* (p. 56). Global Environment Facility (GEF).
- Gibbs, H. K., & Salmon, J. M. (2015). Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*, 57, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.024>
- Gichenje, H., & Godinho, S. (2018). Establishing a land degradation neutrality national baseline through trend analysis of GIMMS NDVI Time-series. *Land Degradation and Development*, 29(9), 2985–2997. <https://doi.org/10.1002/ldr.3067>
- Gichenje, H., & Godinho, S. (2019). A Climate-smart approach to the implementation of land degradation neutrality within a water catchment area in Kenya. *Climate*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/cli7120136>
- Gichenje, H., Muñoz-Rojas, J., & Pinto-Correia, T. (2019). Opportunities and limitations for achieving land degradation-neutrality through the current land-use policy framework in Kenya. *Land*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/land8080115>
- Gichenje, H., Pinto-Correia, T., & Godinho, S. (2019). An analysis of the drivers that affect greening and browning trends in the context of pursuing land degradation-neutrality. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100251>
- Gilbey, B., Davies, J., Metternicht, G., & Magero, C. (2019). Taking Land Degradation Neutrality from concept to practice: Early reflections on LDN target setting and planning. *Environmental Science and Policy*, 100(May), 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.04.007>
- Global Support Program. (2016). *Methodological note for the establishment of voluntary national targets for Land Degradation Neutrality using the UNCCD indicator framework* (p. 43). Global Support Programme. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- Gloria-Cogliati, M., Ostertag, G., Caso, M., Gisella-Finessi, F., & Groch, D. (2018). Análisis Del Balance Hídrico Medio Mensual En La Provincia Del Neuquén (Argentina). *Boletín Geográfico*, 40(2), 26–44.
- Gobierno Municipal de Ixtacamaxtitlán. (2014). *Plan Municipal de Desarrollo de Ixtacamaxtitlán 2014-2018* (p. 72). Gobierno Municipal Ixtacamaxtitlán 2014-2018. <http://www.ixtacamaxtitlanpuebla.gob.mx/plan-de-desarrollo-municipal/>
- Gómez, C. (2015). Hidrografía Marina y Continental: Balance Hidrológico. *Revista Geográfica Digital*, 12(23), 1–19. [revistas.unne.edu.ar › index.php › geo › article](http://revistas.unne.edu.ar/index.php/geo/article)
- Gonzalez-Roglich, M., Zvoleff, A., Noon, M., Liniger, H., Fleiner, R., Harari, N., & Garcia, C. (2019). Synergizing global tools to monitor progress towards land degradation neutrality: Trends.Earth and the World Overview of Conservation Approaches and Technologies sustainable land management database. *Environmental Science & Policy*, 93, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.019>

- Google. (2022). *Google Earth PRO* (9.155.0.2).
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, *342*(6160), 850–854. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, R. G. (2021). *Global Forest Change*. Global Land Analysis and Discovery (GLAD). <https://glad.umd.edu/dataset>
- Hengl, T., De Jesus, J. M., Heuvelink, G. B. M., Gonzalez, M. R., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, *12*(2), 1–40. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación* (J. Mares-Chacón (ed.); Quinta edi). Mc Graw Hill.
- Hincapié-Gómez, E., & Salazar-Gutiérrez, L. F. (2011). Impacto de la erosión sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de café. *Revista Cenicafé*, *62*(2), 79–89.
- Huaico-Malhue, A. I., Romero-Díaz, M. A., & Espejel-Carbajal, M. I. (2018). Evolución de los enfoques en desertificación: una revisión de 170 estudios de casos. *Cuadernos Geográficos*, *57*(2), 53–71. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i2.5530>
- INEGI. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2001). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Sistema topofomas. Escala de los datos 1:1000 000*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2002). *Anuario estadístico y geográfico de Puebla*. (p. 571). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2005). *Continuo Nacional de Geología de la República Mexicana escala 1:250,000*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2007a). *Censo Ejidal 2007*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2007b). *VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Ixtacamaxitlán, Puebla*. (p. 9). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/21/21209.pdf>
- INEGI. (2010). *Red Hidrográfica de México, escala 1:50 000 edición: 2.0*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2012). *Anuario estadístico y geográfico de Puebla*. (p. 35). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2013). *Anuario estadístico y geográfico de Puebla* (p. 33). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2014a). *Anuario estadístico y geográfico de Puebla* (p. 34). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

- INEGI. (2014b). *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional), escala: 1:250000. edición: 2.* Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2015a). *Anuario estadístico y geografico de Puebla* (p. 38). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2015b). *Encuesta Intercensal 2015.* Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://doi.org/10.2307/j.ctv26d9pv.32>
- INEGI. (2016a). *Anuario estadístico y geográfico de Puebla* (p. 34). Gobierno del Estado de Puebla, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2016b). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Union), escala: 1:250 000. edición: 1.* Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INPI. (2019). *Oficio de respuesta pública CGPE/2019/ OF/0477* (p. 6). Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas (INPI).
- IPCC. (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. In Penman, M. Gytarsky, T. Hiraiishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, & F. Wagner (Eds.), *IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme.* The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) C/o Institute for Global Environmental Strategies. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2014.11.004>
- Jardel-Peláez, E. (2015). *Guía para la caracterización y clasificación de hábitats forestales* (Primera ed). Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). United Nations Development Programme (UNDP).
- Jin, H., Shi, D., Zhong, Y., Huang, S., Lou, Y., & Jiang, N. (2020). Quantitative evaluation and path analysis of factors influencing the cultivated-layer quality of red soil sloping farmland based on the dpsir framework. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(1), 509–521. <https://doi.org/10.15244/pjoes/122434>
- Kapović, M., Barger, N., Cerda, A., Keesstra, S., & Marković, M. (2018). Assessing land condition as a first step to achieving land degradation neutrality: A case study of the Republic of Srpska. *Environmental Science and Policy*, 90(September), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.09.014>
- Kędra, M., & Szczepanek, R. (2019). Land cover transitions and changing climate conditions in the Polish Carpathians: Assessment and management implications. *Land Degradation and Development*, 30(9), 1040–1051. <https://doi.org/10.1002/ldr.3291>
- Koohafkan, P., Lantieri, D., & Nachtergaele, F. (2003). Land Degradation Assessment in Drylands: Guidelines for a Methodological Approach. In *The Future of Drylands* (Issue September 2021). Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). UN Environment Programme (UNEP). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6970-3>
- Kust, G., Andreeva, O., & Cowie, A. (2017). Land Degradation Neutrality: Concept development, practical applications and assessment. *Journal of Environmental Management*, 195, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.043>
- Kyere-Boateng, R., & Marek, M. V. (2021). Analysis of the social-ecological causes of deforestation and forest degradation in ghana: Application of the dpsir framework. *Forests*, 12(4), 1–29. <https://doi.org/10.3390/f12040409>
- Laina, E. (2016). UNCCD / CoP-12 Land Degradation Neutrality. *Environmental Policy and Law*, 46(1), 32–35. <https://doi.org/0378-777X/15/>
- le Polain de Waroux, Y., & Lambin, E. F. (2012). Monitoring degradation in arid and semi-arid forests and

- woodlands: The case of the argan woodlands (Morocco). *Applied Geography*, 32(2), 777–786. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.005>
- Lopez-Díaz, C. (2005). *Ganadería campesina en agostaderos de uso comun: Estudio de caso en Ixtacamaxtitlán, Puebla* (Issue February 2005) [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4607.9443>
- López-Santos, A. (2016). Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México? *Terra Latinoamericana*, 34(2), 239–249.
- López-Teloxa, L. C. (2017). *Propuesta para el manejo sustentable del sitio Ramsar No. 2027 (Presa Manuel Ávila Camacho) con base en el estado actual de la degradación del suelo*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- López, J., & Rodríguez, M. de L. (2009). Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México. In *Instituto de Geografía, UNAM* (Primera). Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/12/12/34-1>
- Lott, M. R. (1926). *Wage Scales and Job Evaluation: Scientific Determination of Wage Rates on the Basis of Services Rendered* (Primera ed). Ronald Press Company.
- Lucrecia, L., Pueyo, J. M., Fonseca, J., Burns, J., & Massa, E. (2011). Producción primaria del pastizal natural en el centro - norte de Entre Ríos. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, 1–9.
- Marclint-Ediede, T. (2011). Conflict Drivers : Environmental Degradation and Corruption in the Niger Delta Region. *African Conflict and Peacebuilding Review*, 1(1), 139–151. <https://doi.org/10.1353/acp.2011.0007>
- Martínez-Santiago, J., Licona-Vargas, A. L., González-Santiago, M. V., Becerra-Moreno, A., Pérez-Godínez, E. A., & Patlán-Martínez, E. (2015). Diagnóstico de la degradación de la tierra en la microcuenca del Yute Ndaa, Ñuu Ndeku, Ñuu Savi, Oaxaca. *Revista de Geografía Agrícola*, 55(Jul-Dic), 7–25. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2015.55.002>
- Mas, J.-F., Velázquez, A., & Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura / uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental*, 1(1), 23–39.
- McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1987). Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 30(5), 1387–1396. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>
- MEA. (2005). *Millennium Ecosystem Assessment. Synthesis report*. Millennium Ecosystem Assessment (MEA).
- Meadows, D. (2009). Thinking in Systems. A primer. In D. Wright (Ed.), *AEU - International Journal of Electronics and Communications* (First, Issue 1). Sustainability Institute. Earthscan and International Institute for Environment and Development. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2014.08.008>
- Medianero, D. (2014). Metodología de Estudios de Línea de Base. *Pensamiento Crítico*, 15, 61–82. <https://doi.org/10.15381/pc.v15i0.8994>
- Mengui, M., Montani, N., Monaco, N., Herrera, M., & Rosa, M. (2011). Diversidad y producción primaria de un pastizal inundable no pastoreado en la estepa pampeana (Argentina Central). *Revista Pastos*, 28(2), 183–200.
- Meyer, B. C., Mezosi, G., & Kovács, F. (2017). Landscape degradation at different spatial scales caused by aridification. *Moravian Geographical Reports*, 25(4), 271–281. <https://doi.org/10.1515/mgr-2017-0023>
- Mitri, G., Nasrallah, G., Gebrael, K., Bou Nassar, M., Abou Dagher, M., Nader, M., Masri, N., & Choueiter, D.

- (2019). Assessing land degradation and identifying potential sustainable land management practices at the subnational level in Lebanon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7739-y>
- Morales, C. (2012). *Los costos de la inacción ante la desertificación y la degradación de las tierras en escenarios alternativos de cambio climático* (p. 96). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Muñoz Iniestra, D. J., Ferreira Ramírez, M., Escalante Arriaga, I., & López García, J. (2013). Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 201–210. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n3/2395-8030-tl-31-03-00201.pdf>
- Nijbroek, R., Piikki, K., Söderström, M., Kempen, B., Turner, K. G., Hengari, S., & Mutua, J. (2018). Soil organic carbon baselines for land degradation neutrality: Map accuracy and cost tradeoffs with respect to complexity in Otjozondjupa, Namibia. *Sustainability (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/su10051610>
- Obubu, J. P., Odong, R., Alamerew, T., Fetahi, T., & Mengistou, S. (2022). Application of DPSIR model to identify the drivers and impacts of land use and land cover changes and climate change on land, water, and livelihoods in the L. Kyoga basin: implications for sustainable management. *Environmental Systems Research*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00254-8>
- OECD. (2001). *Environmental Indicators. Towards Sustainable Development* (p. 152). Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). <https://doi.org/10.1177/009155218501300304>
- Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., & Sombroek, W. . (1991). *Global Assessment Of Soil Degradation (GLASOD). World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation* (p. 26). International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), UN Environment Programme (UNEP).
- ONU. (2012). El futuro que queremos. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible. In 2012. Organización de las Naciones Unidas (ONU).
- Oropeza-Orozco, O. (2010). Pendiente del terreno. In U. Atlántida Coll-Hurtado, IGg (Ed.), *Atlas Regional de Impactos derivadas de las actividades petroleras en Coatzacoalcos, Veracruz*. (Primera ed, p. 122). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo Sánchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S., & Welton, S. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface*. (p. 140). United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- Pacheco, F. A. L., Sanches Fernandes, L. F., Valle Junior, R. F., Valera, C. A., & Pissarra, T. C. T. (2018). Land degradation: Multiple environmental consequences and routes to neutrality. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 5, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.002>
- Paz-Pellat, F., & Ortiz-Solorio, C. (2019). Base de datos para la evaluación de la degradación de los suelos en México. In *Elementos para Políticas Públicas* (No. 1; Vol. 3, Issue 1, pp. 51–56). Programa Mexicano del Carbono.
- Pena, S. B., Abreu, M. M., Magalhães, M. R., & Cortez, N. (2020). Water erosion aspects of land degradation neutrality to landscape planning tools at national scale. *Geoderma*, 363(May 2019), 114093. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114093>
- Pérez-Morales, J. (2014). Índice de Degradación de la vegetación sometida a manejo forestal en el sur de

- Nuevo León, Mexico. In *UANL*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Perez-Munoz, S. A. (2021). *La Remodelización Extractivista de la Sierra Norte de Puebla y su deriva local en el municipio de Ixtacamaxtitlán a través de la minería (2001-2020)*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 157–173. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>
- Ponce, A. (2004). *Los actores sociales del Cantón Rocafuerte y su participación en el desarrollo local*. Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí” Manta, Ecuador.
- Pulido, J., & Bocco, G. (2011). ¿Cómo se evalúa la degradación de tierras? Panorama global y local. *Interciencia*, 2(36), 96–103.
- Rámirez-Carballo, H., & Pedroza-Sandoval, A. (2007). La Reserva De La Biosfera De Mapimi , Durango , Mexico Participatory Assessment of the Soil Degradation in Biosfere Reserve Mapimi , Durango , Mexico. *Revista Chapingo, Serie Zonas Áridas*, VI(2), 247–254.
- Ramirez-Garcia, A. L. (2017). *Evaluación de la desertificación en la microcuenca Cacaloapan en Tepanco de López, Puebla*. Benemérita Universidad Autonoma de México, Puebla, México.
- RAN. (2018). *Conjunto de datos vectoriales de Tierras de Uso Común*. Registro Agrario Nacional.
- Rappo, S., Vázquez, R., Amaro, M., & Formacio, X. (2015). La disputa por los territorios rurales frente a la nueva cara del extractivismo minero y los procesos de resistencia en Puebla, México. *Revista NERA*, 18(28), 28–206. <http://revista.fct.unesp.br/index.php/nera/article/viewFile/3999/3051>
- Ren, Y., Lü, Y., Fu, B., Comber, A., Li, T., & Hu, J. (2020). Driving Factors of Land Change in China ' s Loess Plateau : Quantification Using Geographically Weighted Regression and Management Implications. *Remote Sensing*, 12(453). <https://doi.org/10.3390/rs12030453>
- Retiere, A., Sommer, S., Minelli, S., Byron-Cox, R., & Candelori, M. (2015). *Land degradation neutrality from concept to practice. Using the UNCCD indicator framework to set LDN national voluntary targets and monitor their achievement*. (No. 13). Joint Research Center (JRC).
- Richmond, B. (1994). Systems thinking/systems dynamics: Let's just get on with it. *International Systems Dynamic Conference*, 25. <https://iseesystems.com/resources/articles/download/lets-just-get-on-with-it.pdf>
- Rivera-Posada, J. H., Lal, R., Amézquita-Collazos, É., Mesa-Sánchez, Ó., & Chaves-Córdoba, B. (2010). Predicción de la Erodabilidad en algunos suelos de ladera de la Zona Cafetera Colombiana. *Cenicafé*, 61(4), 344–357.
- Rivero-Ramos, L., Ruiz-Careaga, J., Tamariz-Flores, V., Martínez-Rodríguez, F., & Marín-Castro, M. (2013). Los suelos, la cobertura vegetal y el relieve en el municipio Tzicatlacoyan, Estado de Puebla, México. *Geominas Agronomía*, 41(61), 105–110.
- Rocha-Loredo, A. G., & Ramírez-Marcial, N. (2009). Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de Pino-Encino en Chiapas, México. *Botanical Sciences*, 84, 1–12. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.2287>
- Rodríguez-Balboa, P. (2020). *Degradación y composición química de la hojarasca en bosque de pino, pinoñencino y encino en Nuevo León, México*. Universidad Autónoma de Nuevo Leon.

- Romero, D. (2009). Modelo integrado para la construcción participativa y experta de un sistema de indicadores locales de sostenibilidad. *Revista Desarrollo Local Sostenible.*, 3(9), 1–14.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. In *NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA* (Issue September 1972, pp. 1–137). Remote Sensing Center. Texas A&M University. http://scholar.google.com/scholar?q=related:kfZY0xukQScJ:scholar.google.com/&hl=en&num=20&as_sdt=0,5%5Cnpapers2://publication/uuid/FB22B85B-B2F9-442E-AF63-58F3517012FC
- Ruizpalacios, B., Charli-Joseph, L., Eakin, H., Siqueiros-García, J. M., Manuel-Navarrete, D., & Shelton, R. (2019). *El Laboratorio de Transformación en el Sistema Socio-Ecológico de Xochimilco, Ciudad de México: Narrativa del proceso y guía metodológica* (p. 37). LANCIS-IE, UNAM. <http://steps-centre.org/project/tkn/>
- Safriel, U. (2017). Land degradation neutrality (LDN) in drylands and beyond – where has it come from and where does it go. *Silva Fennica*, 51(1). <https://doi.org/10.14214/sf.1650>
- Salas, J., & Infante, Á. (2006). Producción Primaria Neta Aérea en Algunos Ecosistemas y Estimaciones de Biomasa en Plantaciones Forestales. *Revista Forestal Latinoamericana*, 40, 47–70. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=lah&AN=20073297511&site=ehost-live>
- Salcedo, A. P., & Solorza, N. R. (2010). La degradación de tierras mediante análisis fisiográfico y la aplicación de técnicas de teledetección en la cuenca del río Guañacos, Departamento Minas, Neuquén. *Boletín Geográfico*, 32, 23–54.
- Sanchez-Ramón, E. (2004). *Manejo del suelo en la zona de restauración ecológica Texocuixpan Municipio de Ixtacamaxtitlán, Puebla*.
- SEDESOL. (2012). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Ixtacamaxtitlán, Puebla* (Issue 662). Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL).
- Segura-Castruita, M., Sánchez-Guzmán, P., Ortiz-Solorio, C., & Gutiérrez-Castorena, M. del C. (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *TERRA Latinoamericana*, 23(1), 21–28. <https://doi.org/ISSN:2395-8030>
- SEMARNAT-CP. (2002). *Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el hombre en la República Mexicana, Escala 1:250000* (Issue December 2002). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Colegio de Postgraduados (CP).
- SEMARNAT-UACH. (2003). *Evaluación de la pérdida de suelos por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, escala 1: 1 000 000*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- NOM-021-RECNAT-2000, Pub. L. No. Método AS-02, Diario Oficial de la Federación (2002). http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002
- SEMARNAT. (2007). *El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental* (H. Cotler (ed.); Segunda). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).
- SEMARNAT. (2011). *Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras*. (2011th ed.). Gobierno Federal.
- SEMARNAT. (2014). *Diagnóstico del Programa de Manejo de Tierras para la Sustentabilidad Productiva Diagnóstico para programas nuevos Dirección General del Sector Primario y Recursos* (p. 104). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- SEMARNAT. (2015). *Programa Nacional Manejo Sustentable de Tierras Para combatir Degradación de Tierras y Desertificación en México* (p. 67). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Sharpley, A. N., & Williams, J. R. (1990). EPIC: The erosion-productivity impact calculator: 1. Model documentation. In *U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin* (Issue 1768, p. 235). U.S. Department of Agriculture. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9403696>
- Silva, P. (2017). *Indicadores Edáficos para la alerta de erosión y desertificación al sur del municipio de Puebla*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Sims, N. C., England, J. R., Newnham, G. J., Alexander, S., Green, C., Minelli, S., & Held, A. (2019). Developing good practice guidance for estimating land degradation in the context of the United Nations Sustainable Development Goals. *Environmental Science and Policy*, 92(October 2018), 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.014>
- Siwailam, M., Abdelsalam, H., & Saleh, M. (2019). *Integrated DPSIR-ANP-SD framework for Sustainability Assessment of Water Resources System in Egypt*. 3(3), 1–12.
- SMN. (s.f.). *Monitor de Sequía en México (MSM)*. Retrieved August 11, 2021, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Soliz, F., & Maldonado, A. (2012). Guía de Metodologías Comunitarias Participativas. In *Repositorio Institucional del Organismo Académico de la Comunidad Andina* (Clínica Am, Vol. 5, Issue 5). Universidad Andina Simón Bolívar.
- Sommer, S., Zucca, C., Grainger, A., Cherlet, M., Zougmore, R., Sokona, Y., Hill, J., Della Peruta, R., Roehrig, J., & Wang, G. (2011). Application of indicator systems for monitoring and assessment of desertification from national to global scales. *Land Degradation and Development*, 22(2), 184–197. <https://doi.org/10.1002/ldr.1084>
- Stavi, I., & Lal, R. (2015). Achieving Zero Net Land Degradation: Challenges and opportunities. *Journal of Arid Environments*, 112(2015), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.01.016>
- Tapia-Guerrero, L. A. (2018). Infraestructura carretera y economía regional. El caso de los productores de ajo de Oaxaca y Puebla. *Región Y Sociedad*, 30(73). <https://doi.org/10.22198/rys.2018.73.a944>
- Thorntwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(71\)90076-6](https://doi.org/10.1016/0022-3115(71)90076-6)
- Touraine, A. (1998). *Crítica de la modernidad* (T. al castellano por A. L. Bixio (ed.); Cuarta). Fondo de Cultura Económica de Argentina, S. A.
- Touré, E. O., Romagosa Casals, F., & Breton Renard, F. (2015). Análisis de la situación de la pesca artesanal en el delta y valle bajo del río Senegal a partir del marco conceptual DPSIR1. *Estudios Geográficos*, 76(279), 703–731. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201525>
- UACH-UNICEDER. (2002). Evaluación del Programa Nacional de Reforestación (PRONARE 2002) Puebla. In *Evaluación Del Programa Nacional De Reforestación (PRONARE 2002) Puebla* (p. 59). Unidad de Investigación, Capacitación y Evaluación para el Desarrollo Rural de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH-UNICEDER).
- UCLouvain. (2017). *ESA Climate Change Initiative - Land Cover*. Universidad Católica de Lovaina, Instituto de La Tierra y La Vida, Iniciativa Contra El Cambio Climático. <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>
- UNCCD. (2013). Aspectos económicos de la desertificación, la degradación de las tierras y la seguía: Metodologías y análisis para la toma de decisiones. In *2da conferencia científica de la Convencion de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación - CNULD*. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD),.

- UNCCD. (2015a). Cambio climático y degradación de las tierras: Acercar los conocimientos a las partes interesadas. In *3a Conferencia Científica de la UNCCD* (p. 34). United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD),. <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/1.-Problemas-de-Degradacion.pdf>
- UNCCD. (2015b). Integration of the Sustainable Development Goals and targets into the implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification and the Intergovernmental Working Group report on land degradation neutrality. In *Convention to Combat Desertification* (Vol. 11235, Issue July, pp. 2–14). United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD),. <https://www.unccd.int/sites/default/files/inline-files/dec3-COP.12eng.pdf>
- UNCCD. (2015c). *Land Degradation Neutrality Resilience At Local, National and Regional Levels* (p. 24). United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- UNCCD. (2016a). *Achieving Land Degradation Neutrality at the country level. Building blocks for LDN target setting* (p. 32). United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- UNCCD. (2016b). *Guía técnica para el establecimiento de metas para la Neutralidad de la Degradación de las Tierras*. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD),.
- UNCCD. (2017). *The Global Land Outlook* (First). United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- UNCCD. (2018). *Default data: methods and interpretation A guidance document for 2018 UNCCD reporting* (Issue February, p. 54). United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- USAGov. (2019). *Earthdata*. National Aeronautics and Space Administration (NASA). [https://search.earthdata.nasa.gov/search?ff=Map Imagery](https://search.earthdata.nasa.gov/search?ff=Map+Imagery)
- van Lynden, G. W. J., & Oldeman, L. R. (1997). *The Assessment of the status of Human-Induced Soil Degradation in South and Southeast Asia* (Issue February). International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- Vázquez-Valencia, R., & García-Almada, R. M. (2018). Indicadores PER y FPEIR para el análisis de la sustentabilidad en el municipio de Cihuatlán, Jalisco, México. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 27(53–1), 1–26. <https://doi.org/10.20983/noesis.2018.3.1>
- Vega, M. B., & Febles, J. M. (2008). La agresividad de la lluvia en áreas rurales de la provincia la habana como factor de presión en la sostenibilidad agroambiental. *II Seminario Internacional de Cooperación y Desarrollo En Espacios Rurales Iberoamericanos*.
- Vela-Correa, G., López-Blanco, J., & Rodríguez-Gamiño, M. D. L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del distrito federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 77, 18–30. <https://doi.org/10.14350/rig.31007>
- Viera, M., & Schumacher, M. V. (2010). Variação mensal da deposição de serapilheira em povoamento de Pinus taeda L. em área de campo nativo em Camará do Sul-RS. *Revista Árvore*, 34(3), 487–494. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622010000300012>
- Vogt, J. V., Safriel, U., Von Maltitz, G., Sokona, Y., Zougmore, R., Bastin, G., & Hill, J. (2011). Monitoring and assessment of land degradation and desertification: Towards new conceptual and integrated approaches. *Land Degradation and Development*, 22(2), 150–165. <https://doi.org/10.1002/ldr.1075>
- Von Bertalanffy, L. (1972). The History and Status of General Systems Theory. *Academy of Management Journal*, 15(4), 407–426. <https://doi.org/10.5465/255139>
- Wang, B., Zheng, F., & Guan, Y. (2016). Improved USLE-K factor prediction: A case study on water erosion

- areas in China. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.003>
- Warren, A. (2002). Land degradation is contextual. *Land Degradation and Development*, 13(6), 449–459. <https://doi.org/10.1002/ldr.532>
- Weldemariam, S. (2017). Application of DPSIR Framework for Assessment of Land Degradation: A Review Weldemariam. *Approaches in Poultry, Dairy & Veterinary Sciences*, 1(5), 1–7. <http://www.crimsonpublishers.com>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning* (Vol. 1). U.S Department of Agriculture. U.S. Government Printing Office.
- WOCAT. (2011). *Donde La Tierra Es Más Verde. Estudios de caso y análisis de iniciativas de conservación de tierras y aguas en todo el mundo* (H. Liniger & W. Critchley (eds.)). Revisión Mundial de Enfoques y Tecnologías de Conservación (WOCAT).
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker, C. J. (2014). *The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations* (Issue July 2021). Lund University Centre for Sustainability Studies (LUCSUS) and The Scientific and Technical Advisory Panel of the Global Environment Facility (STAP/GEF). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>
- Yescas-Coronado, P., Álvarez-Reyna, V. P., Segura-Castruita, M. Á., González-Cervantes, G., García-Carrillo, M., & Hernández-Hernández, V. (2018). Análisis temporal del contenido de carbono orgánico del suelo en una región árida de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), 1181–1192. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1583>
- Zimmermann, M., Meir, P., Silman, M. R., Fedders, A., Gibbon, A., Malhi, Y., Urrego, D. H., Bush, M. B., Feeley, K. J., Garcia, K. C., Dargie, G. C., Farfan, W. R., Goetz, B. P., Johnson, W. T., Kline, K. M., Modi, A. T., Rurau, N. M. Q., Staudt, B. T., & Zamora, F. (2010). No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems*, 13(1), 62–74. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>