



Universidad Autónoma del Estado de México



Facultad de Planeación Urbana y Regional

**Análisis de pérdida de cobertura forestal y cambio de uso de
suelo en el Parque Ecológico y Recreativo Tenancingo,
Malinalco y Zumpahuacán, 1974 al 2019**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias Ambientales

P R E S E N T A

JONATHAN PÉREZ FUENTES

Directora

Mtra. en A.E.G. Marisol De la Cruz Jasso

Toluca de Lerdo, Estado de México; Noviembre de 2019.

	2.1.4. <i>Edafología</i>	40
	2.1.5. <i>Clima</i>	43
2.1.6.	<i>Hidrografía</i>	46
2.1.7.	<i>Uso de suelo y vegetación</i>	48
2.2.	Contexto socioeconómico del área de estudio	51
2.2.1.	<i>Dinámica demográfica</i>	53
2.2.2.	<i>Actividades económicas</i>	54
2.2.3.	<i>Asentamientos humanos</i>	57
2.3.	Tenencia de la tierra	58
	Conclusiones preliminares	59
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		60
3.1.	Esquema metodológico	60
3.2.	Alcance y diseño de la investigación	61
3.3.	Método de la investigación	61
3.4.	Estructura de la investigación	62
3.4.1.	<i>Recolección de la información</i>	62
3.4.2.	<i>Tratamiento de la información</i>	65
3.4.3.	<i>Evaluación de la fiabilidad</i>	71
	Conclusiones preliminares	76
CAPITULO IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES		77
4.1.	Uso del suelo para los años 1974 y 2019	77
4.1.1.	<i>Uso de suelo y vegetación en el año 1974</i>	77
4.1.2.	<i>Uso de suelo y vegetación en el año 2019</i>	81
4.2.	Validación de Mapa de Uso de Suelo y Vegetación de 2019	86
4.3.	Tasa de Cambio de Uso de Suelo entre 1974 y 2019	92
4.4.	Cambios de Uso de Suelo entre 1974 y 2019	96
4.5.	Indicadores de cambios entre 1974 y 2019	99
4.6.	Índice de Vegetación Normalizada NDVI para 2019	103
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		106
REFERENCIAS CONSULTADAS		109
ANEXO		115

Índice de Tablas

Tabla 1. Elementos de un sistema.....	20
Tabla 2. Causas directas e indirectas de la deforestación	22
Tabla 3. Pérdida gradual de cobertura forestal	23
Tabla 4. Servicios ambientales proporcionados por un sistema forestal	24
Tabla 5. Categorías de Áreas Naturales en México.....	26
Tabla 6. Tipos de resolución de un sensor	29
Tabla 7. Municipios por superficie del PERTMZ.	31
Tabla 8. Subprovincias fisiográficas por superficie del PERTMZ.	34
Tabla 9. Principales características de rocas del PERTMZ.....	35
Tabla 10. Principales características de suelos del PERTMZ.	40
Tabla 11. Principales características de subtipos de climas.....	43
Tabla 12. Subcuencas hidrográficas del PERTMZ.....	46
Tabla 13. Usos de Suelo Actual.....	48
Tabla 14. Principales características de los tipos de ecosistemas del PERTMZ	49
Tabla 15. Categorías de vegetación	50
Tabla 16. Población por municipio del PERTMZ.....	54
Tabla 17. Localidades por municipio.....	57
Tabla 18. Información ambiental del área de estudio.....	63
Tabla 19. Características de la imagen de satélite Sentinel-2.....	65
Tabla 20. Categorías de uso de suelo y vegetación	66
Tabla 21. Métodos de percepción remota.....	67
Tabla 22. Matriz de cambios.....	70
Tabla 23. Fórmulas de matriz de cambios	71
Tabla 24. Tamaño de muestra por categoría en función de Fiabilidad (p) y Error (B)	72
Tabla 25. Matriz de Error	72
Tabla 26. Ecuaciones para obtener índices de confiabilidad y medio intervalo de confianza	73
Tabla 27. Estadísticas de precisión de clasificación	75
Tabla 28. Matriz de Error del año 2019.....	86
Tabla 29. Matriz de Error expresada en proporción.	87

Tabla 30. Matriz de Error expresada en proporción y corregida (método de Card, 1982)	87
Tabla 31. Coeficientes de los índices de confiabilidad e intervalos de confianza.	88
Tabla 32. Probabilidades de asignación de las categorías cartografiadas	88
Tabla 33. Coeficientes de la proporción y superficie resultado del ajuste de los errores de clasificación	89
Tabla 34. Estadísticas de precisión	90
Tabla 35. Tasa de Cambio entre 1974 y 2019	92
Tabla 36. Cambios de uso de suelo	96
Tabla 37. Indicadores de cambio 1974 – 2019.	100
Tabla 38. Índices de Braimoh, 1974 -2019	102

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de fragmentación del hábitat natural.....	18
Figura 2. Principales exponentes de la TGS.	19
Figura 3. Modelo grafico del PERTMZ como sistema.....	21
Figura 4. Proceso de degradación y cambio de uso de suelo en un sistema forestal	23
Figura 5. Espectro electromagnético.....	28
Figura 6. Superficie total del PERTMZ.	32
Figura 7. Climograma semifrío subhúmedo.....	44
Figura 8. Climograma semicálido subhúmedo.....	44
Figura 9. Dinámica demográfica.....	53
Figura 10. Población desocupada y ocupada en 2010	54
Figura 11. Tenencia de la tierra.....	58
Figura 12. Esquema metodológico general de la investigación	60
Figura 13. Método de la investigación	62
Figura 14. Configuración orbital del sensor Sentinel-2.	64
Figura 15. Firma espectral de vegetación viva.	68
Figura 16. Determinación del valor crítico $Z_{\alpha/2}$ para un nivel de confianza del 95%.	74
Figura 17. Precisión del productor y usuario en la clasificación de un mapa temático	75
Figura 18. Superficie de Uso de Suelo en 1974	78
Figura 19. Superficie de Uso de Suelo en 2019	81
Figura 20. Evidencia del aumento espacial de invernaderos en el PERTMZ.....	83
Figura 21. Evidencia de causas de pérdida de cobertura forestal	83
Figura 22. Evidencia de deforestación y fragmentación del paisaje.....	84
Figura 23. Tasa de Cambio entre 1974 y 2019	93
Figura 24. Ejemplo de ganancia de cobertura forestal	95
Figura 25. Invernaderos y Reservorios de agua.....	97
Figura 26. Pérdidas y ganancias por categoría en hectáreas.	102
Figura 27. Grafica de caja para datos de NDVI	104
Figura 28. Firma espectral de bosque de coníferas al norte de Tenancingo.....	104

Índice de Mapas

Mapa 1. Localización del PERTMZ en el Estado de México.	33
Mapa 2. Altimetría	36
Mapa 3. Fisiografía.....	37
Mapa 4. Geología	39
Mapa 5. Edafología	42
Mapa 6. Climas.....	45
Mapa 7. Hidrología	47
Mapa 8. Uso de suelo.....	52
Mapa 9. Localidades por número de habitantes	56
Mapa 10. Uso de Suelo y Vegetación en 1974	80
Mapa 11. Uso de Suelo y Vegetación en 2019	85
Mapa 12. Sitios de verificación	91
Mapa 13. Tasa de Cambio Forestal 1974 al 2019.....	94
Mapa 14. Cambios de Uso de Suelo	98
Mapa 15. Índice de Vegetación Normalizada para 2019.....	105

RESUMEN

En las últimas décadas la cobertura forestal del Parque Ecológico y Recreativo de Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacán (PERTMZ) ha presentado transformaciones espacio-temporales derivado principalmente de las actividades antrópicas. La deforestación y en consecuencia los cambios de uso de suelo han sido ejemplo de dichas actividades que degradan ambientalmente el hábitat natural. Es el caso del Área Natural Protegida, en donde se han presentado cambios en la cobertura forestal. En este trabajo se realizó el análisis espacio-temporal de la pérdida de cobertura forestal y cambio de uso de suelo entre 1974 y 2019, para determinar, comparar y evidenciar los cambios en el uso de suelo que se han presentado. Además, de explicar la pérdida de cobertura forestal referente al bosque de coníferas y la selva baja caducifolia mediante fotointerpretación y técnicas de percepción remota útiles para la producción de los mapas de uso de suelo y vegetación, aplicando una metodología basada en: a) el proceso de clasificación supervisada por el método de Máxima Verosimilitud de imágenes de satélite Sentinel-2, b) la evaluación de la fiabilidad temática, c) el cálculo de indicadores y tasas de cambio a través de la sobreposición de ambos mapas y d) el cálculo del Índice de Vegetación Normalizada. Los resultados obtenidos mostraron que, para el periodo 1974 – 2019, las categorías de agricultura y selva baja caducifolia presentaron un decremento, puesto que se perdieron 7,518.04 ha y 2,497.31 ha, respectivamente. Por su parte, las categorías que obtuvieron mayores ganancias fueron urbano con 2,991.89 ha e invernadero con 1,440.84 ha. Además, se encontró que existe una relación en la actividad fotosintética y las zonas que presentan poca o nula vegetación vigorosa. El estudio tuvo una precisión de clasificación global del 85.5 % y un coeficiente de Kappa y Tau de 80.6 % y 82.4 %, respectivamente. Finalmente, la pérdida de cobertura forestal es producto de la extensión de la frontera agrícola, el pastizal inducido e incendios forestales.

Palabras clave: clasificación supervisada, deforestación, evaluación de precisión, fotointerpretación, NDVI, percepción remota y uso de suelo

INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como propósito aportar conocimiento sobre la dinámica espacio-temporal de la cobertura y uso de suelo desde el enfoque de las ciencias ambientales, mediante la temática del análisis de la pérdida de cobertura forestal y cambio de uso de suelo en el Parque Ecológico y Recreativo Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacán entre 1974 y 2019 en el Estado de México.

Este trabajo se estructura en cuatro capítulos, en primer lugar, se aborda la parte teórico-conceptual con el fin de aplicar el enfoque integrador de las ciencias ambientales desde la perspectiva del área de estudio vista como un sistema, en el cual interactúan los componentes bióticos y abióticos con otros subsistemas, su entorno (ambiente) y que la alteración en estas interacciones conlleva a un desequilibrio del sistema, por lo cual, la pérdida de cobertura forestal y el cambio de uso de suelo producto de las actividades humanas desarrolladas dentro de sus límites administrativos son consideradas causas de desequilibrio del sistema, así mismo, se presentan los principios conceptuales de la percepción remota como técnica de análisis ambiental.

En segundo lugar, se caracterizan las condiciones biofísicas y socioeconómicas actuales del área de estudio, a fin de identificar los elementos bióticos, abióticos y los aspectos relacionados con la dinámica demográfica y económica, además, de representarlos de forma cartográfica (mapas).

Posteriormente, se expone la estructura metodológica que permitió cumplir los objetivos establecidos detallando la recolección y el tratamiento de la información, que incluyen entre otros aspectos: los materiales y métodos de la investigación.

Finalmente, se presenta el análisis de los resultados obtenidos, siendo estos, mapas-gráficos de uso de suelo y cambios, matriz de transición, tasa anual de cambio e Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), además de las conclusiones y recomendaciones aportadas por el estudio.

Planteamiento del problema

Los bosques son el bioma terrestre dominante con una amplia distribución espacial principalmente en el Hemisferio Norte (Pan *et al.*, 2013). Sin embargo, se encuentran en un proceso de reducción a causa de la deforestación y el cambio de uso de suelo derivado de las actividades antrópicas lo que ha implicado la pérdida de cobertura forestal y la reducción en los servicios ambientales asociados (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

De acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), la cobertura forestal mundial se redujo 129 millones de hectáreas hasta quedar por debajo de los 4 millones de hectáreas entre 1990 y 2015, al tiempo que el proceso de deforestación ha sido producto principalmente de la agricultura (FAO, 2016).

En México, las tasas de deforestación indican una diferencia de 260,000 ha/año a 775,000 ha/año (Mas *et al.*, 2009). Dicho proceso de deforestación ha impactado de forma negativa la cubierta forestal, teniendo como consecuencia la pérdida de cobertura forestal, la disminución de los servicios ambientales y la pérdida de hábitat, además, se debe tener en cuenta que este proceso es producto de diversos factores multicausales directos e indirectos.

Challenger (1998) afirma que la deforestación es un proceso de impacto inmediato en el cambio de cobertura y uso de suelo de donde resulta, la fragmentación y desequilibrio ecológico del bioma. De modo que conlleva al deterioro ambiental y la disminución en los servicios ambientales proporcionados por los bosques en diversas áreas del país.

El cambio de cobertura y uso de suelo ha sido producto de la pérdida de cobertura forestal a causa del proceso de deforestación. En consecuencia, se han establecido medidas para el deterioro ambiental como son las áreas naturales protegidas cuyo propósito es el de preservar y/o restaurar aquellas zonas en donde los ambientes originales han sido alterados por las actividades antrópicas.

En el Estado de México las áreas naturales protegidas se han establecido para la protección, preservación y conservación de los ambientes naturales representativos

tales como los bosques del sur y este de la entidad. No obstante, en algunos casos como en el Parque Ecológico y Recreativo de Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacan, las actividades antrópicas han ejercido presión ambiental *in situ*, lo que ha ocasionado una pérdida de cobertura forestal y cambios significativos en el uso de suelo.

Justificación

El Parque Ecológico y Recreativo de Tenancingo – Malinalco y Zumpahuacan (ahora en adelante PERTMZ) se caracteriza por ser una de las 97 áreas naturales protegidas del Estado de México, así mismo por su riqueza natural de las zonas montañosas del sur y de proporcionar beneficios intangibles denominados servicios ambientales; en particular, los relacionados con la biodiversidad, recursos hídricos y la protección de suelos.

Por lo cual, es importante analizar la pérdida de cobertura forestal y el cambio de uso de suelo que se ha presentado en el área natural protegida durante el periodo comprendido de 1974 al 2019, considerando el enfoque interdisciplinario e integrador de las ciencias ambientales con el propósito de comprender las causas e impactos derivados del uso y aprovechamiento inadecuado del recurso biótico forestal.

Dicho lo anterior, se considera que la pérdida de cobertura forestal a causa de diversos factores, representa una alteración al funcionamiento del bosque en cuanto a su potencial como fuente de servicios ambientales previamente mencionados. Además, de conllevar al cambio de uso de suelo, sobre todo, para el desarrollo de actividades agropecuarias.

De ahí que el presente estudio tiene el propósito de analizar la pérdida de cobertura forestal, así como las causas del cambio de uso de suelo en el Parque Ecológico y Recreativo de Tenancingo – Malinalco y Zumpahuacan; aplicando técnicas de percepción remota como lo son: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), tasa de cambio y matriz de transición de categorías, para el análisis espacio-temporal de la pérdida de cobertura forestal y cambio de uso de suelo; que a su vez

permitirá localizar aquellas zonas prioritarias de atender, esto mediante la representación cartográfica.

Hipótesis

La extensión de las actividades agropecuarias, el crecimiento urbano, así como, el auge de invernaderos son factores determinantes en el incremento de la pérdida de cobertura forestal y en consecuencia el cambio de uso de suelo en el Parque Ecológico y Recreativo Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacán, conllevando a la degradación ambiental del área natural protegida.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la pérdida de cobertura forestal y los cambios de uso de suelo en el Parque Ecológico y Recreativo de Tenancingo – Malinalco y Zumpahuacán; mediante la aplicación de técnicas de percepción remota, durante el periodo comprendido de 1974 al 2019.

Objetivos específicos

- a) Caracterizar las condiciones biofísicas y socioeconómicas actuales del Parque Ecológico Recreativo Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacán.
- b) Determinar cuáles han sido los cambios del uso del suelo en el parque Ecológico Recreativo Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacán, durante el periodo 1974 al 2019.
- c) Validar el mapa de uso de suelo y vegetación del año 2019 para conocer su grado de fiabilidad temática.
- d) Analizar las zonas con mayor pérdida de cobertura forestal y dinámica de cambios de uso de suelo mediante tasas de cambio.
- e) Representar cartográficamente la pérdida de cobertura forestal y los cambios de uso de suelo de 1974 y 2019.

Antecedentes

Actualmente los trabajos relacionados con el proceso de deforestación y cambio de uso de suelo se han enfocado en aspectos ambientales y geográficos mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG). De ahí que, en las últimas dos décadas se han realizado estudios de investigación con la temática de cambio de cobertura y uso de suelo en diversas zonas a nivel internacional y nacional que presentan algún grado de deterioro ambiental.

Por citar algunos estudios a nivel internacional se encuentran (Yousuf *et al.*, 2019) en su artículo *Spatio-Temporal Patterns of Land Use/Land Cover Change in the Heterogeneous Coastal Region of Bangladesh between 1990 and 2017*, en donde se presenta un análisis del cambio de cobertura y uso de suelo aplicado a la región costera de Bangladesh, con el propósito de mostrar la heterogeneidad del paisaje y los patrones de cambio.

Por otra parte, en México entre los principales estudios se encuentran Pineda *et al.*, (2009) en su trabajo de *Análisis de cambio de uso de suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación* en donde describe el cambio de uso de suelo mediante el empleo de mapas de vegetación y uso de suelo, aplicando modelos de regresión lineal múltiple y logística para identificar las posibles causas que provocan la deforestación.

Por su parte, Camacho *et al.*, (2015) en su artículo *Cambios de cobertura/uso de suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña*, se hace un análisis de cambio de uso de suelo mediante la interpretación de imágenes de satélite Landsat TM y la aplicación del método de Máxima Verosimilitud para evaluar su confiabilidad y con ello generar una matriz de transición para identificar los cambios ocurridos durante el periodo de análisis.

Posteriormente, López *et al.*, (2015), exponen el *Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano*, en él se analizan los cambios de uso de suelo presentados haciendo énfasis en las

implicaciones socioeconómicas que representa, aplicando la clasificación supervisada como técnica de percepción remota y la ecuación propuesta por la FAO para tasas anuales de cambio por cobertura, obteniendo como resultados la representación cartográfica de la dinámica espacio-temporal del fenómeno de estudio.

Además, Leija *et al.*, (2016) presentan en *Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la region costera del estado de Oaxaca, México*, un analisis de cambio de cubierta vegetal pero presentando escenarios futuros para el año 2025 mediante modelacion espacial utilizando como herramienta el software Dinamica ego, obteniendo proyecciones de cambios significativas.

Mientras tanto, España y Champo (2016), en *Proceso de deforestacion en el municipio de Cherán Michoacán, México (2006-2012)*, se analizo el proceso de deforestación que conlleva al levantamiento armado de la población purépecha en respuesta a la tala ilegal de sus bosques, mediante la cuantificación de la deforestación con el fin de proporcionar informacion objetiva del fenomeno.

Por otra parte, Avalos *et al.*, (2018) en su artículo *Analysis of the Land Use and Cover Changes in the Metropolitan Areas of Tepic-Xalisco (1973-2015) through Landsat Images*, expone al cambio de uso de suelo como la principal causa en la pérdida de biodiversidad, deforestación y servicios ambientales, enfatizando en el uso de suelo urbano como principal factor de cambio, por lo cual, se emplean imágenes de satélite Landsat; para con ello generar matriz de cambios y su respectiva cartografía para el periodo de estudio.

Finalmente, un estudio a nivel local en el Estado de México es de García *et al.*, (2012) en *Procesos de Cambio en el Uso de Suelo de una Microcuenca en el Altiplano Mexicano. El caso del Río San José en el Estado de México*, se presenta el cambio de uso de suelo a escala local mediante el uso de cartas topograficas, ortofotos e imagenes de satelite SPOT 5, obteniendo como resultado la representacion cartografica del cambio de uso de suelo identificando como principal factor de cambio el crecimiento demografico.

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

En el presente capítulo se consideró importante revisar los conceptos de sistema, ecosistema y sistema forestal para relacionar los elementos de la Teoría General de Sistemas (TGS) con el área natural protegida del Parque Ecológico y Recreativo de Tenancingo – Malinalco y Zumpahuacan vista como un sistema natural y de esta forma, analizar el problema de la pérdida de cobertura forestal y en consecuencia el cambio de uso de suelo que conllevan a su degradación ambiental.

En primer lugar, se revisan los conceptos de sistema, ecosistema y sistema forestal, a fin de, integrar los elementos de la Teoría General de Sistemas y comprender la dinámica *espacio-temporal* del Parque Ecológico y Recreativo de Tenancingo – Malinalco y Zumpahuacan (PERTMZ) desde el enfoque sistémico.

En segundo lugar, se contextualiza al área natural protegida como estrategia de preservación de ambientes naturales, restauración y aprovechamiento sustentable de recursos naturales, su categorización y la legislación ambiental correspondiente que permite y regula la realización de actividades antrópicas *in situ*.

Finalmente, se describen los principios físicos de la percepción remota, así como las características de las imágenes de satélite Sentinel-2, como herramienta de análisis de la pérdida de cobertura forestal y cambios de uso de suelo.

1.1. Concepto de Sistema

Etimológicamente la palabra sistema proviene de la raíz latina *systema*, a su vez del griego *synistanai* que significa *reunir, juntar, colocar juntos*. Sterling y Villanueva (2011), definen al sistema como una agrupación ordenada de componentes independientes unidos según el plan para lograr un objetivo específico.

De manera semejante, Johansen (1993), argumenta que un sistema es un grupo de elementos interrelacionados o interactivos que forman un todo unificado y que presenta subsistemas.

Actualmente, el concepto de sistema hace referencia a cualquier conjunto de componentes ordenados e interrelacionados y sus atributos, unidos por flujos de energía y materia, a diferencia del entorno circundante fuera del sistema, además, puede comprender cualquier número de subsistemas (Christopherson y Birkeland, 2015).

Se puede señalar que un sistema debe cumplir un propósito con base en la integración de un conjunto de elementos que se encuentran en un estado de interacción e interdependencia, presentando características propias y, por lo cual, se pueden distinguir varios tipos.

Dicho lo anterior, Valverde *et al.* (2005) afirman que los sistemas con base al grado de relación [*intercambio*] con el entorno [*ambiente*] pueden ser abiertos o cerrados.

- Sistemas abiertos: existe un constante intercambio de materia y energía con su entorno (ambiente).
- Sistemas cerrados: no existe intercambio de materia y energía con su entorno (ambiente).

1.1.1. *Ecosistema*

En 1935 el ecólogo inglés Arthur G. Tansley, acuñó el concepto de ecosistema o sistema ecológico, para definir el complejo de organismos junto con factores físicos de su ambiente, en un lugar determinado y con ello comprender y describir las complejas interacciones entre recursos bióticos y abióticos (Tansley, 1935).

Más tarde, en 1971 el ecólogo americano Odum definió la palabra - ecosistema como cualquier unidad que incluya todos los organismos de un área dada, interactuando con el ambiente físico; de forma que el flujo de energía lleva a definir estructuras tróficas, diversidad biótica y ciclos de materiales dentro del sistema (Odum, 1971).

Posteriormente, CBD (2004) lo define como un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y microorganismos, y su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional, y en el que el hombre se considera como parte integral.

Actualmente, el ecosistema se conceptualiza como el espacio determinado en el que se establecen relaciones entre los recursos bióticos y los recursos abióticos del medio donde viven, existiendo un intercambio de materia y energía (Fernández, 2017).

En este contexto, el ecosistema implica una variedad de interacciones entre diversas comunidades bióticas con su medio físico, además de presentar flujos de materia y energía tal y como lo establece el sistema. De ahí que, no existe sistema sin ecosistema debido a que este último forma parte de un sistema más general y complejo que algunos autores denominan paisaje (en inglés: *Landscape*).

1.2. Teoría General de Sistemas

La presente investigación se sustenta en los principios establecidos por la denominada Teoría¹ General de Sistemas (TGS), la cual se considera como un aporte teórico al conocimiento científico ya que permite la explicación de fenómenos que se presentan en la realidad como un todo (*sistema*) y con base en los aportes de sus principales exponentes, tal como se muestra en la Figura 2.

Uno de los primeros aportes a la Teoría General de Sistemas fue el enfoque del sudafricano Jan C. Smuts en 1926, denominado holismo, es decir, “*la práctica del todo*”. De donde resulta que, éste permite comprender los fenómenos desde el punto de vista de múltiples interacciones con un enfoque integrador, para entender las causas de los procesos. Hay que subrayar que el holismo hace hincapié en que los seres humanos se encuentran inmersos en sistemas naturales y la vida humana depende de la naturaleza para la supervivencia (Briceño *et al.* 2010).

¹... es una explicación científicamente aceptable y bien fundamentada de algún aspecto del mundo natural (Bordens, K. y Abbott, B., 2018).

Por su parte, en 1939 el geógrafo alemán Carl Troll introduce el concepto de ecología del paisaje² (en inglés: *Landscape Ecology*), [cuatro años posterior al establecimiento del concepto de *ecosistema* propuesto por Tansley en 1935], para entender la manera en que las actividades humanas modifican los elementos que conforman el paisaje, considerando la escala espacio-temporal (Gurrutxaga y Lozano, 2008). De modo que, el problema del proceso de deforestación y cambio de uso de suelo, resultado de las actividades humanas alteran la estructura espacial del paisaje mediante el proceso de fragmentación del hábitat natural como se muestra en la Figura 1.

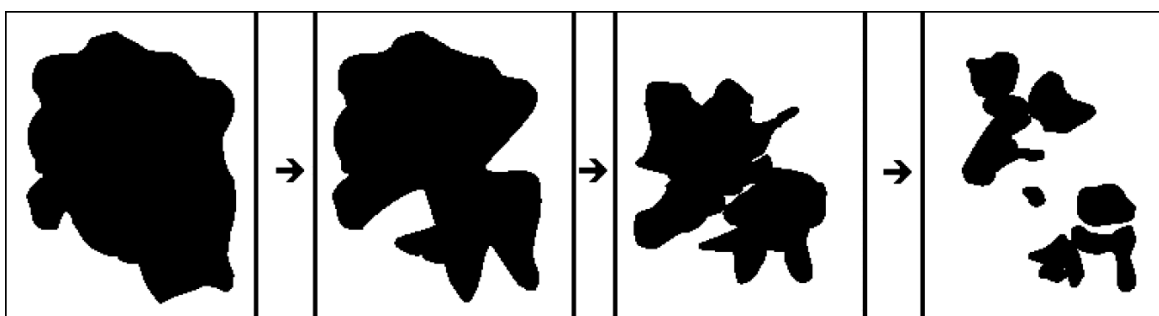


Figura 1. Proceso de fragmentación del hábitat natural.

Fuente: Retomado de Gurrutxaga y Lozano, 2008 y adaptado de Bennett, 1999.

La ecología del paisaje considera al territorio como un tejido vivo, en el que los diferentes componentes, físicos y biológicos se encuentran relacionados y conectados mediante procesos de interacción; lo que es lo mismo un sistema conformado por elementos bióticos y abióticos que se encuentran interrelacionados y es alterado por las actividades humanas.

Posteriormente, en la década de 1940 el biólogo austriaco Ludwig V. Bertalanffy propone el modelo denominado Teoría General de Sistemas, la cual debería constituirse como un mecanismo de integración entre las ciencias naturales y sociales³ que permita la representación de la realidad y una forma de trabajo interdisciplinario (Bertalanffy, 1986).

² Ciencia que estudia la relación entre el patrón espacial y los procesos ecológicos a través de niveles jerárquicos de organización biológica y a diferentes escalas en el espacio y el tiempo (Molles, 2016).

³ Por mencionar el ejemplo de la dimensión interdisciplinaria de las Ciencias Ambientales

Hay que mencionar, además, que la Teoría General de Sistemas se caracteriza por retomar lo propuesto por Smuts sobre holística e integración, es decir, ver la realidad en su conjunto (*totalidad*) para apreciar sus interacciones y entender cómo se representa está bajo la premisa de la existencia de sistemas y de cómo se relaciona el sistema con el entorno (*ambiente*).

La Teoría General de Sistemas postula las ideas centrales de que el todo (*sistema*) es más que la suma de las partes, los fenómenos deben ser contemplados desde una perspectiva dinámica espacio-temporal y las partes (*elementos*) del sistema no pueden comprenderse si se consideran en forma aislada debido a que se encuentran interrelacionadas.

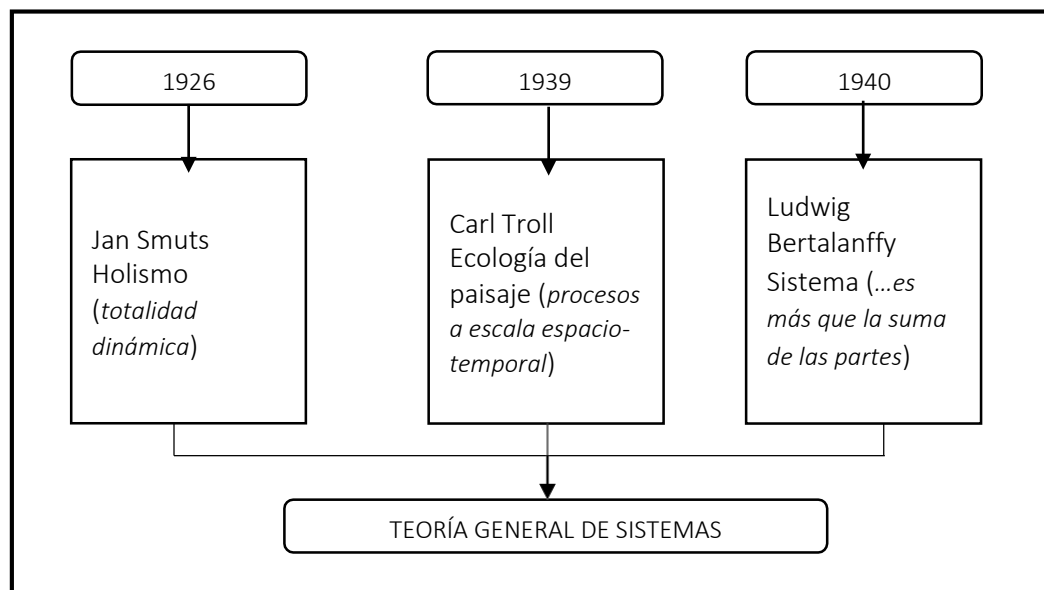


Figura 2. Principales exponentes de la TGS.

Fuente: Elaboración propia con base en Gurrutxaga, 2008 y Bertalanffy, 1986.

Es importante resaltar el objeto de estudio de las ciencias ambientales con enfoque integrador e interdisciplinario⁴ que permite comprender cómo funcionan los sistemas naturales y como las actividades humanas influyen en ellos. En el caso del PERTMZ, éste se representa como un sistema abierto, el cual mantiene complejas interacciones entre sus elementos como se muestra en la Figura 2.

⁴ Debido a que se consolida y sintetiza el conocimiento especializado de varias disciplinas.

1.2.1. Elementos del sistema

La Teoría General de Sistemas menciona que un sistema está conformado por varios elementos. Por consiguiente, estos elementos se encuentran interrelacionados con el propósito de cumplir varios objetivos y mantener el equilibrio general del sistema y evitar lo contrario, es decir, el desequilibrio.

Dicho lo anterior entre los principales elementos que integran un sistema son los que se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Elementos de un sistema

Elementos	Descripción
Ambiente	Condiciones que influyen sobre el comportamiento de un sistema
Complejidad	Cantidad de elementos de un sistema y sus potenciales interacciones
Elemento	Parte o componente que se halla en un sistema
Energía	Entradas al sistema o resultados de procesos en un sistema
Entradas	Un sistema a partir de ciertas condiciones iniciales y por distintos caminos llega a un mismo estado final
Equilibrio	Para lograr el equilibrio del sistema se requiere de la importación de recursos provenientes del ambiente.
Frontera	Es aquella línea que separa al sistema de su entorno (ambiente) y que define lo que le pertenece
Homeostasis	Nivel de respuesta y de adaptación al contexto
Morfogénesis	Procesos que apuntan al desarrollo, crecimiento o cambio en la forma, estructura y estado del sistema
Proceso	Transformación de una entrada en una salida
Relación	Enlaces que vinculan entre sí a los subsistemas que componen el sistema
Salidas	Resultados que se obtienen de procesar las entradas
Sinergia	Interacciones entre los componentes de un sistema
Subsistema	Conjunto de elementos y relaciones que responden a un sistema mayor
Viabilidad	Capacidad de adaptación de un sistema a un medio en cambio

Fuente: Elaboración y adaptación propia con base en Arnold y Osorio, 1998.

1.2.2. Aplicación de la TGS al PERTMZ

Por lo que se refiere al ambiente, difícilmente se pueden encontrar en él elementos totalmente aislados. Dado que cada uno de estos elementos que lo conforman se encuentran en constante relación con otros.

De manera que la teoría general de sistemas permite tener un modelo integral del área de estudio considerándola como un sistema abierto conformado por elementos que se interrelacionan entre si y que intercambian materia y energía. Para comprender mejor el funcionamiento del PERTMZ como un sistema, se ejemplifica mediante un modelo gráfico de análisis aplicado al área de estudio como se representa en la Figura 3.

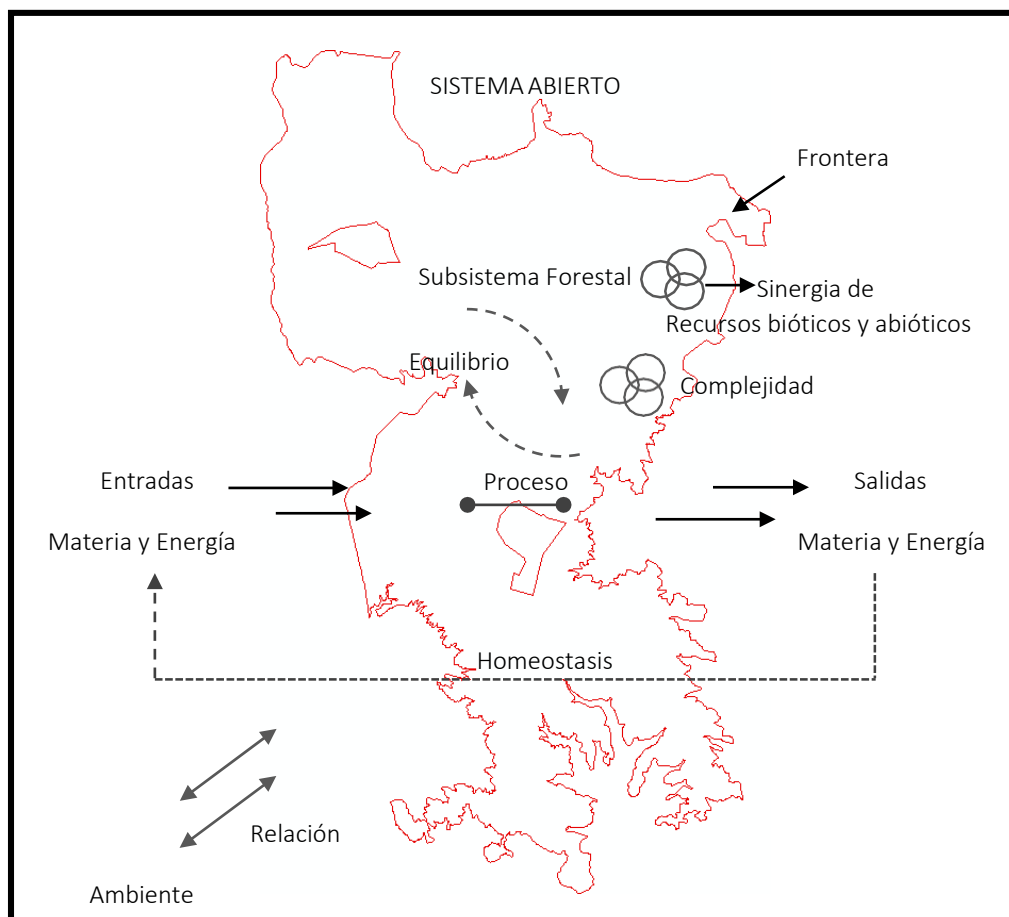


Figura 3. Modelo gráfico del PERTMZ como sistema.

Fuente: Elaboración propia.

1.2.3. Pérdida de cobertura forestal y deforestación

Las actividades antrópicas han causado diversos impactos significativos en los biomas terrestres. En el caso de los bosques templados, la pérdida de cobertura arbórea como consecuencia de diversos factores entre ellos la deforestación ha sido una de las principales causas de la degradación forestal⁵.

La FAO (2018), define la deforestación como la transformación de la cobertura del bosque a otro uso de suelo o la reducción permanente de la cobertura del dosel forestal por debajo del umbral mínimo del 10 por ciento. Conviene subrayar que la FAO considera como superficie mínima de cobertura forestal 1 hectárea (ha).

Por otra parte en México, la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable define a la deforestación como “la pérdida de vegetación forestal en forma permanente, por causas inducidas o naturales” (LGDFS, 2018). Hay que subrayar que ambas definiciones coinciden con la pérdida *permanente* de la cobertura forestal, a la cual se debe añadir que se presenta en un espacio y transcurso de tiempo determinado.

Por lo cual, la deforestación es debida a diversas causas que pueden ser directas e indirectas como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Causas directas e indirectas de la deforestación

Causas directas	Causas indirectas
Agricultura de subsistencia	Crecimiento demográfico
Desarrollo de infraestructura	Pobreza
Asentamientos humanos	Gobernanza e instituciones
Expansión urbana	Inadecuada coordinación intersectorial
Cambio en el uso de suelo	Inadecuada planeación ambiental

Fuente: Recuperado de Molles, 2016.

Hay que mencionar que de las causas previamente mencionadas también existen otras las cuales son: la extracción legal e ilegal de recursos maderables, minería, incendios forestales y actividades turísticas, que igualmente conllevan a la pérdida de

⁵ Entiéndase como la reducción de la capacidad de un bosque para proveer de bienes y servicios.

la cobertura forestal. No obstante, esta última dependerá de la frecuencia en que se presenten las causas y del grado la presión ambiental ejercida sobre el sistema forestal. De ahí que, un factor de presión ambiental determinante en su alteración sea el cambio de cobertura y uso de suelo.

Dicho lo anterior, el cambio de cobertura⁶ y uso de suelo⁷ (fuertemente vinculados) implican cambios cuantitativos en el patrón de uso de suelo en una extensión de superficie de un tipo determinado de cobertura o uso de suelo, respectivamente (Verburg *et al.*, 2009). Así mismo, supone cambios en la intensidad de uso o alteración de sus cualidades, conllevando a problemas ambientales como la pérdida de biodiversidad a escala local, regional e internacional; el proceso de cambio de cobertura y uso de suelo se representa en el modelo de la Figura 4.

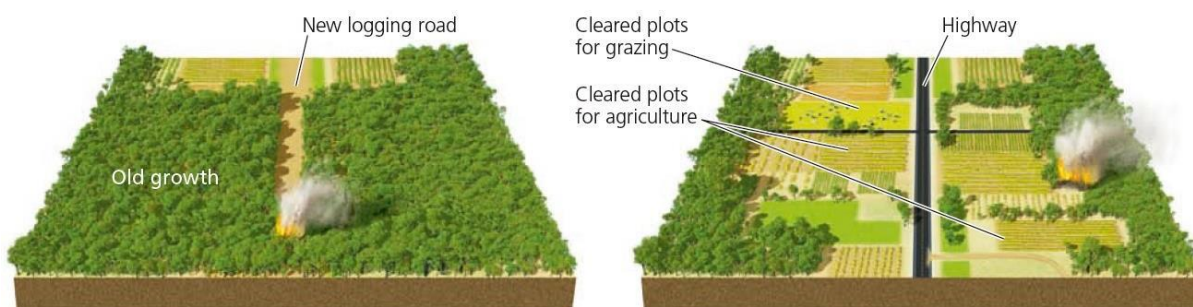


Figura 4. Proceso de degradación y cambio de uso de suelo en un sistema forestal.

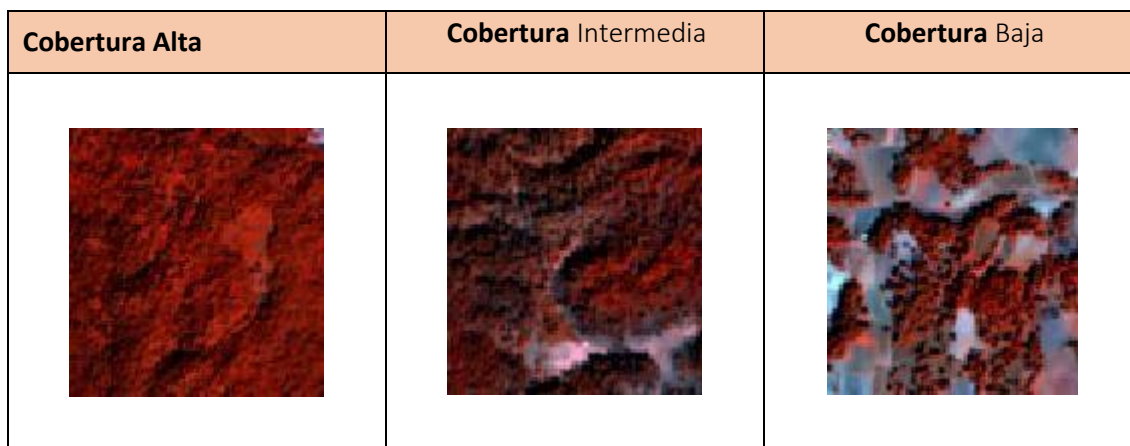
Fuente: Retomado de Enger y Smith, 2016

De manera que, el proceso de cambio de cobertura y uso de suelo comienza con la deforestación y fragmentación del sistema forestal, posteriormente se construyen vías de comunicación y se establecen parcelas destinadas para pastizal y/o agricultura; dejando al sistema forestal fragmentado en parches, simultáneamente el proceso de cambio de uso de suelo también puede ser debido a la pérdida gradual de cobertura forestal por deforestación como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Pérdida gradual de cobertura forestal

⁶ Cobertura de suelo refiere a las características físicas de la superficie del suelo, por ejemplo: la vegetación.

⁷ Uso de suelo refiere a los propósitos por los cuales los humanos explotan la cobertura de suelo.



Fuente: Elaboración propia con base en imágenes de satélite Sentinel -2.

Como resultado del proceso de cambio de cobertura y uso de suelo, además de la pérdida gradual de cobertura arbórea, el sistema forestal va reduciendo su capacidad para suministrar servicios ambientales.

Se pueden distinguir cuatro tipos de servicios ambientales proporcionados directa o indirectamente por el sistema forestal: de aprovisionamiento, regulación, culturales y de apoyo los cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Servicios ambientales proporcionados por un sistema forestal

Aprovisionamiento	Regulación	Culturales	De apoyo
Madera	Captura de carbono	Patrimonio cultural	Formación de
Fibras	Regulación del clima,	Identidad	suelos Fotosíntesis
Agua	La fertilidad o erosión	Educación	Ciclos
Biodiversidad	del suelo	Recreación	biogeoquímicos
	Calidad del aire	Ecoturismo	Ciclo hidrológico
	Polinización	Estética	

Fuente: Adaptación con base en Ball (2001).

1.3. Área Natural Protegida

Con respecto a las Áreas Naturales Protegidas (ANP), estas se han establecido principalmente con el propósito de conservar la biodiversidad de un área determinada.

Para el presente estudio es importante comprender con claridad el concepto de un ANP y su clasificación en México.

1.3.1. Concepto de Área Natural Protegida (ANP)

De acuerdo con UNEP-WCMC y IUCN (2016), un área natural protegida es un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y administrado, a través de medios legales u otros medios efectivos, para lograr la conservación a largo plazo de la naturaleza con los servicios asociados y los valores culturales.

De manera semejante Reece *et al.* (2013), exponen que es un espacio definido con el propósito de conservar la biodiversidad. Así, por ejemplo, existen diversas ANP a nivel internacional de tipo acuático y terrestre, con medios legales para su jurisdicción y con un patrimonio natural e incluso cultural que proteger.

En México, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), define a las ANP como áreas en las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas (LGEEPA, 1988).

Por consiguiente, las áreas naturales protegidas permiten aplicar estrategias de conservación, preservación, protección y restauración de ambientes que no han sido altamente alterados por las actividades humanas.

1.3.2. Categorías de ANP en México

Las áreas naturales protegidas como se les conoce en México, han surgido desde finales del siglo XIX como instrumento de política ambiental enfocado a la conservación de la biodiversidad.

Dicho lo anterior, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en su última reforma en el DOF de junio de 2018, establece 6 categorías de áreas naturales protegidas, las cuales se describen en la Tabla 5.

Tabla 5. Categorías de Áreas Naturales en México

Categoría	Descripción
Reservas de la biósfera	Constituyen áreas relevantes, representativas de uno o más biomas no alterados significativamente por las actividades humanas o que requieran ser preservados o restaurados, en los cuales habiten especies representativas de la biodiversidad, incluyendo a las consideradas endémicas, amenazadas o en peligro de extinción.
Parques nacionales	Constituyen áreas representativas de uno o más biomas por su belleza escénica, su valor científico, educativo, de recreo, histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo o bien por otras razones análogas de interés general.
Monumentos naturales	Áreas que contengan uno o varios elementos naturales, consistentes en lugares u objetos naturales, que, por sus carácter único o excepcional, interés estético, valor histórico o científico, se resuelva incorporar a un régimen de protección absoluta.
Áreas de protección de recursos naturales	Áreas destinadas a la protección y conservación del suelo, cuencas hidrográficas, aguas y en general los recursos naturales localizados en terrenos forestales de aptitud preferentemente forestal.
Áreas de protección de flora y fauna	Áreas que contienen el hábitat de cuyo equilibrio y preservación dependen la existencia, transformación y desarrollo de las especies de flora y fauna silvestre.
Santuarios	Áreas que se establecen en zonas caracterizadas por una considerable riqueza de flora y fauna, o por la presencia de especies, subespecies o hábitat de distribución restringida.

Fuente: Título Segundo *Biodiversidad*, Capítulo I. ANP, Secc. II; LGEEPA, 1988.

Por lo anterior, el Parque Nacional Desierto del Carmen decretado en 1942, se localiza dentro del polígono del PERTMZ, de ahí que está última presente una primera extracción en el límite político-administrativo hacia el sur en el municipio de Tenancingo.

Ahora bien, a nivel estatal el Código para la Biodiversidad del estado de México en su Título Tercero establece aquellas áreas prioritarias de preservación, protección, conservación y restauración, en donde, los ambientes naturales no hayan sido

atareados por las actividades humanas, estableciendo entre sus categorías la de parques estatales. De donde resulta el establecimiento del PERTMZ y el Parque Hermenegildo Galeana (Cámara de Diputados del Honorable Congreso del Estado de México, 2005).

En consecuencia, el Parque Estatal Ecológico, Recreativo y Turístico denominado Hermenegildo Galeana también genera una segunda extracción en el polígono político-administrativa del PERTMZ al norte en el municipio de Tenancingo. En suma, el área de estudio presenta dos extracciones en el polígono debido al decreto previo del Desierto del Carmen y el Parque Ecológico, Recreativo y Turístico denominado Hermenegildo Galeana en 1942 y 1980, respectivamente (Mapa 1).

1.4. Percepción remota

1.4.1. *Concepto de Percepción Remota*

La percepción remota, forma parte de las geotecnologías y actualmente se emplean para realizar análisis de diversas temáticas, entre las que destaca lo relacionado con el ambiente.

La percepción remota, es el registro sin contacto de la información de las regiones ultravioleta, visible, infrarroja y de microondas del espectro electromagnético, por medio de instrumentos como cámaras, escáneres, láseres, matrices lineales y/o matrices de área, ubicadas en plataformas como aviones o plataformas satelitales, y el análisis de la información adquirida mediante el procesamiento visual y digital de imágenes (Jensen, 2007).

Por su parte, Weng (2010), define a la percepción remota a las actividades de grabación, observación y percepción de eventos u objetos en lugares lejanos; empleando sensores a bordo de plataformas aéreas o espaciales.

En las últimas cuatro décadas el uso de sensores en plataformas satelitales ha revolucionado el estudio de la dinámica espacio-temporal de la cobertura y uso de

suelo. Además, ha evidenciado el efecto negativo que tienen las actividades humanas sobre el ambiente.

En este contexto, la percepción remota coadyuva a comprender los procesos espaciales y los problemas que generan un desequilibrio en el ambiente entre los que destacan la deforestación, fragmentación del hábitat y el cambio de uso de suelo, entre otros.

Actualmente, en estos temas la percepción remota se aplica principalmente para monitorear los cambios y la dinámica de cobertura y uso de suelo, además, de los impactos ambientales que conllevan

1.4.2. Principios físicos de la percepción remota

De acuerdo con Walker (2018), la radiación electromagnética es una forma de energía con las propiedades de una onda, y su fuente principal es el sol. La energía solar que viaja en forma de onda se conoce como espectro electromagnético. Las ondas se propagan a través del tiempo y del espacio y pueden caracterizarse por dos medidas principales: longitud de onda (distancia entre las crestas) y frecuencia (número de oscilaciones completadas por segundo) como se representa en la Figura 5.

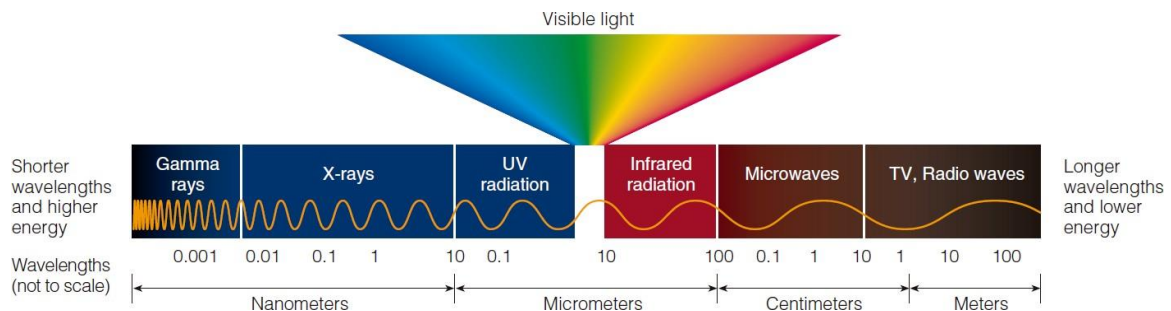


Figura 5. Espectro electromagnético.

Fuente: Retomado de Walker, 2018.

Como se muestra en la imagen, el espectro electromagnético presenta divisiones que van desde ondas de onda corta y alta frecuencia hasta ondas de onda larga de baja

frecuencia, siendo estas: rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta (UV), luz visible, radiación infrarroja (IR), radiación de microondas y ondas de radio.

1.4.3. Sistema de percepción remota

Por lo que se refiere al sistema de percepción remota, estos pueden ser de dos tipos: activo y pasivo. Hay que subrayar que para fines de este trabajo se hace hincapié en el sistema de percepción remota pasivo, el cual registra la radiación reflejada por la superficie terrestre en un sensor, por ejemplo, Sentinel-2.

El sensor Sentinel-2 forma parte del programa espacial Copernicus de la European Space Agency (ESA), el cual entre sus principales aplicaciones destaca cartografiar el estado y los cambios de cobertura y uso de suelo. Se debe agregar que la recopilación adecuada de datos por parte del sistema sensor presenta cuatro características importantes las cuales se describen en la Tabla 6:

Tabla 6. Tipos de resolución de un sensor

Resolución	Descripción
Espacial	Se refiere al nivel de detalle espacial que se puede observar de la superficie terrestre
Espectral	Se refiere al número y tamaño de las bandas que puede grabar.
Radiométrica	Se refiere a la sensibilidad de un sensor a la radiación entrante, es decir, cuanto cambio de radiación debe haber en el sensor antes de que ocurra un cambio en el valor de brillo registrado
Temporal	Se refiere a la cantidad de tiempo que le toma a un sensor regresar a una ubicación previamente fotografiada.

Fuente: Elaboración con base en Jensen, 2016.

Conclusiones preliminares

En este capítulo se conceptualizaron los términos relacionados con el trabajo de investigación, siendo estos: el sistema, deforestación, área natural protegida y la percepción remota con el propósito de conocer la importancia de su aplicación en el área de estudio, haciendo especial énfasis en la diferenciación de los conceptos de ecosistema y sistema forestal, con el fin de aplicar el enfoque interdisciplinario de las ciencias ambientales sobre cómo funciona el sistema natural (bosque) y cómo las actividades humanas *in situ* han influido en su deterioro ambiental.

Por otra parte, se explicó la Teoría General de Sistemas (TGS) desarrollada por Smuts, Troll y Bertalanffy como aporte teórico para el análisis del área de estudio vista como un sistema abierto y caracterizada por presentar elementos bióticos y abióticos, los cuales se relacionan entre sí.

Finalmente, se conceptualizó la percepción remota y su importancia como técnica de análisis espacial para el monitoreo del cambio de cobertura y uso de suelo, así mismo, los principios físicos que la rigen y los cuatro tipos de resolución fundamentales para realizar el trabajo de investigación

CAPITULO II. MARCO DE REFERENCIA

El propósito de este capítulo consiste en presentar el contexto biofísico y socioeconómico del Parque Ecológico y Recreativo Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacán (PERTMZ), en donde, se identifican las principales características físicas, biológicas, sociales y económicas actuales del área de estudio.

2.1. Contexto biofísico del área de estudio

2.1.1. Localización

El Parque Ecológico y Recreativo Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacán (PERTMZ) es una de las 97 áreas naturales protegidas del Estado de México⁸, se encuentra localizado en la parte sureste del estado entre las siguientes coordenadas extremas: 18° 46' 58.4" y 19° 04' 56.3" latitud norte y 99° 27' 42.1" y 99° 39' 9.8" longitud oeste; con una superficie total de 33,047.12⁹ hectáreas (ha) equivalente al 1.5% de la superficie del estado: abarcando parte del territorio de siete municipios, siendo estos: Tenango del Valle, Villa Guerrero, Tenancingo, Joquicingo, Ocuilan, Malinalco y Zumpahuacán (Tabla 7).

Tabla 7. Municipios por superficie del PERTMZ.

Municipio	Superficie (ha)	%
Joquicingo	983.57	3.0
Malinalco	7,224.23	21.9
Ocuilan	292.88	0.9
Tenancingo	14,283.57	43.2
Tenango del Valle	4,160.35	12.6
Villa Guerrero	598.96	1.8
Zumpahuacán	5,503.56	16.7
Total	33,047.12	100.0

Fuente: Elaboración propia.

⁸ Al 2018 según la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF)

⁹ Para fines prácticos del presente trabajo se consideró la superficie obtenida en el software QGIS.

Comprende un rango altitudinal de entre 1,774 y 2,980 m.s.n.m. Dentro del polígono se encuentran dos áreas naturales protegidas a cargo de la comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF): el Parque Estatal Ecológico, Recreativo y Turístico denominado Hermenegildo Galeana de categoría estatal y el Parque Nacional Desierto del Carmen de categoría nacional con una superficie de 340.37 ha y 529 ha respectivamente, ambas ubicadas en el municipio de Tenancingo (Mapa 1). Es importante resaltar que para fines de este trabajo no fueron integradas en el análisis estas áreas naturales protegidas, debido a que el objeto de estudio es el PERTMZ.

Como se muestra en la Figura 6, el PERTMZ representa el 97 % del total del polígono, seguido del Desierto del Carmen con el 2 % y finalmente el Parque Hermenegildo Galeana con el 1 % del total de la superficie del polígono. El PERTMZ ha sido la última ANP decretada en la zona sur del Estado de México, cuyo decreto se estableció en el mes de julio de 1981.

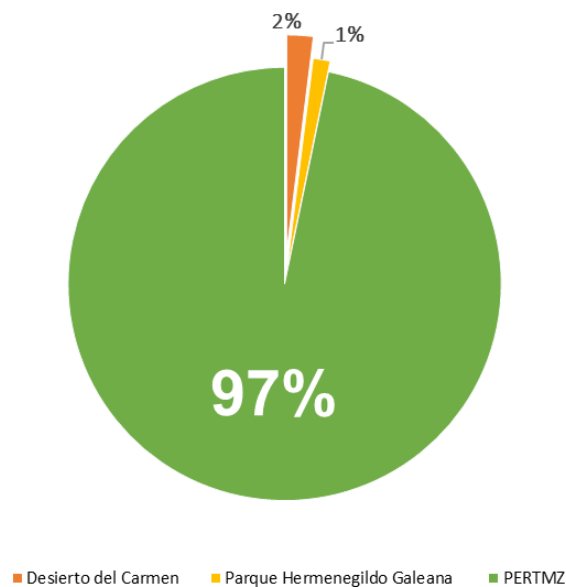
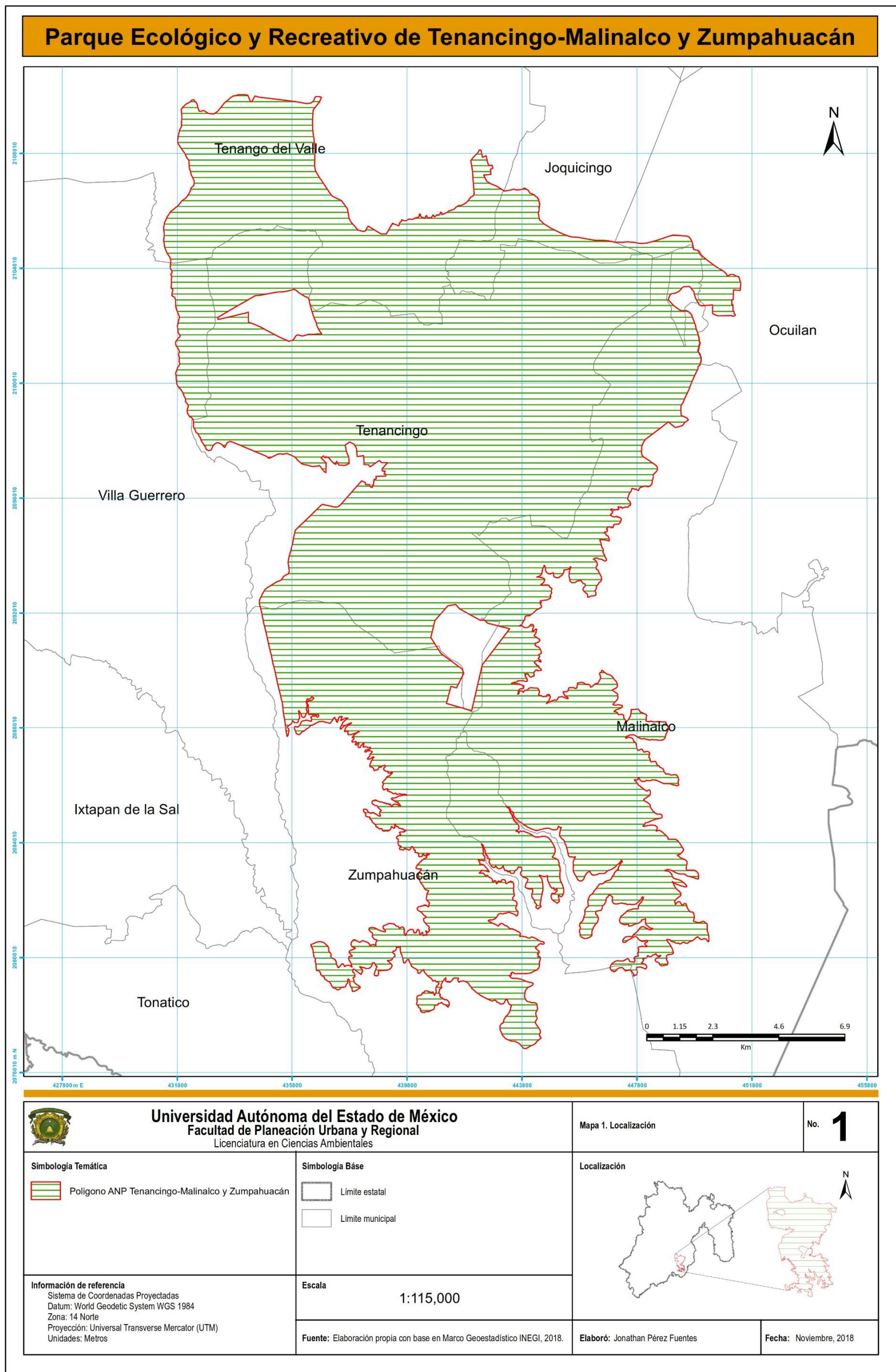


Figura 6. Superficie total del PERTMZ.

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 1. Localización del PERTMZ en el Estado de México.



Fuente: Elaboración propia.

2.1.2. Fisiografía

El PERTMZ se encuentra ubicado entre dos provincias fisiográficas: al norte como parte del Eje Neovolcánico y al sur en la Sierra Madre del Sur; y dentro de las subprovincias fisiográficas de Lagos y Volcanes de Anáhuac y Sierras y Valles Guerrerenses (Tabla 8); estas últimas se caracterizan por tener un relieve accidentado con altitudes que varían de 2,980 hasta 1,774 m.s.n.m. en la parte sur, en el municipio de Zumpahuacán (Mapa 2).

Tabla 8. Subprovincias fisiográficas por superficie del PERTMZ.

Subprovincia	Superficie (ha)	%
Lagos y Volcánes de Anahuac	19,413.72	58.7
Sierras y Valles Guerrerenses	13,633.40	41.3
Total	33,047.12	100.0

Fuente: Elaboración propia.

La morfología es diferenciada y está formada por un sistema de geoformas con predominancia de lomeríos con 12,944.83 ha, lo cual representa el 39.2 %, sierras con 17,157.30 ha (51.9 %) y planicies lacustres con 1,580.68 ha (4.8 %); aunque en menor proporción también está formada por valles con 1,364.31 ha (4.1 %) al norte en los municipios de Tenango del Valle y Joquicingo (Mapa 3).

Desde la perspectiva geomorfológica, los lomeríos se caracterizan por ser un relieve que se origina por la disección (proceso de destrucción del relieve por efecto de la erosión) de piedemonte¹⁰, las sierras por ser montañas alargadas generalmente de más de 5km de longitud y los valles al ser depresiones estrechas y alargadas, formadas esencialmente por procesos erosivos (Lugo, 2011).

Por otra parte, destacan las elevaciones del municipio de Tenancingo denominados Cerro Tepetzingo, Cerro Santa Cruz, Cerro La Malinche y Cerro Llano del Ciprés.

¹⁰ Superficie marginal a las montañas, de las que se distingue por una pendiente aproximadamente de 6° en el contacto con la ladera y descendiendo gradualmente.

2.1.3. Geología

El PERTMZ se encuentra constituido en su mayoría por rocas ígneas extrusivas de tipo andesita y basalto, así mismo, de rocas sedimentarias como la arenisca, caliza, lutita y conglomerado; además, de presentar depósitos de toba, brecha volcánica y aluvial.

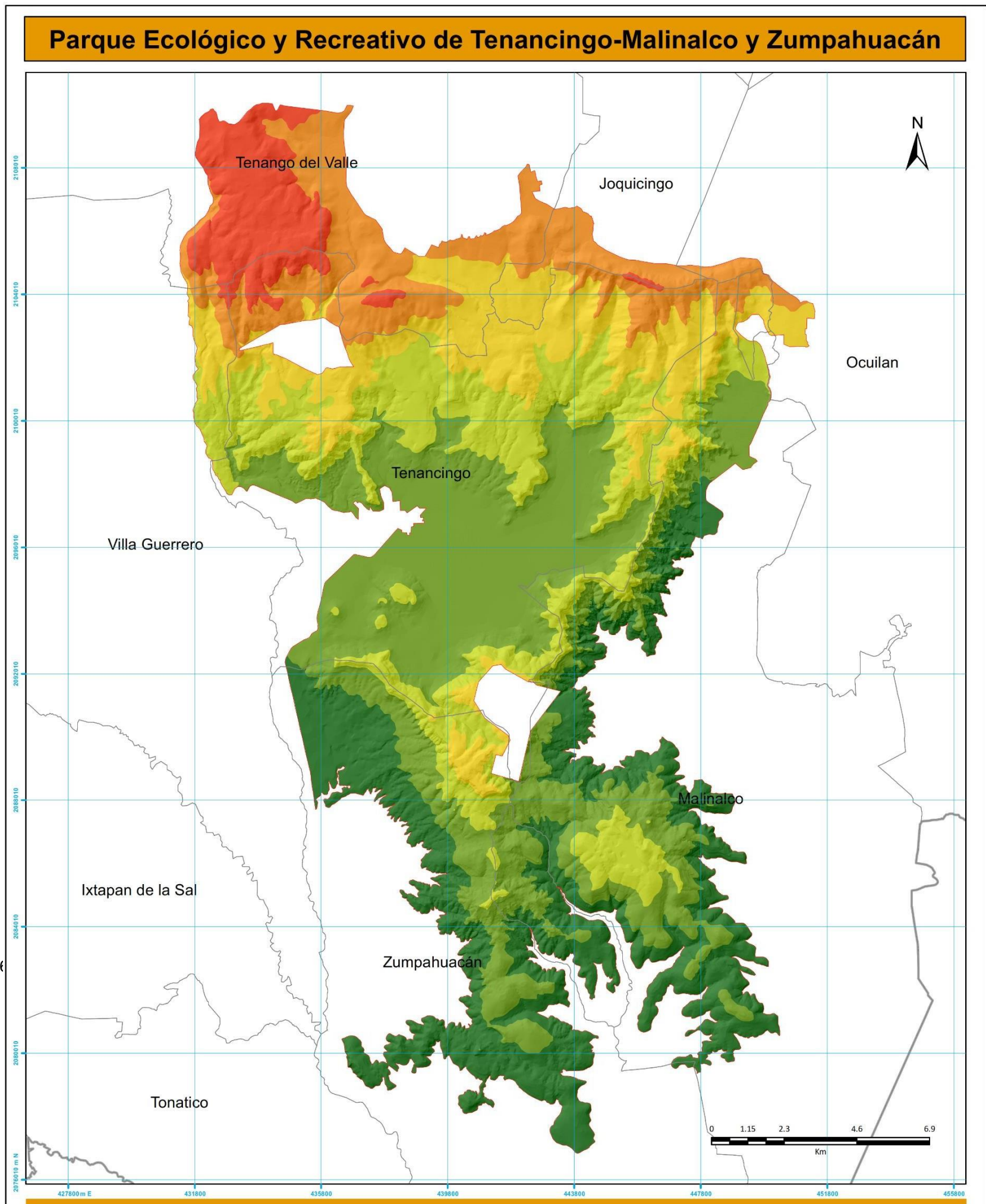
En la Tabla 9 se resumen algunas de las principales características de cada tipo de roca presente en el PERTMZ (Frederick & Tarbuck, 2017):


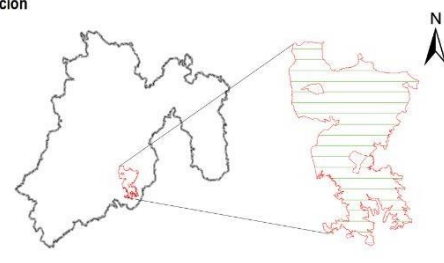
Tabla 9. Principales características de rocas del PERTMZ

Roca	Símbolo	Descripción
Andesita	A	Roca ígnea extrusiva de composición intermedia (anfíbol y plagioclasa feldespato), de textura afanítica, color gris intermedio a oscuro y es común de zonas de relieve volcánico.
Arenisca	ar	Roca sedimentaria formada por granos de arena cementados de tamaño medio (entre 0.0625 y 2mm), de textura detrítica y de composición mineralógica variada.
Basalto	B	Roca ígnea extrusiva de composición máfica (piroxeno y plagioclasa feldespato), de textura afanítica, color oscuro y es común de zonas de relieve volcánico.
Brecha volcánica	Bv	Roca volcanoclástica consistente en detritos (clastos) volcánicos angulosos, además, de estar constituida por ceniza volcánica (<2mm) y lapilli (entre 2 y 64mm).
Caliza	cz	Roca sedimentaria compuesta principalmente de mineral calcita (CaCO ₃), de origen orgánico e inorgánico y de textura no clástica.
Conglomerado	cg	Roca sedimentaria formada por clastos de grava redondeados aunque también pueden ser clastos angulosos (brechas) de tamaño superior a 2mm y de textura detrítica.
Lutita	lu	Roca sedimentaria formada por partículas de arcilla cementadas de tamaño fino (menores de 0.002mm) y de textura detrítica.
Toba	T	Roca volcanoclástica formada por acumulación de ceniza volcánica y lapilli.

Fuente: Elaboración propia con base en Lutgens y Tarbuck (2017).

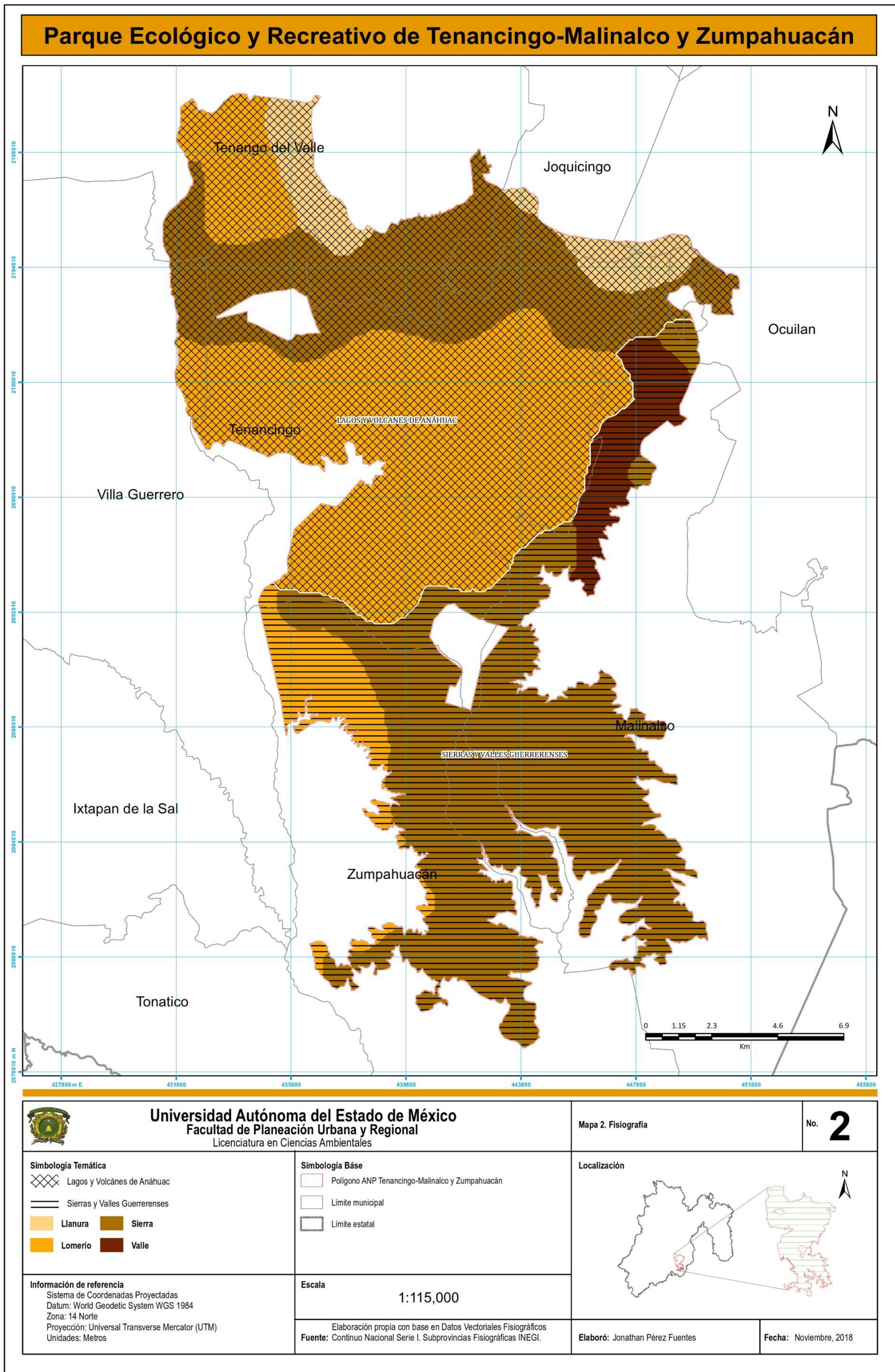
Mapa 2. Altimetría



 <p>Universidad Autónoma del Estado de México Facultad de Planeación Urbana y Regional Licenciatura en Ciencias Ambientales</p>		<p>Mapa 3. Altimetría</p>	<p>No. 3</p>
<p>Simbología Temática</p> <ul style="list-style-type: none"> 1774-1975 1975-2176 2176-2377 2377-2578 2578-2779 >2779 	<p>Simbología Base</p> <ul style="list-style-type: none"> Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán Límite municipal Límite estatal 	<p>Localización</p> 	
<p>Información de referencia</p> <p>Sistema de Coordenadas Proyectadas Datum: World Geodetic System WGS 1984 Zona: 14 Norte Proyección: Universal Transverse Mercator (UTM) Unidades: Metros</p>		<p>Escala</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">1:115,000</p> <p style="font-size: 0.8em;">Elaboración propia con base en datos vectoriales Cartas E14A48 y Fuente: E14A58 INEGI.</p>	
		<p>Elaboró: Jonathan Pérez Fuentes</p>	<p>Fecha: Noviembre, 2018</p>

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 3. Fisiografía

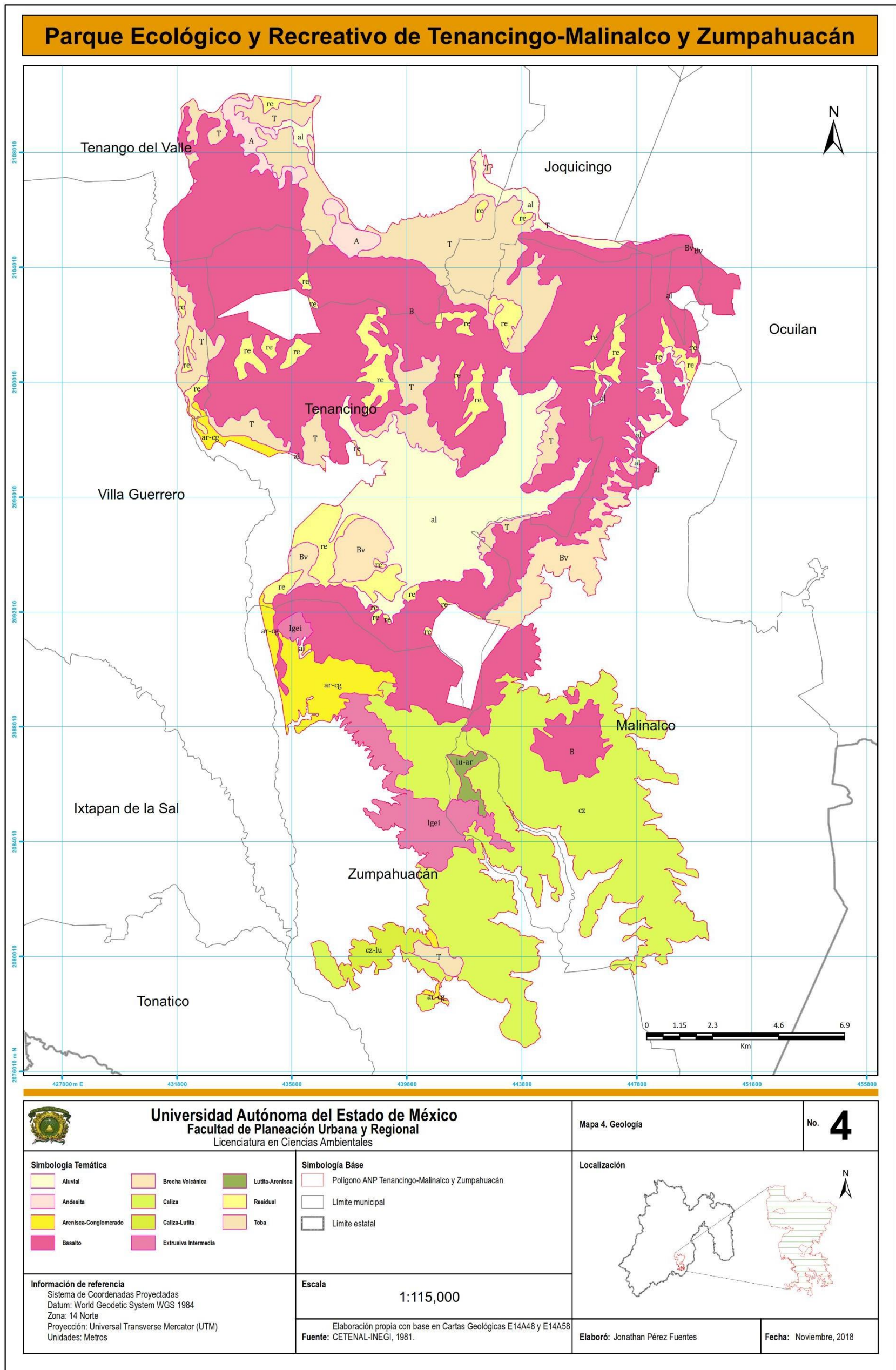


Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el Mapa 4., las rocas con mayor superficie son el basalto con un 41.4 %, seguido de la caliza con el 19.8 %, depósitos de toba volcánica con el 11.3 % y por último los depósitos aluviales con 10.2 %; el resto de las rocas representa el 17.3 % del total.

En términos de distribución el basalto se encuentra mayormente en la subprovincia fisiográfica de Lagos y Volcanes de Anáhuac al norte, por otra parte, la caliza se localiza en la subprovincia fisiográfica de Sierras y Valles Guerrerenses al sur, los depósitos de toba volcánica se distribuyen en varias zonas del norte y finalmente los depósitos aluviales se presentan en el centro del PERTMZ al ser la zona con menor altitud.

Mapa 4. Geología



Fuente: Elaboración propia.

2.1.4. Edafología

El PERTMZ se conforma de nueve tipos de suelos siendo estos: Acrisol, Andosol, Cambisol, Leptosol, Luvisol, Phaeozem, Regosol y Vertisol; además, también se encuentra la Rendzina¹¹ caracterizados por ser suelos poco profundos ricos en humus que generalmente se forman a partir de material parental rico en carbonato y suelen presentarse en ambientes montañosos (FAO, Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, 2016).

En la Tabla 10, se describen las principales características de cada uno de los tipos de suelo presentes en el PERTMZ (Porta, 2014):

Tabla 10. Principales características de suelos del PERTMZ.

Suelo	Símbolo	Descripción
Acrisol	A	Suelo ácido; se caracteriza por contar con un endopedión enriquecido en arcilla, de colores rojos o amarillos y pobre en nutrientes.
Andosol	T	Suelo de origen volcánico; se caracteriza por estar constituido principalmente por ceniza, con alto contenido de alófono. De color oscuro y con alta capacidad de retención de humedad y son muy susceptibles a la erosión.
Cambisol	B	Suelo que cambia; se caracteriza por ser relativamente joven, poco desarrollados, con un endopedión cámbico (evidencia de alteración edafogenética), son muy abundantes y con una moderada a alta susceptibilidad a la erosión.
Litosol	I	Suelo de roca; se caracteriza por su profundidad menor de 25cm, limitada por la presencia de roca dura continua.
Luvisol	L	Suelo ácido; se caracteriza por contar con un endopedión enriquecido en arcilla (árgico), de colores rojos o amarillos y pobre en nutrientes.
Phaeozem	H	Suelo de materia orgánica; se caracteriza por contar con un epipedión móllico (blando) relativamente grueso, de color oscuro y con un contenido moderado a alto de materia orgánica.
Rendzina	E	Suelo somero; se caracteriza por presentar una capa superficial rica en materia orgánica y muy fértil, que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal, arcilloso y es poco profundo.

¹¹Según la World Reference Base, los suelos Rendzina se clasifican como; Leptosol, Chernozem, Kastanosol y Phaeozem dependiendo sus características específicas.

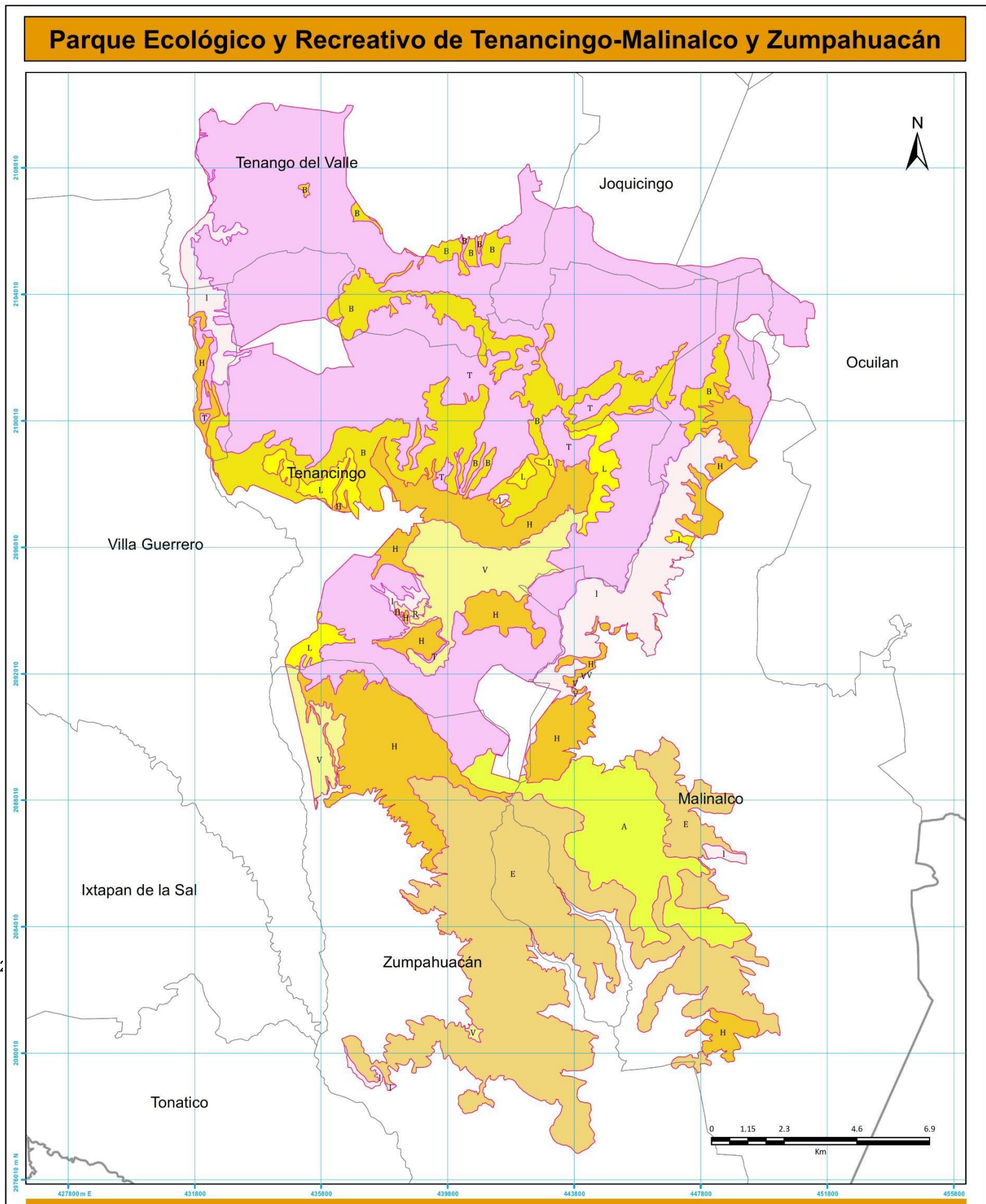
Regosol	R	Suelo poco desarrollado; se caracteriza por ser someros, presentar colores claros y pobres en materia orgánica, se asocia al litosol.
Vertisol	V	Suelo influenciado por el agua; caracterizador por presentar arcillas expandibles, grietas abiertas periódicamente, de color negro o gris oscuro, duros y con baja susceptibilidad a la erosión, pero alta a la salinización.


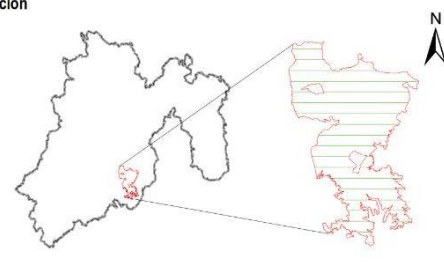
Fuente: Elaboración propia con base en Porta, 2014.

En el Mapa 5., los suelos predominantes son el andosol con un 42.7 %, seguido por la rendzina con el 18.8 %, el phaeozem con el 11.9 %, el cambisol con 9.2 %; el 17.4 % restante lo representan los demás tipos de suelo.

Dicho lo anterior, el andosol se distribuye mayormente en el centro y norte del área de estudio sobre las geoformas de lomeríos y sierras respectivamente, la rendzina se relaciona con la ubicación y la presencia de roca caliza al sur en las sierras, el cambisol se encuentra esparcido prácticamente en la porción norte, así mismo, cabe resaltar la presencia de phaeozem y Vertisol en la zona centro del PERTMZ.

Mapa 5. Edafología



 <p>Universidad Autónoma del Estado de México Facultad de Planeación Urbana y Regional Licenciatura en Ciencias Ambientales</p>		Mapa 5. Edafología	No. 5												
<p>Simbología Temática</p> <table border="0"> <tr> <td> Acrisol</td> <td> Litosol</td> <td> Regosol</td> </tr> <tr> <td> Andosol</td> <td> Luvisol</td> <td> Rendzina</td> </tr> <tr> <td> Cambisol</td> <td> Phaeozem</td> <td> Vertisol</td> </tr> </table>	Acrisol	Litosol	Regosol	Andosol	Luvisol	Rendzina	Cambisol	Phaeozem	Vertisol	<p>Simbología Base</p> <table border="0"> <tr> <td> Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán</td> </tr> <tr> <td> Límite municipal</td> </tr> <tr> <td> Límite estatal</td> </tr> </table>	Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán	Límite municipal	Límite estatal	<p>Localización</p> 	
Acrisol	Litosol	Regosol													
Andosol	Luvisol	Rendzina													
Cambisol	Phaeozem	Vertisol													
Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán															
Límite municipal															
Límite estatal															
<p>Información de referencia Sistema de Coordenadas Proyectadas Datum: World Geodetic System WGS 1984 Zona: 14 Norte Proyección: Universal Transverse Mercator (UTM) Unidades: Metros</p>		<p>Escala 1:115,000</p> <p>Elaboración propia con base en Cartas Edafológicas E14A48 y E14A58 Fuente: CETENAL-INEGI, 1981.</p>													
		Elaboró: Jonathan Pérez Fuentes	Fecha: Noviembre, 2018												

Fuente: Elaboración propia.

2.1.5. Clima

Entre los principales factores geoambientales que influyen en la variabilidad de climas del PERTMZ se encuentran: la vegetación, latitud, altitud y el relieve; estos dos últimos tienen el mayor efecto en la distribución de los climas. Por una parte, la temperatura, la presión, humedad y precipitación disminuyen con el gradiente altitudinal derivado del relieve orográfico del área de estudio.

De acuerdo con la clasificación climática de Wladimir Köppen y modificada por E. García (1981), en el PERTMZ se presentan dos tipos de clima húmedos: el A tropical lluvioso y C templado lluvioso (Mapa 6). En la Tabla 11, se describen las características de los subtipos de climas presentes en el área de estudio.

Tabla 11. Principales características de subtipos de climas

Clima	Descripción
C(E)(w ₂)(w)	<i>Semifrío subhúmedo</i> : se caracteriza por presentar una temperatura media anual entre los 5 y 12 °C y con régimen de precipitaciones durante el verano (Figura 1). Es el de mayor distribución en el PERTMZ, en los municipios de Tenango, Tenancingo y parte Zumpahuacan y Malinalco debido a la presencia de paisaje de sierra; y se presenta entre los 1,900 y 2,700 m.s.n.m.
A(C)(w ₂)(w)	<i>Semicálido subhúmedo</i> : se caracteriza por presentar una temperatura media anual mayor de 18°C (siendo en este caso 18.2°C) y con régimen de precipitaciones durante el verano (Figura 2). Se distribuye al sur y sureste en los municipios de Malinalco y Zumpahuacan; entre los 1,700 y 1,990 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia con base en (García, 1981)

Las consecuencias del régimen climático se manifiestan en la forma del relieve de tipo fluvial en la sierra que delimita ambas vertientes hidrológicas y lacustres al centro de la cuenca Rio Alto Amacuzac.

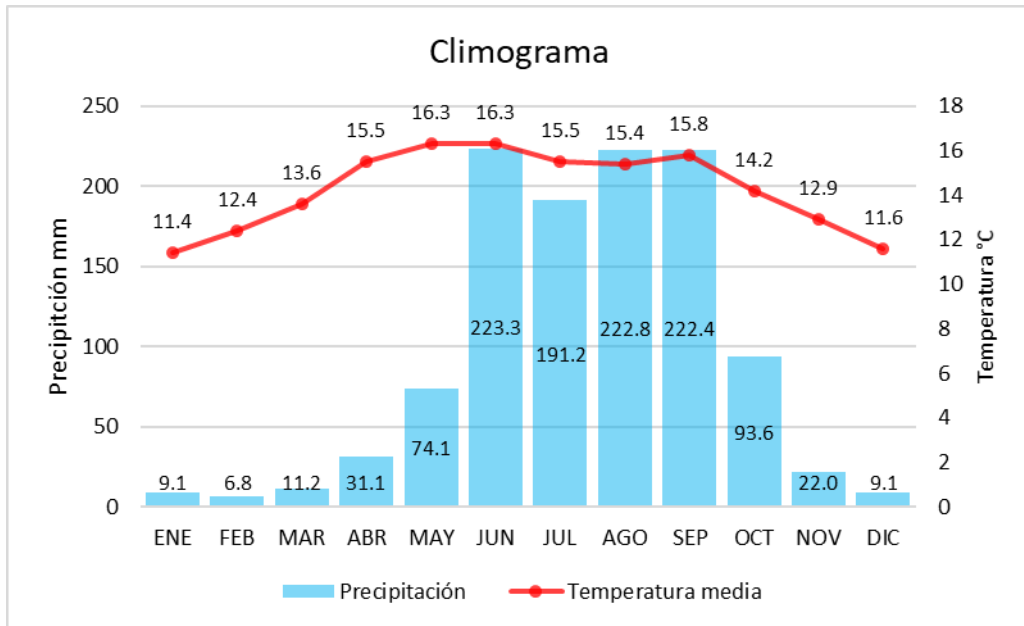


Figura 7. Climograma semifrío subhúmedo.

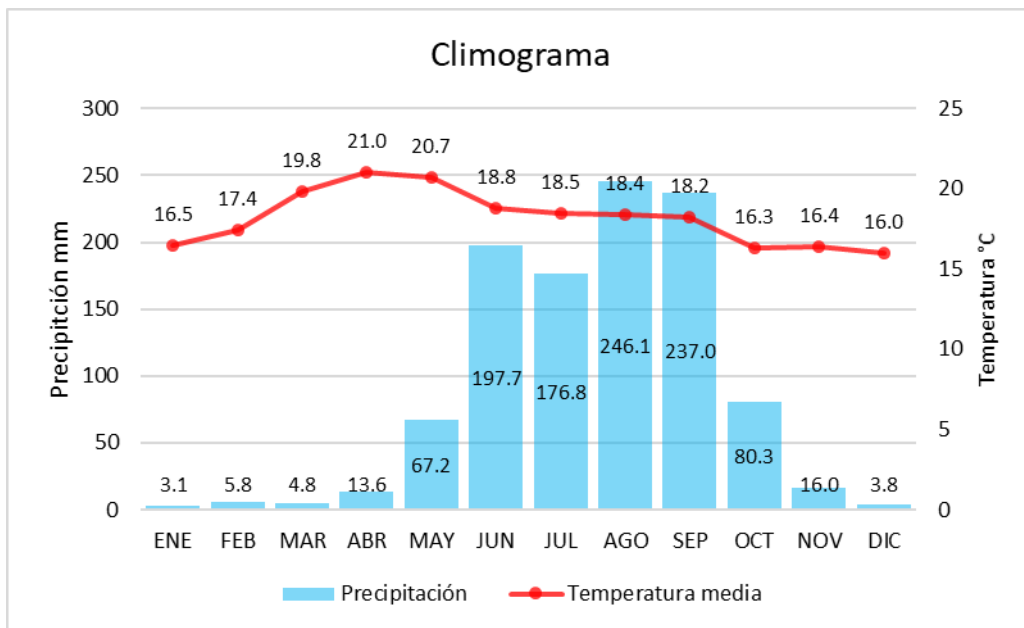
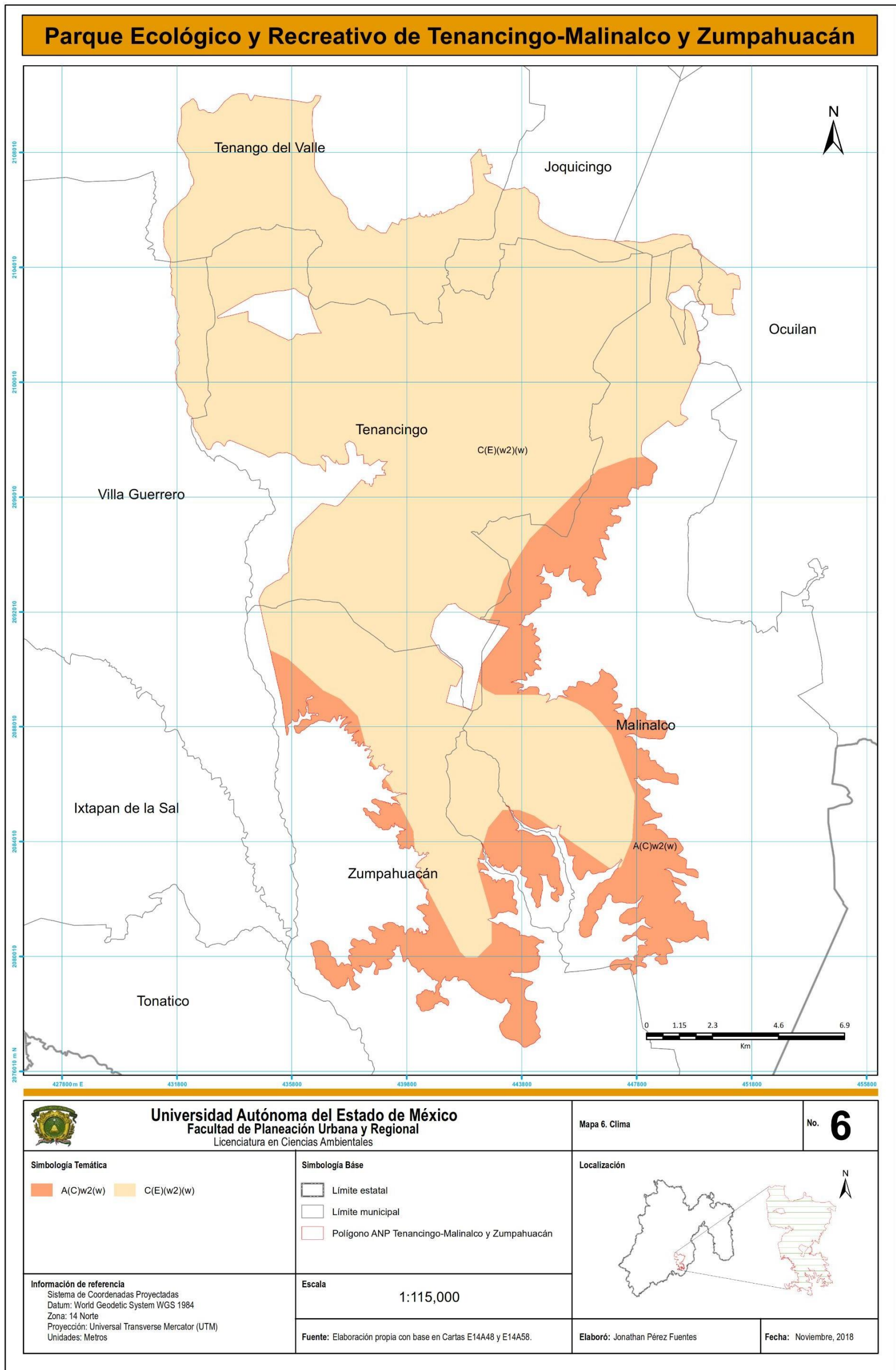



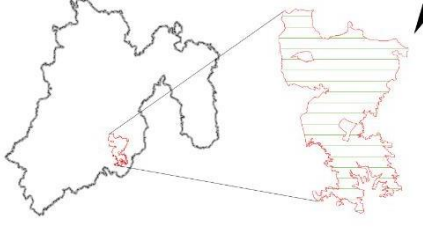
Figura 8. Climograma semicálido subhúmedo.

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Servicio Meteorológico Nacional, 2010.

En el Mapa 6., se puede observar que el clima con mayor predominancia en el área de estudio es el semifrío subhúmedo y seguido del semicálido subhúmedo.

Mapa 6. Climas



 <p>Universidad Autónoma del Estado de México Facultad de Planeación Urbana y Regional Licenciatura en Ciencias Ambientales</p>		<p>Mapa 6. Clima</p>	<p>No. 6</p>
<p>Simbología Temática</p> <p> A(C)w2(w) C(E)(w2)(w) </p>	<p>Simbología Base</p> <p> Límite estatal Límite municipal Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán </p>	<p>Localización</p> 	
<p>Información de referencia Sistema de Coordenadas Proyectadas Datum: World Geodetic System WGS 1984 Zona: 14 Norte Proyección: Universal Transverse Mercator (UTM) Unidades: Metros</p>	<p>Escala</p> <p style="text-align: center;">1:115,000</p>	<p>Fuente: Elaboración propia con base en Cartas E14A48 y E14A58.</p>	
		<p>Elaboró: Jonathan Pérez Fuentes</p>	<p>Fecha: Noviembre, 2018</p>

Fuente: Elaboración propia.

2.1.6. Hidrografía

El PERTMZ forma parte de la región hidrológica 18 Balsas, de la cuenca hidrográfica Rio Grande de Amacuzac y de las subcuencas Rio Alto Amacuzac con el 69.5% al oeste y Rio Coatlán con el 30.4% al este como se muestra en la Tabla 12:

Tabla 12. Subcuencas hidrográficas del PERTMZ

Región hidrológica	Cuenca hidrográfica	Subcuenca	%
RH18 Balsas	Rio Grande de Amacuzac	Rio Alto Amacuzac	69.6
		Rio Coatlán	30.4

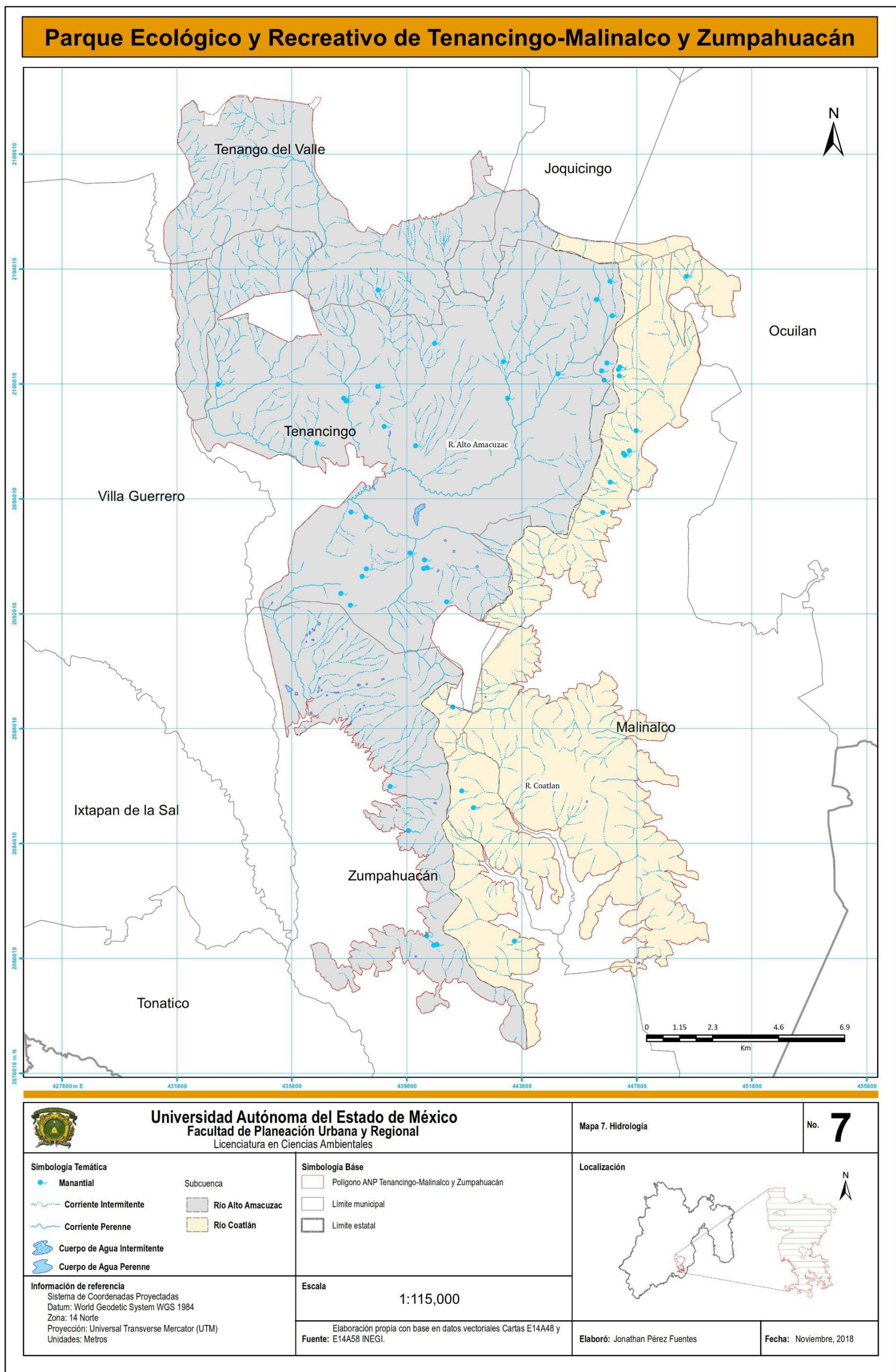
Fuente: Elaboración propia.

Por lo que se refiere a las corrientes principales que comprenden el área de estudio estas son: el Rio San Simonito, Arroyo Salado, Las Canoas y Arroyo Color, todos de condición perenne y localizados en la zona centro sobre depósitos aluviales y suelos de tipo Vertisol, como se aprecia en el Mapa 7.

Ahora bien, es importante resaltar que el patrón de drenaje se ve influenciado por el gradiente altitudinal en la sierra que rodea el área de estudio, así mismo, por la presencia de material geológico ígneo resistente (basalto); generando un patrón de drenaje de tipo dendrítico en ambas cuencas.

Finalmente, cabe mencionar que el patrón de drenaje en las sierras y lomeríos es de tipo dendrítico determinado por las geoformas, la resistencia de las rocas, el clima y la hidrología superficial (Escobar, 2017).

Mapa 7. Hidrología






Fuente: Elaboración propia.

2.1.7. Uso de suelo y vegetación

El uso de suelo es aquel propósito antrópico aplicado a los atributos biofísicos de la cobertura original, por ejemplo, el desarrollo de asentamientos humanos, la actividad agrícola, etc. En la Tabla 13 y Mapa 8, se presentan los usos de suelo actuales como parte del área del PERTMZ.

Tabla 13. Usos de Suelo Actual

Uso de Suelo	%	Uso de Suelo	%	Uso de Suelo	%
Agropecuario	27.6	Forestal	61.4	Urbano	10.9
					

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla anterior, los usos de suelo actuales se representan por el uso forestal representando el 61.4%, seguido del uso agropecuario con 27.6% y finalmente el uso urbano con 10.9% del total del área. Cabe mencionar que existe el 0.1% ocupado por cuerpos de agua perenes.

En cuanto se refiere a vegetación, de acuerdo con la clasificación de (INEGI, Guía para la interpretación de cartografía: uso de suelo y vegetación, 2005b) y CONABIO (2006), los diferentes tipos de vegetación que se presentan se encuentran agrupados en 3 diferentes tipos de ecosistemas, siendo estos: Bosque templado de coníferas y latifoliadas, Bosque tropical deciduo (Selva baja caducifolia) y matorral inerme (*sin espinas*).

En la Tabla 14 se describen las principales características de estos tipos de ecosistemas según los estudios de Miranda y Hernández X. (1963), Rzedowski (1966) e INEGI (2005b):

Tabla 14. Principales características de los tipos de ecosistemas del PERTMZ

Ecosistema	Características y distribución
Bosque templado de coníferas y latifoliadas	Comunidad vegetal dominada por arboles altos mayormente <i>Pinus</i> y <i>Quercus</i> , se desarrolla sobre suelos profundos y ácidos (Andosol), y en ambientes montañosos (Eje Volcánico Transversal) entre los 2,000 y 3,400m de altitud, con una temperatura media anual de entre 12 a 23°C y una precipitación media anual entre 600 y 1,200mm como máximo y proporcionan una gran variedad de servicios ambientales.
Bosque tropical caducifolio o Selva baja caducifolia	Comunidad vegetal dominada por arboles pequeños (4-10m) con copas poco densas y muy abiertas, en donde, más del 75% de las especies pierden sus hojas en la época seca del año, se desarrolla sobre suelos someros y pedregosos (Rendzina), entre los 0 y 1,900m de altitud (Sierras), con una temperatura media anual de entre 20 a 29°C y una precipitación media anual entre 300 y 1,800mm y es uno de los ecosistemas más amenazados del país a causa de la deforestación.
Matorral inerme (<i>sin espinas</i>)	Comunidad vegetal dominada por arbustos de altura inferior a 4m, se desarrolla entre los 0 y 3,000m de altitud, con una temperatura media anual de entre 12 a 26°C y una precipitación media anual entre 300 y 400mm y el pastoreo descontrolado es una de las principales causas de deterioro.

Fuente: Elaboración propia con base en (Rzedowski, 2006).

Se debe agregar que de acuerdo con (CONABIO, 2009), el área forma parte de las provincias biogeográficas del Eje Neovolcánico y Depresión del Balsas. En la primera, la vegetación se caracteriza por la presencia de bosques de coníferas con afinidad a la región neártica en la porción norte; por otra parte, en la Depresión del Balsas, el tipo de vegetación principal es la selva baja caducifolia con afinidad a la región neotropical, y con presencia de bosques de encino hacia la porción sur.

La vegetación presente, es resultado de su localización y de la interacción de las condiciones físicas de la geomorfología, geología, edafología y el clima; este último, influenciado por la variabilidad altitudinal. Entre las principales categorías están el agrícola de temporal y riego, el bosque de coníferas, con especies de pino (*Pinus*) y enebro (*Juniperus*), bosque de encino (*Quercus*), bosque tropical deciduo, matorral inerme y pastizal inducido como se puede observar en la Tabla 15.

Tabla 15. Categorías de vegetación

Categoría	Tipo de vegetación
Agrícola	Agricultura de Temporal Anual Agricultura de Riego
Bosque de Coníferas	Bosque de Pino Bosque de Pino-Enebro Bosque de Enebro Bosque de Enebro-Pino Bosque de Encino Bosque de Encino-Pino
Bosque Tropical Deciduo ¹²	Bosque Tropical Deciduo con Vegetación Secundaria
Matorral	Matorral Inerme
Pastizal	Pastizal Inducido

Fuente: Elaboración propia.

Por lo que se refiere a la categoría de bosque de coníferas, esta se encuentra conformada principalmente por bosques de pino (*Pinus*), enebro (*Juniperus*) y encino (*Quercus*); aunque también se presentan asociaciones vegetales como son: bosques de pino-enebro y encino-pino.

Por lo anterior, el bosque de pino predomina a una altitud promedio de entre los 1,900 y 2,700 m.s.n.m., debido a su mayor tolerancia al clima frío, localizándose ampliamente al norte del área de estudio y rodeando la sierra de la cuenca del Río Alto Amacuzac, además, de estar asociado con encino y sobre suelos de tipo andosol. Hay que mencionar, además que las principales especies son: *Pinus moctezumae* (ocote), *Pinus oocarpa* (pino prieto) y *Pinus hartwegii* (ocote blanco) todos nativos de México y Centroamérica y cuyas principales características son una altura promedio de entre 20-30 metros, de hoja perennifolia, copa ancha y redondeada.

El bosque de encino se encuentra asociado al de pino, cuya distribución a diferencia del pino se amplía en predominancia hacia el sureste en el municipio de Malinalco, debido al rango altitudinal entre los 1,900 y 2,000 m.s.n.m.; las especies de encino

¹² También conocido como Selva Baja Caducifolia

son: *Quercus magnoliifolia* (encino amarillo), *Quercus elliptica* (encino blanco) y *Quercus candicans* (encino aguacatillo), sus características son una altura promedio de entre 5-20 metros y de hoja elíptico-lanceolada.

Por el contrario, el bosque de enebro se encuentra localizado al sur del área de estudio en el municipio de Zumpahuacan sobre suelos de tipo andosol y phaeozem; las especies de enebro son: *Juniperus flaccida* (cedro blanco) y *Juniperus deppeana* (cedro), sus características son una altura promedio de entre 3-12 metros, de hoja perennifolia y copa redondeada.

Con relación con la selva baja caducifolia, esta se distribuye prácticamente al sur del área de estudio abarcando los municipios de Malinalco y Zumpahuacan sobre suelos de tipo litosol, andosol y phaeozem, destacan especies arbóreas de *Bursera* y de cactáceas como *Pereskia*. Aunado a la selva baja caducifolia se encuentra el matorral inerme que se localiza principalmente en varias zonas al sur del área de estudio, en donde, predomina el suelo de tipo Acrisol y la rendzina.

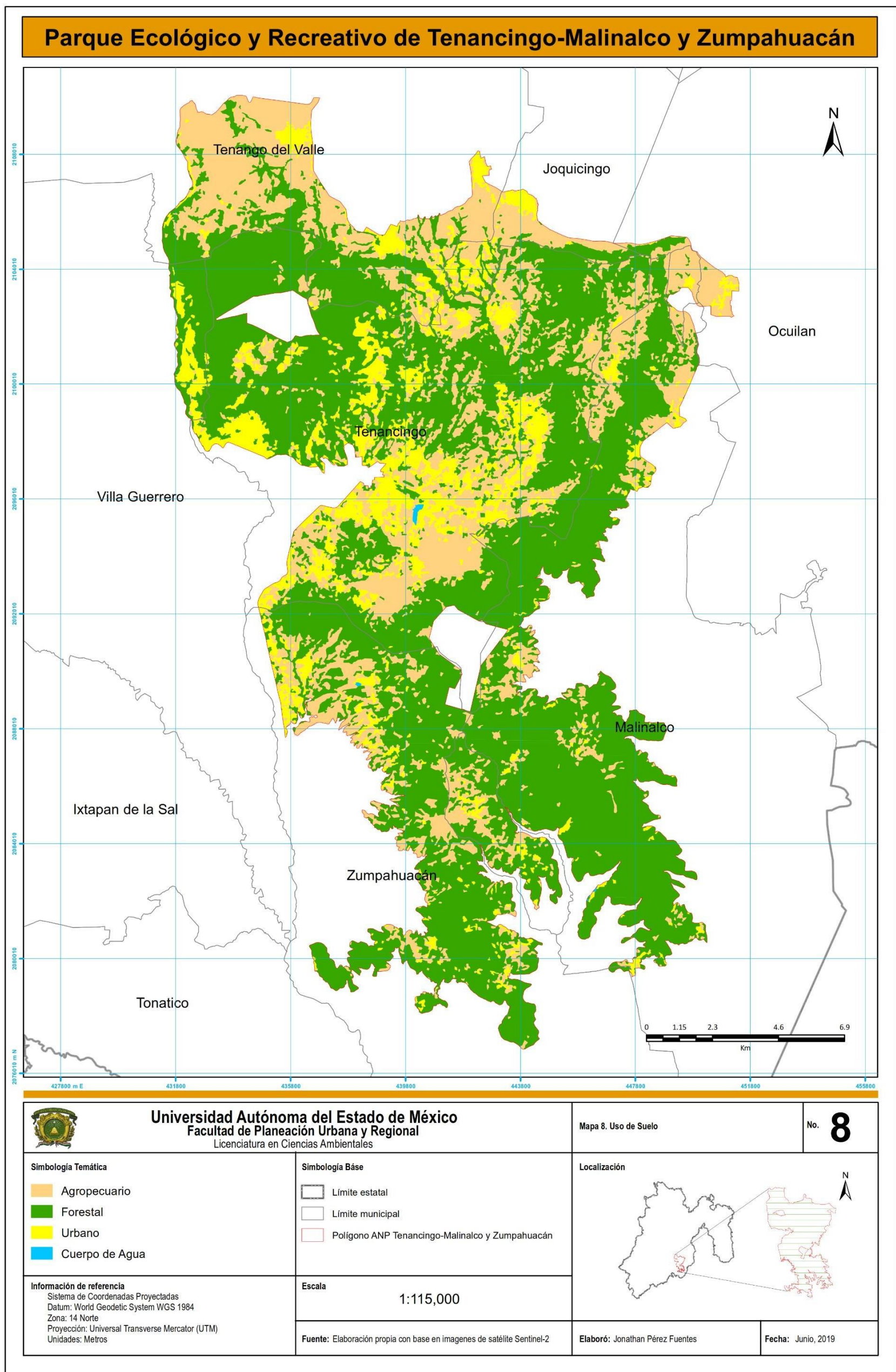
Finalmente, el pastizal inducido es un tipo de cobertura utilizada para la alimentación de ganado, se distribuye de forma dispersa en pequeñas zonas del área de estudio.

2.2. Contexto socioeconómico del área de estudio

El PERTMZ se localiza aproximadamente a 45 km del centro de la capital del estado de México. Como se mencionó en el apartado 2.1 *Localización* dentro de los límites político-administrativos de siete municipios al sureste del estado.

El principal acceso vial al área de estudio es la carretera México 55, que conecta la ciudad de Toluca con los municipios del sur del estado de México.

Mapa 8. Uso de suelo



Fuente: Elaboración propia.

2.2.1. Dinámica demográfica

El Parque Ecológico y Recreativo de Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacan, forma parte de siete municipios del Estado de México, que con base al Censo de Población y Vivienda INEGI 2010, presenta un total de 98,918 habitantes en las localidades que se encuentran dentro del polígono del área.

Durante cuarenta y cinco años, la dinámica demográfica ha ido incrementando principalmente en las localidades de San Bartolomé Atlatlahuca, San Pedro Zictepec, San José el Cuartel, El Salitre y Joquicingo de León Guzmán.

En la Figura 9, se observa que la dinámica de población presenta un crecimiento, alcanzando en el año 2010 una población total de 98,918 habitantes y con ello una densidad de población de 299.33 hab/km².

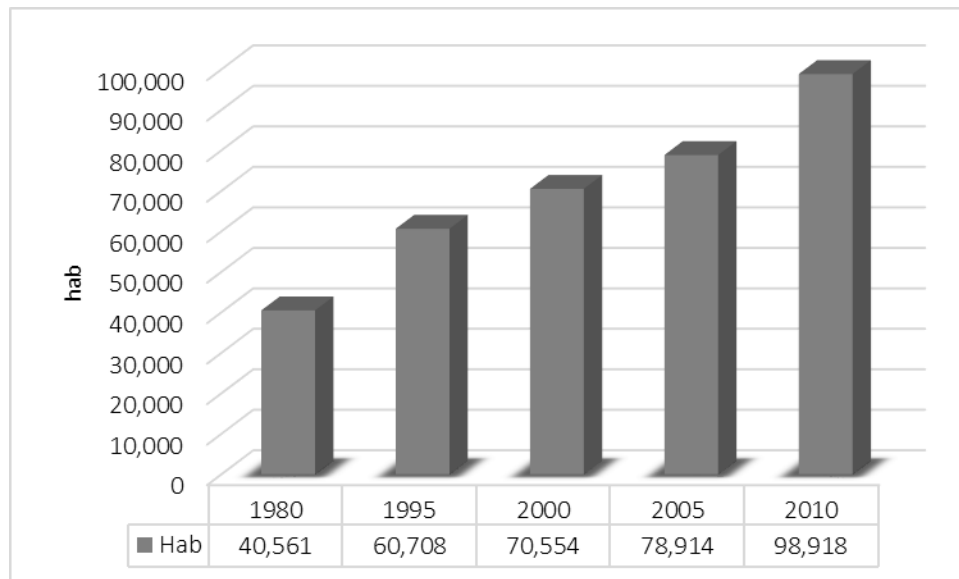


Figura 9. Dinámica demográfica.

Fuente: Censo de Población y Vivienda INEGI, 1980,1995, 2000, 2005 y 2010.

Por otra parte, en la Tabla 16, se presenta la población total por municipio del PERTMZ, siendo la cabecera del municipio de Tenancingo con 61,467 habitantes; concentrando a la población en la periferia, así mismo, seguido de la cabecera municipal de Tenango del Valle con 17,685 habitantes y concentrando la mayor

población en las localidades de San Bartolomé Atlatlahuca y San Pedro Zictepec, como se muestra en el Mapa 9.

Tabla 16. Población por municipio del PERTMZ

Municipio	Población total
Joquicingo	6,770
Malinalco	6,330
Ocuilan	2,742
Tenancingo	61,467
Tenango del Valle	17,685
Villa Guerrero	747
Zumpahuacán	3,177

Fuente: Elaboración propia con base a INEGI, 2010.

2.2.2. Actividades económicas

Por lo que se refiere al contexto económico, la Población Económicamente Activa (PEA), fue de 35,358 habitantes, de los cuales 32,615 presentaban condición de ocupación según datos del INEGI, 2010 como se muestra en la Figura 10.

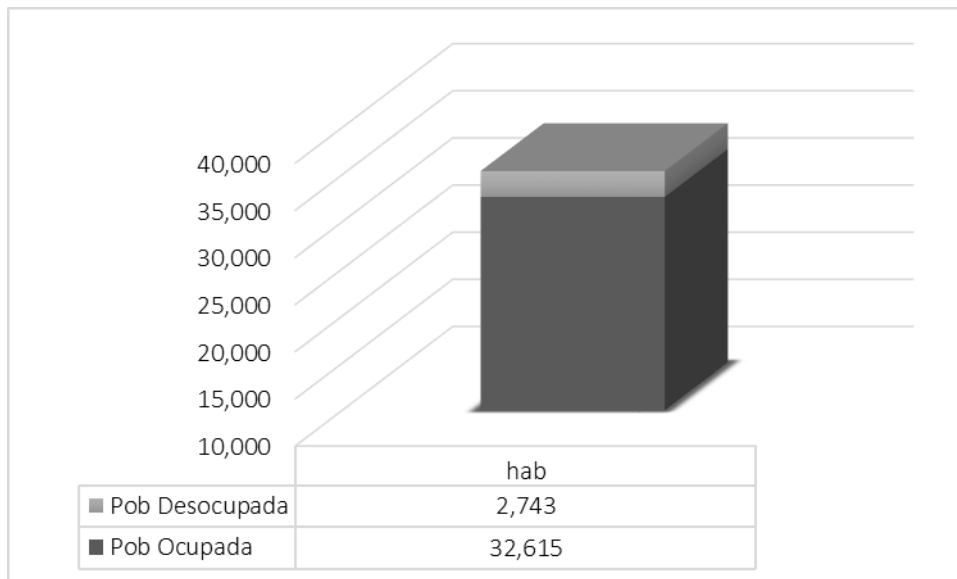


Figura 10. Población desocupada y ocupada en 2010.

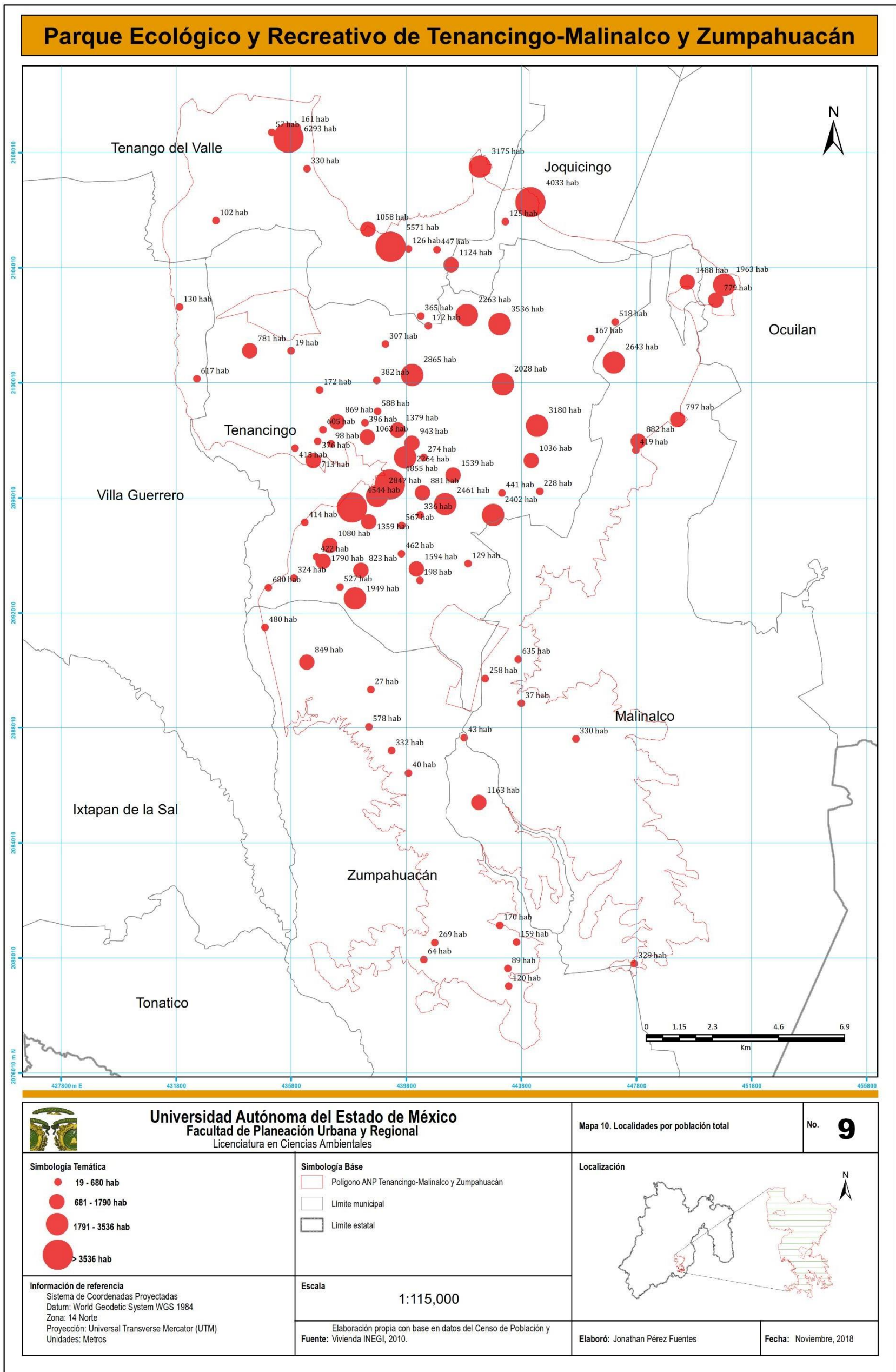
Fuente: Elaboración propia con base al Censo de Población y Vivienda INEGI, 2010.

En lo que respecta a la actividad agrícola, destacan principalmente el cultivo de maíz de grano, frijol y, la floricultura.

En el caso de la floricultura, las plantas ornamentales es la principal actividad en la que actualmente se emplea la población; su localización se ha extendido del municipio de Villa Guerrero a los municipios de Tenancingo en el centro y Zumpahuacan al sur del área de estudio. Entre las principales localidades con mayor desarrollo de floricultura de invernadero se encuentran: San Gabriel Zepayautla, Rancho Los Morales, San Miguel Tecomatlán en Tenancingo y San Antonio Guadalupe en Zumpahuacan.

Entre los principales cultivos florícolas se encuentran: la gerbera, rosas, aster, solidago, lirio, crisantemo, clavel, entre otras.

Mapa 9. Localidades por número de habitantes



Fuente: Elaboración propia.

2.2.3. Asentamientos humanos

Según datos del INEGI, dentro del PERTMZ se encuentran 93 localidades; de las cuales 82 son de categoría rural y 11 de categoría urbana con base al criterio establecido por la misma institución (menor a 2,500 habitantes rural) y se muestran en la Tabla 17.

Dicho lo anterior, la población total del PERTMZ es de 98,918 habitantes, siendo las localidades de San Bartolomé Atlatlahuca, San Pedro Zictepec, San José el Cuartel, El Salitre y Joquicingo de León Guzmán las de mayor concentración de población y de mayor extensión en los últimos años.

Como se observa en la Tabla 17, los municipios con el mayor número de localidades son Tenancingo, Zumpahuacan y Tenango con 54, 12 y 11 localidades respectivamente, generando una concentración en la zona céntrica del PERTMZ.

Tabla 17. Localidades por municipio

Municipio	No. de localidades	Localidad(es) con más de 2500 habitantes
Joquicingo	4	Joquicingo de León Guzmán
Malinalco	9	San Simón el Alto
Ocuilan	2	Ninguna
Tenancingo	54	El Salitre, Tenería, San Martin Coapaxtongo, San Simonito, San Miguel Tecomatlán, San Juan Xochiaca, San Gabriel Zepayautla, Ejido de Tenancingo, Colonia San Ramón, La Ciénega y San José el Cuartel
Tenango del Valle	11	San Bartolomé Atlatlahuca, San Francisco Tepexoxuca y San Pedro Zictepec
Villa Guerrero	2	Ninguna
Zumpahuacán	12	Ninguna

Fuente: Elaboración propia al Censo de Población y Vivienda INEGI, 2010.

2.3. Tenencia de la tierra

El PERTMZ presenta en su mayor extensión propiedad ejidal, siendo la de mayor extensión en el PERTMZ como se muestra en la Figura 11.

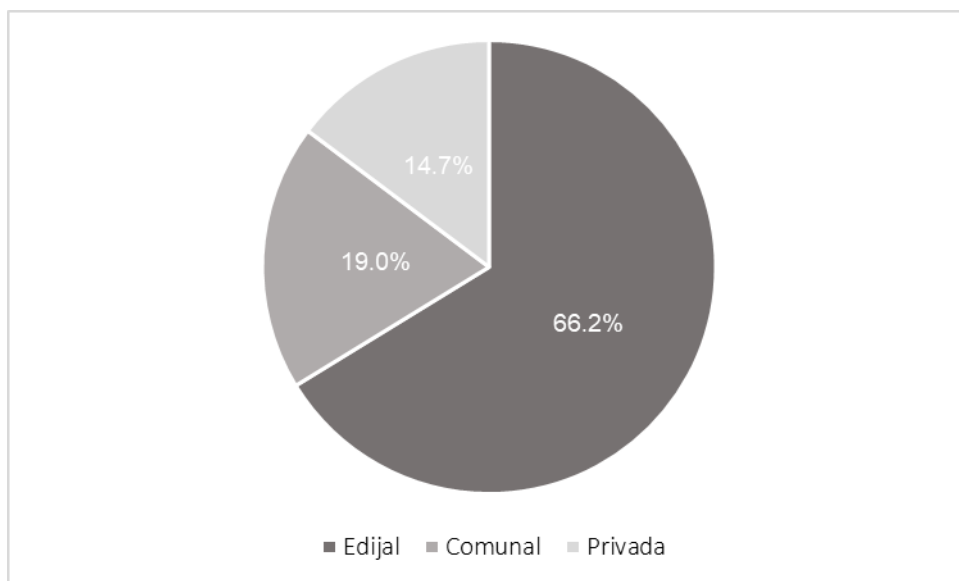


Figura 11. Tenencia de la tierra.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la propiedad ejidal esta cuenta con el 66.2%, localizándose principalmente en la zona centro de la cuenca del Rio Alto Amacuzac en los municipios de Tenancingo y Malinalco al oeste.

Por otra parte, la propiedad comunal representa el 19.0% y esta se presenta al norte del PERTMZ que se localiza en el municipio de Tenango y la porción oeste que abarca el municipio de Ocuilan.

Finalmente, la propiedad privada con el 14.7% se localiza en los municipios de Villa Guerrero al este, Joquicingo al noroeste [en la cabecera municipal] y Zumpahuacan al sur.

Conclusiones preliminares

En este capítulo se contextualizaron las condiciones biofísicas y socioeconómicas actuales del PERTMZ, destacando la heterogeneidad ambiental, además, de que los factores abióticos han condicionado la presencia y distribución espacial de los recursos bióticos particularmente la cobertura forestal; contenida en este estudio como bosque de coníferas y selva baja caducifolia.

Por lo anterior, se resalta que las variables altitud, latitud y geología, han condicionado la distribución espacial del bosque de coníferas, en particular, en los municipios de Tenango del Valle, Tenancingo, Joquicingo al norte y zonas de Zumpahuacán al sur, en contraste con la selva baja caducifolia, cuya distribución se ha caracterizado por su abundancia en los municipios de Malinalco y Zumpahuacán al sur del PERTMZ.

Se puede señalar que durante el periodo de estudio la población que ha habitado en el PERTMZ, ha presentado una dinámica significativa, la cual ha incrementado en las últimas décadas, concentrándose en la zona centro, sobre todo en la periferia de la cabecera municipal de Tenancingo.

Finalmente, es importante subrayar un incremento de los invernaderos en el PERTMZ, debido a la especialización en la producción florícola, de modo que, la población PEA y que presenta condición de ocupación se encuentra laborando principalmente en esta actividad.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

El propósito de este capítulo consiste en presentar la metodología general que permitió cumplir los objetivos establecidos, así mismo, describir el alcance, método, estructura, técnicas y los materiales requeridos para el desarrollo de la presente investigación.

3.1. Esquema metodológico

En la Figura 12 se representa la metodología del proyecto de investigación, el cual se estructuró en cuatro etapas de desarrollo.

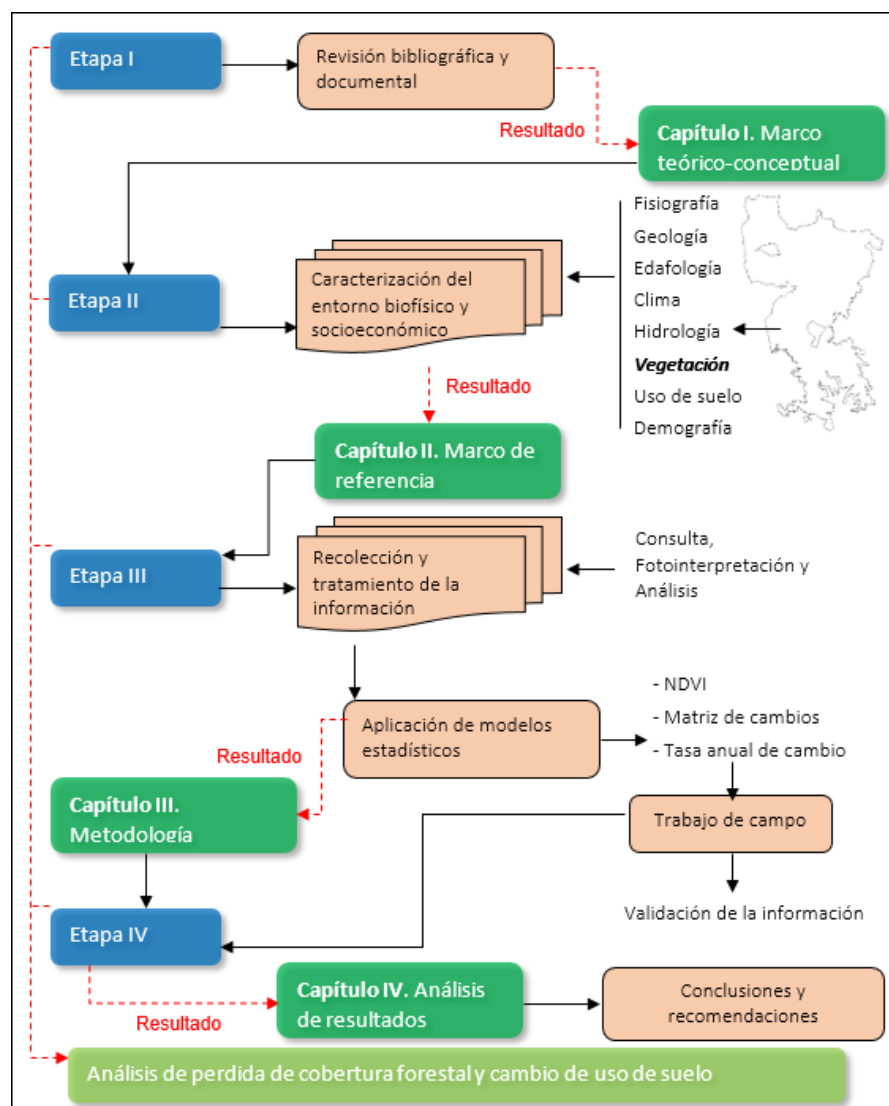


Figura 12. Esquema metodológico general de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Alcance y diseño de la investigación

El presente estudio de investigación por su alcance es de tipo explicativo, el cual busca describir las características y encontrar los cambios más importantes del proceso de pérdida de cobertura forestal y cambio de uso de suelo en el periodo de tiempo de 1974 a 2019. De manera que el diseño de investigación sea de tipo longitudinal con la finalidad de analizar las causas y consecuencias del fenómeno de estudio durante dos tiempos, es decir, el tiempo 1 (1974) y tiempo 2 (2019) en el PERTMZ (Munch, 2017).

A su vez, la investigación tiene un enfoque mixto, esto es que la recopilación y tratamiento de los datos se analiza de forma cuantitativa (mediante la medición matemática) y cualitativa (mediante la observación).

3.3. Método de la investigación

Los métodos de investigación son una importante herramienta para la búsqueda y el perfeccionamiento del conocimiento acerca de la realidad, ya que sirven como medio para alcanzar los objetivos previamente establecidos (Munch, 2017).

Cada método tiene su forma particular de acercamiento al objeto de estudio. Razón por la cual, uno de los métodos de investigación científica es el método deductivo; el cual consiste en obtener conclusiones particulares a partir de una proposición general (Hernández, 2013).

Dicho lo anterior, el método empleado en la presente investigación es el *deductivo* como se muestra en la Figura 13:

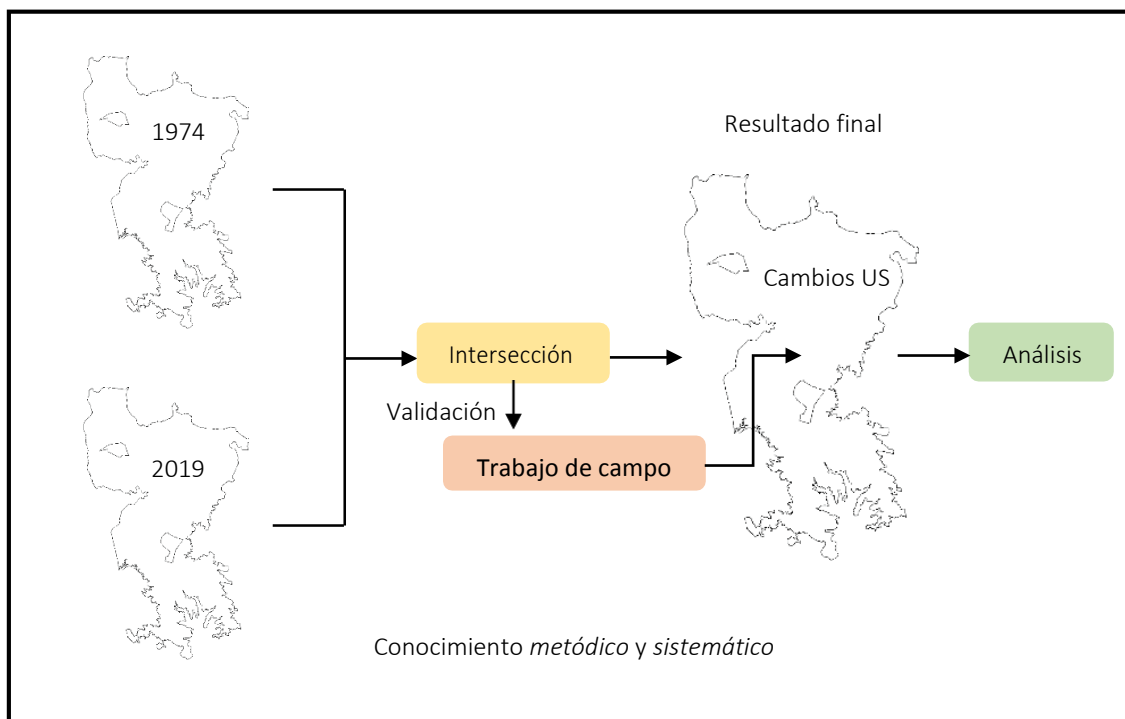


Figura 13. Método de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Estructura de la investigación

La elaboración de esta investigación se estructuró en tres fases de desarrollo: 1) recolección de la información; 2) tratamiento y análisis de la información y 3) trabajo de campo.

3.4.1. Recolección de la información

Para cumplir con lo establecido en el primer objetivo específico (caracterización de las condiciones ambientales del ANP), se contempló la superficie del área de estudio correspondiente al polígono del Parque Ecológico y Recreativo Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacan¹³; la cual presenta una superficie total de 33,047.12 ha¹⁴.

¹³ De la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)

¹⁴ Con base al decreto del 18 de julio de 1981

Lo anterior con el propósito de obtener y caracterizar la: fisiografía, altimetría, geología, edafología, climas, hidrología, uso de suelo y vegetación con base en las cartas topográficas E14A48 y E14A58, emitidas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Información ambiental del área de estudio.

Componente ¹⁵	Materiales y métodos	Productos
Altimetría	Revisión de bibliografía acerca de los principales aspectos de la fisiografía, geología (tipología), edafología (tipología) clima e hidrología superficial (perenne e intermitente), uso de suelo y vegetación del ANP, aplicando técnicas (georreferenciación y digitalización) de cartografía automatizada con base a las cartas topográficas E14A48 y E14A58 del INEGI Generación de Bases de Datos Geoespaciales.	Generación de nueve mapas temáticos del contexto biofísico y urbano del PERTMZ, a una escala 1:115,000
Fisiografía		
Geología		
Edafología		
Climas		
Hidrología		
Uso de Suelo y Vegetación		
Localidades		
Uso de suelo y vegetación actual	Tratamiento de imágenes de satélite Sentinel-2 del PERTMZ	Mapas uso de suelo y vegetación actual, tasa de cambio forestal y NDVI escala 1:115,000

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener como resultado nueve mapas temáticos de las condiciones ambientales, estos se interpretaron, lo que permitió caracterizar el contexto biofísico y socioeconómico actual que presenta el área de estudio haciendo énfasis en la tipología de la vegetación arbórea y su relación con el uso del suelo; así mismo, se identificaron las principales áreas con cobertura forestal actual y su respectiva superficie en hectáreas.

¹⁵ Componente del entorno biofísico

Posteriormente, se obtuvo información de carácter socioeconómico, a fin de conocer el crecimiento y la dinámica demográfica en las localidades ubicadas dentro del polígono del PERTMZ, así como, su distribución y cambios durante el periodo 1974 – 2019; de igual manera, con los aspectos referentes a las actividades económicas desarrolladas por los habitantes de los municipios que integran el área de estudio.

Lo anterior con el propósito de identificar aquellas zonas que podrían presentar los mayores cambios de uso del suelo y establecer una relación de causa-efecto de la pérdida de cobertura forestal en el PERTMZ.

Finalmente, se empleó imágenes de satélite (Figura 14) Sentinel-2¹⁶ del año 2019, requeridas para analizar la pérdida de cobertura forestal y el cambio de uso de suelo, éstas fueron seleccionadas y descargadas de la página (<https://scihub.copernicus.eu>) como parte de la misión Copérnico Sentinel-2 de la European Spatial Agency (ESA), destacando entre los principales criterios de selección la coincidencia en meses (febrero) y su bajo porcentaje en nubosidad debido a que representa un ruido para su tratamiento.

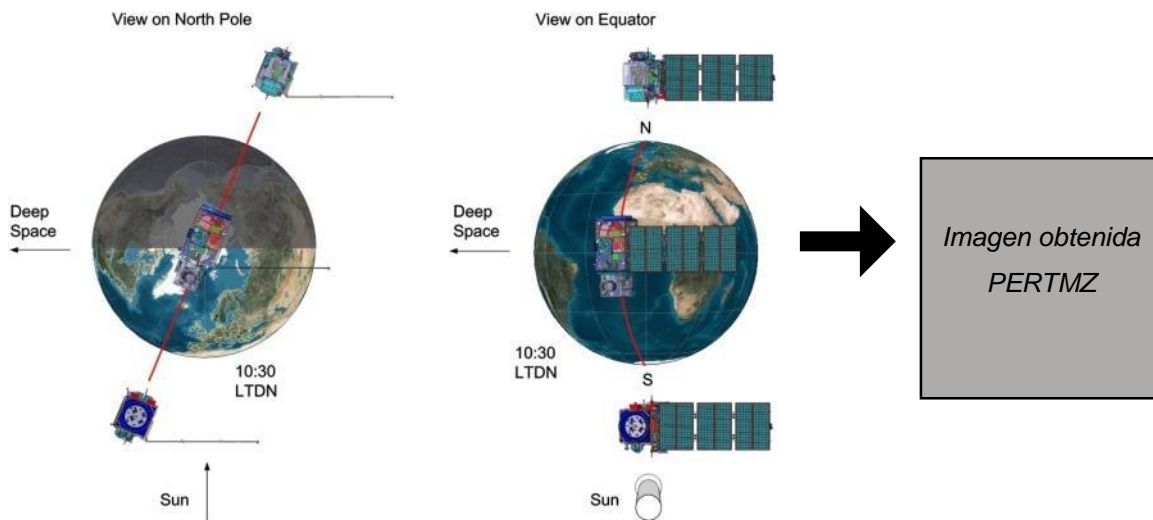



Figura 14. Configuración orbital del sensor Sentinel-2.

Fuente: Misión Copérnico Sentinel-2

¹⁶ Sentinel-2 es una misión de imágenes multispectrales de gran resolución espacial.

Con respecto a la figura anterior, al obtener las imágenes de satélite Sentinel-2, estas presentan características propias las cuales se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Características de la imagen de satélite Sentinel-2

Descripción	Imagen Sentinel-2
<p>Satélite: Sentinel-2 (2019)</p> <p>Sensor: L2A</p> <p>Escena: A018942</p> <p>Resolución espacial 20m</p> <p>Composición: 348</p> <p>Fecha de adquisición 6 de febrero de 2019</p>	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Tratamiento de la información

Para llevar a cabo el tratamiento de la información, se ejecutaron las siguientes fases: en primer lugar, se establecieron las categorías de cambio de uso de suelo para ambos tiempos, después se aplicaron técnicas de percepción remota, luego se determinaron las pérdidas y ganancias por cobertura y finalmente se llevó a cabo el análisis de los factores antrópicos que condicionan la pérdida de cobertura forestal y el cambio de uso de suelo en el PERTMZ.

Dicho lo anterior, se establecieron las categorías de análisis para ambos años: 1974 y 2019. Para el año 1974 se digitalizó las cartas de uso de suelo y vegetación E14A48 y E14A58, posteriormente para el 2019 se empleó la técnica de clasificación supervisada de las imágenes de satélite Sentinel-2 con una resolución espacial de 20m.

Las categorías de usos de suelo se asignaron con base en el conocimiento previo del PERTMZ, revisión de literatura y trabajo de campo. Se identificaron 12 coberturas, las cuales se agruparon en 9 categorías para un mejor análisis de la información (Tabla 20).

Tabla 20. Categorías de uso de suelo y vegetación

No.	Cobertura	Categoría	Clave
1	Agricultura de Temporal	Agricultura	AGT
2	Agricultura de Riego		
3	Cuerpo de Agua	Cuerpo de Agua	CA
4	Bosque de Pino	Bosque de Coníferas	BC
5	Bosque de Pino-Encino		
6	Bosque de Enebro-Pino		
7	Matorral Inerme	Matorral Inerme	MI
8	Pastizal Inducido	Pastizal Inducido	PI
9	Selva Baja Caducifolia	Selva Baja Caducifolia	SBC
10	Suelo Desprovisto de Vegetación	Suelo Desprovisto de Vegetación	SDV
11	Urbano	Urbano	URB
12	Invernadero	Invernadero	INV

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar cuáles han sido los cambios de uso del suelo (segundo objetivo específico), se empleó la percepción remota, definida como una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, suponiendo que entre la superficie y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, y que no engloba sólo el proceso de adquirir las imágenes, sino también el posterior procesamiento e interpretación (Chuvienco, 2011).

Se aplicaron métodos de percepción remota tales como; el cálculo de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI¹⁷), clasificación supervisada¹⁸ mediante la aplicación del clasificador de máxima verosimilitud a fin de obtener el mejor resultado en los cambios de uso de suelo, y finalmente la aplicación de la fórmula de tasa anual de cambio propuesta por la FAO (Tabla 21).

Tabla 21. Métodos de percepción remota

Método	Ecuación	Propósito
Índice de Vegetación del Diferencia Normalizada (NDVI)	$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$	Este índice aprovecha el contraste de las características de dos bandas de un dataset raster multiespectral; que permite generar una imagen que muestra el verdor (la biomasa relativa).
Clasificación supervisada	N/A	Se basa en la disponibilidad de áreas de entrenamiento. Se trata de áreas de las que se conoce <i>a priori</i> la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una signatura espectral.
Tasa anual de cambio	$d = \frac{S_2}{S_1}^{n/1} - 1$	Indica los cambios ocurridos entre un periodo de tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) por sus siglas en inglés, es el índice de vegetación más utilizado debido a la sencillez de su cálculo, y por disponer de un rango de variación fijo entre -1 y +1, lo que permite visualizar el comportamiento de la actividad fotosintética de la vegetación debido a la alta reflectancia y con ello entender su estado actual mediante la aplicación de la siguiente formula:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$$

¹⁷ Normalization Difference Vegetation Index (NDVI)

¹⁸ Mediante la aplicación de sitios de entrenamiento en las categorías asignadas

Donde:

- R_{NIR} : corresponde a la banda 8 de Sentinel-2
- R_{Red} : corresponde a la banda 4 de Sentinel-2

Consideremos ahora que, en condiciones normales la vegetación viva tiene reflectancia alta en el espectro Infrarrojo Cercano (*Near Infrared*) y baja en el espectro visible, como se muestra en la firma espectral de vegetación de la Figura 15.

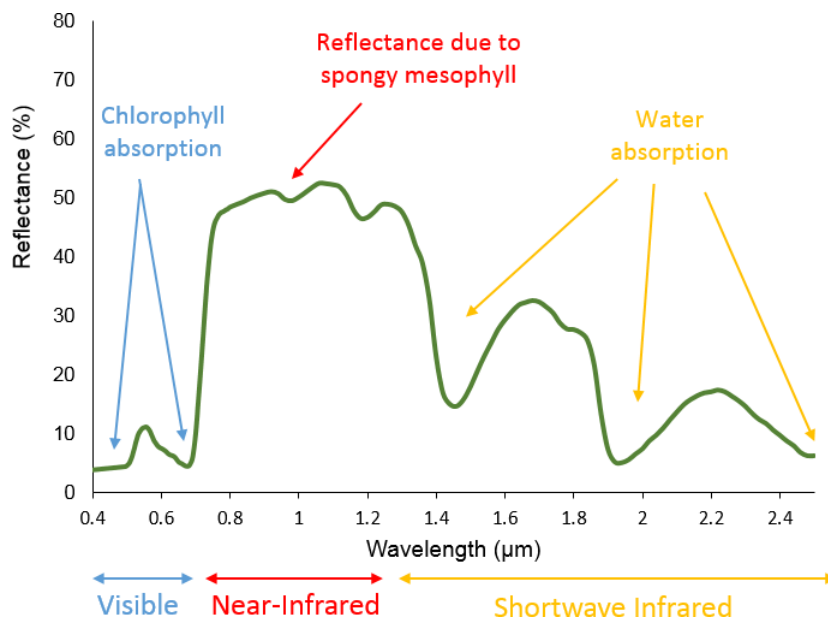


Figura 15. Firma espectral de vegetación viva.

Fuente: gsp.humboldt.edu

Por otra parte, el compuesto utilizado en el tratamiento de las imágenes de satélite Sentinel-2 fue 3-4-8 RGB, dado que permite una mejor visualización de las nueve categorías destacando el bosque de coníferas, selva baja caducifolia, urbano e invernadero. Conviene subrayar que el tratamiento de la información se realizó a través del software libre QGIS, así mismo, la edición, validación y generación de los productos cartográficos.

Simultáneamente, el proceso de clasificación de las imágenes de satélite Sentinel-2 (que consiste en un proceso de asignación de píxeles a clases); se realizó mediante el empleo del software TerrSet; por lo cual, se utilizó la clasificación supervisada.

La clasificación supervisada se define como el proceso de usar muestras de identidad conocida (campos de entrenamiento) para clasificar píxeles de identidad desconocida (Lillesand, *et al.*, 2015); así mismo, entre los principales criterios para su selección incluyen: 1) el control de categorías adaptadas a un propósito específico, 2) está vinculada a aéreas específicas de identidad conocida, y 3) se pueden detectar errores graves en la clasificación, examinando los datos de entrenamiento.

El proceso de clasificación supervisada de las imágenes de satélite Sentinel-2 (2019), se realizó mediante el software TerrSet, dividiendo el proceso en tres etapas: etapa de entrenamiento, etapa de asignación y validación de resultados con trabajo de campo.

En primer lugar, se establecieron campos de entrenamiento de las nueve categorías definidas previamente; con un total de 305 sitios de entrenamiento, con un promedio mínimo de 30 sitios por categoría, no obstante, las categorías de cuerpo de agua y matorral inerme se definieron un total de 10 y 5 campos de entrenamiento, respectivamente debido a la poca superficie que presenta en el área de estudio.

En segundo lugar, la asignación consistió en aplicar el método de Clasificación de Máxima Verosimilitud (*Maximum Likelihood Classification*); éste utiliza los datos de entrenamiento como un medio para estimar las medias y las variaciones de las clases, que luego se utilizan para estimar las probabilidades. Considera no solo la media o el promedio de los valores al asignar la clasificación, sino también la variabilidad de los valores de brillo en cada clase (Campbell y Wynne, 2011).

Finalmente, una vez aplicado el método de Clasificación de Máxima Verosimilitud, se procedió a rectificar la información obtenida con base en imágenes de satélite y trabajo de campo, a fin de validar el uso de suelo actual en el PERTMZ.

Con relación en la tasa de cambio de uso de suelo, está permite calcular los cambios ocurridos entre dos periodos de tiempo (1974 y 2019), por cada una de las categorías de análisis para el presente estudio.

De modo que para el periodo de análisis la tasa de cambio de cobertura de uso de suelo en el periodo comprendido entre 1974 y 2019, se calculó utilizando la fórmula propuesta por la FAO (1996) siendo:

$$d = [(S_2/S_1)^{1/n} - 1] * 100$$

Donde:

- *d*: tasa de cambio (%)
- *S*₁: superficie en el año inicial (ha)
- *S*₂: superficie en el año final (ha)
- *n*: número de años del periodo de análisis

Por otra parte, el cambio de uso de suelo, se realizó mediante la matriz de transición (cambios) propuesta por Pontius *et al.*, 2004 y que permite el análisis espacio-temporal por categoría de la dinámica de cambio de uso de suelo, indicando las pérdidas, ganancias, el intercambio, cambio total y cambio neto por categoría de análisis como se representa en la Tabla 22.

Tabla 22. Matriz de cambios

Año	2019 (t2)										
1974 (t1)	AGR	CA	BC	MI	PI	SBC	SDV	URB	INV	Total T1	Pérdidas
AGR	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄	Y ₁₅	Y ₁₆	Y ₁₇	Y ₁₈	Y ₁₉	ΣY ₁	ΣY ₁₊ -Y ₁₁
CA	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₂₃	Y ₂₄	Y ₂₅	Y ₂₆	Y ₂₇	Y ₂₈	Y ₂₉	ΣY ₂	ΣY ₂₊ -Y ₂₂
BC	Y ₃₁	Y ₃₂	Y ₃₃	Y ₃₄	Y ₃₅	Y ₃₆	Y ₃₇	Y ₃₈	Y ₃₉	ΣY ₃	ΣY ₃₊ -Y ₃₃
MI	Y ₄₁	Y ₄₂	Y ₄₃	Y ₄₄	Y ₄₅	Y ₄₆	Y ₄₇	Y ₄₈	Y ₄₉	ΣY ₄	ΣY ₄₊ -Y ₄₄
PI	Y ₅₁	Y ₅₂	Y ₅₃	Y ₅₄	Y ₅₅	Y ₅₆	Y ₅₇	Y ₅₈	Y ₅₉	ΣY ₅	ΣY ₅₊ -Y ₅₅
SBC	Y ₆₁	Y ₆₂	Y ₆₃	Y ₆₄	Y ₆₅	Y ₆₆	Y ₆₇	Y ₆₈	Y ₆₉	ΣY ₆	ΣY ₆₊ -Y ₆₆
SDV	Y ₇₁	Y ₇₂	Y ₇₃	Y ₇₄	Y ₇₅	Y ₇₆	Y ₇₇	Y ₇₈	Y ₇₉	ΣY ₇	ΣY ₇₊ -Y ₇₇
URB	Y ₈₁	Y ₈₂	Y ₈₃	Y ₈₄	Y ₈₅	Y ₈₆	Y ₈₇	Y ₈₈	Y ₈₉	ΣY ₈	ΣY ₈₊ -Y ₈₈
INV	Y ₉₁	Y ₉₂	Y ₉₃	Y ₉₄	Y ₉₅	Y ₉₆	Y ₉₇	Y ₉₈	Y ₉₉	ΣY ₉	ΣY ₉₊ -Y ₉₉
Total T2	ΣY ₊₁	ΣY ₊₂	ΣY ₊₃	ΣY ₊₄	ΣY ₊₅	ΣY ₊₆	ΣY ₊₇	ΣY ₊₈	ΣY ₊₉		
Ganancias	ΣY ₊₁ -Y ₁₁	ΣY ₊₂ -Y ₂₂	ΣY ₊₃ -Y ₃₃	ΣY ₊₄ -Y ₄₄	ΣY ₊₅ -Y ₅₅	ΣY ₊₆ -Y ₆₆	ΣY ₊₇ -Y ₇₇	ΣY ₊₈ -Y ₈₈	ΣY ₊₉ -Y ₉₉		

Fuente: Elaboración con base a Pontius *et al.* 2004.

Con respecto a la tabla 16, las columnas representan la superficie en (ha) de cada una de las nueve categorías de análisis del tiempo 1 (t₁), mientras que las filas contienen la superficie de las categorías del tiempo 2 (t₂). La diagonal con sombreado indica la persistencia (*superficies que no presentaron cambios*) de cada una de las categorías; la sumatoria indica el total de superficie para el tiempo 1 y el tiempo 2 de cada categoría y simultáneamente se presentan las ganancias y pérdidas entre ambos tiempos, las cuales se calcularon con base a las formulas de la Tabla 22.

Tabla 23. Fórmulas de matriz de cambios

No.	Formula	Descripción
1	$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj}$	Ganancia: es la diferencia entre la columna del total del tiempo de 1974 (P_{+j}) y la persistencia (P_{jj})
2	$L_{ij} = P_{j+} - P_{jj}$	Pérdida: es la diferencia entre la fila del total del tiempo de 2019 (P_{j+}) y la persistencia (P_{jj})
3	$S_j = 2 * MIN(G_{ij}, L_{ij})$	Intercambio: indica la cantidad de superficie que se ha intercambiado entre categorías
4	$DT_j = G_{ij} + L_{ij}$	Cambio total: es la suma de las ganancias (G_{ij}) y pérdidas (L_{ij})
5	$D_j = DT_j - S_j$	Cambio neto: es la diferencia entre el cambio total (DT_j) y el intercambio (S_j) de cada categoría

Fuente: Elaboración propia con base a Pontius *et al.* 2004.

3.4.3. Evaluación de la fiabilidad

Con el propósito de cuantificar la fiabilidad del mapa de uso de suelo del año 2019 del PERTMZ, éste se sometió al proceso de evaluación de confiabilidad el cual se realizó a partir de la metodología propuesta por Stehman y Czaplewski (1998), que consiste en tres fases:

- Diseño del muestreo: Consistió en determinar la unidad de muestreo (pixel), el método de muestreo aleatorio estratificado¹⁹ el cual permite tener cierto control sobre la distribución de los sitios de muestreo por cada categoría de análisis y establecer el tamaño de la muestra para estimar la fiabilidad del mapa. Este último se estableció con base en los parámetros establecidos por Mass y Couturier (2011), donde establecen que para obtener una fiabilidad global estimada (ρ) del 80 % y un medio-intervalo de confianza²⁰ (error) del 5 % para el mapa se deben aplicar 246 sitios de verificación como se muestra en la Tabla 24.

¹⁹ ... potencialmente útil para la evaluación de precisión.

²⁰ Intervalo de confianza (IC) es un rango (o un intervalo) de valores utilizados para estimar el valor real de un parámetro poblacional (Triola, 2018).

Tabla 24. Tamaño de muestra por categoría en función de Fiabilidad (p) y Error (B)

Error (%)	Fiabilidad (%)				
	90	80	70	60	50
2.5	553	983	1291	1475	1537
5	138	246	323	369	384
10	35	61	81	92	96

Fuente: Mass y Couturier (2011).

- Evaluación de los sitios de verificación: Consistió en la localización de los sitios de verificación mediante trabajo de campo; dichos sitios de verificación (305) se sobrepusieron en el mapa de uso de suelo y vegetación de 2019, para corroborar las categorías que se definieron previamente en el proceso de clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud.
- Análisis de los datos: Consistió en el desarrollo de una matriz de error con el propósito de contrastar la información de los sitios de verificación (verdad terreno) con las categorías previamente clasificadas en el mapa de uso de suelo y vegetación (verdad imagen). La matriz de error está integrada por filas que representan las categorías de referencia (i) y columnas que representan las categorías del mapa (j) como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Matriz de Error

Verdad terreno (i)	Verdad imagen (j)				
	j_1	j_2	...	j_q	Total
i_1	i_1j_1	i_1j_2	...	i_1j_q	i_{1+}
i_2		i_2j_2	...	i_2j_q	i_{2+}
...
i_q	i_qj_1	i_qj_2	...	i_qj_q	i_{q+}
Total	$_j1$	$_j2$...	$_jq$	$\sum_+ j i_+$

Fuente: Elaboración propia con base en Camacho *et al.* (2015).

Donde:

- ij = número de píxeles (superficie) correctamente clasificados de cada categoría,
- i_{1+} = corresponde a la suma de los píxeles correspondientes a la categoría de referencia (i_1),
- $_j1$ = corresponde a la suma de los píxeles de la categoría del mapa (j_1).

- $\sum j$ o i_+ es el total de la suma de los pixeles de las categorías de referencia ($\sum i_+$), o bien, el total de la suma de los pixeles correspondientes a las categorías del mapa ($\sum j$)

Posteriormente, con los datos obtenidos se determinaron y calcularon los índices de fiabilidad, así como el medio-intervalo de confianza (error); en la Tabla 26 se describen cada una de las ecuaciones para obtener los índices de confiabilidad y medio-intervalo de confianza. No obstante previo al cálculo de estos índices, se realizó la corrección de la matriz de error a partir del método sugerido por Card (1982), que consiste en ponderar el número de sitios de verificación en relación con la superficie de cada categoría representada en el mapa²¹.

Tabla 26. Ecuaciones para obtener índices de confiabilidad y medio intervalo de confianza

Índice	Ecuación	Descripción
Fiabilidad Global	$P_c = \sum_{k=1}^q p_{kk}$	Es la proporción de pixeles (superficie) correctamente clasificados en el mapa, producto de la fotointerpretación de imágenes de satélite. El coeficiente derivado de su cálculo representa la probabilidad para cualquier sitio en el mapa de ser correctamente clasificado.
Medio Intervalo de Confianza ²²	$B = z_{\alpha/2} \sqrt{\sum_{j=1}^q p_{jj} \frac{(\Pi_{jj} - p_{jj})}{n_{+j}}}$	Corresponde al error de la estimación precisa de la confiabilidad del mapa. Dónde: $z_{\alpha/2}$ es el valor que separa a un área de $\alpha/2$ en la cola del lado derecho de la distribución normal estándar (el valor de $z_{\alpha/2}$ en este estudio corresponde a 1.96 ²³); p es la confiabilidad esperada; y n corresponde al tamaño de la muestra.
Error de Comisión	$EC_k = 1 - \frac{p_{kk}}{p_{+k}}$	Indica la proporción de sitios de verificación cartografía en una cierta clase j , pero que en realidad pertenecen a otra categoría.
Error de Omisión	$EO_k = 1 - \frac{p_{kk}}{p_{k+}}$	Representa la proporción de sitios de verificación correspondientes a una categoría j que fue cartografiada en otra.

²¹ La corrección de la matriz de error se obtiene aplicando la ecuación $p'_{ij} = \frac{\pi_j p_{ij}}{p_{+j}}$

²² En este estudio el cálculo del medio intervalo de confianza (error) para la fiabilidad global, del usuario y del productor se realizó con base en Card (1982).

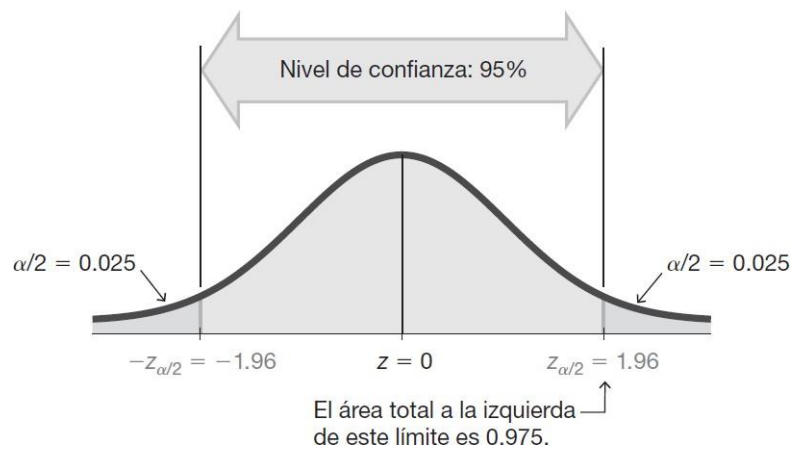
²³ El valor crítico (z_{α}) en la distribución normal estándar con base en Triola (2018) se define como una puntuación z en el límite que separa las puntuaciones z que son significativamente bajas o altas, para este estudio el valor crítico utilizado fue 1.96 con un nivel de confianza del 0.95.

Fiabilidad del Usuario	$FU_k = \frac{p_{kk}}{p_{+k}}$	Se interpreta como la probabilidad que un sitio clasificado como j y aleatoriamente seleccionado sea realmente j en el terreno.
Fiabilidad del Productor	$FP_k = \frac{p_{kk}}{p_{k+}}$	Es la proporción de sitios de verificación de la clase j que están representados en el mapa o en la base de datos como tal.

Fuente: Elaboración propia con base en Stehman y Czaplewski (1998); Mass y Couturier (2011) y Camacho *et al.* (2015).

Ahora bien, es importante entender que el valor crítico es una puntuación z con una propiedad de que está en el límite que separa un área de $\alpha/2$ en la cola derecha de la distribución normal estándar como se muestra en la Figura 16.

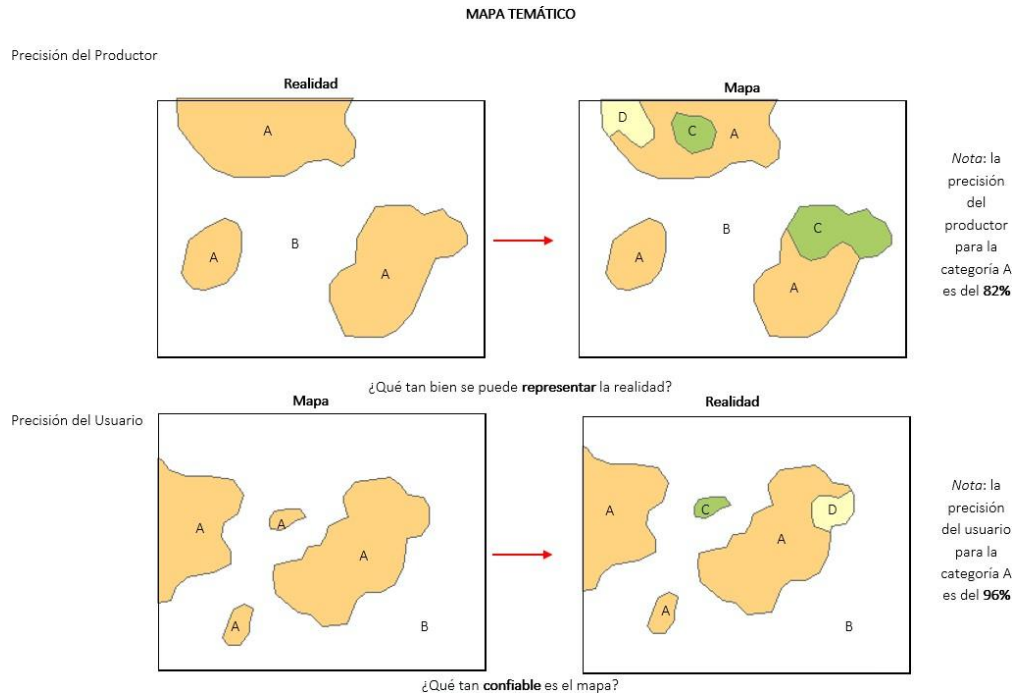
Figura 16. Determinación del valor crítico $z_{\alpha/2}$ para un nivel de confianza del 95%.



Fuente: Retomado de Triola (2018).

Por otro lado, para comprender mejor lo referente a la fiabilidad del usuario y productor en la elaboración de un mapa temático como es el caso de los mapas de uso de suelo y vegetación; se muestra en la Figura 17 que la fiabilidad estará en función de que tan confiable es el mapa temático con respecto a la realidad y de que tan bien se puede representar correctamente las categorías de análisis en el mapa, respectivamente.

Figura 17. Precisión del productor y usuario en la clasificación de un mapa temático.



Fuente: Elaboración propia.

Para corroborar la fiabilidad global del mapa, se aplicó el cálculo de las estadísticas de precisión de clasificación Kappa²⁴ (K) y Tau (τ), que permiten evaluar la matriz de error y la concordancia al azar en la fiabilidad del mapa como se describen en la Tabla 27:

Tabla 27. Estadísticas de precisión de clasificación.

Índice	Ecuación	Descripción
Kappa (K)	$K = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2}$	Es una medida de acuerdo general de una matriz. A diferencia de la precisión general (la relación entre la suma de los valores diagonales y el número total de recuentos de celdas en la matriz), el coeficiente Kappa también tiene en cuenta los elementos fuera de la diagonal de la matriz de error.
Tau (τ)	$\tau = \frac{\theta_1 - \theta'_2}{1 - \theta'_2}$	De forma similar a Kappa, es una medida de acuerdo general de una matriz. Sin embargo, la diferencia es que considera los elementos fuera de la diagonal de la matriz de error <i>a priori</i> a su corrección.

Fuente: Elaboración propia con base en (Rossiter, 2014).

²⁴ Es importante resaltar que los resultados de ambos índices por lo general siempre son menores o iguales a la precisión global, pero nunca superiores.

Conclusiones preliminares

En este capítulo se presentaron los materiales, métodos, las técnicas y fuentes de información para el cumplimiento de los objetivos establecidos en la presente investigación.

Por lo anterior, se describieron las técnicas de percepción remota empleadas para el tratamiento de la información y la generación de los productos cartográficos. De manera que, se expone el método de clasificación supervisada de máxima verosimilitud, la ecuación para el cálculo de la tasa de cambio propuesta por la FAO, la matriz de transición (cambios) utilizado para este tipo de estudios y, el Índice de Vegetación Normalizada que permite la identificación del vigor de la cobertura forestal en el área de estudio.

Cabe señalar, además que se presentó la metodología empleada para la evaluación de la fiabilidad en la elaboración del mapa de uso de suelo de 2019, con el propósito de conocer la calidad del mapa y evaluar el éxito de la clasificación supervisada. Así mismo, podemos señalar que se justificó mediante un esquema metodológico sistemático el alcance, método, diseño y estructura de la investigación. Al mismo tiempo, se mostró mediante una tabla las nueve categorías definidas para el análisis del estudio, así mismo, la información referida de las imágenes de satélite Sentinel-2.

CAPITULO IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El propósito de este capítulo consiste en presentar los resultados obtenidos producto de la metodología aplicada mediante técnicas de percepción remota, la evaluación de la fiabilidad global del mapa de uso de suelo y vegetación del año 2019, la tasa de cambio por categoría, así mismo, el cálculo de indicadores de cambio entre el periodo de estudio y finalmente la discusión de cada uno de estos resultados.

4.1. Uso del suelo para los años 1974 y 2019

Los resultados de la metodología previamente descrita en el capítulo III, se obtuvieron dos mapas de uso de suelo y vegetación del PERTMZ para los años 1974 y 2019 (Mapa 10 y Mapa 11), los cuales representan cartográficamente la distribución espacio-temporal de la dinámica de uso de suelo y vegetación que se ha presentado durante el periodo de análisis.

Posteriormente, se presenta la evaluación de la fiabilidad global del mapa de uso de suelo y vegetación del año 2019, así como, la tasa de cambio por categoría de análisis, particularmente de la cobertura forestal, su patrón de pérdida, fragmentación y dinámica actual; así mismo, el análisis de ganancias, pérdidas e intercambios por categoría mediante los indicadores de cambio.

Finalmente, se realiza el análisis comparativo de los cambios de uso de suelo y vegetación durante el periodo comprendido entre 1974 y 2019, así como su representación cartográfica. En este apartado se presenta el análisis de uso de suelo y vegetación para el año 1974 y posteriormente para el año 2019, además de los factores que han incidido en el cambio de uso de suelo en el PERTMZ.

4.1.1. *Uso de suelo y vegetación en el año 1974*

Los valores presentados (en color gris oscuro) de la Figura 18, muestran la superficie total en hectáreas de cada categoría de uso de suelo para el año 1974.

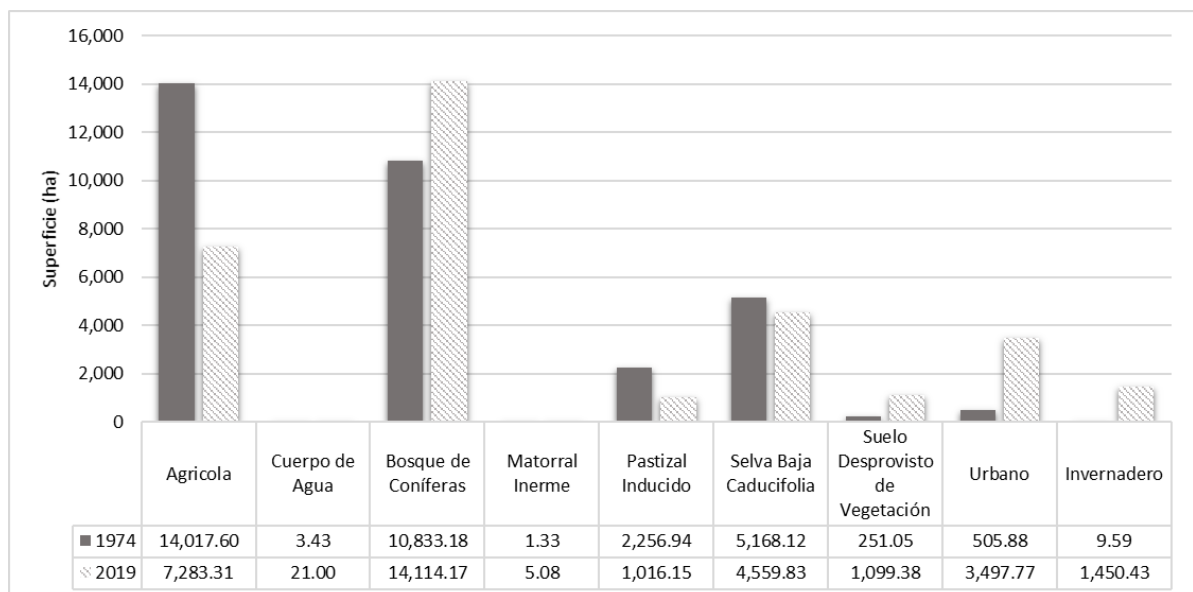


Figura 18. Superficie de Uso de Suelo en 1974.

Fuente: Elaboración propia.

De la superficie total de 33,047.12 ha, el 42.4 % estaba bajo uso de suelo agrícola; ocupando una extensión de 14,017.60 ha, la cual presentaba una distribución en el centro y norte del PERTMZ principalmente en los municipios de Tenango del Valle y Tenancingo. En este sentido, el uso agrícola se caracterizaba por el cultivo de subsistencia y de amplias extensiones de tierra.

En relación con las siguientes categorías de uso de suelo, el bosque de coníferas representaba el 32.8 % (10,833.20 ha), presentando su mayor núcleo al noroeste de Tenancingo y sobre la ladera de barlovento de la sierra que limita los municipios de Tenancingo y Malinalco al este; seguido en cuanto a superficie por la selva baja caducifolia con el 15.6 % (5,168.12 ha) la cual presentó la mayor distribución al sur en los municipios de Zumpahuacan y Malinalco y sobre la ladera de sotavento (contrario a barlovento) al este y finalmente el pastizal inducido con el 6.8 % (2,256.94 ha) el cual se presentó de manera dispersa en varias partes del PERTMZ.

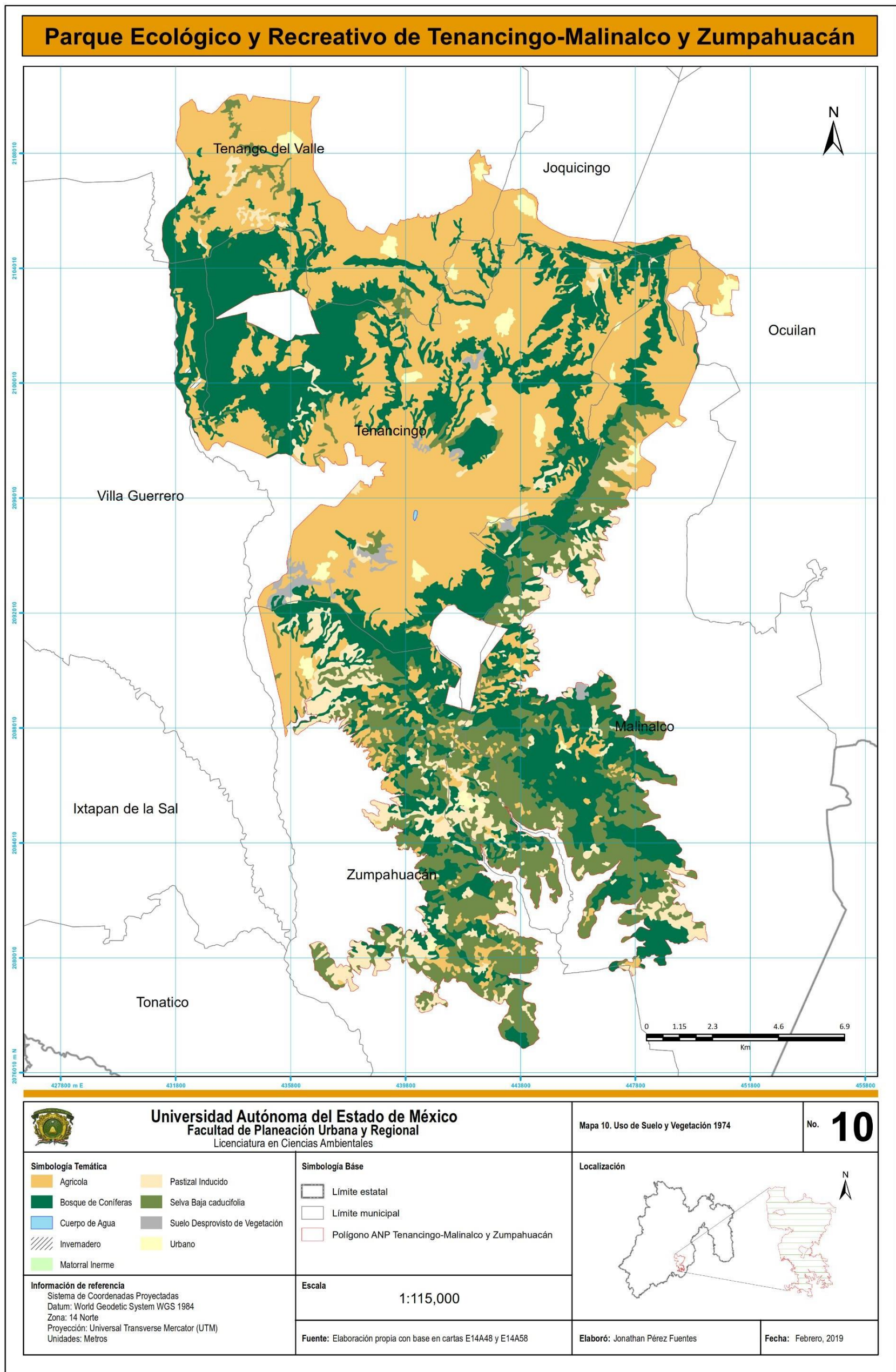
Con respecto al uso urbano del PERTMZ, presentó una superficie de 505.88 ha (1.5 %), siendo las localidades de Atlatlahuca y Zictepec en el municipio de Tenango del Valle, así como, San Juan Xochiaca, San Martin Coapaxtongo y Tecamatlán en el municipio de Tenancingo las que presentaban la mayor concentración de población.

Hay que mencionar, además que la localidad de Joquicingo es la única cabecera municipal que se encuentra totalmente dentro de los límites del PERTMZ.

En cuanto al suelo desprovisto de vegetación, presentó una superficie de 251.05 ha, seguido de los invernaderos con 79.59 ha, los cuerpos de agua perenes con 3.43 ha y el matorral inerme con 1.33 ha. Hay que subrayar que las condiciones iniciales de cobertura y uso de suelo, es decir, del año 1974 se encontraban siete años previos al decreto del PERTMZ en 1981. Razón por la cual, el análisis implica conocer las condiciones en las que fue decretado el área de estudio y como ha sido la pérdida de cobertura forestal y el cambio de cobertura y uso de suelo al 2019.

Hecha esta salvedad, en el Mapa 10 se observa el patrón de distribución de la cobertura forestal en el PERTMZ (considerando la forma restringida que presenta), se concentraba en dos “núcleos” principales; al norte en el municipio de Tenancingo (rodeando el Parque Hermenegildo Galeana) y al sur en los municipios de Malinalco y Zumpahuacán. De modo que se evidencia la transición biogeográfica entre el sistema forestal de coníferas y el sistema forestal de selva baja caducifolia en el norte y sur, respectivamente.

Mapa 10. Uso de Suelo y Vegetación en 1974



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Uso de suelo y vegetación en el año 2019

Los valores presentados [en color gris oscuro] de la Figura 19, muestran la superficie total en hectáreas de cada categoría de uso de suelo para el año 2019.

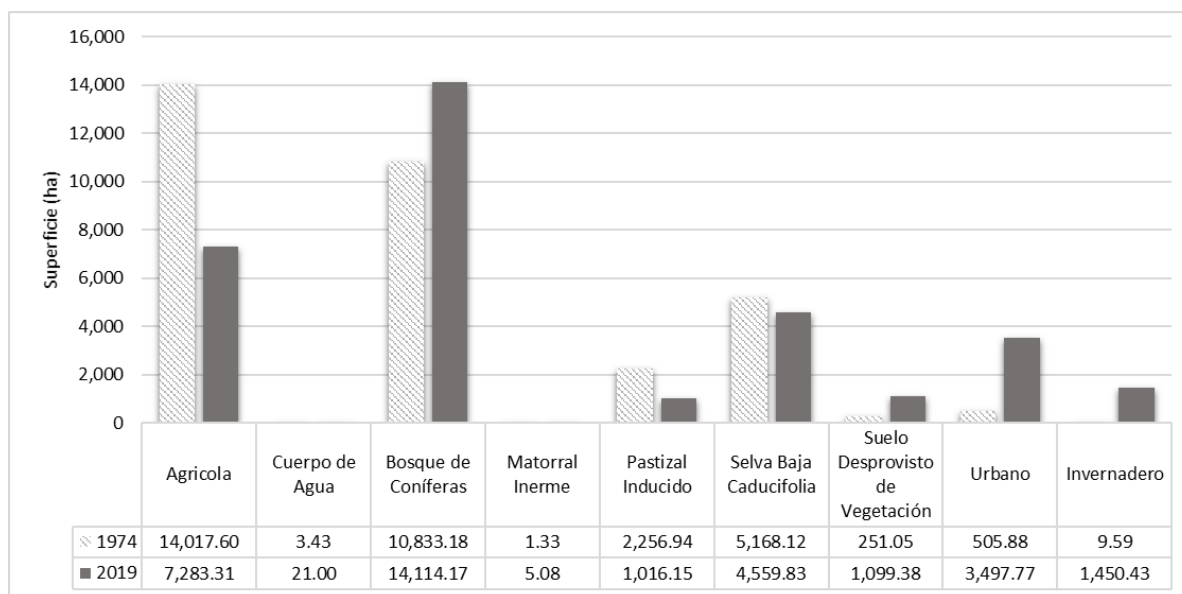


Figura 19. Superficie de Uso de Suelo en 2019.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidencian que se produjo un cambio significativo en el uso de suelo en el PERTMZ entre 1974 y 2019. El uso agrícola era el principal uso de suelo en el área de estudio. Los valores muestran que la superficie de 14,017.60 ha había disminuido y que la superficie de otras categorías sobre todo los cuerpos de agua, urbano e invernadero habrían aumentado, la pérdida total del uso agrícola fue de 7,518.04 ha entre 1974 y 2019.

La tendencia de cambio de uso de suelo mostró un aumento²⁵ en las categorías de bosque de coníferas siendo el de mayor incremento pasando del 32.8 % (10,833.18 ha) al 39.5 % (13,068.68 ha), seguido por el uso urbano con el 8.4 %, el suelo desprovisto de vegetación e invernadero con el 7.1 y 5.5 %, respectivamente.

En el caso del incremento de la superficie de bosque de coníferas, se presentó sobre todo en los municipios de Tenancingo al norte, Zumpahuacán al sur, y Malinalco al

²⁵ Con base en las superficies corregidas por el método de Card (1982).

este. No obstante, el aumento significativo del pastizal inducido, los invernaderos y el uso de suelo agrícola, contribuyó a la modificación espacial y la fragmentación de la cobertura forestal, lo que implicó una reducción de los núcleos forestales mayores. De manera análoga, se presentó un aumento de parches en el caso de Tenango del Valle, perforaciones en concreto en algunas zonas de Tenancingo y el aumento de núcleos de bosque pequeños, los cuales son indicativos de la continua desconexión funcional del sistema forestal en el PERTMZ (Mapa 11), debido a que alteran el número y la composición de las especies contribuyendo a la disminución de varias poblaciones biológicas (Fahrig, 2003). Por su parte, Hill y Curran (2003) argumentan que los parches también influyen en las comunidades de plantas debido a sus efectos en procesos ecológicos como la polinización, dispersión de semillas y la competencia de las plantas, y en consecuencia influyen en el número y la composición de las especies de un paisaje.

Por lo que se refiere al uso de suelo urbano, este se ha caracterizado por la construcción de asentamientos humanos de forma céntrica (Sterling y Villanueva, 2011). En este sentido, para el 2019 representó el 8.4 % (2,776.01 ha). De manera que, se evidenció el crecimiento de la zona urbana sobre uso agrícola principalmente en la cabecera municipal de Tenancingo y Joquicingo, así como, en las localidades de Atlatlahuca, Zictepec (en Tenango), Tecomatlán, San Martín Coapaxtongo y Tepalcatepec en Tenancingo.

Algo semejante ocurre con los invernaderos que presentaron un incremento del 5.5 % (1,824.84 ha), siendo la segunda categoría que más extensión ha presentado sobre la categoría agrícola en las últimas cuatro décadas como se muestra espacialmente en la Figura 20. Hay que mencionar, además que la distribución de invernaderos presenta un patrón espacial en la zona centro-norte de Tenancingo y en los límites con el municipio de Villa Guerrero, resultado de la especialización florícola de la región, además, de estar asociado por el aumento en los rendimientos en la producción y su comercialización. En relación con la selva baja caducifolia, presentó una disminución en superficie pasando del 15.6 % al 13.8 % (4,559.83 ha).

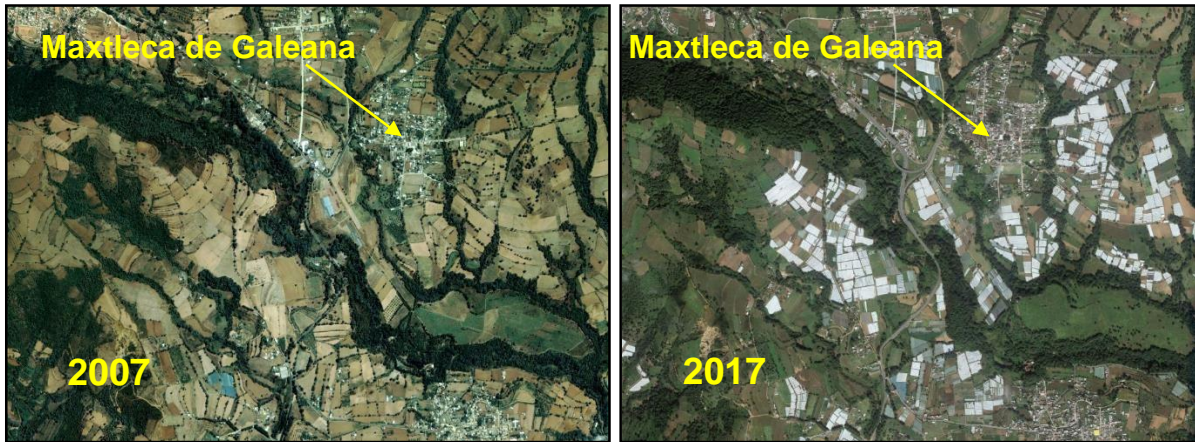


Figura 20. Evidencia del aumento espacial de invernaderos en el PERTMZ.

Fuente: Imágenes de Satélite Sentinel-2.

Es así que la pérdida de cobertura forestal es particularmente considerable en los municipios de Tenancingo y Zumpahuacan, donde se evidencia que las principales causas directas han sido la extensión de la frontera agrícola y el pastizal inducido e incendios forestales como se observa en las Figuras 21 y 22. De acuerdo con Lininger (2011), se evidenció que efectivamente la extensión de la agricultura a pequeña escala está relacionada con la pérdida de cobertura forestal. Sin embargo, con menor impacto en contraste con la agricultura comercial.



Figura 21. Evidencia de causas de pérdida de cobertura forestal.

Fuente: Elaboración propia.

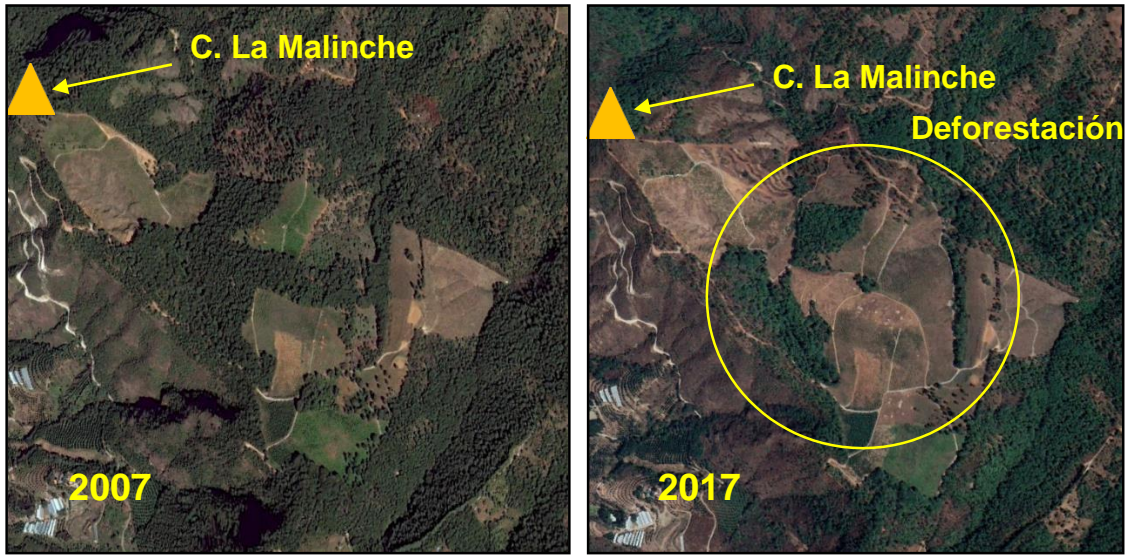


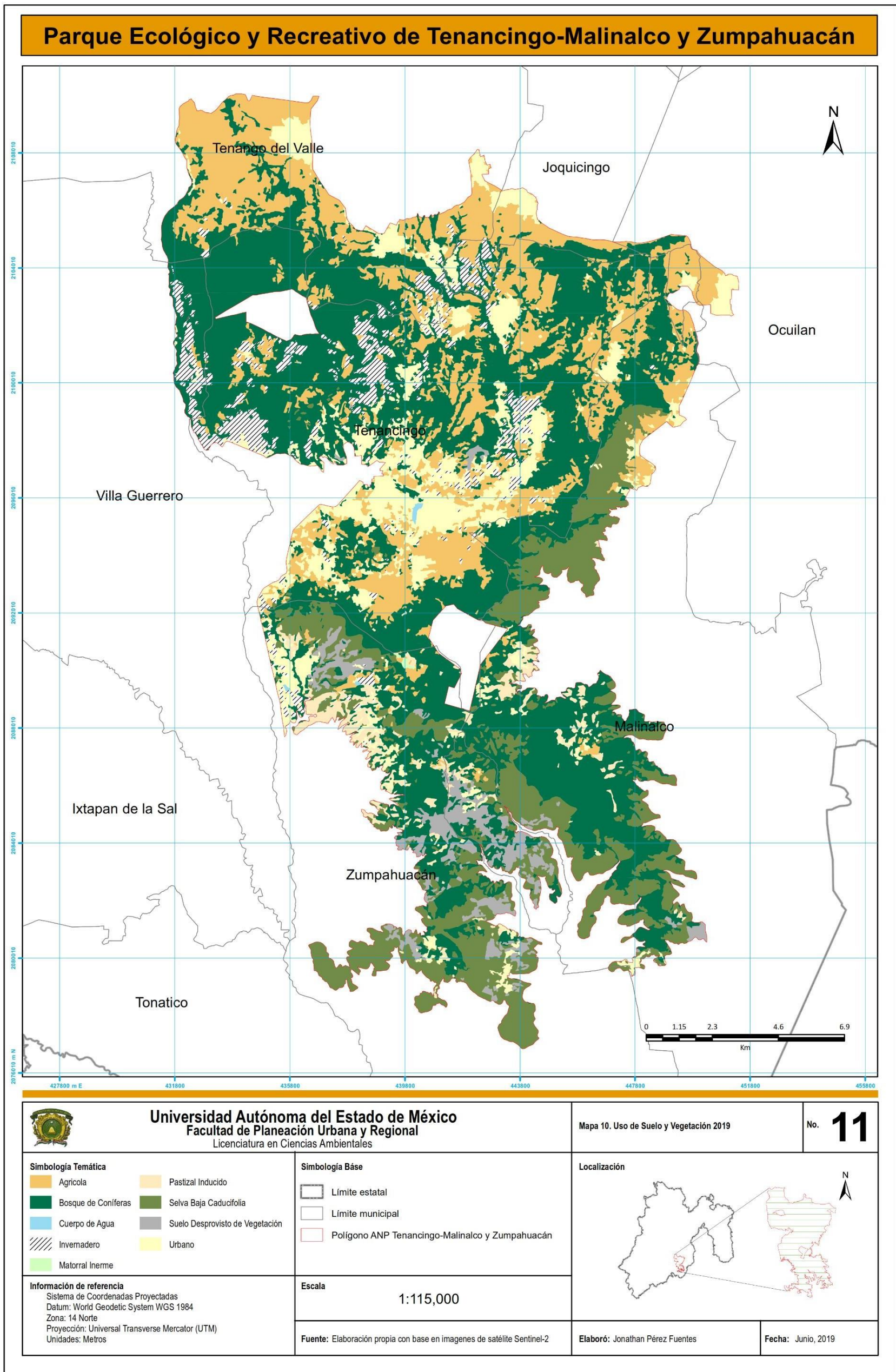
Figura 22. Evidencia de deforestación y fragmentación del paisaje.

Fuente: Imágenes de Satélite Sentinel-2.

El resultado producto de la representación y comparación espacio-temporal de la pérdida de cobertura forestal y cambio de uso de suelo entre 1974 y 2019, evidenció categóricamente los cambios presentados espacialmente en el PERTMZ, resultado de las interacciones de las actividades del ser humano con su ambiente (Enger y Smith, 2016). Además, la elaboración de la cartografía sirvió de base para describir, explicar y analizar en términos cuantitativos (Mas *et al.*, 2003) la dinámica que han presentado las nueve categorías de uso del suelo al comparar ambos mapas (1974 y 2019).

Ahora bien, los cambios ocurridos en el uso agrícola están relacionados principalmente con el crecimiento urbano y la producción florícola en invernaderos, puesto que para el periodo de análisis el uso agrícola fue la categoría con mayor pérdida, por su parte, las categorías que obtuvieron mayores ganancias fueron el suelo desprovisto de vegetación producto de la deforestación (Figura 22), urbano e invernadero (Figura 20).

Mapa 11. Uso de Suelo y Vegetación en 2019



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Validación de Mapa de Uso de Suelo y Vegetación de 2019

El Mapa 11 fue validado mediante sitios de verificación con trabajo de campo y fotointerpretación, de modo que en la Tabla 28 se presenta la matriz de error producto de la verificación entre las categorías de referencia (terreno) y las categorías del mapa. En estas últimas, del total de 305 sitios de muestreo, 261 coincidieron con las categorías del mapa clasificado por el método de Máxima Verosimilitud (*Maximum Likelihood Classification*) y 44 corresponden a una categoría distinta como se representa en el Mapa 12 en la página 88.

Dicho lo anterior, de los 44 sitios de verificación que correspondieron a otra categoría distinta estos coinciden principalmente en su localización en la porción sur del área de estudio, debido a la mayor heterogeneidad que presenta en el paisaje de tipo selva baja caducifolia, pastizal inducido, matorral inerte y suelo desprovisto de vegetación, por lo cual al momento de realizar la clasificación se consideraron en la categoría incorrecta.

Tabla 28. Matriz de Error del año 2019.

Año 2019		Verdad mapa (j)								Total i	
		AGR	CA	BC	MI	PI	SBC	SDV	URB		INV
Verdad terreno (i)	AGR	40	0	0	0	0	0	0	9	1	50
	CA	2	6	1	0	0	1	0	0	0	10
	BC	0	0	50	0	0	0	0	0	0	50
	MI	0	0	0	3	0	2	0	0	0	5
	PI	5	0	0	0	21	0	2	2	0	30
	SBC	1	0	2	0	0	27	0	0	0	30
	SDV	3	0	1	1	5	3	15	2	0	30
	URB	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50
	INV	3	0	0	0	0	0	0	0	47	50
Total j		54	6	54	4	26	33	17	63	48	305

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, en la Tabla 29 se presentan nuevamente los datos de los sitios de muestreo presentados anteriormente, pero ahora expresados en proporción (porcentaje) del número total de sitios de verificación, obteniendo un resultado total de proporción igual a 1.

Tabla 29. Matriz de Error expresada en proporción.

Año 2019		Verdad mapa (j)								Total i	
		AGR	CA	BC	MI	PI	SBC	SDV	URB		INV
Verdad terreno (i)	AGR	0.131	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.003	0.164
	CA	0.007	0.020	0.003	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.033
	BC	0.000	0.000	0.164	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.164
	MI	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.016
	PI	0.016	0.000	0.000	0.000	0.069	0.000	0.007	0.007	0.000	0.098
	SBC	0.003	0.000	0.007	0.000	0.000	0.089	0.000	0.000	0.000	0.098
	SDV	0.010	0.000	0.003	0.003	0.016	0.010	0.049	0.007	0.000	0.098
	URB	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.164	0.000	0.164
INV	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.154	0.164	
Total j		0.177	0.020	0.177	0.013	0.085	0.108	0.056	0.207	0.157	1
Proporción π		0.220	0.001	0.427	0.000	0.031	0.138	0.033	0.106	0.044	1

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 30 presenta los valores resultado de la aplicación del método de Card (1982), con el propósito de evaluar la precisión del mapa con base al muestreo aleatorio estratificado por categoría del mapa, en donde, el resultado de la suma de las columnas es igual a la proporción de la categoría representada en el mapa y de igual forma obteniendo un resultado total de proporción igual a 1.

Tabla 30. Matriz de Error expresada en proporción y corregida (método de Card, 1982).

Año 2019		Verdad mapa (j)								Total i	
		AGR	CA	BC	MI	PI	SBC	SDV	URB		INV
Verdad terreno (i)	AGR	0.163	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.001	0.18
	CA	0.008	0.001	0.008	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.02
	BC	0.000	0.000	0.395	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.40
	MI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.01
	PI	0.020	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000	0.004	0.003	0.000	0.05
	SBC	0.004	0.000	0.016	0.000	0.000	0.113	0.000	0.000	0.000	0.13
	SDV	0.012	0.000	0.008	0.000	0.006	0.013	0.029	0.003	0.000	0.07
	URB	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.084	0.000	0.08
INV	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.06	
Total j		0.220	0.001	0.427	0.000	0.031	0.138	0.033	0.106	0.044	1
Proporción π		0.220	0.001	0.427	0.000	0.031	0.138	0.033	0.106	0.044	1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 31 se presentan los coeficientes correspondientes a los índices de confiabilidad e intervalos de confianza del mapa clasificado por el método de Máxima

Verosimilitud; siendo un total de ocho índices, de los cuales seis se observan a nivel categoría: la fiabilidad del usuario, el error de comisión, el medio intervalo de confianza del usuario, la fiabilidad del productor, el error de omisión y el medio intervalo de confianza de productor. Por su parte, la fiabilidad global del mapa de uso de suelo y vegetación obtenida fue del 85.35%, con un medio intervalo de confianza de ± 5.84 %.

Tabla 31. Coeficientes de los índices de confiabilidad e intervalos de confianza.

AÑO 2019	Categorías (%)									Fiabilidad Global (%)	Medio Intervalo de Confianza de Fiabilidad Global (%)
	AGR	CA	BC	MI	PI	SBC	SDV	URB	INV		
Fiabilidad del usuario	74.07	100.00	92.59	75.00	80.77	81.82	88.24	79.37	97.92	85.35	± 5.84
Error de comisión	25.93	0.00	7.41	25.00	19.23	18.18	11.76	20.63	2.08		
Medio Intervalo de Confianza del usuario	12.15	0.00	7.26	37.96	14.10	13.80	11.53	11.22	3.96		
Fiabilidad del productor	91.06	3.04	100.00	1.36	47.29	85.01	41.13	100.00	77.83		
Error de omisión	8.94	96.96	0.00	98.64	52.71	14.99	58.87	0.00	22.17		
Medio Intervalo de Confianza del productor	6.07	0.00	4.01	0.68	5.98	6.50	3.81	19.31	5.58		

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en las Tablas 32 y 33, se presentan los valores correspondientes a la probabilidad de asignación de las categorías cartografiadas y los coeficientes de proporción y los coeficientes de la proporción, así como, la superficie resultado del ajuste de los errores de clasificación, respectivamente.

Tabla 32. Probabilidades de asignación de las categorías cartografiadas.

AÑO 2019	Probabilidades de Asignación										Superficie (ha)
	AGR	CA	BC	MI	PI	SBC	SDV	URB	INV		
Categorías de referencia	AGR	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.02	7,283.31
	CA	0.04	1.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	21.00
	BC	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14,114.17
	MI	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	5.08
	PI	0.09	0.00	0.00	0.00	0.81	0.00	0.12	0.03	0.00	1,016.15
	SBC	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.00	4,559.83
	SDV	0.06	0.00	0.02	0.25	0.19	0.09	0.88	0.03	0.00	1,099.38
	URB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.00	3,497.77
INV	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	1,450.43	
Proporción Π	0.220	0.001	0.427	0.000	0.031	0.138	0.033	0.106	0.044	33,047.12	

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar ambas tablas, se observa que la proporción corregida aplico en diferente grado para las nueve categorías de análisis. Por mencionar algunos ejemplos se tiene que en la categoría de invernadero de 4.4 % (1,450.43 ha) de superficie que se encuentra representada en el mapa, 98.0% (1,029.42 ha) corresponde efectivamente a esta categoría y 2.0 % (421.01 ha) restante pertenece, en realidad, a la categoría

agrícola. Por otro lado, 6.0 % (436.99 ha) de la superficie cartografiada como agrícola corresponde realmente a la categoría invernadero. Esto se debe al error de omisión ocurrido en la categoría invernadero, por tanto, la superficie que comprende a esta se encuentra sub-representada en el mapa con 4.4 % cuando en realidad ocupa 5.5 % del área del PERTMZ.

Las categorías de cuerpo de agua, matorral inerme, pastizal inducido y el suelo desprovisto de vegetación, también se encuentran subrepresentadas, con 0.06 % (21.0 ha), 0.02 % (5.08 ha), 3.07 % (1,016.15 ha) y 3.33 % (1,099.38 ha), respectivamente. Por lo anterior, la proporción correcta que corresponde a estas categorías es 2.1 % (690.30 ha), 0.8 % (280.16 ha), 5.3 % (1,735.50 ha) y 7.1 % (2,358.30 ha), respectivamente.

Por su parte, la categoría de uso agrícola se encuentra sobrerrepresentada producto de los errores de comisión con 22.0 % (7,283.31 ha), siendo que realmente le corresponde 17.9 % de proporción. Así mismo, las categorías de bosque de coníferas, selva baja caducifolia y urbano se encuentran sobrerrepresentadas, con 42.71 % (14,114.17 ha), 13.80 % (4,559.83 ha) y 10.58 % (3,497.77 ha). Por lo anterior, la proporción correcta que corresponde a estas categorías es 39.5 % (13,068.68 ha), 13.3 % (4,388.39 ha) y 8.4 % (2,776.01 ha), respectivamente.

Tabla 33. Coeficientes de la proporción y superficie resultado del ajuste de los errores de clasificación.

Año 2019	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Categoría		
AGR	0.179	5,924.94
CA	0.021	690.30
BC	0.395	13,068.68
MI	0.008	280.16
PI	0.053	1,735.50
SBC	0.133	4,388.39
SDV	0.071	2,358.30
URB	0.084	2,776.01
INV	0.055	1,824.84
Total	1	33,047.12

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 34, se observa la comparación de los resultados obtenidos referentes a la fiabilidad global del mapa de uso de suelo y vegetación en relación con el cálculo de las estadísticas de precisión Kappa y Tau. Por esta razón, se puede comparar que, con 305 unidades de muestreo, una fiabilidad estimada del 80 % y un medio intervalo de confianza del 5 %, la fiabilidad global del mapa esté entre 75 y 85 %, dicho esto, se corrobora con base en los resultados obtenidos 85.35 % en la fiabilidad global, Kappa y Tau con 80.67 % y 82.40 %, respectivamente que la fiabilidad global se encuentra en el intervalo esperado.

Tabla 34. Estadísticas de precisión.

Global	Kappa	Tau
85 .35 %	80 .67 %	82 .40 %

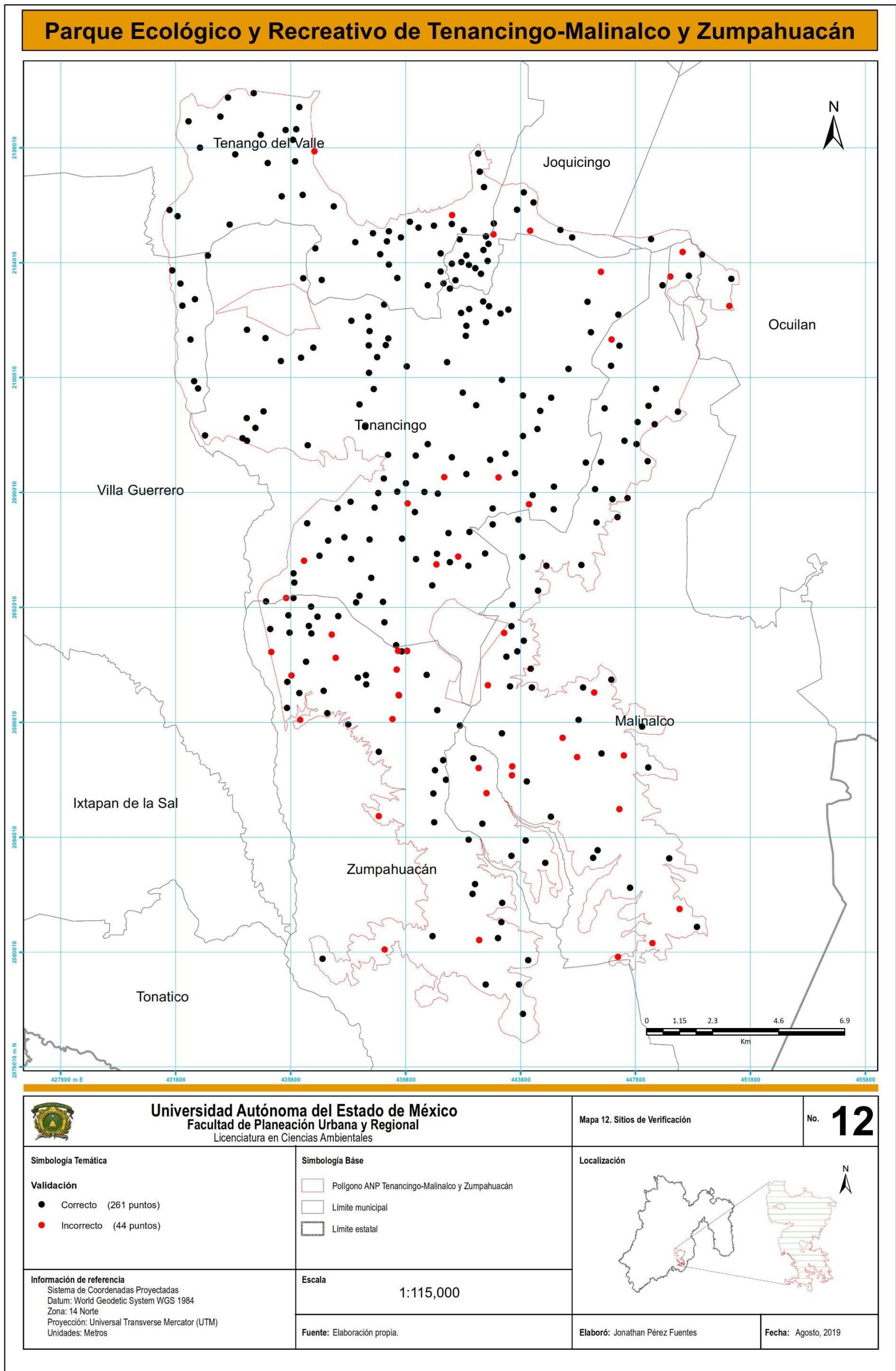
Fuente: Elaboración propia.

El resultado producto de la metodología de evaluación de la fiabilidad del mapa, muestra que el Mapa de Uso de Suelo y Vegetación del año 2019 (Mapa 12) del PERTMZ se encuentra en el porcentaje mínimo permisible de validación cartográfica que corresponde al 80% (Mas *et al.*, 2003; Mass y Couturier, 2011).

Aunado a lo anterior, la aplicación de la metodología propuesta por (Stehman y Czaplewski, 1998), permitió evaluar la fiabilidad del mapa al realizar el diseño del muestreo con base en el muestreo aleatorio estratificado por categorías, la evaluación de los sitios de verificación y el análisis de los índices de fiabilidad que permitió la corrección de las superficies derivadas del mapa clasificado y evitó la sub o sobrerrepresentación de algunas categorías (Card, 1982). Además, el cálculo de las estadísticas de Kappa y Tau (Rossiter, 2014), permitió comparar el grado de fiabilidad global del mapa en relación con la estadística general de fiabilidad.

Finalmente, el proceso de corrección, fue de gran importancia para el cálculo de las tasas de cambio de cada categoría, ya que implicó obtener resultados con mayor precisión y validez estadística en lo que respecta particularmente a la dinámica de cambio espacio-temporal de la cobertura forestal (bosque de coníferas y selva baja caducifolia) en el PERTMZ.

Mapa 12. Sitios de verificación



Fuente: Elaboración propia.

4.3. Tasa de Cambio de Uso de Suelo entre 1974 y 2019

Durante el periodo de 1974 al 2019, se registraron tasas de cambio en las categorías de análisis; la Tabla 35 resume los resultados de la cobertura de uso de suelo (en ha) y la tasa de cambio por superficie (en %) por cada categoría para el PERTMZ.

Tabla 35. Tasa de Cambio entre 1974 y 2019

Uso de Suelo	1974	2019	TC
Agrícola	14,017.60	7,283.31	-1.44%
Bosque de Coníferas	10,833.18	14,114.17	0.59%
Cuerpo de Agua	3.43	21.00	4.11%
Matorral Inerme	1.33	5.08	3.02%
Pastizal Inducido	2,256.94	1,016.15	-1.76%
Selva Baja Caducifolia	5,168.12	4,559.83	-0.28%
Suelo Desprovisto de Vegetación	251.05	1,099.38	3.34%
Urbano	505.88	3,497.77	4.39%
Invernadero	9.59	1,450.43	11.80%

Fuente: Elaboración propia

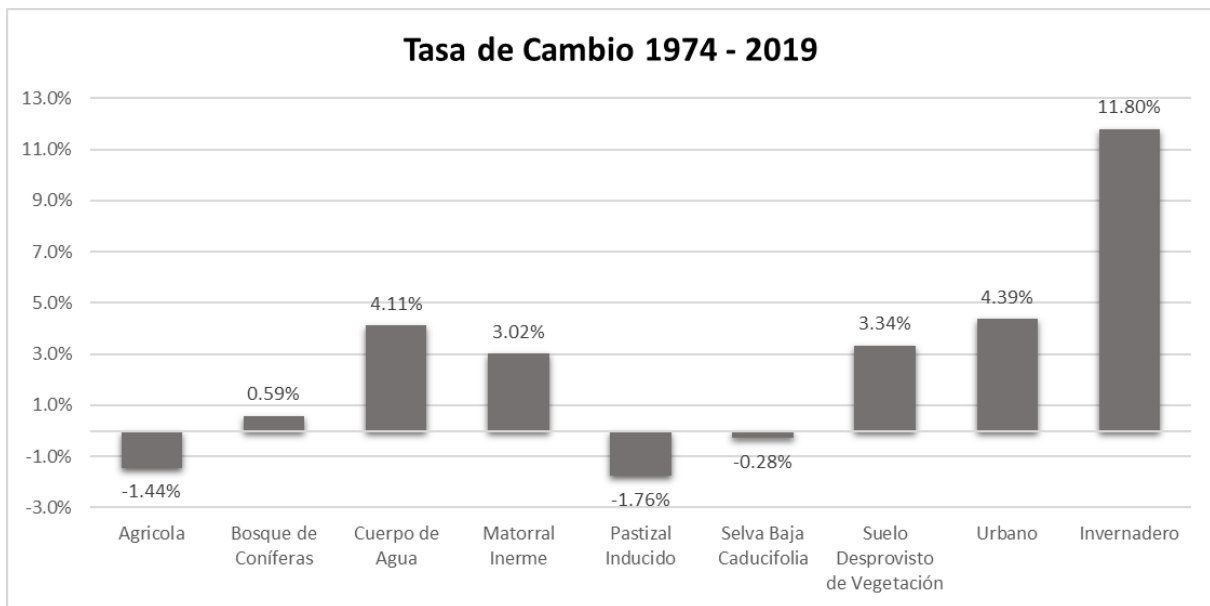
La superficie agrícola era el principal uso de suelo en 1974 con 14,017.62 ha el 42.4% de la superficie total, seguido principalmente por el bosque de coníferas con 10,833.16 ha (32.8 %), selva baja caducifolia con 5,168.12 ha (15.6 %), pastizal inducido con 2,249.94 ha (6.8 %) y el uso urbano con 505.88 ha (1.5 %). Sin embargo, las categorías con menor superficie eran el matorral inerme, suelo desprovisto de vegetación, cuerpos de agua e invernadero.

Por lo anterior, la superficie agrícola disminuyó del 42.4 % (14,017.62 ha) en 1974 al 22.0 % (7,283.31 ha), simultáneamente el pastizal inducido y la selva baja caducifolia presentaron un decremento del 6.83 % (2,256.94 ha) al 3.07 % (1,016.15 ha) y 13.8 % (5,168.12 ha) al 13.8 % (4,559.83 ha), respectivamente para el año 2019. En contraste, los usos de suelo que presentaron un incremento en superficie fueron, bosque de coníferas, cuerpos de agua, matorral inerme, área urbana, invernadero y el suelo desprovisto de vegetación que aumentaron progresivamente de 32.78 %, 0.01%, 0.004 %, 1.5 %, 0.02 % y 0.7 % en 1974 a 42.71 %, 0.06 %, 0.02 %, 10.58 %, 4.39 % y 3.33 % en 2019, respectivamente.

Con respecto al siguiente resultado, se registraron tres categorías con tasas de cambio notables con base en una fiabilidad del 85.35%; siendo estas los cuerpos de agua, matorral inerme e invernadero con el 11.19 %, 11.29 % y 11.07 %, respectivamente como se muestra en la Figura 22. Conviene subrayar que la categoría de invernadero al ser la que presento mayor tasa de cambio, se debió al incremento en el número de ranchos (Figura 23) que presentaron un cambio de uso de suelo agrícola de temporal a producción florícola en invernadero en los municipios de Tenancingo, Villa Guerrero y Zumpahuacan. Además, las categorías de suelo desprovisto de vegetación y urbano también presentaron tasas de cambio significativas del 3.34 % y 4.39 %, respectivamente.

Por el contrario, las categorías de pastizal inducido, agrícola y selva baja caducifolia registraron decremento en las tasas de cambio con -1.76 %, -1.44 % y -0.28 %, respectivamente. Siendo el pastizal inducido el de mayor pérdida de superficie derivado de cambios de uso a agrícola, urbano e invernadero.

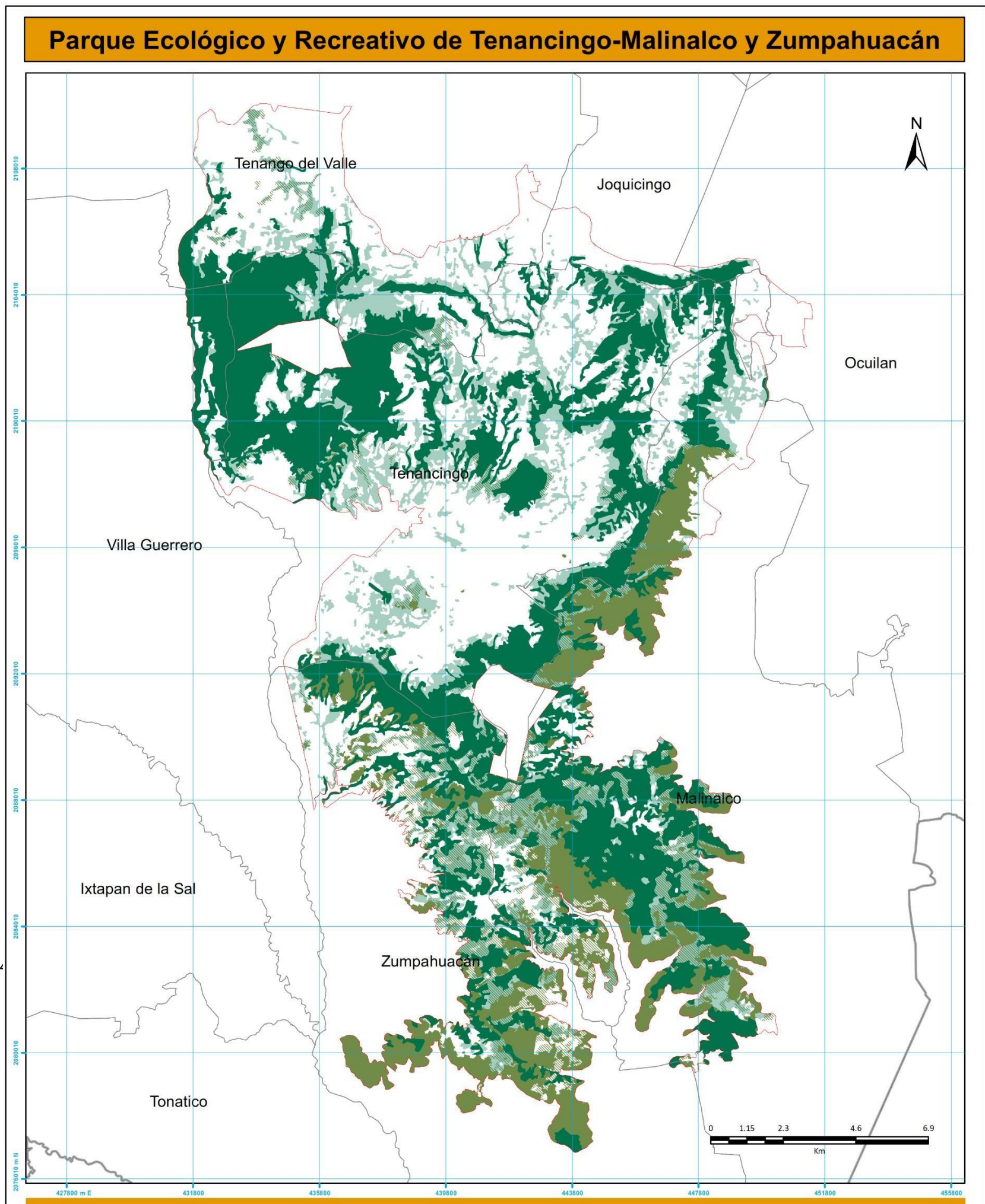
Figura 23. Tasa de Cambio entre 1974 y 2019.


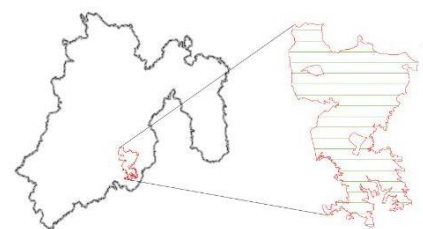


Fuente: Elaboración propia

El Mapa 13 representa la distribución de superficie ganada y/o pérdida entre 1974 y 2019 de la cobertura forestal. En este sentido, el bosque de coníferas presento ganancia en el municipio de Tenancingo, en cambio, la selva baja caducifolia presento pérdida principalmente en el municipio de Zumpahuacan.

Mapa 13. Tasa de Cambio Forestal 1974 al 2019



 <p>Universidad Autónoma del Estado de México Facultad de Planeación Urbana y Regional Licenciatura en Ciencias Ambientales</p>		<p>Mapa 12. Tasa de Cambio de Uso Forestal 2019</p>	<p>No. 12</p>
<p>Simbología Temática</p> <ul style="list-style-type: none"> Bosque de Coníferas en 1974 — Se conservo Bosque de Coníferas en 2019 — Ganancia Selva Baja Caducifolia en 1974 — Pérdida Selva Baja Caducifolia en 2019 — Se conservo 	<p>Simbología Base</p> <ul style="list-style-type: none"> Límite estatal Límite municipal Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán 	<p>Localización</p> 	
<p>Información de referencia Sistema de Coordenadas Proyectadas Datum: World Geodetic System WGS 1984 Zona: 14 Norte Proyección: Universal Transverse Mercator (UTM) Unidades: Metros</p>		<p>Escala 1:115,000</p>	
<p>Fuente: Elaboración propia con base en imágenes de satélite Sentinel-2</p>		<p>Elaboró: Jonathan Pérez Fuentes</p>	<p>Fecha: Junio, 2019</p>

Fuente: Elaboración propia.

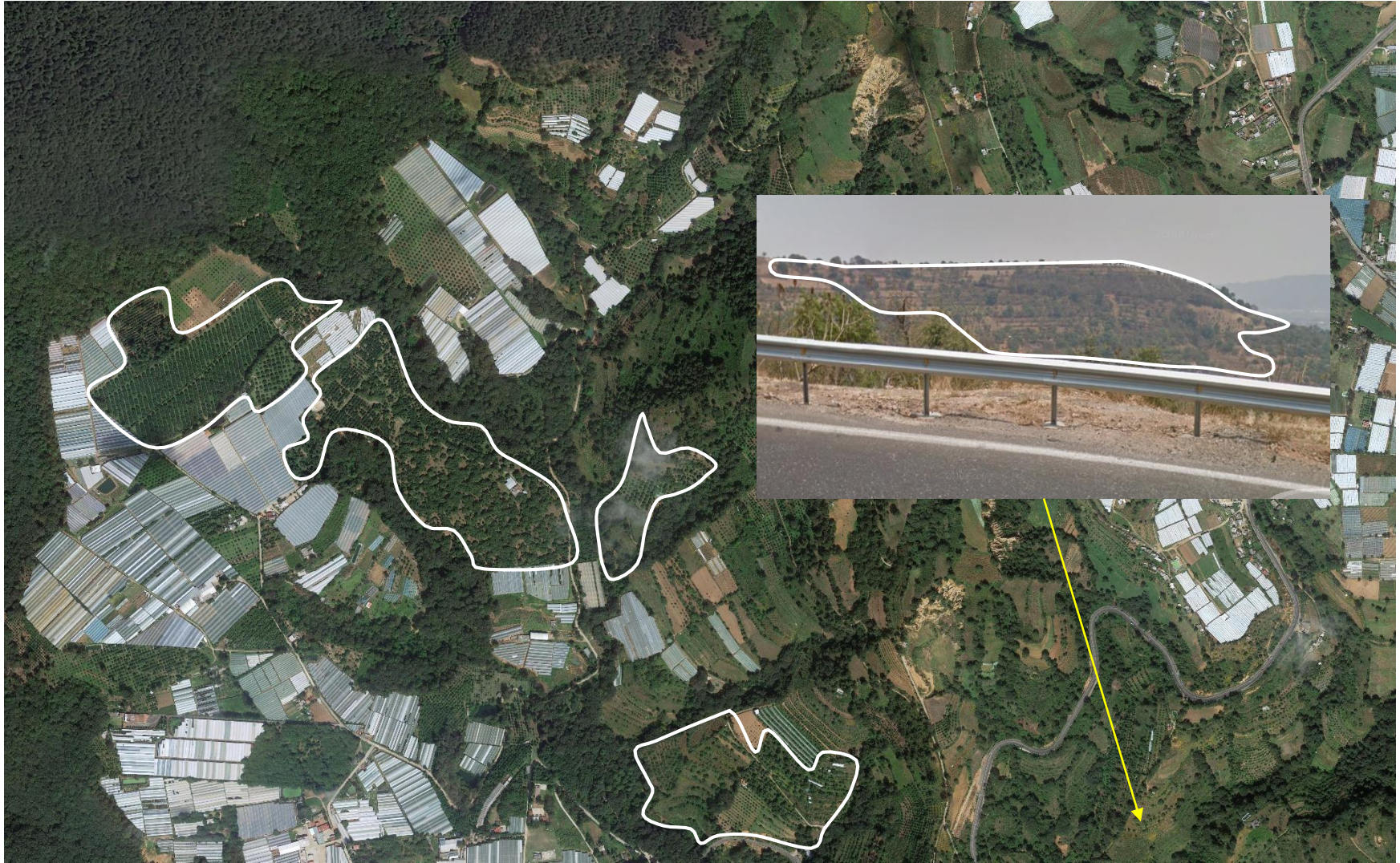


Figura 24. Ejemplo de ganancia de cobertura forestal.

Fuente: Servidor web de QGIS

4.4. Cambios de Uso de Suelo entre 1974 y 2019

En la Tabla 36 se presentan los 30 cambios de uso de suelo resultado de la dinámica espacio-temporal del PERTMZ entre 1974 y 2019, así mismo, se representan espacialmente los cambios ocurridos en el Mapa 13.

Tabla 36. Cambios de uso de suelo

No.	Cambio de Uso de Suelo	%
1	Agrícola a Bosque de Coníferas	25.88
2	Agrícola a Cuerpos de Agua	0.09
3	Agrícola a Invernadero	8.82
4	Agrícola a Matorral Inerme	0.01
5	Agrícola a Suelo Desprovisto de Vegetación	0.59
6	Agrícola a Urbano	19.38
7	Bosques de Coníferas a Agrícola	3.36
8	Bosques de Coníferas a Cuerpos de Agua	0.001
9	Bosques de Coníferas a Invernadero	1.41
10	Bosques de Coníferas a Pastizal Inducido	1.21
11	Bosques de Coníferas a Selva Baja Caducifolia	7.03
12	Bosques de Coníferas a Suelo Desprovisto de Vegetación	1.20
13	Bosques de Coníferas a Urbano	0.71
14	Pastizal Inducido a Agrícola	1.16
15	Pastizal Inducido a Cuerpos de Agua	0.02
16	Pastizal Inducido a Invernadero	0.14
17	Pastizal Inducido a Selva Baja Caducifolia	6.73
18	Pastizal Inducido a Suelo Desprovisto de Vegetación	2.63
19	Pastizal Inducido a Urbano	0.52
20	Selva Baja Caducifolia a Agrícola	0.75
21	Selva Baja Caducifolia a Bosque de Coníferas	12.98
22	Selva Baja Caducifolia a Cuerpos de Agua	0.001
23	Selva Baja Caducifolia a Invernadero	0.08
24	Selva Baja Caducifolia a Matorral Inerme	0.01

25	Selva Baja Caducifolia a Pastizal Inducido	0.97
26	Selva Baja Caducifolia a Suelo Desprovisto de Vegetación	2.55
27	Selva Baja Caducifolia a Urbano	0.83
28	Suelo Desprovisto de Vegetación a Agrícola	0.41
29	Suelo Desprovisto de Vegetación a Invernadero	0.03
30	Suelo Desprovisto de Vegetación a Urbano	0.35

Fuente: Elaboración propia

Por lo que se refiere a la transición de uso de suelo agrícola hacia urbano e invernadero fue de 2,660.14 y 1,210.41 ha, respectivamente principalmente en los municipios de Tenancingo y Villa Guerrero. Además, el crecimiento urbano se ha extendido sobre la cobertura de uso agrícola en la periferia de la cabecera municipal de Tenancingo, Santa Ana Ixtlahuatzingo y San Martín Coapaxtongo al norte y en algunas localidades del municipio de Zumpahuacán en la selva baja caducifolia al sur conllevando a su pérdida. Una de las razones por las que se ha reducido el uso agrícola se debe a la extensión del área urbana e invernaderos como se observa en la Figura 25, así mismo, en el caso de la selva baja caducifolia se debe al proceso de deforestación previamente mencionado e incendios forestales.

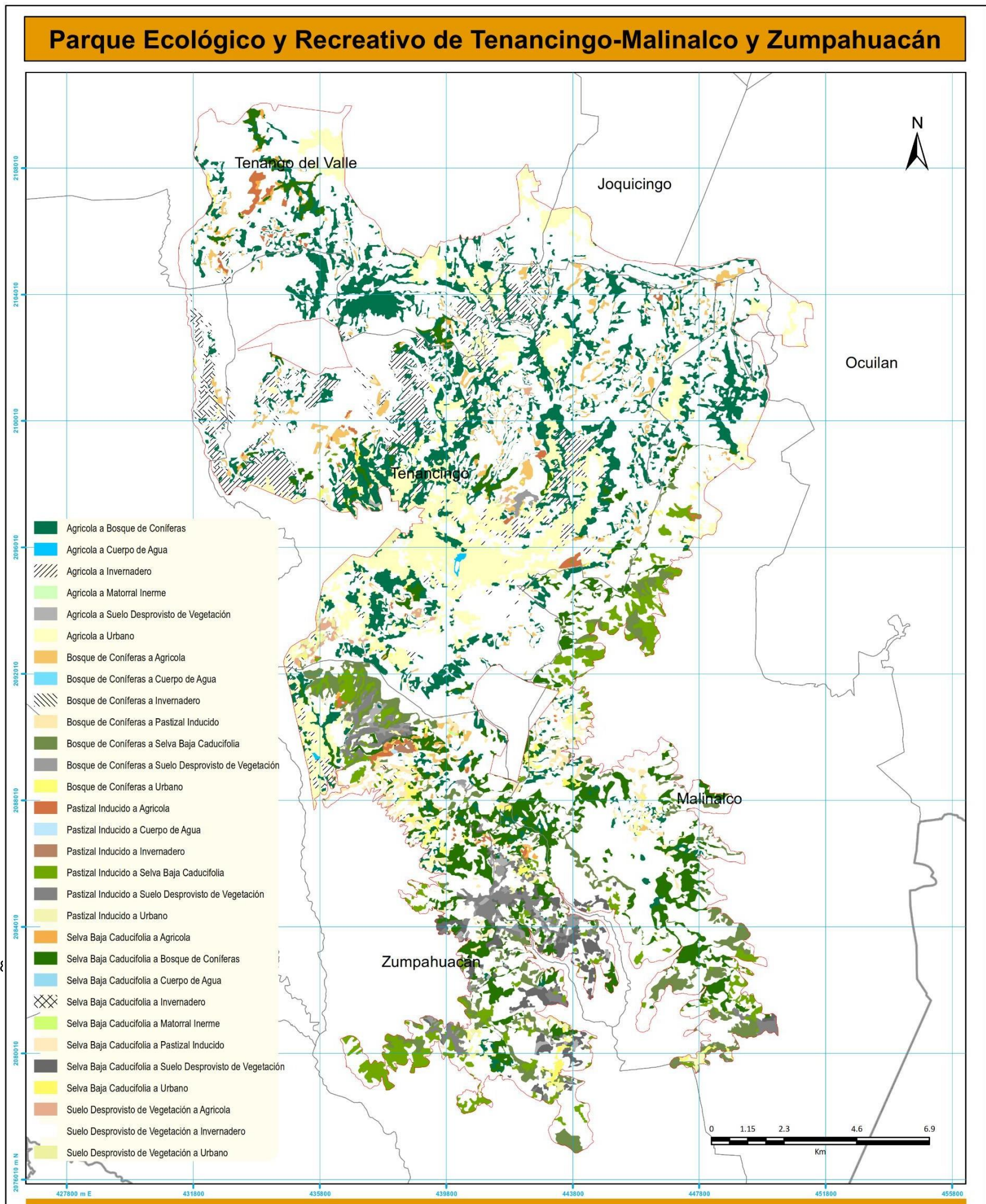
Por otra parte, los invernaderos presentaron transiciones significativas sobre el uso de suelo agrícola y el bosque de coníferas, concentrándose al norte de Tenancingo y en los límites con el municipio de Villa Guerrero. De donde se infiere que el aumento en los cuerpos de agua (Figura 25) está asociado con el riego agrícola y producción de cultivos florícolas de invernadero.


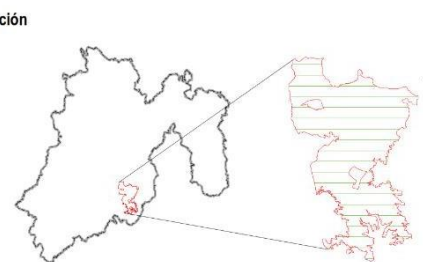


Figura 25. Invernaderos y Reservorios de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 14. Cambios de Uso de Suelo



 <p>Universidad Autónoma del Estado de México Facultad de Planeación Urbana y Regional Licenciatura en Ciencias Ambientales</p>		<p>Mapa 13. Cambios de Uso de Suelo entre 1974 y 2019</p>	<p>No. 13</p>
<p>Simbología Temática</p> <p>Nota: Para una mejor visualización de la simbología, está se sitúa en el cuerpo del mapa.</p>	<p>Simbología Base</p> <ul style="list-style-type: none"> Límite estatal Límite municipal Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán 	<p>Localización</p> 	
<p>Información de referencia</p> <p>Sistema de Coordenadas Proyectadas Datum: World Geodetic System WGS 1984 Zona: 14 Norte Proyección: Universal Transverse Mercator (UTM) Unidades: Metros</p>	<p>Escala</p> <p>1:115,000</p>	<p>Elaboró: Jonathan Pérez Fuentes</p> <p>Fecha: Junio, 2019</p>	
<p>Fuente: Elaboración propia con base en imágenes de satélite Sentinel-2</p>			

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Indicadores de cambios entre 1974 y 2019

La matriz de transición es una técnica que permite identificar los procesos de cambio de cobertura y uso de suelo, estos cambios se obtienen mediante la sobreposición (*intersección*) de mapas de dos tiempos (t_1 y t_2), es decir, del año 1974 y 2019.

Dicho lo anterior, se obtuvo mediante la matriz de transición indicadores los cuales representan los cambios de coberturas y usos de suelo en la forma de ganancias, pérdidas, persistencias, cambio total e intercambios por cada categoría durante el periodo comprendido entre 1974 y 2019 dichos indicadores se muestran en la Tabla 37.

Los resultados obtenidos, muestran en términos absolutos que la categoría que tuvo mayor cambio de superficie fue el uso agrícola con 6,734.29 ha de cambio neto respecto a la superficie que presentaba en 1974, seguido por el bosque de coníferas con 3,280.99 ha, urbano con 2,991.89 ha, invernaderos con 1,440.84 ha y el pastizal inducido con 1,240.79 ha. Por el contrario, las categorías que presentaron menor cambio de superficie fueron el suelo desprovisto de vegetación con 848.33 ha, la selva baja caducifolia con 608.29 ha, los cuerpos de agua con 17.57 ha y el matorral inerme con 3.75 ha.

Por su parte, el uso agrícola fue el que presentó la mayor dinámica de cambio de uso de suelo, perdiendo superficie por la extensión del área urbana y los invernaderos, sobre todo en la zona centro norte del PERTMZ en los municipios de Tenancingo y Villa Guerrero. Sin embargo, el bosque de coníferas y la selva baja caducifolia también presentaron cambios significativos, puesto que la frontera agrícola y el crecimiento urbano de las localidades con mayor concentración de población han contribuido a dicha pérdida sobre todo en los municipios de Tenancingo y Zumpahuacán.

Tabla 37. Indicadores de cambio 1974 – 2019.

Categoría	AGR	BC	CA	MI	PI	SBC	SDV	URB	INV	Total ha/%
Área (ha) 1974	14,017.60	10,833.18	3.43	1.33	2,256.94	5,168.12	251.05	505.88	9.59	33 ,047 .12
%	42.42	32.78	0.01	0.00	6.83	15.64	0.76	1.53	0.03	100 .00
Área (ha) 2019	7,283.31	14,114.17	21.00	5.08	1,016.15	4,559.83	1,099.38	3,497.77	1,450.43	33 ,047 .12
%	22.04	42.71	0.06	0.02	3.07	13.80	3.33	10.58	4.39	100 .00
Persistencia	6,499.56	8,781.31	3.43	1.33	715.32	2,670.81	140.10	505.88	9.59	19 ,327 .33
%	19.67	26.57	0.01	0.00	2.16	8.08	0.42	1.53	0.03	58 .48
Pérdidas	7,518.04	2,051.87	0.00	0.00	1,541.62	2,497.31	110.95	0.00	0.00	13 ,719 .79
%	22.75	6.21	0.00	0.00	4.66	7.56	0.34	0.00	0.00	41 .52
Ganancias	783.75	5,332.86	17.57	3.75	300.83	1,889.02	959.28	2,991.89	1,440.84	13 ,719 .79
%	2.37	16.14	0.05	0.01	0.91	5.72	2.90	9.05	4.36	41 .52
Cambio Total	8,301.79	7,384.73	17.57	3.75	1,842.45	4,386.33	1,070.23	2,991.89	1,440.84	13 ,719 .79
%	25.12	22.35	0.05	0.01	5.58	13.27	3.24	9.05	4.36	41 .52
Cambio Neto	6,734.29	3,280.99	17.57	3.75	1,240.79	608.29	848.33	2,991.89	1,440.84	8 ,583 .37
%	20.38	9.93	0.05	0.01	3.75	1.84	2.57	9.05	4.36	25 .97
Intercambios	1,567.50	4,103.74	0.00	0.00	601.66	3,778.04	221.90	0.00	0.00	5 ,136 .42
%	4.74	12.42	0.00	0.00	1.82	11.43	0.67	0.00	0.00	15 .54

ARG) Categoría Agrícola, CA) Cuerpo de Agua, BC) Bosque de Coníferas, MI) Matorral Inerme, PI) Pastizal Inducido, SBC) Selva Baja Caducifolia, SDV) Suelo Desprovisto de Vegetación, URB) Urbano, INV) Invernadero.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo que se refiere a la persistencia, las categorías con la mayor superficie sin cambio fueron el bosque de coníferas con 8,781.31 ha, seguido del uso agrícola con 6,499.56 ha y la selva baja caducifolia con 2,670.81 ha. La persistencia de estas categorías está relacionada significativamente con su extensión y localización, puesto que la cobertura forestal se encuentra sobre la fisiografía de sierra con menor accesibilidad y por lo tanto menor grado de urbanización y en lo que respecta al uso agrícola por ser una de las actividades económicas prioritarias de la zona. En contraste con lo anterior, los invernaderos, cuerpos de agua y el matorral inerme tuvieron la menor persistencia con 9.59 ha, 3.43 ha y 1.33 ha, respectivamente.

El mayor intercambio se manifestó en las categorías de bosque de coníferas con 4,103.74 ha, la selva baja caducifolia con 3,778.04 ha y el uso agrícola con 1,567.50 ha, resultado de la dinámica espacio-temporal que se ha presentado en el PERTMZ. En cambio, los cuerpos de agua, el matorral inerme, el uso urbano y los invernaderos no presentaron pérdidas debido a la persistencia de la superficie de 1974 y puesto que únicamente presentaron ganancias, sobre todo sobre el uso agrícola.

Ahora bien, el cambio total fue mayor sobre el uso agrícola con 8,301.79 ha entre 1974 y 2019, debido a que presentó los mayores cambios principalmente hacia el uso forestal, urbano e invernadero, similarmente, la cobertura forestal también presentó mayor dinámica de cambio con 7,384.73 ha y 4,386.33 ha para el bosque de coníferas y la selva baja caducifolia, respectivamente como se observa en el Mapa 13 (pág. 98).

Los índices de Braimoh para el periodo 1974-2019 expresan que las diferentes categorías tienden más a persistir que a ganar o perder superficie (índices de ganancia-persistencia y pérdida-persistencia). Mientras que el índice de cambio neto-persistencia indica que las categorías de agrícola, pastizal inducido y selva baja caducifolia presentan valores negativos, lo que significa que son más vulnerables a perder que a ganar superficie; por el contrario, las categorías de bosque de coníferas, cuerpos de agua, matorral inerme, suelo desprovisto de vegetación, urbano e invernadero tienden más a ganar que a perder superficie como se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38. Índices de Braimoh, 1974 -2019.

Categoría	Índice G/ P	Índice L/ P	Índice NC/ P
AGR	0.121	1.157	-1.036
BC	0.607	0.234	0.374
CA	5.120	0.000	5.120
MI	2.812	0.000	2.812
PI	0.421	2.155	-1.735
SBC	0.707	0.935	-0.228
SDV	6.847	0.792	6.055
URB	5.914	0.000	5.914
INV	150.242	0.000	150.242

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 26 se observa que la mayor pérdida de superficie fue en el uso agrícola (7,518.04 ha), seguido por la selva baja caducifolia (2,497.31 ha), bosque de coníferas (2,051.87 ha) y pastizal inducido (1,541.62 ha), mientras que se observó una ganancia significativa del bosque de coníferas (5,332.86 ha), uso urbano (2,991.89 ha), la selva baja caducifolia (1,889.02 ha) e invernaderos (1,440.84 ha). En este último, la ganancia en superficie se ha debido a la especialización económica de la región en el cultivo florícola de invernadero.

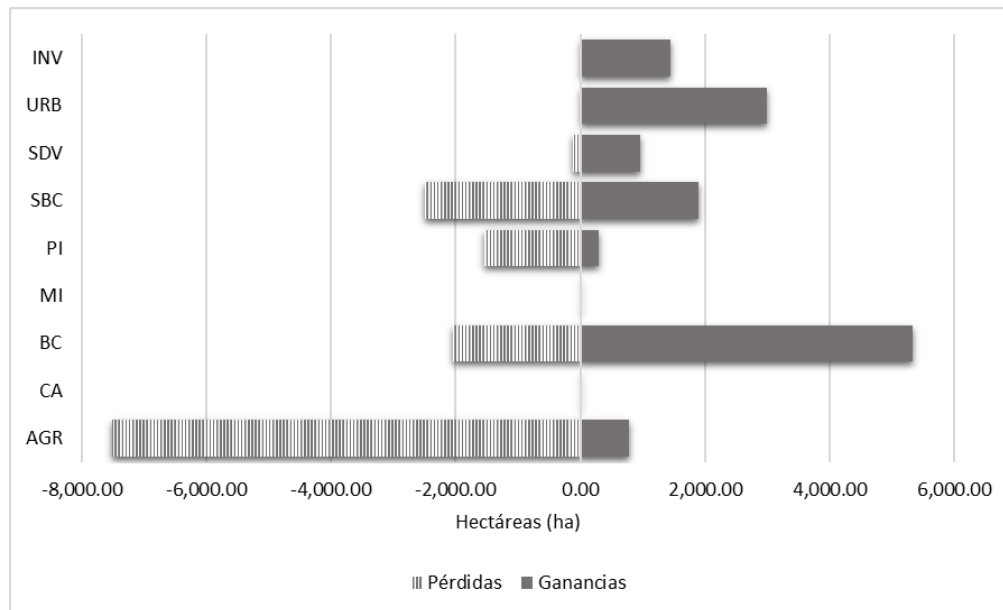


Figura 26. Pérdidas y ganancias por categoría en hectáreas.

Fuente: Elaboración propia

4.6. Índice de Vegetación Normalizada NDVI para 2019

En cuanto al Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), los resultados indican que existe una actividad fotosintética que va desde muy baja hasta muy alta reflectancia en el PERTMZ, en lo que respecta al bosque de coníferas este mostro una reflectancia que va de alta a muy alta al norte y oeste. En contraste con la selva baja caducifolia que presento una reflectancia que va de media a alta en los municipios de Zumpahuacan y Malinalco al sur, debido a que más del 75% de las especies pierden sus hojas durante la época de secas como se muestra en el Mapa 14.

Hay que mencionar, además que la alta reflectancia del bosque de coníferas se debe a que presenta mayor cobertura, una distribución espacial que va del centro al norte y que se caracteriza en que las especies permanecen con hojas durante todo el año, por lo cual, tienden a absorber más radiación solar en el Infrarrojo cercano (NIR) presentando mayor reflectancia.

En relación con la clasificación de la actividad fotosintética, esta se definió en seis rangos y con base a la desviación estándar de los valores de datos de la media. De ahí que, se consideró el valor mínimo (-0.889), el valor máximo (0.925), la media (0.221) y la mediana (0.231); para conocer la posición relativa del conjunto de datos del NDVI mediante una gráfica de caja (*Box-plot*),²⁶ la cual, resulto asimétrica debido a que los valores se encuentran más por encima de la mediana y cercanos al valor máximo, es decir, que más del 50% de los datos presentan reflectancia como se muestra en la Figura 27.

Por otra parte, aquellas áreas que mostraron una reflectancia de muy baja a baja, corresponden particularmente a aquellas zonas dedicadas al uso agrícola, con una distribución espacial al norte en el municipio de Tenango y el centro del PERTMZ, representados con un color naranja y amarillo, respectivamente.

²⁶ Gráfica de un conjunto de datos que consiste en una línea que se extiende desde el valor mínimo hasta el valor máximo, y una caja con líneas dibujadas en el primer cuartil Q_1 , la mediana y el tercer cuartil Q_3 (Triola, 2018).

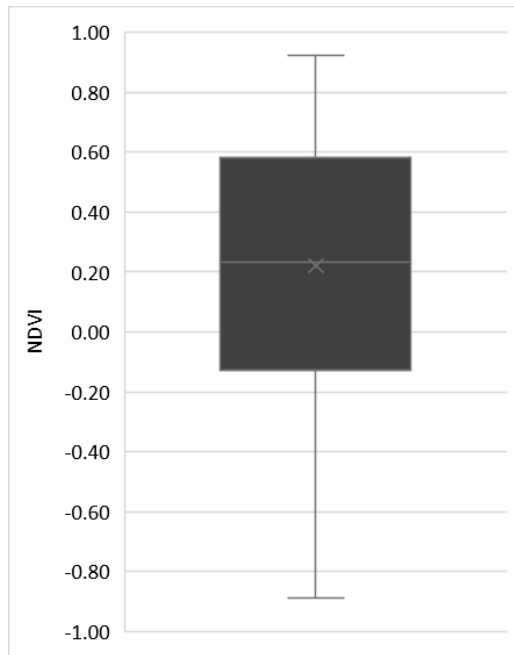


Figura 27. Grafica de caja para datos de NDVI.

Fuente: Elaboración propia.

Con el propósito de ilustrar la actividad fotosintética de la vegetación, en la Figura 28 se muestra la firma espectral correspondiente al bosque de coníferas, el cual indica en el eje y los valores más altos de reflectancia del NDVI. Por el contrario, los valores más bajos corresponden al uso agrícola.

Firma espectral bosque de coníferas al norte de Tenancingo

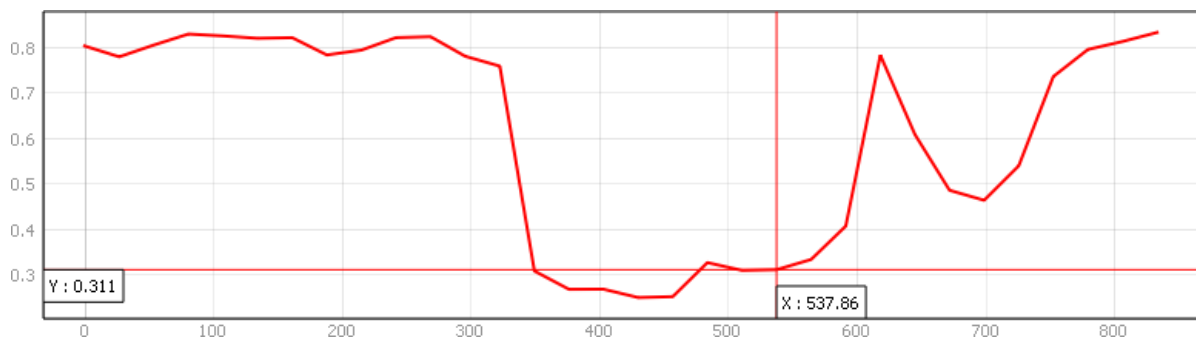
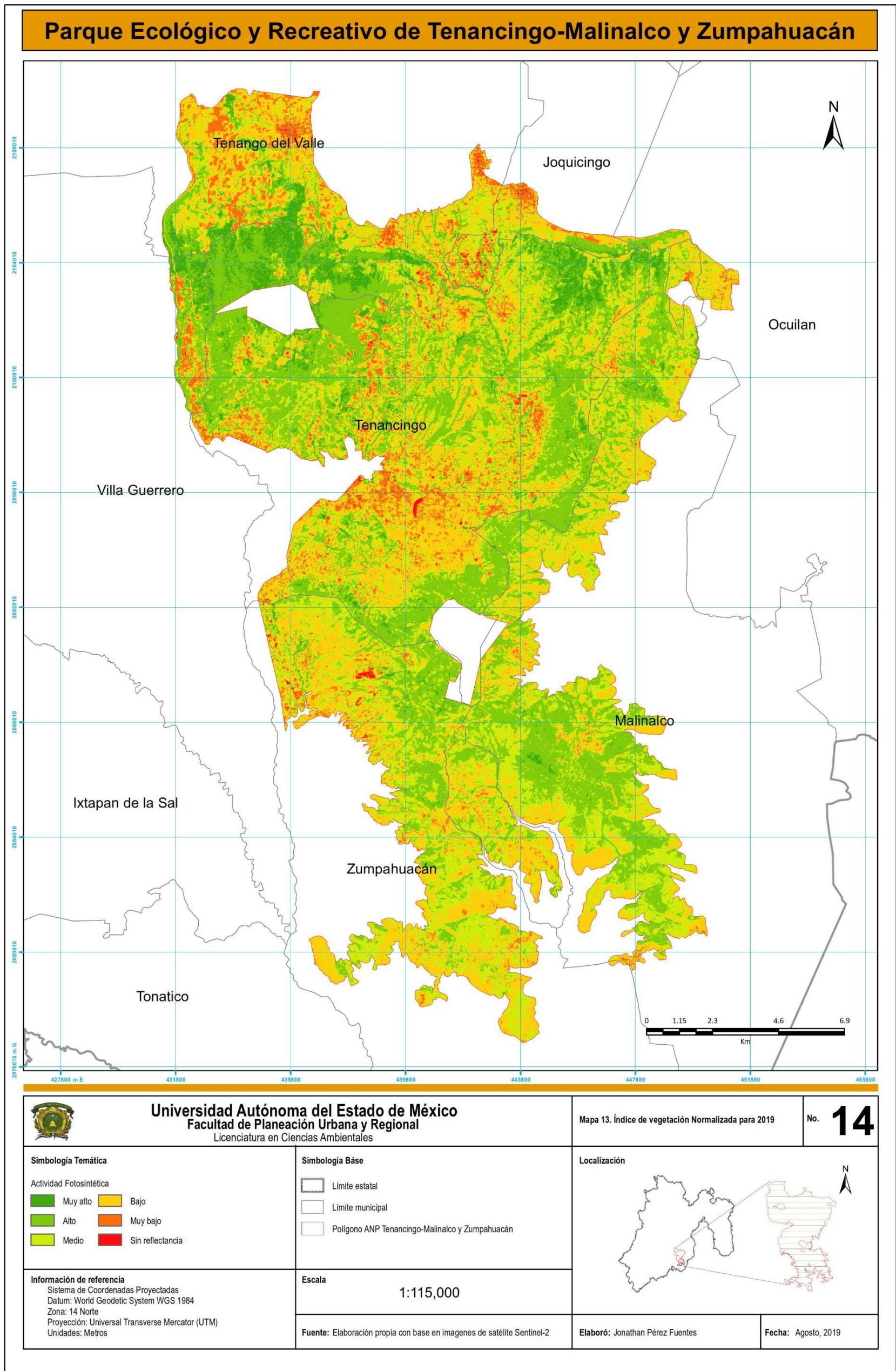



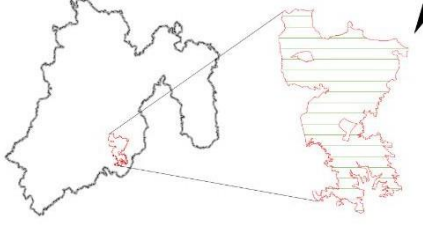
Figura 28. Firma espectral de bosque de coníferas al norte de Tenancingo.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se identificó aquellas zonas que no presentaron reflectancia con valores que van de 0 hasta el mínimo de -0.889, correspondientes a las zonas urbanas, los invernaderos, el suelo desprovisto de vegetación y los cuerpos de agua representados en color rojo.

Mapa 15. Índice de Vegetación Normalizada para 2019



 <p>Universidad Autónoma del Estado de México Facultad de Planeación Urbana y Regional Licenciatura en Ciencias Ambientales</p>		Mapa 13. Índice de vegetación Normalizada para 2019	No. 14																		
<p>Simbología Temática</p> <p>Actividad Fotosintética</p> <table border="0"> <tr> <td></td> <td>Muy alto</td> <td></td> <td>Bajo</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Alto</td> <td></td> <td>Muy bajo</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Medio</td> <td></td> <td>Sin reflectancia</td> </tr> </table>		Muy alto		Bajo		Alto		Muy bajo		Medio		Sin reflectancia	<p>Simbología Base</p> <table border="0"> <tr> <td></td> <td>Limite estatal</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Limite municipal</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán</td> </tr> </table>		Limite estatal		Limite municipal		Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán	<p>Localización</p> 	
	Muy alto		Bajo																		
	Alto		Muy bajo																		
	Medio		Sin reflectancia																		
	Limite estatal																				
	Limite municipal																				
	Polígono ANP Tenancingo-Malinalco y Zumpahuacán																				
<p>Información de referencia</p> Sistema de Coordenadas Proyectadas Datum: World Geodetic System WGS 1984 Zona: 14 Norte Proyección: Universal Transverse Mercator (UTM) Unidades: Metros		<p>Escala</p> <p style="text-align: center;">1:115,000</p>																			
<p>Fuente: Elaboración propia con base en imágenes de satélite Sentinel-2</p>		<p>Elaboró: Jonathan Pérez Fuentes</p>	<p>Fecha: Agosto, 2019</p>																		

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Según los resultados obtenidos del análisis de pérdida de cobertura forestal y cambio de uso de suelo en el PERTMZ entre 1974 y 2019, se observó una extensión en superficie de la categoría invernaderos, ya que para el año 2019 dicha superficie se incrementó a 1,450.43 ha particularmente al norte en los municipios de Joquicingo, Tenancingo y Villa Guerrero, producto de la especialización regional en la producción florícola en invernaderos. Simultáneamente, la categoría de urbano también evidenció un incremento en su superficie pasando de 505.88 ha a 3,497.77 ha, derivado del crecimiento demográfico y presentando un patrón espacial concéntrico (*in situ*) principalmente en las cabeceras de los municipios de Tenancingo y Joquicingo.

Por otra parte, las categorías de cuerpos de agua, matorral inerme y suelo desprovisto de vegetación no presentaron cambios significativos en cuanto a su superficie. Por el contrario, la categoría de selva baja caducifolia manifestó un decremento de superficie, pasando de 5,168.12 ha a 4,559.83 ha, producto del proceso de deforestación asociado a; la extensión de la frontera agrícola, el pastizal inducido e incendios forestales especialmente al sur del PERTMZ en los municipios de Malinalco y Zumpahuacán. Así mismo, la superficie del uso agrícola disminuyó pasando de 14,017.60 ha a 7,283.31 ha, derivado del incremento de superficie de los invernaderos y el área urbana.

Hay que mencionar, además que los procesos de cambio en el uso de suelo en el PERTMZ han propiciado la fragmentación del paisaje y la pérdida de cobertura forestal en el bosque de coníferas, transformando su configuración espacial sobre todo en el municipio de Tenancingo. Los resultados obtenidos evidenciaron categóricamente un grado de fragmentación del bosque de coníferas, asociado a la extensión del pastizal inducido. Así mismo, se observó un patrón espacial lineal de cobertura forestal al norte del PERTMZ asociado a la hidrología de la cuenca.

Por otro lado, la aplicación de la evaluación de la fiabilidad temática, permitió obtener una cartografía de uso de suelo y vegetación para el PERTMZ del año 2019 con un grado de fiabilidad global del 85.35 % y paralelamente con un 80.6 % y 82.4 % con

base en los coeficientes Kappa y Tau, respectivamente. De manera análoga, a partir de la elaboración del mapa de Uso de Suelo y Vegetación de 1974 y 2019, se elaboró el mapa de cambios de uso de suelo ocurridos entre 1974 y 2019, por lo cual la sobreposición de ambos mapas permitió determinar que 19,327.33 ha (58.5%) de la superficie del PERTMZ se mantiene sin cambios. No obstante, 13,719.80 ha (41.5%) presentó cambios en las categorías de uso de suelo.

Otro resultado importante, según los coeficientes obtenidos en relación a las tasas de cambio, fue el decremento en superficie en las categorías de pastizal inducido, agrícola y selva baja caducifolia, registrando una tasa de cambio de -1,76 %, -1.44 % y -0.28 %, respectivamente; la deforestación y los incendios forestales se infiere han sido las principales causas asociadas en la pérdida de cobertura forestal en la selva baja caducifolia, en tanto, el crecimiento del área urbana y los invernaderos propiciaron la reducción del uso agrícola y el pastizal inducido. Dichos resultados se relacionan con los obtenidos en el mapa de uso de suelo y vegetación del año 2019. Por su parte, las categorías de cuerpos de agua, uso urbano e invernadero, registraron un incremento considerable en la tasa de cambio con 4.1 %, 4.3 % y 11.8 %, respectivamente. Resaltando, el caso de los cuerpos de agua, los cuales se infiere que su incremento se debe a los reservorios de agua utilizados para el riego agrícola en los municipios de Joquicingo y Tenancingo.

Por otra parte, como resultado de los indicadores de cambio fue posible concluir que la categoría con mayor dinámica fue la agrícola con 6,734.29 ha de cambio neto, esto es congruente en relación con lo obtenido en el mapa de uso de suelo y vegetación de 2019, así como, la tasa de cambio; lo cual evidenció que las causas de la dinámica se deben al crecimiento del área urbana e invernaderos, al mismo tiempo, la categoría de uso urbano presento 2,991.81 ha de cambio neto debido a la ganancia en superficie sobre uso agrícola. Por su parte, la categoría de bosque de coníferas fue la que presento mayor persistencia con 8,781.31 ha.

En tanto, los índices de Braimoh indicaron que para el periodo 1974-2019 las diferentes categorías tienden más a persistir que a ganar o perder superficie (índices de ganancia-persistencia y pérdida-persistencia). Asimismo, el índice de cambio neto-

persistencia indica que las categorías de agrícola, pastizal inducido y selva baja caducifolia presentan valores negativos, lo que significa que son más vulnerables a perder que a ganar superficie; por el contrario, las categorías de bosque de coníferas, cuerpos de agua, matorral inerme, suelo desprovisto de vegetación, urbano e invernadero tienden más a ganar que a perder superficie

El Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) permitió diferenciar las áreas con actividad fotosintética, es decir, aquellas zonas en donde la vegetación se encuentra presente y en condiciones saludables. Como resultado, la cobertura forestal indicó valores de muy alta (>0.80), alta ($0.71-0.80$) y media ($0.61-0.70$) actividad fotosintética resaltando el bosque de coníferas con valores mayores de 0.71 particularmente en el centro y norte municipio de Tenancingo y la selva baja caducifolia con valores entre 0.61 y 0.70 al sur del PERTMZ en el municipio de Zumpahuacán, así mismo, los valores inferiores a 0.60 indican una actividad fotosintética baja y aquellos inferiores a 0.00 indican que no se presenta actividad fotosintética debido a la ausencia de vegetación como son los cuerpos de agua y las zonas urbanas.

Hay que mencionar, además que la aplicación de técnicas de percepción remota permitió dimensionar a nivel macro, la dinámica espacio-temporal del cambio de uso de suelo que se ha presentado en el PERTMZ. De manera que, permitió representar cartográficamente los cambios ocurridos e identificar aquellas zonas con el mayor cambio de uso de suelo y las causas que lo producen.

Finalmente, este trabajo representa un análisis desde el enfoque integrador de las ciencias ambientales al incorporar conocimientos de diversas áreas destacando la ecología, biología de la conservación, política ambiental, recursos naturales y sobre todo la geografía con la aplicación de técnicas espaciales a través de los sistemas de información geográfica (SIG) y de percepción remota. Cabe resaltar que este trabajo, es útil para localizar las zonas con mayor pérdida de cobertura forestal, restauración, planeación ambiental, programas de ordenamiento territorial y la administración sustentable de los recursos naturales a diversas escalas.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Arnold, M. y Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. *Cinta de Moebio*, (3), 40-49.
- Avalos, A., Flores, F., Nájera, O., y Marcelaño, S. (2018). Analysis of the Land Use and Cover Changes in the Metropolitan Area of Tepic-Xalisco (1973–2015). *Journal of Sustainability*, 1-15.
- Ball, J. (2001). *Global Forest Resources: History and Dynamics. The Forest Handbook*. Oxford: Blackwell Science.
- Bennett, A. (1999). *Linkages in the Landscape. The role of corridors and connectivity in wildlife conservation*. Gland, Switzerland y Cambridge, UK.: IUCN.
- Bertalanffy, L. (1986). *Teoría General de Sistemas: Fundamentos, Desarrollo y Aplicaciones*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Bordens, K. y Abbott, B. (2018). *Research Design and Methods A Process Approach*. New York: McGraw-Hill Education.
- Briceño, J., Cañizalez, B., Rivas, Y., Lobo, H., Moreno, E., Velásquez, I. y Ruzza, I. (2010). La holística y su articulación con la generación de teorías. *Educere*, 73-83.
- Camacho, J., Juan, J., Pineda, N., Cadena, E., Bravo, L. y Sánchez, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 93-112.
- Camacho, J., Juan, J., Pineda, N., Cadena, E., Bravo, L. y Sánchez, L. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques* 21(1), 93-112.
- Cámara de Diputados del Honorable Congreso del Estado de México. (2005). Código para la Biodiversidad del Estado de México. Estado de México, México.
- Card, H. (1982). Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(3), 431-439.

- CBD. (2004). *Directrices del CBD: Enfoque por ecosistemas*. Obtenido de <https://www.cbd.int/doc/publications/ea-text-es.pdf>
- Challenger, A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: Pasado, presente y futuro*. México: Conabio-Instituto de Biología, UNAM.
- Christopherson, R. y Birkeland, G. (2015). *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*. Pearson Education.
- Chuvieco, E. (2011). *Teledetección ambiental*. Barcelona: Ariel Ciencia.
- CONABIO. (2009). *Capital Natural de México Vol. 1*. México.
- Damnyag, L., Saaatamoinen, O., Blay, D., Dwomoh, F. Anglaaere, L. y Pappinen, A. . (2013). Sustaining protected areas: identifying and controlling deforestation and forest degradation drivers in the Ankasa Conservation Area, Ghana. *Biology Conservation* 165, 86-94.
- Enger, E. y Smith, B. (2016). *Environmental Science A Study of Interrelationships*. New York: McGraw-Hill Education.
- ESA. (Febrero de 2019). *Copernicus Europe's eyes on Earth*. Obtenido de <https://scihub.copernicus.eu>
- Escobar, A. (2017). *Geografía*. México: McGraw Hill.
- España, M. y Champo, O. (2016). Proceso de deforestación en el municipio de Cherán Michoacán, México (2006-2012). *Madera y Bosques* 22, 141-153.
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematic* 34, 487-515.
- FAO. (2016). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2016). *El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra*. Roma.
- FAO. (2018). *El estado de los bosques del mundo: Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible*. Roma: FAO.
- Fernández, D. (2017). *Ecología y Medio Ambiente*. Ciudad de México: Pearson Educación.






- Frederick, L., & Tarbuck, E. (2017). *Foundations of Earth Science*. Boston: Pearson.
- García, E. (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Instituto de Geografía-UNAM.
- García, J., Cedillo, J., Juan, J., y Balderas, M. (2012). Procesos de Cambio en el Uso del Suelo de una Microcuenca en el Altiplano Mexicano. El caso del Río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía*, 63-73.
- Gurrutxaga, M. y Lozano, P. (2008). Ecología del Paisaje. Un marco para el estudio integrado de la dinámica territorial y su incidencia en la vida silvestre. *Estudios Geográficos*, 519-543.
- Hernández, R. (2013). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill.
- Hill, J. y Curran, P. (2003). Area, shape and isolation of tropical forest fragments: effects on tree species diversity and implications for conservation. *Journal of Biogeography* 30, 1391-1403.
- INEGI. (1980). *X Censo General de Población y Vivienda 1980*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1980/default.html>
- INEGI. (1995). *Conteo de Población y Vivienda 1995*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1995/default.html>
- INEGI. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/default.html>
- INEGI. (2005). *II Conteo de Población y Vivienda 2005*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2005/default.html>
- INEGI. (2005b). *Guía para la interpretación de cartografía: uso de suelo y vegetación*. Aguascalientes, Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- James B. Campbell y Randolph H. Wynne. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. New York City: The Guilford Press.




- Jensen, J. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. New Jersey: Prentice Hall.
- Jensen, J. (2016). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. New York: Pearson Education.
- Johansen, O. (1993). *Introducción a la Teoría General de Sistemas*. México: Editorial LIMUSA.
- Leija, E., Reyes, H. Reyes, O. Flores, J. y Sahagún F. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 22, 125-140.
- LGDFS. (2018). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. Obtenido de Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS_050618.pdf
- LGEEPA. (28 de enero de 1988). *Camara de Diputados H. Congreso de la Unión*. Obtenido de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_050618.pdf
- Lininger, K. (2011). Small-Scale Farming and Shifting Cultivation. En E. P.-T. Boucher D, *The root of the problem what's driving tropical deforestation today?* (págs. 89-94). Cambridge: Union of Concerned Scientists.
- López, V., Balderas, M., Chávez. M., Juan, J. y Gutiérrez, G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del antiplano mexicano. *CIENCIA ergo-sum*, 136-144.
- Lugo, J. (2011). *Diccionario geomorfológico*. Ciudad de México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Margalef, R. (1998). *Ecología*. OMEGA.
- Mas, J., Reyes, J. y Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (51), 53-72.
- Mas, J.F., Velázquez, A. y Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso de suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental Ciencia y Política Pública*, 23-39.

- Mass, J. y Couturier, S. (2011). Evaluación de bases de datos cartográficas. En B. F., *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (págs. 675-703). México: CIGA, IG.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Obtenido de <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.354.aspx.pdf>
- Molles, M. (2016). *Ecology: Concepts and Applications*. New York: McGraw-Hill Education.
- Munch, L. (2017). *Métodos y Técnicas de Investigación*. Ciudad de México: Trillas.
- Odum, E. (1971). *Fundamentals of ecology*. Philadelphia: W.B. Saunders.
- Pan, Y., Birdsey, R., Phillips, O. y Jackson, R. (2013). The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forest. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 593–622.
- Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M. y Plata W. . (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 33-52.
- Pontius, R. G. Jr., E. Shusas and M. McEachern. (2004). Detecting important categorical land changes while. *Agriculture, Ecosystems and the Environment*, 251-268.
- Porta, J. (2014). *Edafología: Uso y protección de suelos*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Reece et al. (2014). *Biology*. New York: PEARSON.
- Reece, J., Urry, L., Cain, M., Wasserman, S., Minorsky, P. y Jackson, R. (2013). *Campbell Biology*. New York: Pearson Education.
- Rossiter, D. (2014). *Technical Note: Statistical methods for accuracy assesment of classified thematic maps*. Enschede, NL.: D G Rossiter's Publications & Computer Programs.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. México: CONABIO.
- Stehman, S. y Czaplewski R. (1998). Desing and Analisys for thematic map accuracy assesment: fundamental principles. *Remote Sensing of Environment*, 331-344.
- Sterling B, y Villanueva E. (2011). *Geografía y medio ambiente*. México: Editorial Esfinge.
- Tansley, A. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 284-307.

- Thomas Lillesand, Ralph W. Kiefer y Jonathan Chipman. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley.
- Triola, M. (2018). *Estadística*. Ciudad de México: Pearson Educación.
- UNEP-WCMC y IUCN. (2016). *Protected Planet Report 2016*. Cambridge, UK and Gland, Switzerland: UNEP-WCMC and IUCN.
- Valverde, T., Cano-Santano, Z., Meave, J. y Carabias, J. (2005). *Ecología y Medio Ambiente*. México: Pearson Educación.
- Verburg P., van de Steeg J., Veldkamp A. y Willemen L. (2009). From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 1327-35.
- Walker, J. (2018). *Physics*. San Francisco: Pearson Education.
- Weng, Q. (2010). *Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods and Applications*. New York : McGraw-Hill Education.
- Yousuf, A., Masrur, A., Sarfaraz, M., Abdullah, Md., Hassan, K. y Dewan, A. (2019). Spatio-Temporal Patterns of Land Use/Land Cover Change in the Heterogeneous Coastal Region of Bangladesh between 1990 and 2017. *Remote Sensing*, 1-26.

ANEXO

No.	Coordenadas	Nombre	Cobertura y Uso	Observación	Referencia
1	19°02'35.1" Lat N 99°64'76.8" Long W Altitud 2,560 m.s.n.m.	Carretera Tenango- Ixtapan de la Sal Villa Guerrero	Forestal Bosque de coníferas	Se presenta cobertura forestal de coníferas de pino y encino sobre pendientes abruptas mayores a 35°; el paisaje ha sido fragmentado por la apertura de la carretera	
2	18°97'93.3" Lat N 99°62'57.7" Long W Altitud 2,129 m.s.n.m.	Zona de invernaderos Localidad de Santa Ana Tenancingo	Urbano Invernadero	Hay invernaderos de producción florícola sobre la ladera de la sierra, así mismo, rodean la localidad de Santa Ana Ixtlahuatzingo.	
3	18°94'12.8" Lat N 99°60'51.4" Long W Altitud 2098 m.s.n.m.	Campos agrícolas Localidad de Tepalcatepec Tenancingo	Agrícola de temporal	Es la parte baja de la cuenca Rio Alto Amacuzac en el centro del PERTMZ, se presentan tierras ejidales con uso agrícola de temporal y hay rasgos de reforestación en el Cerro Tepetzingo.	
4	18°89'36.5" Lat N 99°60'75.2" Long W Altitud 1834 m.s.n.m.	Ejido de la Finca Zumpahuacán	Agrícola, Pastizal inducido e Invernaderos	Hay indicios de pastizal inducido, se evidencia el incremento de invernaderos y cuerpos de agua para riego, además de asentamientos humanos dispersos, al fondo se observa el Cerro La Malinche.	
5	18°98'51.4" Lat N 99°52'71.3" Long W Altitud 2,109 m.s.n.m.	San Miguel Tecomatlán Tenancingo	Agrícola, Urbano e Invernadero	Con vista al Cerro La Víbora, se observan los invernaderos de los productores de San Miguel Tecomatlán.	

6	19°04'28.2" Lat N 99°57'41.8" Long W Altitud 2,653 m.s.n.m.	San Pedro Zictepec Tenango del Valle	Urbano	En los límites del PERTMZ en la localidad de Zictepec, con vista al Cerro La Ladera en donde hay presencia de bosque de coníferas.	
7	19°03'77.3" Lat N 99°51'68.1" Long W Altitud 2,653 m.s.n.m.	Joquicingo	Agrícola y Forestal (bosque de coníferas)	Presencia de uso agrícola de temporal (cultivo de maíz) y bosque de coníferas en la parte alta del lomerío.	
8	18°96'51.3" Lat N 99°50'68.5" Long W Altitud 2,097 m.s.n.m.	Carretera Tenancingo- Tenería Malinalco	Forestal Selva Baja Caducifolia	Se observa la ladera de sotavento con vegetación característica de la selva baja caducifolia, sin embargo, se presenta la zona de transición con el bosque de coníferas al occidente.	
9	18°95'31.2" Lat N 99°50'29.2" Long W Altitud 1,888 m.s.n.m.	Zona Arqueológica de Malinalco	Forestal Selva Baja Caducifolia	Se observan pendientes abruptas cubiertas por vegetación arbórea y arbustiva característica de la selva baja caducifolia	