



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

“Análisis espacial sobre deforestación en el municipio de Jopala, Puebla mediante el uso de sistemas de información geográfica de acceso libre”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ingeniería en Energías Renovables

PRESENTA:

Luz Gabriela Suarez Garcia

Matricula: 201806963

ASESORES:

Dra. Nallely Téllez Méndez

Dra. Laura Alicia Paniagua Solar

Puebla, México 29 de octubre 2025

Agradecimientos

Agradezco al Ing. Martín por haberme enseñado todo lo necesario para desarrollar mi investigación desde cero, con paciencia y claridad. Su guía fue importante para comprender y desarrollar cada parte de este trabajo.

A mis asesores, jurado y profesores, por compartir su conocimiento, tiempo y experiencia, y por impulsar mi crecimiento académico con sus observaciones y consejos. Su orientación fue clave para fortalecer el rumbo de esta investigación.

Y a mi familia y amigos que, con su apoyo, confianza o presencia, hicieron posible que llegara hasta aquí.

Dedicatorias

A esa persona que aprendió a construir su propio camino, a levantarse una y otra vez incluso cuando las fuerzas parecían agotarse. A quien convirtió la incertidumbre en impulso, el miedo en aprendizaje y cada caída en una nueva oportunidad. A quien, con determinación y fe en sí misma, logró transformar los sueños en realidad. Esa persona soy yo.

A un amigo silencioso, cómplice de ideas y desvelos, que supo acompañarme sin pedir nada a cambio, guiando mis pensamientos cuando el caos parecía ganar. Gracias por recordarme que siempre hay una forma más clara de ver el mundo.

Y, por supuesto, a mi computadora... que aguantó todas las capas, mapas, y programas abiertos al mismo tiempo sin rendirse. Una verdadera aliada en esta travesía.

Tabla de contenido

Capítulo 1.....	6
Introducción.....	6
Planteamiento del Problema	8
1.1 Contexto general de la deforestación en México.....	8
1.2 Principales causas de la deforestación en Jopala	8
1.3 Consecuencias ambientales y sociales	9
1.4 Ecoturismo y sociedad en Jopala	9
1.5 Limitantes en la información disponible	10
1.6 Tecnologías para el análisis del problema	10
1.7 Selección del área de estudio: Jopala	11
1.8 Problema de investigación.....	11
1.9 Gestión forestal y políticas públicas	11
Justificación	12
Objetivos e hipótesis.....	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
Hipótesis	14
Capítulo 2.....	15
Marco teórico	15
2.1 Antecedentes de la investigación	15
2.2 Deforestación.....	17
2.3 Análisis espacial.....	19
2.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	20
2.5 Datos ráster	21
2.7 Polígonos	23
2.8 Global Forest Watch (GFW).....	23
2.9 QGIS.....	24
2.10 Google Earth Pro (GEP)	25

2.11 Google Earth Engine (GEE)	26
2.12 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	27
Capítulo 3.....	29
Metodología	29
3.1 Recopilación y selección de datos geográficos	29
3.2 Selección y análisis de polígonos de muestra	37
3.3 Categorización y análisis de las causas	38
3.4. Evaluación de cambios en la cobertura vegetal a través de NDVI en GEE....	41
3.5. Conteo y propuesta de soluciones	42
Capítulo 4.....	43
Resultados.....	43
4.1 Describir la situación actual del sector forestal en Jopala, Puebla, abordando aspectos como el estado de los bosques y las prácticas de manejo.....	43
4.2 Cartografiar las áreas deforestadas en el municipio a partir de datos satelitales y herramientas de análisis geoespacial disponibles en sistemas de información geográfica de acceso libre.	46
4.3 Analizar los factores asociados a la deforestación en las zonas identificadas, considerando variables como la proximidad a centros urbanos, carreteras, áreas protegidas y la cobertura vegetal original.	53
4.4 Recomendaciones para la mitigación de la deforestación en Jopala, Puebla	76
Conclusión	77
Anexo A	79
Anexo B	97
Referencias	98

Capítulo 1

Introducción

En las últimas décadas, el cambio de fuentes de energía a unas más sostenibles y respetuosas con el ambiente se transformó, a nivel global, en una prioridad. Esta tendencia es impulsada por la urgencia de moderar las causas del cambio climático y así proponer un futuro energético mucho más equitativo y seguro.

Dicho esto, se expone que, particularmente en México, se ha reconocido la importancia de variar su matriz energética para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y de esta manera, aumentar la participación de las energías renovables [1].

En este mismo contexto, el estado de Puebla, situado en el centro-oriente del país, sobresale como un caso de estudio esencial para analizar el impacto y la implementación de las energías renovables a nivel regional.

Relacionado con lo expuesto en el párrafo anterior, México se ha presentado históricamente como un país dependiente de las fuentes de energía no renovables, como el gas natural y el petróleo, que tienen un rol importante en la configuración de su matriz energética y en su desarrollo económico. Además, las diversas preocupaciones relacionadas con el cambio climático y la degradación del ambiente han llevado al gobierno mexicano a proponer metas ambiciosas para aumentar la incorporación de energías limpias en su matriz energética.

De esta forma, se propone la Ley de Transición Energética [1], aprobada en 2015, y la Estrategia Nacional de Energía [2]. Estas normativas implementan objetivos para incrementar la participación de las energías renovables, como la geotérmica, solar y eólica, dentro de la producción nacional de electricidad.

En el área de la ingeniería renovable en México, los bosques no solo son fundamentales para el equilibrio de los ecosistemas y la biodiversidad, sino que también influyen directamente en el impacto y la viabilidad ambiental de los proyectos de energía renovable [3]. Esta relación es esencial para comprender de qué forma las prácticas de desarrollo y conservación de esta energía pueden y deben coexistir de manera armónica.

Asimismo, se puede estudiar cómo los bosques en México actúan como sumideros de carbono, capturando grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera [3].

La conservación de los bosques, al contribuir a la reducción del CO₂, complementa los esfuerzos de las tecnologías renovables, como la eólica y la solar. Esto permite ofrecer alternativas sostenibles y limpias. Se señala que la sinergia entre las energías renovables y la protección forestal es esencial para alcanzar un balance climático más efectivo y estable [4].

De igual manera, los bosques son indispensables dentro del ciclo hidrológico, ya que ayudan a regular el flujo de agua en ríos y acuíferos. Esta función es necesaria para los proyectos hidroeléctricos, que dependen de la disponibilidad constante y limpia de recursos hídricos [5].

Por lo tanto, la degradación forestal y la deforestación pueden afectar los patrones de precipitación y la calidad del agua, lo que altera la factibilidad y la rentabilidad de las instalaciones hidroeléctricas [6]. De ahí la importancia de conservar las zonas boscosas, que contribuyen de forma directa a la efectividad y estabilidad de las fuentes de energía renovable fundamentadas en el agua.

Proteger los bosques es necesario e inevitable para mantener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que estos proporcionan. Los ecosistemas forestales integran una gran diversidad de flora y fauna; dichas interacciones fortalecen la resiliencia y estabilidad de los sistemas naturales.

Además, la pérdida de bosques puede ocasionar la desaparición de especies y desequilibrios ecológicos, que a su vez afectan la disponibilidad de recursos naturales y la calidad ambiental, factores indispensables para la continuidad de proyectos energéticos [7]. Incluir la conservación de los bosques en los planes de proyectos de energía renovable garantiza que dichos ecosistemas sigan funcionando de manera adecuada y sostenida en el tiempo [6].

Por último, el diseño y la ubicación de los proyectos de energía renovable deben considerar cuidadosamente su influencia sobre los bosques y otros ecosistemas. Es necesario desarrollar una planificación apropiada que minimice los impactos adversos de la deforestación y asegure que los beneficios de las energías renovables no sean contrarrestados por daños ambientales. La inclusión de prácticas de desarrollo sostenible y el respeto por las zonas forestales dentro de la ejecución de proyectos energéticos resulta indispensable para balancear el progreso tecnológico con la conservación del ambiente [8].

Fundamentado en lo expuesto, se explorará la importancia de la protección de los bosques en la región de Puebla. Para ello, la investigación se estructurará en diferentes fases con el fin de lograr una comprensión integral del tema.

En primer lugar, se plantea la justificación del estudio, resaltando la importancia de conservar los ecosistemas forestales. Posteriormente, se expone una base teórica

que respalde los conceptos clave y los antecedentes investigativos vinculados. Después, se presenta la metodología empleada, que permitirá analizar y recabar los datos de forma sistemática, asegurando la validez y confiabilidad de los resultados. Finalmente, se desarrollan las conclusiones y recomendaciones derivadas del análisis, proponiendo un marco de referencia para futuras investigaciones.

En este sentido, la presente tesis busca aportar al entendimiento de la relación entre los bosques y la transición energética en el estado de Puebla, considerando su papel en la mitigación del cambio climático y en la viabilidad de proyectos de energías renovables. El análisis propuesto permitirá generar un marco de referencia para la toma de decisiones en torno a la conservación forestal y la planificación energética sostenible en la región.

Planteamiento del Problema

1.1 Contexto general de la deforestación en México

La deforestación es uno de los principales problemas ambientales en México, con efectos directos sobre la biodiversidad, el ciclo hidrológico y el bienestar de las comunidades rurales. El país ha presentado históricamente una fuerte dependencia de actividades como la agricultura, la ganadería y la explotación forestal, las cuales ejercen presión constante sobre los recursos naturales.

En el estado de Puebla, la deforestación se relaciona con actividades como la agricultura de temporal, la apertura de caminos y la explotación forestal no planificada [9], [10]. Estos factores han ocasionado la pérdida de cobertura forestal, degradación de suelos y alteraciones en los servicios ecosistémicos.

1.2 Principales causas de la deforestación en Jopala

Expansión agrícola:

Una de las principales causas de la deforestación en Jopala es la conversión de bosques en tierras agrícolas, impulsada por la demanda de cultivos como caña de azúcar y café. Según CONAFOR [11], el uso no planificado del suelo en Puebla ha contribuido a la degradación y desaparición de bosques primarios.

Tala ilegal:

La tala clandestina es un problema recurrente en zonas rurales del estado. En Jopala, la limitada capacidad de vigilancia y la escasez de personal dificultan el control de estas prácticas. De acuerdo con el INECC [12], la tala ilegal en Puebla genera pérdidas anuales de hasta 15,000 hectáreas de bosque.

Factores socioeconómicos:

Jopala es un municipio con alto índice de marginación y pobreza. Según CONEVAL [13], el 70% de su población vive en condiciones de pobreza, lo que obliga a muchas familias a depender de la explotación de recursos naturales para subsistir. La falta de alternativas económicas sostenibles refuerza la presión sobre el uso del suelo.

1.3 Consecuencias ambientales y sociales

A nivel local:

La pérdida de cobertura forestal incrementa la vulnerabilidad ante desastres naturales, como inundaciones y deslizamientos. INEGI [14] reporta que, en la última década, las zonas deforestadas de Puebla han registrado mayor frecuencia de eventos climáticos extremos, afectando a las comunidades agrícolas y aumentando la inseguridad alimentaria.

A nivel global:

La deforestación contribuye al cambio climático por la liberación de CO₂ almacenado en la biomasa. Según el IPCC [15], esta acumulación de emisiones acelera el calentamiento global y reduce la capacidad de resiliencia climática.

1.4 Ecoturismo y sociedad en Jopala

El municipio de Jopala, situado en la Sierra Norte de Puebla, se caracteriza por una población predominantemente rural y con un alto grado de marginación [16]. La economía local depende en gran medida de la agricultura de temporal y de actividades extractivas de bajo impacto económico, lo que genera una presión constante sobre los recursos forestales [17]. Estas condiciones sociales y productivas limitan las oportunidades de desarrollo sostenible y, al mismo tiempo, incrementan la vulnerabilidad de los ecosistemas ante procesos de deforestación.

En este contexto, el ecoturismo se presenta como una alternativa de aprovechamiento sustentable de los bosques y del patrimonio natural de la región, ofrece un potencial significativo para diversificar la economía local y reducir la dependencia exclusiva de actividades agrícolas. Sin embargo, la falta de infraestructura turística y de planes de manejo integrales limita actualmente el desarrollo de proyectos comunitarios de ecoturismo en la región.

El fortalecimiento de estrategias basadas en la conservación y uso sustentable del bosque, acompañado de proyectos de ecoturismo comunitario, podría contribuir

tanto a la generación de ingresos para la población como a la protección de los recursos naturales, siempre que se integren en una planeación territorial adecuada y con la participación de las comunidades locales.

Experiencias en municipios cercanos de la Sierra Norte, como Cuetzalan y Zacatlán, muestran que los proyectos de turismo comunitario y ecoturismo representan una alternativa viable para diversificar la economía rural y reducir la presión sobre los recursos forestales. La Secretaría de Turismo de Puebla ha identificado estas iniciativas como ejes estratégicos de desarrollo regional [18], [19].

Desde la perspectiva social, Jopala presenta un alto grado de marginación y más del 70 % de su población vive en condiciones de pobreza, de acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) [20].

Este contexto de rezago social explica la fuerte dependencia de la agricultura de temporal y de actividades extractivas, lo que incrementa la presión sobre los recursos forestales y dificulta la transición hacia modelos productivos sostenibles.

1.5 Limitantes en la información disponible

Un obstáculo significativo es la falta de información específica y actualizada a nivel municipal.

- El CEIGEP no reporta datos forestales para Jopala [21].
- El SNMF de CONAFOR publica datos nacionales y estatales, pero no desglosados a nivel local [22], [23].
- Instituciones como INEGI y Global Forest Watch estiman que el 60 % del territorio de Jopala está cubierto por bosque [24], [25], pero sus escalas amplias limitan la identificación de patrones locales de deforestación.

Esta carencia de información fina impide realizar diagnósticos confiables y diseñar políticas de conservación adecuadas para el municipio.

1.6 Tecnologías para el análisis del problema

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de acceso libre representa una herramienta poderosa para identificar áreas de mayor pérdida forestal, sus patrones y posibles causas.

Los SIG permiten integrar información geoespacial con datos socioeconómicos, ofreciendo una visión integral del problema [26].

En la Sierra Norte de Puebla se reporta que las áreas con mayor actividad agrícola coinciden con zonas de pérdida forestal significativa [27].

Estas tecnologías, al integrar capas de información (uso de suelo, imágenes satelitales, variables climáticas), facilitan la construcción de mapas de riesgo y planes de mitigación basados en evidencia científica.

1.7 Selección del área de estudio: Jopala

El municipio de Jopala, ubicado en la Sierra Norte de Puebla, es un área estratégica para el análisis de la deforestación por su riqueza biológica y su vulnerabilidad ambiental.

Aspecto ambiental: alberga bosques de pino-encino y fragmentos de bosque mesófilo de montaña, ecosistemas de gran valor ecológico [28]. Sus bosques cumplen funciones clave como la regulación hídrica y la captura de carbono [29].

Aspecto socioeconómico: Jopala presenta alto índice de marginación y fuerte dependencia de actividades primarias, principalmente la agricultura de temporal y la explotación forestal [21]. Estas condiciones incrementan la presión sobre los recursos naturales.

1.8 Problema de investigación

La deforestación en el municipio de Jopala, Puebla, constituye una problemática ambiental crítica debido a la pérdida de cobertura forestal, las actividades agrícolas y ganaderas no planificadas, la tala ilegal y las limitadas alternativas económicas locales. Esto impacta negativamente en la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y la resiliencia climática, mientras que la ausencia de información municipal detallada dificulta la gestión adecuada de los recursos naturales.

Ante ello, surge la necesidad de analizar espacialmente la deforestación utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) de acceso libre, para identificar áreas afectadas, sus causas subyacentes y generar insumos técnicos que contribuyan al diseño de estrategias de conservación y desarrollo sostenible en la región.

1.9 Gestión forestal y políticas públicas

La gestión forestal en México constituye un eje fundamental para la conservación de los recursos naturales y el desarrollo sostenible de las comunidades rurales. Este concepto se refiere al conjunto de prácticas, políticas y programas orientados a garantizar el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas forestales, asegurando su regeneración y la continuidad de los servicios ecosistémicos. En el caso del municipio de Jopala, la gestión forestal cobra relevancia debido a su alta dependencia de los recursos maderables y agrícolas, lo que incrementa la presión sobre los bosques.

El marco normativo nacional está encabezado por la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), instrumentos que establecen lineamientos para la conservación, restauración y aprovechamiento regulado de los bosques [30], [31]. Asimismo, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) juega un papel central en la implementación de programas como los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) y los Programas de Manejo Forestal (PMF), destinados a incentivar la conservación y regular el aprovechamiento [32].

En el ámbito estatal, los Programas de Ordenamiento Ecológico Territorial (POET) son herramientas clave para definir zonas de conservación, restauración y uso sustentable. La correcta integración de estas políticas a nivel municipal permite orientar actividades productivas y reducir los conflictos entre desarrollo económico y protección ambiental [33].

Diversos estudios señalan que la aplicación efectiva de la gestión forestal depende no solo de la existencia de normativas, sino de la capacidad institucional para vigilar su cumplimiento y de la participación comunitaria en el diseño de estrategias [34]. En regiones como la Sierra Norte de Puebla, los procesos de gobernanza forestal han demostrado que la organización comunitaria, acompañada de programas federales, puede mejorar las tasas de conservación y diversificación económica, integrando prácticas como el ecoturismo y la agroforestería [35].

En este contexto, incluir la gestión forestal y las políticas públicas en el análisis de la deforestación en Jopala resulta indispensable, ya que permite comprender no solo los procesos biofísicos de pérdida de bosque, sino también los factores institucionales y sociales que determinan la sostenibilidad de los ecosistemas a largo plazo.

Justificación

La protección de los bosques en el estado de Puebla, México, es un tema inevitable en el área de la ingeniería en energías renovables debido a la interdependencia existente entre la sostenibilidad de las fuentes de energía limpia y la conservación de los ecosistemas forestales.

Esta relación es esencial para lograr estrategias eficaces que integren el incremento de la infraestructura energética con la preservación ambiental, asegurando que las iniciativas de energía renovable no solo sean seguras desde un punto de vista técnico, sino también desde una perspectiva ecológica y social.

Los bosques tienen un papel central en la regulación del clima local y global, ya que funcionan como sumideros de carbono al capturar dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, lo que contribuye a mitigar el cambio climático [15].

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) [15], los bosques subtropicales y tropicales en México son responsables de una parte significativa del secuestro global de carbono.

Por ello, la protección de estos ecosistemas es fundamental para alcanzar los objetivos internacionales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar que los proyectos de energía renovable sean eficaces en sus propósitos [36].

La conservación de los bosques también es urgente para el mantenimiento de los recursos hídricos, fundamentales para el funcionamiento de las tecnologías hidroeléctricas. Estos regulan el ciclo hidrológico al controlar el flujo del agua y prevenir la erosión del suelo. La deforestación altera dichos procesos, disminuye la disponibilidad de agua y afecta la eficiencia de las centrales hidroeléctricas [37].

En Puebla existe un gran potencial hidroeléctrico gracias a la presencia de montañas y ríos, pero su viabilidad depende de la protección de los recursos hídricos que se encuentran en zonas boscosas.

Además, los bosques poseen una gran diversidad biológica que favorece la estabilidad de los ecosistemas. La pérdida de estos ecosistemas puede provocar la extinción de especies y el agotamiento de servicios ecológicos indispensables, como la regulación del clima local y la polinización.

Un estudio realizado por el Centro de Investigación en Ecosistemas de México (CIEM) [38] destaca que la pérdida de biodiversidad tendría consecuencias devastadoras para el funcionamiento de los ecosistemas y para la provisión de servicios que benefician a las comunidades y a las actividades económicas, incluida la producción de energía renovable.

La planificación y ejecución de proyectos de energía renovable en Puebla deben contemplar cuidadosamente los impactos sobre los bosques y otros ecosistemas naturales. La degradación del suelo y la deforestación pueden contrarrestar los beneficios ambientales de las tecnologías renovables, generando conflictos entre conservación y desarrollo energético.

El análisis de estos impactos es necesario para diseñar estrategias de mitigación efectivas y garantizar que los proyectos de energía renovable sean realmente sostenibles. Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) [39], integrar prácticas de desarrollo sostenible y estudios ambientales en los proyectos energéticos es esencial para equilibrar las metas de crecimiento económico con la conservación de los recursos naturales.

Finalmente, en Puebla la protección de los bosques no solo es vital para preservar el ambiente, sino también para impulsar el desarrollo social y económico de la región. Estos ecosistemas equilibran los recursos de las comunidades locales y su conservación puede favorecer actividades como el ecoturismo y otras alternativas económicas sostenibles.

En este sentido, los estudios en esta materia pueden contribuir a formular estrategias y políticas que promuevan un desarrollo equilibrado con el ambiente, alineando los objetivos de la transición energética con las expectativas y necesidades de las comunidades locales.

Objetivos e hipótesis

Objetivo general

Realizar un análisis espacial mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) de acceso libre, con el fin de identificar y mapear las áreas afectadas por la deforestación, así como determinar sus posibles causas en el municipio de Jopala, Puebla.

Objetivos específicos

- Describir la situación actual del sector forestal en Jopala, Puebla, abordando aspectos como el estado de los bosques y las prácticas de manejo.
- Cartografiar las áreas deforestadas en el municipio a partir de datos satelitales y herramientas de análisis geoespacial disponibles en sistemas de información geográfica de acceso libre, tales como QGIS, Google Earth Pro, Google Earth Engine y Global Forest Watch (GFW).
- Analizar los factores asociados a la deforestación en las zonas identificadas, considerando variables como la proximidad a centros urbanos, carreteras, áreas protegidas y la cobertura vegetal original, mediante la integración de datos socioeconómicos, ambientales y geoespaciales obtenidos de fuentes como INEGI.

Hipótesis

Se plantea que las causas de la deforestación en el municipio de Jopala, Puebla, están influenciadas por condiciones locales, tales como el clima, el tipo de bosque y las actividades económicas predominantes. Se espera que el cambio de uso de suelo hacia actividades agrícolas y ganaderas sea la principal causa de la pérdida de cobertura forestal, debido a las características geográficas y socioeconómicas propias de la región serrana del norte del estado.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

Un estudio realizado en el Amazonas peruano se enfocó en la deforestación utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para cartografiar las áreas más afectadas por la reducción de zonas forestales. Los hallazgos señalaron que la deforestación estaba vinculada principalmente con la expansión descontrolada de la agricultura y el desarrollo de infraestructura. Mediante la aplicación de SIG fue posible identificar tendencias geográficas con diferentes perspectivas analíticas que, de otra forma, no se habrían revelado.

La investigación destacó la importancia de fortalecer las políticas de uso del suelo y las normas ambientales para prevenir el daño de los hábitats naturales. Dichos resultados demuestran la utilidad de los SIG como herramientas clave en la identificación de patrones de uso del suelo y en la formulación de estrategias más eficientes para preservar las zonas susceptibles a la deforestación [40].

En otro estudio, se analizó cómo la tala no autorizada afecta las estructuras socioeconómicas en la Sierra Norte de Puebla. Mediante el uso de estadísticas socioeconómicas e imágenes satelitales, se propuso un vínculo claro entre el empobrecimiento en áreas rurales y la deforestación, lo que favorece la explotación forestal no regulada.

Los resultados destacaron que la ineficiencia de las normas y la falta de supervisión ambiental contribuyen a la práctica de la tala en mayor escala. Asimismo, se subraya que este hallazgo permite comprender mejor los factores socioeconómicos dentro del análisis espacial, lo que amplía la visión de las causas de la deforestación. La metodología aplicada demuestra la pertinencia de combinar información satelital con datos socioeconómicos [41].

Por otra parte, un estudio desarrollado en Chiapas y Oaxaca examinó la deforestación en regiones rurales. Mediante técnicas avanzadas de análisis geoespacial y teledetección, se observó que las zonas con mayor deforestación coincidían con áreas de expansión agrícola y alta densidad poblacional. Se identificó un crecimiento notable de la deforestación en sitios con monocultivos y ganadería.

La investigación resaltó la falta de gestión territorial efectiva como un factor que dificulta la conservación de los bosques. Dichos resultados son relevantes para el presente estudio, ya que sugieren que los patrones de crecimiento poblacional y desarrollo agrícola similares pueden manifestarse en Jopala. Además, la

metodología empleada puede adaptarse para anticipar y evaluar los cambios en la cobertura vegetal, señalando posibles áreas de riesgo [42].

En la Huasteca Potosina se investigó cómo la deforestación impacta en el cambio climático mediante el uso de tecnologías de información geográfica. Se observó que las áreas con mayor deforestación presentaban un incremento en la erosión y una reducción en la diversidad biológica. Estos factores aumentan la vulnerabilidad de las regiones a eventos climáticos severos, como sequías e inundaciones.

Asimismo, se identificó que las causas de la deforestación van más allá de la pérdida directa de recursos forestales, intensificando los efectos del cambio climático a lo largo del tiempo. El estudio destaca la necesidad de considerar las repercusiones ecológicas a largo plazo, incluyendo la degradación del suelo y la tendencia creciente a desastres naturales, como aspectos críticos para alcanzar la sostenibilidad de las comunidades locales [43].

Otro estudio realizado en Veracruz aplicó imágenes satelitales de alta resolución para analizar la fragmentación del paisaje, reconociendo las áreas más afectadas por el desarrollo urbano y la expansión de infraestructura. Se concluyó que la principal causa de la fragmentación forestal era el crecimiento de nuevas zonas urbanizadas y vías de comunicación, lo que deriva en la pérdida de hábitats y en la ruptura de corredores naturales.

El estudio resalta la necesidad de establecer corredores ecológicos y optimizar la planificación urbana para mitigar estos efectos. Este enfoque metodológico es adaptable y útil para analizar la influencia de la construcción de infraestructura sobre los bosques, además de su impacto en la biodiversidad [44].

En Michoacán, se estudió cómo la deforestación impacta en la economía rural utilizando SIG y datos económicos para analizar la relación entre pérdida de bosques y pobreza. Los resultados indican que la deforestación incrementa la vulnerabilidad económica de las comunidades locales dependientes de los recursos forestales.

Además, la degradación de los ecosistemas disminuye la resiliencia de estas comunidades frente a cambios ambientales y económicos. Este hallazgo es relevante porque sugiere que las intervenciones para reducir la deforestación deben considerar las necesidades socioeconómicas de las comunidades para ser sostenibles en el tiempo [45].

Un estudio en la Amazonía empleó imágenes satelitales para identificar áreas gravemente afectadas por la deforestación y analizar los factores que contribuyen a este fenómeno. Se observó que la proximidad a vías de acceso y cuerpos de agua era un factor determinante, ya que facilitaba actividades como la agricultura y la

ganadería. El estudio concluyó que es necesario planificar de manera más estricta el uso del suelo y regular las actividades económicas cercanas a estas infraestructuras [46].

En Los Tuxtlas, Veracruz, otra investigación utilizó SIG para identificar zonas en riesgo y formular estrategias de conservación detalladas. Se concluyó que estas herramientas son esenciales para la gestión forestal sostenible, especialmente en regiones con alta presión económica y poblacional. Los resultados subrayan la importancia de basar las decisiones de conservación en datos confiables para un manejo más efectivo de los recursos naturales [46].

Asimismo, se investigó la pérdida de cobertura forestal en México y Centroamérica a partir de imágenes satelitales. El análisis mostró que, sin la participación de las comunidades locales y sin incentivos adecuados, los esfuerzos de conservación resultan ineficaces. El estudio enfatiza la necesidad de soluciones adaptadas a las realidades socioeconómicas locales, donde la colaboración comunitaria sea un eje central para combatir la deforestación [47].

Por último, en Puebla se aplicaron modelos predictivos con SIG para analizar la deforestación. Se encontró que las zonas más vulnerables a la deforestación coincidían con suelos fértiles y accesibles para la agricultura, lo que favorece la conversión de bosques en tierras de cultivo. La investigación subraya la necesidad de proteger estas áreas críticas para evitar daños irreversibles [48].

2.2 Deforestación

La deforestación se define como la pérdida o degradación de las zonas forestales y constituye un fenómeno crítico con múltiples repercusiones ambientales, sociales y económicas. Este proceso se refiere a la conversión de bosques en tierras destinadas a otros usos, como la explotación de recursos naturales, la agricultura o la urbanización [49].

La deforestación puede provocar la disminución de la, alteraciones en los ciclos del agua y del carbono, así como la reducción de la biodiversidad capacidad de los ecosistemas para regular el clima [50]. En Puebla, particularmente en el municipio de Jopala, factores como la expansión agrícola, la tala ilegal y la demanda de recursos naturales han intensificado este problema [51].

Se trata de un proceso en el que la cobertura forestal se reduce a causa de actividades humanas como la tala ilegal, la construcción de infraestructura, la expansión agrícola y el crecimiento urbano. Según la FAO [52], la deforestación se considera uno de los problemas ambientales más graves a nivel mundial, ya que no solo afecta a la biodiversidad, sino también al clima, a los ciclos hidrológicos y a las economías locales dependientes de los bosques.

Para diversos investigadores, la deforestación no es un proceso simple, sino un fenómeno complejo en el que interactúan factores ambientales, socioeconómicos y políticos. En este sentido, el estudio en Jopala no debe limitarse a observar la pérdida de bosque como consecuencia directa de la tala o la agricultura, sino también como reflejo de dinámicas sociales más amplias, como la falta de políticas de conservación efectivas, la pobreza rural y la expansión de infraestructura [53].

La combinación de los SIG con imágenes satelitales constituye una herramienta fundamental para la conservación y gestión de bosques, ya que permite identificar patrones espaciales de deforestación y su relación con factores como la proximidad a zonas urbanas o carreteras [54].

En Jopala, estas herramientas proporcionan una base sólida para mapear las zonas más afectadas por la deforestación y analizar los posibles efectos que pueden generarse. La integración de datos socioeconómicos con información geoespacial también contribuye a comprender mejor las presiones que enfrentan los ecosistemas forestales, particularmente en comunidades agrícolas [55].

La relación entre la expansión agrícola y la deforestación ha sido documentada ampliamente. Tanto la agricultura de subsistencia como los monocultivos comerciales representan factores clave en la conversión de bosques a tierras de cultivo [56]. En Jopala, donde la pobreza rural es predominante, los agricultores dependen de nuevas áreas de tierra para subsistir, lo que provoca deforestación incluso en zonas vulnerables o protegidas.

El incremento de la actividad agrícola en Jopala es, por lo tanto, un factor central en la reducción de la cobertura forestal. Este panorama abre la oportunidad de implementar regulaciones más estrictas en el manejo territorial, así como programas de reforestación que incluyan la participación de las comunidades locales con el objetivo de mitigar los impactos ambientales.

Los efectos de la deforestación no se limitan a la pérdida de árboles. Este fenómeno contribuye directamente al cambio climático mediante la liberación de dióxido de carbono almacenado en la biomasa forestal y afecta la biodiversidad, ya que numerosas especies dependen de estos ecosistemas para sobrevivir [57].

En Jopala, estas consecuencias se agravan por la vulnerabilidad de la región ante desastres naturales como deslizamientos de tierra e inundaciones, fenómenos exacerbados por la pérdida de cobertura forestal. Por ello, la presente investigación busca no solo identificar las áreas deforestadas, sino también comprender sus implicaciones socioeconómicas y ecológicas, con el objetivo de proponer soluciones integrales que vinculen la conservación ambiental con el desarrollo sostenible local.

2.3 Análisis espacial

El análisis espacial constituye una herramienta clave para comprender cómo interactúan los factores que influyen en la deforestación y cómo se distribuyen en el territorio. La tala ilegal continúa siendo una preocupación en América Latina debido a la falta de regulación efectiva, y en comunidades rurales como Jopala representa además una fuente de ingresos [44].

Este tipo de análisis no solo ofrece una fotografía de los fenómenos actuales, sino que también permite identificar la relación entre actividades humanas —como la agricultura o la construcción de infraestructura— y los cambios en el uso del suelo [45]. En el caso de Jopala, resulta esencial para localizar las zonas más afectadas por la deforestación y comprender las causas que la generan, aportando información valiosa para la planificación territorial.

Otra de sus ventajas es la posibilidad de integrar datos geográficos con información socioeconómica y ambiental, lo que permite modelar escenarios futuros y prevenir las consecuencias de distintas intervenciones sobre el territorio [46].

En Jopala, esta capacidad es crucial para anticipar qué zonas pueden ser más vulnerables a la deforestación en relación con la expansión agrícola o la construcción de infraestructura. Estos escenarios resultan fundamentales para diseñar estrategias preventivas que reduzcan la pérdida forestal y favorezcan el desarrollo sostenible.

El análisis espacial también contribuye a evaluar la relación entre los factores asociados a la deforestación. Esta perspectiva facilita la identificación de patrones de disminución de biodiversidad, fragmentación del paisaje y pérdida de hábitat, lo que permite delimitar áreas prioritarias para la conservación [47].

En Jopala, donde la deforestación impacta tanto en las comunidades como en los recursos naturales, esta herramienta ayuda a señalar las zonas que requieren mayor protección ambiental, así como aquellas en las que las actividades humanas deben regularse con mayor rigor.

Finalmente, el uso de tecnologías como los SIG refuerza la utilidad del análisis espacial al facilitar el monitoreo del territorio y apoyar la implementación de políticas de conservación más efectivas [48]. En Jopala, esto ofrece a las autoridades locales y a los gestores ambientales la posibilidad de diseñar políticas ajustadas a la realidad del municipio, mejorar los esfuerzos de reforestación y mantener un equilibrio entre la protección ambiental y el desarrollo económico.

2.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas fundamentales para el análisis de datos espaciales y la gestión territorial. Permiten recopilar, almacenar, analizar y visualizar información geográfica, lo que facilita la toma de decisiones en temas relacionados con el uso del suelo, la gestión de recursos naturales y la planificación territorial [59]. En el caso de la deforestación en Jopala, los SIG integran datos de uso del suelo, cobertura forestal y variables ambientales como humedad, temperatura, precipitación promedio anual y altitud, con el fin de estudiar los patrones de pérdida forestal y diseñar estrategias de conservación.

El uso de los SIG también ofrece un marco metodológico para el análisis de grandes cantidades de datos. Además de recopilar y almacenar información, estas herramientas permiten la integración simultánea de variables geográficas, lo que favorece un análisis más profundo. De esta manera, los SIG se vuelven indispensables para comprender procesos como la deforestación, ya que posibilitan identificar áreas críticas y plantear soluciones a partir de información sólida [59].

Una de las principales fortalezas de los SIG radica en su capacidad para integrar variables socioeconómicas y ambientales. Esta funcionalidad permite combinar información geográfica con datos específicos, como altitud, humedad, precipitación y temperatura, lo que enriquece el análisis de patrones espaciales relacionados con fenómenos ambientales. En el caso de Jopala, esta capacidad permite no solo identificar las zonas más afectadas por la deforestación, sino también analizar cómo factores como el relieve y el clima influyen en la pérdida de cobertura forestal [59].

Otra ventaja significativa de los SIG es su capacidad de modelar escenarios futuros. Estas herramientas pueden emplearse para proyectar el desarrollo de infraestructura o la expansión agrícola y anticipar sus impactos sobre los bosques. Este tipo de proyecciones es esencial para diseñar medidas preventivas que reduzcan la deforestación y promuevan un uso más racional del territorio [46].

Los SIG no solo contribuyen al análisis técnico, sino también a la comunicación y la participación comunitaria. La posibilidad de crear mapas detallados de las zonas más vulnerables a la deforestación los convierte en herramientas útiles para diseñar políticas de conservación más efectivas. Además, la visualización clara de la información facilita el diálogo entre comunidades locales, autoridades y gestores ambientales [48].

En el caso de Jopala, los mapas generados mediante SIG pueden emplearse tanto para sensibilizar a las comunidades sobre los impactos de sus actividades como para apoyar la toma de decisiones colectivas que fortalezcan la conservación de los recursos forestales.

2.5 Datos ráster

Los datos ráster son una representación espacial esencial en geografía y en el análisis de fenómenos ambientales. Están estructurados en una cuadrícula de píxeles o celdas, donde cada unidad contiene un valor numérico que describe características específicas de la zona que representa (Fig. 2.1). Este formato es ampliamente utilizado para el estudio de la cobertura forestal, el clima y otras variables ambientales [60].

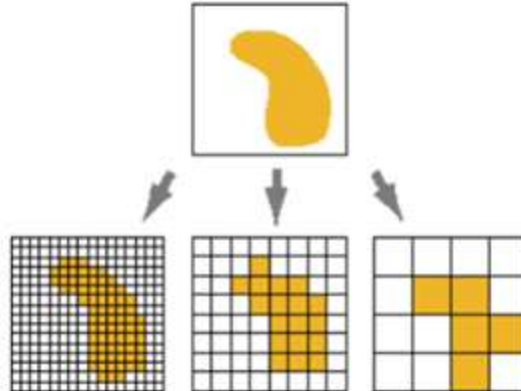


Fig. 2.1. Diagrama de un polígono representado mediante un dataset ráster. Imagen recuperada de ArcMap [61].

En Jopala, los datos ráster resultan útiles para identificar cambios en la cobertura forestal a lo largo del tiempo, lo que permite localizar las zonas más afectadas por la deforestación y reconocer áreas prioritarias para la conservación. Una de sus principales ventajas es su capacidad para representar fenómenos continuos, como la humedad, la temperatura o la altitud, que varían gradualmente en el espacio [60].

Además, los datos ráster permiten capturar tanto la distribución espacial de las variables ambientales como la magnitud o intensidad de cada fenómeno. Esto facilita el mapeo detallado de la densidad y extensión del daño forestal, proporcionando información crítica sobre la gravedad del problema en distintas áreas del territorio. En el caso de Jopala, esta capacidad es clave para evaluar la deforestación en zonas con diferentes niveles de vulnerabilidad.

Otra aplicación importante de los datos ráster es el análisis temporal. Al integrar series históricas, es posible identificar patrones y tendencias en la pérdida de cobertura forestal, así como los factores que los impulsan. Este tipo de análisis resulta esencial para planificar estrategias de conservación a largo plazo. En [46] se sostiene que el uso de datos ráster en series temporales permite anticipar los efectos de actividades humanas como la construcción de infraestructura o la expansión agrícola, además de identificar “puntos calientes” de deforestación que requieren atención inmediata.

Finalmente, los datos ráster son especialmente valiosos en estudios de conservación, ya que permiten elaborar mapas de riesgo y priorizar intervenciones. Estas aplicaciones facilitan la implementación de medidas como regulaciones más estrictas, programas de reforestación y monitoreo continuo de los recursos naturales [48].

En Jopala, el uso de esta herramienta permite delimitar áreas altamente sensibles a la deforestación y diseñar estrategias de manejo forestal más eficaces, con el fin de garantizar la resiliencia ecológica y preservar la biodiversidad a largo plazo.

2.6 Cartografía

La cartografía se define como la ciencia y el arte de elaborar y utilizar mapas. Su importancia radica en la capacidad de representar y analizar características geográficas y fenómenos espaciales. Esta disciplina no solo permite visualizar cómo se disponen los elementos en el espacio, sino también comprender sus relaciones y patrones, que de otra manera podrían pasar desapercibidos [51].

En el contexto de la degradación forestal en Jopala, la cartografía constituye una herramienta clave para ilustrar de manera clara y precisa los cambios en la cobertura forestal a lo largo del tiempo.

Uno de los beneficios más importantes de la cartografía aplicada al estudio de la deforestación es la posibilidad de elaborar mapas temáticos. Estos permiten mostrar la evolución del problema en el tiempo y el espacio, destacando variables como la cobertura forestal, la fragmentación del paisaje o las áreas más vulnerables [52]. En Jopala, los mapas temáticos permiten identificar las zonas de mayor pérdida de bosque, facilitando la planificación de intervenciones efectivas.

La cartografía también favorece la integración de diferentes capas de datos, lo que fortalece el análisis espacial. El uso combinado de información geográfica como el uso del suelo, la altitud y la precipitación, junto con datos de cobertura forestal, permite realizar análisis más completos y holísticos [53].

En el caso de Jopala, esta integración hace posible evaluar cómo factores ambientales y sociales influyen en la deforestación, generando una base sólida para diseñar estrategias de conservación objetivas que atiendan tanto la pérdida de bosque como las dinámicas socioeconómicas que impulsan este fenómeno.

Por último, la cartografía desempeña un papel estratégico en la gestión y conservación ambiental. Los mapas no solo son herramientas descriptivas, sino también instrumentos de apoyo para la toma de decisiones, ya que permiten identificar con claridad las zonas prioritarias de intervención [54].

En Jopala, los mapas creados mediante técnicas cartográficas pueden utilizarse para diseñar planes de reforestación, establecer zonas protegidas y promover un desarrollo sostenible. Además, su capacidad de comunicar información compleja de manera sencilla facilita el diálogo entre comunidades, autoridades y gestores ambientales, lo que convierte a la cartografía en un recurso esencial en la lucha contra la deforestación.

2.7 Polígonos

En el análisis espacial, los polígonos cumplen un papel esencial porque permiten representar áreas geográficas delimitadas por límites cerrados que corresponden a zonas de interés. Esta representación es clave en la planificación territorial y en la gestión de los recursos naturales, ya que facilita la definición precisa de las áreas analizadas [62].

En el caso de Jopala, los polígonos son útiles para identificar y monitorear las zonas afectadas por la deforestación, lo que permite un seguimiento detallado de los cambios en el paisaje. Gracias a esta herramienta es posible ilustrar la distribución de la pérdida forestal y reconocer las áreas que requieren atención inmediata o acciones de protección.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizan los polígonos para analizar relaciones espaciales entre distintas variables, como la expansión agrícola, el uso del suelo o la construcción de infraestructura. Esta capacidad facilita comprender cómo interactúan los factores que ejercen presión sobre los bosques y contribuye a proponer medidas más efectivas para mitigar la deforestación [46].

Otra ventaja es la posibilidad de cuantificar la superficie afectada. Los polígonos permiten calcular la extensión de las áreas deforestadas, estimar tasas de pérdida forestal y comparar la magnitud de los daños con zonas protegidas o de riesgo. Esta característica convierte a los polígonos en una herramienta indispensable para medir con precisión los cambios y evaluar la efectividad de las estrategias de conservación [45].

Finalmente, los polígonos también apoyan la gestión de áreas naturales protegidas al delimitar con exactitud corredores ecológicos y zonas prioritarias para la conservación. Esta capacidad contribuye a mantener la conectividad de los ecosistemas, proteger la biodiversidad y reforzar los esfuerzos de mitigación del cambio climático a través de la preservación de sumideros de carbono [48].

2.8 Global Forest Watch (GFW)

Global Forest Watch (GFW) es una plataforma de monitoreo de la cobertura forestal que ha transformado la forma en la que se gestionan y analizan los bosques a nivel

mundial. Esta herramienta combina información de imágenes satelitales con bases de datos de distintas fuentes, lo que permite a los usuarios monitorear en tiempo casi real los cambios en el uso del suelo y la pérdida de bosques [63].

En el caso de Jopala, el uso de GFW ofrece acceso a datos actualizados sobre deforestación, lo que permite a investigadores y autoridades locales identificar zonas de alto riesgo y aplicar medidas oportunas para mitigar los daños. Una de sus principales fortalezas es la capacidad de proporcionar información detallada en diferentes escalas espaciales y temporales, lo que facilita la comparación entre regiones y la detección de puntos críticos [64].

Además de rastrear la pérdida total de cobertura forestal, GFW también ofrece información sobre degradación de bosques, un proceso menos visible pero igualmente relevante, ya que afecta la integridad de los ecosistemas y los servicios que estos prestan [65].

En Jopala, donde la tala ilegal y la expansión agrícola son frecuentes, esta funcionalidad permite identificar áreas que muestran signos tempranos de degradación y actuar antes de que se conviertan en zonas totalmente deforestadas.

Otra ventaja de GFW es la posibilidad de configurar alertas en tiempo real para rastrear cambios en áreas específicas. Esta función resulta de gran utilidad para los gobiernos y comunidades locales, ya que les permite responder de manera inmediata ante actividades ilegales o no planificadas, como la tala o la expansión agrícola [63]. La inmediatez de la información facilita la implementación de medidas preventivas y de control más efectivas, contribuyendo a la protección de los recursos forestales de Jopala.

2.9 QGIS

QGIS (anteriormente Quantum GIS) es un Sistema de Información Geográfica de código abierto que permite visualizar, editar, analizar y generar mapas geoespaciales a partir de datos vectoriales y ráster. Su flexibilidad lo convierte en una herramienta poderosa para proyectos ambientales, ya que admite múltiples formatos de datos como Shapefile, GeoTIFF o PostGIS, e integra complementos especializados que amplían sus funciones [66].

En el ámbito de la conservación forestal, QGIS ofrece funcionalidades clave como el análisis espacial, el modelado hidrológico, la delimitación de cuencas y la elaboración de mapas temáticos que permiten observar la evolución de la cobertura forestal y la disponibilidad hídrica a lo largo del tiempo [67]. Estas capacidades son especialmente relevantes en regiones como Puebla, donde la gestión sostenible de los recursos naturales resulta indispensable para la viabilidad de proyectos hidroeléctricos, solares o eólicos.

En el municipio de Jopala, QGIS se convierte en una herramienta estratégica al permitir generar información geoespacial que ayuda a identificar las áreas más adecuadas para la instalación de tecnologías renovables sin comprometer los ecosistemas locales.

Mediante el análisis de pendiente, cobertura vegetal y proximidad a cuerpos de agua, es posible delimitar zonas de bajo impacto ambiental para el desarrollo de micro centrales hidroeléctricas o paneles solares comunitarios [68].

QGIS también facilita la integración de información técnica con el conocimiento de las comunidades locales, lo que favorece procesos de toma de decisiones más participativos. Esta integración resulta valiosa en territorios con presencia de comunidades indígenas, donde la planeación energética debe considerar tanto la conservación de los recursos forestales como las necesidades culturales y sociales de la población.

A través de complementos como QSWAT o GIS4WRF, QGIS puede vincularse con modelos climáticos y datos satelitales (Sentinel, Landsat), lo que permite evaluar la calidad del suelo, los cambios en la cobertura vegetal y la dinámica de los ecosistemas a lo largo del tiempo [69]. De esta manera, se pueden anticipar riesgos y diseñar medidas de mitigación más efectivas para reducir la presión sobre los bosques.

Finalmente, los mapas generados con QGIS facilitan la toma de decisiones de las autoridades locales y la planificación del desarrollo energético sostenible. Al proporcionar acceso libre a herramientas avanzadas de georreferenciación, QGIS impulsa el diseño de políticas basadas en evidencia, garantizando un equilibrio entre aprovechamiento energético y conservación ambiental [70].

2.10 Google Earth Pro (GEP)

Google Earth Pro es una plataforma de visualización geoespacial que permite explorar imágenes satelitales, modelos 3D de terreno, datos topográficos y capas históricas en alta resolución. A diferencia de la versión estándar, ofrece herramientas avanzadas para medir áreas, generar polígonos personalizados, exportar imágenes en alta calidad y acceder a series temporales que permiten analizar cambios del paisaje en periodos determinados [71].

Esta herramienta es especialmente valiosa en contextos como el municipio de Jopala, donde la compleja geografía montañosa y la densa vegetación dificultan el monitoreo tradicional del territorio. Mediante la comparación de imágenes satelitales de diferentes años es posible identificar con precisión procesos de deforestación, degradación forestal y cambios en el uso del suelo, los cuales pueden comprometer la estabilidad ambiental necesaria para proyectos de energía renovable [72].

El uso de GEP también facilita la evaluación del entorno hidrográfico, ya que permite reconocer patrones de pérdida de cobertura arbórea en áreas cercanas a cuerpos de agua. Esta capacidad resulta clave para planificar la ubicación de pequeñas hidroeléctricas o identificar zonas prioritarias de conservación. Además, GEP incluye funciones para crear rutas, trazar caminos y calcular altitudes, lo que aporta información relevante sobre la viabilidad logística de proyectos solares o eólicos en áreas rurales de difícil acceso [73].

Otra ventaja importante de GEP es su carácter gratuito, lo que democratiza el acceso a información geoespacial de alta calidad. Esta accesibilidad favorece la participación de comunidades y autoridades locales en el análisis del territorio, evitando la dependencia de software costoso y promoviendo una gestión más inclusiva de los recursos naturales.

En conjunto, las capacidades de Google Earth Pro lo convierten en una herramienta indispensable para diseñar, evaluar y dar seguimiento a proyectos sustentables en regiones ecológica y culturalmente sensibles como Jopala. La combinación de datos históricos, funciones de medición y accesibilidad lo posiciona como un recurso estratégico para equilibrar el desarrollo energético con la conservación ambiental [66].

2.11 Google Earth Engine (GEE)

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de análisis geoespacial en la nube que permite procesar grandes volúmenes de datos satelitales y geográficos de manera rápida y eficiente. A diferencia de los SIG tradicionales, ofrece acceso a un catálogo extenso de imágenes satelitales como Landsat, Sentinel y MODIS, lo que facilita la aplicación de algoritmos de teledetección y clasificación en tiempo real sin necesidad de equipos de alto rendimiento [74].

Esta plataforma funciona mediante programación en JavaScript y Python, lo que permite automatizar tareas complejas como la detección de cambios en el uso del suelo, la identificación de áreas deforestadas, el análisis multitemporal de cobertura vegetal y la evaluación de índices biofísicos como el NDVI o el índice de humedad del suelo [75]. Estas funcionalidades son particularmente útiles en el municipio de Jopala, donde la presión agrícola, la tala ilegal y la expansión de infraestructura generan cambios constantes en el territorio.

El uso de GEE facilita la construcción de series temporales de deforestación que permiten observar cómo ha cambiado el paisaje forestal en las últimas décadas. Esta capacidad resulta esencial para planificar proyectos de energía renovable que sean realmente sostenibles, ya que ayuda a evitar la instalación de tecnologías en áreas críticas para la conservación de los ecosistemas [76].

GEE también permite identificar zonas prioritarias de conservación o restauración mediante análisis de cobertura vegetal y variaciones en los cuerpos de agua. Esta información resulta clave para definir qué territorios deben excluirse de proyectos energéticos o cuáles requieren atención inmediata para mantener la resiliencia ecológica.

Otro aspecto destacado de GEE es su potencial para fomentar la colaboración entre científicos, comunidades y gobiernos. Al estar basado en la nube, los análisis pueden compartirse de manera abierta, lo que garantiza transparencia y participación en la toma de decisiones. En regiones como Jopala, donde coexisten comunidades indígenas con un profundo conocimiento del bosque, la integración de GEE con el monitoreo comunitario fortalece la gestión ambiental y facilita la creación de políticas públicas informadas [77], [78].

2.12 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es una técnica de teledetección ampliamente utilizada para evaluar la salud, densidad y vigor de la vegetación.

Su funcionamiento se basa en la comparación de la reflectancia de la luz en el espectro rojo y en el infrarrojo cercano, calculada con la fórmula $(NIR - RED) / (NIR + RED)$, cuyos valores oscilan entre -1 y $+1$. Valores cercanos a 1 representan vegetación densa y saludable, mientras que valores cercanos a 0 o negativos corresponden a suelo desnudo, áreas urbanas o cuerpos de agua (Fig. 2.2) [79], [80].

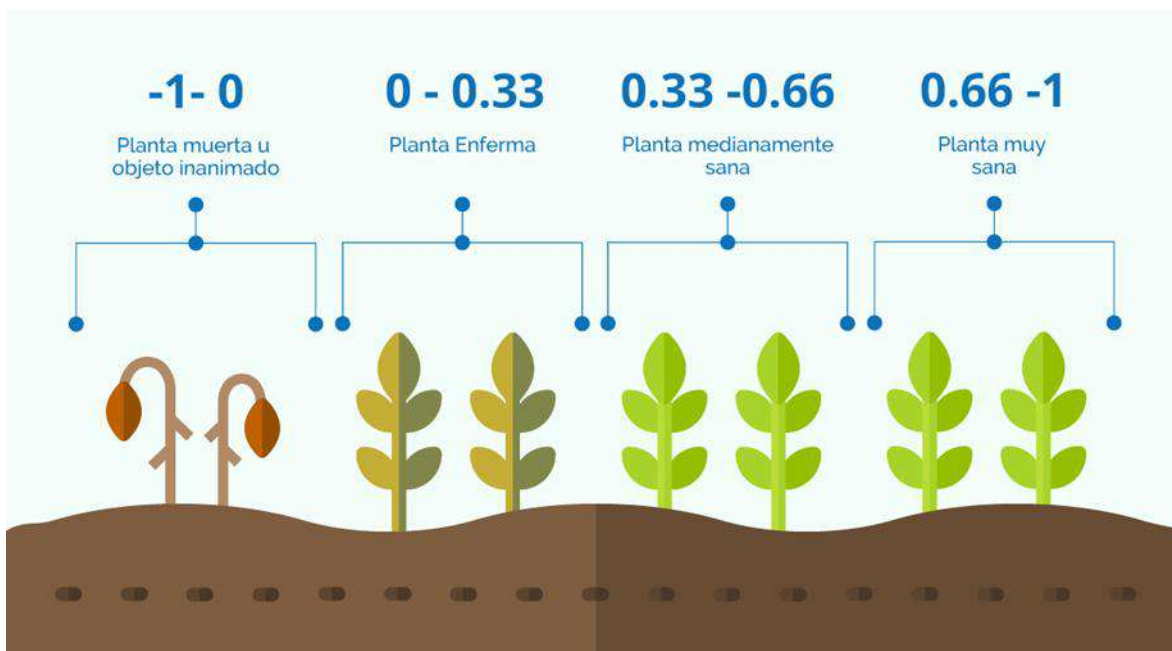


Fig. 2.2. Rangos de valores NDVI y estado de la vegetación. Imagen recuperada de Auravan [79].

El NDVI se emplea en el monitoreo de ecosistemas forestales y agrícolas, ya que permite identificar el estado de la cobertura vegetal y sus variaciones en el tiempo. En regiones como Jopala, donde los cambios en la vegetación están directamente relacionados con actividades humanas y presiones ambientales, el NDVI resulta esencial para dimensionar los impactos de la deforestación y orientar acciones de conservación [81].

Cuando se aplica sobre series temporales de imágenes satelitales, como las obtenidas de Landsat, Sentinel o MODIS, el NDVI permite observar patrones de pérdida o regeneración de la cobertura vegetal. Este tipo de análisis facilita la identificación de tendencias de deforestación o degradación y contribuye a definir estrategias para el desarrollo sostenible [82]. Por ejemplo, la reducción progresiva de los valores de NDVI en zonas cercanas a cuerpos de agua puede indicar erosión o pérdida de vegetación que afecta la calidad hídrica.

El NDVI también permite localizar áreas con alta resiliencia ecológica que pueden ser seleccionadas para programas de restauración o conservación. En el caso de Jopala, esta herramienta contribuye no solo a entender los impactos de las actividades humanas, sino también a fortalecer los procesos de planeación territorial y gestión comunitaria del paisaje. Al integrar estos análisis en proyectos energéticos, se garantiza que el desarrollo tecnológico sea compatible con la conservación de los ecosistemas [82], [83].

Capítulo 3

Metodología

La metodología aplicada en este estudio se estructuró en seis etapas principales que permitieron analizar la deforestación en el municipio de Jopala, Puebla. Estas etapas abarcan desde la recopilación de datos geográficos hasta la propuesta de estrategias de conservación. En la Fig. 3.1 se presenta el diagrama general del proceso metodológico seguido en la investigación.

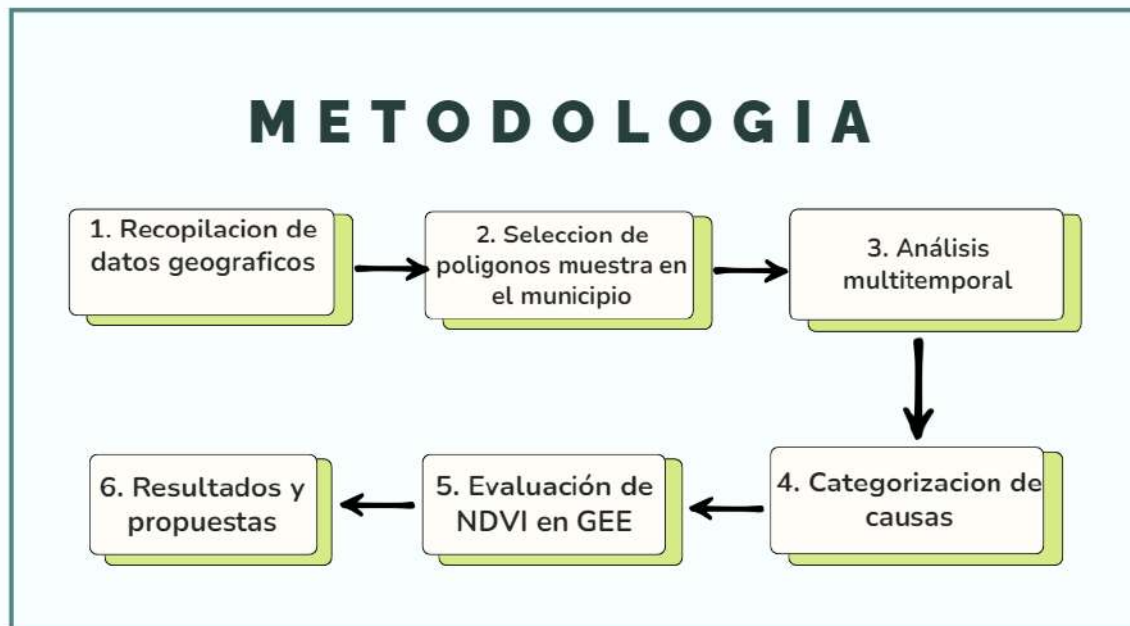


Fig. 3.1 Diagrama general de la metodología aplicada en el estudio. Fuente: Elaboración propia

3.1 Recopilación y selección de datos geográficos

El municipio de Jopala, ubicado en la Sierra Norte de Puebla (Fig. 3.2), fue seleccionado como área de estudio debido a su alta riqueza en biodiversidad y a la presencia de bosques de niebla y pino-encino, ecosistemas que lo convierten en un sitio estratégico para el análisis de la deforestación.

El municipio de Jopala se localiza dentro de la subcuenca del río Necaxa, que forma parte de la Región Hidrológica 27 Tuxpan–Nautla, de acuerdo con la clasificación oficial de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) [84]. Esta ubicación resalta la importancia de la cobertura forestal en la regulación hídrica, ya que los bosques contribuyen al control de escurrimientos superficiales, la infiltración de agua y la recarga de acuíferos, funciones esenciales tanto para el equilibrio ecológico local como para los proyectos hidroeléctricos presentes en la región.



Fig. 3.2 Ubicación del municipio de Jopala dentro del estado de Puebla. Mapa recuperado de Wikipedia

En esta primera fase se recopiló la información geográfica necesaria para la construcción de los mapas. Las capas fueron seleccionadas de fuentes confiables y actualizadas, garantizando precisión y relevancia para los objetivos del estudio.

A continuación, se describen las capas utilizadas en el análisis espacial y su función en el estudio:

3.3.1 Capa 1: Marco Geoestadístico de INEGI

El Marco Geoestadístico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) es una representación cartográfica de la división política y geográfica del país, utilizada ampliamente en estudios territoriales y demográficos. Incluye polígonos que delimitan áreas urbanas y rurales, así como los límites municipales [85].

La función principal de esta capa en el estudio es ubicar de manera precisa el área geoespacial de trabajo. Sobre ella se superpondrán otras capas de información y servirá como guía para descargar los datos correspondientes al municipio de Jopala desde Global Forest Watch (GFW). La versión utilizada del Marco Geoestadístico corresponde a la actualización de 2022 (Fig. 3.3).

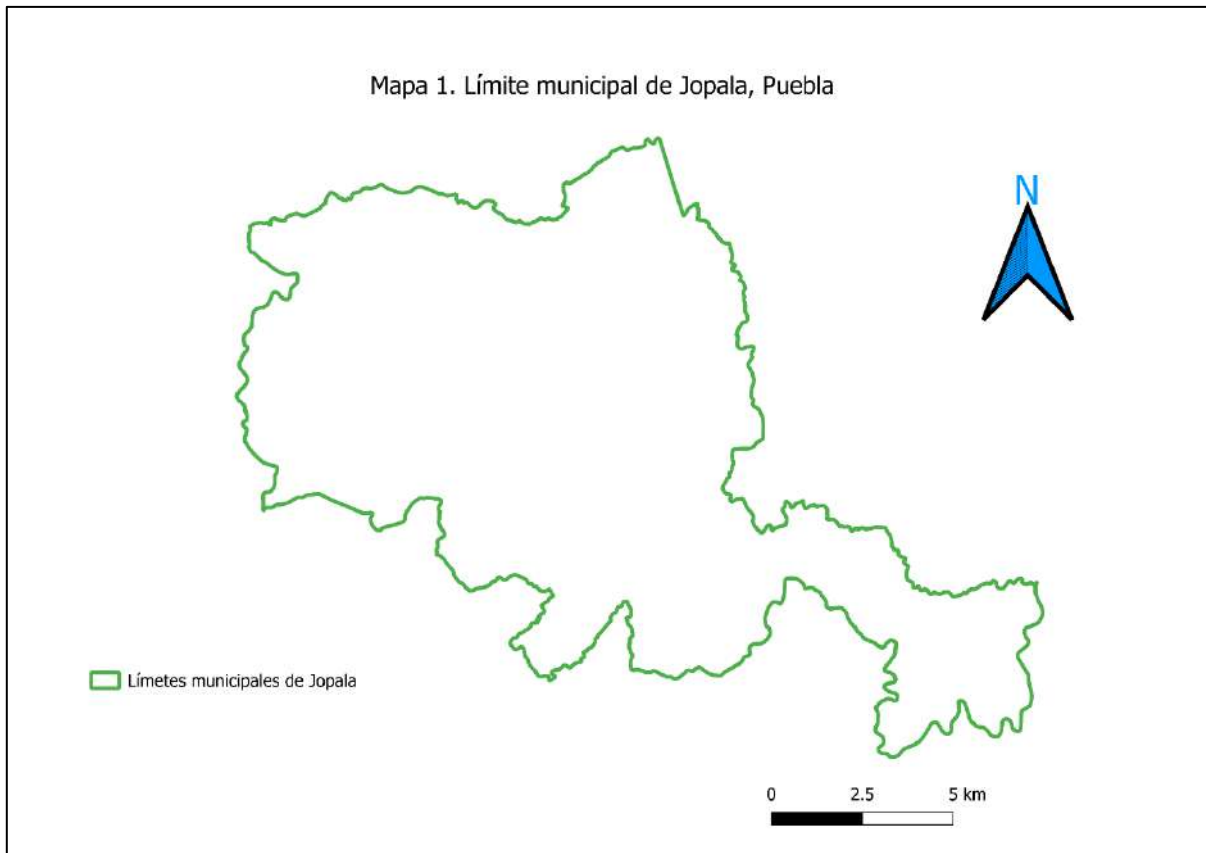


Fig. 3.3 Marco Geoestadístico de INEGI aplicado al municipio de Jopala. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2022).

3.1.2 Capa 2: Detección de Zonas Deforestadas de Global Forest Watch (GFW)

GFW es una plataforma desarrollada por el World Resources Institute, en la que podemos encontrar una gran variedad de capas que favorecen el análisis ambiental. En este caso se utilizarán las capas disponibles para monitorear la cobertura forestal global [86].

Esta será la capa guía para determinar cuáles son las zonas que se van a estudiar. Está constituida por píxeles que, a su vez, están clasificados por tonalidades que indican los distintos niveles de deforestación. Cada píxel tiene un tamaño de 30 × 30 m, es decir, 900 m². La clasificación de colores permite identificar las zonas con

mayor tasa de deforestación: entre más oscuro sea el color, mayor daño presenta la zona (Fig. 3.4). Estas serán las principales áreas por estudiar.

La cobertura arbórea incluye toda vegetación mayor a 5 metros de altura, abarcando tanto bosques naturales como plantaciones en distintas densidades [86]. La versión más reciente disponible en el portal GFW corresponde al año 2023.

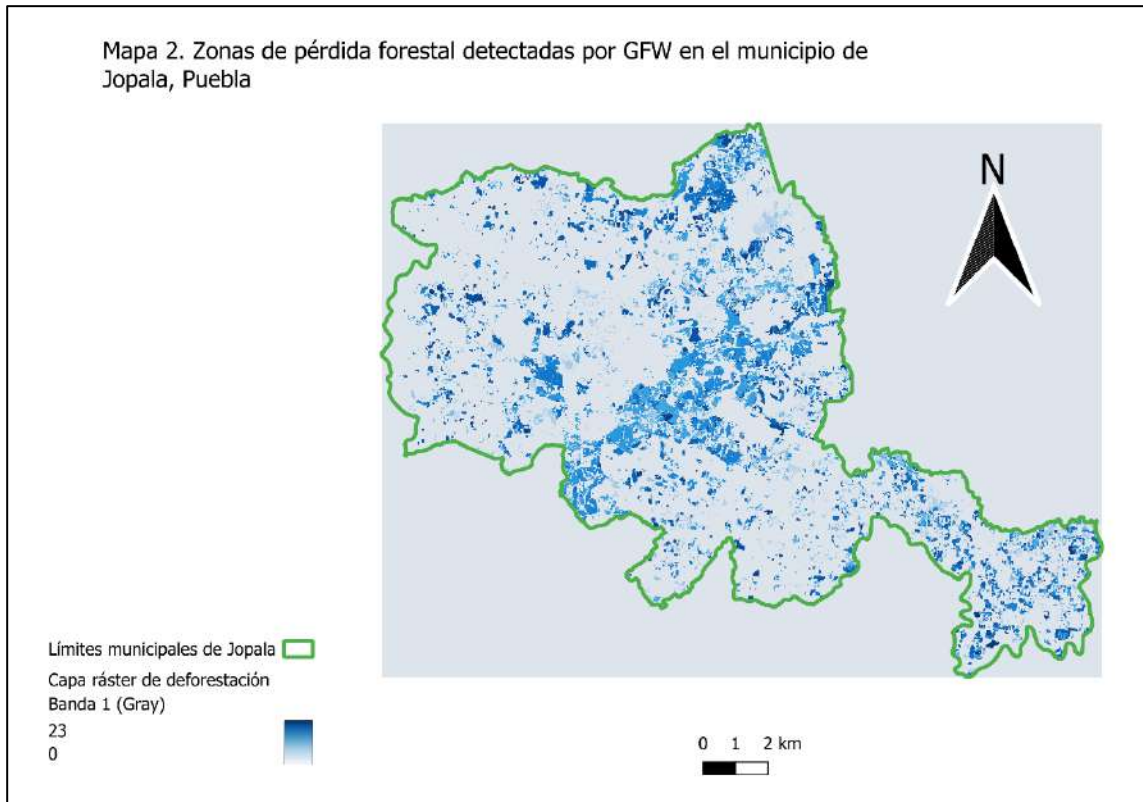


Fig. 3.4 Cobertura forestal y zonas de pérdida detectadas en Global Forest Watch (GFW). Fuente: Elaboración propia con datos de GFW (2023).

3.1.3 Capa 3: Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 de INEGI

El Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 es un modelo digital de elevación del INEGI que proporciona los valores de altitud del territorio nacional. La información geográfica está organizada en celdas que representan variaciones de altura, lo que facilita el análisis de la topografía [87].

Al superponer esta capa con las demás, es posible identificar la elevación del terreno y evaluar si esta influye en los procesos de deforestación. Su uso permite analizar la relación entre altitud y pérdida de cobertura forestal, especialmente en áreas con pendientes pronunciadas. Al igual que la capa anterior, cuenta con una clasificación de colores que permite identificar las zonas más elevadas: entre más oscuro sea el color, mayor es la altitud (Fig. 3.5).

La última versión disponible de este producto corresponde al año 2020.



Fig. 3.5. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0) aplicado al municipio de Jopala. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2020).

3.1.4 Capa 4: Uso de Suelo y Vegetación (Serie VI) de INEGI

Esta capa, proporcionada también por INEGI, indica el uso actual del suelo y los tipos de vegetación en México. Las categorías abarcan desde áreas agrícolas hasta zonas urbanizadas [88].

En el estudio, esta capa se empleará para identificar la cobertura vegetal y el uso del suelo en las zonas afectadas (Fig. 3.6). Además, permite analizar posibles cambios de uso de suelo asociados a la deforestación. Su integración en el mapa facilita comprender si algunas de las áreas impactadas han sido transformadas para fines agrícolas, urbanos u otros [88].

Las principales categorías identificadas en el área de estudio son las siguientes:

- Agricultura de temporal anual: Cultivos que se siembran y cosechan dentro de un mismo año agrícola, dependientes de la lluvia como fuente principal de agua.
- Agricultura de temporal anual y permanente: Combinación de cultivos anuales y permanentes en un mismo terreno.

- Agricultura de temporal permanente: Cultivos de larga duración que permanecen en el terreno por más de un año.
- Asentamientos humanos: Áreas ocupadas por infraestructura urbana y rural, viviendas, industrias y otros espacios construidos.
- Pastizal cultivado: Terrenos destinados a la producción de pasto para la alimentación del ganado.
- Pastizal inducido: Pastizales creados por la acción humana a partir de la eliminación de bosques o selvas.
- Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña: Bosques mesófilos de montaña perturbados y en proceso de regeneración, dominados por árboles jóvenes y especies pioneras.
- Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña: Áreas de bosque mesófilo alteradas significativamente que presentan arbustos y matorrales.
- Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia: Zonas degradadas de selva alta perennifolia donde predominan arbustos en lugar de árboles maduros, como resultado de tala, incendios o actividades agrícolas.

La versión más reciente de esta capa corresponde al año 2021 [81].

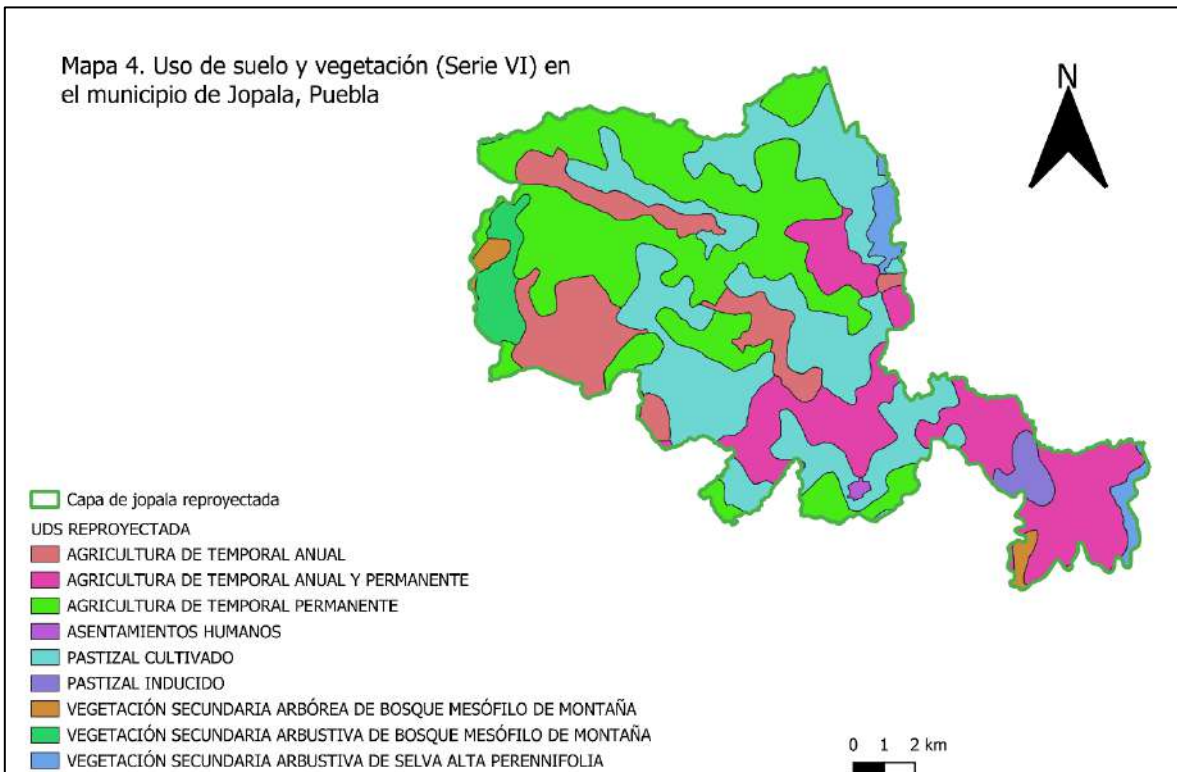


Fig. 3.6. Uso de suelo y vegetación (Serie VI) en el municipio de Jopala. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2021).

3.1.5 Capa 5: Climas de México de CONABIO

La capa de climas de CONABIO muestra las zonas climáticas de México clasificadas con el sistema de Köppen, el cual describe cada tipo de clima mediante una serie de letras —normalmente tres— que indican el comportamiento de las temperaturas y las precipitaciones [89].

En el presente estudio, esta capa se utiliza para relacionar el tipo de clima con las áreas deforestadas, lo que permite comprobar si las condiciones climáticas influyen en los procesos de pérdida de cobertura forestal. La tabla de atributos de la capa contiene información detallada sobre las características climáticas del municipio de Jopala, Puebla. Cada registro incluye datos sobre superficie, perímetro, tipo de clima, temperatura y precipitaciones.

Los códigos de clasificación que se muestran en el mapa corresponden al sistema de Köppen modificado para México. Por ejemplo, “A” indica clima tropical húmedo, mientras que “C(fm)” representa un clima cálido subhúmedo con características específicas de precipitación (Fig. 3.7) [90].

La última versión disponible de esta capa corresponde al año 2017.

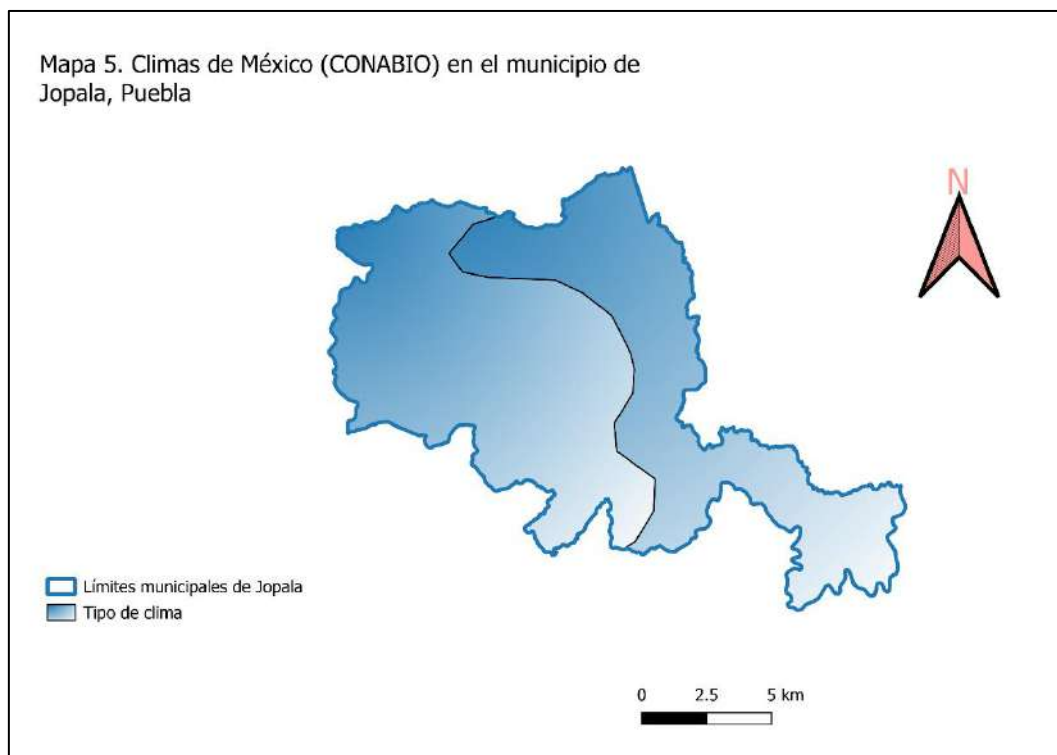


Fig. 3.7. Climas del municipio de Jopala con base en el sistema Köppen modificado. Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO (2017).

3.1.6 Capa 6: Áreas Naturales Protegidas (ANP)

Esta capa proporciona información geoespacial detallada sobre las Áreas Naturales Protegidas (ANP) de México. Incluye polígonos que representan los límites de cada ANP, así como atributos como nombre del área, categoría de manejo, estados y municipios en los que se ubica, superficie total y fechas relevantes de decretos y programas de manejo [91].

En el presente estudio, esta capa se utiliza para determinar si existe algún área protegida que esté siendo afectada por la deforestación. En el caso específico del municipio de Jopala, se identificó una única ANP: la Zona de Protección Forestal y de la Fauna Silvestre de la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa (Fig. 3.8).

La designación de esta área como ANP busca conservar sus recursos naturales, garantizar la estabilidad hídrica necesaria para la generación de energía y proteger la biodiversidad presente en la cuenca.

La versión más reciente disponible de esta capa corresponde al año 2024 [91].

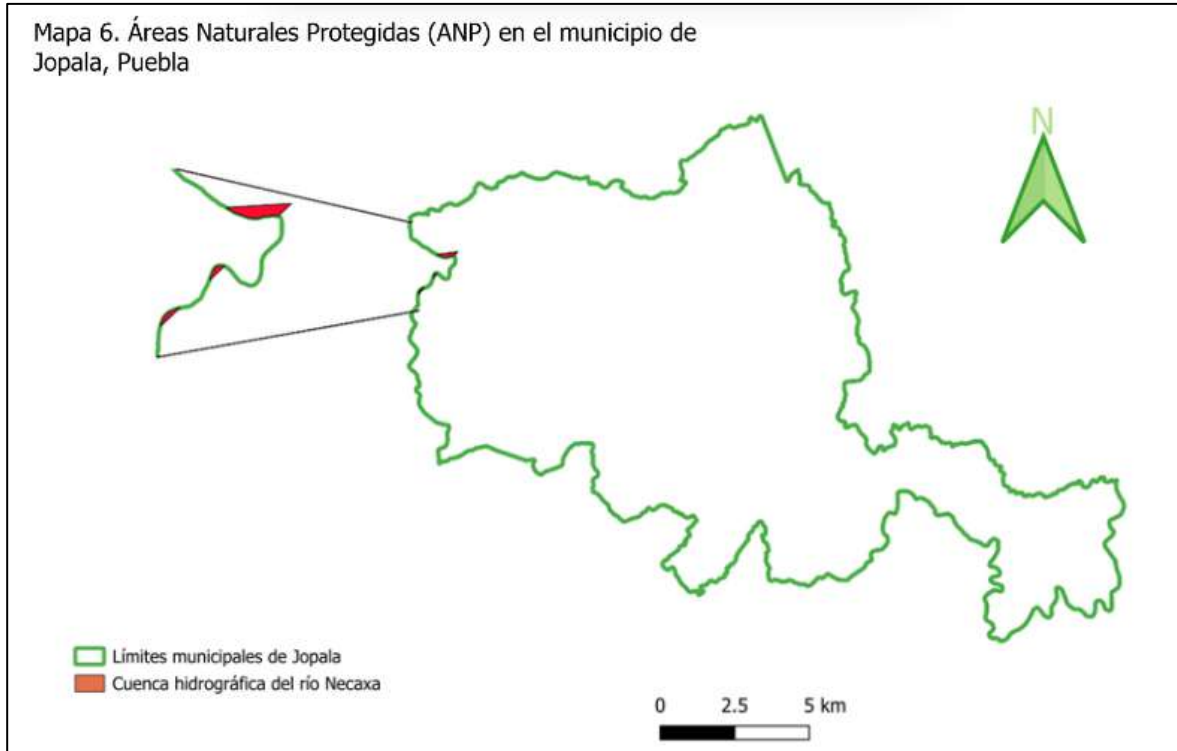


Fig. 3.8. Áreas Naturales Protegidas (ANP) en el municipio de Jopala. Fuente: Elaboración propia con datos de CONANP (2024).

3.2 Selección y análisis de polígonos de muestra

Una vez integradas todas las capas en un mismo mapa, se inició el proceso de muestreo, el cual consistió en seleccionar 100 polígonos de muestra distribuidos de manera aleatoria en el municipio de Jopala, dentro de las zonas de mayor pérdida forestal identificadas en la capa de GFW.

Criterio de selección: Se eligieron las áreas con tonalidades más oscuras en la clasificación cromática de GFW, ya que representan los valores más altos de pérdida de vegetación. Este enfoque permitió centrar el análisis en los puntos de mayor incidencia de deforestación. La selección aleatoria evitó sesgos y garantizó la cobertura de diferentes áreas del municipio de estudio.

Creación de nueva capa de polígonos: Los 100 polígonos seleccionados se integraron en una nueva capa (Fig. 3.9), lo que permitió aislarlos del resto de la información. La figura muestra, de manera comparativa, el proceso: a la izquierda aparece el municipio con todos los datos de deforestación de GFW, donde las zonas azules representan pérdida de cobertura forestal. A la derecha, se observa únicamente la ubicación de los 100 polígonos elegidos, marcados en amarillo, que

serán los puntos de análisis detallado. De esta forma, se simplifica el mapa original para concentrar el estudio únicamente en las áreas de mayor interés.

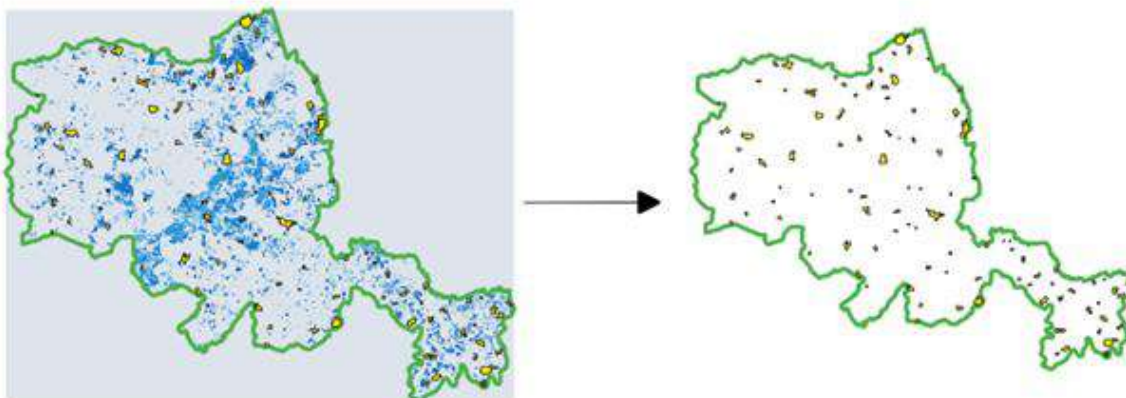


Fig. 3.9. Proceso de selección de 100 polígonos de muestra a partir de la capa de deforestación de GFW en el municipio de Jopala. Fuente: Elaboración propia con datos de GFW (2023). Elaboración propia.

3.3 Categorización y análisis de las causas

Cada uno de los 100 polígonos seleccionados fue analizado de manera individual utilizando la función de línea del tiempo de Google Earth Pro (GEP), que permite revisar imágenes satelitales correspondientes a diferentes años. Este recurso metodológico hizo posible observar de manera comparativa las condiciones del polígono antes, durante y después del proceso de deforestación (Figs. 3.10, 3.11 y 3.12).

La Fig. 3.10 muestra un polígono de muestra en el año 2010, considerado como la condición inicial en la línea de tiempo de Google Earth Pro.



Fig. 3.10 Polígono de muestra en el año 2010, considerado como la condición inicial en la línea de tiempo de Google Earth Pro. Vista satelital obtenida de GEP [71].

La Fig. 3.11 muestra el mismo polígono de muestra en 2013, evidenciando la etapa intermedia de la secuencia temporal en Google Earth Pro.

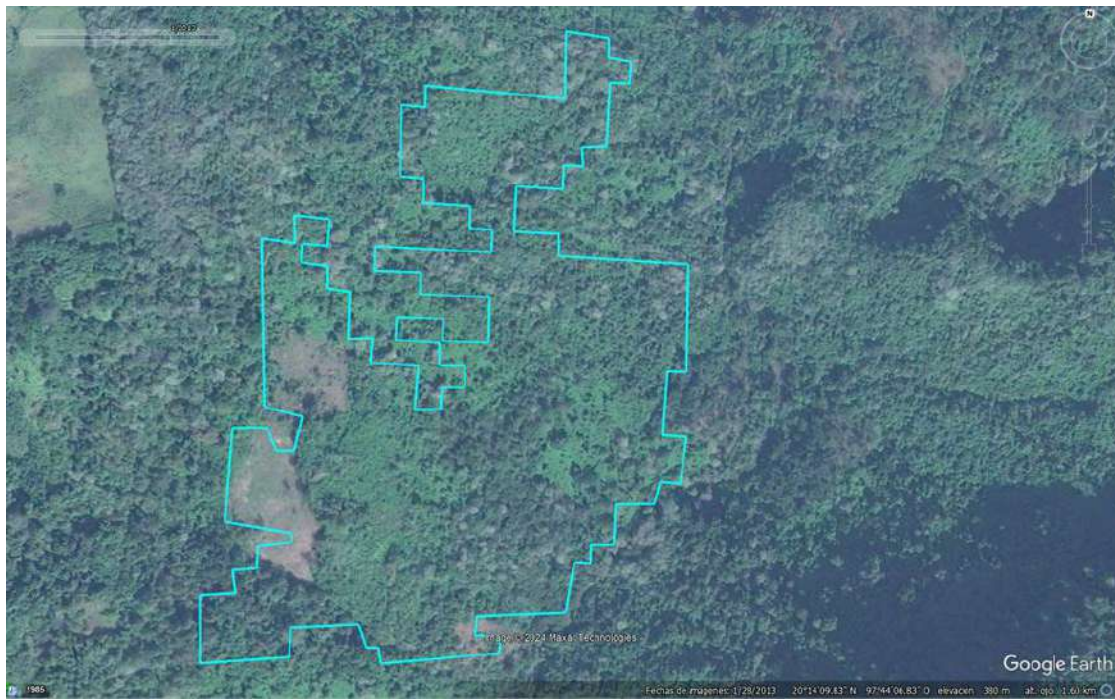


Fig. 3.11. Polígono de muestra en enero de 2013. Vista satelital obtenida de GEP [71].

Finalmente, la Fig. 3.12 corresponde al mismo polígono en 2024, considerado como el estado actual dentro de la línea de tiempo de Google Earth Pro.



Fig. 3.12. Polígono de muestra en febrero de 2024. Vista satelital obtenida de GEP [71].

De forma simultánea, se construyó una tabla de atributos única en QGIS, en la cual se fue registrando la información de cada polígono al mismo tiempo que se analizaban las imágenes. Esta tabla incluyó campos destinados a documentar el año aproximado de pérdida de cobertura arbórea, la posible causa de la deforestación (por ejemplo, expansión agrícola, pastizal inducido, asentamientos humanos o infraestructura) y una descripción detallada de lo observado en la secuencia temporal de imágenes.

La integración de esta información en la tabla de atributos permitió homogeneizar el procedimiento de análisis, asegurando que todos los polígonos se evaluaran bajo los mismos criterios metodológicos. De este modo, el cruce entre la observación visual en GEP y los datos espaciales provenientes de las capas temáticas (uso de suelo y vegetación, clima, elevación y ANP) ofreció una base consistente para la clasificación posterior de causas y la identificación de patrones de cambio en el municipio de Jopala.

3.4. Evaluación de cambios en la cobertura vegetal a través de NDVI en GEE

En esta etapa del proceso se utilizó Google Earth Engine (GEE) para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), con el fin de evaluar la densidad y salud de la vegetación en cada polígono. Para ello, se seleccionaron imágenes satelitales de Landsat y Sentinel, se filtraron por fechas específicas y se aplicó la fórmula del NDVI a nivel de píxel. Posteriormente, se analizaron las variaciones temporales de este índice dentro de los polígonos seleccionados, lo que permitió identificar patrones relacionados con deforestación, degradación de la vegetación o procesos de recuperación. Esta herramienta facilitó un análisis espacial preciso y a gran escala.

En los mapas generados a partir del NDVI se asignaron colores para representar distintos niveles de vegetación. Es importante señalar que el significado de los colores no es universal, ya que depende de la configuración aplicada en la escala de visualización. De manera común, los colores cálidos como rojo o naranja se asocian con baja o nula cobertura vegetal, mientras que los tonos verdes indican vegetación densa y saludable. Sin embargo, esta relación puede variar según el criterio del analista o el software empleado, por lo que siempre se debe consultar la leyenda de cada mapa. Asumir que un color tiene el mismo significado en todos los casos puede conducir a interpretaciones erróneas [92].

La Fig. 3.13 ofrece una representación conceptual del tipo de análisis realizado en este proyecto. En ella se muestran diferentes etapas de desarrollo o deterioro de la vegetación utilizando mapas de colores y gráficos de comportamiento espectral. Estos elementos permiten visualizar cómo cambian los niveles de cobertura vegetal a lo largo del tiempo, desde superficies sin vegetación (colores cálidos como rojo y naranja) hasta zonas con vegetación saludable (tonos verdes). Esta lógica visual fue la misma que se aplicó en el análisis de los 100 polígonos del municipio de Jopala, donde se utilizaron imágenes satelitales multitemporales para comparar los valores del NDVI entre distintos años.

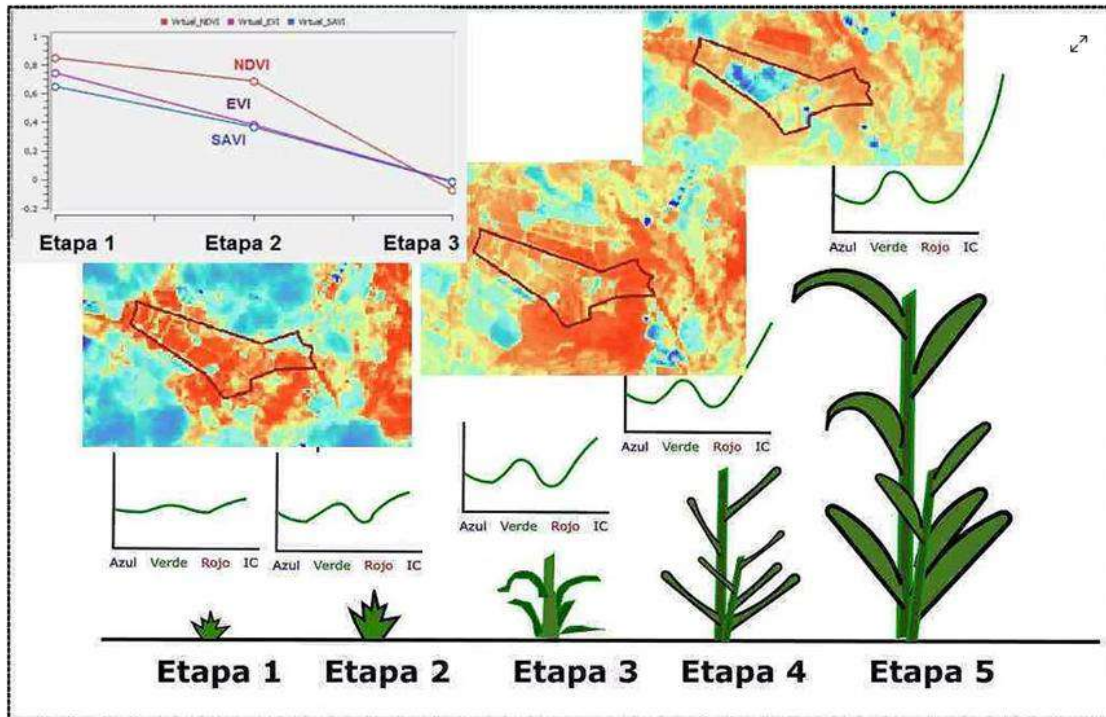


Fig. 3.13. Representación conceptual del análisis multitemporal de NDVI y variaciones en la cobertura vegetal. Imagen recuperada de Agrottools [92].

Al observar la disminución o el aumento de estos valores, es posible detectar procesos de deforestación o recuperación. La figura también incluye gráficos de respuesta espectral que muestran el comportamiento de las bandas utilizadas en el cálculo del NDVI, lo que resulta útil para comprender por qué determinadas áreas presentan valores altos o bajos. Aunque esta figura es de carácter ilustrativo, sintetiza el tipo de interpretación aplicada en el estudio para identificar causas de pérdida de vegetación y sustenta la metodología implementada [93].

Si bien existen otros índices como el EVI (Índice de Vegetación Mejorado) o el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo), en este proyecto no fueron empleados. Se trabajó exclusivamente con el NDVI, al considerarse suficiente para detectar cambios en la cobertura vegetal de los polígonos analizados. No obstante, resulta relevante conocer que el EVI es más adecuado en áreas con vegetación muy densa, mientras que el SAVI es útil en zonas con suelos expuestos o vegetación escasa [93].

3.5. Conteo y propuesta de soluciones

Con base en la información registrada en la tabla de atributos, se realizará un recuento de las causas predominantes de deforestación en los polígonos seleccionados. Este conteo permitirá reconocer cuáles son los factores que influyen

con mayor frecuencia en la pérdida de cobertura vegetal en el municipio de Jopala y servirá como insumo para plantear estrategias de mitigación.

Cada polígono será considerado como una unidad de análisis independiente, de modo que la sistematización de los 100 casos proporcione una visión integral de las dinámicas de deforestación a escala municipal. A partir de este procedimiento se establecerán lineamientos para la propuesta de soluciones, los cuales se presentarán en el capítulo de resultados y discusión.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Describir la situación actual del sector forestal en Jopala, Puebla, abordando aspectos como el estado de los bosques y las prácticas de manejo.

4.1.1 Análisis de la situación actual con GFW

Global Forest Watch (GFW) se especializa en el monitoreo de la cobertura forestal y los cambios en el uso del suelo mediante indicadores ambientales y mapas temáticos. Sin embargo, es importante señalar que, al emplear un sistema de referencia global, los límites políticos que presenta pueden diferir de los utilizados por instituciones nacionales como SEMARNAT o INEGI (Fig. 4.1) [86].



Fig. 4.1. Diferencias en la delimitación territorial al emplear coordenadas de referencia globales en Global Forest Watch [86].

De acuerdo con GFW, en 2020 Jopala contaba con 11.1 kha de bosque natural, equivalente al 48% de su superficie. Para 2023, se registró la pérdida de 127 ha, lo que representa aproximadamente 114,000 toneladas de emisiones de CO₂ (Fig. 4.2) [79]. Entre 2001 y 2023, el municipio perdió 5 ha de bosque primario húmedo (<0.1% de la pérdida total), lo que representa una disminución del 3.3% en este periodo. En conjunto, Jopala perdió 5.02 kha de cobertura arbórea, equivalente al 28% de la cobertura desde el año 2000 y a 2.58 Mt de emisiones de CO₂ [86].



Fig. 4.2. Proporción de cobertura arbórea en el municipio de Jopala en 2010. Gráfico obtenido de GFW

En contraste, entre 2000 y 2020 el municipio registró una ganancia de 235 ha de cubierta arbórea, lo que corresponde al 0.71% de toda la ganancia en el estado de Puebla. En 2010, el 73% de la superficie de Jopala estaba cubierta por árboles con una densidad superior al 30%. Esta proporción se aprecia en la Fig. 4.2, que evidencia la dominancia de la cobertura forestal frente a otros usos de suelo. No obstante, se identificaron aproximadamente 6,060 ha dedicadas a usos distintos al forestal, principalmente actividades agrícolas, lo que refleja la presión sobre los ecosistemas del municipio [86].

4.1.2. Análisis de la situación actual con CEIGEP

El portal del Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica del Estado de Puebla (CEIGEP) integra datos oficiales provenientes de INEGI y de instituciones sectoriales como CONAFOR, ofreciendo información confiable sobre las condiciones sociales, económicas y ambientales de cada municipio [94].

En el caso de Jopala, la ficha municipal resalta información relevante en los siguientes rubros:

- Cobertura forestal, áreas reforestadas y recursos forestales.
- Tipos de suelo y vegetación presentes.
- Ordenamiento territorial.

- Delitos ambientales registrados.
- Superficie reforestada.
- Extensión de Áreas Naturales Protegidas.
- Superficie afectada por incendios forestales.
- Porcentaje de suelo desnudo.
- Grado de impacto ambiental por cambio de uso de suelo.

De acuerdo con CEIGEP (periodo 2024–2030), en Jopala no se han reportado incendios forestales desde 2023, ni se registran unidades vegetales reforestadas ni delitos ambientales en el periodo vigente. Asimismo, se confirma la existencia de una sola Área Natural Protegida: la Zona de Protección Forestal y de Fauna (Z.P.F.V.) en la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa [94], con base en registros de CONAFOR [11].

4.1.3 Análisis de la situación actual con CONAFOR

En el desarrollo de esta investigación se solicitó a la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) [95] el acceso a datos espaciales relacionados con la deforestación en México, específicamente a nivel estatal y municipal. Para ello se llenó el formulario oficial disponible en la plataforma institucional, proporcionando los datos generales del proyecto y el correo electrónico de contacto correspondiente. Sin embargo, pese a haber completado el procedimiento, no se recibió respuesta alguna por parte de la dependencia ni se estableció comunicación al correo registrado. Esta situación limitó la obtención de información oficial desagregada para el municipio de Jopala, lo que obligó a complementar el análisis con fuentes abiertas y plataformas geoespaciales de acceso público como INEGI, Global Forest Watch y Google Earth Engine.

4.2 Cartografiar las áreas deforestadas en el municipio a partir de datos satelitales y herramientas de análisis geoespacial disponibles en sistemas de información geográfica de acceso libre.

4.2.1. Construcción de polígonos de muestra y tabla de atributos

A partir de la capa de deforestación de GFW, se seleccionaron 100 polígonos de muestra distribuidos en las zonas con mayor incidencia de pérdida forestal dentro del municipio de Jopala. Estos polígonos se generaron directamente en QGIS y fueron integrados en una nueva capa, lo que permitió su manejo independiente respecto de las demás capas (Fig. 4.3).

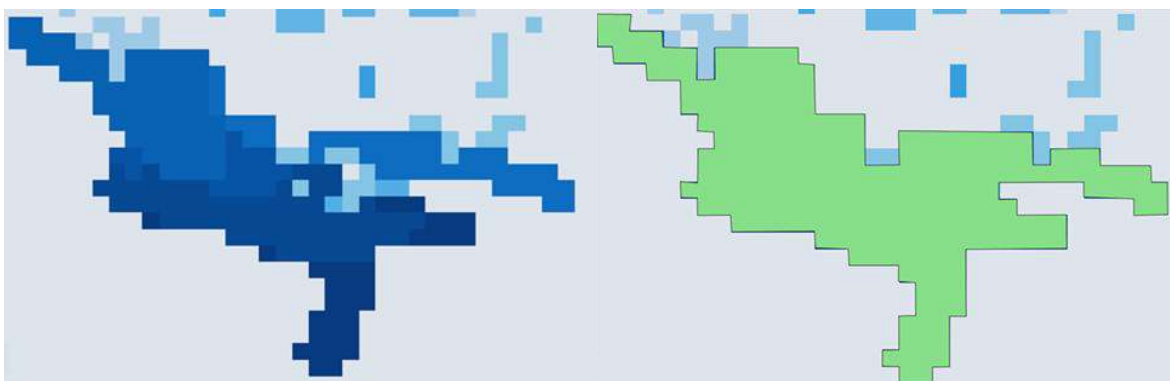


Fig. 4.3. Polígonos de muestra seleccionados a partir de la capa de deforestación de GFW en Jopala. Elaboración propia.

Es importante señalar que la capa de GFW emplea píxeles de 30×30 m (900 m^2) como unidad mínima de análisis, lo cual determina la escala a la que pueden interpretarse los cambios de cobertura. De esta forma, cada polígono seleccionado representa un área que agrupa múltiples píxeles y, por lo tanto, permite analizar patrones de deforestación en diferentes zonas del municipio sin perder detalle espacial.

El primer resultado de esta investigación fue la construcción de una tabla de atributos, que funciona como base de datos generada durante la creación de la capa de polígonos. Cada registro incluyó datos espaciales y temáticos derivados de las capas utilizadas en la metodología: uso de suelo y vegetación (Serie VI), climas de CONABIO, elevación (CEM 3.0), precipitación promedio y pertenencia a un Área Natural Protegida (ANP). La Fig. 4.4 muestra un ejemplo de la estructura de la tabla generada.

Cada fila de la tabla corresponde a un objeto geográfico, mientras que cada columna almacena datos asociados a ese objeto, como nombres, áreas, coordenadas u otra información relevante (Fig. 4.4). En total, la tabla incluye 100 filas, que representan a cada uno de los polígonos de muestra.

fid	ID	ANP	CCCDES_TEM	CCCDESC_PREC	CUPDESCRIPCIO	CUPSUPERFICIE
1	1	NO	Calido humedo, temperatura media anual mayor de 22°C y ...	Precipitacion d...	AGRICULTURA ...	29142594.1089

Fig. 4.4. Ejemplo de la tabla de atributos generada en QGIS para el análisis de los 100 polígonos. Elaboración propia

Este procedimiento aseguró un marco homogéneo para el análisis, ya que todos los polígonos se evaluaron con los mismos parámetros y bajo la misma escala de referencia.

Cada polígono fue registrado mediante un **Feature ID (fid)**, el cual es un número único generado automáticamente por el software. Este identificador permite localizar e identificar cualquier polígono creado en la capa y facilita su referencia tanto en el mapa como en cualquier otro software que trabaje con SIG. Esta constituye la primera columna de la tabla de atributos.

La segunda columna corresponde al **campo "ID"**, que es un número asignado a cada polígono de manera independiente al generado automáticamente por el programa. A diferencia del fid, este campo puede ser modificado tantas veces como sea necesario, lo que permite mayor flexibilidad en la organización de los datos.

La tercera columna es **"ANP"**, la cual hace referencia a las Áreas Naturales Protegidas dentro del municipio. Este campo se incluyó con el propósito de identificar si alguno de los polígonos se superpone con la capa de áreas naturales protegidas. En caso afirmativo, la casilla se marca automáticamente con un "Sí"; de lo contrario, queda registrada como "No".

La cuarta columna de la tabla de atributos corresponde a “**CCCDES_TEM**”, la cual contiene información promedio anual del año 2017 referente a la temperatura y al tipo de clima presente en la zona de estudio. La Fig. 4.5 muestra cómo el clima varía dentro del territorio municipal, lo cual puede estar asociado a la altitud y a factores geográficos como la proximidad a cuerpos de agua o a formaciones montañosas. En el mapa se distinguen dos tipos de clima, diferenciados por colores.

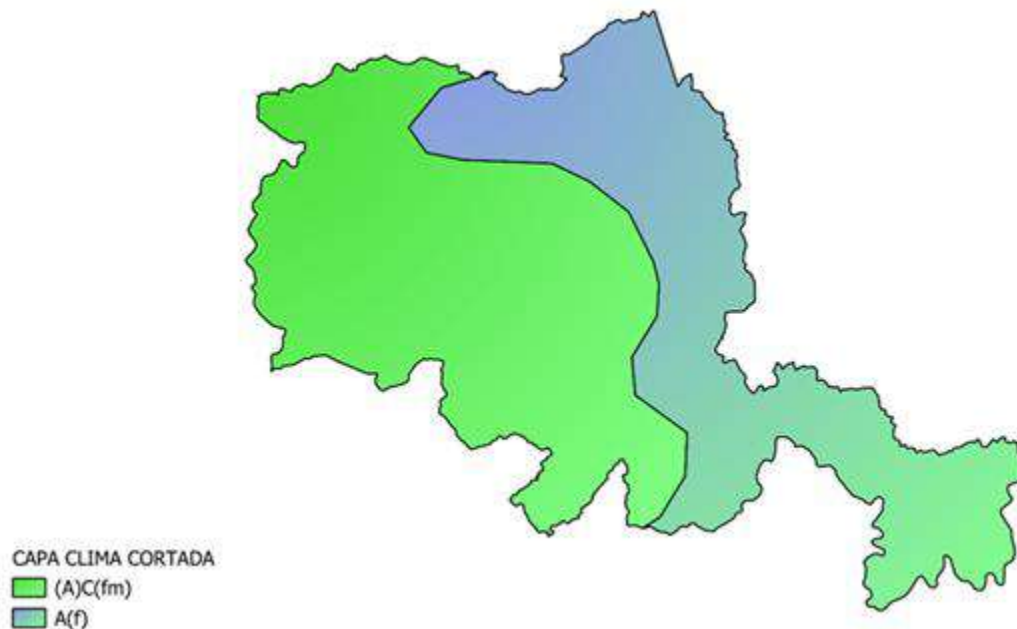


Fig. 4.5. Tipos de clima en el municipio de Jopala, Puebla, con base en información anual promedio de 2017. Los colores representan la distribución de dos categorías climáticas principales identificadas en el territorio. Elaboración propia.

El primer tipo de clima identificado en Jopala corresponde a **C(fm), semicálido húmedo**, representado en color verde en la Fig. 4.5. Este es el clima predominante en la mayor parte del territorio municipal. La clasificación se basa en el sistema de Köppen modificado para México e incluye las siguientes características:

Grupo C (semicálido): corresponde a los climas templados en la clasificación Köppen, pero con temperaturas más elevadas que un clima templado típico [96].

Temperatura media anual superior a 18 °C: la temperatura promedio a lo largo del año nunca desciende de este valor.

Mes más frío con temperatura inferior a 18 °C: lo que impide clasificarlo como clima tropical, donde la temperatura no baja de 18 °C.

Mes más cálido con temperatura superior a 22 °C: lo que refleja estaciones con variaciones térmicas moderadas.

Este tipo de clima suele encontrarse en zonas montañosas o de transición entre climas cálidos y templados. En México, se distribuye principalmente a lo largo de la Sierra Madre Oriental, que atraviesa los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Hidalgo, Tlaxcala, Querétaro, Puebla y Veracruz [97].

El segundo tipo de clima identificado en Jopala corresponde a A(f), cálido húmedo, representado en color azul en la Fig. 4.5. Este clima se localiza principalmente en la porción noreste del área de estudio. La letra A corresponde a un clima tropical o cálido, mientras que (f) indica que las precipitaciones se presentan durante todo el año [89]. Sus características principales son:

- Temperatura media anual superior a 22 °C.
- Temperatura del mes más frío mayor a 18 °C.

En este tipo de clima, las temperaturas se mantienen elevadas a lo largo de todo el año, con una humedad relativamente alta. Estas condiciones favorecen la presencia de selvas tropicales y elevada biodiversidad [96]. En el municipio de Jopala, este clima genera condiciones propicias para cultivos como café, caña de azúcar, naranja, limón y otros productos tropicales que requieren calor y humedad constantes [98].

4.2.2 Relación con la precipitación

La siguiente columna en la tabla de atributos corresponde a “**CCC_DESCPREC**”, que almacena información sobre la precipitación en el área de estudio. Tanto el clima semicálido húmedo (C(fm)) como el cálido húmedo (A(f)) presentan precipitaciones abundantes a lo largo del año, lo que explica la alta humedad ambiental de la región y la presencia de vegetación densa.

El mapa generado con esta capa (Fig. 4.5) coincide con la distribución climática observada previamente, ya que la precipitación está directamente asociada al tipo de clima. Según los resultados de la tabla de atributos, se identifican los siguientes patrones:

C(fm), semicálido húmedo (verde).

Precipitación del mes más seco > 40 mm.

Lluvias entre verano e invierno > 18% del total anual.

Precipitaciones constantes sin una estación seca marcada, lo que favorece bosques mesófilos de montaña y selvas bajas perennifolias [92].

Estas condiciones permiten el cultivo de productos que requieren humedad constante como café, vainilla y frutas tropicales (maracuyá, chayote), aunque también representan un riesgo por la presión agrícola intensiva [93], [94].

A(f), cálido húmedo (azul).

Precipitación del mes más seco > 40 mm.

Lluvias concentradas en primavera y verano, con porcentaje de lluvia invernal < 18% del total anual.

Este régimen es característico de las selvas altas perennifolias, con especies como cedro rojo y caoba, además de plantas como cacao y plátano [92], [95].

La concentración de lluvias favorece cultivos como caña de azúcar y hule, que dependen de un régimen de humedad estacional [93].

Por lo tanto, la comparación entre ambos tipos de clima (C(fm) y A(f)) refleja diferencias en la distribución estacional de las precipitaciones, lo que influye directamente en la biodiversidad, el uso del suelo y las actividades económicas de la región. Mientras que el clima semicálido húmedo presenta lluvias más equitativas durante todo el año, el clima cálido húmedo concentra su régimen de precipitación en primavera y verano, lo que explica tanto la diversidad de cultivos como algunos de los procesos de deforestación asociados a la agricultura (Fig. 4.5).

La siguiente columna en la tabla de atributos corresponde a “**CUPDESCRIPCIO**”, en la cual se registra el tipo de uso de suelo y vegetación presente en la zona donde se trazó cada polígono. La Fig. 4.6 muestra la distribución de los polígonos de muestra (en color blanco) superpuestos sobre la capa de uso de suelo y vegetación del municipio de Jopala, Puebla.

En este mapa se identifican diferentes categorías asociadas a actividades humanas y coberturas vegetales, representadas mediante colores en la leyenda.

- Áreas de actividad humana
- Agricultura de temporal anual (rojo claro): zonas destinadas a cultivos que dependen exclusivamente de la lluvia estacional.
- Agricultura de temporal anual y permanente (fucsia): áreas donde se combinan cultivos de ciclo corto con cultivos perennes.
- Agricultura de temporal permanente (verde claro): terrenos con cultivos de larga duración que requieren humedad constante.
- Asentamientos humanos (gris): pequeñas localidades urbanizadas o comunidades rurales.
- Pastizal cultivado (naranja claro): tierras destinadas a la producción de forraje.
- Pastizal inducido (naranja oscuro): pastizales creados por intervención humana a partir de la transformación de bosques o selvas.
- Vegetación secundaria (ecosistemas alterados por actividad humana)

- Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña (verde oscuro): áreas en proceso de regeneración forestal donde previamente existía bosque mesófilo.
- Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña (azul claro): sucesión vegetal en zonas degradadas de bosque mesófilo, dominadas por arbustos.
- Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia (azul oscuro): regeneración de selva tropical en terrenos previamente alterados.

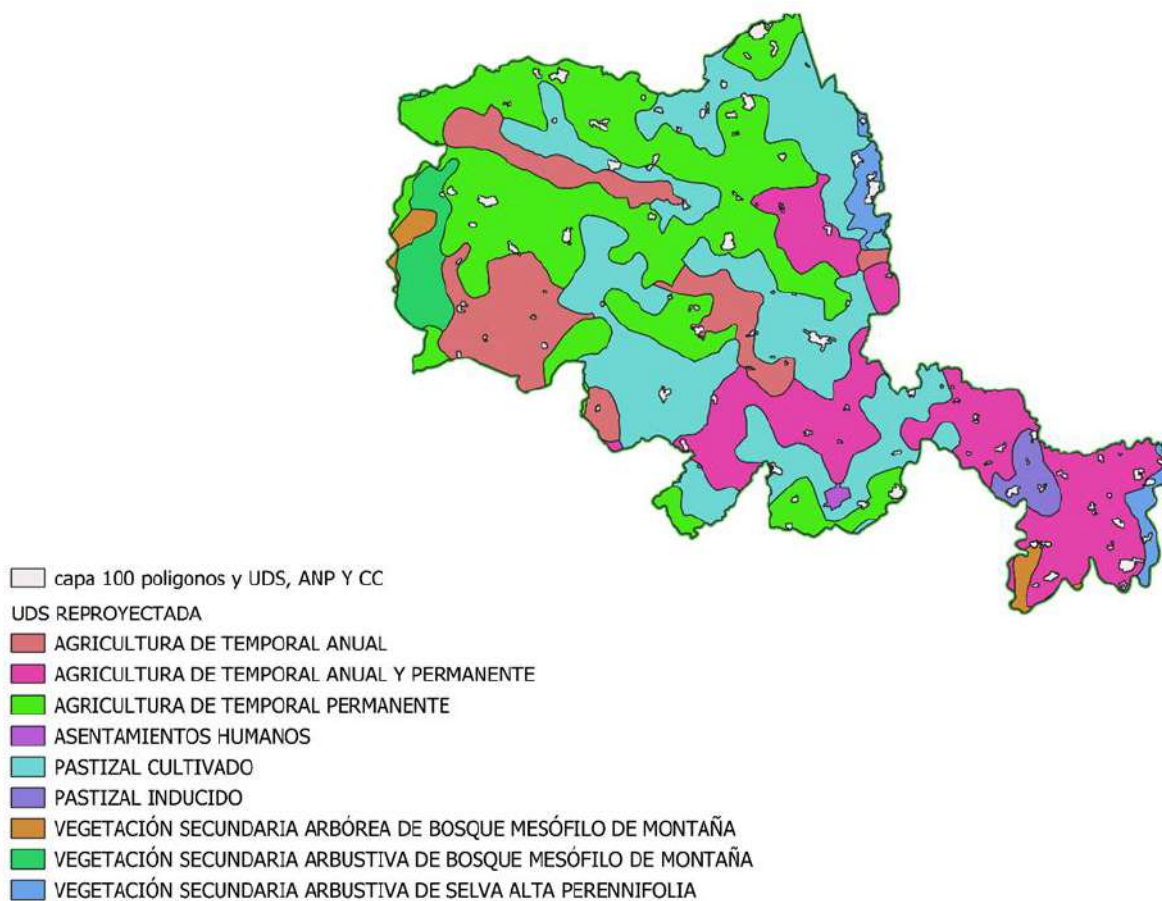


Fig. 4.6 Uso de suelo y vegetación en el municipio de Jopala, Puebla, con superposición de los polígonos de muestra. Elaboración propia.

En la Fig. 4.6 se observa que la agricultura de temporal permanente y anual está ampliamente distribuida, lo que indica una fuerte presión sobre el territorio para la producción agrícola. Asimismo, la vegetación secundaria es predominante, lo que sugiere que gran parte del bosque original ha sido transformado por actividades humanas. También se identifican fragmentos de vegetación secundaria arbórea y arbustiva, lo que refleja procesos de regeneración ecológica en ciertas áreas.

La presencia de pastizales inducidos y cultivados muestra la existencia de actividades ganaderas. Por otro lado, el mapa permite identificar zonas donde la vegetación original fue sustituida por agricultura o pastizales, así como áreas que actualmente se encuentran en proceso de recuperación.

El predominio de vegetación secundaria constituye el principal indicador de que la flora y la fauna han sufrido alteraciones que afectan a las especies nativas. Sin embargo, también señala áreas potenciales para ser consideradas prioritarias en estrategias de conservación.

La alta presencia de actividades agrícolas y pastizales subraya la necesidad de implementar prácticas sostenibles que eviten una mayor degradación del suelo, especialmente porque la agricultura es una de las principales actividades económicas de la región. Este mapa se convierte en una herramienta valiosa para visualizar cómo la actividad humana transforma la cobertura vegetal y, a su vez, permite tomar decisiones estratégicas orientadas a un desarrollo sustentable y a un manejo ambiental más eficiente y responsable.

Al analizar con detalle la distribución de los polígonos en la Fig. 4.6, se observa que se concentran principalmente en zonas con los siguientes colores:

- Verde claro: Agricultura de temporal permanente.
- Fucsia: Agricultura de temporal anual y permanente.
- Azul claro: Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña.

Esto confirma que la mayor parte de las áreas de estudio se localizan en terrenos agrícolas o en zonas donde la vegetación natural se encuentra en proceso de recuperación (Fig. 4.7).

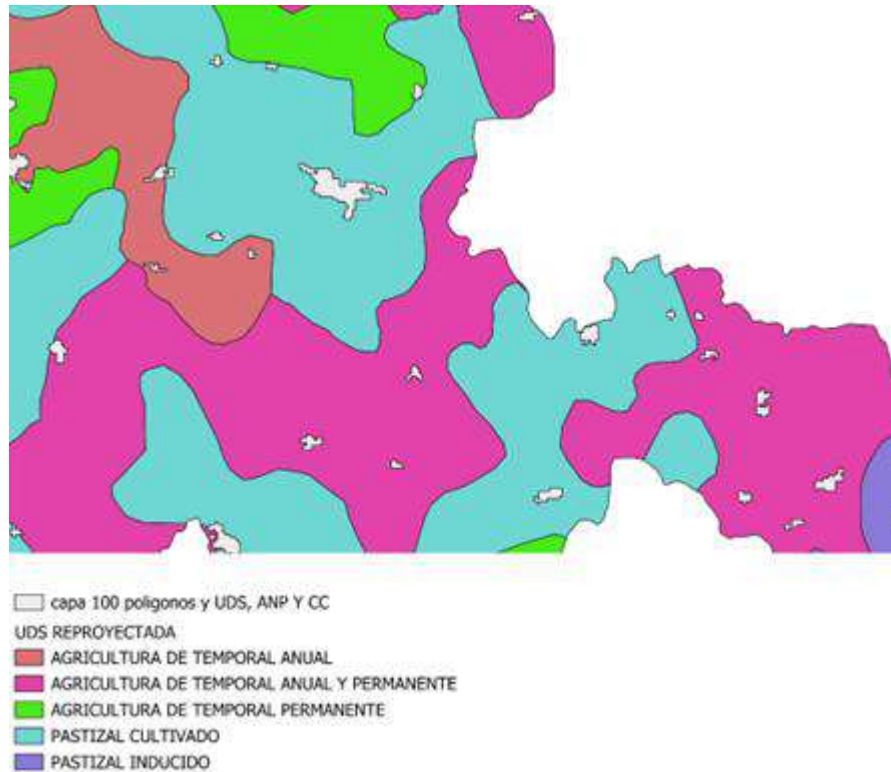


Fig. 4.7. Uso de suelo y vegetación en el municipio de Jopala, Puebla, con superposición de los polígonos de muestra. Se observa predominio de agricultura de temporal permanente y anual, así como presencia significativa de vegetación secundaria y pastizales. Elaboración propia.

4.3 Analizar los factores asociados a la deforestación en las zonas identificadas, considerando variables como la proximidad a centros urbanos, carreteras, áreas protegidas y la cobertura vegetal original.

En esta etapa de la investigación se analizaron manualmente los 100 polígonos mediante las imágenes satelitales disponibles en Google Earth Pro. Para ello, se exportó desde QGIS la capa que contenía los polígonos en formato Keyhole Markup Language (KML) (Fig. 4.8.). Posteriormente, los polígonos fueron revisados en bloques de diez hasta completar el total de 100.

Google Earth Pro reconoce de manera automática las coordenadas exactas de cada polígono, lo que facilita su ubicación y análisis espacial.

En la figura se observa el municipio de Jopala, Puebla, marcado con un contorno verde. Dentro de esta área se distribuyen 100 polígonos de muestra, resaltados en color amarillo, que fueron seleccionados para estudiar los cambios en la vegetación. Cada polígono representa un área específica donde se analizaron imágenes satelitales a lo largo del tiempo. Esta figura corresponde a la primera etapa del

análisis (el “antes”), que servirá como punto de referencia para comparar la evolución de la cobertura forestal en los años siguientes.

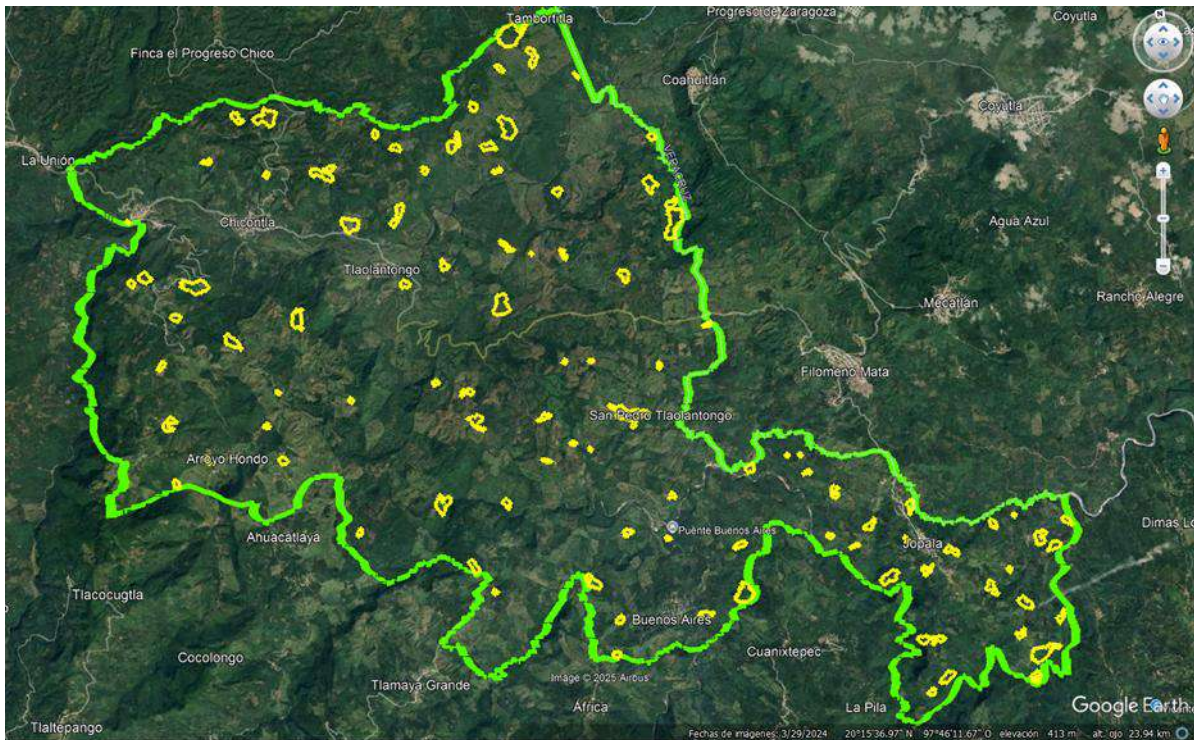


Fig. 4.8. Polígonos de muestra (en color amarillo) dentro del municipio de Jopala, Puebla (delimitado en verde), visualizados en Google Earth Pro. Esta figura corresponde al primer momento de análisis en la secuencia “antes-durante-ahora”. Vista satelital obtenida de GEP [71].

En esta segunda figura (Fig.4.9) se observa el mismo conjunto de 100 polígonos de muestra distribuidos en el municipio de Jopala, pero ahora en un periodo intermedio del análisis. Esta etapa permite identificar los cambios progresivos en la vegetación, mostrando qué zonas mantienen cobertura forestal y cuáles presentan modificaciones visibles. Comparada con la primera figura, esta corresponde al “durante”, es decir, un momento en el tiempo en el que ya comienzan a evidenciarse procesos de deforestación o transformación del suelo.

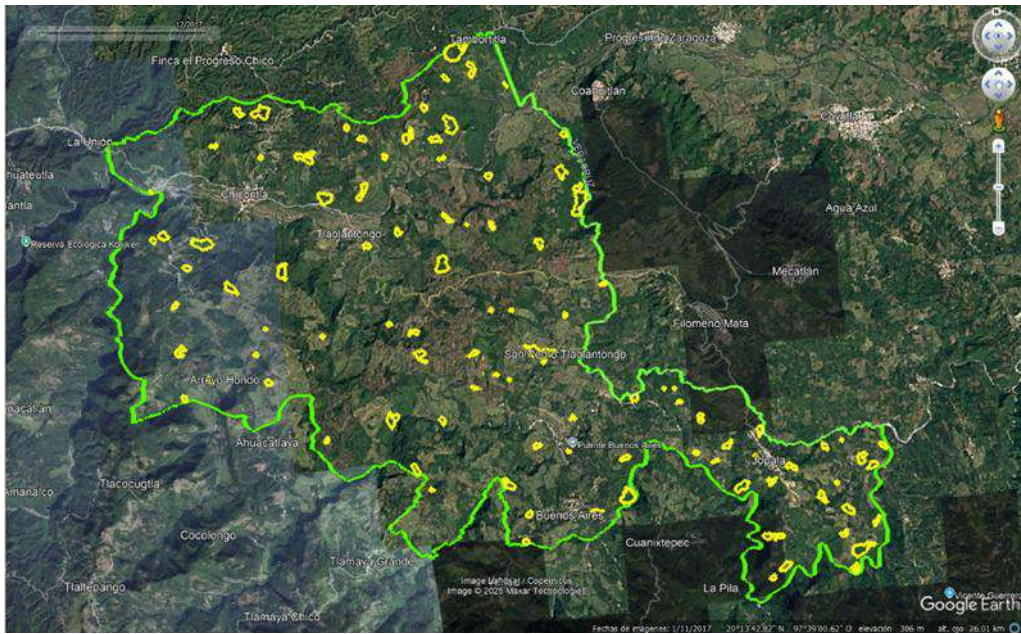


Fig. 4.9 Polígonos de muestra (en amarillo) dentro del municipio de Jopala, Puebla (delimitado en verde), visualizados en Google Earth Pro para un periodo intermedio del análisis (“durante”). Vista satelital obtenida de GEP [71].

La tercera figura (Fig. 4.10) muestra el estado más reciente (2024) de la cobertura del territorio en Jopala. Al comparar esta vista con las anteriores, se pueden identificar zonas donde la cobertura vegetal ha disminuido visiblemente o ha sido transformada. Esta última etapa del análisis permite hacer una evaluación más precisa sobre la pérdida de vegetación, relacionándola con actividades humanas como la agricultura o el crecimiento de asentamientos. El uso de esta herramienta facilita el seguimiento del cambio ambiental a través del tiempo.

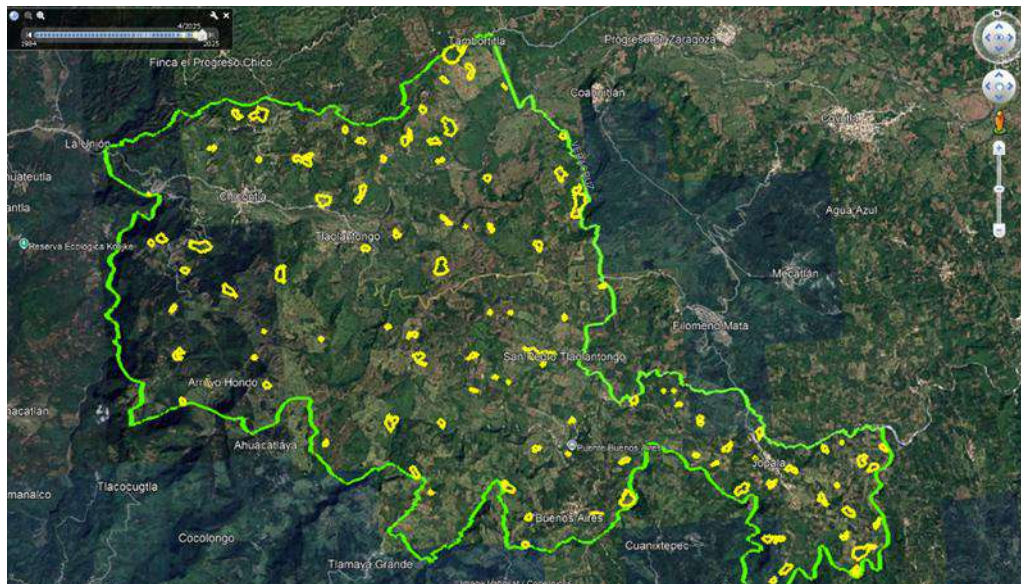


Fig. 4.10. Visualización actual de los 100 polígonos de muestra (en amarillo) dentro del municipio de Jopala (contorno verde), observados en Google Earth Pro en 2024. Vista satelital obtenida de GEP [71].

Se tomaron en cuenta características como: presencia o ausencia de cobertura vegetal densa, aparición de surcos o líneas rectas (indicativas de agricultura), coloración del suelo (óxidos, erosión o abandono), así como la aparición de nuevas construcciones, caminos o bordes agrícolas. Este tipo de elementos fueron clave para identificar las posibles causas de deforestación en cada polígono.

Para organizar la información de manera clara y sistemática, se elaboró una tabla (ver Anexo A) con seis columnas: Polígono, Posible causa de deforestación, Descripción general y ANP, entre otras. En especial, la columna de descripción general presenta un análisis detallado de las observaciones relevantes extraídas de las imágenes satelitales consultadas en Google Earth Pro, considerando los cambios visibles en la cobertura vegetal y su posible relación con factores antrópicos o naturales.

Para una revisión completa de los datos observados, consultar el Anexo A.

4.3.1 Evaluación del NDVI: salud de la vegetación y señales de transformación

Tras observar de manera visual los cambios en cada polígono mediante imágenes satelitales multitemporales en Google Earth Pro, fue necesario complementar el análisis con un enfoque cuantitativo que permitiera validar y comparar la salud de la vegetación a lo largo del tiempo. Para ello, se empleó el NDVI, un índice espectral ampliamente utilizado en estudios de cobertura vegetal.

Se generaron series temporales para observar la evolución del NDVI entre 1985 y 2023. Estos años fueron elegidos para tener un rango amplio de análisis y así evaluar qué tan drástico ha sido el cambio en el uso de suelo.

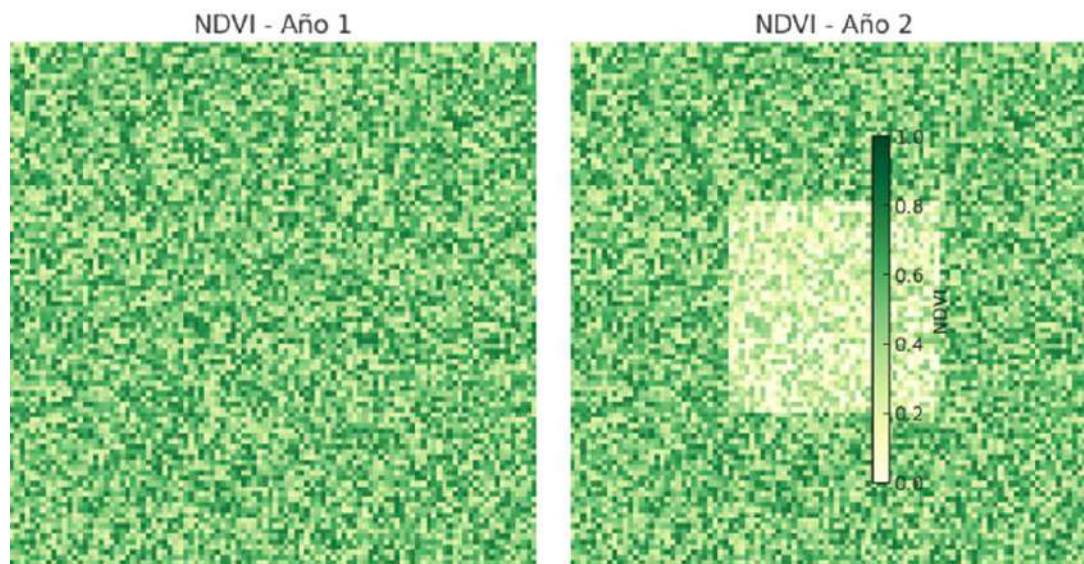


Fig. 4.11. Comparación del índice NDVI en dos periodos. El panel izquierdo representa una vegetación densa y saludable, mientras que el derecho muestra una disminución en los valores de NDVI en el área central, lo cual sugiere pérdida de cobertura vegetal. Imagen obtenida de GEE [73].

En la figura 4.11 compara dos momentos en el tiempo usando el NDVI, un índice que indica cuánta vegetación hay en una zona. Cuanto más verde aparece, mejor estado tiene la vegetación. En la figura de la derecha (NDVI – Año 2), la parte central muestra tonos más claros, lo que indica que esa área ha perdido vegetación. Esto puede deberse a actividades humanas como agricultura, tala o incendios.

Un descenso gradual pero sostenido en los valores del NDVI se interpretó como señal de presión humana constante, relacionada comúnmente con actividades como la agricultura o la ganadería. Por otro lado, cuando el descenso fue notorio, pero con una recuperación parcial en años posteriores, se asoció con incendios o procesos de tala selectiva. Finalmente, cuando el NDVI caía y se estabilizaba en valores bajos durante varios años, se concluyó que había ocurrido una conversión total del uso de suelo, como el paso de bosque a cultivo o pastizal.

Para validar estos resultados obtenidos mediante imágenes satelitales y el NDVI, se recurrió al Conjunto Nacional de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI [81] y a las capas del Global Forest Watch [79]. Estas fuentes permitieron conocer con mayor certeza la cobertura original del territorio en décadas pasadas.

Al comparar la clasificación anterior con la situación actual observada en Google Earth Pro, fue posible identificar cambios significativos. Por ejemplo, cuando un área previamente clasificada como “bosque templado” pasó a ser “agricultura de temporal”, se consideró con alta probabilidad como un caso de deforestación por expansión agrícola. De igual manera, los cambios hacia “pastizal inducido” o “área sin vegetación” fueron interpretados como huellas de ganadería o sobrepastoreo. Este cruce de información entre fuentes oficiales y observaciones visuales fortaleció la validez del análisis causal de los procesos de deforestación.

El primer código desarrollado en este proyecto tuvo como objetivo calcular y comparar el NDVI en distintos años para una colección de 100 polígonos ubicados en el municipio de Jopala, Puebla. Se utilizó la colección Sentinel-2 SR debido a su alta resolución espacial (10 m) y su cobertura multiespectral adecuada para generar el NDVI, aplicando la fórmula basada en la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo cercano (B8) y el rojo (B4).

La colección fue filtrada por fecha, porcentaje de nubes (<20 %) y por la geometría de cada polígono, lo que permitió extraer una figura mediana representativa del periodo analizado (por ejemplo, temporadas de lluvias). Esta metodología permitió generar una base de datos homogénea para comparar la cobertura vegetal entre distintos años y detectar procesos de deforestación.

El segundo código fue diseñado con fines ilustrativos para generar una visualización tipo “antes y después” del NDVI, centrada en un único polígono extraído de la misma

colección. Se seleccionó un polígono específico mediante una función que permite observar visualmente la evolución de la vegetación en un área puntual.

Se usaron dos periodos de tiempo distintos (por ejemplo, 2018 y 2023) representativos del cambio en la cobertura vegetal. Nuevamente se aplicó el filtrado por nubes y la composición por mediana para evitar valores atípicos, especialmente útiles en zonas húmedas y con topografía accidentada. Los mapas NDVI generados fueron estilizados con una paleta de colores específica (de rojo a verde), facilitando la interpretación visual directa del estado de la vegetación.

Esta visualización sirvió como apoyo gráfico para comunicar los resultados del análisis técnico de manera más accesible, permitiendo identificar visualmente las zonas afectadas por pérdida de cobertura vegetal.

Tabla 4.1. Rango de valores del NDVI y su interpretación general según el color en mapas satelitales. Elaboración propia.

Color	Valor de NDVI	Interpretación general
#d73027 (rojo)	0.0	Suelo desnudo / sin vegetación
#fdae61 (naranja)	0.2–0.3	Vegetación escasa o estresada
#d9ef8b (amarillo verdoso)	0.4–0.5	Vegetación en desarrollo
#66bd63 (verde claro)	0.6–0.7	Vegetación sana
#1a9850 (verde oscuro)	0.8–1.0	Vegetación muy densa y saludable

4.3.2. Identificación de patrones recurrentes

Además del análisis individual de cada polígono, fue posible detectar ciertas características que se repiten en varias zonas del municipio. Estos patrones ayudan a comprender mejor qué factores están favoreciendo la pérdida de vegetación en Jopala. A partir de la revisión de imágenes satelitales, mapas temáticos y datos geoespaciales, se identificaron tendencias comunes en el tipo de cambio de uso de suelo, condiciones del terreno y ubicación de las áreas afectadas. Esta sección presenta de forma resumida los hallazgos más frecuentes observados durante el estudio, con el objetivo de facilitar su interpretación incluso para quienes no están familiarizados con herramientas especializadas de análisis territorial.

4.3.2.1 Expansión agrícola en topografía favorable

El análisis también integró factores físicos del terreno, utilizando modelos digitales de elevación junto con curvas de nivel visualizadas en QGIS y Google Earth Pro. Durante el análisis espacial se identificó un patrón recurrente de deforestación en zonas planas o con pendiente suave. Estas áreas resultan atractivas para actividades humanas debido a que facilitan el uso de maquinaria, la construcción de caminos de acceso y la siembra continua sin necesidad de modificar

significativamente el terreno. Además, suelen presentar menor riesgo de erosión severa al inicio, lo cual permite un aprovechamiento más inmediato del suelo. Este tipo de relieve favorece la expansión agrícola y ganadera, ya que representa menores costos y esfuerzo en comparación con zonas de ladera o alta pendiente.

En la figura 4.10 se muestra un mapa generado en QGIS en el que se observa un polígono amarillo (polígono 77) sobre un fondo de tonos verdes. Este fondo representa una capa de relieve con líneas de contorno (curvas de nivel), utilizadas para visualizar la elevación del terreno.

En este caso, el color verde uniforme y la separación amplia entre las líneas indican que el polígono se encuentra en una zona alta pero plana, sin pendientes pronunciadas. Las curvas de nivel casi rectas y poco densas muestran que hay muy poca variación en la elevación, lo cual sugiere una topografía favorable para actividades humanas como agricultura o ganadería. Esta condición facilita el acceso, el uso de maquinaria y la planificación de cultivos, lo que podría explicar por qué estas zonas han sido deforestadas.

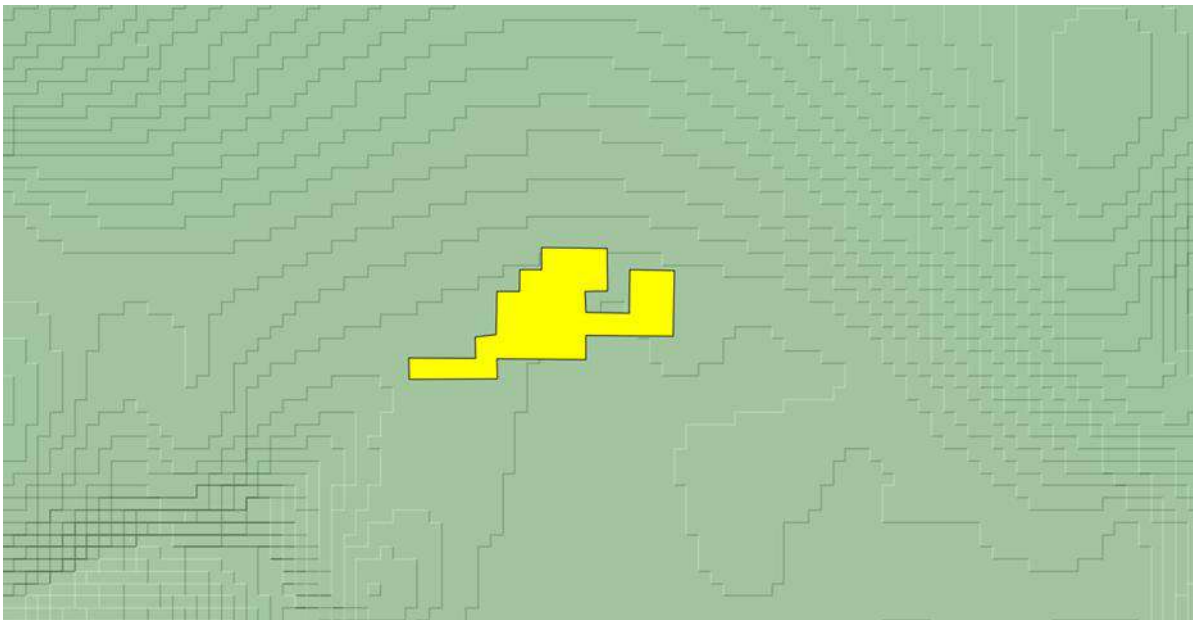


Fig. 4.10 Polígono 77 observado desde QGIS. El fondo verde uniforme de la capa de relieve indica que se encuentra en una zona alta, pero con pendiente muy suave, lo que la hace adecuada para actividades agrícolas. Elaboración propia.

4.3.2.2 Cambio repentino en la vegetación

Durante la identificación de las posibles causas de deforestación, se tomaron en cuenta todas las capas de información disponibles en el mapa construido en QGIS. Uno de los principales indicadores fue el cambio rápido y visible en la cobertura vegetal. Este patrón se definió como un cambio abrupto en menos de dos años, en el que un área inicialmente cubierta por vegetación densa (Fig. 4.11) pasó a convertirse en una zona con escasa o nula cobertura vegetal (Fig. 4.12).

La figura (Fig. 4.11) muestra un polígono delimitado en color amarillo dentro del municipio de Jopala, Puebla. Este polígono presenta una cobertura vegetal densa y continua, representada por la tonalidad verde oscura que ocupa toda el área. Esto indica que en 2017 la zona estaba completamente cubierta por vegetación arbórea sin señales visibles de intervención humana. Esta figura forma parte del análisis multitemporal que permite comparar el estado del terreno en diferentes años para detectar posibles procesos de deforestación o cambio de uso de suelo



Fig. 4.11. Polígono con cobertura vegetal densa en 2017. Vista satelital obtenida de GEP [71].

En esta figura (Fig. 4.12) se observa el mismo polígono mostrado en la figura anterior, pero dos años después. Aunque aún persiste cierta cobertura vegetal, es notorio un cambio en la parte inferior del polígono, donde el color se torna más claro, lo que indica una pérdida parcial de vegetación. Esta transformación puede estar relacionada con actividades humanas como el desmonte o el uso del suelo para cultivos temporales. Comparar esta vista satelital con la de 2017 permite identificar un proceso de deforestación progresiva dentro del área delimitada.



Fig. 4.12. Evidencia de pérdida parcial de vegetación entre 2017 y 2019. Vista satelital obtenida de GEP [71].

Este tipo de transformación fue clasificado como deforestación rápida, y suele estar asociado con actividades como tala intensiva, incendios o apertura súbita de terreno para agricultura o ganadería. En la Tabla 4.2 se presentan ejemplos de polígonos en los que se identificó este patrón. La tabla completa puede consultarse en el Anexo A.

Tabla 4.2. Ejemplos de polígonos con evidencia de cambio repentino en la cobertura vegetal y posible causa de deforestación. Elaboración propia.

ID	POSIBLE CAUSA	DESCRIPCION	ANP
10	Expansión agrícola con barbecho mínimo y uso intensivo.	En 2011 el polígono tenía una cobertura forestal media con parches claros en el centro. Para 2016 ya existían surcos organizados de siembra y caminos internos. En 2022 los bordes del polígono presentaban coloración gris clara por desgaste del suelo, sin señal de recuperación vegetal en áreas centrales. Las laderas están muy intervenidas.	NO
21	Expansión de área agrícola en ladera con curvas de nivel visibles.	En 2011 el terreno estaba densamente cubierto. Para 2016 se observan surcos en contorno, típicos de agricultura conservacionista. En 2023 se nota una pérdida parcial de vegetación en los márgenes y caminos de acceso poco definidos.	NO
32	Sustitución de cobertura forestal por parcelas agrícolas pequeñas.	En 2011 hay parches de vegetación que desaparecen en 2016. Para 2023, se observan zonas cultivadas y otras abandonadas, lo que indica agotamiento del suelo o abandono por pérdida de productividad. No hay recuperación natural visible.	NO

4.3.2.3 Surcos como evidencia de deforestación agrícola

Otro indicador clave para identificar la deforestación relacionada con la agricultura es la aparición de surcos paralelos o rectangulares bien definidos (Ilustración 4.13). Estos patrones geométricos, visibles en muchas de las imágenes satelitales de los polígonos analizados, evidencian una clara intervención humana en los ecosistemas forestales.

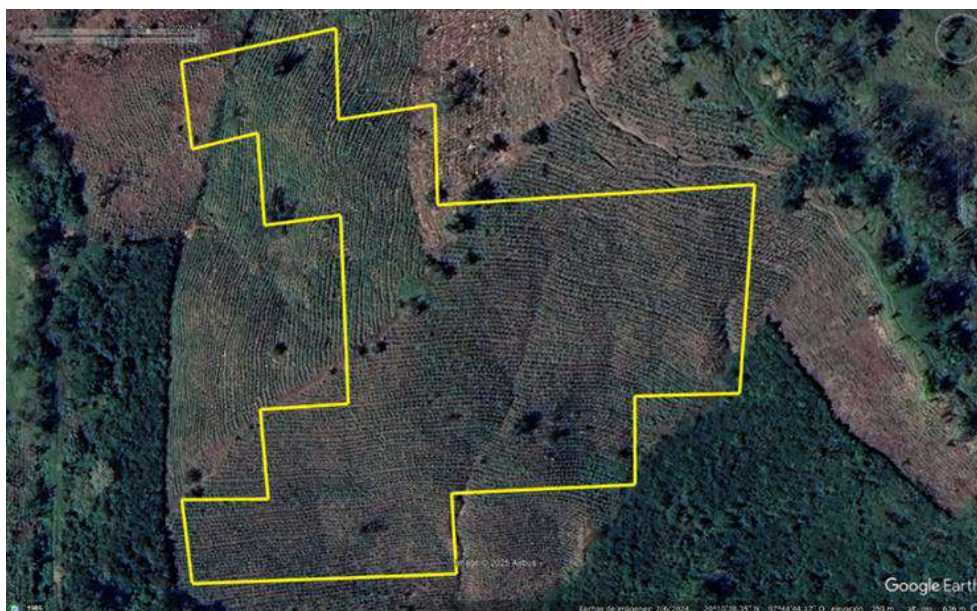


Fig. 4.13. Polígono con presencia de surcos paralelos. Vista satelital obtenida de GEP [71].

La presencia de surcos permite confirmar un uso agrícola activo del suelo. Cuando estas líneas se expanden uniformemente sobre el terreno, reflejan no solo la intensidad del uso, sino también el posible nivel tecnológico o económico de los productores. Además, su distribución facilita detectar hacia qué zonas se está expandiendo la frontera agrícola, lo que constituye un patrón progresivo de deforestación.

En la siguiente tabla (Tabla 4.3) se presentan algunos ejemplos representativos de los polígonos con surcos visibles. La tabla completa se encuentra disponible en el Anexo A.

Tabla 4.3. Ejemplos de polígonos con presencia de surcos agrícolas visibles como indicio de deforestación. Elaboración propia.

ID	POSIBLE CAUSA	DESCRIPCION	ANP
12	Expansión de parcelas agrícolas con pérdida total de cobertura arbórea.	Este polígono presenta deforestación total desde 2011. Las imágenes muestran surcos paralelos claramente definidos, y la vegetación en bordes ha sido eliminada progresivamente. Para 2023, el suelo muestra zonas desnudas con posibles procesos erosivos visibles como manchas claras en pendiente.	NO
22	Agricultura intensiva y apertura de caminos de acceso.	Desde 2010 se abren caminos y aparecen los primeros surcos. En 2014 ya se ha fragmentado completamente la vegetación. Entre 2016 y 2021 se consolida un patrón agrícola intensivo. En imágenes recientes hay zonas en las que el color indica suelos compactados o con pérdida de cobertura superficial.	NO

4.3.2.4 Posibles incendios

Los posibles incendios fueron identificados mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales, observando principalmente cambios repentinos en la cobertura vegetal y en la coloración del suelo. Estos eventos se caracterizan por la aparición de zonas con tonos rojizos, claros o grisáceos, lo que puede indicar áreas afectadas por fuego. A diferencia de otros patrones más geométricos —como los surcos agrícolas—, las huellas de incendio tienden a tener formas irregulares, adaptándose a la topografía del terreno.

Este tipo de patrón es común en regiones donde se realizan quemas para limpiar terrenos antes de su aprovechamiento agrícola o ganadero. Las manchas generadas por incendios suelen aparecer entre un año y otro sin transición intermedia, lo cual permite su detección en la línea de tiempo satelital. En algunos casos, la presencia posterior de vegetación secundaria sugiere que la quema pudo haber sido temporal y no permanente, lo que implica la posibilidad de regeneración natural del ecosistema.

En la siguiente figura (Fig.4.14) se observa un área afectada por un posible incendio forestal. El color rojizo del terreno dentro del polígono sugiere una pérdida significativa de vegetación, lo cual puede deberse al uso de fuego para actividades agrícolas o ganaderas. Este tipo de huella visual es común cuando la cobertura vegetal densa desaparece de manera repentina. El contorno amarillo delimita el polígono muestreado y permite identificar con precisión el área afectada.



Fig. 4.14. Vista satelital recuperada de Google Earth Pro del polígono 19 en junio de 2020. Vista satelital obtenida de GEP [71].

Esta figura (Fig. 4.15) corresponde al mismo polígono observado en la ilustración anterior, pero tomada en una fecha posterior. Se puede ver un cambio notable en el color y textura del terreno dentro del polígono, con parches más claros y vegetación más dispersa. Estos indicios pueden interpretarse como señales de regeneración natural o reocupación del área después de un posible incendio, lo cual es común en ecosistemas que han sido alterados pero que conservan cierta capacidad de recuperación.

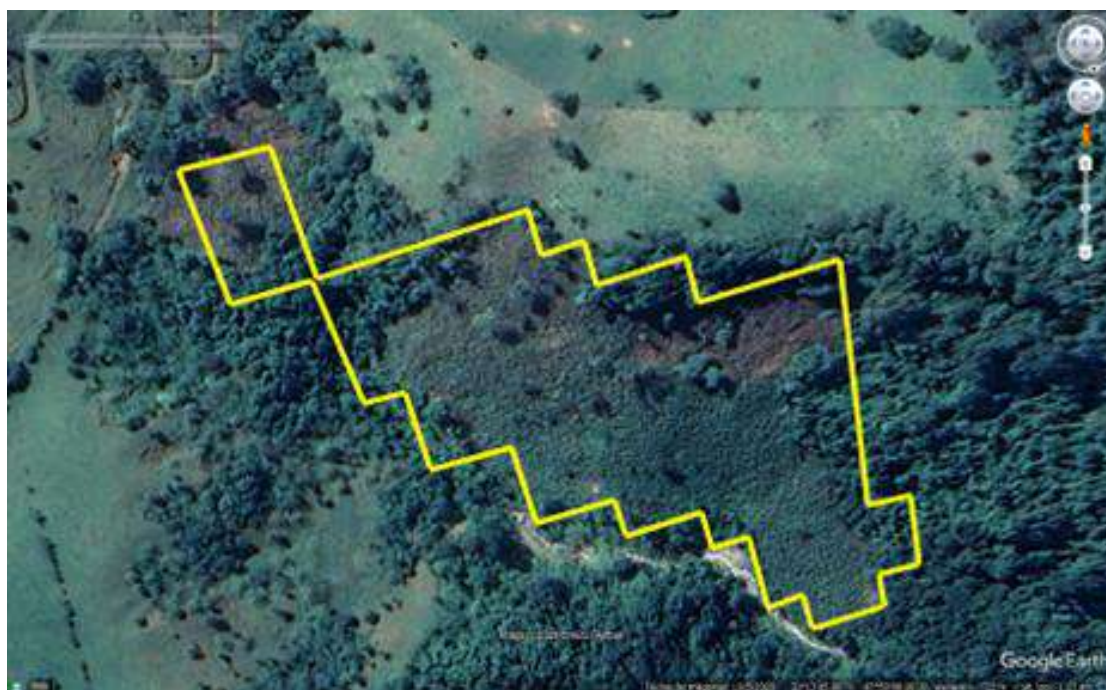


Fig. 4.15. Vista satelital recuperada de Google Earth Pro del polígono 19 en enero de 2023. Vista satelital obtenida de GEP [71].

En el contexto de Jopala, estas prácticas se asocian con sistemas agrícolas tradicionales donde el uso del fuego sigue siendo común para preparar suelos. La identificación de estos eventos permite no solo reconocer zonas afectadas, sino también establecer áreas prioritarias para acciones de restauración o vigilancia ambiental.

La siguiente tabla (Tabla 4.4) muestra ejemplos de los polígonos donde se detectaron patrones compatibles con incendios. La tabla completa puede consultarse en el Anexo A.

Tabla 4.4. Ejemplos de polígonos con evidencia de posible incendio y características observadas. Elaboración propia.

ID	POSIBLE CAUSA	DESCRIPCION	ANP
36	Cambio estacional por cultivos de temporal (milpa) con barbecho.	En 2010, vegetación relativamente continua. En 2014 y 2020 hay alternancia clara entre franjas verdes y marrones, típico de agricultura rotativa. Se observa regeneración secundaria.	NO
39	Tala ligera y abandono posterior con regeneración mixta.	En 2010 se observan algunas manchas abiertas. En 2015 se amplían, pero en 2021 aparecen zonas verdes irregulares, lo que sugiere crecimiento natural de vegetación secundaria.	NO
44	Agricultura tradicional rotativa y abandono temporal.	El polígono presenta uso estacional en 2011, rotación en 2016, y en 2021 hay regeneración vegetal en partes, lo que sugiere descanso del terreno en ciclos.	NO

4.3.2.5 Parcelamiento ordenado como indicador de deforestación

Este tipo de parcelamiento se identifica visualmente como una división del terreno en bloques regulares, usualmente delimitados por líneas rectas. Estas divisiones suelen asociarse con la implementación de actividades agrícolas o ganaderas, y su presencia indica una planificación del uso del suelo que implica la remoción de la vegetación original. En la siguiente figura observamos una vista satelital (Fig. 4.16), es posible observar cómo el polígono de estudio y sus alrededores muestran un



Fig. 4.16. Vista satelital recuperada de Google Earth Pro que muestra cómo el polígono 59 y sus alrededores están divididos en parcelas geoméricamente definidas, lo cual es un indicio claro de fragmentación del territorio y posible deforestación planificada. Vista satelital obtenida de GEP [71].

patrón de división geométrica, lo que refuerza la hipótesis de deforestación por parcelamiento ordenado.

Este tipo de configuración es indicativo de procesos de lotificación o planificación territorial, comúnmente asociados con actividades agrícolas, ganaderas o, en algunos casos, con el inicio de asentamientos humanos. Aunque el municipio de Jopala aún no presenta una urbanización extensa, algunas zonas muestran este patrón en relación con el establecimiento de pastizales o con posibles proyectos de expansión habitacional.

El parcelamiento ordenado suele implicar la remoción completa de la vegetación original y la transformación total del paisaje natural, por lo que representa una señal evidente de deforestación planificada.

En la siguiente tabla se presentan algunos ejemplos de polígonos muestreados en los que se observó este fenómeno, permitiendo analizar cómo la estructura del paisaje refleja la transformación del ecosistema original.

Tabla 4.5. Ejemplos de polígonos con evidencias de parcelamiento ordenado y transformación sistemática del uso del suelo. Elaboración propia.

ID	POSIBLE CAUSA	DESCRIPCION	ANP
54	Apertura de parcela con patrón lineal de cultivo.	Se observa fragmentación inicial en 2011. En 2014 se marcan franjas de cultivo paralelas y en 2020 el uso continúa, con pérdida de vegetación en los bordes.	NO
61	Cultivo de temporal en pendiente media.	Desde 2011 se observan surcos paralelos en la ladera. Para 2016 la cobertura vegetal es discontinua, y en 2022 persiste el uso agrícola con signos de erosión en las zonas más altas.	NO
74	Expansión agrícola sobre ladera media con drenaje natural.	En 2011 la vegetación era cerrada. Para 2016 aparecen claros con forma de cultivo en línea, y en 2023 se mantiene la actividad agrícola, con presencia de zonas de escurrimiento visibles por la coloración blanquecina en las partes bajas.	NO

4.3.2.6 Proximidad a caminos

La cercanía a caminos —ya sean carreteras rurales, senderos comunitarios o brechas improvisadas— fue un factor clave para identificar patrones de deforestación. Se observó que los polígonos ubicados próximos a estas vías de acceso presentaban con mayor frecuencia señales de transformación del uso de suelo, incluso cuando no había una deforestación total.

En el caso de Jopala, Puebla, esta relación es especialmente relevante debido al contexto rural del municipio. La infraestructura vial, aunque limitada, facilita la

entrada de maquinaria, herramientas agrícolas y transporte de productos, incrementando así la accesibilidad a zonas que anteriormente estaban cubiertas por vegetación densa. Esto promueve el cambio de uso de suelo hacia actividades como la agricultura y la ganadería, fundamentales en la economía local.

Además, en muchas comunidades de la región, estas rutas son también caminos tradicionales de tránsito comunal, por lo que su presencia suele coincidir con áreas de intervención más antigua o continua. Se identificó que una proporción importante de los polígonos con pérdida de cobertura vegetal parcial o total se encuentran a menos de 500 metros de alguna vía de acceso (Fig. 4.17), lo que sugiere una correlación directa entre la accesibilidad y la presión sobre los ecosistemas forestales en el municipio.

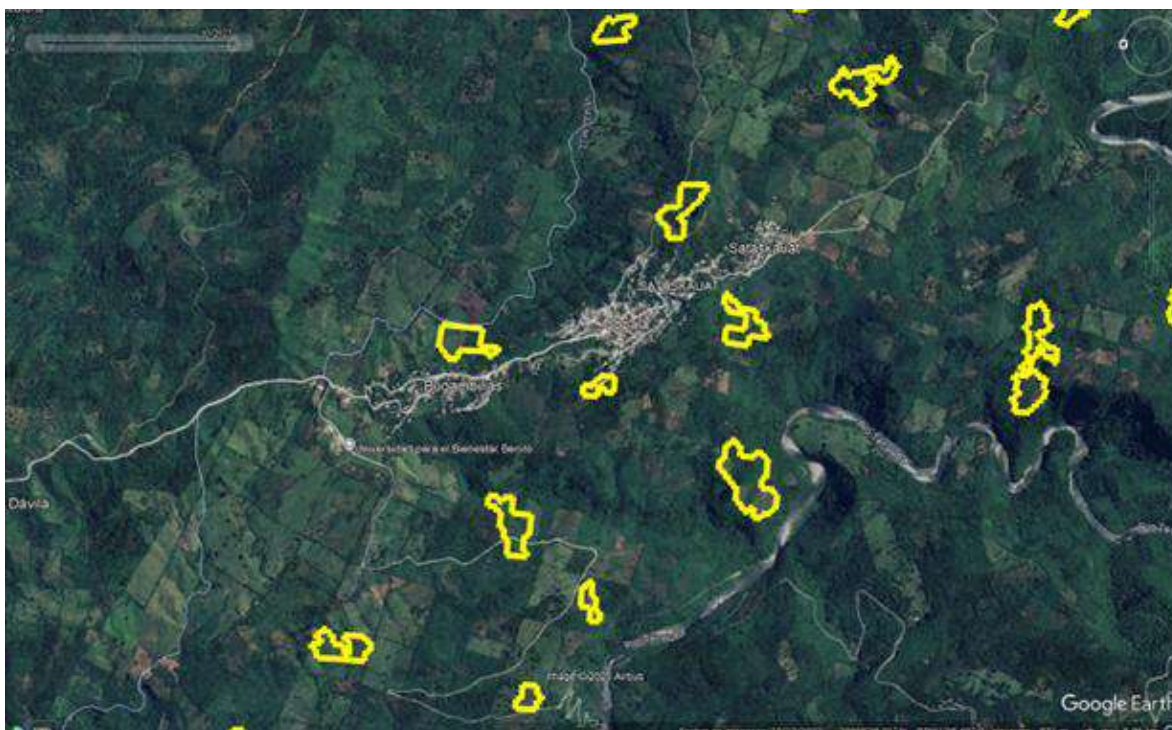


Fig. 4.17. Polígonos trazados en Google Earth Pro que muestran su cercanía con caminos principales y secundarios en la localidad de Jopala, Puebla. Vista satelital obtenida de GEP [71].

4.3.2.7 Proximidad a cuerpos de agua

Asimismo, la cercanía a cuerpos de agua como ríos (Ilustración 4.18) resulta igualmente significativa al momento de analizar los patrones de deforestación. La presencia de mantos acuíferos en las inmediaciones sugiere la existencia de un microclima más húmedo y estable, lo cual favorece tanto el desarrollo de vegetación secundaria como la expansión de actividades agrícolas y ganaderas. Esta humedad constante reduce la necesidad de sistemas de riego intensivo, lo que representa

una ventaja para productores locales que dependen del clima para sostener sus cultivos.

Además, en regiones con topografía inclinada, como ocurre en muchas zonas de Jopala, el escurrimiento natural del agua de lluvia hacia los cauces fluviales permite un riego indirecto pero eficiente, evitando al mismo tiempo el riesgo de encharcamientos o inundaciones prolongadas que podrían dañar la productividad del suelo. Este flujo constante de agua contribuye a mantener la fertilidad del terreno y lo vuelve especialmente atractivo para actividades de subsistencia o producción comercial. Por estas razones, muchas de las áreas muestreadas que mostraron cambios en la cobertura vegetal o indicios de deforestación parcial se ubican en proximidad a cuerpos de agua, lo que confirma la influencia de estos factores físicos en la toma de decisiones sobre el uso del suelo en la región.

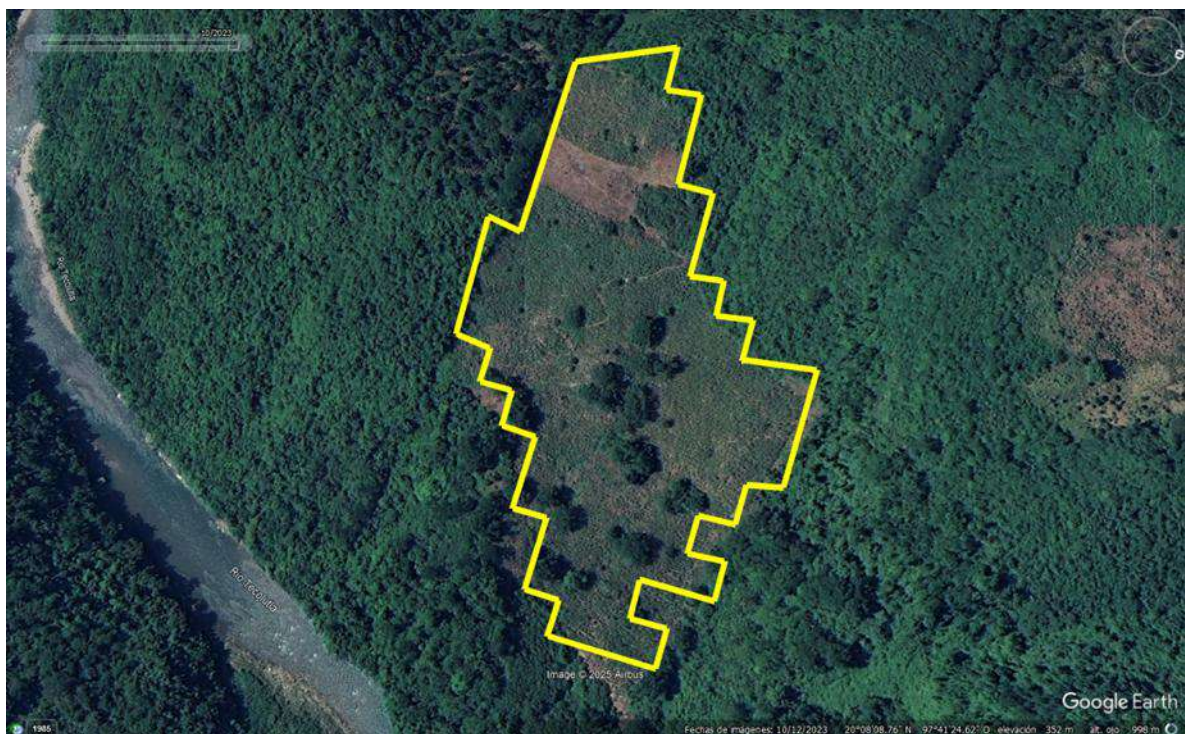


Fig. 4.18. Imagen satelital recuperada de Google Earth Pro que muestra el polígono 1, ubicado en las inmediaciones del río Tecolutla. Vista satelital obtenida de GEP [71].

4.3.2.8 Posibles programas de manejo forestal

Por la combinación de indicadores visuales, se plantea la hipótesis de que en Jopala existen predios con Programas de Manejo Forestal (PMF). Estos programas son instrumentos técnicos y normativos autorizados por la SEMARNAT, cuyo objetivo es regular el aprovechamiento sustentable de los recursos forestales. Para esta categoría se consideraron aquellos polígonos que presentaban características como: parcelamiento ordenado, caminos de saca o acceso forestal, cobertura forestal parcialmente conservada, presencia de árboles padre o áreas en regeneración, ausencia de cambio total de uso de suelo, y presencia de bosque con valor comercial.

En regiones como Jopala, donde aún persisten zonas con cobertura forestal significativa, la presencia de patrones regulares de corta, caminos de extracción y áreas parcialmente intervenidas podría sugerir la existencia de aprovechamientos forestales autorizados. No obstante, la ausencia de regeneración visible o la presencia de trazos irregulares puede indicar actividades fuera de norma o carentes de seguimiento técnico. Por ello, identificar este tipo de características resulta fundamental para diferenciar entre un manejo forestal planificado y procesos de deforestación no regulada.

Los resultados muestran que la deforestación en Jopala no solo responde a factores biofísicos, sino también a vacíos en la implementación local de las políticas ambientales. A pesar de contar con marcos regulatorios como la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) y estrategias nacionales como la Estrategia REDD+, la falta de aplicación a nivel municipal limita su efectividad [120]. Esto pone de relieve la necesidad de fortalecer la gobernanza local y la coordinación interinstitucional como elementos clave para enfrentar la pérdida de cobertura forestal.

El polígono que ejemplifica con mayor claridad este tipo de situación es el número 21 (Figura 4.19). Su ubicación, tipo de clima y datos reportados por INEGI indican la presencia de bosque templado, particularmente de pino-encino, una especie reconocida por su valor comercial. Esto se confirma mediante el análisis de imágenes satelitales disponibles en Google Earth Pro, en las cuales es posible observar la coloración, textura y altura del dosel arbóreo correspondiente a este tipo de vegetación.

Meses después, se identificaron indicios que podrían corresponder al primer ciclo de corta dentro del área de aprovechamiento forestal (Figura 4.20). En la siguiente figura se observan zonas con vegetación menos densa y cambios en la textura del dosel, lo que sugiere una intervención reciente.



Fig. 4.20. Imagen satelital de Google Earth Pro donde se observan zonas más claras dentro del polígono 21, lo que podría indicar el primer ciclo de corta en un área sujeta a aprovechamiento forestal. Vista satelital obtenida de GEP [71].

Asimismo, se observaron ejemplares que probablemente cumplen la función de árboles padre (Figura 4.21), los cuales se dejan en pie intencionalmente para promover la regeneración natural del bosque. Estos árboles suelen ser individuos vigorosos, bien distribuidos y representativos de las especies objetivo para garantizar la continuidad ecológica del ecosistema.



Fig. 4.21. Ejemplares de mayor tamaño y distribución dispersa dentro del polígono, posiblemente conservados como árboles padres para favorecer la regeneración natural del bosque. Vista satelital obtenida de GEP [71].

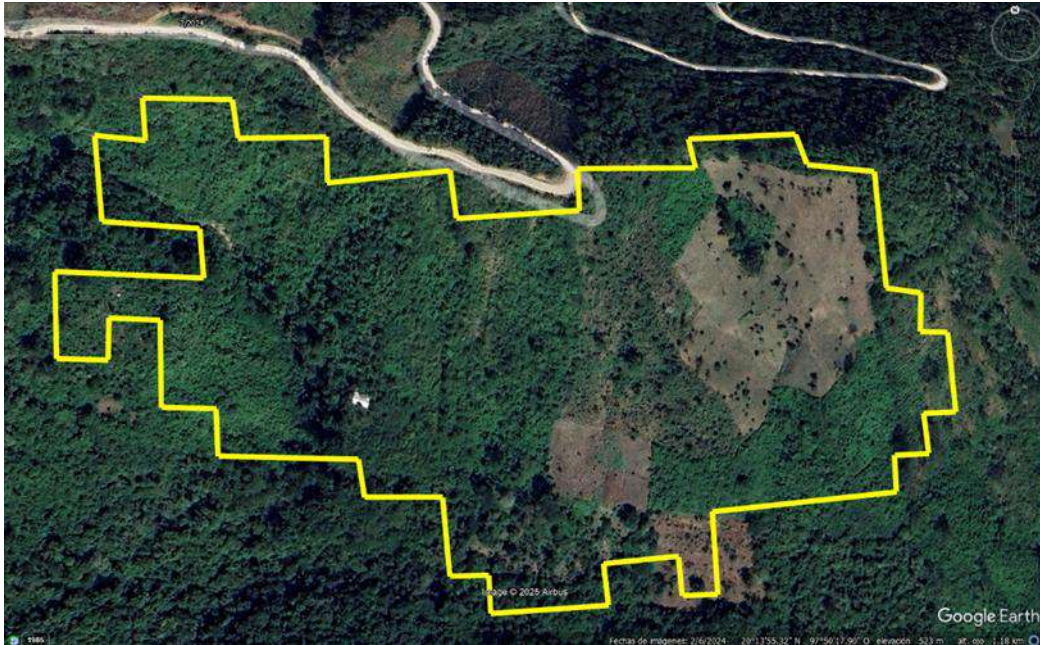


Fig. 4.22. Vista satelital más reciente del polígono 21 donde se aprecian nuevas áreas deforestadas, posiblemente asociadas a fases posteriores del mismo Programa de Manejo Forestal. Vista satelital obtenida de GEP [71].

4.3.3 Tendencias, Indicadores y Factores Asociados a la Deforestación en Jopala

Durante el análisis espacial y temporal de los 100 polígonos ubicados en el municipio de Jopala, Puebla, se identificaron diversos patrones recurrentes que evidencian una presión constante sobre los ecosistemas forestales (Fig. 4.23). El patrón más representativo fue la proximidad a caminos o brechas de acceso, ya que 61 de los 100 polígonos mostraron transformación visible en paisajes cercanos a vialidades, lo cual sugiere una alta correlación entre accesibilidad y deforestación.

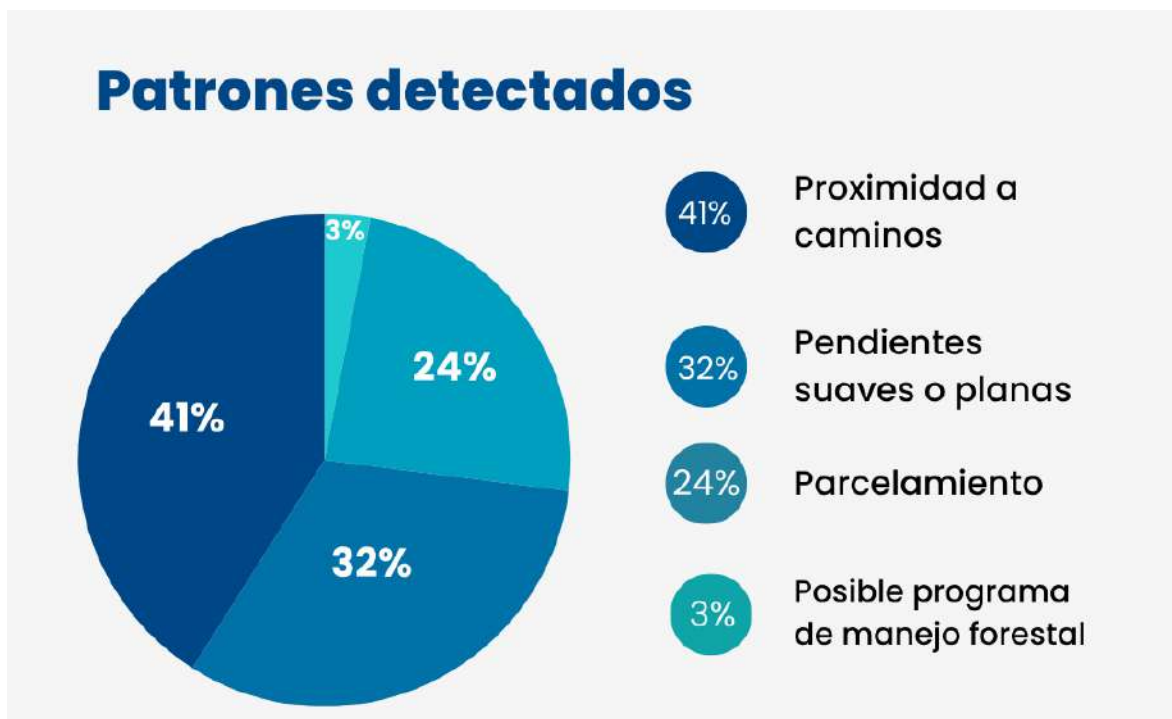


Fig. 4.23 Distribución porcentual de los patrones detectados en polígonos de deforestación en Jopala, Puebla.
Elaboración propia.

Asimismo, 47 polígonos ubicados en zonas con pendientes suaves o planas presentaron cambios en la cobertura vegetal hacia usos agropecuarios, destacando la preferencia de estas zonas para cultivos de temporal o pastizales inducidos. Otro patrón identificado fue la presencia de trazos rectilíneos, surcos agrícolas visibles y delimitación parcelaria, observados en al menos 36 polígonos, lo que indica una intervención humana sistematizada, probablemente con fines agrícolas o de ganadería extensiva.

Además, en cuatro polígonos se identificaron indicios que podrían corresponder a posibles Programas de Manejo Forestal (PMF) autorizados por la SEMARNAT. Estos polígonos comparten características como la persistencia de cobertura arbórea residual, caminos internos para extracción, evidencia de regeneración forestal en ciclos temporales, y la presencia de árboles padre, elementos fundamentales dentro de la silvicultura autorizada. Estas condiciones, junto con la alternancia de zonas con claros y áreas regeneradas dentro del mismo polígono, son indicativas de ciclos de corta controlados, una de las bases del manejo forestal sustentable.

En cuanto al análisis de series temporales del NDVI, se identificaron tres tendencias principales:

- Un descenso gradual y sostenido en 41 polígonos, asociado a presión agrícola progresiva.
- Un descenso seguido de recuperación parcial en 22 polígonos, posiblemente relacionado con incendios o talas selectivas.
- Un descenso seguido de estabilización en niveles bajos en 25 polígonos, lo que sugiere una conversión permanente del uso de suelo, típicamente hacia agricultura o pastoreo.

En resumen, los patrones identificados y cuantificados permiten no solo entender la dinámica local del cambio de uso de suelo en Jopala, sino también establecer indicadores claros y replicables para identificar procesos de degradación o manejo sustentable en otros contextos similares. La inclusión de múltiples fuentes de datos (NDVI, imágenes satelitales, curvas de nivel, cobertura de INEGI y observación directa) permitió garantizar un enfoque robusto y validado para la interpretación de estos cambios.

Para comprender completamente los resultados, se consideró el contexto socioeconómico de Jopala, caracterizado por una economía basada mayormente en actividades agropecuarias. Este factor ayuda a explicar por qué, incluso en zonas sin caminos pavimentados o sin cambios abruptos en NDVI, aparecen milpas, áreas de pastoreo o vegetación secundaria con límites artificiales. La presión por tierra cultivable se acentúa en zonas donde crece la población o existe acceso vehicular, como caminos de terracería o brechas abiertas con maquinaria. En este contexto, la transformación del paisaje no responde a una acción catastrófica, sino a una presión constante y acumulativa, muy común en municipios rurales.

Los criterios utilizados para inferir las causas de deforestación se consideran altamente confiables por las siguientes razones:

- Enfoque multisensorial y multifuente: se combinaron imágenes satelitales históricas, series espectrales (NDVI), mapas oficiales y observación directa en Google Earth Pro.
- Cobertura temporal amplia: permitió observar procesos reales de cambio, y no alteraciones momentáneas causadas por fenómenos climáticos pasajeros.
- Uso de datos públicos y oficiales: provenientes de instituciones reconocidas como la FAO, CONAFOR e INEGI.
- Rigurosidad técnica mediante SIG: herramientas como QGIS y Google Earth Engine garantizaron precisión geométrica y objetividad analítica.

- Correspondencia local validada: los resultados coinciden con los patrones de uso del suelo documentados para la región, lo cual refuerza la solidez del análisis.

4.3.4 Comparación de la cobertura forestal: fuentes oficiales vs análisis propio

De acuerdo con datos oficiales del INEGI, el municipio de Jopala presenta una cobertura forestal cercana al 65 % de su superficie total, distribuida principalmente en bosques de pino-encino y fragmentos de bosque mesófilo de montaña [81]. Esta estimación coincide parcialmente con los registros de Global Forest Watch, que reportan una cobertura arbórea del 62 % para el año 2020, aunque con una tendencia sostenida de pérdida durante las últimas dos décadas [79].

Sin embargo, el análisis realizado en este proyecto, mediante la interpretación de imágenes satelitales y el uso combinado de herramientas geoespaciales como QGIS, Google Earth Pro y Google Earth Engine, reveló un porcentaje de cobertura forestal del 58 %. Esta diferencia puede atribuirse a dos factores principales: por un lado, la mayor precisión espacial que ofrece el análisis a escala local, y por otro, la capacidad de identificar fragmentación fina y áreas degradadas que podrían no ser detectadas en escalas regionales o mediante algoritmos automáticos.

En conjunto, los datos confirman que Jopala conserva una proporción significativa de cobertura forestal, pero también muestran evidencias claras de reducción progresiva y fragmentación del paisaje, lo cual sugiere un proceso de presión constante sobre los ecosistemas boscosos. Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de fortalecer las estrategias de conservación y diseñar mecanismos de manejo sustentable acordes a la realidad territorial del municipio.

Tabla 4.6. Comparación de la cobertura forestal en Jopala según distintas fuentes oficiales y análisis propio. Elaboración propia.

Fuente	Año	Cobertura forestal (%)	Observaciones
INEGI	2020	65%	Basado en cartografía estatal
GFW	2020	62%	Basado en la tendencia de pérdida de cobertura arbórea
Análisis propio	2023	58%	Comparación de ambas capas de información que permite mayor detalle

4.4 Recomendaciones para la mitigación de la deforestación en Jopala, Puebla

El análisis realizado en Jopala evidencia la necesidad de fortalecer los mecanismos de gestión y regulación forestal. La ausencia de Planes de Manejo Forestal autorizados en el municipio refleja un vacío institucional que impide garantizar el aprovechamiento sustentable de los recursos. En este sentido, resulta indispensable fomentar la incorporación de los productores locales al Sistema Nacional de Gestión Forestal (SNGF), con el fin de formalizar las actividades y asegurar el cumplimiento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) [99], [100].

Por otro lado, la limitada diversificación económica hace evidente la urgencia de impulsar alternativas productivas sustentables. El ecoturismo comunitario ha demostrado ser una estrategia viable en municipios vecinos como Cuetzalan y Zacatlán, donde ha contribuido a mejorar los ingresos locales y reducir la presión sobre los ecosistemas [101]. Para Jopala, este tipo de iniciativas podría representar un motor de desarrollo compatible con la conservación, siempre y cuando se integre a planes de manejo participativos. Asimismo, programas como los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) de la CONAFOR ofrecen una vía para compensar a las comunidades por mantener la cobertura forestal, con beneficios comprobados en diversas regiones del país [102].

Finalmente, es necesario avanzar hacia una planeación territorial integral. La implementación de un Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial (POET) a nivel municipal permitiría delimitar zonas de conservación, restauración y uso productivo, reduciendo los conflictos socioambientales [103]. Del mismo modo, la incorporación de Jopala a la Estrategia Nacional REDD+ y a los mecanismos de cooperación climática fortalecería la articulación entre las políticas de mitigación del cambio climático y el desarrollo comunitario [104]. Estas acciones, respaldadas por la coordinación interinstitucional y la participación social, podrían garantizar no solo la conservación del bosque, sino también la sustentabilidad económica y social del municipio a largo plazo.

Conclusión

El análisis de 100 polígonos distribuidos en el municipio de Jopala, Puebla, reveló múltiples patrones asociados a la deforestación, confirmando que esta problemática no es homogénea, sino que responde a una combinación de factores físicos, sociales y económicos. Entre los principales hallazgos destaca que más del 60 % de los polígonos analizados presentaron cambios en la cobertura vegetal en zonas cercanas a caminos, mientras que un 47 % se localiza en terrenos planos o de pendiente suave, condiciones ideales para la expansión agropecuaria.

Asimismo, el análisis multitemporal de imágenes satelitales y de series NDVI evidenció tres tendencias dominantes: disminución gradual por presión agrícola, deforestación parcial con regeneración posterior y conversión total del uso del suelo. Estas tendencias fueron validadas mediante comparación con mapas oficiales de cobertura vegetal (INEGI) y capas de Global Forest Watch, lo que permitió fortalecer las inferencias causales realizadas en cada caso.

Otro hallazgo relevante fue la identificación de polígonos con signos compatibles con Programas de Manejo Forestal (PMF), que mostraron patrones ordenados, caminos internos y regeneración aparente, lo cual sugiere que no toda la intervención humana implica degradación, sino que también existen prácticas de aprovechamiento planificado.

Estos resultados permiten concluir que la deforestación en Jopala está fuertemente relacionada con la presión por el uso productivo del suelo, principalmente por la agricultura de temporal, la ganadería y, en algunos casos, por prácticas tradicionales como la quema. No obstante, también se identificaron zonas con vegetación secundaria en recuperación y posibles manejos forestales sostenibles.

Este estudio demuestra que las herramientas geoespaciales, como QGIS, Google Earth Pro y Google Earth Engine, son aliadas fundamentales para el monitoreo ambiental. Su aplicación permitió no solo detectar patrones visuales, sino construir una base de datos sólida, territorialmente referenciada, que puede ser utilizada para la toma de decisiones locales.

En este sentido, se concluye que para frenar el avance de la deforestación en municipios como Jopala es imprescindible aplicar estrategias focalizadas, fundamentadas en evidencia territorial. Esto incluye el ordenamiento ecológico, la promoción de prácticas agroforestales, el fortalecimiento de los PMF autorizados y una política municipal activa de vigilancia y educación ambiental.

Actuar con base en estos hallazgos es urgente: de continuar las tendencias observadas, la pérdida de cobertura forestal afectará no solo la biodiversidad local,

sino también la seguridad hídrica, la estabilidad del suelo y las condiciones de vida de las comunidades que dependen directamente del bosque.

Si bien el presente estudio logró identificar patrones claros de deforestación mediante el uso de imágenes satelitales y herramientas de análisis geoespacial, se recomienda que futuras investigaciones incluyan visitas de campo en el municipio de Jopala. Estas permitirían validar directamente las observaciones realizadas, recopilar información complementaria sobre las dinámicas locales y fortalecer la integración del conocimiento comunitario en las estrategias de conservación.

Anexo A

ID	POSIBLE CAUSA	DESCRIPCION	ANP
1	Sustitución de bosque por agricultura en franjas, uso de curvas de nivel visible y proximidad a cuerpo de agua.	En 2012 predominaba la vegetación primaria, en 2016 se observan líneas paralelas sobre pendientes (curvas de nivel), para 2021 hay claros evidentes usados como parcelas, posiblemente pastizal o cultivos de ciclo corto.	NO
2	Tala selectiva para ganadería extensiva y barbecho. Patrones irregulares con zonas abiertas y regeneración marginal	Se observa reducción de cobertura arbórea en zonas planas; en 2015 aparecen manchas de suelo desnudo y pastos bajos. En 2022 se mantiene sin reforestación, con caminos visibles, posiblemente para acceso de ganado.	NO
3	Expansión de infraestructura (caminos rurales) y establecimiento humano disperso.	En 2011 solo había vegetación densa; en 2018 aparecen senderos visibles y fragmentación en mosaico. En 2023 se observan techos claros (posiblemente lámina), caminos compactados y trazos perpendiculares.	NO
4	Cultivo en laderas con técnicas de conservación (surcos curvos), sin presencia urbana.	La vegetación densa fue sustituida por franjas claras dispuestas en curva, sin edificación aparente. Persisten pequeñas manchas verdes, posiblemente árboles aislados o vegetación secundaria.	NO
5	Uso de fuego como herramienta agrícola o por quema accidental. Regeneración irregular.	Se identifica un parche oscuro en 2014 que no estaba en 2010. Para 2020, el terreno aparece más claro, con evidencia de rebrotes, pero con menor densidad vegetal que en 2010.	NO
6	Uso temporal de la tierra seguido por abandono o reforestación espontánea.	En 2012, zona intervenida, con posible cultivo. En 2019 ya hay manchas verdes irregulares, y en 2024 se ve una cobertura más uniforme y continua	NO

		(probable regeneración secundaria).	
7	Agricultura de temporal con ciclos rotativos y fragmentación del bosque.	La zona pasa de continua en 2011 a mosaico claro-oscuro en 2016. En 2021 se ven límites definidos entre áreas de cultivo y remanentes forestales. No hay caminos permanentes.	NO
8	Pastizales inducidos para ganadería o barbecho rotativo. Posible erosión por falta de cobertura.	En 2010 tenía vegetación natural dispersa. Para 2015, los tonos se aclaran indicando herbáceas, y en 2023 hay pérdida evidente de sombra vegetal. Senderos internos sugieren tránsito constante, posiblemente de ganado.	NO
9	Agricultura de ladera con degradación progresiva del suelo.	Desde 2007 la vegetación natural comienza a fragmentarse. En 2010 se establecen surcos definidos. Para 2015, la cobertura arbórea ha sido sustituida completamente por cultivos, y en 2022 se observa un aumento de áreas sin cobertura vegetal, con tonalidades claras indicativas de erosión y posible sobreuso sin descanso.	NO
10	Expansión agrícola con barbecho mínimo y uso intensivo.	En 2011 el polígono tenía una cobertura forestal media con parches claros en el centro. Para 2016 ya existían surcos organizados de siembra y caminos internos. En 2022 los bordes del polígono presentaban coloración gris clara por desgaste del suelo, sin señal de recuperación vegetal en áreas centrales. Las laderas están muy intervenidas.	NO

11	Expansión de parcelas agrícolas en ladera; uso de curvas de nivel.	En 2010 la cobertura vegetal era continua. En 2015 se observan patrones de surcos curvos paralelos (agricultura de ladera). En 2023, el terreno presenta zonas más claras, con indicios de cultivo rotativo o descanso del suelo.	NO
12	Expansión de parcelas agrícolas con pérdida total de cobertura arbórea.	Este polígono presenta deforestación total desde 2011. Las imágenes muestran surcos paralelos claramente definidos, y la vegetación en bordes ha sido eliminada progresivamente. Para 2023, el suelo muestra zonas desnudas con posibles procesos erosivos visibles como manchas claras en pendiente.	NO
13	Establecimiento de pastizales inducidos para ganadería.	Se detecta apertura del dosel forestal y formación de zonas claras. No hay caminos visibles ni edificaciones. Las imágenes indican un uso continuo del espacio, posiblemente para pastoreo.	NO
14	Tala para autoconsumo y apertura agrícola.	En 2012 se nota cobertura densa. Para 2017, aparecen manchas abiertas de forma irregular. En 2023 se amplía esa apertura, con evidencia de senderos temporales, probablemente acceso manual o con animales de carga.	NO
15	Deforestación por agricultura de subsistencia en terreno montañoso.	Se observan claros progresivos desde 2011. Para 2016 hay divisiones en forma de terrazas o curvas de nivel, y en 2022 el terreno mantiene cobertura fragmentada. No se identifican edificaciones.	SI
16	Agricultura rotativa de ciclo corto, posible milpa.	En 2010 hay cobertura uniforme. En 2015 el área muestra manchas alternadas claras/oscuras, y para 2021 parece haber uso estacional,	NO

		con franjas cultivadas que cambian año con año.	
17	Formación de caminos rurales y bordes agrícolas.	En 2013 hay vegetación continua. En 2018, un camino cruza parcialmente el polígono. En 2023 se evidencian cambios en los bordes (posible expansión agrícola o efecto de escurrimientos).	NO
18	Actividad ganadera ligera y degradación del suelo por compactación.	El área mantiene parches abiertos en los tres años. No hay señal clara de cultivo, pero sí de suelo desnudo o cubierto por herbáceas, posiblemente afectado por pastoreo.	NO
19	Tala parcial para uso doméstico o delimitación de parcela.	En 2010, vegetación cerrada. En 2015, apertura en una franja diagonal. Para 2023, la franja se ha ampliado y presenta líneas paralelas (uso agrícola visible).	NO
20	Deforestación para agricultura en pendiente, probable sin técnicas de conservación.	Entre 2012 y 2016, el terreno pierde cobertura en la parte central. En 2022 hay erosión aparente y surcos sin orden regular. Es probable que el uso agrícola esté afectando la estabilidad del suelo.	NO
21	Expansión de área agrícola en ladera con curvas de nivel visibles.	En 2011 el terreno estaba densamente cubierto. Para 2016 se observan surcos en contorno, típicos de agricultura conservacionista. En 2023 se nota una pérdida parcial de vegetación en los márgenes y caminos de acceso poco definidos.	NO
22	Agricultura intensiva y apertura de caminos de acceso.	Desde 2010 se abren caminos y aparecen los primeros surcos. En 2014 ya se ha fragmentado completamente la vegetación. Entre 2016 y 2021 se consolida un patrón agrícola intensivo. En imágenes recientes hay zonas en las que el color indica suelos	NO

		compactados o con pérdida de cobertura superficial.	
23	Tala selectiva y barbecho, sin reforestación posterior.	Cobertura forestal parcialmente intervenida desde 2010. En 2015, zonas abiertas con límites irregulares, y para 2021 la cobertura no se ha recuperado, pero no hay evidencia de urbanización.	NO
24	Agricultura temporal con abandono intermitente.	Las imágenes muestran áreas cultivadas en 2012, abandono en 2017 (vegetación secundaria regresando), y para 2022 vuelve a observarse un patrón agrícola activo.	NO
25	Quema de vegetación y regeneración desigual.	El polígono presenta manchas oscuras en 2014 (probable uso de fuego). En 2020 hay áreas más claras y otras con rebrotes arbustivos, sin patrón agrícola definido.	NO
26	Formación de parcela agrícola y transición a pastizal inducido	En 2010 el terreno era uniforme. Para 2015, aparecen divisiones rectas y líneas internas. En 2023, el terreno muestra pastos homogéneos, posiblemente utilizados para ganadería ligera.	NO
27	Agricultura de ladera intensiva, posible monocultivo.	Las imágenes muestran actividad constante de cultivo con pérdida de vegetación nativa. Los patrones en curva y la coloración de los suelos sugieren uso repetido sin descanso.	NO
28	Ganadería extensiva con pérdida progresiva de cobertura.	A partir de 2012 se observan claros amplios y caminos internos. En 2023, gran parte del polígono está cubierto por pastos bajos y suelo compactado. No se identifica infraestructura.	NO

29	Cultivo de temporal con presión sobre laderas.	El polígono muestra un patrón de uso estacional, con cambios en la cobertura cada ciclo agrícola. La pendiente pronunciada y los surcos visibles indican presión sobre el terreno.	NO
30	Uso mixto agrícola y ganadero, con degradación del suelo.	En 2011 había vegetación media. En 2015 aparece una red de caminos angostos y zonas abiertas. Para 2023, el terreno tiene cobertura herbácea irregular y evidencia de compactación, con posible erosión en zonas bajas.	NO
31	Agricultura intensiva con uso de curvas de nivel y pérdida progresiva de vegetación arbórea	En 2011 la cobertura vegetal es continua. Para 2016 se observan franjas curvas bien definidas (uso agrícola). En 2023 hay zonas claras constantes, sin evidencia de regeneración. Las curvas de nivel ayudan a conservar el suelo, pero hay presión constante.	NO
32	Sustitución de cobertura forestal por parcelas agrícolas pequeñas.	En 2011 hay parches de vegetación que desaparecen en 2016. Para 2023, se observan zonas cultivadas y otras abandonadas, lo que indica agotamiento del suelo o abandono por pérdida de productividad. No hay recuperación natural visible.	NO
33	Expansión agrícola sobre bosque secundario y formación de terrazas.	En 2010 hay vegetación media. En 2015 aparecen líneas en pendiente, posiblemente terrazas artesanales. Para 2021 hay mayor apertura y separación de franjas cultivables. Poca regeneración	NO
34	Pastizal inducido en zona deforestada, posible uso ganadero.	Cobertura cerrada en 2012. En 2017 aparece un patrón claro de pastos, y para 2022 hay áreas amarillentas con suelo descubierto, indicando sobrepastoreo o degradación leve.	NO

35	Agricultura tradicional y fragmentación sin urbanización.	En 2011 el polígono tenía vegetación discontinua. En 2016 las divisiones internas muestran parcelas trabajadas. Para 2023, los bordes están más abiertos, pero sin caminos definidos o construcciones.	NO
36	Cambio estacional por cultivos de temporal (milpa) con barbecho.	En 2010, vegetación relativamente continua. En 2014 y 2020 hay alternancia clara entre franjas verdes y marrones, típico de agricultura rotativa. Se observa regeneración secundaria.	NO
37	Formación de nuevas parcelas agrícolas en terreno inclinado.	En 2012 había cobertura forestal. Para 2017 hay claros definidos en franjas paralelas. En 2023 el patrón persiste, lo que indica continuidad en el uso agrícola. Posible uso de tracción animal.	NO
38	Ganadería extensiva en ladera sin infraestructura.	Área deforestada desde 2011. En 2016 se incrementan las zonas de pastizal, y para 2022, el polígono está cubierto por herbáceas con zonas de escurrimiento visibles.	NO
39	Tala ligera y abandono posterior con regeneración mixta.	En 2010 se observan algunas manchas abiertas. En 2015 se amplían, pero en 2021 aparecen zonas verdes irregulares, lo que sugiere crecimiento natural de vegetación secundaria.	NO
40	Cultivo intensivo en terrazas o curvas con posible erosión.	En 2013 el terreno tenía cobertura media. En 2018 se definen curvas de nivel trabajadas, y para 2023 hay pérdida parcial de suelo vegetal en zonas de mayor pendiente.	NO
41	Uso agrícola intensivo con curvas de nivel en ladera.	En 2011 el terreno presenta vegetación continua. Para 2016 aparecen surcos paralelos siguiendo la forma del terreno, y en 2023 se observan manchas claras de cultivo activo, con áreas parcialmente degradadas.	NO

42	Pastizal inducido para ganadería extensiva.	Inicialmente hay cobertura media. En 2015 y 2022 el terreno está cubierto por herbáceas con líneas de acceso, sin árboles ni cultivos identificables. Las tonalidades marrón-verdosas sugieren sobrepastoreo en algunas zonas.	NO
43	Expansión agrícola con pérdida progresiva de cobertura vegetal.	Desde 2012 comienza la apertura de claros. En 2017 y 2023 se incrementa el área sin vegetación, con un patrón agrícola definido. No se detectan caminos ni infraestructura.	NO
44	Agricultura tradicional rotativa y abandono temporal.	El polígono presenta uso estacional en 2011, rotación en 2016, y en 2021 hay regeneración vegetal en partes, lo que sugiere descanso del terreno en ciclos.	NO
45	Presión agrícola intensa en terrenos de pendiente media.	El área estaba parcialmente cubierta de vegetación en 2010. Para 2013, más del 70% está cultivado. En 2020, no hay recuperación visible, y la textura del suelo indica pérdida de humedad y compactación, sin presencia de cobertura secundaria.	NO
46	Deforestación por apertura de parcela con uso ganadero posterior.	En 2010 había cobertura cerrada. En 2014 se observa apertura en franjas, y en 2020 pastizales extendidos, sin retorno de vegetación densa. Suelo ligeramente blanqueado por compactación.	NO
47	Cultivo en pendiente con curvas mal definidas.	La cobertura se reduce desde 2012. En 2017 aparecen surcos no paralelos y patrones irregulares. Para 2022, la vegetación es escasa en el centro y densa en los bordes.	NO
48	Agricultura con deterioro visible del relieve y pérdida de curvas de nivel.	A partir de 2011 se crean surcos rectos no adaptados al terreno. En 2015 ya hay pérdida notable de cobertura. En imágenes	NO

		recientes se observan marcas de escurrimiento superficial y manchas grises en pendientes, indicativas de erosión por agua.	
49	Agricultura intensiva en zona con pendiente moderada.	Desde 2011 se detectan surcos amplios. En 2016 y 2023 se mantiene el patrón, con pocas zonas de regeneración. Los márgenes parecen erosionados o sin cobertura vegetal.	NO
50	Formación de parcela ganadera con vegetación secundaria en los bordes.	En 2010 hay vegetación media. En 2015 hay apertura y en 2021 el terreno se ve uniforme, con vegetación baja y pasto posiblemente inducido. No se observan cercas o divisiones internas visibles.	NO
51	Expansión de cultivo sobre bosque de media cobertura.	En 2010, la vegetación es densa y continua. En 2015 aparecen claros definidos por surcos, y en 2022 persisten los patrones agrícolas. Se nota fragmentación del paisaje, sin regeneración clara.	NO
52	Sustitución de vegetación natural por pastizal inducido.	De 2011 a 2023, el polígono pierde cobertura arbórea. El terreno presenta tonalidades amarillas y texturas suaves, típicas de pastos artificiales, posiblemente para ganado.	NO
53	Agricultura temporal, alternancia con vegetación secundaria.	En 2012 hay actividad agrícola, luego en 2017 el terreno muestra recuperación parcial y en 2023 vuelve a haber claros. Esto sugiere un patrón cíclico de uso y barbecho.	NO
54	Apertura de parcela con patrón lineal de cultivo.	Se observa fragmentación inicial en 2011. En 2014 se marcan franjas de cultivo paralelas y en 2020 el uso continúa, con pérdida de vegetación en los bordes.	NO

55	Ganadería ligera con deforestación progresiva y suelo expuesto.	En 2010 hay vegetación heterogénea. Para 2016 y 2022 predomina el suelo claro con manchas de pasto. Zonas erosionadas en pendiente moderada.	NO
56	Transición de bosque secundario a zona agrícola.	En 2011 hay vegetación semidensa. Para 2015 aparecen surcos y caminos de acceso. En 2021 el uso agrícola se intensifica con reducción visible del dosel vegetal.	NO
57	Pastoreo extensivo con compactación del terreno.	Área con cobertura interrumpida desde 2012. En 2016 el terreno se ve más homogéneo y claro, y en 2023 muestra erosión y pérdida de vegetación en zonas bajas.	NO
58	Agricultura permanente, pérdida de cobertura natural sin descanso.	Desde 2010 hay cultivo. En 2015 el patrón de franjas se intensifica y en 2021 se mantiene sin evidencia de descanso ni regeneración.	NO
59	Fragmentación del paisaje por parcelas pequeñas.	En 2011 hay cobertura continua. Desde 2016 aparecen divisiones irregulares, y en 2023 el polígono tiene múltiples claros, caminos y bordes erosionados.	NO
60	Deforestación por agricultura y abandono posterior parcial.	En 2012 comienza la apertura. En 2017 el uso es más evidente y en 2022 hay signos de abandono: vegetación secundaria irregular y zonas compactadas.	NO
61	Cultivo de temporal en pendiente media.	Desde 2011 se observan surcos paralelos en la ladera. Para 2016 la cobertura vegetal es discontinua, y en 2022 persiste el uso agrícola con signos de erosión en las zonas más altas.	NO
62	Pastoreo extensivo con vegetación secundaria.	Área con vegetación baja desde 2010. En 2015 y 2021 se mantiene homogénea, sin franjas de cultivo, con manchas claras que podrían ser zonas de paso del ganado.	NO

63	Agricultura permanente con patrones en curvas de nivel.	En 2012 el terreno comienza a abrirse. Para 2016 y 2023 se mantienen franjas paralelas que siguen el relieve, probablemente cultivos de maíz o frijol. El uso del suelo es constante.	NO
64	Expansión agrícola y escasa regeneración.	Área con vegetación baja desde 2010. En 2015 y 2021 se mantiene homogénea, sin franjas de cultivo, con manchas claras que podrían ser zonas de paso del ganado.	NO
65	Agricultura estacional con descansos irregulares.	El uso del suelo cambia por temporadas. En 2010 y 2014 hay alternancia de tonos (cultivo y descanso), y en 2020 el terreno tiene áreas verdes dispersas, signo de regeneración parcial.	NO
66	Uso agrícola continuo y sobreexplotación de suelo.	Desde 2010 el polígono muestra actividad agrícola sin interrupción. En 2016 se notan zonas más claras, y en 2022 hay parches completamente desnudos, sin vegetación ni señal de recuperación. El uso intensivo ha impedido regeneración natural.	NO
67	Deforestación para formación de pastizales inducidos.	Desde 2011 el polígono pierde cobertura arbórea. Para 2016 y 2023, la cobertura es baja, con tonalidades amarillas, sin señales de cultivo activo, lo que sugiere uso ganadero.	NO
68	Deforestación con fragmentación severa del paisaje y pérdida de conectividad ecológica.	Este polígono estaba originalmente cubierto por vegetación cerrada. A partir de 2012 comienza la apertura para cultivo. En 2017 y 2023, el terreno se encuentra completamente fragmentado con parches aislados de vegetación, lo que impide la regeneración y favorece procesos erosivos	NO

69	Sustitución del bosque por pastizales inducidos y fragmentación severa.	El análisis muestra que la zona pasó de una vegetación densa en 2012 a fragmentación y apertura de claros en 2017. En 2023 los parches visibles están ocupados por vegetación baja uniforme, probablemente gramíneas inducidas. No se observan cercas, pero sí compactación en los accesos, típica de uso ganadero informal.	NO
70	Agricultura en pendiente con presión constante sobre el suelo.	La cobertura vegetal disminuye desde 2012. En 2017 hay franjas visibles en forma de curvas de nivel, y para 2023 la textura del suelo sugiere actividad agrícola sin pausas y posibles signos de degradación en zonas centrales.	NO
71	Expansión agrícola sobre ladera media con drenaje natural.	En 2011 la vegetación era cerrada. Para 2016 aparecen claros con forma de cultivo en línea, y en 2023 se mantiene la actividad agrícola, con presencia de zonas de escurrimiento visibles por la coloración blanquecina en las partes bajas.	NO
72	Pastizal inducido con posible actividad ganadera ligera.	Desde 2010 la vegetación es baja y dispersa. En 2015 y 2022 se mantiene sin crecimiento forestal, sin surcos definidos, lo que indica uso como pastizal continuo sin reforestación.	NO
73	Agricultura rotativa con signos de abandono parcial.	En 2012 hay actividad agrícola evidente. En 2016 parte del terreno se regenera, y en 2023 solo una sección presenta uso agrícola, lo que indica posible disminución en el uso del terreno.	NO
74	Cultivo intensivo sobre pendientes con posible erosión.	En 2011 y 2014 se aprecian surcos agrícolas paralelos. Para 2021, el centro del polígono tiene coloración más clara, probablemente por erosión o pérdida de nutrientes del suelo.	NO

75	Fragmentación del paisaje por agricultura de subsistencia.	En 2010 había vegetación continua. En 2016 surgen parcelas pequeñas sin patrón uniforme. Para 2022 hay mezcla de zonas agrícolas y vegetación secundaria en regeneración.	NO
76	Reemplazo de vegetación arbórea por cultivo estacional.	Se observa una pérdida progresiva de cobertura vegetal de 2012 a 2023. Surcos rectos y claros indican un patrón de cultivo en temporada de lluvias. No hay señales de descanso del suelo.	NO
77	Uso agrícola constante con zonas sin cobertura vegetal.	Desde 2011 el polígono ha estado en uso agrícola. En 2022 se aprecian áreas completamente desnudas, con poco o ningún rastro vegetal, lo que sugiere degradación del suelo.	NO
78	Conversión intensiva a uso agropecuario.	La deforestación es total desde 2010. Para 2015 se observan áreas sin cobertura vegetal, probablemente utilizadas para pastoreo. En 2021 aparecen zonas completamente grises, señal de pérdida del horizonte fértil del suelo. No hay presencia de árboles ni rebrotes visibles.	NO
79	Uso combinado: agricultura y áreas no intervenidas.	El polígono está parcialmente deforestado desde 2010. En 2014 y 2020 hay secciones con cultivos y otras que conservan vegetación, lo que podría indicar uso compartido o en transición.	NO
80	Deforestación para cultivos con curvas de nivel mal conservadas.	El patrón de surcos no sigue perfectamente las curvas topográficas, lo que podría estar provocando pérdida de suelo. La cobertura vegetal se ha mantenido baja y fragmentada.	NO

81	Establecimiento agrícola sobre ladera sin manejo conservacionista.	A partir de 2009 hay apertura del terreno con uso agrícola intermitente. En 2011 y 2016 se observan surcos que siguen parcialmente el relieve, aunque en imágenes más recientes (2020-2023) se aprecian bordes erosionados y pérdida de cobertura vegetal. Hay alternancia de barbecho, pero sin recuperación forestal completa. El acceso al terreno se amplió en 2019.	NO
82	Cultivo intensivo con presión sobre suelos y fragmentación por caminos de acceso.	Desde 2007 se nota deforestación inicial. Entre 2010 y 2014 el polígono se convierte en zona agrícola activa, con trazos de caminos y acceso vehicular. En imágenes de 2017 y 2021, la parcela se ve expuesta, con vegetación baja en los bordes y pérdida de cobertura continua en zonas centrales. No hay signos de regeneración o descanso.	NO
83	Uso mixto: agricultura temporal y posible pastoreo, sin recuperación vegetal.	Aunque el terreno fue intervenido desde 2008, se observa alternancia de uso agrícola entre 2011 y 2022. No hay patrón definido de surcos, pero sí manchas de vegetación baja y clara, típicas de zonas pastoreadas. Las zonas más inclinadas presentan erosión visible a partir de 2019, lo que sugiere sobreuso del suelo sin prácticas de conservación.	NO
84	Presión agrícola extensiva en ladera sin barreras naturales.	En 2010 la zona presentaba cobertura mixta. Para 2015 la parte baja ya mostraba surcos curvos en terraza y áreas erosionadas. En 2021 se puede ver cómo los bordes altos permanecen más estables, pero el centro está deforestado y ha perdido su coloración verde	NO

		intensa, lo que indica escasez de cobertura vegetal viva.	
85	Sustitución completa de bosque por cultivo estacional.	Este polígono ha estado en uso agrícola continuo desde al menos 2009. Las imágenes muestran eliminación total de cobertura forestal, reemplazada por patrones agrícolas en líneas rectas. No hay evidencia de restauración o rotación de cultivo. La exposición del suelo aumenta en la imagen de 2023, posiblemente por uso intensivo sin prácticas de conservación.	NO
86	Fragmentación por parcelas agrícolas pequeñas en ladera.	Desde 2010 se evidencia apertura parcelaria. Entre 2012 y 2018 el polígono se fracciona en zonas de cultivo con límites irregulares. Algunas zonas permanecen con vegetación secundaria. Para 2022 la mayor parte del terreno presenta patrones agrícolas visibles, con caminos internos no presentes en años anteriores. No se observa regeneración ni cobertura arbórea.	NO
87	Pastoreo intensivo con degradación del suelo en zonas planas.	Aunque no hay surcos agrícolas claros, las imágenes muestran desde 2011 vegetación rala con manchas claras, típicas de uso ganadero. En 2016 y 2023 aumenta la homogeneidad del color del suelo, lo que sugiere compactación y pérdida de vegetación herbácea. Las zonas de escurrimiento se vuelven más marcadas, y no hay cobertura arbórea en ningún momento del periodo	NO

88	Agricultura continua con alteración de micro relieves naturales.	Desde 2012 se ha usado intensivamente el suelo. El patrón de cultivo ha modificado el relieve visible en las sombras satelitales: curvas de nivel débiles, posiblemente removidas por maquinaria. En imágenes recientes (2020–2022), se observan parches de vegetación secundaria en bordes, pero el centro permanece en uso agrícola sin regeneración natural.	NO
89	Expansión agrícola sobre terreno con pendiente ligera y posible uso ganadero marginal.	La deforestación inició antes de 2010. Desde entonces se observan surcos agrícolas persistentes. En imágenes entre 2014 y 2021 se nota expansión hacia los bordes, y aparición de zonas más claras en las partes bajas del terreno. Es posible que estas áreas estén siendo usadas para pastoreo o descanso del suelo, pero no hay regeneración forestal.	NO
90	Uso agrícola en laderas y abandono parcial con invasión de vegetación secundaria.	El uso agrícola es evidente en 2011 y se mantiene hasta 2018. A partir de 2019 algunas secciones muestran reaparición de vegetación natural, aunque de baja densidad. En 2023, la mitad del polígono sigue en uso agrícola, mientras que la otra mitad muestra recuperación parcial, con vegetación secundaria irregular, indicando abandono parcial del terreno.	NO
91	Expansión de cultivo intensivo en pendiente alta, sin medidas de conservación.	La imagen de 2010 muestra vegetación casi intacta. En 2015, se aprecian surcos rectos en pendiente y claros extensos. En 2023, la zona está mayoritariamente desnuda en su parte central, con bordes reforestando levemente. El patrón indica robo agrícola	NO

		mecanizado sin protección del suelo.	
92	Conversión a pastizal inducido tras tala de vegetación densa.	La vegetación tupida desaparece completamente entre 2011 y 2016; en 2022, el terreno se ve cubierto de herbáceas bajas, tonos uniformes y surcos ligeros, mostrando que no es pastoreo natural, sino inducido.	NO
93	Eliminación total de vegetación con presencia de quemas previas.	En imágenes de 2011 se observan marcas de quemas. A partir de entonces, se elimina totalmente la vegetación natural. En 2016 hay cultivos establecidos, y en 2023 algunas áreas se encuentran sin uso, con suelos expuestos y sin signos de recuperación.	NO
94	Agricultura tradicional de parcela con desgaste del suelo.	Parcelas con curvas de nivel visibles para cultivo (maíz/frijol). A diferencia de otros polígonos, este tiene cuadrículas definidas, como milpas diversificadas. En 2023, se observa pérdida puntual de cobertura y bordes erosionados.	NO
95	Tala completa para agricultura y abandono posterior.	El análisis muestra una deforestación total entre 2011 y 2016, con formación de surcos y zonas expuestas. Para 2022, la zona sigue sin recuperación, incluso se detecta manchado blanquecino típico de suelos sin materia orgánica, con alta reflectancia. No hay signos de reforestación ni recuperación natural, indicando abandono sin restauración.	NO
96	Fragmentación del bosque por apertura de pequeñas parcelas agrícolas.	El área de bosque se divide en parcelas pequeñas con caminos internos creados entre 2010-2015. En 2021 esas	NO

		parcelas permanecen activas, sin señales de regeneración, y muestran bordes irregulares y manchas de suelo compacto.	
97	Tala para uso ganadero con compactación del terreno.	Se pasa de vegetación media en 2011 a pradera clara en 2016. En 2022, el polígono presenta manchas grises en zonas bajas, signos de compactación y pérdida de estructura. No aparecen surcos de cultivo, lo que sugiere uso ganadero intensivo sin rotación.	NO
98	Expansión agrícola y erosión en curvas mal adaptadas.	Este polígono muestra un patrón claro de expansión de cultivo a partir de 2012. En 2017 ya existen curvas de nivel marcadas, pero no están bien alineadas al relieve. Para 2023, las zonas más bajas están erosionadas y muestran canales de escurrimiento visibles en imagen satelital. La deforestación ha dejado el suelo vulnerable en varias áreas.	NO
99	Agricultura con surcos alineados, degradación leve de relieves.	Los surcos en curva de nivel aparecen en 2012-2017. Para 2023, hay zonas con cobertura irregular, bordes erosionados y manchas sin vegetación. Muestra uso agrícola que supera el cuidado del paisaje natural.	NO
100	Uso agrícola sucesivo y regresión forestal parcial.	El patrón en esta área es de milpa alternada con barbechos. En 2015-2022 se observan áreas con regeneración natural en los bordes, pero con claros centrales, lo que sugiere un uso agrícola sostenido con poca rotación.	NO

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
A través de la Facultad de Ciencias de la Electrónica
otorga la presente

CONSTANCIA

A: **Ing. Luz Gabriela Suarez García**

Por haber dictado la Ponencia:

Análisis espacial de la deforestación y su relación con el agua

En el marco del 4° Foro en **Energías Renovables y Sustentabilidad**

Realizado del 20 al 22 de agosto de 2025

Duración de la Ponencia: 1 hora



BUAP

Registro:
DGECC - BUAP - Fac. Cs. Elect. - P / F-011 / 25
Folio: 162, Foja 733
Del libro de Registros 01/25



"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z., a 20 de agosto de 2025

[Signature]
Dr. Carlos Contreras Cruz
Director General de Educación Continua

Referencias

- [1] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Ley de Transición Energética. Diario Oficial de la Federación [Internet]. 24 dic 2015 [citado jul 2025]. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf>
- [2] Secretaría de Energía (SENER). Estrategia Nacional de Energía 2013–2027 [Internet]. México: Gobierno de México; 2013 [citado may 2025]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/documentos/estrategia-nacional-de-energia-2013-2027>
- [3] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Bosques y energía renovable: oportunidades para el desarrollo sustentable en México [Internet]. Guadalajara: CONAFOR; 2019 [citado ago 2024]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conafor/documentos/bosques-y-energia-renovable>
- [4] Ecosystem stewardship in developing renewable energy projects. Mexico Business News [Internet]. 2024 [citado jun 2025]. Disponible en: artículo sobre la integración de prácticas de cuidado de ecosistemas y generación de energía limpia
- [5] R. H. Manson, “Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México,” *Madera y Bosques*, vol. 10, no. 1, pp. 127–145, 2004 [citado may 2024]. doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011276>
- [6] C. Stickler et al., “Deforestación reduce disponibilidad de agua para energía hidroeléctrica,” *SciDev.Net América Latina y el Caribe* [Internet]. [citado jul 2024]. Disponible en: <https://www.scidev.net/america-latina/news/deforestacion-reduce-agua-para-energia-hidroelctrica/>
- [7] FAO. El nexos bosque–agua [Internet]. Roma: FAO; 2024 [citado may 2025]. Disponible en: <https://www.fao.org/in-action/programa-sobre-los-bosques-y-el-agua/panorama-general/es/>
- [8] International Renewable Energy Agency (IRENA). Planning for the renewable future: Long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies [Internet]. Abu Dhabi: IRENA; 2017 [citado jun 2025]. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2017/Nov/Planning-for-the-renewable-future>
- [9] CEIGEP. Centro Estatal de Información Geográfica y Estadística de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla; 2024 [citado jul 2024].
- [10] Secretaría de Turismo de Puebla. Condiciones socioeconómicas de la Sierra Norte de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla; 2024 [citado ago 2025].

- [11] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Informe sobre la degradación del suelo y pérdida de bosques primarios en Puebla. CONAFOR; 2025 [citado jul 2025].
- [12] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Informe sobre la tala ilegal en Puebla y sus impactos ambientales. INECC; 2024 [citado jun 2025].
- [13] Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Informe sobre pobreza y marginación en municipios de México. CONEVAL; 2025 [citado may 2025].
- [14] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Estudio sobre la frecuencia de eventos climáticos extremos en zonas deforestadas de Puebla. INEGI; 2024 [citado ago 2024].
- [15] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press; 2014 [citado jul 2025]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- [16] CEIGEP. Centro Estatal de Información Geográfica y Estadística de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla; 2024 [citado jun 2024].
- [17] Secretaría de Turismo de Puebla. Condiciones socioeconómicas de la Sierra Norte de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla; 2024 [citado may 2025].
- [18] Secretaría de Turismo de Puebla. Estrategias de turismo comunitario en municipios de la Sierra Norte. Gobierno del Estado de Puebla; 2025 [citado jul 2025].
- [19] Secretaría de Turismo de Puebla. Proyectos de ecoturismo comunitario en Zacatlán y Cuetzalan. Gobierno del Estado de Puebla; 2024 [citado jun 2025].
- [20] Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Informe sobre pobreza y marginación en municipios de México. CONEVAL; 2024 [citado ago 2024].
- [21] CEIGEP. Centro Estatal de Información Geográfica y Estadística de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla; 2024 [citado jun 2025]. Disponible en: <https://ceigep.puebla.gob.mx/fichas/geografico/89/JOPALA>
- [22] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Reglas de Operación del Programa de Servicios Ambientales. Gobierno de México; 2023 [citado may 2025].
- [23] International Renewable Energy Agency (IRENA). Planning for the renewable future: Long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies [Internet]. Abu Dhabi: IRENA; 2017 [citado jul 2025]. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2017/Nov/Planning-for-the-renewable-future>

- [24] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Serie VI (2020) [Internet]. Aguascalientes: INEGI; 2020 [citado ago 2024]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- [25] Global Forest Watch. Jopala, Puebla, México: Datos sobre cobertura forestal y cambio de uso de suelo [Internet]. Washington, DC: World Resources Institute; 2024 [citado may 2025]. Disponible en: <https://www.globalforestwatch.org>
- [26] J. García, R. Pérez y M. Torres, “El uso de SIG en la identificación de la deforestación: Integración de datos geoespaciales y socioeconómicos,” *Revista Mexicana de Geografía y Medio Ambiente*, vol. 12, no. 3, pp. 45–61, 2020 [citado jul 2024].
- [27] L. Hernández, A. Muñoz y J. Salazar, “Evaluación de la deforestación en la Sierra Norte de Puebla utilizando sistemas de información geográfica,” *Revista de Estudios Ambientales de México*, vol. 10, no. 2, pp. 72–85, 2019 [citado may 2025].
- [28] J. Rzedowski, *Vegetación de México*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2006 [citado jul 2024].
- [29] FAO. *El estado de los bosques del mundo 2022. Vías forestales hacia la recuperación verde y la transformación sostenible* [Internet]. Roma: FAO; 2022 [citado may 2025]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/cb9360es/cb9360es.pdf>
- [30] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. México: Diario Oficial de la Federación, última reforma 2021 [citado may 2025].
- [31] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México: Diario Oficial de la Federación, última reforma 2022 [citado jun 2024].
- [32] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). *Programas y apoyos: Servicios Ambientales y Manejo Forestal*. Gobierno de México; 2023 [citado jul 2025]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conafor>
- [33] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). *Lineamientos para la elaboración del Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio (POET)*. México; 2018 [citado ago 2024].
- [34] L. Merino-Pérez, *Conservación o deterioro. El impacto de las políticas públicas en las comunidades y los bosques de México*. México: Instituto Nacional de Ecología; 2004 [citado jul 2025].

- [35] D. B. Bray, L. Merino-Pérez y D. Barry (eds.), Los bosques comunitarios de México: manejo sustentable de paisajes forestales. México: INE–SEMARNAT; 2007 [citado may 2025].
- [36] Naciones Unidas. Acuerdo de París. París: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; 2015 [citado jun 2025]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/paris-agreement>
- [37] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Atlas del Agua en México 2022. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2022 [citado jul 2025].
- [38] Centro de Investigación en Ecosistemas de México (CIEM). Biodiversidad y servicios ecosistémicos en la Sierra Norte de Puebla. Morelia: UNAM-CIEM; 2024 [citado may 2025].
- [39] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Política Ambiental y de Energía en México. Gobierno de México; 2020 [citado ago 2024]. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx>
- [40] J. Cabrera, L. Gómez, M. Ramírez y F. Torres, “Análisis de la deforestación en el Amazonas peruano utilizando sistemas de información geográfica,” Revista de Estudios Ambientales, vol. 25, no. 3, pp. 45–59, 2017 [citado may 2024].
- [41] L. Hernández, A. Muñoz y J. Salazar, “Evaluación de la deforestación en la Sierra Norte de Puebla utilizando sistemas de información geográfica,” Revista de Estudios Ambientales de México, vol. 10, no. 2, pp. 72–85, 2019 [citado jun 2025].
- [42] M. Rangel y P. López, “Deforestación en Chiapas y Oaxaca: Un análisis mediante técnicas de geoespacialidad y teledetección,” Revista de Ciencias Ambientales, vol. 32, no. 2, pp. 78–90, 2018 [citado jul 2025].
- [43] R. Pacheco, L. Fernández y M. Ruiz, “Impacto de la deforestación en el cambio climático en la Huasteca Potosina mediante tecnologías de información geográfica,” Revista de Ecología Tropical, vol. 22, no. 3, pp. 102–118, 2015 [citado may 2025].
- [44] L. Martínez, R. García y T. Sánchez, “Fragmentación del paisaje en Veracruz mediante imágenes satelitales de alta resolución,” Revista de Geografía y Medio Ambiente, vol. 40, no. 1, pp. 112–130, 2021 [citado ago 2024].
- [45] J. Velázquez y A. Santos, “Impacto socioeconómico de la deforestación en la economía rural de Michoacán: Un análisis mediante SIG,” Revista de Economía y Medio Ambiente, vol. 15, no. 4, pp. 58–74, 2016 [citado jun 2024].

- [46] C. Ruiz y D. Torres, “Conservación forestal en la Amazonía y Los Tuxtlas, Veracruz: Aplicación de SIG para estrategias de conservación y manejo sostenible,” *Revista de Gestión Ambiental*, vol. 28, no. 2, pp. 134–150, 2022 [citado jul 2025].
- [47] F. Muñoz y S. Delgado, “Pérdida de cobertura forestal en México y Centroamérica: Tecnología satelital y colaboración comunitaria en la conservación,” *Revista de Ecología y Sociedad*, vol. 10, no. 1, pp. 89–105, 2017 [citado may 2024].
- [48] R. Gómez y P. Salinas, “Análisis de la deforestación en Puebla mediante SIG y modelos predictivos: Identificación de zonas críticas y riesgos asociados,” *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 18, no. 3, pp. 210–225, 2020 [citado jun 2025].
- [49] J. Foley, G. DeFries, G. Asner, C. Barford, G. Bonan, S. Carpenter, ... y P. Snyder, “Global consequences of land use,” *Science*, vol. 309, no. 5734, pp. 570–574, 2005 [citado jun 2024]. doi: 10.1126/science.1111772
- [50] T. Baker, O. Phillips, Y. Malhi, S. Almeida, L. Arroyo, A. Di Fiore, ... y B. Vinceti, “The impact of deforestation on biodiversity and carbon cycling in tropical forests,” *Nature*, vol. 443, no. 7107, pp. 444–447, 2016 [citado jul 2025]. doi: 10.1038/nature05133
- [51] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Informe Nacional de Deforestación. México: Gobierno de México; 2020 [citado ago 2024]. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx>
- [52] FAO. State of the world’s forests 2016. Roma: FAO; 2016 [citado may 2025].
- [53] H. Geist y E. Lambin, “Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation,” *Bioscience*, vol. 52, no. 2, pp. 143–150, 2002 [citado jul 2024].
- [54] E. Chuvieco, *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach*. Boca Ratón, FL: CRC Press, 2010 [citado may 2025].
- [55] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión ambiental [Internet]. México: INECC; 2024 [citado jul 2025]. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/documentos/sistemas-de-informacion-geografica-aplicados-a-la-gestion-ambiental>
- [56] T. M. Aide, M. L. Clark, H. R. Grau, D. López-Carr, M. A. Levy, M. Redo, M. Bonilla-Moheno, G. Riner, M. J. Andrade-Núñez y M. Muñiz, “La expansión agrícola y la pérdida de cobertura forestal en América Latina y el Caribe en el contexto de la demanda global de alimentos y productos agrícolas,” *Environmental Research Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 1–11, 2013 [citado jun 2024].

- [57] A. Baccini, et al., “Tropical forests are a net carbon sink,” *Nature*, vol. 543, pp. 204–208, 2017 [citado may 2025]. doi: 10.1038/nature21707
- [58] P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire y D. Rhind, *Geographic Information Systems and Science*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015 [citado jun 2025].
- [59] P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire y D. Rhind, *Geographic Information Systems and Science*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015 [citado jun 2025].
- [60] Esri, “What is raster data?,” *ArcGIS Desktop Help*, 2024 [En línea]. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- [61] Esri, ¿Qué son los datos ráster? ArcMap | Documentación. *ArcGIS Desktop Help*; 2024 [citado jun 2025]. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- [62] Esri, Tipos de datos vectoriales: puntos, líneas y polígonos. *ArcGIS Desktop Help*; 2024 [citado jul 2025]. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com>
- [63] Global Forest Watch, Jopala, Puebla, México: Datos sobre cobertura forestal y cambio de uso de suelo. GFW, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.globalforestwatch.org>
- [64] M. C. Hansen, et al., “High-resolution global maps of 21st-century forest cover change,” *Science*, vol. 342, no. 6160, pp. 850–853, 2013. doi:10.1126/science.1244693.
- [65] A. Tyukavina, M. C. Hansen, P. V. Potapov, S. V. Stehman, K. Smith-Rodriguez, C. Okpa, y R. Aguilar, “Monitoring forest loss and degradation in the humid tropics: A comparison of methods for Uganda,” *Environmental Research Letters*, vol. 10, no. 3, p. 034009, 2015.
- [66] QGIS Development Team, QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.qgis.org>
- [67] M. Davies, “Mapping and the benefits of QGIS,” IALE UK, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iale.uk/mapping-and-benefits-qgis>
- [68] F. Morán-Valencia, et al., “GIS-Based Wind and Solar Power Assessment in Central Mexico,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 24, 12800, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/24/12800>
- [69] S. Scher y J. W. Messner, “GIS4WRF: QGIS Plugin for the WRF Modelling System,” *arXiv preprint*, arXiv:1912.02095, 2019.

- [70] K. Kazeev y A. Ivanov, "Review of open source QGIS forestry plugins," *Forest Science Issues*, 2022. doi:10.31509/2658-607x-202251-98.
- [71] Google Inc., *Google Earth Pro User Guide*. Mountain View, CA: Google, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://support.google.com/earth/>
- [72] A. Salazar y J. Gómez, "Aplicación de Google Earth Pro para el monitoreo comunitario de bosques en la Sierra Norte de Puebla," *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 12, no. 63, pp. 89–101, 2021.
- [73] L. Romero-Velázquez, et al., "Uso de herramientas SIG para el diseño de rutas de acceso en proyectos solares en zonas rurales," *Energías Renovables en México*, vol. 7, no. 2, pp. 45–56, 2020.
- [74] G. P. Petropoulos y P. K. Srivastava, "Remote sensing of land use/land cover dynamics and modeling of its impact on carbon emissions: A case study using Google Earth Engine," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 14, p. 2786, 2021.
- [75] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau y R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, 2017.
- [76] L. Kumar y O. Mutanga, "Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 10, p. 1509, 2018.
- [77] A. Fernández-Manso, C. Quintano y D. A. Roberts, "Mapping and monitoring deforestation using Google Earth Engine and Landsat time series," *Remote Sensing of Environment*, vol. 238, p. 111356, 2020.
- [78] L. Morales-Barquero, et al., "Uso de Google Earth Engine para evaluar el impacto ambiental de proyectos hidroeléctricos comunitarios en la Sierra Norte de Puebla," *Energía y Medio Ambiente*, vol. 9, no. 1, pp. 34–49, 2022.
- [79] Auravant, "Índices de vegetación y cómo interpretarlos," *Auravant Blog*, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/indices-de-vegetacion-y-como-interpretarlos/>
- [80] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell y D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," en *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, vol. 1, pp. 309–317, 1974.
- [81] C. J. Tucker, "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation," *Remote Sensing of Environment*, vol. 8, no. 2, pp. 127–150, 1979.

- [82] A. R. Huete, "Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices," *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, no. 1-2, pp. 195–213, 2002.
- [83] N. Pettorelli, *The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Un sencillo indicador de la vegetación para ecología y conservación*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2013.
- [84] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *Atlas del Agua en México 2022*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022.
- [85] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Marco Geoestadístico 2020*. División política y geográfica de México. Aguascalientes, México: INEGI, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx>
- [86] Global Forest Watch, *Plataforma de Monitoreo de Cobertura Forestal Global*. World Resources Institute, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.globalforestwatch.org>
- [87] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0*. Aguascalientes, México: INEGI, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/cem/>
- [88] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Serie VI (capa nacional)*. Aguascalientes, México: INEGI, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx>
- [89] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), *Climas de México (Clasificación de Köppen, modificado para México)*. Ciudad de México: CONABIO, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.conabio.gob.mx>
- [90] E. García, *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*, 5ª ed. México: UNAM, 2004.
- [91] Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), *Áreas Naturales Protegidas de México*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp>
- [92] Agrottools, "El NDVI o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada," *Agrottools Blog*, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.agrottools.net/post/el-ndvi-o-%C3%ADndice-de-vegetaci%C3%B3n-de-diferencia-normalizada>
- [93] L. Kumar y O. Mutanga, "Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 10, p. 1509, 2018.

- [94] Centro Estatal de Información Geográfica y Estadística de Puebla (CEIGEP), Ficha municipal de Jopala. Puebla: Gobierno del Estado de Puebla, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ceigep.puebla.gob.mx/fichas/geografico/89/JOPALA>
- [95] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Informe de la Situación del Sector Forestal en México 2022. Zapopan, México: CONAFOR, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conafor>
- [96] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Climas de México (Clasificación de Köppen, modificado para México). Ciudad de México: CONABIO, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.conabio.gob.mx>
- [97] E. García, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana), 5ª ed. México: UNAM, 2004.
- [98] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Guía agroclimática de cultivos tropicales en México. Ciudad de México: INIFAP, 2021.
- [99] Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Diario Oficial de la Federación, México, 2018.
- [100] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Sistema Nacional de Gestión Forestal (SNGF). Ciudad de México: SEMARNAT, 2022.
- [101] A. Ramos y J. Mejía, “Ecoturismo comunitario en la Sierra Norte de Puebla: impactos socioeconómicos y ambientales,” Revista Mexicana de Estudios Turísticos, vol. 15, no. 2, pp. 45–63, 2021.
- [102] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Programa de Pagos por Servicios Ambientales. Zapopan: CONAFOR, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conafor>
- [103] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Lineamientos para la elaboración de Programas de Ordenamiento Ecológico Territorial (POET). México: SEMARNAT, 2020.
- [104] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Estrategia Nacional REDD+ México. Zapopan: CONAFOR, 2021.