

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Escuela de Ingenierías

Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica



Teledetección de cambios en el uso de suelo entre el Parque Nacional Montaña La Malinche y el Parque Nacional Popocatepetl-Iztaccíhuatl

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta la estudiante

Madai Rivera Vazquez

166949

Ingeniería Mecatrónica

Dr. Alejandro Arias Del Razo

San Andrés Cholula, Puebla.

Primavera 2024

Hoja de firmas

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el estudiante

Madai Rivera Vazquez y ID 166949

Director de Tesis

Dr. Alejandro Arias del Razo

Presidente de Tesis

Dr. Rubén Alejos Palomares

Secretario de Tesis

Mtro. Eduardo Javier Jiménez López

Resumen

El cambio en el uso de suelo constituye uno de los fenómenos más significativos y de mayor impacto en el ámbito ambiental a nivel global, motivado por una compleja interacción de factores económicos, sociales y naturales. Este fenómeno resulta en procesos como la alteración de la composición y estructura de los paisajes naturales, fragmentación de hábitats, repercute en la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el cambio climático. Dentro de este contexto, el presente estudio se adentra en la comprensión de estos cambios mediante teledetección y análisis geoespacial, a través de la clasificación del uso de suelo, entre los años 2016 y 2021, para ofrecer una perspectiva de su impacto en la conectividad del paisaje en los parques nacionales Montaña La Malinche y Popocatepetl-Iztaccíhuatl, en la zona norte del estado de Tlaxcala.

Abstract

Land use change is one of the most significant phenomena with the greatest impact on the global environmental sphere, driven by a complex interaction of economic, social, and natural factors. This phenomenon results in processes such as the alteration of the composition and structure of natural landscapes, habitat fragmentation, impacts on biodiversity, ecosystem services, and climate change. Within this context, the present study delves into the understanding of these changes through remote sensing and geospatial analysis, by classifying land use between the years 2016 and 2021, to offer a perspective on its impact on landscape connectivity in the national parks of La Malinche Mountain and Popocatepetl-Iztaccíhuatl, in the northern area of the state of Tlaxcala.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por siempre apoyarme, por sembrar esa semillita de curiosidad en mí por todo lo que me rodea, por enseñarme a ser disciplinada y quererme como lo hacen. A mi mamá por siempre escucharme y motivarme, a mi papá por enseñarme las maravillas de la naturaleza y a ser una gran aventurera, a mis abuelitas por su gran apoyo y cariño desde que era pequeña, a mi novio por enseñarme a ver la vida más ligera, por brindarme todo su apoyo y amor, y por siempre hacerme sonreír; a mis hermanas Shu, Yaax y Umi por ser mi gran compañía y por siempre cuidarme.

Gracias a mis profesores de Mecatrónica y Biología por darme tantas oportunidades para aprender, por compartir no sólo su conocimiento sobre su materia, sino aprendizajes de vida y risas también. Gracias al Dr. Arias por brindarme una gran oportunidad, por su gran apoyo, motivación y por contagiarme de su alegría y tranquilidad.

Gracias a mis amigos por los increíbles momentos juntos, por su gran apoyo y cariño. Y gracias a la vida, porque sigo disfrutando y aprendiendo...

Índice

Resumen	3
Abstract.....	3
Agradecimientos.....	4
Marco teórico.....	8
1. Parques Nacionales.....	8
2. Cambio en el uso de suelo	9
2.1. Clasificación del uso de suelo	11
2.1.1. Vegetación primaria	11
2.1.2. Vegetación secundaria.....	12
2.1.3. Zona agrícola	12
2.1.4. Zona urbana	13
2.1.5. Cuerpos de agua	13
2.1.6. Terreno abandonado	13
3. Teledetección.....	14
3.1. NDVI	16
4. Ecología y conectividad del paisaje.....	17
Antecedentes.....	18
Objetivo principal.....	20
Objetivo particular.....	21
Hipótesis.....	21
Método.....	22
Resultados.....	25
1. Cambios en el uso de suelo	25
2. Índice de la Vegetación de Diferencia Normalizada.....	33
Discusión	35
Conclusión.....	38
Referencias	40
Anexo	51

Introducción

El equilibrio entre la conservación de la biodiversidad y el desarrollo de las actividades humanas presenta uno de los desafíos más complejos en la gestión ambiental actual (Durand y Jiménez, 2020). Dentro de este contexto, el monitoreo de los cambios en el uso del suelo mediante teledetección emerge como una herramienta crítica para comprender las dinámicas que amenazan los hábitats naturales y, por ende, la biodiversidad que albergan (Lambin *et al.*, 2001). En particular, los Parques Nacionales Montaña La Malinche y Popocatepetl-Iztaccíhuatl se destacan como ecosistemas de valor incalculable, no sólo por su riqueza biológica, sino también por los servicios ecosistémicos que proporcionan (Ramón y Aguilar, 2021; Acosta *et al.*, 2014). Sin embargo, la presión sobre estos entornos debido a la expansión urbana plantea riesgos significativos que pueden alterar su integridad y funcionalidad (Cruz *et al.*, 2022). Estas alteraciones tienen el potencial de aislar a las especies dentro de estas áreas, lo que puede generar un deterioro en la diversidad genética y llegar a comprometer sus poblaciones (Fernández y López, 2005).

Ante este panorama, el establecimiento de un corredor biológico que permita la conexión entre estas áreas naturales se convierte en una estrategia clave para mitigar los efectos adversos del aislamiento (Fernández y López, 2005; Robles, 2009). Para ello, la implementación efectiva de esta solución requiere una comprensión detallada de cómo y dónde el uso del suelo ha cambiado a lo largo del tiempo, información que es fundamental para evaluar las áreas de estudio y determinar si son las más propicias para la conservación o restauración ecológica (Arias *et al.*, 2010).

La teledetección, mediante del uso de imágenes satelitales y herramientas de análisis geoespacial como el software QGIS, ofrece la oportunidad de examinar estos cambios con gran precisión. A través de este enfoque, es posible obtener datos detallados sobre la extensión y carácter de las transformaciones del paisaje, lo que permite conocer las posibles causas y consecuencias de los cambios en el uso del suelo, así como evaluar el grado y la velocidad de deterioro de las áreas de muestreo (Berry *et al.*, 1996, Torres *et al.*, 2003).

El presente estudio se enfoca en detectar cambios el uso del suelo entre los años 2016 y 2021 a fin de comprender mejor la tendencia existente en procesos como la deforestación, expansión urbana o de área agrícolas, que pudieran determinar a su vez la factibilidad de procesos como son la conservación o restauración de zonas boscosas.

Los polígonos seleccionados son estratégicos, al ser representativos de la región de interés, y ubicarse entre los dos parques nacionales, por lo que cuentan con el potencial de convertirse en áreas de conectividad entre estos. Es decir, responde a la necesidad de identificar los espacios más propensos para la conservación que pueden servir como enlaces vitales entre los parques.

El valor fundamental de esta investigación reside en la utilización de tecnologías de teledetección para abordar y superar los retos ambientales derivados del impacto humano, como la urbanización, la expansión agrícola y la deforestación. Al emplear avanzadas herramientas de teledetección, este estudio proporciona un diagnóstico detallado del uso actual del suelo y sus dinámicas de cambio, además de facilitar la orientación y el desarrollo de iniciativas de conservación enfocadas en proteger la diversidad biológica y garantizar la variabilidad genética de las especies que habitan los parques nacionales. Este enfoque representa un paso significativo hacia la reconciliación de las necesidades humanas con la

conservación de la biodiversidad, destacando el papel de la teledetección en el monitoreo del cambio de uso de suelo en áreas naturales.

Marco teórico

1. Parques Nacionales

El Parque Nacional La Malinche, también conocido como Matlalcuéyetl o Malitzin, forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), (Figura 1), sitio reconocido como núcleo de diversificación, endemismo y transición biogeográfica (Gámez *et al.*, 2012) y se sitúa en los estados de Tlaxcala y Puebla (Vargas 1997), localizado entre los 19°06'04'' y 19°20'06'' de latitud N, y los 97°55'41'' y 98°10'52'' de longitud W (Villers *et al.*, 2006).

Este parque, fue decretado como un Área Natural Protegida (ANP) el 6 de octubre de 1938, cubre una superficie de 46,112.24 hectáreas y se extiende desde los 2,300 hasta los 4,461 msnm (Cruz *et al.*, 2022). La declaración de área protegida tuvo como fin la conservación de una rica diversidad de especies y endemismos, impulsando iniciativas de protección, manejo y restauración de la diversidad biológica y cultural (López-Téllez *et al.*, 2019). A lo largo del tiempo, este parque ha sufrido cambios en su extensión y funcionalidad, debido a las actividades humanas como la agricultura, la extracción forestal para la sustracción de leña y madera, las actividades pecuarias (Cruz *et al.*, 2022) y la quema de vegetación herbácea (Romero *et al.*, 2015).

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, de 40,000 ha, ubicado en la región central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT; Figura 1) y extendido a través de los estados de México, Puebla y Morelos, entre las coordenadas 18°59'00.43''-19°28'09.44'' de latitud Norte y 98°34'55.88''-98°46'40.95'' de longitud Oeste, con un rango altitudinal que

va de los 3,000 a los 5,480 msnm (Rodríguez, 2013), comparte desafíos similares. Declarado también como Área Natural Protegida (ANP) el 8 de noviembre de 1935, este parque se enfrenta a la presión de un crecimiento poblacional acelerado y actividades agrícolas, ganaderas, pecuarias y de uso forestal que afectan la biodiversidad y los servicios ambientales que ofrece (Rodríguez, 2013). De igual modo, el parque es un reservorio clave de biodiversidad, alberga especies endémicas y proporciona servicios vitales como la generación de agua dulce para las poblaciones circundantes y mantiene el equilibrio del clima de la zona (Acosta *et al.*, 2014).

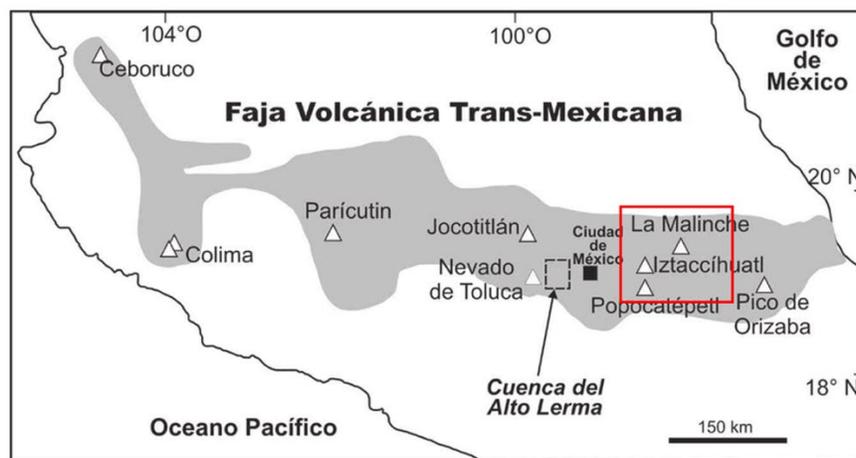


Figura 1. Ubicación de La Malinche, El Popocatepetl y El Iztaccíhuatl dentro de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (Yoko *et al.*, 2010).

2. Cambio en el uso de suelo

De acuerdo con Pérez (2021), el concepto de uso del suelo describe cómo los seres humanos utilizan la superficie terrestre, adaptando sus características naturales para actividades tales como la agricultura, urbanización, forestación y minería. Esta interacción con el suelo es una manifestación de patrones culturales que definen cómo se manejan y modifican los entornos

naturales para satisfacer necesidades humanas (Velázquez *et al.*, 2014). A diferencia de la cobertura del suelo, que se refiere al estado biofísico de la superficie terrestre incluyendo vegetación, agua y materiales terrestres, el uso del suelo implica la manipulación de estos elementos para crear infraestructuras y zonas de actividad económica (FAO, 1995; Briassoulis, 2019).

Ambos términos, en ocasiones son usados indistintamente, sin embargo, tienen diferencias claras: la cobertura del suelo se define como lo que cubre la tierra, mientras que el uso del suelo explica cómo las personas gestionan y explotan estos recursos (Pérez, 2021). Esta relación es esencial para entender los cambios en los paisajes y sus consecuencias sobre los ecosistemas y la biodiversidad (Lambin *et al.*, 2001). Además, afecta directamente fenómenos globales como el cambio climático y la pérdida de servicios ecosistémicos debido a la interacción de factores socioeconómicos que incluyen el crecimiento demográfico (Leyva y Herrera, 2003), avances tecnológicos y políticas territoriales (Briassoulis, 2019).

El cambio de uso del suelo constituye uno de los fenómenos más significativos y preocupantes en el ámbito ambiental global, impulsado por una compleja interacción de factores económicos, sociales y naturales, siendo los primeros factores, los sociodemográficos que incluyen el crecimiento de la población y, por ende, su redistribución, migración y urbanización (Leyva y Herrera, 2003). Este fenómeno altera la composición y configuración de los paisajes naturales, tiene profundas implicaciones para la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el cambio climático (Rosete-Vergés *et al.*, 2014).

En ese sentido, el análisis de los cambios en el uso y cubierta del suelo provee una herramienta que permite conocer las posibles causas y consecuencias del cambio del uso de suelo para aplicar métodos de conservación y restauración (Díaz-Gallegos *et al.*, 2008).

Además, los estudios sobre el cambio en la cobertura y uso del suelo son esenciales para identificar las tendencias de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de biodiversidad de una región determinada (Lambin *et al.* 2001). Aunque algunos fenómenos pueden inducir variaciones en la cobertura natural, las actividades humanas han emergido como los principales motores de la transformación del paisaje en los últimos años (Vitousek *et al.*, 1997).

La transformación en el uso del suelo es un reflejo de las prioridades económicas, culturales y ambientales de la sociedad (Singh *et al.*, 2019), y su estudio es fundamental para abordar los desafíos del desarrollo sostenible y la conservación ambiental. El análisis de estos cambios se realiza a través de varias fases de investigación que ayudan a describir, explicar, predecir y evaluar los impactos de dichas transformaciones, que proporciona una base sólida para la formulación de políticas y estrategias para un manejo efectivo y sostenible del territorio (Pérez, 2021).

2.1. Clasificación del uso de suelo

La clasificación del uso de suelo es una organización sistemática del suelo que permite analizar y evaluar su aptitud natural para los diversos usos que puede tener, lo que brinda información relevante sobre las “limitaciones de su uso, necesidades y prácticas de manejo que requieren” (OAS, s.f.) y también permite formular planes de conservación y restauración. Para el presente estudio, se utilizaron las categorías descritas a continuación.

2.1.1. Vegetación primaria

Esta categoría comprende aquellas áreas que han conservado su cobertura vegetal natural sin alteraciones significativas por actividades humanas o perturbaciones naturales, es decir, son áreas en las que la alteración ha sido mínima o inexistente (SEMARNAT, 2005). A lo largo

de las décadas, la vegetación primaria ha experimentado una reducción notable en su extensión, un ejemplo es la disminución de los bosques templados primarios desde casi 300,000 km² en 1985 a menos de 210,000 km² en 2014 (INEGI, s.f.) debido a la deforestación y al cambio de uso del suelo, particularmente en ciertas regiones del país.

2.1.2. Vegetación secundaria

La vegetación secundaria, también denominada “vegetación en regeneración”, refiere a las áreas donde la vegetación ha comenzado a recuperarse tras haber sido significativamente alterada o eliminada por actividades humanas o eventos naturales, por lo que acaba ocupando el lugar físico-ecológico donde anteriormente había vegetación primaria (PlenaMata, 2024) o puede suceder totalmente lo opuesto, pueden ser áreas donde la vegetación presenta signos visibles de alteración, lo que significa que no está necesariamente en proceso de recuperación. Estas áreas pueden desarrollar una estructura y composición similares a la vegetación original, pero son generalmente más heterogéneas (IMPLAN, 2020) y pueden incluir restos de la vegetación primaria. Los bosques secundarios, por ejemplo, han visto un aumento en su extensión en los últimos años (INEGI, s.f.; SEMARNAT, 2005).

2.1.3. Zona agrícola

Incluye terrenos que han sido transformados para uso agropecuario, una práctica identificada como una de las principales causas de deforestación tanto en América Latina como globalmente (SEMARNAT, 2005) y que junto con la apertura urbana, son una de las principales causas de la destrucción de la cubierta vegetal primaria y secundaria (Gobierno de México, s.f.), ya que frecuentemente son los agricultores los que impiden la recuperación vegetal (SEMARNAT, 2005). Estas áreas donde se practica la agricultura para la producción de alimentos, fibras, combustibles y otros productos, están modificadas para el cultivo de

plantas y la cría de ganado, con intervenciones humanas como el arado, la siembra, el riego y el uso de fertilizantes y pesticidas. La superficie dedicada a la agricultura en México creció aproximadamente 68,000 km² desde 1985 hasta 2014, aunque este crecimiento ha sido menor en la última década (INEGI, s.f.).

2.1.4. Zona urbana

Representa las áreas donde la vegetación natural ha sido completamente eliminada para dar paso a infraestructuras como edificios, calles y otras construcciones urbanas, empleadas como centros de población y actividad económica. Aunque la extensión urbana es pequeña en proporción al territorio nacional (aproximadamente 0.4%), es el tipo de uso del suelo que más rápidamente ha crecido en ciertas regiones. Las tierras urbanizadas suelen ser planas y anteriormente productivas agrícolamente y aunque el efecto directo de las ciudades es limitado, indirectamente influyen en la gestión del suelo en vastas áreas para cubrir su demanda de alimentos, madera, recreación y manejo de desechos (SEMARNAT, 2005).

2.1.5. Cuerpos de agua

Comprende todas las extensiones de agua, en estado líquido se incluyen ríos, lagos, embalses y acuíferos, y en sólido, glaciares y casquetes polares, pueden ser de agua salada o dulce, naturales o artificiales (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, s.f.). Estos cuerpos de agua son cruciales para mantener la biodiversidad acuática y terrestre, proveer agua dulce, y sustentar actividades económicas y recreativas. También son esenciales para la regulación del microclima y el sustento de diversas especies (CONABIO, 2024).

2.1.6. Terreno abandonado

Se refiere a áreas que anteriormente se utilizaban para actividades agrícolas o urbanas (SEMARNAT, 2005) pero que han sido dejadas en desuso. Estos terrenos a menudo

presentan signos de degradación y pueden ofrecer oportunidades para estudios de regeneración natural de la vegetación (Romero y Martínez, 2014).

3. Teledetección

La teledetección es una técnica avanzada y relativamente reciente que permite la adquisición de información sobre objetos y fenómenos sin contacto físico directo, mediante el uso de dispositivos montados en plataformas aéreas o satélites (ESA, 2009; EOS, 2021; González y Mendoza, s.f.). Este método captura datos sobre la superficie de la Tierra y la atmósfera a través de la detección y el análisis de la energía reflejada o emitida desde estos objetivos (Bella et al., 2008, González, y Mendoza, s.f.).

En términos generales, el proceso de teledetección (Fig. 2) se basa en tres elementos esenciales: la fuente de energía que ilumina o emite energía desde los objetos observados, el sensor que capta esta energía y la plataforma (como satélites y aviones) que sostiene estos sensores (ESA, 2019). Los datos recogidos por los sensores se transmiten a estaciones terrestres donde son procesados y analizados para interpretar y transformar en información útil que puede ser aplicada en diversos ámbitos (González-Roglich y Mendoza, 2008).

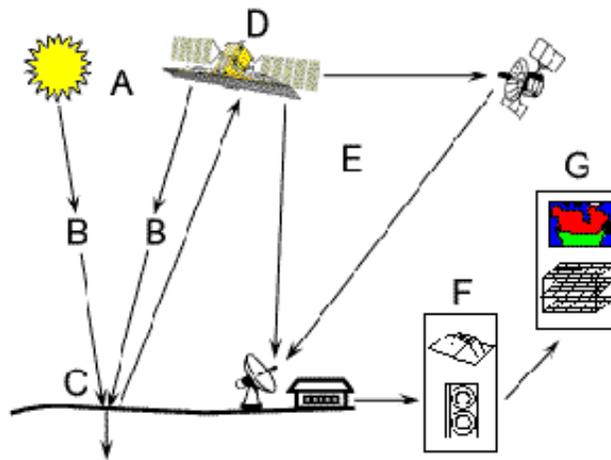


Figura 2. Proceso de teledetección.

De acuerdo con EOS (2021), existen dos tipos principales de teledetección: activa y pasiva; la teledetección activa emplea sensores que emiten su propia energía hacia la Tierra para estudiar la energía reflejada, como en el caso de los radares, mientras la teledetección pasiva depende de la energía natural emitida o reflejada por los objetos, tal como la luz solar reflejada observada por sensores ópticos.

La resolución de los datos recopilados en la teledetección puede variar ampliamente y se clasifica en cuatro categorías principales: espacial, que se refiere al tamaño del píxel en la imagen capturada; temporal, que indica la frecuencia con la que se pueden obtener imágenes de una misma área; espectral, que describe el número y el tipo de longitudes de onda que el sensor puede capturar; y radiométrica, que determina la capacidad del sensor para distinguir entre diferentes niveles de energía reflejada o emitida (IGN, s.f., González-Roglich y Mendoza, 2008).

La teledetección tiene una amplia gama de aplicaciones en varios campos. En la agricultura, por ejemplo, los datos de teledetección se utilizan para monitorizar la salud de los cultivos y gestionar de manera eficiente el uso del agua y de los fertilizantes EOS (2021). En el ámbito de la gestión de desastres, permite una rápida evaluación de los daños tras eventos como terremotos, inundaciones o huracanes, facilitando las labores de respuesta y recuperación (IGN, s.f.). Además, en la ciencia ambiental, contribuye al seguimiento de la deforestación, la degradación de tierras y la dinámica de los ecosistemas a escala global (ESA, 2009).

Otras aplicaciones incluyen la oceanografía, donde se utilizan datos de teledetección para estudiar la dinámica oceánica, la temperatura superficial del mar y la biomasa marina

EOS (2021). En meteorología, los satélites de teledetección ofrecen datos vitales para la predicción del tiempo y el estudio del clima a largo plazo (ESA, 2009).

3.1. NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es una herramienta esencial en teledetección utilizada para cuantificar el verdor y la densidad de la vegetación (USGS, s.f.) a través de imágenes satelitales. Esta medida se obtiene calculando la diferencia entre la reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano (NIR), que la vegetación saludable refleja fuertemente, y la luz roja (R), que absorbe (GISGeography, 2024).

El resultado es un índice que varía entre -1 y 1, proporcionando un indicativo claro del estado de salud de la vegetación a lo largo del tiempo, ya que cuando una planta se encuentra en malas condiciones, ya sea deshidratada y/o enferma, ésta absorbe más luz cercana al infrarrojo, en lugar de reflejarla como lo haría una planta sana, gracias a la presencia de la clorofila, la cual funciona como un pigmento indicador de salud (EOS, 2024). La interpretación de los valores de NDVI varía dependiendo del rango en el que se encuentren, de la temporada y especie de la planta de este modo, la regla general es la siguiente (EOS, 2024; GISGeography, 2024; Toribio, 2019):

- Valores negativos: suelen indicar la presencia de agua, nieve, nubes, así como estructuras hechas por el hombre, ya que estos elementos reflejan muy poco la luz cercana al infrarrojo y más la luz visible.
- Valores cercanos a cero (hasta 0.1): generalmente representan superficies no vegetativas como rocas, arena o suelos desnudos, que reflejan la luz de manera similar en las bandas visibles e infrarrojas, pero en cantidades bajas.

- Valores moderados (0.2 a 0.5): son indicadores de que la vegetación es escasa o dispersa, como arbustos y prados.
- Valores altos (0.6 a 0.8): reflejan áreas de vegetación densa y saludable, típicamente encontradas en bosques templados y tropicales. Estos valores indican una alta reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y baja en la roja.

Este índice es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones prácticas. En la agricultura, ayuda a monitorear la salud de los cultivos, optimizar el uso de recursos y planificar las cosechas. En la gestión forestal, el NDVI facilita la cuantificación del suministro forestal (EOS, 2024) y la evaluación de la biomasa (GISGeography, 2024). Además, es un indicador efectivo de sequías y se emplea en la planificación de la respuesta a incendios forestales y la evaluación de la degradación ambiental.

4. Ecología y conectividad del paisaje

La ecología del paisaje se centra en estudiar la estructura espacial y dinámica de los paisajes, entendiendo éstos como sistemas heterogéneos compuestos de parches o mosaicos con diferentes tipos de cobertura que interactúan entre sí y con las actividades humanas (Durán *et al.*, 2002; Forman y Godron, 1985; Bertrand, 1975). Por lo tanto, esta ciencia interdisciplinaria se dedica al análisis integrado de cómo las variaciones en la configuración del paisaje afectan los procesos ecológicos y biológicos, así como la distribución y flujo de la biodiversidad (Arroyo-Rodríguez *et al.*, 2017).

Los mosaicos que conforman los paisajes cambian a lo largo del tiempo debido a la interacción entre procesos naturales y, principalmente, antropogénicos, lo que resulta en un patrón dinámico de fragmentación y variabilidad espacial (Lejía & Mendoza, 2021; CONABIO, 2021). La fragmentación del paisaje se caracteriza por la reducción del tamaño

de los hábitats y el aumento de su aislamiento (Gurrutxaga & Lozano, 2008), además de la alteración de los ciclos hidrológicos, cambios en el microclima local y en las propiedades del suelo (Forman 1994).

Actualmente, la conectividad del paisaje es una de las estrategias fundamentales para la conservación ecológica, especialmente en paisajes altamente fragmentados, debido a que facilita el movimiento y la dispersión de especies, así como el mantenimiento de los procesos ecológicos (CONABIO 2021; Lejía & Mendoza, 2021). Los corredores ecológicos, como elementos estructurales en el paisaje, juegan un papel clave en la mejora de la conectividad, proporcionando rutas cubiertas por vegetación que permiten el intercambio genético y la migración de especies entre hábitats fragmentados (CONABIO, 2022).

Antecedentes

En los últimos ocho años, se ha realizado una serie de investigaciones que abordan las transformaciones en el uso del suelo y su impacto en los ecosistemas y áreas protegidas, con un enfoque particular en los Parques Nacionales Montaña La Malinche y Popocatepetl-Iztaccíhuatl. Estos estudios han proporcionado valiosas perspectivas sobre cómo las actividades humanas, la urbanización (Leyva y Herrera, 2003) y la gestión de los recursos naturales (Rosete-Vergés *et al.*, 2014) inciden en la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. La creciente evidencia de los efectos negativos de la intervención humana sobre la biodiversidad resalta la necesidad de adoptar medidas de gestión sostenible y estrategias de conservación eficaces (Rodríguez, 2013). A continuación, se presenta una síntesis de los recientes hallazgos clave que fundamentan el contexto y la motivación detrás

del presente estudio, subrayando la importancia de proteger y restaurar estos valiosos paisajes naturales.

Cruz *et al.* (2022) evidenciaron cómo el disturbio humano ha desgastado la integridad del bosque de La Malinche, al disminuir la diversidad arbórea, incrementar la dominancia de pocas especies y reducir la masa forestal. Este estudio realiza un análisis obtenido a partir de imágenes satelitales e índices con la finalidad de identificar la cobertura forestal de los sitios de muestreo. Asimismo, resalta la necesidad urgente de regular las actividades humanas para preservar la biodiversidad en La Malinche, así como en los bosques templados del centro de México, y enfatiza la importancia de estas áreas como corredores biológicos esenciales para la conectividad entre los volcanes de la Faja Volcánica Transmexicana.

Por otro lado, Ramón y Aguilar (2021) abordaron el fenómeno de la periurbanización en la Zona Metropolitana Puebla-Tlaxcala y su relación con el deterioro ambiental de zonas ecológicamente valiosas, como el Parque Nacional La Malinche. Mediante el análisis de imágenes satelitales, este estudio trazó un panorama de la expansión urbana y su contribución al cambio de uso del suelo, evidenciando cómo el crecimiento poblacional y la transformación urbana han acelerado la degradación ambiental y afectado la calidad de vida de la población.

Valdez *et al.* (2016) se centraron en estimar el contenido de carbono en la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche, mediante el cálculo de las pérdidas de carbono debidas a los cambios en el uso del suelo. Este trabajo muestra la relevancia de las áreas naturales protegidas en la mitigación del cambio climático y la urgencia de medidas de conservación eficaces.

Además, se examinó la transformación del paisaje en la región Izta-Popo entre 1980 y 2013, estudio en el que se destaca cómo la extracción de recursos forestales y el cambio de uso del suelo han modificado la composición y estructura de los bosques templados. Este análisis amplía el entendimiento sobre los factores que impulsan la transformación del paisaje en Áreas Naturales Protegidas de México (Quiroz, 2016).

Estos estudios subrayan la complejidad de las interacciones entre las actividades humanas y la conservación de ecosistemas, específicamente de dos Parques Nacionales de la zona Puebla-Tlaxcala, resaltan la importancia de la teledetección y las tecnologías geoespaciales para el monitoreo ambiental y la planificación de la gestión del paisaje. Dichos trabajos establecen un precedente importante para la investigación actual, que busca evaluar los cambios en el uso del suelo entre el Parque Nacional Montaña La Malinche y el Parque Nacional Popocatepetl-Iztaccíhuatl y explorar la viabilidad de establecer corredores biológicos para mejorar la conectividad y la conservación de la biodiversidad en estas áreas naturales clave.

Objetivo principal

Implementar herramientas de teledetección y análisis geoespacial con el propósito de monitorear y evaluar los cambios en el uso de suelo entre el Parque Nacional Montaña La Malinche y el Parque Nacional Popocatepetl-Iztaccíhuatl para identificar áreas óptimas para la conservación o restauración ecológica con el fin de restablecer la conexión entre estas áreas naturales mediante un corredor biológico.

Objetivo particular

Mapear los cambios en el uso de suelo en los seis polígonos de estudio (Malinche, Tlaxcala, Hueyotlipan, Españita, Nanacamilpa y Tlahuapan, durante la temporada seca, mediante el uso de imágenes satelitales y su análisis en un sistema de información geográfica (SIG) a fin de detectar tendencias en el deterioro o conservación de zonas forestales.

Analizar el grado y la velocidad de deterioro del uso de suelo en la región de interés, por medio del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la clasificación del uso de suelo en vegetación primaria, vegetación secundaria, zona agrícola, zona urbana, cuerpo de agua y terreno para comprender la dinámica de cambio y su impacto en la conectividad ecológica entre ambos Parques Nacionales.

Evaluar la viabilidad de establecer un corredor biológico en las áreas identificadas como óptimas, considerando los obstáculos antropogénicos existentes, como zonas urbanas, zonas agrícolas y la deforestación.

Hipótesis

Existe una tendencia hacia la pérdida de cobertura de vegetación primaria en los polígonos intermedios entre los Parques Nacionales Montaña La Malinche e Iztaccíhuatl-Popocatepetl como consecuencia de incrementos en otras categorías de uso de suelo como zonas agrícolas, urbanas, de vegetación secundaria y terrenos abandonados.

Método

El presente trabajo forma parte del proyecto interinstitucional denominado “Análisis de la conectividad funcional entre los Parques Nacionales La Malinche e Iztaccíhuatl-Popocatepetl, e identificación de áreas prioritarias para la conservación”. Dentro de dicho proyecto se seleccionaron para las distintas fases del estudio 6 polígonos de trabajo, uno dentro del Parque Nacional Montaña La Malinche (#1), otro colindante con el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (Tlahuapan #6) y 4 intermedios. Los polígonos intermedios se seleccionaron en los sitios valorados *a priori* como mejores candidatos a fungir como corredor biológico entre los parques nacionales, basado en su menor densidad poblacional, alejados de zonas industriales, que conservaran aún masa forestal y donde se ubicaran cuerpos de agua. Estos polígonos intermedios se ubicaron en los municipios de Tlaxcala (#2), Hueyotlipan (#3), Españita (#4) y Nanacamilpa (#5).

Para analizar cambios en el uso de suelo del área de estudio, se utilizó la teledetección como herramienta principal, mediante la descarga de imágenes satelitales de alta resolución pertenecientes a la plataforma PlanetScope con una resolución de 3 m por pixel (Planet Labs PBC, 2021). La temporalidad elegida fue las temporadas secas, a fin de reducir la presencia de nubes en las imágenes, de los años 2016 y 2021. Los años seleccionados responden a la disponibilidad de imágenes en el catálogo de Planet Labs y al año de muestreos del proyecto. Las imágenes se trabajaron en el software de SIG, QGIS versión 3.34, donde se editaron las bandas RGB para ajustar el color de las imágenes a las necesidades específicas del análisis y se realizaron los cálculos del índice NDVI detallado más adelante.

Posteriormente, se procedió a marcar y nombrar los seis polígonos seleccionados en las imágenes satelitales de cada año, para establecer una base clara para la clasificación del

uso del suelo. Se creó una nueva capa de archivo shape de tipo polígono; en este proceso, se incorporaron campos específicos para asignar un identificador único y la categoría de suelo (vegetación primaria, vegetación secundaria, zonas agrícolas, zonas urbanas, cuerpos de agua y terrenos abandonados) a cada polígono dibujado. Asimismo, se empleó la imagen satelital más reciente de Bing y con mayor resolución, proporcionada por QGIS para verificar la clasificación en zonas dudosas, como los cuerpos de agua, porque al ser pequeños en comparación con las grandes extensiones de vegetación o zonas agrícolas, en ocasiones eran difíciles de identificar. Este proceso permitió clasificar el uso del suelo dentro de los polígonos de manera precisa.

Para la clasificación del uso del suelo, se establecieron criterios específicos basados en las características observables de cada área. Se identificó como vegetación primaria aquellas áreas de densa cobertura arbórea; la vegetación secundaria se distinguió por la presencia de una mezcla de arbustos, pastizales y una densidad vegetal reducida en comparación con la vegetación primaria. Las zonas urbanas se caracterizaron por la presencia de construcciones y espacios recreativos urbanos, mientras que las áreas agrícolas se reconocieron por los cultivos o el suelo preparado para la siembra. Para los cuerpos de agua se incluyeron jagüeyes, albercas y lagos. Por último, los terrenos abandonados se identificaron por la falta de árboles y arbustos, lo cual sugería un uso previo del suelo para cultivos o que había sufrido deforestación.

Se asignaron colores específicos para cada categoría de suelo, lo que mejoró significativamente la visualización, el análisis de los mapas resultantes y facilitó la interpretación de los datos. Con la herramienta de la calculadora de QGIS, se determinó el área exacta ocupada por cada figura marcada dentro de los polígonos para luego calcular el

área total de categoría de la clasificación del uso de suelo, primero en unidades de metros cuadrados [m^2] y luego convertida a hectáreas [ha], lo que brindó una medida cuantitativa del espacio que cada tipo de suelo abarca en la zona de estudio.

Tras clasificar los polígonos para ambos años y calcular sus áreas [ha], los datos obtenidos en QGIS se exportaron a un archivo de tipo XLSX. Posteriormente, con el propósito de analizar los cambios en el uso de suelo, se calculó el área ocupada por cada categoría en cada polígono de la clasificación de 2016 y 2021, con sus respectivos porcentajes, y se obtuvo la diferencia entre las áreas de cada año, lo que simplificó la comparación mediante gráficas de dispersión y permitió una evaluación detallada del grado y la velocidad de los cambios en el uso del suelo, en el software Excel.

Además, se aplicó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) sobre las mismas imágenes satelitales para evaluar la salud de la vegetación y su variación a lo largo del tiempo, lo que proporciona un análisis sobre la calidad y densidad de la vegetación en los polígonos estudiados. Este índice, fue calculado a partir de las bandas del espectro electromagnético del rojo y del infrarrojo cercano, mediante la siguiente operación:

$$NDVI = \frac{(IR\ cercano - Rojo)}{(IR\ cercano + Rojo)}$$

Finalmente, el software QGIS se utilizó para generar mapas de consulta con las imágenes resultantes de la clasificación del uso del suelo y del análisis NDVI. Estos mapas, incluidos en el anexo de este trabajo, representan una herramienta esencial para la interpretación visual de los cambios observados y para fundamentar las recomendaciones de conservación y restauración ecológica propuestas en este estudio.

Resultados

1. Cambios en el uso de suelo

Se presenta una evaluación cuantitativa de los cambios en la vegetación primaria, vegetación secundaria, zonas agrícolas, zonas urbanas, cuerpos de agua y terrenos abandonados, en los 6 polígonos seleccionados, comparando el área cubierta en los años 2016 y 2021, mediante su diferencia. Esta clasificación del uso de suelo se realizó en el software QGIS (Anexo).

El área ocupada por vegetación primaria, es decir, vegetación densa y en buen estado de conservación aumentó en casi todos los polígonos con excepción de Nanacamilpa (#5), donde hubo un ligero decremento y en Tlahuapan (#6) donde se mantuvo estable (Fig. 3, Tabla 1). El mayor aumento en la vegetación primaria ocurrió en el área de los Cerros Blancos de Tlaxcala (#2) con un aumento de 773.9 ha.

Tabla 1. Cambio en el área [ha] de la vegetación primaria por polígono, entre 2016 y 2021.

Área de Vegetación Primaria [ha]			
Polígonos/Año	2016	2021	Diferencia
1	367.91	1,036.78	668.87
2	87.77	861.69	773.93
3	42.15	459.81	417.66
4	190.30	551.41	361.11
5	1,429.65	1,365.12	-64.53
6	1,081.16	1,107.84	26.68

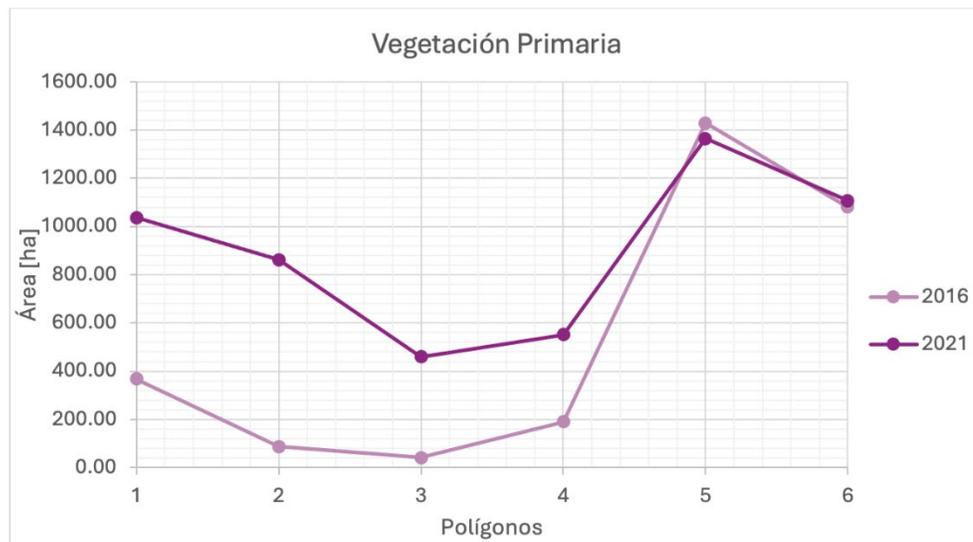


Figura 3. Comparación del área [ha] de vegetación primaria de los 6 polígonos, entre 2016 y 2021.

El área ocupada por vegetación secundaria, es decir, vegetación con visibles signos de alteración o en recuperación disminuyó en casi todos los polígonos con excepción de Nanacamilpa (#5), donde hubo un ligero decremento (Fig. 4, Tabla 2). El mayor decremento en la vegetación secundaria ocurrió en el área de los Cerros Blancos de Tlaxcala (#2) con una disminución de 605.3952 ha.

Tabla 2. Cambio en el área [ha] de la vegetación secundaria por polígono, entre 2016 y 2021.

Área de Vegetación Secundaria [ha]			
Polígonos/Año	2016	2021	Diferencia
1	965.84	370.05	-595.80
2	1,149.68	544.28	-605.40
3	1,053.12	583.23	-469.89
4	805.01	342.40	-462.61
5	49.48	92.11	42.63
6	305.89	265.22	-40.67

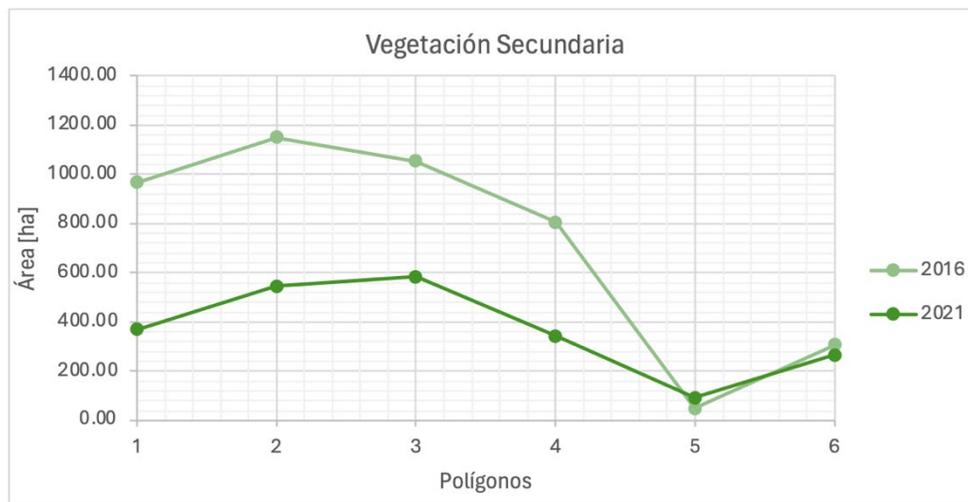


Figura 4. Comparación del área [ha] de vegetación secundaria de los 6 polígonos, entre 2016 y 2021.

El área ocupada por zonas agrícolas, esto es, terrenos donde se practica la agricultura, en casi todos los polígonos aumentó con excepción de La Malinche (#1), donde hubo un ligero decremento y en Tlahuapan (#6) donde se mantuvo estable (Fig. 5, Tabla 3). El mayor aumento en las zonas agrícolas ocurrió en el área de Hueyitlipan (#3) con un aumento de 285.48 ha.

Tabla 3. Cambio en el área [ha] de las zonas agrícolas por polígono, entre 2016 y 2021.

Polígonos/Año	Área de Zona Agrícola [ha]		
	2016.00	2021.00	Diferencia
1	433.14	416.69	-16.45
2	372.52	455.13	82.61
3	623.00	908.48	285.48
4	1,018.78	1,113.94	95.15
5	7.97	11.60	3.63
6	0.00	0.00	0.00

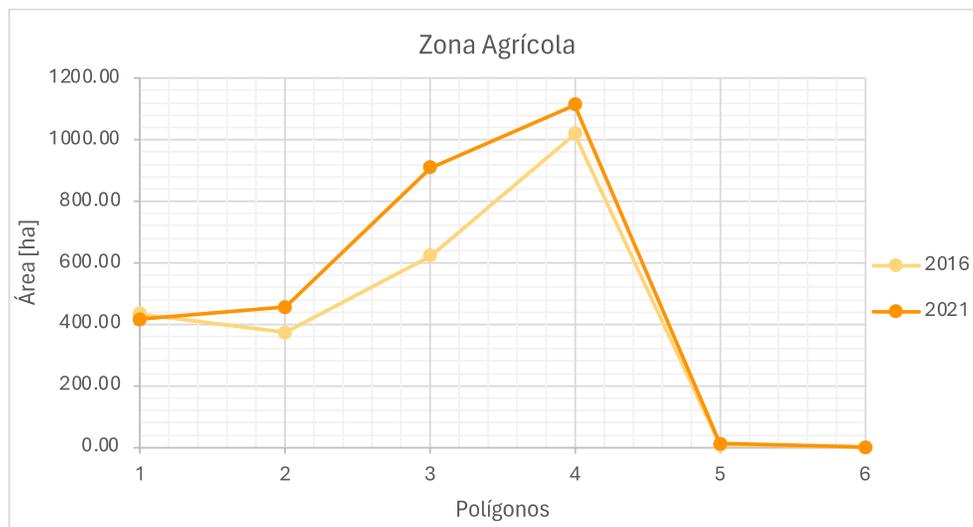


Figura 5. Comparación del área [ha] de zonas agrícolas de los 6 polígonos, entre 2016 y 2021.

El área ocupada por zonas urbanas: terrenos donde existen infraestructuras como edificios, parques, calles, casas, en casi todos los polígonos aumentó con excepción de Tlaxcala (#2) y Españita (#4), donde hubo un decremento (Fig. 6, Tabla 4). El mayor aumento en las zonas urbanas ocurrió en el área de Nanacamilpa (#5) con un aumento de 3.63 ha.

Tabla 4. Cambio en el área [ha] de las zonas urbanas por polígono, entre 2016 y 2021.

Área de Zona Urbana [ha]			
Polígonos/Año	2016	2021	Diferencia
1	0.00	1.29	1.29
2	165.02	140.00	-25.02
3	13.40	14.61	1.21
4	61.47	60.89	-0.58
5	7.97	11.60	3.63
6	1.95	3.99	2.04

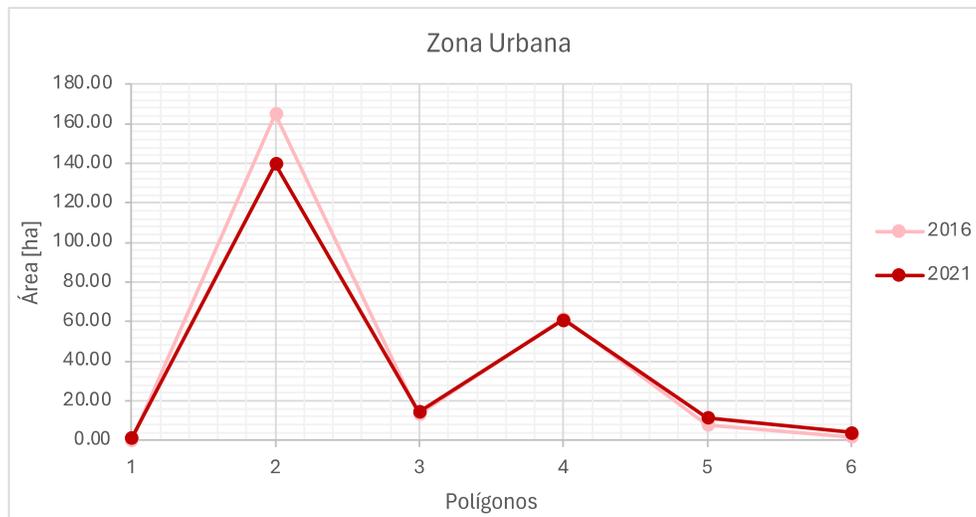


Figura 6. Comparación del área [ha] de zonas urbanas de los 6 polígonos, entre 2016 y 2021.

El área ocupada por cuerpos de agua, es decir, terrenos donde hay extensiones de agua naturales o artificiales, en casi todos los polígonos disminuyó y Española (#4), con excepción de Nanacamilpa (#5) donde se mantuvo estable (Fig. 7, Tabla 5). La mayor disminución en los cuerpos de agua ocurrió en el área de Hueyotlipán (#3) con un decremento de 26.72 ha.

Tabla 5. Cambio en el área [ha] de los cuerpos de agua por polígono, entre 2016 y 2021.

Área de Cuerpos de Agua [ha]			
Polígonos/Año	2016	2021	Diferencia
1	0.24	0.10	-0.14
2	0.90	0.89	-0.01
3	38.78	12.06	-26.72
4	4.61	5.15	0.54
5	0.51	0.58	0.07
6	0.16	0.00	-0.16



Figura 7. Comparación del área [ha] de cuerpos de agua de los 6 polígonos, entre 2016 y 2021.

El área ocupada por terrenos abandonados, es decir, áreas en desuso que antes eran empleadas para actividades agrícolas o urbanas, en todos los polígonos (Fig. 8, Tabla 6). El mayor aumento en los terrenos abandonados ocurrió en el área de Tlaxcala (#2) con un aumento de 234.04 ha.

Tabla 6. Cambio en el área [ha] de los terrenos abandonados por polígono, entre 2016 y 2021.

Polígonos/Año	Área de Terreno Abandonado [ha]		
	2016.0	2021.0	Diferencia
1	72.96	5.25	-67.70
2	284.66	50.63	-234.04
3	91.16	17.44	-73.72
4	41.99	30.31	-11.68
5	23.10	6.80	-16.30
6	0.49	0.00	-0.49

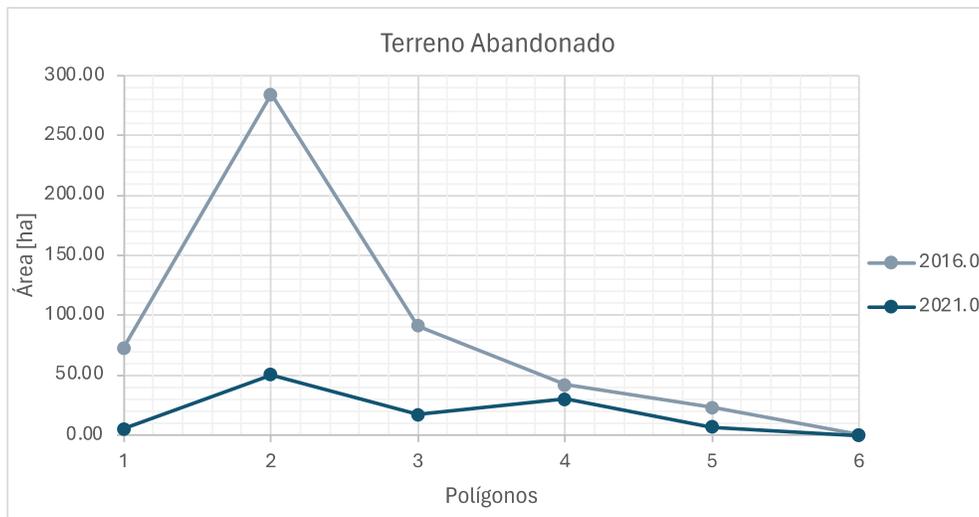


Figura 8. Comparación del área [ha] de terrenos abandonados de los 6 polígonos, entre 2016 y 2021.

En la Tabla 7 se detalla la distribución porcentual del uso del suelo en hectáreas (ha) para el año 2016 en los seis polígonos. Tlaxcala (#2) se caracteriza por un dominio de vegetación secundaria (55.79%), con más de la mitad de su territorio ocupado por este tipo de vegetación, seguido de zonas agrícolas (18.08%). Hueyotlipan (#3), similarmente, se destaca por tener más de la mitad de su área con vegetación secundaria (56.57%) y gran parte de zonas agrícolas (33.47%). En Nanacamilpa (#5) y Tlahuapan (#6), destaca la vegetación primaria (76.62% y 77.80%, respectivamente), ocupando aproximadamente tres cuartas partes del terreno en ambas regiones. La Malinche (#1) se distingue por una composición balanceada de vegetación secundaria (20.22%) y zonas agrícolas (22.77%). Finalmente, Españita (#4) se distingue por una gran proporción de zonas agrícolas (52.49%) que constituyen casi la mitad de su territorio.

Tabla 7. Porcentajes del área [ha] que ocupa cada categoría en cada uno de los polígonos, en 2016.

	Porcentajes [ha] 2016					
	Tlaxcala	Hueyotlipan	Tlahuapan	Malinche	Nanacamilpa	Españita
Cuerpos de Agua	0.04%	2.08%	0.01%	0.01%	0.03%	0.22%
Terrenos Abandonados	13.81%	4.90%	0.04%	3.96%	1.24%	1.98%
Vegetación Primaria	4.26%	2.26%	77.80%	19.99%	76.62%	8.97%
Vegetación Secundaria	55.79%	56.57%	22.01%	52.49%	2.65%	37.93%
Zonas Agrícolas	18.08%	33.47%	0.00%	23.54%	19.03%	48.01%
Zonas Urbanas	8.01%	0.72%	0.14%	0.00%	0.43%	2.90%
Grand Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

La Tabla 8 muestra la distribución porcentual de uso del suelo en 2021 para los diferentes polígonos. En Tlaxcala (#2), la vegetación primaria es predominante (41.98%), mientras que la vegetación secundaria (26.52%) y las zonas agrícolas (22.17%) también son significativas. Hueyotlipan (#3) se distingue por tener la mayor proporción de zonas agrícolas (45.52%). Tlahuapan (#6) muestra una sobresaliente mayoría de vegetación primaria (80.45), La Malinche (#1) tiene una distribución más equilibrada, aunque predomina la vegetación primaria (56.65%). Nanacamilpa (#5) también resalta por su vegetación primaria (73.80%) junto con una notable presencia de zonas agrícolas (20.19%). Finalmente, Españita (#4) es particularmente notable por su enfoque en la agricultura (52.94%), que ocupa más de la mitad de su territorio.

Tabla 8. Porcentajes del área [ha] que ocupa cada categoría en cada uno de los polígonos, en 2021.

	Porcentajes [ha] 2021					
	Tlaxcala	Hueyotlipan	Tlahuapan	Malinche	Nanacamilpa	Españita
Cuerpos de Agua	0.04%	0.60%	0.00%	0.01%	0.03%	0.24%
Terrenos Abandonados	2.47%	0.87%	0.00%	0.29%	0.37%	1.44%
Vegetación Primaria	41.98%	23.04%	80.45%	56.65%	73.80%	26.21%
Vegetación Secundaria	26.52%	29.23%	19.26%	20.22%	4.98%	16.27%
Zonas Agrícolas	22.17%	45.52%	0.00%	22.77%	20.19%	52.94%
Zonas Urbanas	6.82%	0.73%	0.29%	0.07%	0.63%	2.89%
Grand Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

En la Tabla 9 se presentan los porcentajes de cobertura forestal (vegetación primaria y secundaria) para los años 2016 y 2021, de cada polígono. En La Malinche (#1) y Tlaxcala (#2), la cobertura incrementó de 2016 a 2021, mientras que en Hueyotlipan (#3), Españita (#4) y Nanacamilpa (#5) disminuyó y, por último, en Tlahuapan (#6) se mantuvo.

Tabla 9. Porcentaje de cobertura forestal en cada polígono, en 2016 y 2021.

Porcentaje de cobertura forestal		
Polígono/Año	2016 (%)	2021 (%)
Malinche	72.48	76.87
Tlaxcala	60.05	68.50
Hueyotlipan	58.83	52.27
Españita	46.90	42.48
Nanacamilpa	79.27	78.78
Tlahuapan	99.81	99.71

2. Índice de la Vegetación de Diferencia Normalizada

La tabla 10 proporcionada muestra los valores de la media y desviación estándar del NDVI para los seis polígonos (Anexo), en el año 2016. La media del NDVI en estos polígonos varía desde 0.41 en Hueyotlipan (#3), lo que indica una densidad de vegetación relativamente más baja, hasta 0.71 en Tlahuapan (#6) que sugiere una densidad de vegetación muy alta y

probablemente una salud vegetal óptima. La desviación estándar en estos polígonos va desde 0.07 en Tlahuapan (#6), lo que indica que los valores del NDVI están muy concentrados alrededor de la media (menos variabilidad), hasta 0.16 en Nanacamilpa (#5), que muestra una mayor variabilidad en la densidad de la vegetación. En general, La Malinche (#1) y Nanacamilpa (#5) también muestran valores altos de la media del NDVI, indicando buena cobertura vegetal, pero con una variabilidad más alta comparada con Tlahuapan (#6). Tlaxcala (#2), Hueyotlipan (#3) y Españita (#4) tienen valores medios más bajos, con una variabilidad moderada, lo que refleja una salud vegetal más heterogénea o una cobertura menos densa.

Tabla 10. Valores del NDVI en los polígonos de 2016.

Polígonos	Valores de NDVI, 2016	
	Media	Desviación estándar
1	0.66	0.13
2	0.49	0.16
3	0.41	0.14
4	0.43	0.15
5	0.65	0.16
6	0.71	0.07

La tabla 11 muestra un incremento general en la media del NDVI en todos los polígonos en 2021 en comparación con los valores de 2016, lo que indica una mejora en la densidad y salud de la vegetación. La Malinche (#1) presenta la mayor media (0.84) con la menor desviación estándar (0.09), sugiriendo una vegetación densa y también una homogeneidad en su distribución. Tlahuapan (#6) sigue con una media alta (0.85) y la desviación estándar más baja (0.06), indicando una densidad de vegetación alta y consistente. Tlaxcala (#2), Hueyotlipan (#3) y Españita (#4) tienen medias más moderadas (rango de 0.6684 a 0.7359) con una variabilidad relativamente mayor, especialmente en Tlaxcala (#2), que tiene la

desviación estándar más alta (0.16). Nanacamilpa (#5) también muestra una alta media del NDVI (0.80) con una desviación estándar moderada (0.10). Estos resultados reflejan una probable tendencia positiva en el crecimiento y el mantenimiento de la vegetación en la región estudiada entre 2016 y 2021.

Tabla 11. Valores del NDVI en los polígonos de 2021.

Polígonos	Valores de NDVI, 2021	
	Media	Desviación estándar
1	0.84	0.09
2	0.74	0.16
3	0.67	0.13
4	0.68	0.14
5	0.80	0.10
6	0.85	0.06

Discusión

La dinámica de uso de suelo observada en los seis polígonos entre 2016 y 2021 destaca patrones complejos de cambio en la vegetación primaria y secundaria, expansión agrícola y urbana, así como fluctuaciones en cuerpos de agua y terrenos abandonados. Estos patrones son reflejo de procesos más amplios de cambio en el uso del suelo que han sido documentados en la literatura sobre cambios territoriales en México, como la recuperación de la vegetación a lo largo de la Sierra Madre Oriental y la deforestación en zonas de la Sierra Madre Occidental, el Bajío y la parte central del país (SEMARNAT, 2002).

Los resultados indican un aumento en la vegetación primaria en la mayoría de los polígonos, con la excepción de Nanacamilpa. Este aumento es paralelo a una disminución en la vegetación secundaria en la mayoría de los polígonos, excepto en Nanacamilpa donde la vegetación secundaria aumentó. Este comportamiento sugiere una dinámica de sucesión

vegetal (CONAFOR, 2017) donde la vegetación primaria podría estar recuperándose o expandiéndose a expensas de la secundaria en algunas áreas, mientras que en otras, como Nanacamilpa, el proceso podría ser inverso, así como lo sugieren Cortez y Rojas (2021) mediante el análisis con base en el POTDUT (2013), con la reducción de superficies boscosas hasta el año 2030, debido a la “deforestación, tala clandestina de árboles y extensión de la frontera agrícola”. La literatura sugiere que las áreas con vegetación secundaria en México suelen derivar de la alteración de vegetación primaria, implicando procesos de degradación más que de recuperación (Rosete *et al.*, 1997; Sánchez *et al.*, 2003 y Cuevas *et al.*, 2010).

El aumento en las zonas agrícolas observado en varios polígonos coincide con un patrón nacional de conversión de tierras hacia la agricultura, que ha sido una fuerza dominante en el cambio de uso de suelo en México (Cortez y Rojas, 2021; Síntesis Ejecutiva, 2015, SEMARNAT, 2002). Este aumento podría estar contribuyendo a la disminución de la vegetación secundaria y posiblemente afectando la estabilidad de los ecosistemas locales. La literatura indica que los cambios antropogénicos, mediante la transformación de vegetación hacia pastizales ganaderos o cultivos agrícolas es especialmente pronunciada en áreas de vegetación secundaria, siendo ésta una de las principales vías de degradación vegetal y cambios de uso de suelo en México (SEMARNAT, 2002; González 2013). Además, la expansión de las zonas urbanas en casi todos los polígonos, excepto en Tlaxcala y Españaña, es coherente con las tendencias nacionales de urbanización y conurbación que han sido bien documentadas (INEGI, 2010; González 2013).

La disminución de cuerpos de agua en Hueyotlipan es notable, dada la importancia de estos ecosistemas para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Esto podría reflejar un patrón más amplio de inestabilidad en los cuerpos de agua a nivel regional y nacional, tal

como se observó durante el periodo 1980-2000 (Leyva y Herrera, 2003). Los terrenos abandonados mostraron una disminución en todos los polígonos, lo que podría indicar una intensificación del uso de la tierra o una gestión más efectiva del suelo que anteriormente estaba subutilizado y ahora posiblemente es empleado para la agricultura, construcción de zonas urbanas o incluso para la rehabilitación de estos terrenos para proyectos de conservación o reforestación.

El incremento general en la media del NDVI de 2021 en comparación con 2016 sugiere una mejora en la densidad y salud de la vegetación en la región. Esto es particularmente notable en La Malinche y Tlahuapan, que presentan altas medias del NDVI y bajas desviaciones estándar, indicando una cobertura vegetal densa y homogénea, lo que coincide con resultados previos del proyecto al que pertenece el presente trabajo “*Análisis de la conectividad funcional entre los Parques Nacionales La Malinche e Iztaccihuatl-Popocatepetl e identificación de áreas prioritarias para la conservación*”, en dichos resultados previos se explica que los valores más altos de NDVI se obtuvieron en las faldas de la montaña La Malinche y en el área de estudio Santa Rita Tlahuapan y los valores más bajos se encontraron en zonas agrícolas (Arias *et al.*, 2022). Estos hallazgos podrían reflejar esfuerzos efectivos de conservación que han promovido la salud vegetal.

Conclusión

La investigación realizada sobre el cambio en el uso del suelo y el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) entre 2016 y 2021 proporciona un entendimiento crítico de las dinámicas del suelo en la zona de estudio. El incremento en áreas de vegetación primaria, secundaria y los cambios en zonas agrícolas y urbanas reflejan una transformación en el paisaje, que podría estar influenciada tanto por intervención humana como por la evolución natural del ecosistema.

La teledetección ha demostrado ser una herramienta poderosa y eficiente, permitiendo monitorear extensas áreas de terreno con relativa facilidad. Sin embargo, la metodología de clasificación manual puede conllevar a errores humanos, lo cual destaca la importancia de complementar con verificaciones de campo y la aplicación de algoritmos automáticos de clasificación para mejorar la precisión.

Aunque los resultados indican mejoras en la cobertura vegetal, se podría mejorar el método aplicado para su análisis. Se sugiere la integración de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes y algoritmos de aprendizaje automático para refinar los resultados de la clasificación y disminuir la subjetividad en la interpretación de los datos. La implementación de estos avances tecnológicos puede proporcionar una evaluación más precisa de los cambios en el uso del suelo.

La utilidad de la evaluación es significativa, en particular al considerar la selección de áreas para la conservación o la restauración a través de un corredor biológico que potencie la conectividad entre los parques nacionales La Malinche y Popocatepetl-Iztaccíhuatl. Los datos demuestran un aumento en la vegetación primaria y una variación en la vegetación secundaria y zonas agrícolas, sugiriendo que la zona posee un potencial para iniciativas de

conservación. La identificación de áreas prioritarias para la conservación basada en datos de teledetección podría ser fundamental para mejorar en análisis de la biodiversidad y el equilibrio ecológico en la región.

Los resultados de este estudio apoyan la idea de que los métodos de teledetección son útiles para monitorear cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal. A su vez, expanden la comprensión presentada por otros autores en el campo. Sin embargo, resaltan la importancia de métodos de validación de datos y el uso de técnicas automatizadas para mejorar la fiabilidad de los resultados de teledetección. A partir de estos resultados, se puede concluir que la evaluación del uso de suelo y el NDVI son indicadores valiosos para la toma de decisiones relacionadas con la conservación, restauración y la gestión del territorio. No obstante, para asegurar una toma de decisiones óptima y efectiva, se deben integrar continuamente mejoras metodológicas y validación de datos.

Referencias

- Acosta Mireles, Miguel, Carrillo Anzures, Fernando, Delgado, Diego, & Velasco Bautista, Efraín. (2014). Establecimiento de parcelas permanentes para evaluar impactos del cambio climático en el Parque Nacional Izta-Popo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(26), 06-29. Recuperado en 16 de abril de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000600002&lng=es&tlng=es.
- Arias Rodriguez, Lenin & Indy, Jeane & Paramo, Salomon & Hernández, Javier & D'artola Barceló, Alain & España-García, Ángel & Morales-García, Seleny & Ramírez-Hernández, Ady & Perera Garcia, Martha & Rodríguez-Valencia, W.. (2010). Empleo del análisis citogenético para el monitoreo y conservación de poblaciones: Peces de Tabasco, México. *Mesoamericana*. 14. 57-58.
- Arroyo-Rodríguez, Víctor, Moreno, Claudia E., & Galán-Acedo, Carmen. (2017). La ecología del paisaje en México: logros, desafíos y oportunidades en las ciencias biológicas. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(Supl. dic), 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.004>
- Berry, M. W., R. O. Flamm, B. C. Hazen, y R. L. MacIntyre 1996. «The Land-Use Change and Analysis System (LU- CAS) for Evaluating Landscape Management Decisions». *IEEE Computational Science & Engineering* 3(1): 24-35.

Bertrand G. (1975): “Pour une histoire écologique de la France rurale”, en Duby, G. y Wallon, A. (dirs.), *Histoire de la France rurale*, vol. 1, pp. 35-116.

Briassoulis, H. (2019). *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches*. USA. Regional Research Institute, West Virginia University. Editado por Scott Loveridge and Randall Jackson. Consultado el 15 de marzo de 2020 en: <https://researchrepository.wvu.edu/rri-web-book/3>

CONABIO. (2021). *Fragmentación, conectividad y amenazas*. Biodiversidad Mexicana. Recuperado 16 de abril de 2024, de <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/fragmentacion-conectividad-y-amenazas>

CONABIO. (2022). ¿Qué es un corredor biológico? Biodiversidad Mexicana. Recuperado el 16 de abril de 2024, de <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/que-es-corredor>

CONABIO. (n.d.). *Cuerpos de agua*. Biodiversidad Mexicana. Recuperado el 16 de abril de 2024, de <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/simoh-mx/cuerpos-de-agua>

CONAFOR. (2017). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informa de Resultados 2009-2014*. Recuperado el 26 de abril de 2024, de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD002905.pdf>

Cortez Yacila, Héctor & Contreras, Janeth. (2021). Aproximación al conocimiento del cambio de uso del suelo en Tlaxcala, México. Recuperado el 26 de abril de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/352546505_Aproximacion_al_conocimiento_del_cambio_de_uso_del_suelo_en_Tlaxcala_Mexico

Cruz Salazar, B., George Miranda, S., & Tlapa Haro, A. (2022). La agonía de los bosques de La Malinche. *Contactos, Revista De Educación En Ciencias E Ingeniería*, (123), 29-41. Recuperado a partir de <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/180>

Cruz Salazar, B., George Miranda, S., & Tlapa Haro, A. (2022). La agonía de los bosques de La Malinche. *Contactos, Revista De Educación En Ciencias E Ingeniería*, (123), 29-41. Recuperado a partir de <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/180>

Díaz-Gallegos, José Reyes, Mas, Jean-François, & Velázquez Montes, Alejandro. (2008). Monitoreo de los patrones de deforestación en el corredor biológico Mesoamericano, México. *Interciencia*, 33(12), 882-890. Recuperado en 17 de abril de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008001200006&lng=es&tlng=es.

Díaz, Asunción & Martínez-Hernández, Carlos. (2014). Usos del suelo y abandono de tierras de cultivo en el Altiplano Jumilla-Yecla (Región de Murcia).

Durán, E., Galicia, L., Pérez-García, E. y Zambrano, L. (2002). El paisaje en ecología. *Ciencias, UNAM*, 67, 44–50.

Durand, L., & Jiménez, J. (2020). Sobre áreas naturales protegidas y la construcción de no-lugares. Notas para México. *Revista LIDER*, 12(16), 59-72. Recuperado a partir de <https://revistaliderchile.ulagos.cl/index.php/liderchile/article/view/2329>

EOS. (2024). *NDVI: Normalized Difference Vegetation Index*. Recuperado el 16 de abril de 2024, de <https://eos.com/make-an-analysis/ndvi/>

EOS. *NDVI: Preguntas frecuentes sobre este índice de vegetación*. (2020). Recuperado el 16 de abril de 2024, de <https://eos.com/es/blog/ndvi-preguntas-frecuentes/>

Fernández, Jesús & López Domínguez, Juan Carlos. (2006). Biodiversidad Parque Nacional Malinche, Tlaxcala, México..

Fondo para la Comunicación y Educación Ambiental. (s.f.). Cuerpos de agua. *Agua.Org.Mx*. Retrieved April 16, 2024, from <https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/>

Food and Agriculture Organization (FAO, 1995). Planning for Sustainable Use of Land Resources. FAO Land and Water Bulletin 2. Roma: FAO.

Forman R., T. T. (1994). Land mosaics, the ecology of landscapes and regions, University Press, Cambridge.

Forman, R. T. T. y Godron, M. (1986): *Landscape Ecology*, John Wiley and Sons, Nueva York.

Gómez, Niza, Escalante, Tania, Rodríguez, Gerardo, Linaje, Miguel, & Morrone, Juan J.. (2012). Caracterización biogeográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y análisis de los patrones de distribución de su mastofauna. *Revista mexicana de biodiversidad*, 83(1), 258-272. Recuperado en 16 de abril de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532012000100028&lng=es&tlng=es.

GISGeography. (2024). *What is NDVI (Normalized difference vegetation index)?* Recuperado el 16 de abril de 2024, de <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>

Gobierno de México. (s.f.). Construyendo las regiones bioculturales prioritarias para la conservación in situ y el desarrollo sustentable. Recuperado el 16 de abril de 2024, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/325814/biodiversidad_4_cuatro_98-135_eckart_boege.pdf

González, M. (2013). Programa de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano para el Estado de Tlaxcala. Periódico Oficial No. 1 Extraordinario. Recuperado el 26 de abril de 2024, de <https://sfp.tlaxcala.gob.mx/pdf/normateca/Programa%20de%20Ordenamiento%20Territorial%20y%20Desarrollo%20Urbano%20para%20el%20Estado%20de%20Tlaxcala..pdf>

Gurrutxaga, Mikel & Lozano Valencia, Pedro. (2008). Ecología del Paisaje. Un marco para el estudio integrado de la dinámica territorial y su incidencia en la vida silvestre. *Estudios Geográficos*. 256. 519-543. 10.3989/estgeogr.0427.

IMPLAN. (2020). Indicadores municipales para el seguimiento a los objetivos de desarrollo sostenible. Resultados. ODS 15. Vida de Ecosistemas Terrestres.

INEGI. (s.f.). Cuarenta años de cartografía de la vegetación de México. Recuperado el 16 de abril de 2024, de https://www.snieg.mx/DocumentacionPortal/geografico/sesiones/doc_22017/Present_Serie_VI_Carta_U_Sue.pdf

INEGI. (s.f.). Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. Recuperado el 16 de abril de 2024, de <https://www.inegi.org.mx/investigacion/ndvi/>

Lambin, Eric F., B.L. Turner, Helmut J. Geist, Samuel B. Agbola, Arild Angelsen, John W. Bruce, Oliver T. Coomes, Rodolfo Dirzo, Gunther Fischer, Carl Folke, P.S. George, Katherine Homewood, Jacques Imbernon, Rik Leemans, Xiubin Li, Emilio F. Moran, Michael Mortimore, P.S. Ramakrishnan, John F. Richards, Helle Skanes, Will Steffen, Glenn D. Stone, Uno Svedin, Tom A. Veldkamp, Coleen Vogel y, Jianchu Xu. (2001). «The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths». *Global Environmental Change* 11: 261–269.

Landsat Normalized Difference Vegetation Index | U.S. Geological Survey. Recuperado el 26 de abril de 2024, de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation->

QGIS.org (2024). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org>.

Quiroz, A. R. (2016). Capacidad adaptativa en áreas naturales protegidas y sus sistemas socioecológicos, bajo dinámicas de cambio, riesgo y vulnerabilidad: Ejido Emiliano Zapata, un caso de estudio en el Área Natural Protegida Izta-Popo. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/430>

Ramón González, José Augusto; Aguilar, Adrián Guillermo. (2021). “Expansión urbana irregular, cambio de uso del suelo y deterioro ambiental en la periferia norte de la Zona Metropolitana Puebla-Tlaxcala: el caso del Parque Nacional La Malinche.” *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 30 (2): 441-458. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n2.89849>

Robles, R. (2009). Las unidades de manejo para la conservación de vida silvestre y el Corredor Biológico Mesoamericano México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Serie Acciones/Número 2. URL: https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/versiones_digitales/A2UMA.pdf

Rodríguez, L. A. (2013). *Transformación del paisaje en la zona centro de la región Izta-Popo [1980-2013]*[Trabajo Recepcional]. <https://cdigital.uv.mx/>

Romero-Barrios, Claudia & García-Gallegos, Elizabeth & Acosta, Elizabeth. (2015). Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 2. 63-70.

Rosete-Vergés, Fernando A., Pérez-Damián, José Luis, Villalobos-Delgado, Mariano, Navarro-Salas, Elda N., Salinas-Chávez, Eduardo, & Remond-Noa, Ricardo. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y bosques*, 20(1), 21-35. Recuperado el 16 de abril de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000100003&lng=es&tlng=es.

SEMARNAT. (2002). 2. Vegetación y uso de suelo. Compendio de Estadísticas Ambientales. Recuperado el 26 de abril de 2024, de https://paot.org.mx/centro/informacion/semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/02_Vegetacion/2.2_Cambios/index.htm

SEMARNAT. (2005). Capítulo 2. Vegetación y uso del suelo. Recuperado el 16 de abril de 2024, de http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/informe_mex2005/cap2.pdf

SEMARNAT. (2014). Ecosistemas Terrestres. Recuperado el 20 de abril de 2024, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/02_ecosistemas/2_2.html

SEMARNAT. (s.f.). Vegetación y Uso de Suelo. Recuperado el 26 de abril de 2024, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen/02_vegetacion/cap2.html

SIAP. (s.f.). Superficie susceptible de ser cultivada. Recuperado el 26 de abril de 2024, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/596953/29._Superficie_Susceptible_Tlaxcala.pdf

Singh, Sunil & Singh, Dr Mahesh & Kumar, Chandra & Ghoshal, Nandita. (2019). Land use, land use change and sustainable land management.

Síntesis Ejecutiva. (2015). Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Tlaxcala. Periódico Oficial No. 36 Cuarta Sección. Recuperado el 26 de abril de 2024, de <https://periodico.tlaxcala.gob.mx/indices/Peri36-4a2016.pdf>

Toribio, G. (2019). NDVI, ¿qué es y para qué sirve? Recuperado el 16 de abril de 2024, de <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>

Torres Benites, E., Cortes Becerra, J., Mejía Sáenz, E., Exebio García, A., Santos Hernández, A. L., & Delgadillo Piñón, M. E. (2003). Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca "El Josefino", Jesús María, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 21(1), 117-126. °

USGS. (s.f.). *Landsat normalized difference vegetation index | u. S. Geological survey*. Recuperado el 16 de abril de 2024, de

Valdez Pérez, María Eugenia, Gandhi González Guerrero, Rafael Morales Ibarra y Rut Yadira Bolaños Suárez. (2016)2. "Reserva de carbono en biomasa forestal y suelos minerales en el Parque Nacional Malinche, México". *Cuadernos de Geografía:*

Revista Colombiana de Geografía 25 (1): 207-215. DOI:
10.15446/rcdg.v25n1.40382

Vargas, M. F. Parques Nacionales de México. Vol. I. Zonas Centro, Oriente y Occidente, México, Instituto Nacional de Ecología, pp.331, 1997.

Velázquez, Alejandro & Gerardo, Bocco & Siebe, Christina. (2014). Cambio de uso del suelo. Red Temática de CONACYT sobre Medio Ambiente y Sustentabilidad. Compilada por M. Maass y M. Equihua. 1. 1-4.

Villers, Lourdes, Fabiola Rojas y Pedro Tenorio. 2006. *Guía botánica del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala-Puebla*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco y J.M. Melillo 1997. «Human domination of Earth's ecosystems». *Science* 277: 494-499.

Yoko, Sugiura & Elizabeth, Zepeda & Carmen, Pérez & Shigeru, Kabata. (2010). EL DESARROLLO DE UN ASENTAMIENTO LACUSTRE EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA: EL CASO DE SANTA CRUZ ATIZAPÁN, MÉXICO CENTRAL (The development of a lake settlement in the upper basin of the Lerma river). *Arqueología Iberoamericana*. 05.

Anexo

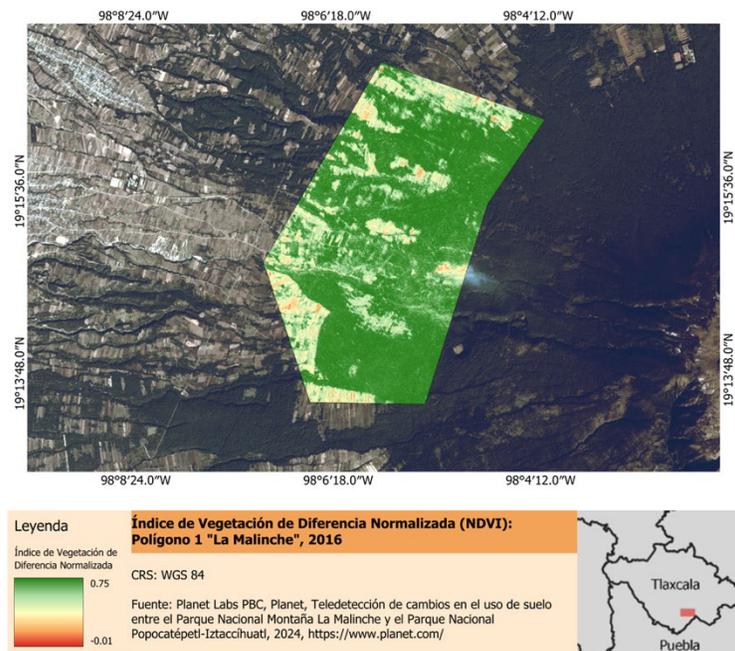


Figura 9. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en La Malinche (#1), en el 2016.

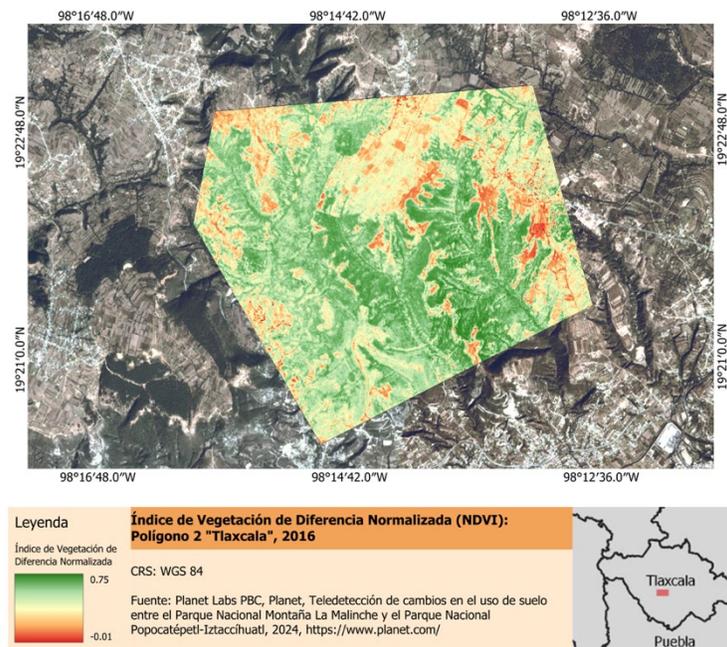


Figura 10. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Tlaxcala (#2), en el 2016.

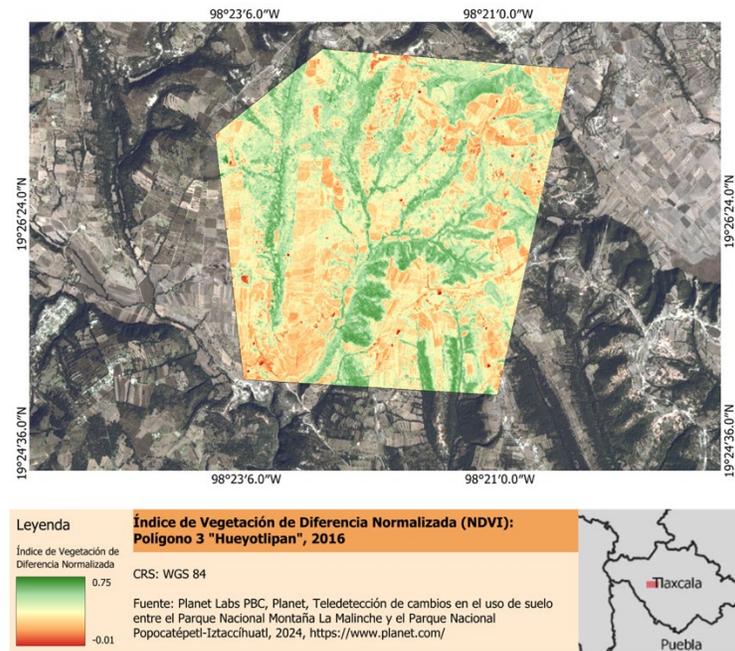


Figura 11. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Hueytlipan (#3), en el 2016.

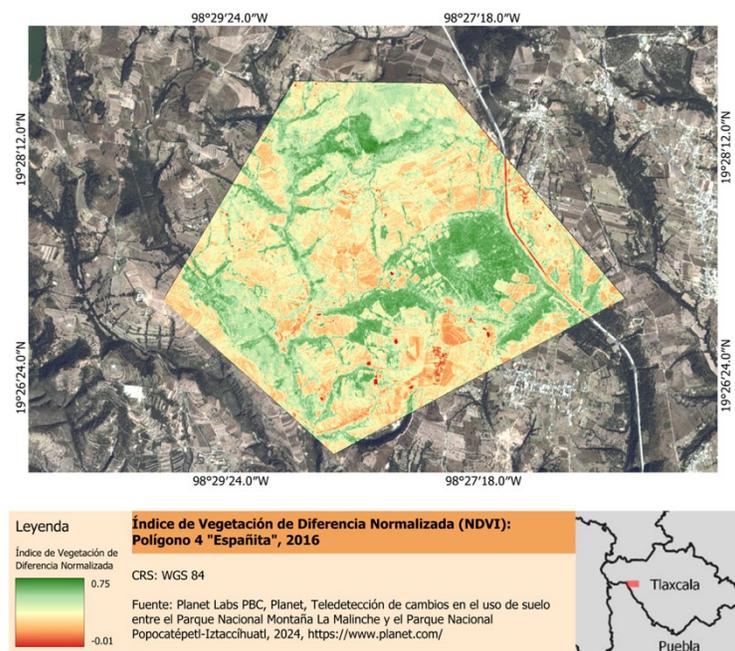


Figura 12. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Españaita (#4), en el 2016.

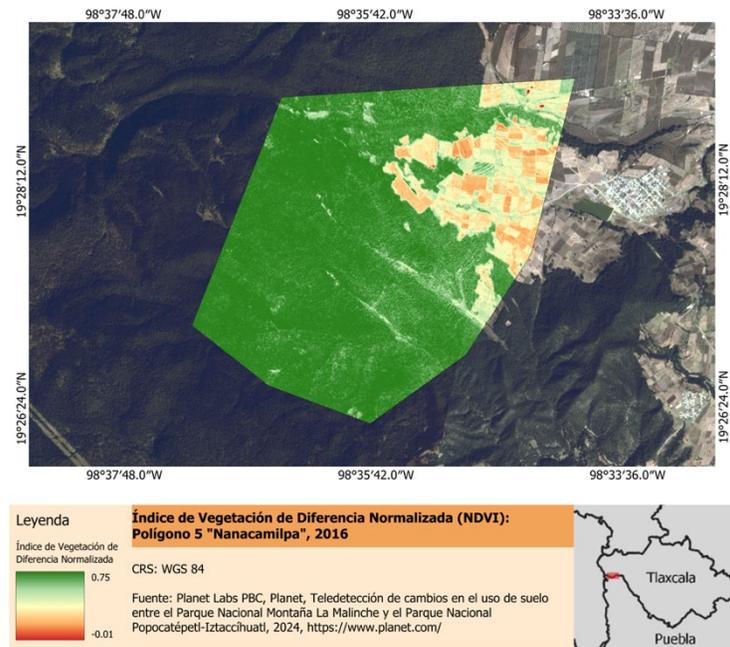


Figura 13. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Nanacamilpa (#5), en el 2016.

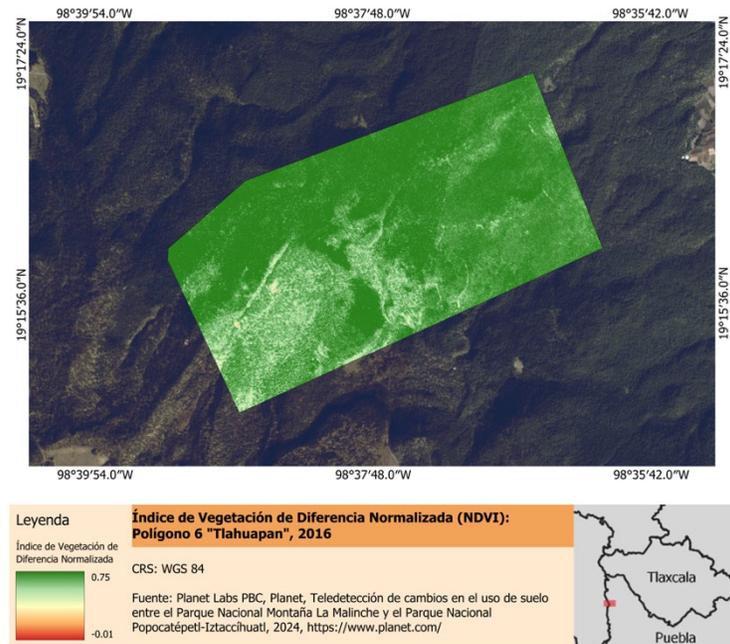


Figura 14. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Tlahuapan (#6), en el 2016.

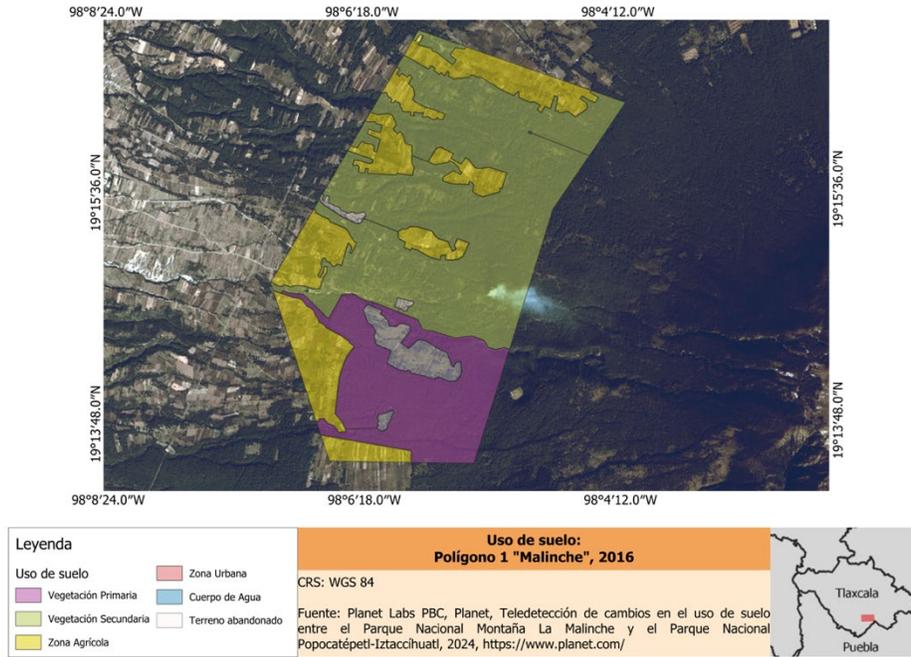


Figura 15. Clasificación del uso de suelo en La Malinche (#1), en el 2016.

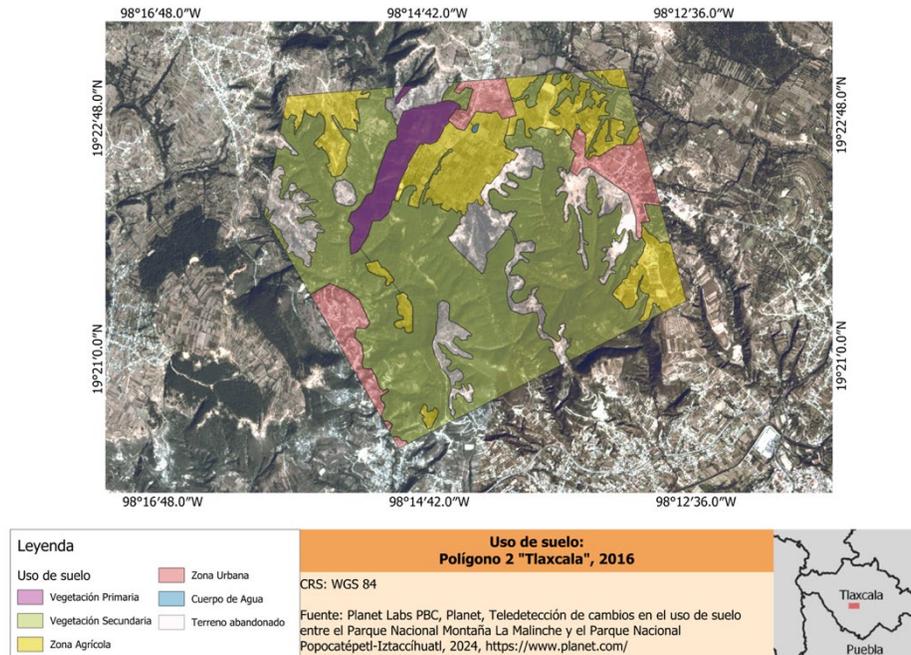


Figura 16. Clasificación del uso de suelo en Tlaxcala (#2), en el 2016.

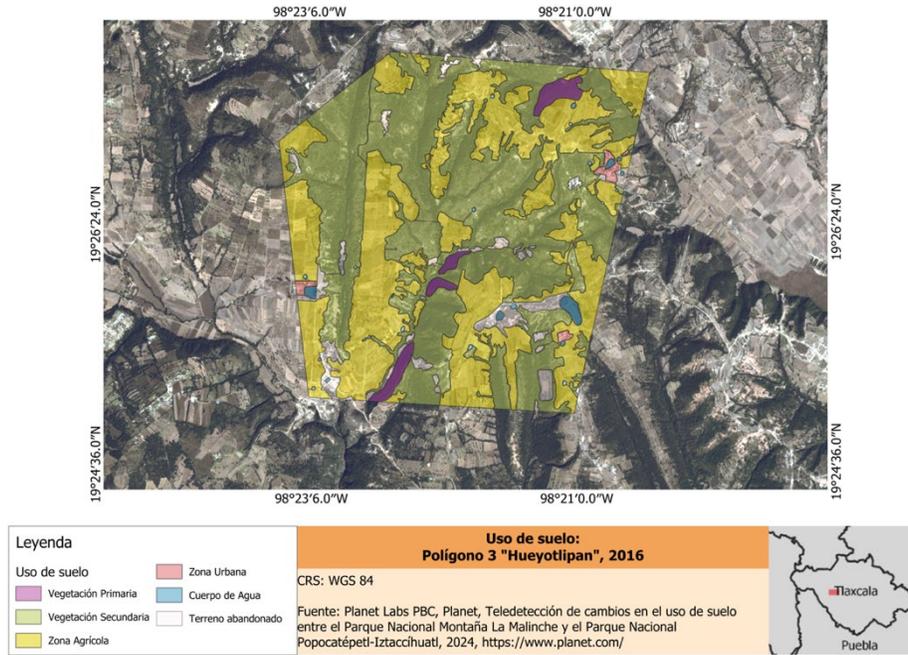


Figura 17. Clasificación del uso de suelo en Hueyotlipan (#3), en el 2016.

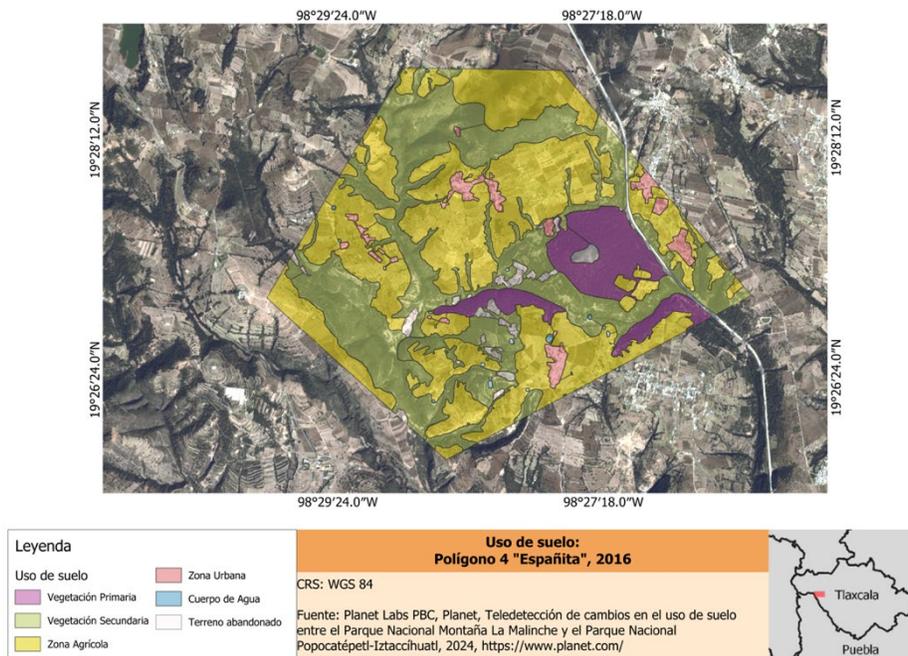


Figura 18. Clasificación del uso de suelo en Españita (#4), en el 2016.

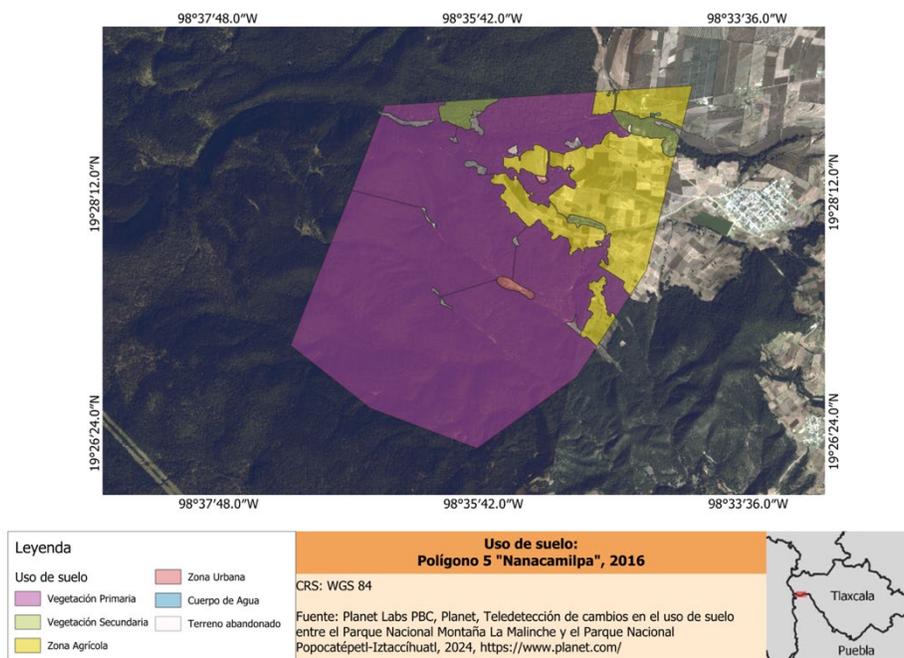


Figura 19. Clasificación del uso de suelo en Nanacamilpa (#5), en el 2016.

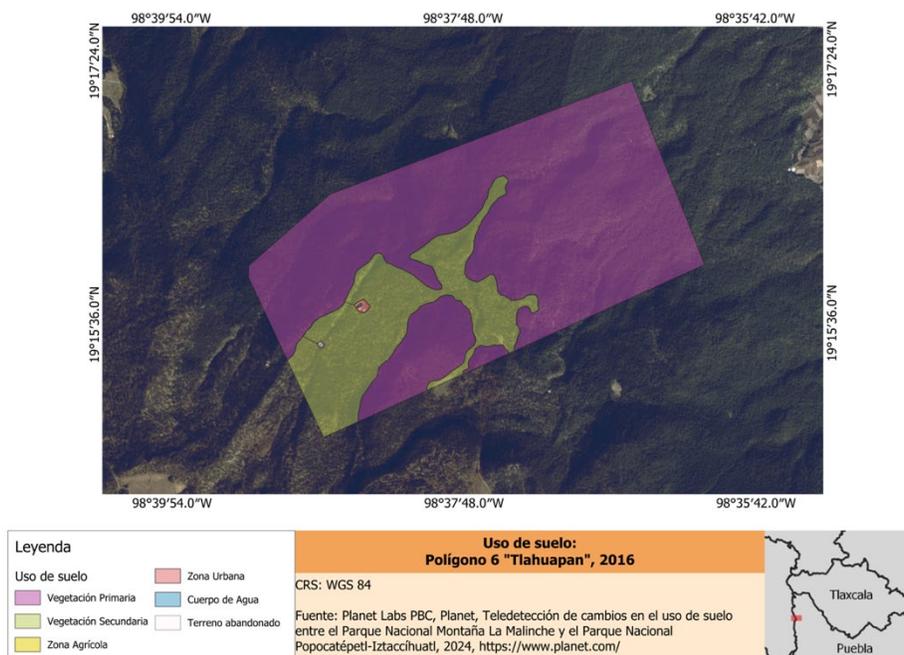


Figura 20. Clasificación del uso de suelo en Tlahuapan (#6), en el 2016.

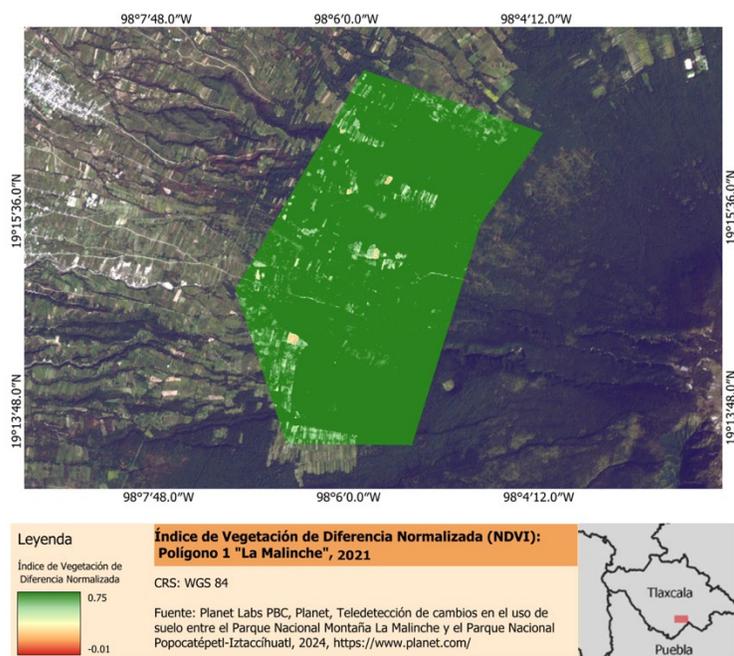


Figura 21. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en La Malinche (#1), en el 2021.

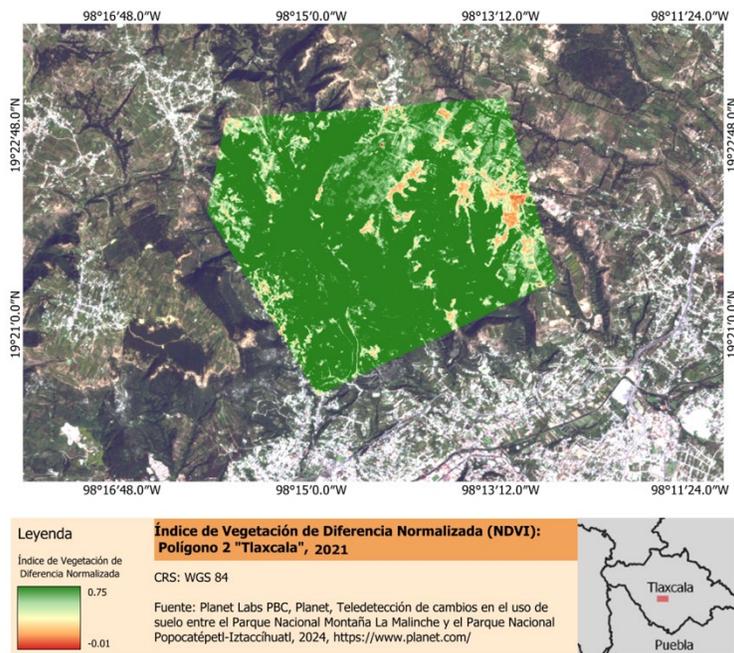


Figura 22. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Tlaxcala (#2), en el 2021.

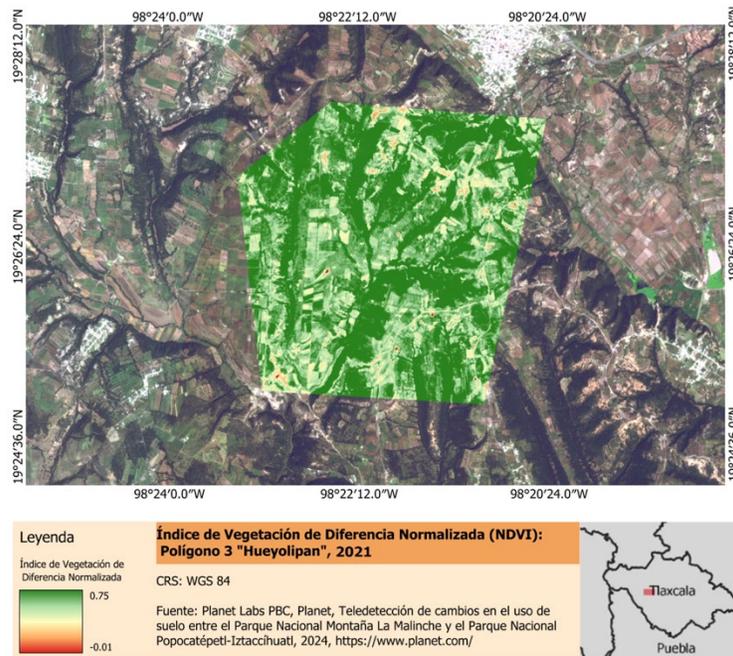


Figura 23. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Hueyotlipan (#3), en el 2021.

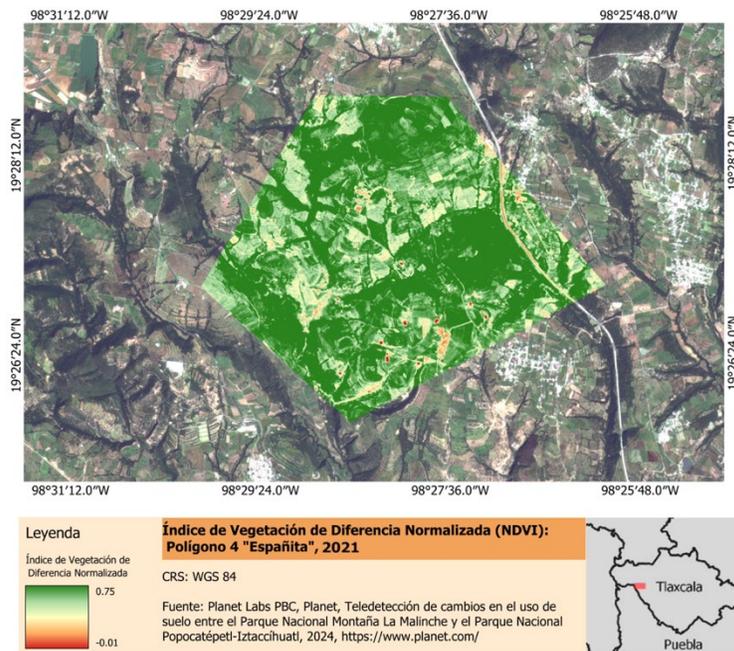


Figura 24. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Españita (#4), en el 2021.

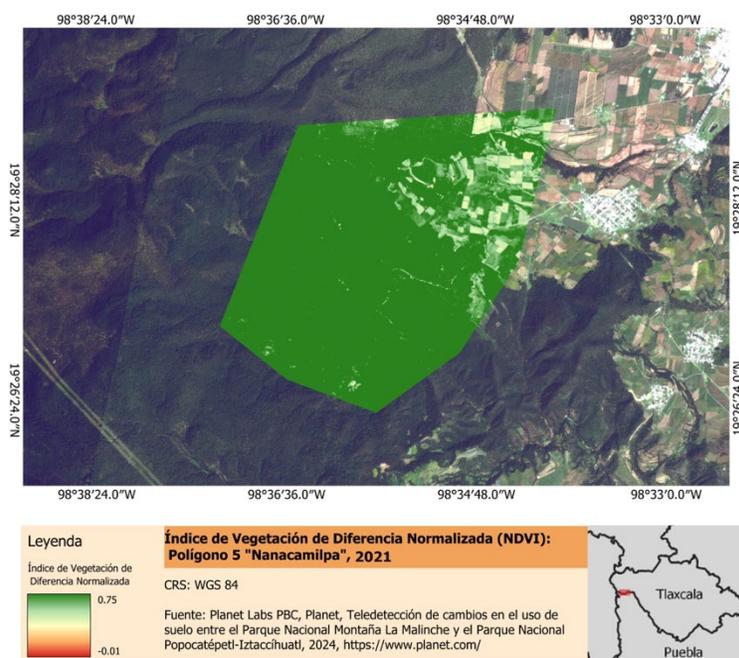


Figura 25. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Nanacamilpa (#5), en el 2021.

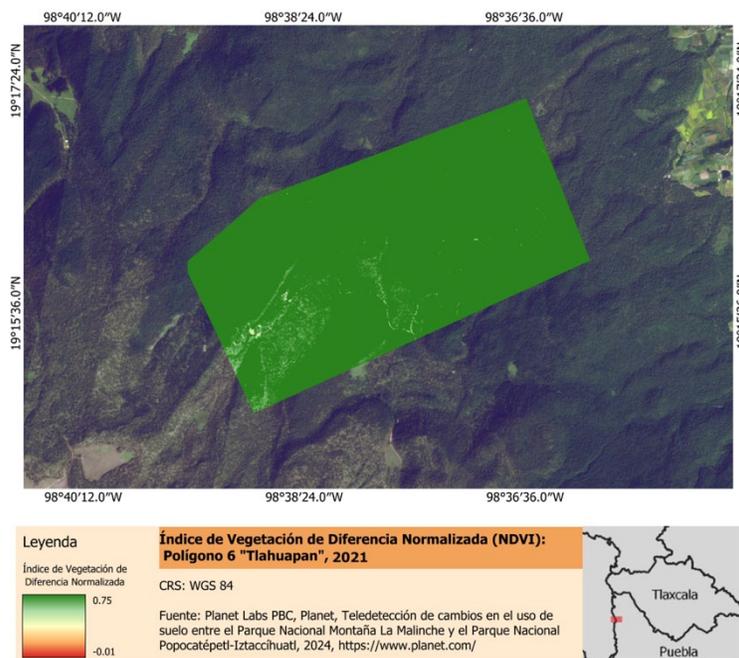


Figura 26. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Tlahuapan (#6), en el 2021.

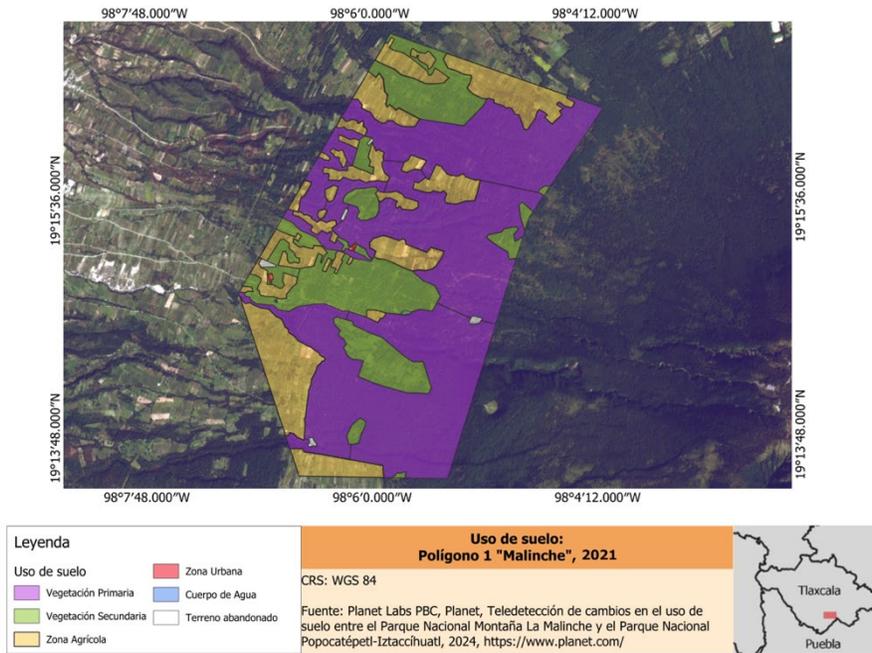


Figura 27. Clasificación del uso de suelo en La Malinche (#1), en el 2021.

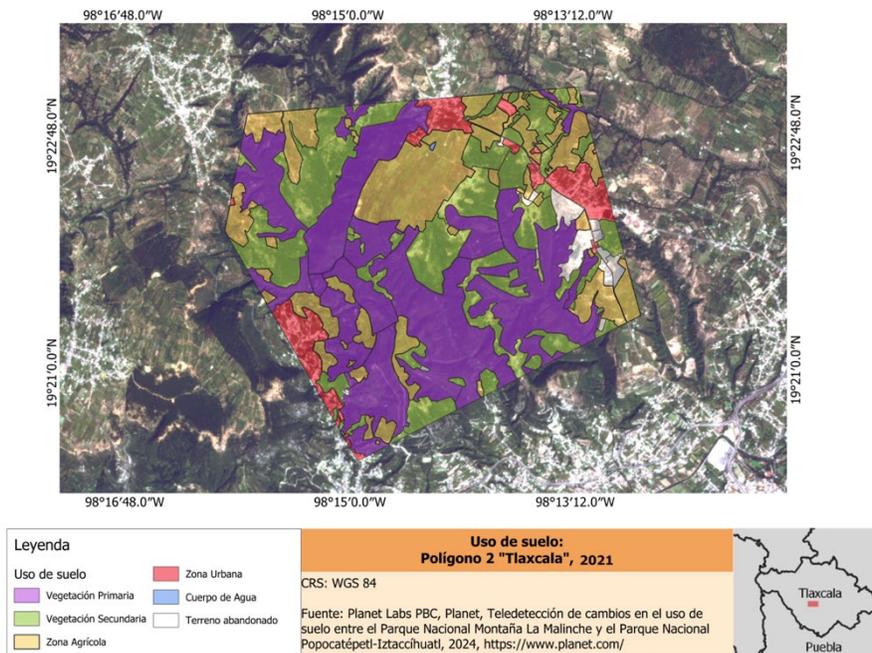


Figura 28. Clasificación del uso de suelo en Tlaxcala (#2), en el 2021.

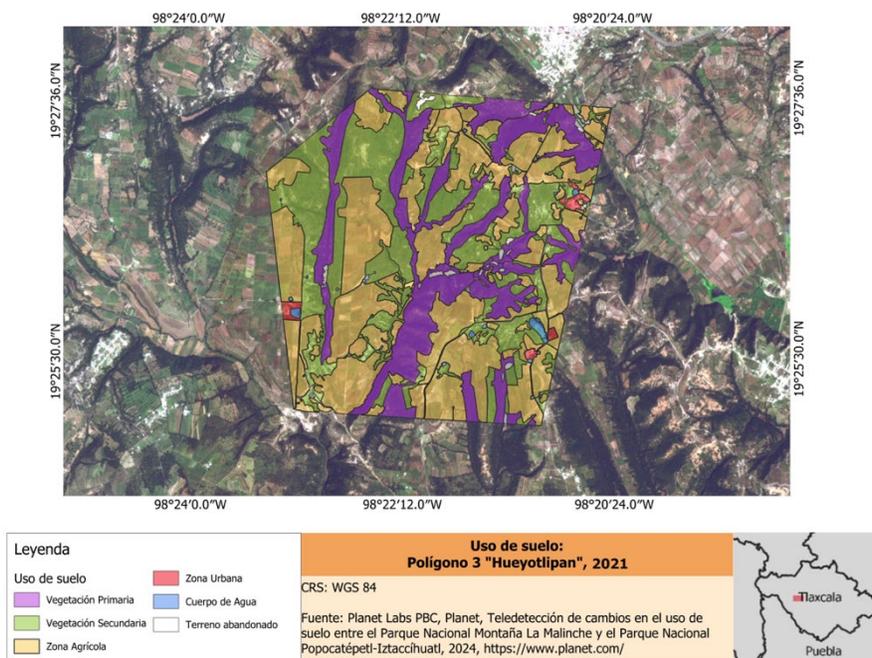


Figura 29. Clasificación del uso de suelo en Hueyotlipan (#3), en el 2021.

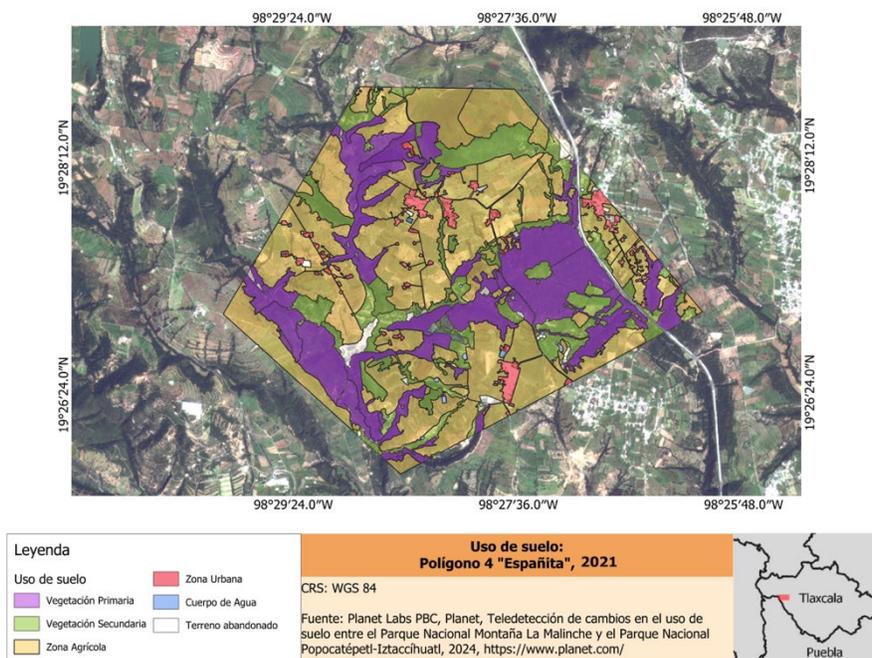


Figura 30. Clasificación del uso de suelo en Españita (#4), en el 2021.

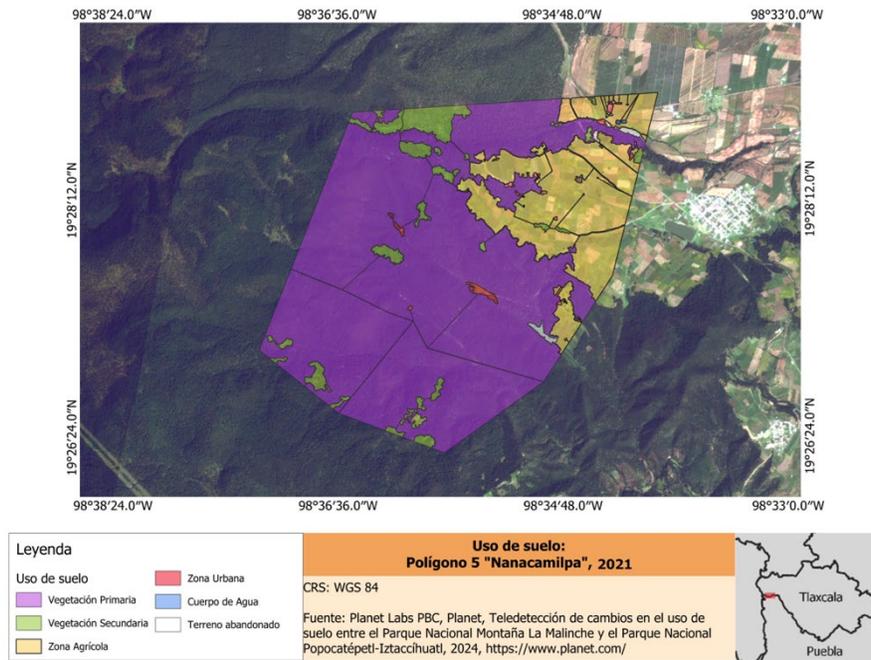


Figura 31. Clasificación del uso de suelo en Nanacamilpa (#5), en el 2021.

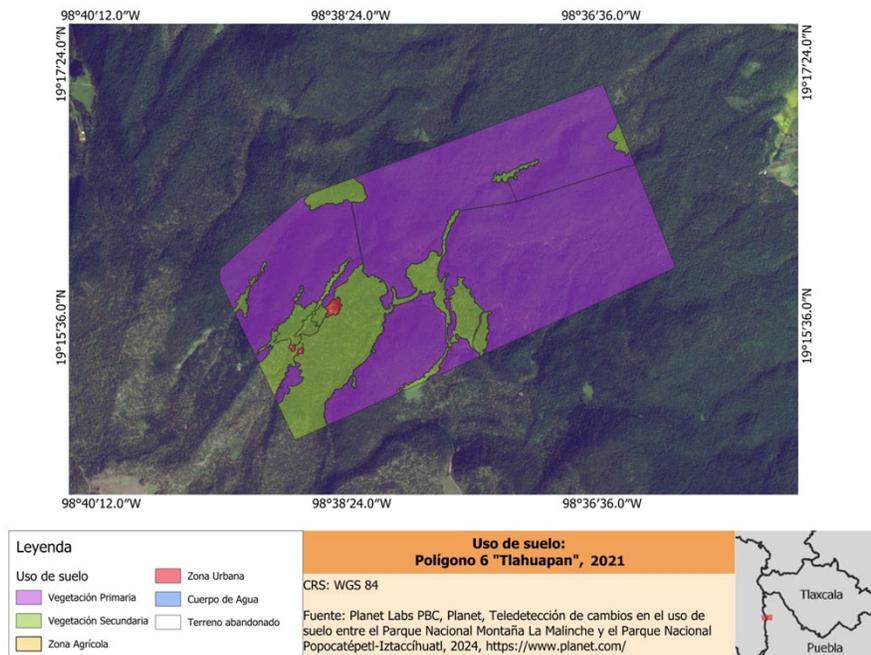


Figura 32. Clasificación del uso de suelo en Tlahuapan (#6), en el 2021.