

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGÍA

*Análisis comparativo de la cobertura forestal entre la Serie 7
de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI y cartografía
obtenida mediante herramientas de monitoreo remoto e
imágenes satelitales en el estado de Oaxaca de Juárez,
México*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN BIOLOGÍA

P R E S E N T A

GUSTAVO GUTIERREZ AGUILAR

JURADO DE EXAMEN

DIRECTORA: DRA GAMEZ TAMARIZ NIZA
ASESOR: M. EN. C. CALVA VAZQUEZ GERMAN
ASESORA: M. EN. C. MARTINEZ ROSALES MARIA BEATRIZ
SINODAL: M. EN. C. CERVANTES SANDOVAL ARMANDO
SINODAL: M. EN. C. CANTELLANO DE ROSAS ELISEO



FES
ZARAGOZA

Ciudad de México

Agosto del 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Con el más profundo y honesto respeto dedico la presente tesis:

A la memoria de mis abuelos Evelia, Dionicio, Carmen y José quienes gracias a sus historias y recuerdos siempre me han hecho compañía y me acompañaran como un claro recordatorio de mi hogar.

A la memoria de mi tía Roció y mi primo Ismael quienes me inspiraron a no rendirme y ver esta vida siempre con optimismo.

A mi tía Gabriela que ha estado siempre conmigo, siendo mi confidente, amiga y muchas veces voz de la razón cuando la inexperiencia y la juventud me sobrepasaron.

A mis pequeños primos Sophie y Leonardo, esperando sea testigo de mi eterno cariño hacia ustedes y claro, inspiración para superarme en lo que sea que decidan ser de mayores, sepan que siempre podrán contar conmigo.

A mi entrañable amigo Jesús, a quien agradezco haber aliviado mi soledad con su compañía y camaradería, la cual espero supere el final de esta etapa en nuestras vidas y que con el tiempo crezca aún más.

A mi padre Gustavo, por quien llevo mi nombre, quien ha sido guía moral a lo largo de mi vida, quien me dio las herramientas para saberme valer en la vida y me enseñó que, si la equivocación es parte inherente del ser humano, pero siempre debemos estar preparados para afrontarlo y buscar soluciones pues con tiempo y paciencia siempre se encontrara un camino.

Muy especialmente dedico esta tesis

A la memoria de mi madre María del Rosario, desearía haber podido disfrutar de este momento contigo pero la vida no siempre nos da lo que deseamos, sin embargo, agradezco cada momento que compartí contigo cada risa, regaño y lección se grabaron permanentemente en mi memoria y fueron pieza indispensable para la culminación de este proyecto, que es testigo de mi promesa que aun en vida te hice de dedicar mi vida profesional a seguir tu ejemplo usando estos conocimientos para ayudar en medida de mis capacidades a los demás, siempre agradecido por la oportunidad que me diste de conocer este bello mundo, abriré bien mis ojos a lo que tiene por ofrecer y así sentiré que lo miraras conmigo. Hasta siempre Doc.

Así mismo agradezco con toda sinceridad a mi directora de proyecto la Dra. Niza Gámez Tamariz por darme la oportunidad de colaborar con ella y por apoyarme en cada paso de este proyecto que me enseñó a nunca cerrar mis horizontes y siempre estar dispuesto a mejorar y claro, a aprender; además agradezco al resto de mi jurado los M en C. German Calva, M. en C. María Beatriz Martínez, M en C. Armando Sandoval y al M en C. Eliseo Cantellano, por sus consejos y paciencia características de los grandes docentes que son y en nombre de mi generación les agradezco por brindarnos su experiencia y conocimiento.

*...La mirada indiferente de quien te debe la vida
Es como sal en la herida en tu pecho de gigante
Ni una voz que se levante, ninguna mano extendida
Solo pus, insecticida
Solo mugre y albañal
Solo el tirano puñal de la ambición desmedida...*

Fragmento de canción "poema de amor y desesperanza al río Papaloapan" de Susana Harp.

***Análisis comparativo de la cobertura forestal entre la Serie 7 de
Uso de Suelo y Vegetación de INEGI y cartografía obtenida
mediante herramientas de monitoreo remoto e imágenes
satelitales en el estado de Oaxaca de Juárez, México***

Contenido

Resumen	8
Introducción.....	9
Marco teórico	11
Monitoreo ambiental	11
Cobertura Vegetal como indicador ambiental	13
Imágenes satelitales como herramienta para el monitoreo ambiental	13
Imágenes SENTINEL-2	15
Índices espectrales	17
Inferencia de la vegetación en México	19
Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS)	20
Fragmentación del paisaje	22
GOOGLE Earth Engine (GEE), una herramienta para el monitoreo ambiental	25
El estado de Oaxaca de Juárez, México	26
Planteamiento del problema	27
Pregunta de investigación	27
Justificación	27
Hipótesis	28
Objetivos	28
General	28
Particular	28
Material y método	29
Zona de estudio	29
Variables	30
Unidades Geográficas de Operación (OGUs)	31
GEE	32
Elaboración de mascara shp	35
Rasterización	36
Recorte en base a Uso de Suelo y Vegetación de la Serie 7	36
Reclasificación de imágenes Ráster satelitales	37
Puntos del Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS) 2015-2020	37
Indicadores ambientales	38
Elaboración de matrices	39

Resultados estadísticos, gráficos y cartografía	39
Resultados	41
Chi cuadrada	42
Métricas de fragmentación.....	43
Numero de parches por comunidad vegetal	43
Tamaño medio de parches.....	44
Longitud de borde.....	45
Comparativo de cobertura forestal en imágenes Ráster desarrolladas e INEGI	46
Discusión de resultados.....	63
Análisis de fragmentación por comunidad forestal	65
Diferencias en imágenes Ráster.....	70
Conclusiones	86
Suplementos	87
Cartografía	87
Cartografía desarrollada	87
Cartografía INEGI	95
Tablas	103
Índices espectrales empleados para cada celda.....	103
Código fuente de GEE	105
Referencias	110

Resumen

La importancia del estudio, control y análisis oportuno de la fragmentación presente en la cobertura forestal resulta hoy en día una herramienta necesaria e indispensable para la pronta toma de decisiones y manejo sustentable de los recursos forestales, ante esta necesidad la detección de los cambios espaciales en la cobertura forestal mediante herramientas de monitoreo remoto como lo son imágenes espectrales satelitales y software de investigación como GOOGLE EARTH ENGINE hoy en día se postulan como una opción viable, el objetivo de la presente disertación es generar un producto cartográfico derivado de imágenes satelitales e índices espectrales de la vegetación, que permita realizar inferencias del estado, superficie y fragmentación de la cobertura forestal en el estado de Oaxaca, estado cuya topografía, hidrografía y orografía lo hace uno de los más biológicamente diversos del país e ideal para este análisis, por ello en la presente disertación se compararon las áreas de cobertura forestal, así como otras tres métricas de fragmentación de los recursos publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en su Serie VII de Uso de Suelo y Vegetación con imágenes satelitales del año 2023 así mismo el producto cartográfico se evaluó estadísticamente con una prueba de chi cuadrada para conocer su capacidad para inferir la cobertura forestal.

Introducción

La revolución industrial abrió las puertas a nuevos avances en todas las actividades humanas, desde las productivas, agrícolas, comerciales, entre otras; y si bien el progreso permitió nuevas comodidades y alternativas en lo que a producción compete, también es innegable el papel que ha tenido en fenómenos como el cambio climático, la deforestación, la pérdida y fragmentación de ecosistemas y poblaciones naturales (Hernández et al., 2019). En este sentido, el uso de herramientas que permiten el monitoreo ambiental y el seguimiento de los ecosistemas, se ha convertido en una práctica de gran relevancia.

Entender a los paisajes dentro de los ecosistemas, como fenómenos de repetición en espacio de un conjunto de elementos que están regidos bajo las mismas funciones ambientales, nos permite hacer inferencias acerca de su estado y dinámicas (Rivera Pavón & Senna, 2017). Para ello, se han desarrollado herramientas que permiten describir, ya sea cualitativa o cuantitativamente, distintas propiedades de los ecosistemas; también llamados indicadores ambientales (Perevochtchikova, 2013). La cobertura vegetal es un elemento esencial para el establecimiento y permanencia de poblaciones naturales, además juega un papel preponderante en las dinámicas atmosféricas, hídricas y de suelos en los ecosistemas (Jiménez Moreno et al., 2019); es por ello, que, dentro de toda la gama de indicadores ambientales, quizá el grupo más empleado sea el de los indicadores de la cobertura vegetal.

El uso de imágenes satelitales como herramienta para el monitoreo remoto de los indicadores ecológicos, ha ampliado enormemente el conocimiento de la distribución espacial de las coberturas forestales o los usos de suelo y por lo tanto se ha convertido en una herramienta fundamental para la gestión ambiental (Cano Salinas et al., 2017). El análisis, identificación y mapeo de las dinámicas vegetales a partir de percepción remota, en muchos casos emplea índices espectrales de vegetación; dichos índices son la combinación de dos, tres o incluso cuatro bandas espectrales, que registran el espectro infrarrojo (Ghandi et al., 2015). Existen dos grupos generales de métricas para describir el estado de la cobertura vegetal, los de la cuantificación del área total y sus dinámicas en el tiempo; y los de la fragmentación del paisaje (Echeverry & Harper. 2009).

Una de las plataformas más poderosas para realizar análisis a partir de imágenes de satélite es Google Earth Engine (GEE). GEE opera a través de la nube, lo cual permite utilizar los recursos de análisis y almacenamiento de los servidores de Google desde nuestra computadora personal; ello

brinda al usuario visualizar y analizar una enorme cantidad de recursos cartográficos e imágenes de satélites a nivel planetario. Esta plataforma es de uso abierto en la gran mayoría de sus recursos y te permite llevar a cabo investigación y monitoreo con herramientas de teledetección y *machine learning*, enfocados a la representación y predicción de fenómenos atmosféricos o bien monitoreo de recursos y mucho más.

El estado de Oaxaca de Juárez ubicado en la costa sur del pacifico mexicano resulta el escenario idóneo para utilizar herramientas de monitoreo remoto, pues, si bien ya es considerada como la entidad más biológicamente diversa del país, se debe no solo por su fauna y flora tan ricas sino también por la gran heterogeneidad de su cubierta forestal (Meave et al., 2012), debido a la integración entre las características del territorio, sus formas y relieves, el clima y su hidrología es que cuenta con la complejidad y la magnitud que muchas veces actúa como factor atenuante para realizar investigaciones a gran escala que resulta ideal (CONABIO, 2018), más aún dadas las constantes presiones demográficas derivadas de una población en constante crecimiento actúan como un factor de constante deterioro (Meave et al., 2012), deterioro que desde hace unos años parece haber empeorado siendo que desde inicios de siglo la tasa de deforestación en el estado de Oaxaca se ha mantenido en promedio de 18,757 Ha por año (Sandoval García et al., 2021), por ello es necesario encontrar métodos que faciliten la investigación, gestión y regulación de las comunidades forestales que comprenden al estado.

Es por todo lo mencionado, que el presente trabajo busca generar productos cartográficos de alta resolución (10m x 10 m), que permitan describir el estado de la cobertura vegetal en el estado de Oaxaca de Juárez.

Marco teórico

Monitoreo ambiental

El monitoreo ambiental surge como una herramienta para facilitar el seguimiento a las actividades, obras y proyectos implementados en un sitio, de forma que se tengan elementos para la toma de decisiones correctivas o mitigantes orientadas al uso racional y sustentable de los recursos (Hernández et al., 2019). Dado que no podemos tener toda la información del estado de los ecosistemas, se han utilizado indicadores ambientales. Un indicador ambiental se define como un parámetro o valor derivado de mediciones, que proporciona información acerca del estado de un fenómeno, ambiente o área con un significado, que va más allá de la asociación directa del parámetro mismo (PAOT, s.f). Los indicadores ambientales son elementos descriptores del paisaje que proporcionan la información clave sobre el estado del ambiente y de los recursos naturales de un territorio, así como su relación con las actividades humanas, económicas y políticas que tienen efectos sobre el ambiente (SEMARNAT, 2022).

Como ya se mencionó, el uso de indicadores ambientales permite abordar la relación entre los componentes naturales y humanos de un ambiente. Y es precisamente esto, lo que los posiciona como elementos de gran valía para la toma de decisiones, permitiendo reducir el número de medidas y parámetros para ofrecer una representación lo más cercana a la realidad de un sitio de estudio; además de simplificar los procesos de comunicación (PAOT, s.f).

De acuerdo con la etapa de diseño y la cadena de causalidad de *Presión-estado-respuesta* (*sensu* los estándares de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), los indicadores ambientales se pueden dividir, de manera general, en tres categorías (Perevochtchikova, 2013):

- **Indicadores de presión.-** Reflejan acciones directas, de tipo antropogénico sobre un ambiente, tales como emisión de contaminantes y descarga de aguas residuales; o bien acciones de tipo indirectas, como el crecimiento demográfico y la producción primaria .
- **Indicadores de estado.-** Buscan caracterizar y/o diagnosticar la calidad ambiental de elementos naturales, tales como el aire, agua, suelo, vegetación, flora y fauna; para luego asociarlos a procesos de producción socioeconómica.

- **Indicadores de respuesta.**- Plasman la interacción de los indicadores, ya sea de presión o de estado, con la respuesta social y/o política en materia ambiental; por lo que son esenciales en la evaluación del desempeño ambiental de un grupo social, sobre un territorio determinado.

En México la Secretaría de Medio Ambiente (SEMARNAT) mediante la Dirección general de Estadística e Información Ambiental han diseñado un organismo denominado Sistema Nacional de Indicadores ambientales (SNIA), el cual tiene como propósito esencial proporcionar la información clave sobre el estado del ambiente y de los recursos naturales del país así como su relación con la sociedad humana, esto al integrar esfuerzos de diversas dependencias federales, académicas y no gubernamentales (SEMARNAT, 2023); para lo cual se ha desarrollado una clasificación propia de los tipos de indicadores ambientales en función de dos conjuntos indicadores claves e indicadores básicos; los primeros consisten en 15 indicadores que proponen una visión sintética de la situación de los principales tópicos ambientales tales como (SEMARNAT, 2023); por otro lado el conjunto de indicadores básicos que están dirigidos hacia un público que se encuentra interesado en el medio ambiente así como de sus problemáticas más y sin embargo, no posee conocimientos previos (SEMARNAT, 2023).

Si bien los indicadores ambientales resultan ser una herramienta eficaz para el estudio de los ecosistemas, éstos presentan diferentes limitaciones, que de acuerdo con Perevochtchikova (2013) se pueden agrupar en dos:

- Limitantes institucionales-. Dependientes del apoyo institucional para el desarrollo de metodologías que sean acordes con el manejo estadístico de la información da sustento a la toma de decisiones.
- Limitantes técnicas-. Dependientes de la calidad y cantidad de datos básicos o estadísticos, así como del desarrollo de herramientas que permitan monitoreos continuos.

Cobertura Vegetal como indicador ambiental

La cobertura vegetal es un elemento esencial para el establecimiento y permanencia de poblaciones naturales, además juega un papel preponderante en las dinámicas atmosféricas, hídricas y de suelos en los ecosistemas (Jiménez Moreno et al., 2019); es por ello, que, dentro de toda la gama de indicadores ambientales, es quizá el grupo más empleado. Al entender los cambios en la cobertura vegetal, tanto temporales como espaciales, se pueden abordar la dinámica de los ecosistemas y así, mejorar el entendimiento del estado, distribución y permanencia de la vegetación en una región determinada (Ceceña Sánchez et al., 2021). Para ello, se han desarrollado diferentes métodos, los cuales se han relacionado y favorecido con el acelerado desarrollo tecnológico; siendo las metodologías de percepción remota las más usadas por los grupos académicos y los gobiernos (Ayanlade, 2017).

El estudio de la cobertura vegetal, se encuentra delimitado por las unidades geográficas del paisaje, las cuales se definen como las unidades morfológicas y estructurales (Vila Subirós & Llausás., 2006). Estas unidades del paisaje corresponden a la delimitación de un territorio con una coherencia visual y estructura definida y están determinadas por el relieve, el clima, los cuerpos de agua presentes y la actividad humana. La dinámica y la relación entre estas unidades, se encuentra funcionalmente interconectada entre sí, puesto que las partes o unidades, no son entes aislados y existe flujo de materia y energía entre éstas (Vila Subirós & Llausás., 2006). Además de la cuantificación de estas unidades del paisaje, para comprender su dinámica en tiempo y así poder generar predicciones, es esencial considerar atributos de carácter histórico, cultural y de significancia para las sociedades que los habitan (López-Contreras et al., 2019). Existen dos grupos generales de métricas para describir el estado de la cobertura vegetal, los de la cuantificación del área total y sus dinámicas en el tiempo; y los de la fragmentación del paisaje; entendiéndose por fragmentación el rompimiento de amplias extensiones de hábitat (Echeverry & Harper., 2009).

Imágenes satelitales como herramienta para el monitoreo ambiental

El uso de imágenes satelitales como herramienta para el monitoreo remoto del medio ambiente se produjo a finales de la década de 1950 y con ello se revolucionó el estudio de la diversidad y complejidad de los ecosistemas (Salinas Zavala et al., 2017); y con ello, la información acerca de la distribución espacial de las coberturas forestales o los usos de suelo (Cano Salinas et al., 2017).

En el caso de la cobertura vegetal, mucha de la información sobre el tipo y su condición es derivada de índices espectrales de la vegetación. Para ello se han diseñado un gran número de sensores satelitales que registran distintos aspectos de la radiación electromagnética que refleja la superficie terrestre. Una vez que el satélite recibe la información de estos aspectos, codifica la información y la almacena; y dado que la radiación reflejada registra cambios en función de la naturaleza de la superficie terrestre con la cual interactuó, el registro de estas variaciones en el espacio y en el tiempo, nos permiten hacer inferencias acerca de su naturaleza, estructura y configuración espacial. En el caso de la energía reflejada por la cobertura vegetal, es posible detectar variaciones relacionadas con el tipo de vegetación, fenología, estado hídricos, densidad, etc. (Manzo Delgado & Meave., 2003).

El comportamiento espectral de la vegetación varía de acuerdo con la longitud de onda que absorbe el tejido vegetal de la hoja al ser irradiada por los rayos del sol (Figura 1). Se registra una alta **absorción** en regiones del ultravioleta (0.01-0.39 micrómetros), el azul (0.43-0.5 micrómetros), rojo (0.6-0.76 micrómetros) y el infrarrojo medio (1.35-2.6 micrómetros); y una alta **reflectancia** en longitudes del verde (0.5-0.76 micrómetros) y del infrarrojo cercano (0.76-1.35 micrómetros), concentrando en estos el 90% de la reflectancia (Arango Gutierrez et al., 2005). Sin embargo, no todo el tejido foliar interactúa de igual forma, la energía reflejada está estrechamente correlacionada con distintas características del tejido, como su naturaleza, edad, actividad fotosintética, estado hídrico, entre otros. Esto permite detectar cuando el tejido foliar se halla en una etapa de desarrollo favorable y otro cuando entra a su periodo de senescencia. Durante la etapa de crecimiento se observa que el contenido de clorofilas aumenta rápidamente, así como el contenido de agua provocando una menor reflectividad en la región visible y mayor porción en la región infrarroja; mientras que durante la senescencia la superficie foliar y su actividad fotosintética disminuye, registrando además pérdida resultando en una marcada disminución de la reflectancia en el infrarrojo y un aumento de ésta en la región visible (Manzo Delgado & Meave., 2003).

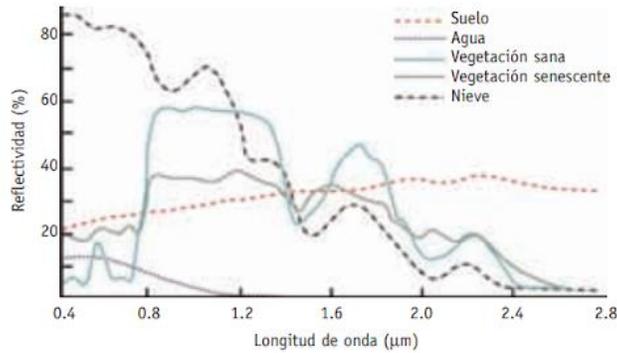


Figura 1. Algunos de los espectros de reflectancia correspondientes a distintos componentes del ambiente (Fuente: Manzo Delgado & Meave., 2003).

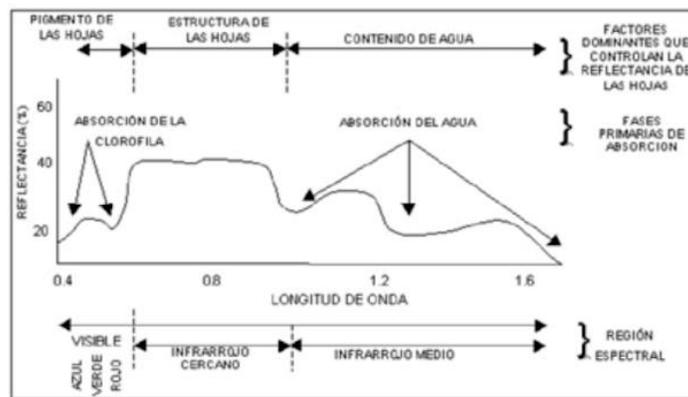


Figura 2. Comportamiento espectral de la vegetación en longitudes del espectro de luz visible (Arango Gutierrez et al., 2005).

Aunado a lo anterior, durante la senescencia los pigmentos se tornan altamente transparentes a la radiación solar, lo que provoca que la energía que incide en la hoja, entre el 45 y 50%, sea reflejada (Arango Gutierrez et al., 2005).

Imágenes SENTINEL-2

Las imágenes satelitales SENTINEL-2, desarrolladas por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del programa COPERNICUS, son derivadas de sensores pasivos multiespectrales que proveen información a tres resoluciones espaciales, alta resolución temporal y se encuentran integradas por 13 bandas que abarcan desde el espectro visible hasta el infrarrojo (Wang et al., 2018). Este satélite recopila imágenes cada entre 6 y 12 días, teniendo una resolución de 10, 20 o 60 m y una capacidad máxima de 15,000 km para la adquisición continua de datos (ESA, 2023; Figura 3).

Sentinel-2 Constellation Observation Scenario:
Revisit Frequency



Validity start: June 2022

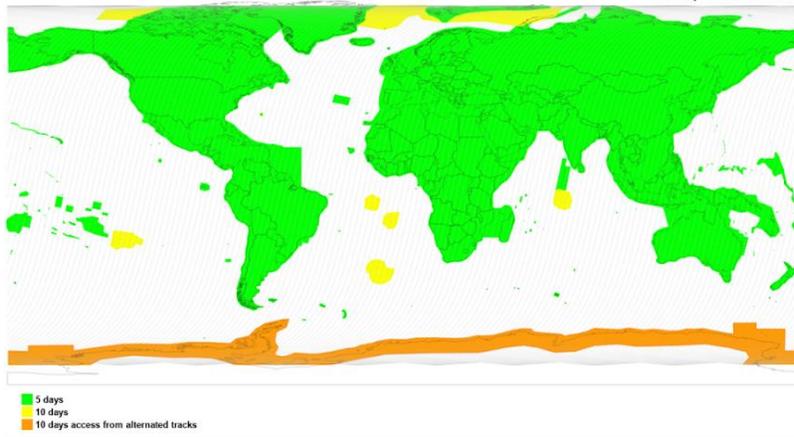


Figura 3. Recorrido del satélite SENTINEL-2 (Fuente: ESA, 2023).

Desde 2022 todos los datos adquiridos por la misión SENTINEL 2 son procesados sistemáticamente hasta nivel 2A (Figura 4), lo que implica que la calidad de los productos pasa por un proceso de clasificación de escena, corrección atmosférica; así mismo dispone de productos adicionales como los mapas de espesor óptico de aerosoles (AOT), mapa de vapor de agua (WV), un mapa de clasificación de escenas (SCL) e indicadores de calidad para probabilidades de nubes o nieve con una resolución de 60 metros (ESA, 2023).

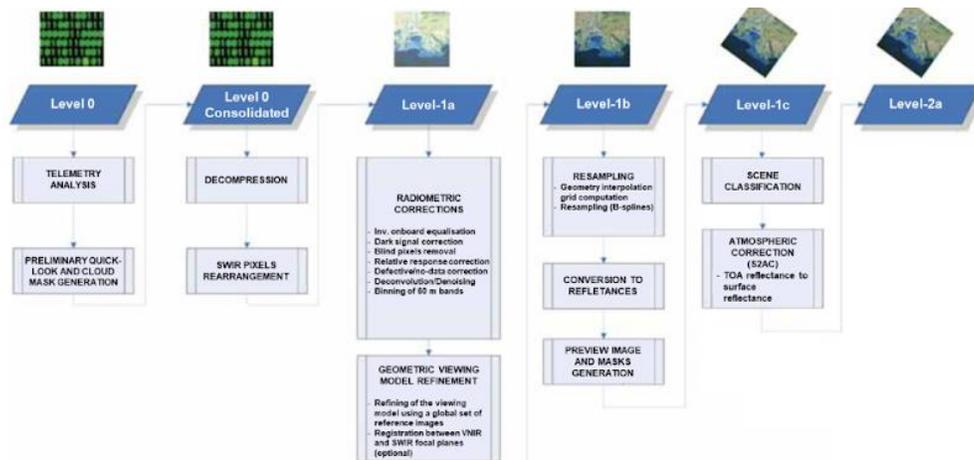


Figura 4. Proceso de imágenes satelitales de SENTINEL-2 (Fuente: ESA, 2023).

A partir del cálculo de algoritmos muy simples y usando los valores de algunas de las bandas del registro multispectral, es posible realizar inferencias del tipo y estado de la materia sobre la cual impacta y se refleja la radiación solar. En el caso de trabajar con amplitudes de onda absorbidas por el tejido vegetal, este tipo de cálculos son conocidos como índices multispectrales de la vegetación

y son calculados a partir del establecimiento de proporciones o combinaciones lineales de la luz del espectro visible (azul, verde o rojo) o bien espectros del infrarrojo; la reflectancia de estos últimos, estrechamente correlacionada con la naturaleza y estado del tejido foliar por lo que son ampliamente utilizados para la estimación de propiedades biofísicas (Huete et al., 2012). Una vez que se cuenta con los valores de alguno de los índices, éstos deben de ser categorizados y agrupados para permitir delimitar y clasificar áreas con características vegetales particulares (Muñoz Aguayo, 2013). Para la presente disertación se analizarán las características y utilidad de 5 diferentes índices espectrales, mismos que a continuación se describen.

Índices espectrales

NDVI

Índice de Vegetación Diferenciada Normalizada (NDVI), propuesto por Rouse et al., 1974. Debido a su sencillez de cálculo y a su intervalo de variación fijo, ha sido el índice de la vegetación más utilizado (Ceceña Sánchez et al., 2021). Su cálculo se basa en la diferencia de ratio entre el intervalo de reflectancia en el rojo cercano (*Red*) a las bandas infrarrojas de los sensores correspondientes (Fig.), razón por la cual ha sido empleado para el análisis del cambio climático (Ghandi et al., 2015). Es importante mencionar que sus valores son altamente susceptibles a los efectos atmosféricos (Jaskula & Sojka, 2019).

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

NIR = espectro del infrarrojo cercano (banda 5 en el caso de las imágenes Sentinel2).

Red = espectro del rojo (banda 4 en el caso de las imágenes Sentinel2).

Otra de las limitantes del NDVI es que es altamente sensible a la reflectancia del suelo, lo que limita su potencial de diferenciación, particularmente en áreas áridas o semiáridas (Ceceña Sánchez et al., 2021); sin embargo, es un índice que minimiza en cierto grado los efectos topográficos y produce una escala lineal de medición donde los valores negativos representan áreas desprovistas de vegetación (Muñoz Aguayo, 2013).

GCI

Índice de Clorofila Verde de la vegetación (GCI por sus siglas en inglés), propuesto por Gitelson et al. 2003 con el objeto de estimar el contenido de clorofila en las hojas y es por ello, que se ha utilizado para realizar análisis de la salud y estrés de diferentes comunidades vegetales (Bentekhici et al., 2022). Resulta un índice útil para realizar monitoreo ambiental de la estacionalidad de la vegetación, el estrés ambiental, o el control de las prácticas agrícolas (Alonso, 2023). Se calcula a partir de las bandas que van del infrarrojo hasta el verde.

$$GCI = \left(\frac{NIR}{Green} \right) - 1$$

NIR= Banda 5 infrarrojo cercano ; Green= Banda 3 verde (1.57 μ m- 1.65 μ m).

NDWI

Índice de agua normaliza (NDWI), es un índice comúnmente empleado en la detección de la severidad de incendios forestales (Flores Rodríguez et al., 2021). Inicialmente se diseñó como una herramienta para delimitar masas superficiales de agua y evaluar diferentes aspectos de las mismas (turbidez, mitigación de la reflectancia del suelo). Este índice utiliza las bandas que reflejan el infrarrojo de onda corta (SWIR) y las del infrarrojo cercano (NIR), lo que permite analizar el contenido de materia seca en el follaje de la vegetación, así como los cambios en el contenido de agua en el tejido foliar; así mismo es utilizado en la detección de terrenos inundados y monitoreo de humedales (Sergieieva, 2023).

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

NIR= Banda 5 infrarrojo cercano ; SWIR= Banda 6 (1.57 μ m- 1.65 μ m).

ARVI

Fue diseñado con el fin de mitigar el efecto de la variación atmosférica, especialmente significativa en el caso del NIR; logrando así reducir significativamente la influencia atmosférica ocasionada por el uso de aerosoles. Su algoritmo matemático fue diseñado como una corrección al índice NDVI y su uso suele enfocarse sobre regiones con alto contenido de aerosoles atmosféricos (Jaskula & Sojka 2019). Su intervalo de acción va desde la reflectancia de las bandas de rojo hasta el azul (Alonso, 2023).

$$ARVI = \frac{\rho NIR - (2\rho Red - \rho Blue)}{\rho NIR + (2\rho Red - \rho Blue)}$$

NIR= Banda 5 infrarrojo cercano ; Red= Banda 4 roja (0.64 μ m- 0.67 μ m); Blue= Banda 2 azul (0.45 μ m- 0.51 μ m).

SIPI

Índice de pigmentación sensible a la estructura (SIPI), fue diseñado para el análisis de vegetación con estructura de dosel variable, es capaz de registrar variaciones de la relación entre carotenoides y clorofila, razón por la cual permite monitorear la salud de vegetación en zonas con gran variabilidad en el dosel (Alonso, 2023). Es útil en la identificación de signos de enfermedad o estrés vegetal, en donde bajos valores de éste, se han relacionado con la pérdida de clorofila en el tejido vegetal (Sergieieva, 2023).

$$SIPI = \frac{NIR - Blue}{NIR + Red}$$

NIR= Banda 5 infrarrojo cercano (0.85 μ m- 0.88 μ m); Red= Banda 4 roja (0.64 μ m- 0.67 μ m); Blue= Banda 2 azul (0.45 μ m- 0.51 μ m).

Inferencia de la vegetación en México

En México existe un organismo público autónomo que es responsable de recabar información estadística del territorio, recursos naturales, población y economía, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). INEGI se apoya en el uso de tecnología de teledetección para mejorar los recursos cartográficos mediante la incorporación de diferentes procesos (INEGI, 2023), tal es el caso de la Serie 7 de Uso de Suelo y Vegetación.

La Serie 7 de INEGI, integra 149 conjuntos de datos a una escala de 1:250,000, se elaboró en el periodo de 2017 a 2021 y se derivó de datos de campo, datos conglomerados del Inventario Nacional Forestal recabados hasta 2018, así como de la interpretación de gemedias generadas a partir de imágenes Landsat del 2018 (INEGI, 2021). Se encuentra estructurada como objeto vectorial, mostrando la distribución del uso de suelo agrícola, la vegetación natural e inducida además de indicar los usos pecuario y forestal presentes en el territorio nacional.

Los datos duros que dan soporte a la Serie 7 de INEGI provienen del Inventario Nacional Forestal (INF), organismo que en el año 2000 renovó el inventario forestal.

A partir de realizar comparaciones de cartografía oficial con imágenes satelitales, es común que se generen falsos cambios resultantes de 2 tipos de errores (Mas & Fernández., 2003):

- Errores de geometría; es decir polígonos cuyos límites no son exactamente iguales a los de la cartografía previa, estos comúnmente se originan en áreas relativamente pequeñas (Mas & Fernández., 2003).
- Errores de atributo o etiqueta; estos se originan al interpretar las cartas, pues debido a las similitudes que puede haber entre las paletas de color y clasificación pueda se causa de confusión (Mas & Fernández., 2003).

Lo anterior pudiera ser interpretado como que los valores obtenidos a base de imágenes satelitales pueden llegar a tener mejor delimitación de los usos de suelo comparados con la cartografía oficial desarrollada por INEGI (Flores Cesáreo et al., 2020).

Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS)

El Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), conforma un instrumento de la política forestal nacional que es capaz de proporcionar información pertinente y actualizada sobre las características, dinámicas, y calidad de los recursos forestales y aquellos asociados a este, el cual está a cargo de la Secretaría de Medio Ambiente (SEMARNAT) (INEGI, 2022), cuyo objetivo principal es el de realizar un monitoreo y caracterización de los recursos forestales así mismo proporcionar información basada en datos de campo que son registrados mediante un muestreo sistemático que abarca todos los ecosistemas presentes en el país, desarrollando un total de 26,220 conglomerados, para el último inventario realizado durante el periodo 2015-2020.

Los conglomerados del INFyS denotan masas compactas de una misma comunidad vegetal. Además de sus coordenadas, la base de datos de los conglomerados describe 39 variables que describen distintos aspectos de la elevación, pendiente, exposición, posición geográfica, tipo de vegetación y clima. En el caso de los conglomerados correspondientes al periodo de 2015-2020, las unidades geográficas corresponden a áreas de 1,600 m² subdivididas en 4 subunidades (Ricker et al., 2020; Figura 5).

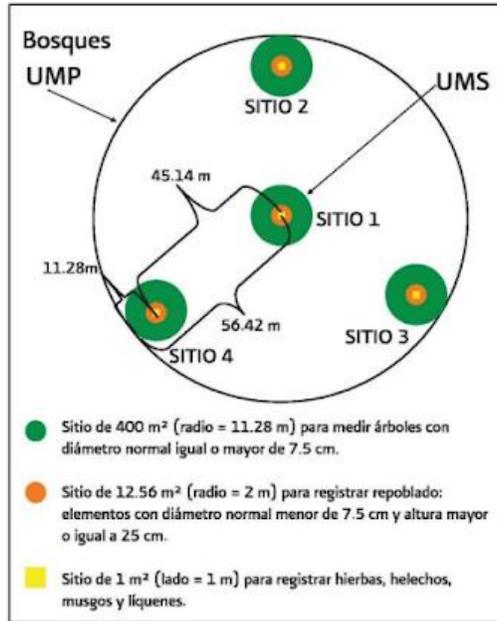


Figura 5. Metodología de muestreo del INFyS (Fuente: Ricker et al., 2020).

Es importante mencionar que de acuerdo con Ricker y cols, este modelo muestreo espacial es limitado, pues si se aprovecharán los 33,745 conglomerados, entonces cada conglomerado representa en promedio 58.1km², área que corresponde a un cuadrado de 7.6 por 7.6 km, por lo tanto, deben ser analizados en conjunto (Ricker et al., 2020).

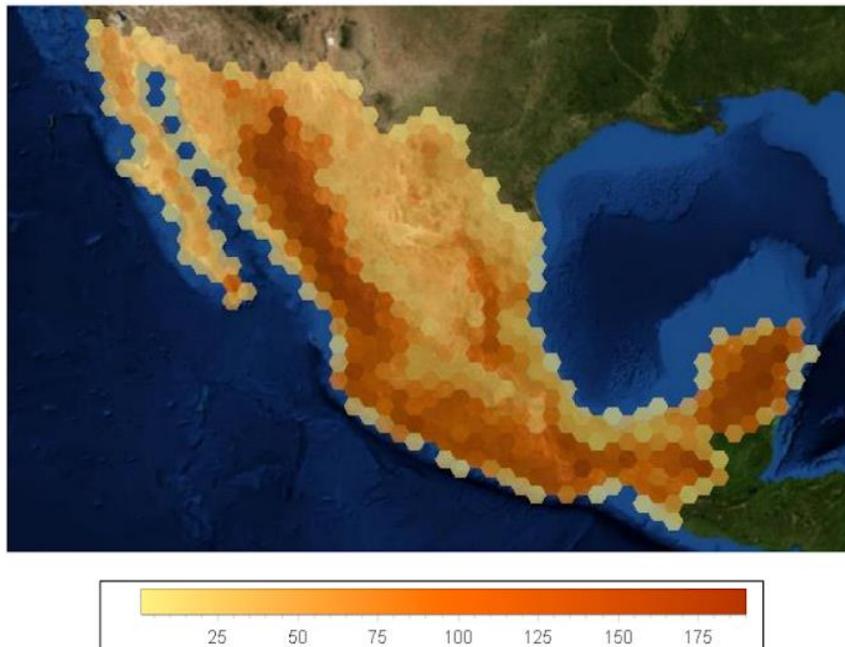


Figura 6. Densidad de puntos en el INFyS ciclo 2015-2020 (Fuente: SNMA).

Fragmentación del paisaje

La fragmentación es un proceso clave para entender cómo las dinámicas de ocupación del suelo intervienen en la calidad de los bosques, pues es a través del análisis de los cambios en la composición vegetal que afectan de manera directa la estructura y la composición de las comunidades se puede comprender cómo inciden en las interacciones entre especies y procesos biológicos (Granados et al., 2014), por ello la fragmentación de las comunidades vegetales da lugar a la interrupción de procesos ecológicos y por lo tanto, a la degradación de la biodiversidad, riqueza, estructura y composición de sus comunidades; así mismo afecta elementos esenciales de la funcionalidad del ecosistema (Magnago et al., 2014; Faria et al., 2023). Los patrones espaciales de las distintas clases de comunidades vegetales, son elementos determinantes de la permanencia y dinámica de las poblaciones naturales, ya que se encuentran estrechamente correlacionados a un gran número de procesos ecológicos (Wang et al., 2014), por lo que se ha convertido en un problema ambiental de proporciones mundiales, provocada principalmente por disturbios que resultan en la reducción y aislamiento de áreas de hábitat natural a nivel de paisaje (Echeverry & Harper, 2009).

Para poder evaluar la fragmentación de las comunidades vegetales, se han propuesto un gran número de métricas, las cuales a través de una combinación de variables directamente relacionadas con el dosel, permiten hacer inferencias acerca de distintos elementos como tamaño de los parches, la forma de éstos, la conectividad, entre otros; siendo importante remarcar que estos elementos se encuentran estrechamente correlacionados con distintas dinámicas ecológicas de las comunidades naturales (Wang et al., 2014). Sin embargo, más allá de las métricas que se empleen, es fundamental seleccionar métricas que se deriven de cuantificar la cantidad de hábitat, así como métricas que permiten describir la estructura y los patrones del hábitat (Wang et al., 2014).

La elección de estas métricas se enfocan de manera general en dos factores la abundancia del hábitat y la forma en que se distribuyen, así, algunas métricas poseen una alta correlación con la abundancia de hábitat, que si bien las hace inapropiadas para medir la fragmentación general del paisaje, las hace funcionales para distinguir entre coberturas forestales de diferentes fuentes de información espacial descritos a diferentes niveles de abundancia del hábitat (Wang et al., 2014); otras métricas que poseen una alta relación con la abundancia del hábitat, más son aquellas que se encuentran más relacionadas con la agregación de los hábitats los que son mejores indicadores de la fragmentación (Wang et al., 2014), son los cambios que los fragmentos de paisaje sufren con el

paso del tiempo en sus áreas de borde relacionadas con el efecto de borde, el cual supone la aparición de propiedades y dinámicas generadas por el contacto de los fragmentos de bosque con el exterior y que a la largo convertirán los bordes en hábitats diferentes de los que no existen en el interior de los fragmentos (Granados et al., 2014); la alta intensidad y frecuencia de disturbios en los bordes de los fragmentos puede explicar la reducción en la funcionalidad comparada con el interior del fragmento, lo que a su vez indica incluso que algunas partes de espacio funcional sin bordes podrían dejar de ser funcionales o incluso desaparecer (Magnago et al., 2014).

A continuación, se describirán las métricas contempladas para la elaboración de esta disertación.

Área total

Calcula el área correspondiente a todos los fragmentos (Correa et al., 2012).

Numero de fragmentos

Clasifica al número de fragmentos en un tipo particular de ecosistema, matemáticamente se define como una media simple de la subdivisión o fragmentación del mismo y se calcula sumando el número de fragmentos en que está dividido un ecosistema en un área de interés, para lo cual el valor mínimo es 1 cuando el ecosistema o clase no está fragmentado y aumenta en función de la fragmentación (Echeverry & Harper 2009); consiste en un indicador esencial para varios procesos ecológicos que adicionalmente se puede emplear como índice de heterogeneidad del paisaje (Correa et al., 2012).

Tamaño medio de los fragmentos

Describe al área total de una clase, es una medida específicamente diseñada para analizar la composición del paisaje y se calcula sumando la superficie de todos los fragmentos en un área de interés y dividir luego el resultado por el número de fragmentos (Echeverry & Harper 2009).

Perímetro de los fragmentos

Describe la cantidad total de borde, el cual es relevante para el estudio de muchos fenómenos ecológicos tales como el efecto de borde, el cual provoca cambios en la composición y la estructura de la vegetación debido a alteraciones en microclimas y eventos de depredación (Correa et al., 2012).

Forma de los fragmentos

Corresponde a la suma de perímetros de cada área dividido por la raíz cuadrada del área para cada clase de interés o para todos los fragmentos en conjunto, su resultado cuando es igual o cercano a 1 significa que los fragmentos son compactos y entre más alejado sea el resultado de 1 más convoluta o irregular es la forma (Echeverry & Harper, 2009); es capaz de calcular la complejidad de la forma media de los fragmentos de paisaje y su importancia radica en la influencia que ejerce sobre numerosos fenómenos ecológicos como la migración de especies; su impacto sobre las dinámicas ecológicas se encuentra asociado al efecto de borde (Correa et al., 2012).

Distancia entre fragmentos

Es un factor esencial al momento de determinar el valor de conservación de un determinado fragmento ya que determina el movimiento de los organismos y condiciona factores como el flujo génico y el acceso a los recursos. Este indicador se calcula sumando las distancias que separan un fragmento de un ecosistema con respecto a su vecino más cercano para luego dividirse el resultado por el número de fragmentos (Echeverry & Harper, 2009).

GOOGLE Earth Engine (GEE), una herramienta para el monitoreo ambiental

La herramienta Google Earth Engine (GEE), se genera a finales del año 2010 como una forma de eliminar la limitante computacional al momento de realizar monitoreo ambiental y permitir así, realizar análisis complejos, involucrando grandes cantidades de datos a partir de cartografía especializada e imágenes satelitales (Perilla & Mas., 2020); sin embargo es hasta 2017 que se presenta como una plataforma de uso abierto para el análisis y monitoreo remoto sustentada en base de datos geoespaciales masivas (Wang et al., 2020).

La herramienta está compuesta de cuatro elementos: **infraestructura** de Google, que comprende servidores digitales y herramientas de análisis en paralelo con al menos 10,000 CPU's (Perilla & Mas., 2020), a la cual se puede acceder y controlar desde aplicaciones de programación API (Gorelck, et al., 2017); **acervo de datos** (dataset), disponible de forma libre para los usuarios, en la mayoría de los productos cartográficos (Perilla & Mas., 2020); **implementación** vía APIs, las cuales permiten una programación, ejecución simple y eficiente de rutinas de análisis - es importante mencionar que dichas rutinas están predefinidas por Google y no es posible modificarlas- (Perilla et al., 2020); y finalmente el **editor de código**, proporciona un entorno de desarrollo integrado *on line*, que enlaza la ejecución de los otros cuatro elementos (Perilla & Mas., 2020).

Dada la versatilidad con la cual se puede operar GEE, éste ha facilitado la realización de estudios ambientales implementados a partir del monitoreo remoto de diferentes elementos del medio natural y de sus interacciones con el ser humano y sus actividades (Perilla & Mas., 2020).

El estado de Oaxaca de Juárez, México

El estado de Oaxaca es considerado como el estado con mayor biodiversidad del país, su territorio cuenta con todas las formaciones forestales; del total de territorio estatal 66.1% está cubierto por superficies forestales lo que equivale a 6,295,473.77 Ha (COEFO-Oax, 2023):

- Coníferas; 603,247 Ha
- Coníferas y latifoliadas; 1,524,088.14 Ha
- Latifoliadas; 742,401.02 Ha
- Bosque Mesófilo de Montaña; 536,576.21 Ha
- Selvas altas y medianas; 1,532,335.97 Ha
- Selvas bajas; 1,156,918.16 Ha
- Manglar; 30,635.22 Ha
- Zonas semiáridas; 25,980.07 Ha
- Zonas áridas; 27,283.72 Ha
- otras asociaciones; 67,687.84 Ha
- Otras áreas forestales; 48,320.41 Ha

En Oaxaca la mayor parte de la biodiversidad se asienta en sus áreas forestales, por lo cual su pérdida y perturbación ecológica constituye una amenaza directa para su integridad y subsistencia (CONABIO, 2018). Además de contar con altos niveles biodiversidad, Oaxaca presenta otra constante de vital importancia, dicha biodiversidad se encuentra asociada a territorios con una significativa presencia de población indígena, cuya vida cotidiana se caracteriza aún por una interacción muy directa con el medio ambiente natural, en especial con los bosques y selvas; lo anterior pone en riesgo la riqueza biocultural que se vive en el estado.

En contraste con la alta riqueza biológica, biocultural, lingüística y de recursos presentes en el estado de Oaxaca éste, registra altos índices de marginación y pobreza, siendo la región de la mixteca Oaxaqueña una de las regiones más pobres del país; aunado a esto, Oaxaca presenta altos niveles de deforestación, deterioro de suelos y escasez de agua (Ruiz Vicente, 2020).

Planteamiento del problema

A nivel mundial los procesos de cambio en el uso de suelo y vegetación han sido documentados como el segundo problema ambiental de mayor importancia (Rosete Vérges *et al.*, 2014), motivo por el cual crece la necesidad de evaluar las herramientas cartográficas para la toma de decisiones y la gestión de los recursos naturales, para ello el estado de Oaxaca, que se sitúa en un territorio de enormes contrastes, tanto por su gran riqueza biológica, biocultural y de recursos forestales, resulta idóneo para la elaboración de la presente disertación pues es un territorio social y económicamente marginado, con altos niveles de deforestación (Leija Loredo *et al.*, 2016); por lo que resulta un sitio adecuado para este estudio en virtud de que la creciente pérdida y transformación de tanto sus bosques como sus selvas amenazan la integridad y permanencia de los ecosistemas naturales, motivo por el cual se requieren estudios como el presente, que permitan conocer el estado actual de las coberturas arbóreas y brinden una estrategia metodológica que a su vez genere productos cartográficos de alta resolución tanto espacial como temporal para el estado de Oaxaca y en su caso a nivel nacional.

Pregunta de investigación

Los productos cartográficos derivados de imágenes satelitales Sentinel2 y el uso de índices de la vegetación, ¿poseen la calidad, resolución geográfica y temporal necesaria para el monitoreo adecuado de la cobertura de bosques y selvas en el estado de Oaxaca?

Justificación

Ante la evidente crisis ambiental a la que hemos sometido al planeta, el interés por realizar estudios que evalúen los cambios de cobertura forestal ha aumentado considerablemente; sin embargo, México cuenta con muy pocos estudios orientados a evaluar el proceso de cambio de uso de suelo y vegetación a nivel nacional o estatal con cartografía de alta resolución como es el caso de las imágenes Sentinel-2. Se cuenta con las series de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI; sin embargo, por su resolución tanto espacial como temporal, este tipo de recursos tiene una utilidad limitada a escala micro regional o bien local. Es por ello que este trabajo propone desarrollar un

producto cartográfico que permita hacer inferencias del estado y superficie de las masas arbóreas de las comunidades vegetales naturales en el estado de Oaxaca, derivado de imágenes satelitales Sentinel-2 y el uso de diversos índices espectrales de la vegetación.

Hipótesis

Al realizar un análisis comparativo de **la capacidad predictiva** de las inferencias relativas a cobertura y fragmentación en ecosistemas en el estado de Oaxaca, tanto bosques como selvas, derivadas a partir de la serie 7 de INEGI vs las inferencias generadas a partir de índices espectrales de vegetación calibrados en imágenes *SENTINEL-2*, se espera no encontrar diferencias significativas entre estas dos estrategias.

Objetivos

General

- Generar un producto cartográfico derivado de imágenes satelitales Sentinel2 e índices espectrales de la vegetación, que permitan realizar inferencias del estado, superficie y fragmentación de la cobertura de bosques y selvas en el estado de Oaxaca.

Particular

- A partir del uso de métricas de álgebra de mapas, métricas de fragmentación y pruebas estadísticas, realizar un análisis comparativo de la capacidad de descripción y predicción entre la cartografía generada por este trabajo y la Serie 7 de USV de INEGI.

Material y método

Zona de estudio

El estado de Oaxaca cuenta con una superficie de 93,799.33 Km², colinda al Norte con los estados de Veracruz y Puebla, al Este con Chiapas, al Sur con el Océano Pacífico y al Oeste con el estado de Guerrero; su división política consta de 570 municipios siendo los mayormente poblados, Oaxaca de Juárez (270,955 Hab), San Juan Bautista Tuxtepec (159,452 Hab) y Juchitán de Zaragoza (113,570 Hab); la población de estado fue de 4,132,148 Hab, 52.5% femenina y 47.5% masculina, 49%; posee una densidad poblacional de 44 hab/Km² posee una gran presencia de personas que hablan una lengua indígena (1,221,555 Hab), siendo la mayor representada el Zapoteco, seguido de Mixteco, Mixe, Chinanteco, Mazateco y Náhuatl, además de otras 11 lenguas; 194,474 Hab se identifican como afrodescendientes y 273,876 Hab presentan alguna discapacidad (INEGI, 2023). En términos nacionales, estos elementos posicionan a Oaxaca como un territorio ocupado por una población humana con alto grado de vulnerabilidad y marginación.

La geomorfología del estado muestra terrenos heteromorfos con relieves bajos (200 msnm), pies de montaña sin diferenciación de niveles, montañas bajas (800-1300 msnm), hasta montañas altas (2500-3720 msnm) para lo cual el Cerro Nube es el pico más alto de la entidad, su territorio se compone por las regiones de la Sierra Norte o también conocida como región Juárez, la Mixteca Alta, la Sierra de Miahuatlán las que presentan mayor heterogeneidad en el relieve (CONABIO, 2022). Esta complejidad geomorfológica, representa el mayor reto en términos de manejo y diagnóstico ambiental.

Con respecto a su clima, el estado se caracteriza por una alta complejidad y recambio, agrupados en dos grandes bloques, los climas cálidos (80% del territorio) y los templados (CONABIO, 2022).

La hidrología del estado se puede clasificar de manera general en dos grupos, el primero el que compone la parte noreste del estado que posee ríos permanentes y más caudalosos y el segundo grupo el ubicado en la región suroeste, con escurrimientos intermitentes y poco caudalosos, así mismo se ha clasificado en ocho regiones hidrológicas: Río Papaloapan (RH28), Coatzacoalcos (RH29), Grijalva-Usumacinta (RH30), Costa Chica-Río verde (RH20), Costa de Oaxaca (RH21),

Tehuantepec (RH22) y Costa de Chiapas (RH23) (CONABIO, 2022). Siendo las de mayor relevancia las del río Papaloapan, Coatzacoalcos y la región de la Costa (CONABIO, 2022).

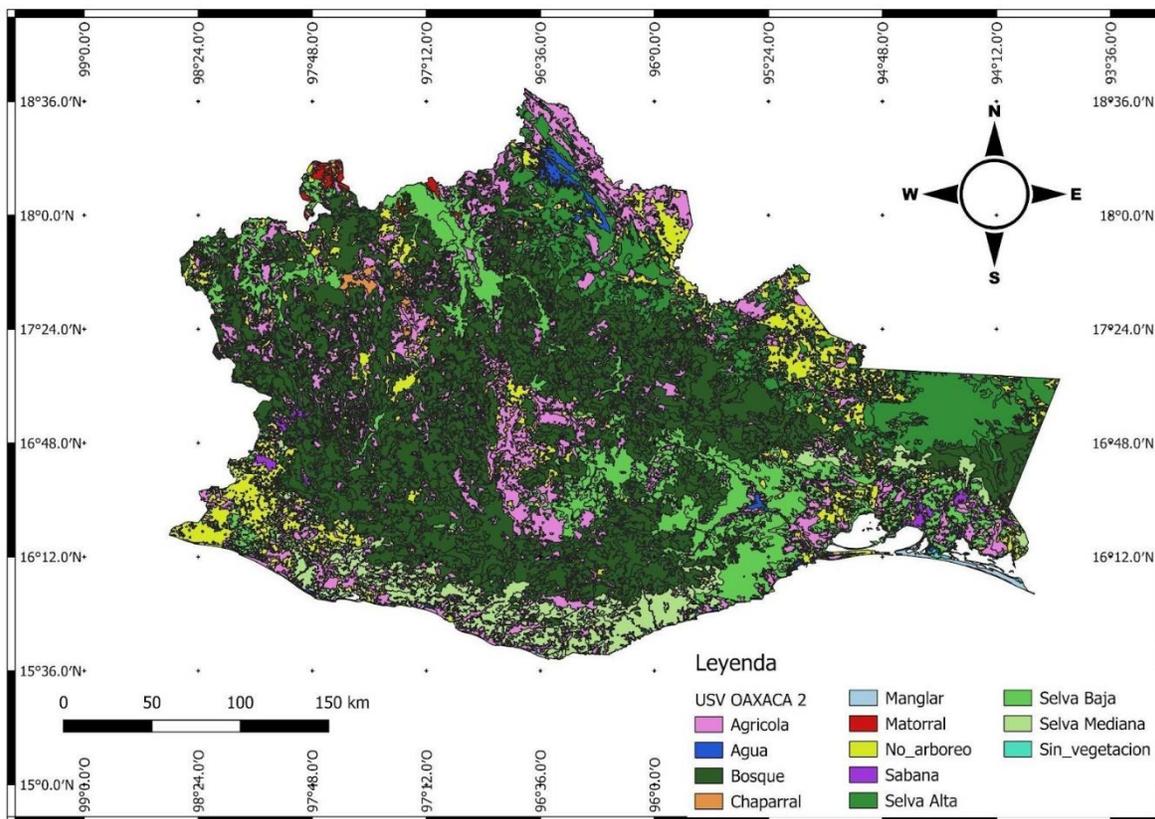


Figura 7. Uso de Suelo y Vegetación del estado de Oaxaca de Juárez, México agrupados (Fuente INEGI Serie 7).

Variables

Para este estudio se emplearán las siguientes variables:

- Variable Independiente: categorías de INEGI para USV
- Variable dependiente: Extensión de los polígonos correspondientes a USV
- Variable controlada: Puntos de INFyS (conglomerados).

Unidades Geográficas de Operación (OGUs)

Las Unidades geográficas operacionales (OGUs) empleadas se definieron como celdas uniformes de 25 x 25 km de área, mismas que dividen el territorio geopolítico del estado de Oaxaca de Juárez, para el cual se utilizó el conjunto de datos vectoriales “División Política Estatal escala 1: 250,000” (INEGI, 2024), resultando en 158 celdas (Figura 8); posteriormente se realizará la descarga de archivos shp útiles para la elaboración del proyecto tales serán la división política del estado de Oaxaca de Juárez, los usos de suelo y vegetación (USV) correspondiente a la Serie 7 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

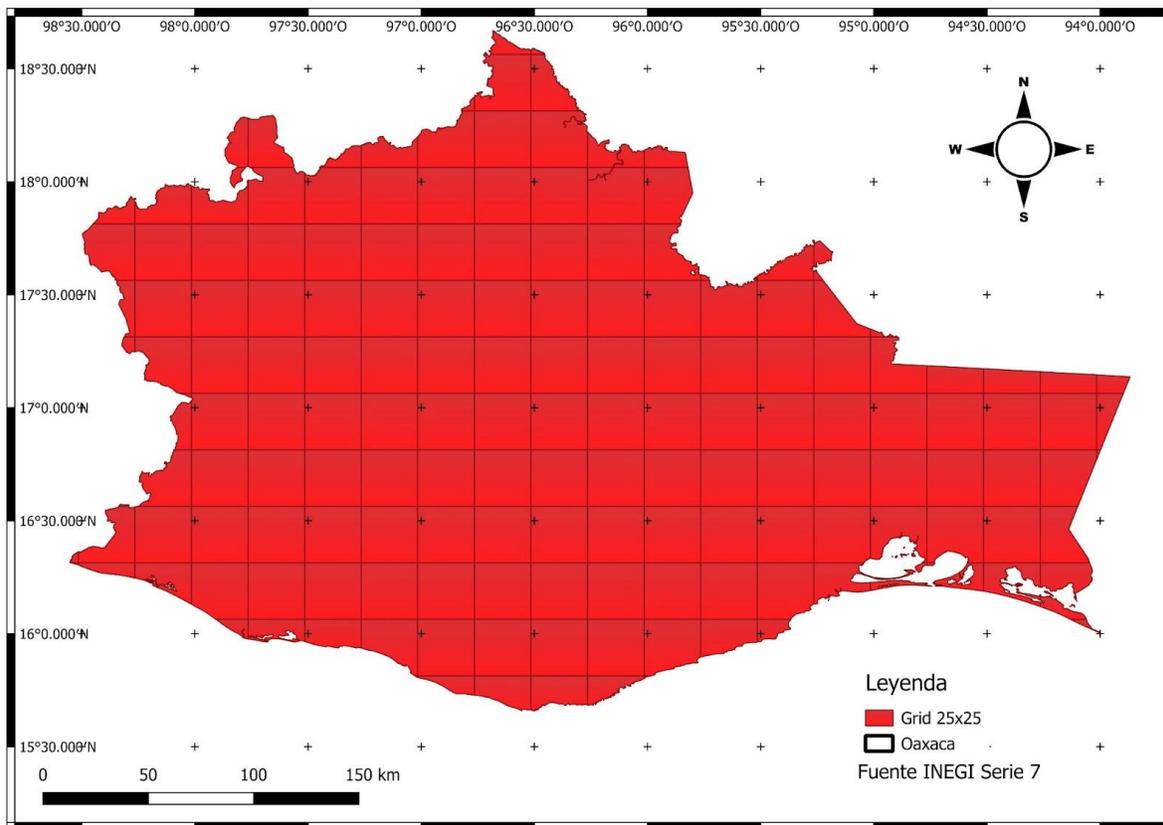


Figura 8. Zona de estudio y delimitación de las UGOs empleadas. DATUM: EPSG:4326, Escala:1:2,500,000.

GEE

Se empleó la plataforma online de GEE para el manejo y análisis de toda la información satelital y el cálculo de los índices espectrales de la vegetación; todo ello utilizando como base imágenes *SENTINEL 2* (Harmonized Sentinel-2 MSI; 2022), parte de la colección de imágenes “*COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED*” en la plataforma de GEE, así mismo se obtuvo una imagen producto de la mediana de imágenes en un periodo de estudio entre el mes de Febrero al mes de Junio del año 2022, luego se añadirán filtros a para disminuir la nubosidad procurando imágenes sin nubosidad o con un máximo de 5%.

La imagen resultante llevó un ajuste en los parámetros RGB de visualización especial para cada índice analizado, con el fin de optimizar la distinción de variaciones en la fenología de la vegetación (fig. 9). Con el fin de detectar cual es el índice que mejor representa la cobertura forestal de cada celda, una vez optimizados los parámetros de visualización de cada índice, éstos fueron contrastados visualmente contra la imagen base de alta resolución de Google (resolución de 2.5 m x 2.5 m para el 2023 y exclusivamente disponible para su visualización) y contra el producto satelital Landcover 2021 (Zanaga, 2022), de este último se tomaron como referencia únicamente las categorías de cobertura cultivada y pastizales.

Es importante mencionar que los productos Landcover son generados a partir de procesos de análisis predictivo con *machine learning*, así como las imágenes Sentinel-2 que se elaboran a partir de datos de validación en campo; estos últimos especialmente robustos en el caso de firmas espectrales de cultivos y pastizales.

```

function maskS2clouds (image) {
  var qa = image.select ("QA60");
  //bits 10 y 11 son nubes y cirrus
  var cludBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;
  var mask = qa.bitwiseAnd (cludBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd (cirrusBitMask).eq(0));
  return image.updateMask (mask).divide (10000);
}

var img_1 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")
  .filterDate ("2022-10-01","2023-02-28")
  .filter(ee.Filter.lt ("CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE",5)) //lt (less than)
  .filterBounds(geometry)
  .map (maskS2clouds)
  .map (function (image){return image.clip (geometry)})
  .median();

print (img_1, "img_s2_median");

var rgb_vis = {
  min: 0.0,
  max: 0.15,
  bands: ["B4", "B3", "B2"],
};

Map.centerObject (geometry);
Map.addLayer (img_1, rgb_vis, "sentinel_median");

```

Figura 9. script para codificación en GEE para presentar imágenes SENTINEL-2 en un periodo determinado considerando nubosidad.

Una vez seleccionado el índice que mejor describa la vegetación (NDVI, NDWI, ARVI, GCI, SIPI), se contrastó posteriormente con la imagen correspondiente del satélite *Landcover 2022*.

Por otro lado, se empleó el software *QGIS 3.32.3* para el procesamiento de tanto la Serie 7 como para la cartografía propuesta. Mientras que, para el análisis estadístico, se utilizó el programa *R 4.2.1*.

El esquema metodológico seguido en este trabajo se puede estructurar en nueve etapas que van desde la división del territorio hasta la rasterización, análisis estadístico de las métricas de fragmentación y la elaboración de matrices con los datos obtenidos; en la Figura 10 se pueden ver los detalles correspondientes a cada una de éstas.

Diagrama de proceso:

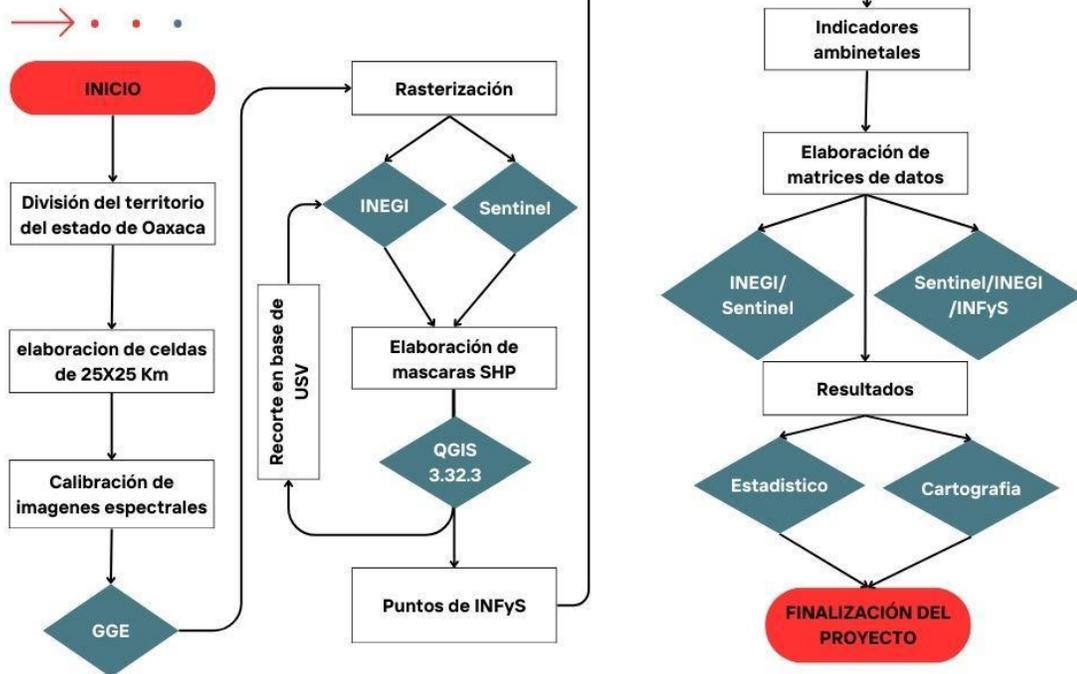


Figura 10. diagrama de flujo del proceso completo de este proyecto

Una vez que se identificó el índice con mayor concordancia con la cartografía del Landcover 2021 y la imagen base de Google (ver Material suplementario) y la aplicación de un detallado proceso de supervisión visual, se identificaron los valores umbral de cambio en la cobertura vegetal. Dichos umbrales de valores describen tres categorías del estado de la cobertura vegetal: aquellos que fueron congruentes con áreas en las que se distinguía una clara cobertura arbórea con dosel cerrado; aquellos que fueron congruentes con áreas en las que se puede distinguir una cobertura arbórea con dosel abierto; y aquellos que fueron congruentes con áreas en las que no se podían distinguir elementos arbóreos (Fig. 11).

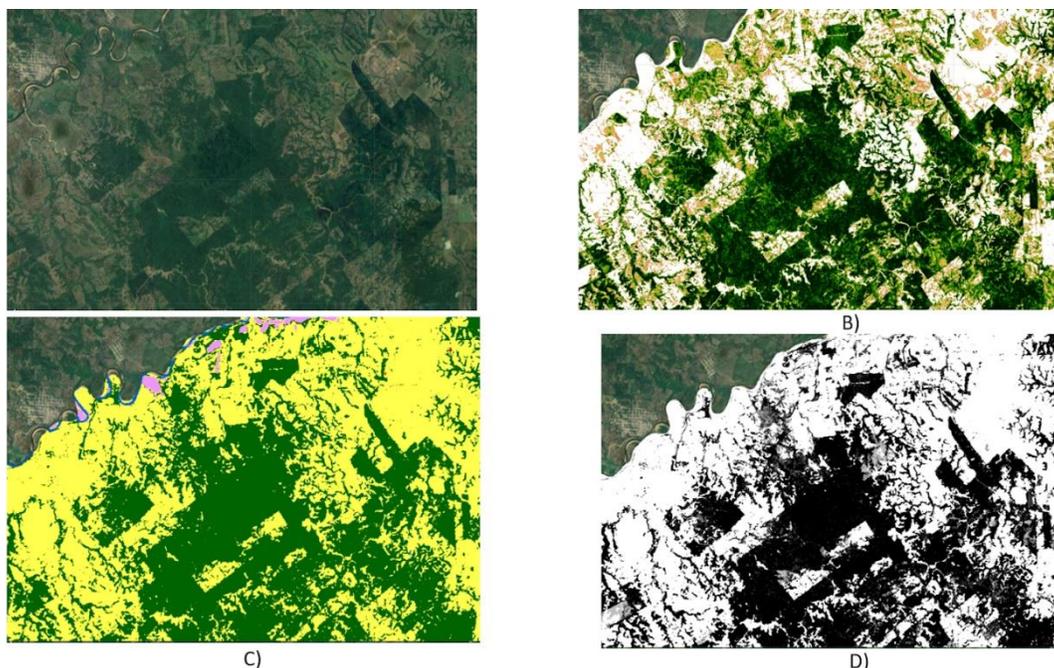


Figura 11. Comparativa de imágenes en GEE de sección de la celda 121. A) Imagen de alta resolución GOOGLE ; B) Imagen de SENTINEL-2 con el índice espectral seleccionado para la celda (GCI) ; C) Imagen de Land Cover 2021 donde áreas en amarillo corresponden a zona

Una vez que se contó con los valores de los umbrales del estado de la cobertura vegetal, en sus tres categorías, fueron tomados como referencia para reclasificar los valores del índice seleccionado, recodificado los valores continuos de cada celda a valores discretos, quedando de la siguiente forma: con valor de 1, todos aquellos valores coincidentes con la observación de dosel cerrado; con 2, todos aquellos valores coincidentes con la observación de dosel abierto; y con 3, sin cobertura arbórea (fig. 11.D). Todas las tareas de reclasificación se llevaron a cabo en el software QGIS 3.32.3.

Elaboración de mascara shp

En el programa QGIS se realizaron recortes de las extensiones correspondientes a cada comunidad forestal en cada celda, todo a través de los datos vectoriales de la capa de uso de suelo y vegetación de la serie 7 correspondiente al estado de Oaxaca y las herramientas vectoriales de recorte en QGIS, estas se compilaron en un directorio ordenadas mediante código de “numero de celda_ ecosistema.shp”.

Rasterización

Mediante el programa Google Earth Engine se descargaron las imágenes ráster realizadas a partir de las imágenes calibradas con un índice espectral, por otro lado, se harán recortes de las capas vectoriales de INEGI los cuales se rasterizarán en función únicamente de la presencia o ausencia de vegetación:

- 1 si el polígono pertenece a los ecosistemas Bosques, Selva Baja, Selva Mediana, Selva Alta, Manglar o Matorral
- 0 si pertenece a categoría No arbórea o agrícola

Para ello se utilizó el programa R que tomó el directorio de máscaras shp clasificados por ecosistema y celda, añadiendo un nuevo atributo que obedezca a la anterior condición (fig. 12).

```
11 ##CREAR DIRECTORIO
12 setwd("E:/TESIS/MASCARAS FINALES")
13
14 ##CREAR LISTA DE ARCHIVOS A TRABAJAR
15 INEGI <- list.files(path = ".", pattern = "shp", full.names = TRUE)
16
17 ##BUCLE PARA AÑADIR NUEVO ATRIBUTO
18 for (SHP in INEGI) {
19   shapefile <- readOGR(SHP)
20   shapefile@data[["RASTER"]] <- '0'
21   writeOGR(shapefile, ".", SHP, driver = "ESRI Shapefile", dataset_options = NULL, layer_options = NULL, overwrite_layer = TRUE)
22 }
23
24 #####Bucle para modificar categoria#####
25 # Cambiar la ruta de trabajo
26 setwd("E:/TESIS/MASCARAS FINALES2")
27
28 # Obtener una lista de todos los archivos shapefile en el directorio
29 shp_files <- list.files("E:/TESIS/MASCARAS FINALES", pattern = "\\*.shp$", full.names = TRUE)
30
31 # Leer cada archivo shapefile y modificar la categoría
32 for (shp_file in shp_files) {
33   shapefileData <- st_read(shp_file)
34   shapefileData$RASTER <- ifelse(
35     shapefileData$Descri_2 %in% c("Bosque", "Chaparral", "Matorral", "Selva Alta", "Selva Baja", "Selva Mediana", "Sabana"),
36     1,
37     0
38   )
39 }
```

Figura 12. código en R para añadir una nueva categoría a un directorio de archivos shp.

Recorte en base a Uso de Suelo y Vegetación de la Serie 7

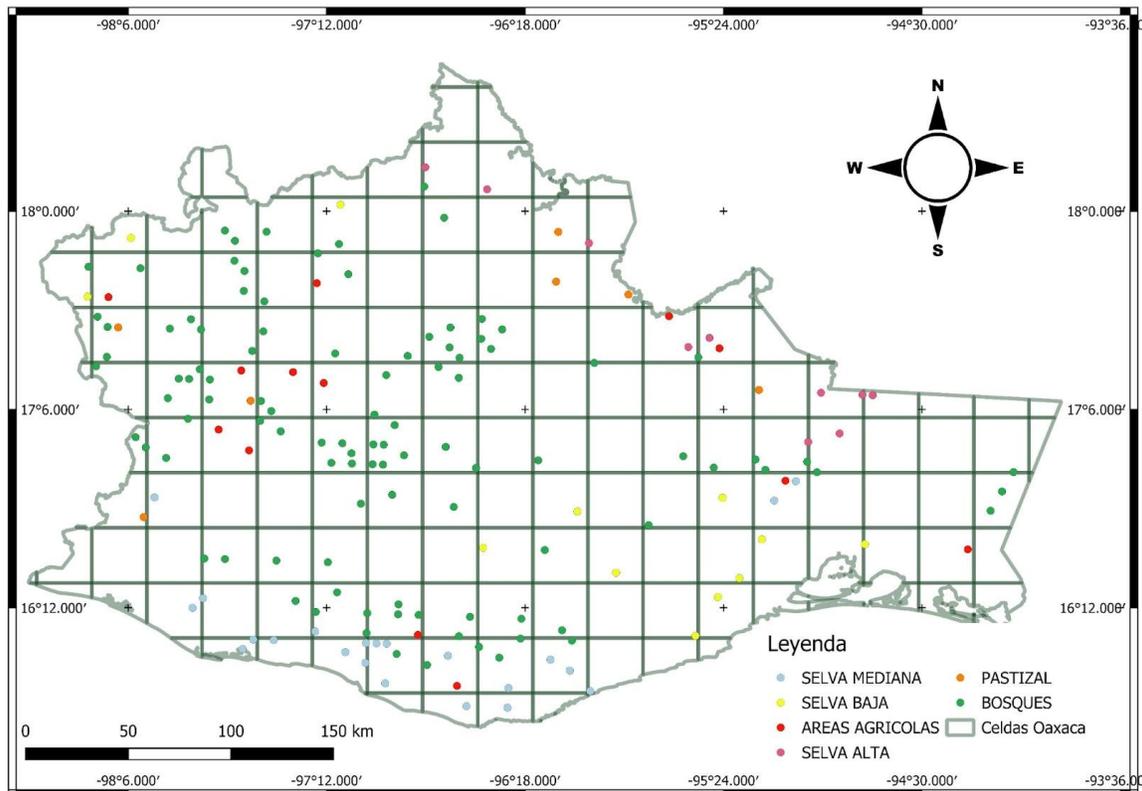
Una vez teniendo las imágenes ráster de cada celda se realizó un corte o extracción en QGIS por “capa mascara”, para ello se utilizaron las máscaras shp previamente realizadas con los datos vectoriales de la Serie 7 de INEGI para cada ecosistema y celda tanto para las imágenes ráster elaboradas en GEE con imágenes SENTINEL-2 como a los archivos ráster elaborados a partir de la Serie 7 “Numero_celda_ecosistema” para las elaboradas a partir de imágenes SENTINEL-2 y “INEGI_Numero_celda_ecosistema”.

Reclasificación de imágenes Ráster satelitales

Una vez realizada y validada la clasificación de la cobertura forestal, se procedió a realizar una reclasificación de las imágenes satelitales, con respecto a los valores calibrados con un índice espectral para cada ecosistema en GEE se codificaron “R_Numero_celda_ecosistema_INEGI” para imágenes en base a SENTINEL-2 y “R_Numero_celda_ecosistema_INEGI” para imágenes de INEGI.

Puntos del Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS) 2015-2020

Se descargaron del portal oficial del Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental (SNMA) el conjunto de datos correspondientes al último ciclo del inventario, el cual comprende un periodo entre el año 2015 y 2020, posteriormente se realizó un filtrado de los puntos registrados a nivel nacional para restringir únicamente los correspondientes al estado de Oaxaca, luego se realizó un segundo filtrado esta vez por ecosistema los cuales se guardaron en formato CVS para posteriormente añadirlos al programa QGIS y realizar los análisis correspondientes.



Para llevar a cabo este estadístico comparativo, se utilizaron los registros estatales catalogados en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) del periodo 2015-2020, realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), estos registros se obtuvieron un total de 168 puntos de los cuales 105 pertenecieron a la categoría “Bosques”, 10 a “Selva Alta”, 21 a “Selva Mediana”, 12 a “Selva Baja”, 7 a “Pastizales” y 13 a “áreas agrícolas” (fig. 13).

Indicadores ambientales

Una vez obtenidas las imágenes ráster reclasificadas finales de tanto SENTINEL-2 como de INEGI se procesaron cada una mediante la extensión “LecoS” en el programa QGIS que analizaron métricas de fragmentación ambiental, evaluando cinco criterios principales Cobertura forestal en kilómetros cuadrados, porcentaje de cobertura que ocupa cada clase, longitud de borde, número de parches o píxeles y por último el tamaño promedio de parche (Fig. 14); dicha información se guardó en archivos CVS individuales que posteriormente se recopilaron en una matriz por cada uno de los conjuntos de datos.

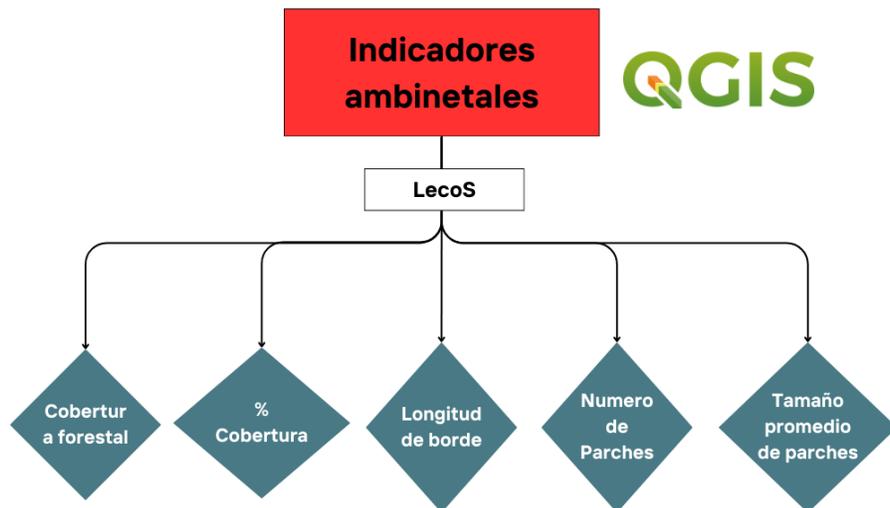


Figura 14. detallado sobre indicadores ambientales a evaluar.

Elaboración de matrices

Una vez obtenidas las imágenes ráster y los datos de los índices ambientales, se realizaron matrices que agruparon los datos para su análisis, una para cada fuente de datos para posteriormente contrastar los indicadores ambientales entre INEGI y el producto de imágenes satelitales. Además, se realizará una matriz en la que se describen los puntos del INFyS su clasificación por ecosistema para realizar la inferencia la inferencia con respecto a tanto INEGI como SENTINEL-2.

Resultados estadísticos, gráficos y cartografía

Se realizaron análisis de varianza entre las inferencias de ambos productos, gráficos de densidad por ecosistema, así como un análisis de correlación entre los datos mediante una prueba estadística de chi cuadrada, estadístico que se empleo debido a que esta prueba sigue siendo uno de los procedimientos estadísticos más conocidos y empleados en la práctica y se desarrolló como una aplicación de la prueba de la razón de verosimilitudes generalizadas (densidad conjunta de la muestra) por lo que sólo es relevante cuando el total de veces que el resultado concuerda y sugiere asociar una distribución binomial para cada evento (Vázquez Alamilla et al., 2022).

Por otro lado, en el aspecto cartográfico se realizaron mapas que describen el estado de los ecosistemas según los valores obtenidos mediante los índices espectrales (fig 15).

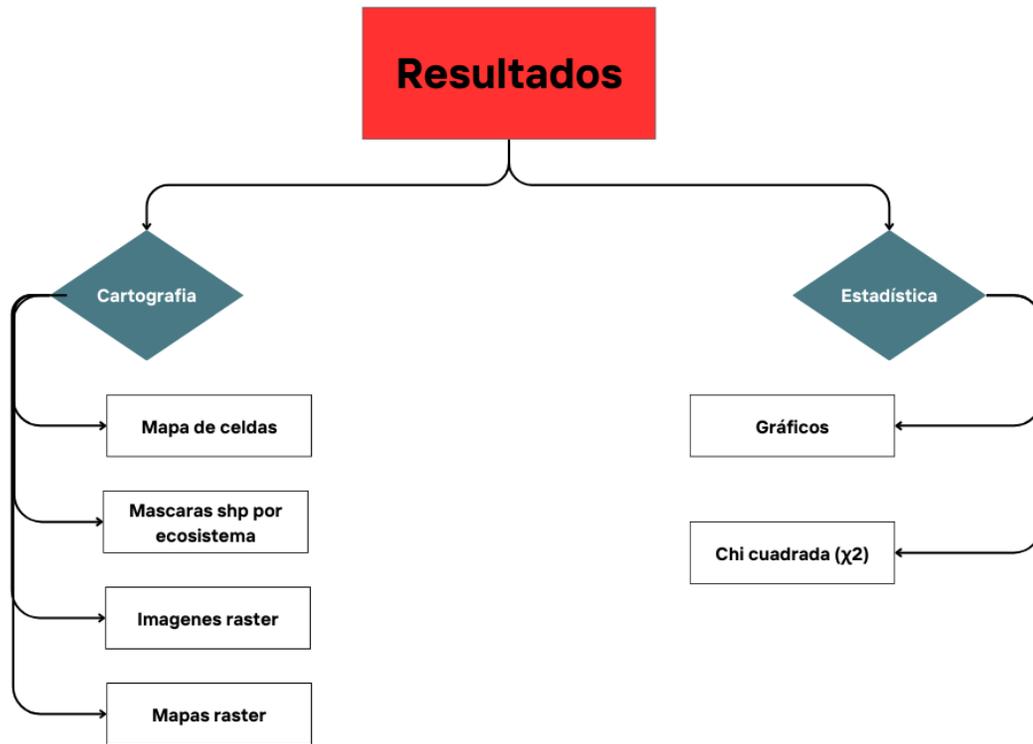


Figura 15. detallado de los resultados que se presentarán.

Resultados

De las 158 celdas (25 x 25 m) en las que se dividió el estado de Oaxaca se obtuvieron un total de 346 máscaras shp de comunidades forestales (Fig. 16), cuya frecuencia se ve claramente dominada por la categoría “bosques”, la cual comprende los ecosistemas de Bosque Mesófilo de Montaña y bosques de coníferas (Encino y Pino):

- Bosques: 119 celdas
- Selva Baja: 87 celdas
- Selva Mediana: 44 celdas
- Selva Alta: 45 celdas
- Sábana: 20 celdas
- Manglar: 19 celdas
- Chaparral: 5 celdas
- Matorral: 7 celdas

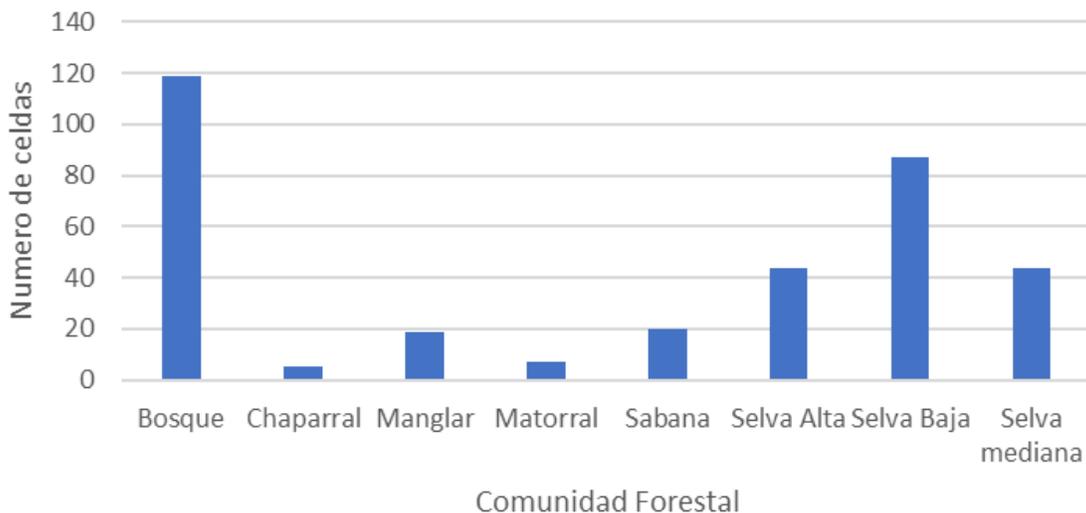


Figura 16. Número de celdas que contienen fragmentos de cada comunidad forestal en el estado de Oaxaca de Juárez, México.

Con respecto a los índices espectrales empleados en la calibración de las imágenes satélites SENTINEL-2 los índices GCI y ARVI fueron los más utilizados (fig. 17), mostraron ser eficientes y adaptarse de manera óptima a los diferentes ecosistemas y las condiciones topográficas del estado

de Oaxaca. De forma particular, en las regiones montañosas ARVI resultó sumamente eficiente, ya que permitió limitar el efecto de reflectancia derivado de la presencia de aerosoles; en tanto que, en las zonas costeras, GCI fue el más adecuado.

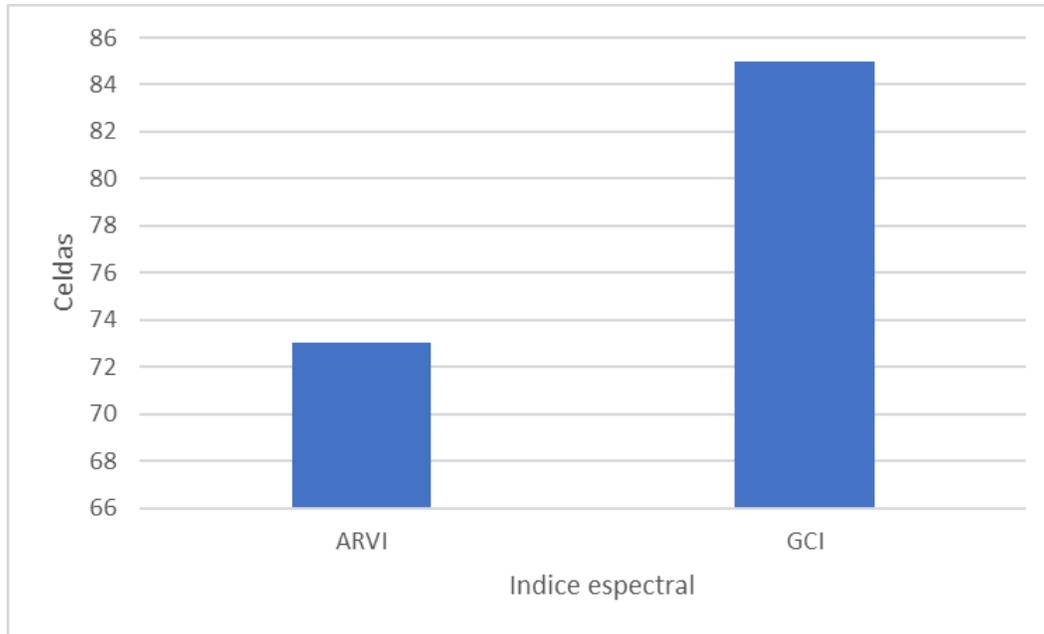


Figura 17. Proporción de índices espectrales utilizados.

Chi cuadrada

Con la finalidad de realizar una validación del poder predictivo de nuestra cartografía contra datos independientes levantados en campo, se realizó una prueba de Chi cuadrada empleando nuestra cartografía y la información de los conglomerados del INF; esta misma prueba se realizó para la cartografía de la Serie 7 de INEGI, se empleó un valor de significancia del 5% (0.05) con 5 grados de libertad y una p en tablas de distribución de 0.412. En ambos casos, los resultados de la prueba apoyan la hipótesis alterna (H_a), es decir no hay independencia entre los dos conjuntos de datos; arrojando un valor de $p=0.000003048$ para en caso de nuestros datos y de $p < 2.2e-16$ para el caso de la Serie 7 de INEGI (Figura. 21).

```

Pearson's Chi-squared test

data: .Table
X-squared = 33.461, df = 5, p-value = 0.000003048

Chi-square components:
      variableInferencia.SENTINEL
Ecosistema.R NO SI
AGRICOLA      19.31 6.23
Bosque        3.62 1.17
pastizal      0.98 0.32
Selva Alta    0.85 0.27
Selva Baja    0.39 0.13
Selva Mediana 0.15 0.05

```

A)

```

Pearson's Chi-squared test

data: .Table
X-squared = 126.06, df = 5, p-value < 2.2e-16

Chi-square components:
      variableInferencia.INEGI
Ecosistema.R NO SI
AGRICOLA      103.79 11.68
Bosque        7.00 0.79
pastizal      0.71 0.08
Selva Alta    0.00 0.00
Selva Baja    1.21 0.14
Selva Mediana 0.60 0.07

```

B)

Figura 18. Pruebas estadísticas Chi Cuadrado. A) Contraste de puntos INFyS con Imágenes ráster de Cartografía propuesta (SENTINEL); B) Contraste de puntos INFyS con imágenes ráster INEGI.

Métricas de fragmentación

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a las distintas métricas de fragmentación empleadas para cuantificar el estado de la cobertura arbórea en el estado de Oaxaca.

Numero de parches por comunidad vegetal

En la figura 19 se puede observar el conteo de parches por comunidad vegetal para ambas cartografías. En todas las comunidades vegetales se observa que en la cartografía propuesta los valores de los conteos, superan en hasta tres órdenes de magnitud a los conteos de la Serie 7; es decir, en el caso de la cartografía propuesta, las comunidades vegetales se encuentran representadas por un mayor número de parches, siendo los casos más sobresalientes los de la selva alta, la selva mediana, la selva baja y las formaciones boscosas.

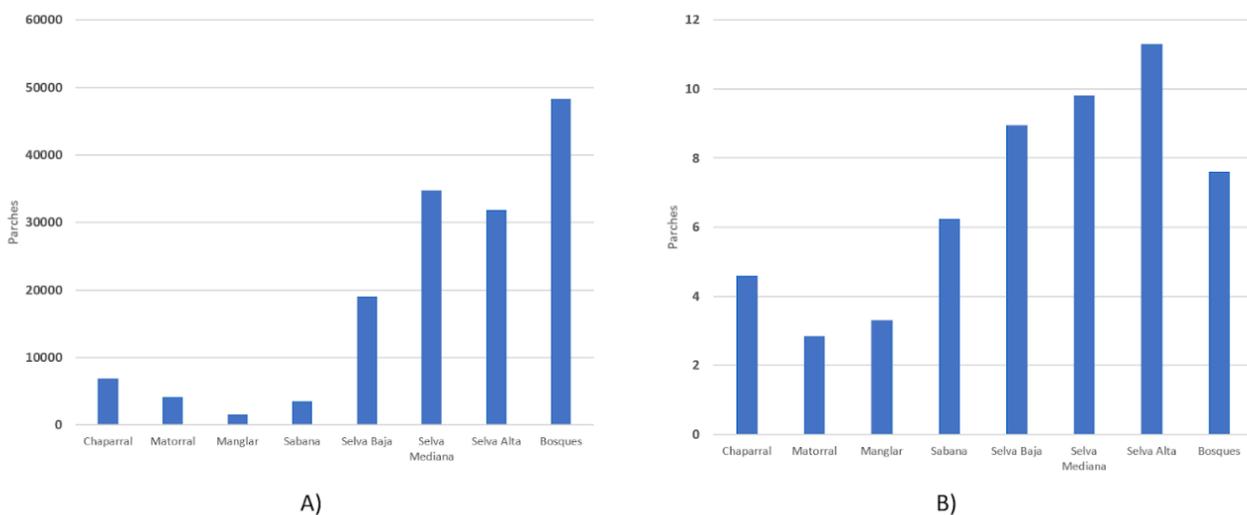


Figura 19. Comparativo de número de parches. A) Parches obtenidos en imágenes ráster de cartografía propuesta; B) parches obtenidos de imágenes rasterizadas de serie 7 INEGI.

Tamaño medio de parches

Con respecto a esta métrica la figura 23 muestra un comparativo del tamaño promedio de parches por comunidad vegetal para ambas cartografías; donde es evidente que el promedio de tamaño de la cartografía es considerablemente menor que los obtenidos en la cartografía de INEGI, en general, todas la comunidades vegetales se observa que en el caso de la cartografía propuesta, las comunidades vegetales se encuentran representadas con parches mucho más pequeños más considerando los valores expuestos en la figura 20 se compone por una mayor cantidad de parches y de igual forma los casos más sobresalientes son los de la selva alta, la selva mediana, la selva baja y las formaciones boscosas.

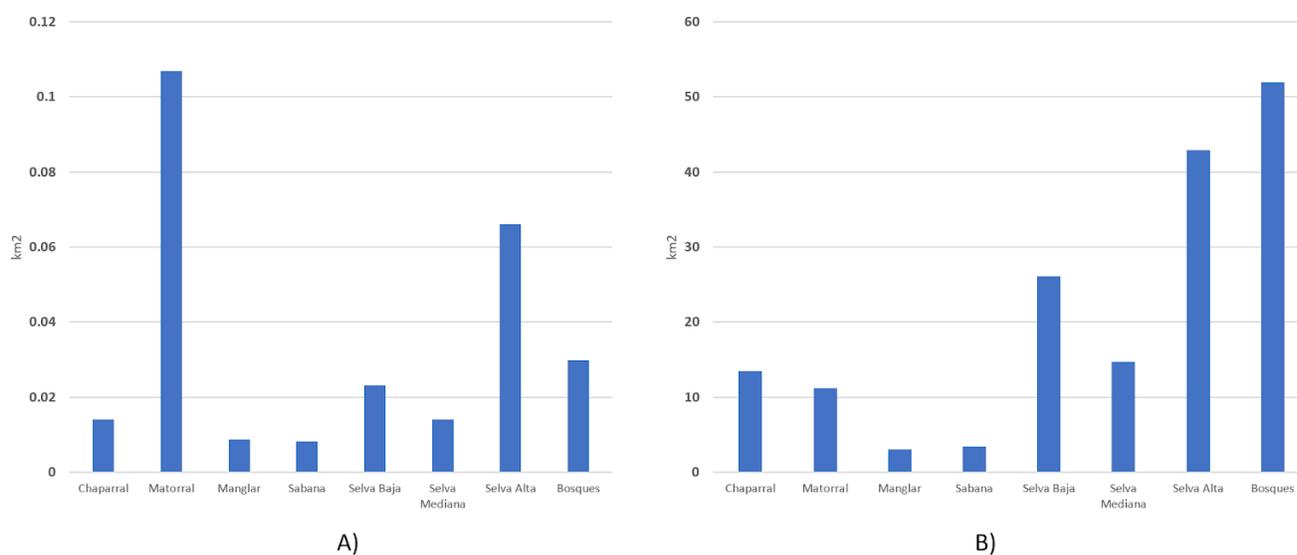


Figura 20. Comparativa de tamaño promedio en parches. A) Cartografía propuesta; B) serie 7 INEGI.

Longitud de borde

Para la longitud de borde se evaluó el promedio estatal del borde por cada uno de los ecosistemas, con el propósito de demostrar la fragmentación, los patrones en ambas fuentes; en la figura 21 se puede observar el comparativo de las longitudes de borde promedio para ambas cartografías; como ha sido el caso en otras métricas todas la comunidades vegetales se observa que en la cartografía propuesta los valores de longitud de borde, superan en al menos dos órdenes de magnitud a los conteos de la Serie 7; es decir, en el caso de la cartografía propuesta, las comunidades vegetales presentan una mayor longitud de borde, siendo los casos más sobresalientes nuevamente los de selva alta, mediana, baja y las formaciones boscosas.

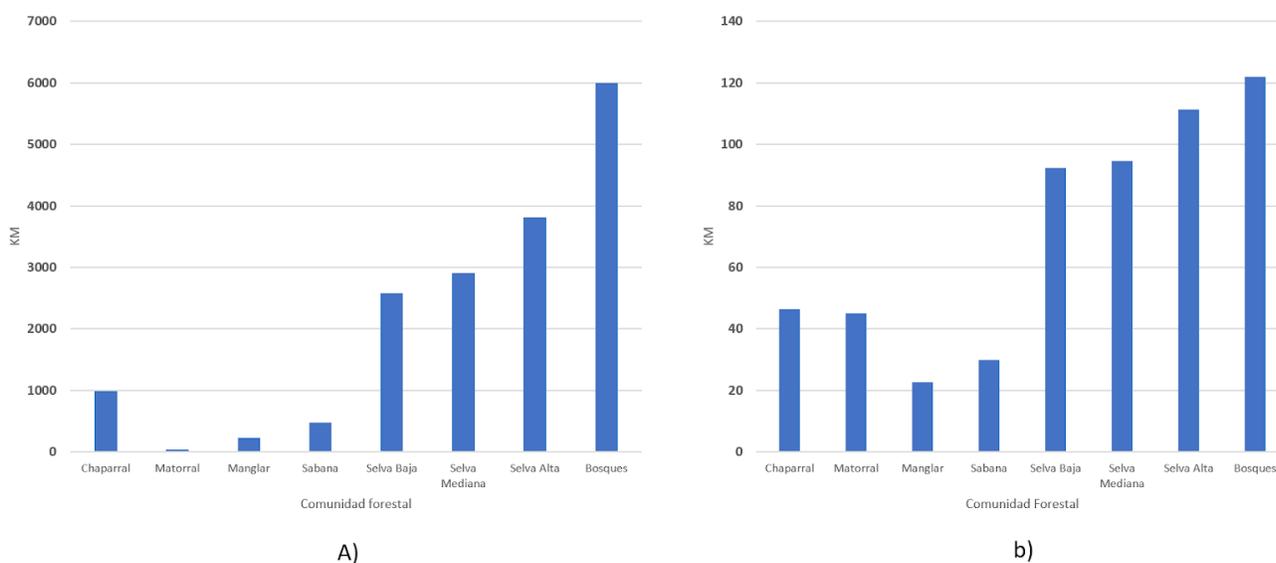


Figura 21. Comparativa de longitud de borde promedio por comunidad forestal. A) Cartografía propuesta; B) serie 7 INEGI.

Comparativo de cobertura forestal en imágenes Ráster desarrolladas e INEGI

Utilizando las 346 máscaras shp obtenidas de la serie 7 de Uso de Suelo y Vegetación (USV) de INEGI como punto de referencia se extrajeron las fracciones de las imágenes ráster correspondientes a cada comunidad forestal para cada celda, de las cuales se encontraron significativas diferencias entre las coberturas arbóreas determinadas por INEGI y las obtenidas mediante el análisis de imágenes espectrales (fig. 22).

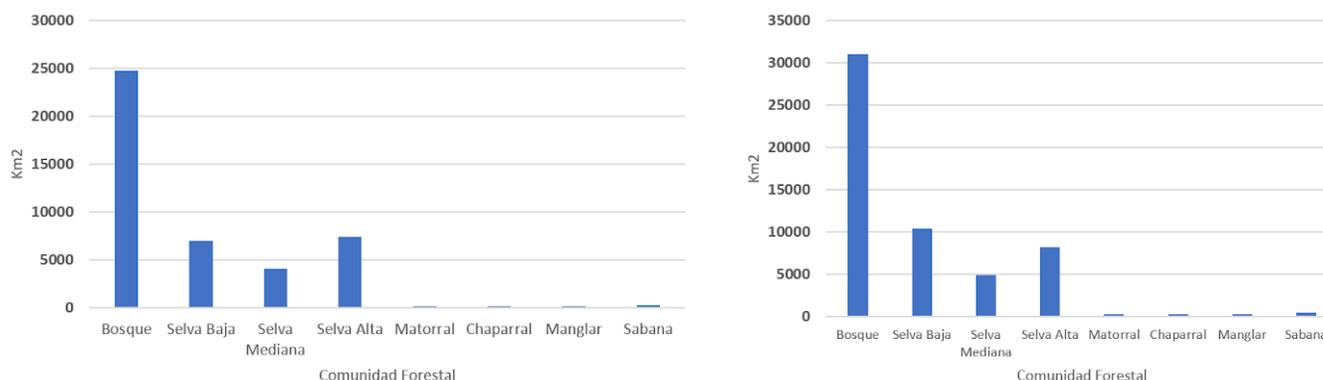


Figura 22. Gráficas de cobertura forestal total del estado de Oaxaca de Juárez dividido por comunidad forestal, México. A) Cobertura descrita mediante imágenes espectrales del satélite SENTINEL 2; B) Cobertura descrita por categorías de INEGI en serie 7 de USV.

Al comparar las coberturas forestales fue notoria la discrepancia entre los datos provenientes de la serie 7 elaborada por INEGI y los resultados obtenidos en la cartografía propuesta, mientras que las imágenes satelitales registraron una cobertura forestal neta de 44,019.2874 Km², equivalente al 46.9292% de la superficie neta del estado de Oaxaca, los resultados obtenidos de la rasterización de los polígonos determinados por el INEGI en su serie 7 reportó una cobertura arbórea de 55,569.731 Km² lo que equivale al 59.2432% de la superficie estatal; por lo que se apreció una diferencia de 12.314% de cobertura forestal entre ambas fuentes cartográficas.

Así mismo se realizó un análisis particular por comunidad forestal con respecto a la condición del dosel forestal, obtenido mediante las imágenes satelitales SENTINEL-2, es necesario aclarar que en lo que a la condición del dosel compete, se reportarán únicamente los datos correspondientes a la cartografía propuesta dado el hecho de que las imágenes de INEGI no comparten una clasificación en su cobertura forestal similar y por lo tanto no se puede hacer una comparación aceptable, los resultados obtenidos mediante el análisis de las imágenes satelitales de SENTINEL 2, se clasificaron considerando el estado espectral del dosel arbóreo diferenciando entre dosel cerrado (mayor señal

de reflectancia) y dosel abierto o deteriorado (menor valor de reflectancia) según el índice con que se calibró cada celda de manera individual.

Bosques

La categoría denominada “bosques” se compuso de los ecosistemas de Bosque mesófilo de montaña, bosque de pino y encino, esto con el propósito de disminuir la cantidad de fragmentos a evaluar, para esta comunidad forestal se puede observar que existe una diferencia significativa en la cobertura forestal, por un lado los resultados obtenidos en la cartografía propuesta arrojaron un total de 24,784.3425 Km² equivalente al 26.4227% del estado de Oaxaca, mientras que, los datos obtenidos de INEGI abarcaron un total de 31,074.4191 Km² equivalente al 33.1286% de la superficie estatal, la diferencia entre ambas fuentes fue de 6290.0766 Km², equivalente a 6.7059% de la superficie estatal (fig. 23).

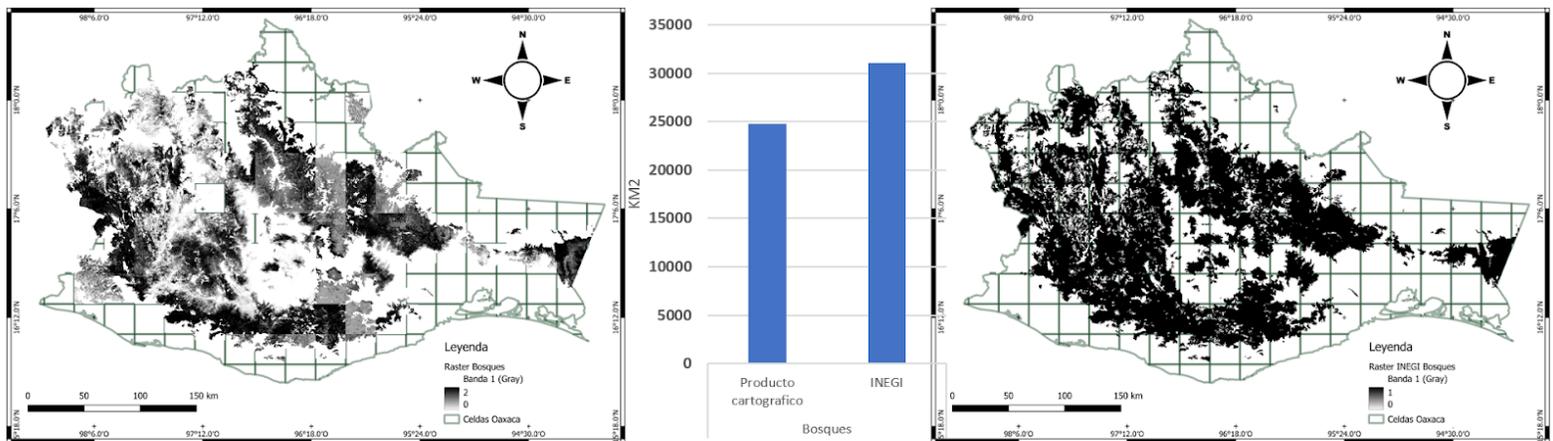


Figura 23. Comparativa de mapas y gráfico de cobertura forestal para la comunidad forestal de Bosques; A) Imágenes obtenidas mediante satélite SENTINEL-2; B) Imágenes obtenidas de la serie 7 INEGI, DATUM: EPSG:4326, Escala:1:2,500,000.

Condición del dosel forestal

Se encontró que mayormente la cobertura forestal clasificada como dosel cerrado superó a la de dosel abierto, por un lado se registró 14,684.8854Km² de dosel cerrado lo que equivale a 59.2506% de la cobertura forestal reportada y 15.6556% de superficie estatal, mientras que el dosel abierto reporta 10,099.4570Km² de cobertura equivalente a 40.7493% de cobertura y 10.7671% de superficie estatal (fig. 24); de las áreas correspondientes vale la pena resaltar que la región centro-oeste del estado de Oaxaca aparenta ser el área con bosques más deteriorados.

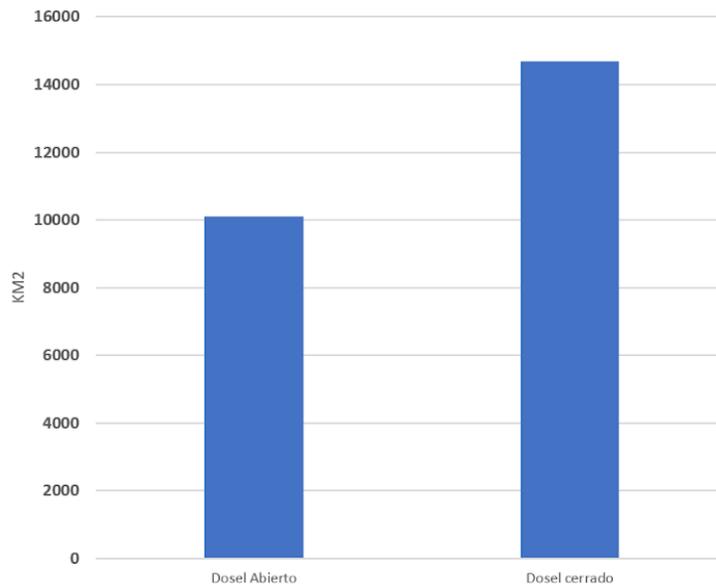


Figura 24. Gráfico comparativo de dosel forestal para la categoría "Bosques".

Selva Baja

La categoría denominada “Selva Baja” se compuso de los polígonos correspondientes al estrato tanto primario como secundario del ecosistema Selva Baja, esta comunidad forestal, siendo la segunda con mayor cobertura registrada, se puede observar que existe una diferencia significativa en la cobertura, por un lado los resultados obtenidos en la cartografía propuesta abarcaron un total de 6,963.4844 Km² equivalente al 7.4238% del estado de Oaxaca, mientras que, los datos obtenidos de INEGI abarcaron un total de 10,337.4540 Km² equivalente al 11.0208% de la superficie estatal, la diferencia entre ambas fuentes fue de 3,373.9696 Km², equivalente a 3.5970% de la superficie estatal (fig. 25).

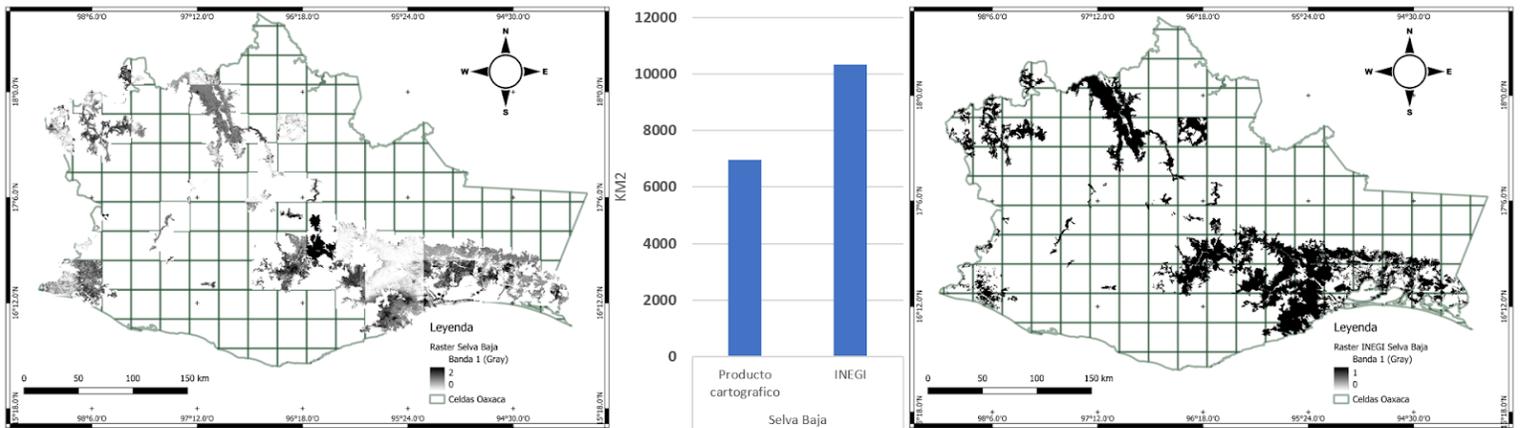


Figura 25. Comparativa de mapas y gráfico de cobertura forestal para la comunidad forestal de Selva Baja; A) Imágenes obtenidas mediante satélite SENTINEL-2; B) Imágenes obtenidas de la serie 7 INEGI. Elaboración propia, DATUM: EPSG:4326, Escala:1:2,500,000.

Condición del dosel forestal

Para el caso de la comunidad de Selva Baja se encontró que mayormente la cobertura forestal clasificada como dosel abierto superó a los de dosel cerrado, que registró 2,531.6110 Km² de dosel cerrado equivalente al 35.3555% de la cobertura forestal reportada y 2.6989% de superficie estatal, mientras que el dosel abierto reportó 4,513.4029 Km² de cobertura equivalente a 63.8152% de cobertura y 4.8117% de superficie estatal (fig. 26), cabe mencionar que se aprecia que el ecosistema de Selva Baja se encuentra concentrado mayormente en la costa Sur-Este comúnmente parte de la región del istmo.

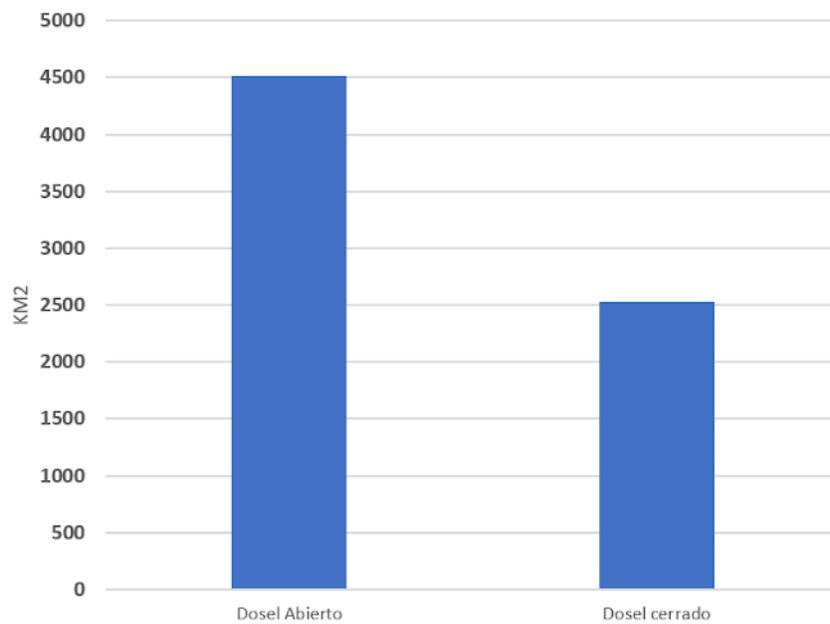


Figura 26. Gráfico comparativo de dosel forestal para la categoría "Selva Baja".

Selva Mediana

La categoría denominada “Selva Mediana” se compuso de los polígonos correspondientes al estrato tanto primario como secundario del ecosistema Selva Mediana, esta comunidad forestal, se puede observar que existe una diferencia significativa en la cobertura, por un lado los resultados obtenidos en la cartografía propuesta que abarcaron un total de 4,097.08006 Km² equivalente al 4.4679% del estado de Oaxaca, mientras que, los datos obtenidos de INEGI abarcaron un total de 4,887.8124 Km² equivalente al 5.2109% de la superficie estatal, la diferencia entre ambas fuentes fue de 790.7323 Km², equivalente a 0.8430% de la superficie estatal (fig. 27).

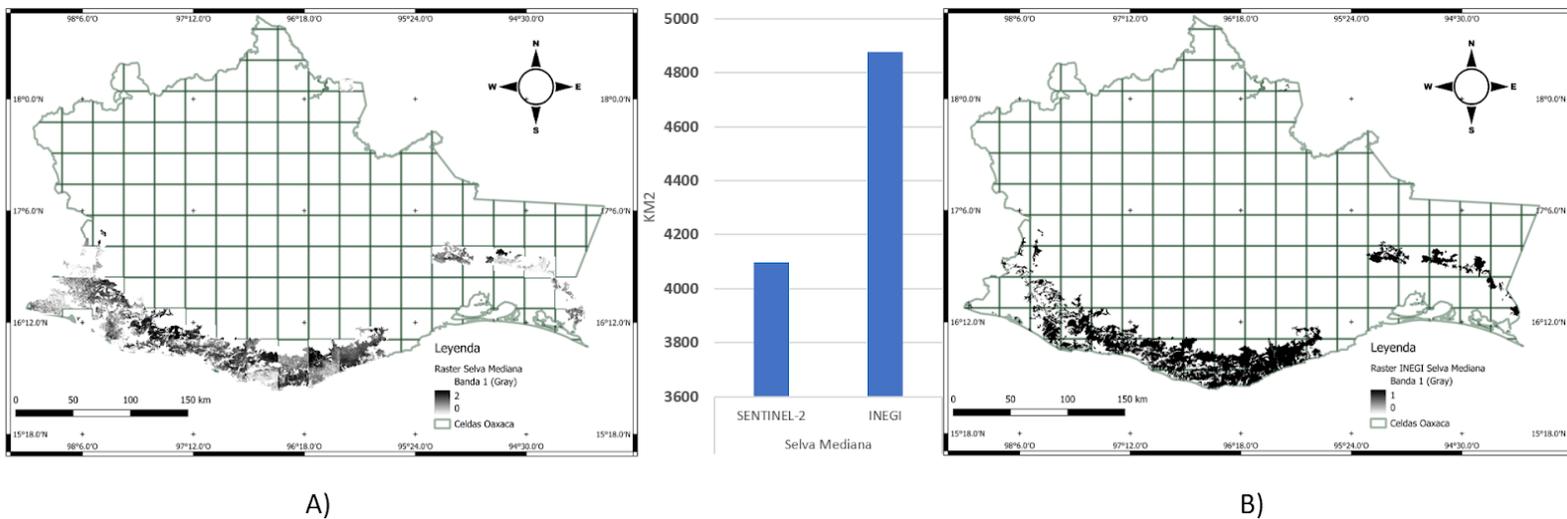


Figura 27. Comparativa de mapas y gráfico de cobertura forestal para la comunidad forestal de Selva Mediana; A) Imágenes obtenidas mediante satélite SENTINEL-2; B) Imágenes obtenidas de la serie 7 INEGI, DATUM: EPSG:4326, Escala:1:2,500,000.

Condición del dosel forestal

Se encontró que mayormente la cobertura forestal clasificada como dosel abierto superó a la de dosel cerrado, por un lado se registró 1,939.9654 Km² de dosel cerrado equivalente a 47.3499% de la cobertura forestal reportada y 2.0682% de superficie estatal, mientras que el dosel abierto reporta 2,145.3494 Km² de cobertura registrada (52.3628%) y equivalencia estatal de 2.2876% de superficie estatal (fig. 31); se aprecia que el ecosistema de la selva mediana se distribuye continuamente por la región costera del estado.

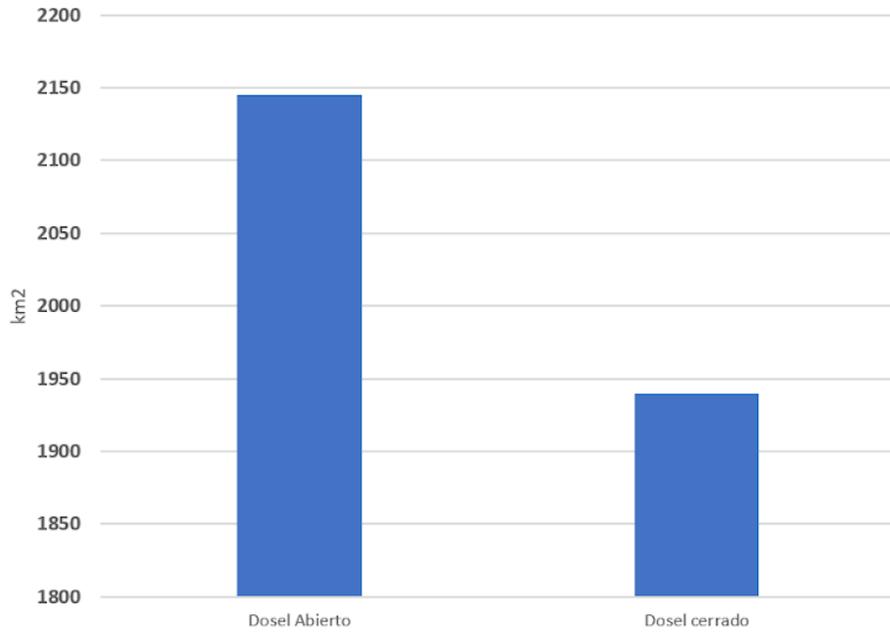
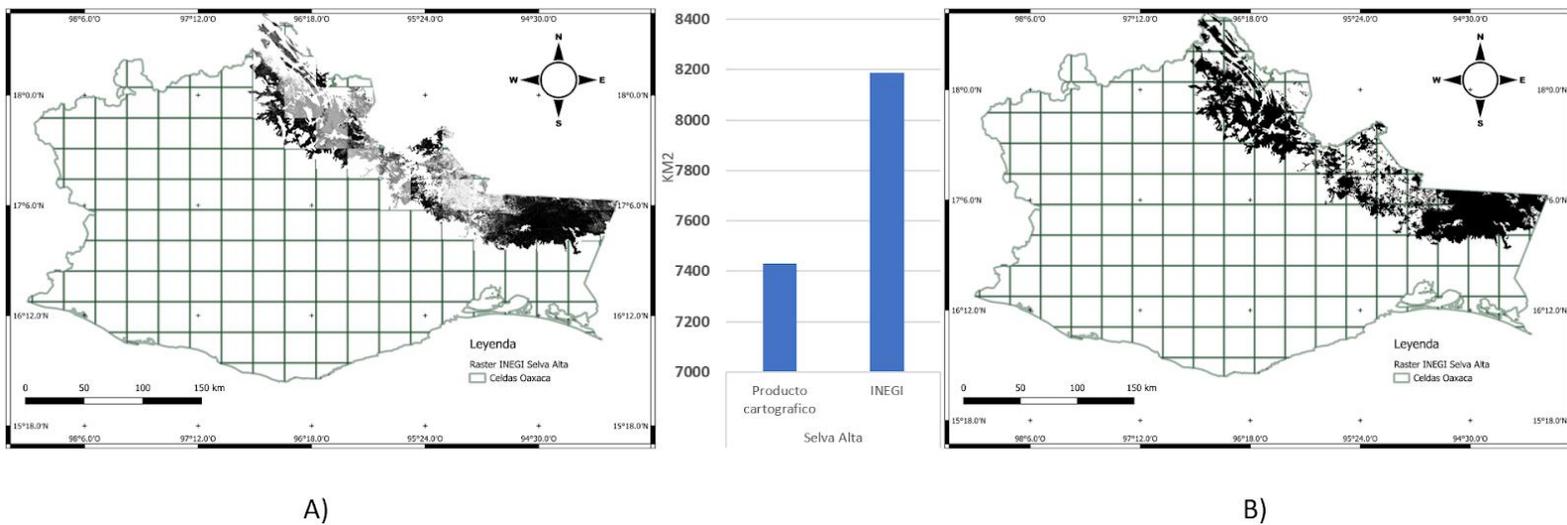


Figura 28. Gráfico comparativo de dosel forestal para la categoría "Selva Mediana".

Selva Alta

En esta comunidad forestal se puede observar que los resultados obtenidos en la cartografía propuesta abarcaron un total de 7,429.1487 Km² equivalente al 7.9202% del estado de Oaxaca, mientras que, los datos obtenidos de INEGI abarcaron un total de 8,189.5008 Km² equivalente al 8.7308% de la superficie estatal, la diferencia entre ambas fuentes fue de 760.3521 Km², equivalente a 0.8106% de la superficie estatal (fig. 29).



A)

B)

Figura 29. Comparativa de mapas y gráfico de cobertura forestal para la comunidad forestal de Selva Alta; A) Imágenes obtenidas mediante satélite SENTINEL-2; B) Imágenes obtenidas de la serie 7 INEGI, DATUM: EPSG:4326, Escala:1:2,500,000.

Condición del dosel forestal

Para el caso de la comunidad de Selva Alta se encontró que mayormente la cobertura forestal clasificada como dosel cerrado superó a la de dosel abierto, por un lado se registró 4896.5579 Km² de dosel cerrado lo que equivale a 65.91% de la cobertura forestal reportada y 5.2202% de superficie estatal, mientras que el dosel abierto reporta 2202.4184 Km² de cobertura (29.6456%) y 2.3480% de superficie estatal (fig. 30); los fragmentos de selva alta se encuentran localizados en la región Noreste del estado, se aprecia en análisis preliminares una clara continuidad entre los fragmentos.

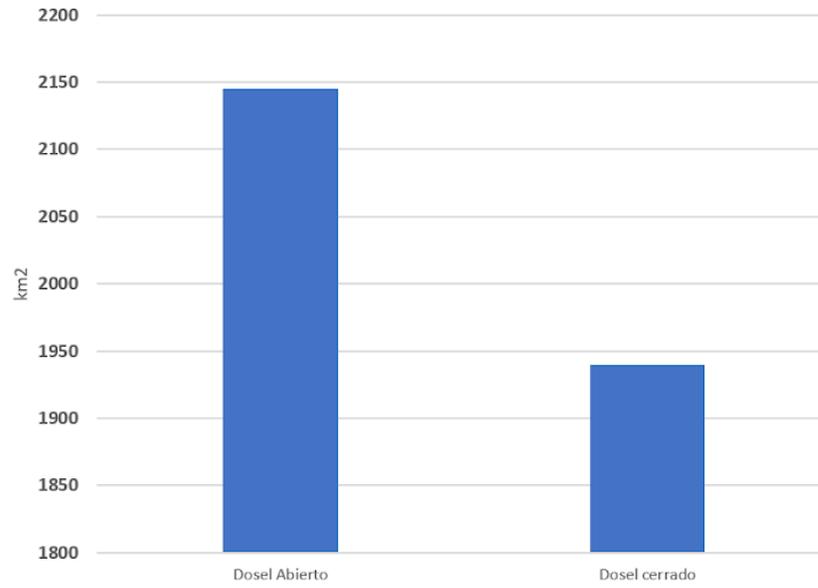


Figura 30. Gráfico comparativo de dosel forestal para la categoría “Selva Alta”.

Matorral

La categoría denominada “Matorral” se compuso de los polígonos correspondientes al estrato arbóreo tanto primario como secundario que se pudiese encontrar en los polígonos correspondientes al ecosistema Matorral de la serie 7, en el caso de esta comunidad forestal se puede observar que no se presentó una diferencia muy significativa en la cobertura, por un lado los resultados obtenidos de SENTINEL-2 abarcaron un total de 210.3798 Km² equivalente al 0.2243% del estado de Oaxaca, mientras que, los datos obtenidos de INEGI abarcaron un total de 222.1809 Km² equivalente al 0.2368% de la superficie estatal, la diferencia entre ambas fuentes fue de 9.8011 Km², equivalente a 0.01045% de la superficie estatal (Fig. 31).

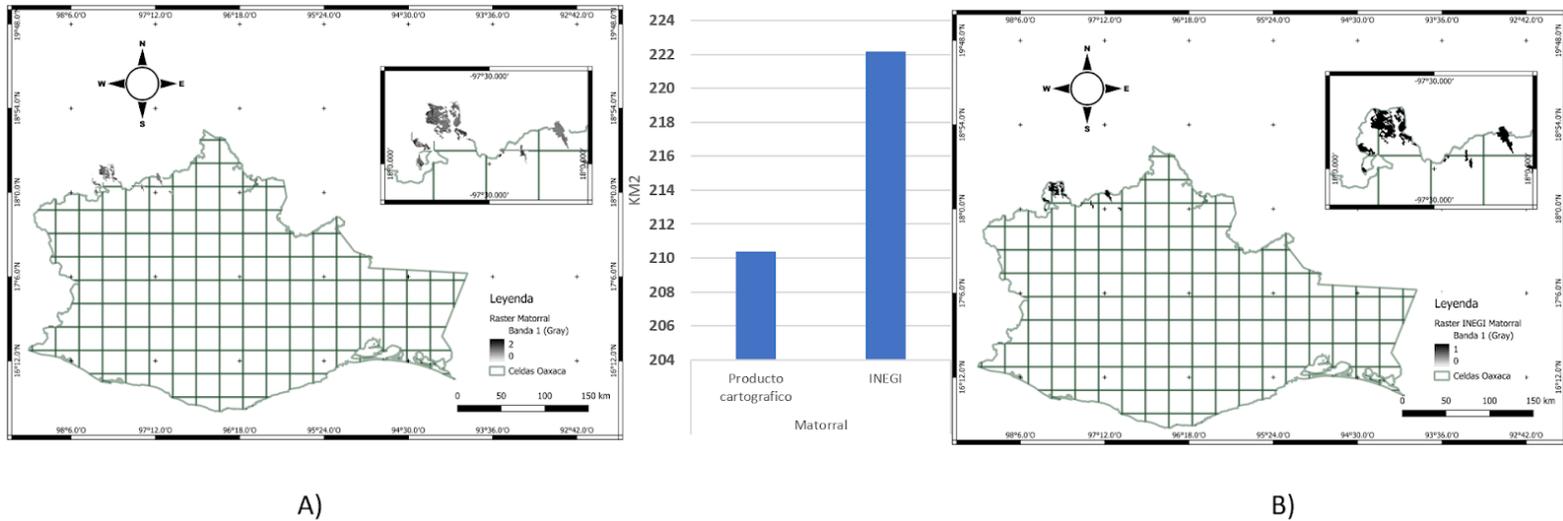


Figura 31. Comparativa de mapas y gráfico de cobertura forestal para la comunidad forestal de Matorral; A) Imágenes obtenidas mediante satélite SENTINEL-2; B) Imágenes obtenidas de la serie 7 INEGI, DATUM: EPSG:4326, Escala:1:2,500,000.

Condición del dosel forestal

La cobertura forestal clasificada como dosel abierto superó a la de dosel cerrado, por un lado se registró 56.4277 Km² de dosel cerrado lo que equivale a 26.8218% de la cobertura forestal reportada y 0.0601% de superficie estatal, mientras que el dosel abierto reportó 153.9520 Km² de cobertura (73.1781%) y 0.1641% de superficie estatal (fig. 32); a pesar de ser pocos los fragmentos a nivel estatal, estos se hallan concentrados en la región Norte del estado, específicamente en la frontera política con el estado de Puebla, en la región de la Mixteca Oaxaqueña.

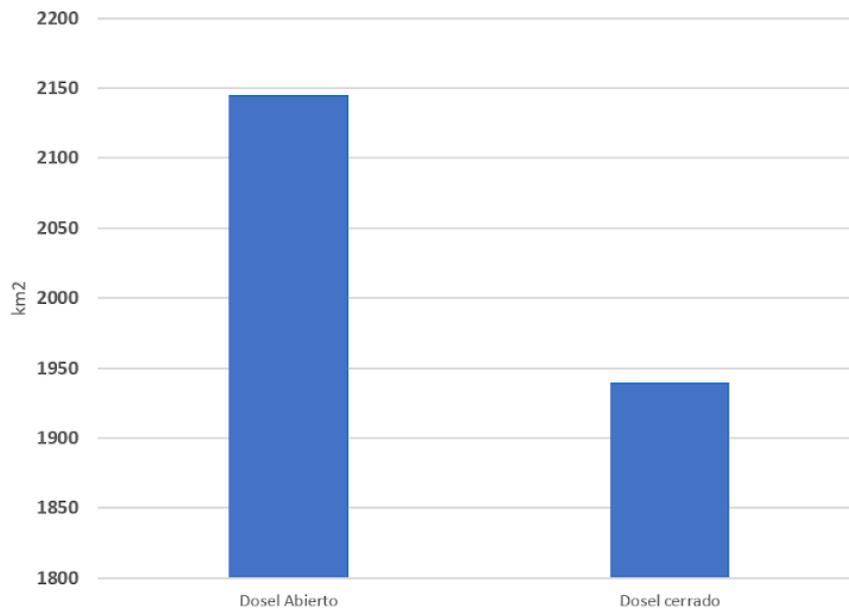


Figura 32. Gráfico comparativo de dosel forestal para la categoría "Matorral".

Chaparral

De igual forma que con la categoría matorral, el “Chaparral” se compuso de los polígonos correspondientes al estrato arbóreo tanto primario como secundario que se pudiese encontrar en los polígonos correspondientes al ecosistema Chaparral de la serie 7, en el caso de esta comunidad forestal se puede observar una diferencia significativa en la cobertura, por un lado los resultados obtenidos en la cartografía propuesta abarcaron un total de 147.2982 Km² equivalente al 0.1570% del estado de Oaxaca, mientras que, los datos obtenidos de INEGI abarcaron un total de 238.5428 Km² equivalente al 0.2543% de la superficie estatal, la diferencia entre ambas fuentes fue de 91.2446 Km², equivalente a 0.09727% de la superficie estatal (fig. 33).

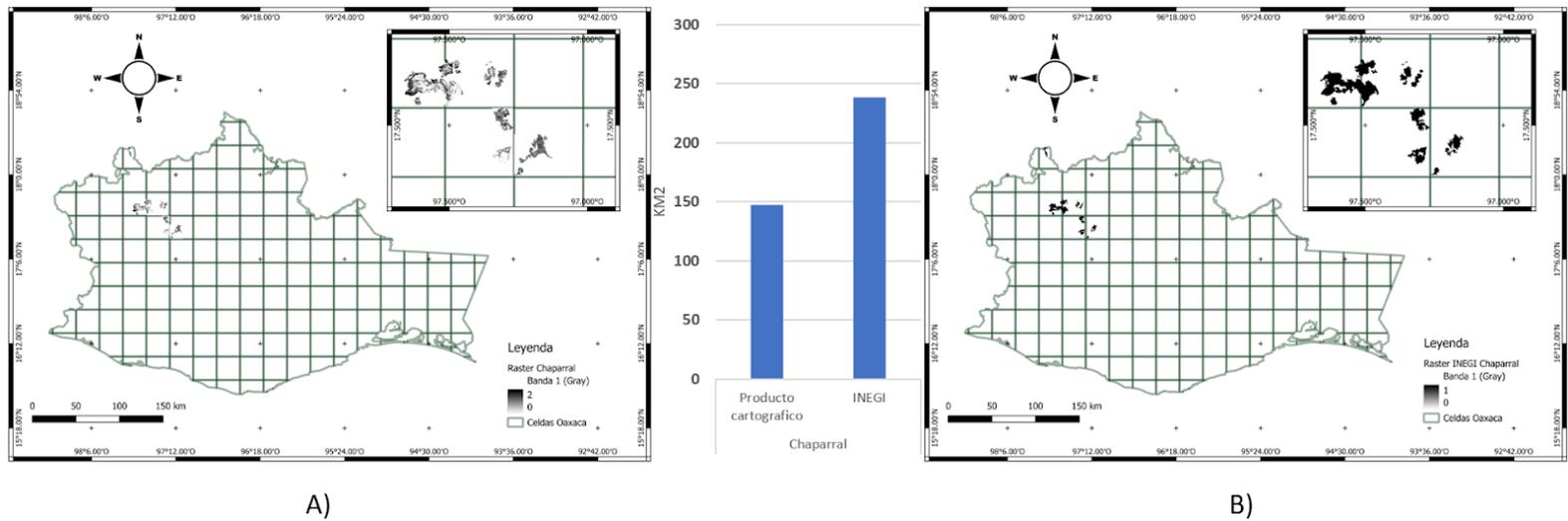


Figura 33. Comparativa de mapas y gráfico de cobertura forestal para la comunidad forestal de Chaparral; A) Imágenes obtenidas mediante satélite SENTINEL-2; B) Imágenes obtenidas de la serie 7 INEGI, DATUM: EPSG:4326, Escala:1:2,500,000.

Condición del dosel forestal

Se encontró que la cobertura forestal clasificada como dosel cerrado superó a la de dosel abierto, por un lado se registró 84.0407 Km² de dosel cerrado lo que equivale a 57.0548% de la cobertura forestal reportada y 0.08959% de superficie estatal, mientras que el dosel abierto reporta 63.2575 Km² de cobertura registrada (42.9451%) y 0.0674% de superficie estatal (fig. 34); ubicados en la porción centro-Norte del estado los fragmentos de chaparral se localizan principalmente en la región de la mixteca.

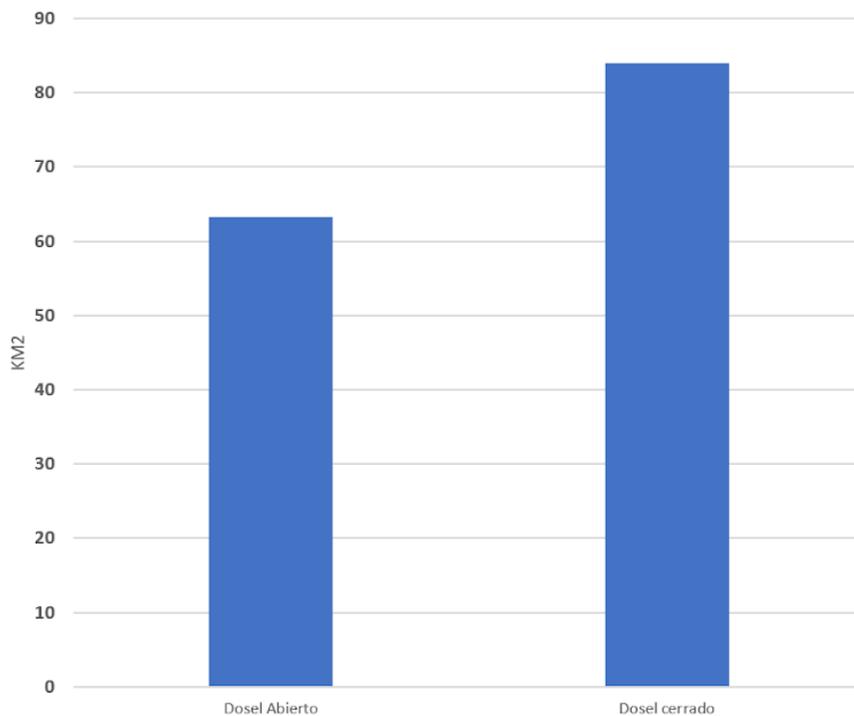


Figura 34. Gráfico comparativo de dosel forestal para la categoría "Chaparral".

Manglar

En el caso de esta comunidad forestal se puede observar una diferencia significativa en la cobertura, por un lado, los resultados obtenidos de SENTINEL-2 abarcaron un total de 129.1489 Km² equivalente al 0.1376% del estado de Oaxaca, mientras que, los datos obtenidos de INEGI abarcaron un total de 219.5787 Km² equivalente al 0.2341% de la superficie estatal, la diferencia entre ambas fuentes fue de 90.4298 Km², equivalente a 0.09640% de la superficie estatal (fig. 35).

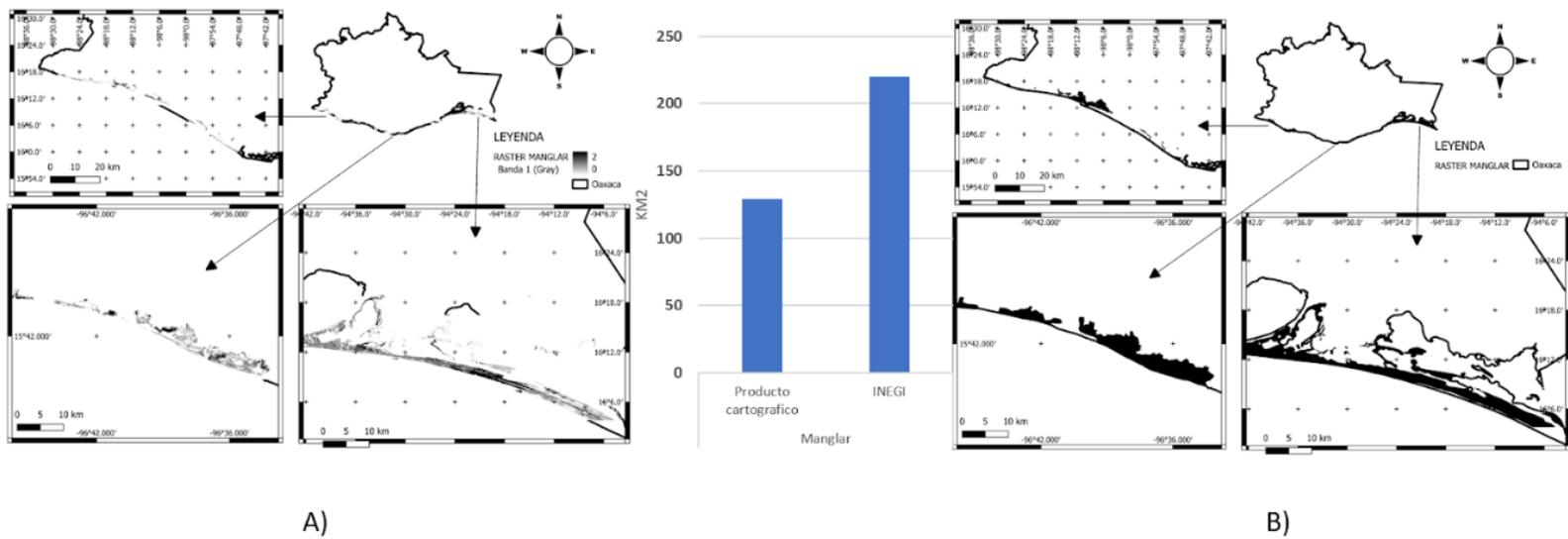


Figura 35. Comparativa de mapas y gráfico de cobertura forestal para la comunidad forestal de Manglares; A) Imágenes obtenidas mediante satélite SENTINEL-2; B) Imágenes obtenidas de la serie 7 INEGI, DATUM: EPSG:4326, Escala:1:2,500,000.

Condición del dosel forestal

Se encontró que la cobertura forestal clasificada como dosel cerrado superó a los de dosel abierto, por un lado se registró 41.5294 Km² de dosel cerrado lo que equivale a 32.1562% de la cobertura forestal reportada y 0.04427% de superficie estatal, mientras que el dosel abierto reportó 91.0806 Km² de cobertura registrada (70.5237%) y 0.0971% de superficie estatal (fig. 36); se aprecia a simple vista según los valores obtenidos del dosel y la distribución de los fragmentos de manglar a

lo largo de la costa del estado de Oaxaca que estos se encuentran considerablemente perturbados y diezmados.

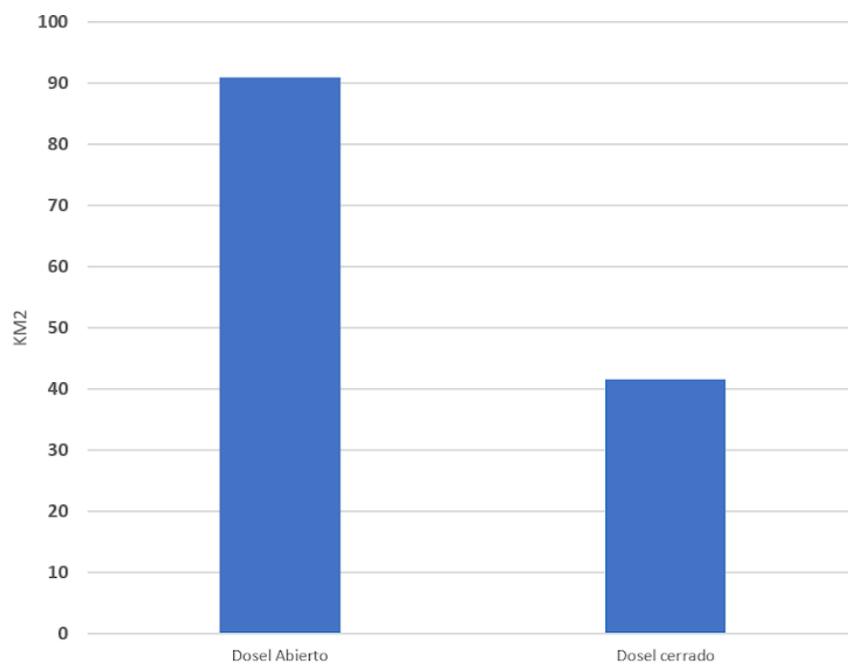
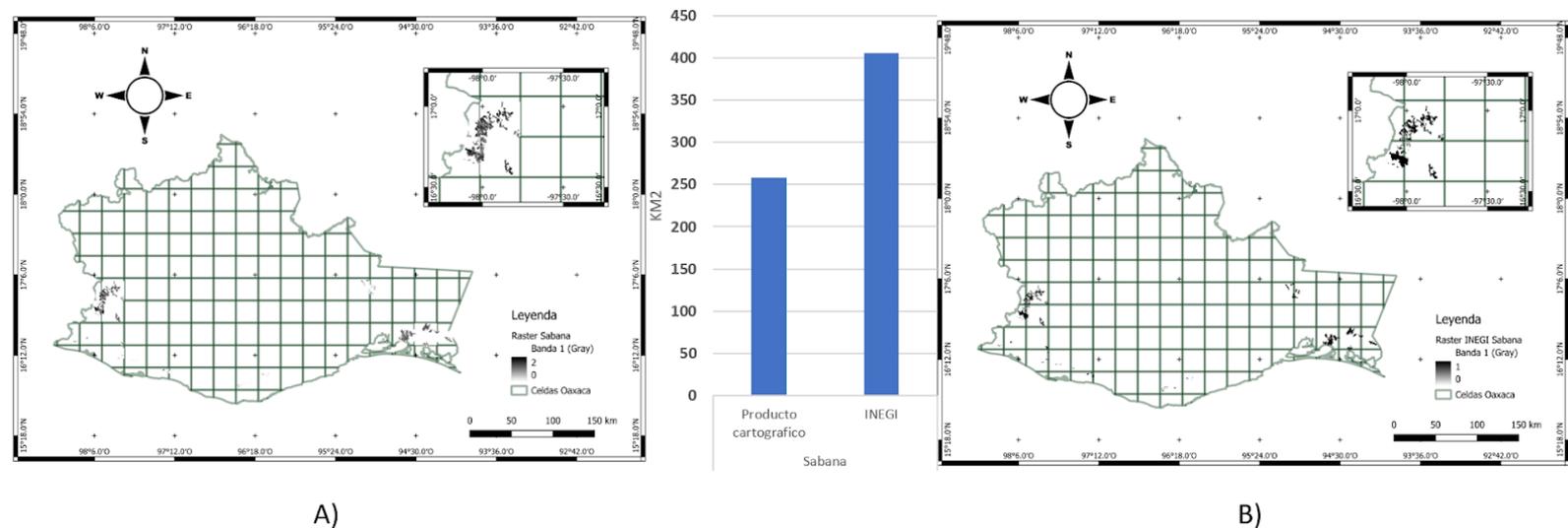


Figura 36. Gráfico comparativo de dosel forestal para la categoría "Manglar".

Sabana

En el caso de esta comunidad forestal se puede observar una diferencia bastante significativa en la cobertura, por un lado, los resultados obtenidos de SENTINEL-2 abarcaron un total de 258.4048 Km² equivalente al 0.2755% del estado de Oaxaca, mientras que, los datos obtenidos de INEGI abarcaron un total de 406.2420 Km² equivalente al 0.4330% de la superficie estatal, la diferencia entre ambas fuentes fue de 147.8372 Km², equivalente a 0.1576% de la superficie estatal (fig. 37).



A)

B)

Figura 37. Comparativa de mapas y gráfico de cobertura forestal para la comunidad forestal de Sabana; A) Imágenes obtenidas mediante satélite SENTINEL-2; B) Imágenes obtenidas de la serie 7 INEGI, DATUM: EPSG:4326, Escala:1:2,500,000.

Condición del dosel forestal

Se encontró que la cobertura forestal clasificada como dosel cerrado superó a los de dosel abierto, por un lado se registró 150.2723 Km² de dosel cerrado lo que equivale a 58.1538% de la cobertura forestal reportada y 0.1602% de superficie estatal, mientras que el dosel abierto reportó 114.0625 Km² de cobertura registrada (44.1410%) y 0.1216% de superficie estatal (fig. 38); en el caso de la sabana los fragmentos de cobertura arbórea se localizan en los extremos Este y Oeste del estado, de los cuales cabe mencionar, el conjunto más grande y en apariencia menos fragmentado es el que localiza en la región Oeste, perteneciente a la Sierra sur de Oaxaca.

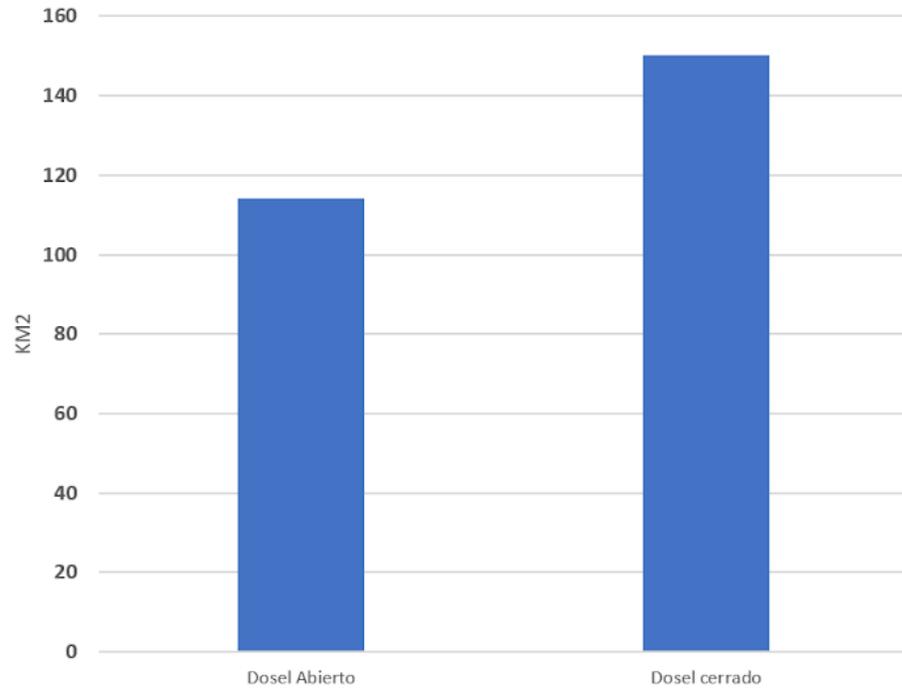


Figura 38. Gráfico comparativo de dosel forestal para la categoría "Sabana".

Discusión de resultados

En el proceso que llevó la realización de este trabajo se realizaron un total de 692 imágenes Ráster, las que comprendieron a los fragmentos para ocho diferentes comunidades forestales presentes en el estado de Oaxaca de Juárez, se realizaron 18 mapas en función de los datos que se utilizaron para ilustrar los hallazgos obtenidos mediante el análisis de las imágenes, análisis que se fundamentó en 4 índices de fragmentación del paisaje, es necesario mencionar que dada las dimensiones del proyecto y la cantidad de datos fue necesario elegir de los 16 indicadores que la herramienta *LecoS* incluido en el programa cartográfico *QGIS 3.32.3* utilizado para elaborar el análisis de fragmentación, debido a que el cálculo de estos superó gravemente la capacidad de cómputo, y calcular para las dimensiones del estado métricas como distancia euclidiana entre parches no fue posible.

Por otro lado, se obtuvieron datos que permitieron describir primero, la cobertura a nivel estatal e individual para cada fragmento de comunidad forestal presente en el estado, datos útiles para futuras investigación más localizadas que podrían facilitar y orientar la investigación del deterioro ambiental que México está sufriendo actualmente, así como a nivel institucional proveer un recurso de contraste que permita mejorar el análisis, catalogación y la regulación legal de los recursos forestales; así mismo, se obtuvieron datos que dan luz del estado actual de las comunidades forestales exponiendo puntos de posible interés científico, zonas de riesgo y la ineficiencia de medidas de reforestación, además de actualizar y validar los recursos satelitales a los que el público tiene acceso, pues se encontraron incluso entre recursos satelitales discrepancias entre la misión SENTINEL-2 e imágenes de alta resolución proveídas por GOOGLE SATELITAL fechadas como datos actuales que en realidad no han sido actualizadas propiamente en áreas de interés ecológico.

A lo largo de este proyecto se hallaron diferencias considerables en el campo y también en las cifras que las instituciones de gobierno reportan sobre la cobertura de las comunidades forestales, al comparar información proveniente de INEGI con la serie 7 e informes del 2018 y 2022 de CONABIO con respecto a los valores obtenidos de las imágenes SENTINEL-2 se aprecian diferencias considerables entre estos recursos.

Con respecto al origen de los datos, la base de datos que se utilizó para comparar el producto cartográfico elaborado en este proyecto fue la serie 7 de INEGI, la cual se realizó en base a imágenes de la misión satelital LANDSAT 8 elaborada a partir de imágenes tomadas en el año 2018 las cuales

están formadas por 10 bandas cuyas resoluciones son de 15, 30 y 100 metros, para lo cual INEGI reporta que se utilizaron imágenes con resolución máxima de 15 metros; sin embargo la información de LANDSAT reporta que la resolución de las bandas correspondientes en realidad tienen una resolución de 30 metros, una resolución menor que la obtenida mediante la misión SENTINEL-2.

Los totales de cobertura descrita para cada una de las fuentes presentó un área acumulada catalogada como territorio forestal considerablemente diferente pues los datos son considerablemente mayores de lo esperado, ambos informes de CONABIO superan incluso la cobertura neta de INEGI y con mayor razón la obtenida mediante SENTINEL-2; sin embargo como se ha discutido anteriormente las evidencias apuntan a una sobrestimación general de las coberturas forestales y la desactualización de los datos pues la diferencia no tiene sentido con lo que a simple vista se puede observar mediante imágenes satelitales (fig. 39).

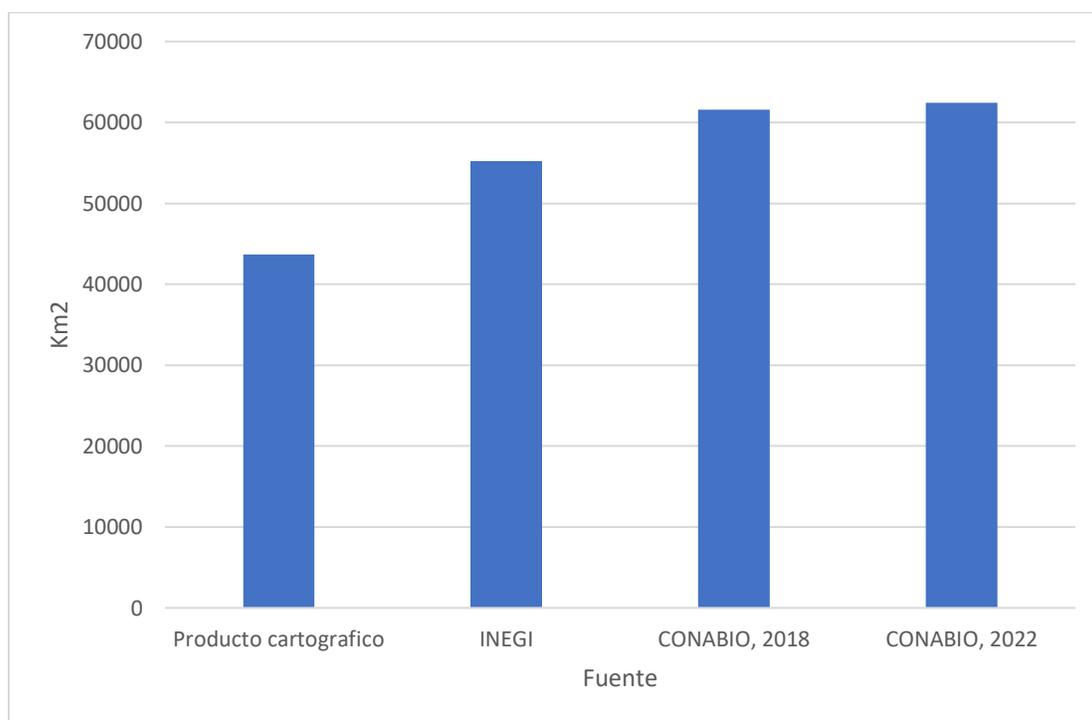


Figura 39. Comparativo de coberturas forestales totales; fuentes Producto cartográfico de esta disertación (imágenes tomadas en 2023); Serie 7 USV INEGI (2017-2020); CONABIO, 2018; CONABIO, 2022.

A continuación, se analizaron y contrastaron los resultados obtenidos con investigaciones y registros similares en la región, la materia y la metodología, para así poder validar y justificar los resultados obtenidos.

Análisis de fragmentación por comunidad forestal

Con el fin de que los resultados de este trabajo fueran comparables con la a Serie 7 de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI, cada una de las comunidades forestales evaluadas en este proyecto fueron agrupadas en base a las categorías descritas en la Serie 7 de Uso de Suelo y Vegetación, estos agruparon los polígonos que comprendía las comunidades tanto primarias como secundarias de los ecosistemas, así como los estratos arbóreos de cada uno.

Bosques

La categoría de bosques, como se aclaró anteriormente en el apartado de resultados con el propósito de disminuir el número de fragmentos a estudiar se consideró dentro de esta categoría los ecosistemas de coníferas (bosques pino y encino así como combinaciones) y el ecosistema de bosque mesófilo de montaña, más no se consideraron los bosques cultivados claramente por su origen antrópico, los resultados obtenidos en este proyecto fueron para las imágenes satelitales SENTINEL-2 fue de apenas 24,784.3425 Km² de cobertura forestal mientras que INEGI reportó un total de 31,078.4191 Km², contabilizando una discrepancia del 6.71% de la superficie estatal; al contrastar los resultados obtenidos del presente proyecto con información obtenida de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), en dos informes uno publicado en el año 2018 y otro publicado en el año 2022, los resultados distan aún más incluso entre instituciones, pues, CONABIO, 2022 reportó un total de 34,580.36 Km² para los mismos ecosistemas que la categoría de Bosques contemplo en este proyecto, mientras que de igual forma CONABIO 2018 reporto 33,626.262 Km².

De acuerdo con los resultados obtenidos, se muestra que el 59% de dosel se encuentra en categoría de dosel abierto o fragmentado asociado a tamaños de fragmentos año promedio de 0.02973 Km²; estos resultados indican la severidad de la situación de los bosques en el estado de Oaxaca, pues si se considera en primera instancia el tamaño promedio de parche este ni siquiera equivale a un kilómetro cuadrado de manera continúa siendo que en el estado hay varias zonas de conservación ecológica.

Selva Baja

Con respecto a esta comunidad, la segunda más grande en extensión, las coberturas obtenidas por medio de SENTINEL-2 y la rasterización de la serie 7 de INEGI son bastante distantes, pues SENTINEL-2 registro 6,963.4844 Km² mientras que INEGI se encontró una extensión de 10,337.454 Km². Al comparar ambos resultados con el informe realizado por *CONABIO, 2022* el cual no se realizó distinción por ecosistema sino solamente dividido en selvas caducifolias y selvas perennifolias las cuales bien describen a la selva baja, pues ésta abarca desde la selva baja perennifolia, subperennifolia y la caducifolia, por ello se considerará el total de ambas categorías en el informe de CONABIO 2022. Para realizar un contraste entre las instituciones, por lo tanto el área de cobertura general de selvas en el estado de Oaxaca CONABIO realizó en el año 2018 un informe que contiene información desglosada relacionada con el Inventario Nacional Forestal de cada ecosistema y cuenta con una diferenciación en los tipos de selvas, para el cual la superficie determinada para la selva baja general es de 11,569.1816 Km² lo que discrepa bastante con los resultados obtenidos pues con respecto a INEGI resulta 1231.7276 Km² mayor a lo registrado en la serie 7 y peor aún con respecto a las imágenes SENTINEL-2, para la cual es 4599.6972 Km² Además de las discrepancias ya señaladas, es importante resaltar que a partir de nuestros resultados se infiere que las selvas bajas del estado presentan un alto grado de fragmentación, con tamaños promedio de parche de 0.02326 Km²; a este dato se suma que el 64.81% de esta agrupación vegetal fue catalogada como dosel abierto, agravando el indicador de deterioro.

Selva Mediana

La selva mediana resulta un caso interesante, pues de los resultados obtenidos en el presente proyecto es la comunidad forestal que empató mejor con respecto a los datos de INEGI, la cobertura forestal determinada mediante las imágenes SENTINEL-2 fue de 4,097.08 Km² mientras que la obtenida mediante INEGI fue de 4877.8125 Km² siendo que la diferencia que existe entre ambos recursos es de apenas 780.7325 Km² una de las diferencias de menor magnitud con respecto a las demás comunidades forestales, sin embargo *CONABIO, 2018* reporto 5972.0236 Km² lo que ciertamente dista de ambos recursos. Por otro lado, a partir del producto cartográfico se identificó

que el 52% se encuentra integrando por parches de dosel abierto, los cuales en promedio presentaron un tamaño de apenas 0.01399 km² mientras que en las imágenes obtenidas a partir de INEGI se obtuvieron parches mucho más grandes de 14.7371 km² en promedio.

Selva Alta

Para la selva alta se registraron coberturas de 7,429.1487 Km² para SENTINEL-2 y 8189.5008 Km² para INEGI de lo cual existe una diferencia de 760.3521 Km² una diferencia considerable más al contrastarlas con CONABIO, 2018 que reportó 9350.6348 Km² del cual los resultados obtenidos de imágenes satelitales distan 1921.8461 Km². En cuanto al estado del dosel, nuestros resultados muestran que el 65% de la cobertura se encuentra en categoría de dosel cerrado. con respecto al tamaño promedio de los parches para este ecosistema se registró para el producto cartográfico un promedio de 0.06559 km² mientras que para las imágenes a partir de INEGI serie 7 42.9222 km² en promedio.

Matorral

Los matorrales con elementos arbóreos o semi arbóreos en el estado de Oaxaca se presentaron principalmente en la región norte del estado, principalmente la que colinda con el estado de Puebla, que si bien se hallan distribuidos en un área bastante pequeña se contabilizaron 29,075 fragmentos con un tamaño promedio de 0.10689 Km² equivalentes a 106,980 m², un estado de dosel donde el 70.1788% es dosel abierto lo que aunado una longitud de borde de 4,417.88 Km indica que si bien se encuentran localizados en un área pequeña, también es cierto que la cobertura arbórea se halla muy deteriorada. Las coberturas obtenidas en el precedente proyecto de tanto SENTINEL-2 como INEGI con datos de CONABIO, 2022 resulta importante la clara sobreestimación de la cobertura, pues mientras que para SENTINEL-2 se registró una cobertura de 147. 2982 Km² para INEGI se obtuvieron 238.5488 Km² y en CONABIO, 2022 se registraron 431.76 Km² cada valor aún mayor más y sin embargo las diferencias entre ambas instituciones son drásticas pues CONABIO registro 80% más que INEGI de cobertura y ya cuando se compara con los datos del satélite

SENTINEL-2 la desproporción es aún mayor, pues prácticamente 3 veces mayor la cobertura registrada.

Manglar

Los manglares son descritos como comunidades florísticas uniformes compuestas comúnmente por una o dos especies arbóreas o arbustivas, caracterizados por ser perennes distribuidos a lo largo de las costas del Golfo de México, el mar caribe también en las costas de Pacífico donde el estado de Oaxaca no ocupa un lugar destacado (Pennington et al., 2005); más es importante hablar de su condición, la cual de hecho es preocupante, primero porque de los datos obtenidos la diferencia entre la cobertura registrada por INEGI y la registrada por las imágenes satelitales es de 90.42 Km² una cantidad que aunado con que en los registros del dosel el dosel abierto o con un nivel de deterioro supera 70.52% de la cobertura respectiva, da indicaciones del deterioro de las comunidades de manglares, segundo al contrastar los resultados obtenidos del presente proyecto con información obtenida de la *CONABIO, 2022*, con mayores discrepancias pues para *CONABIO, 2022* se tenían registrados 309.87 Km² de manglares a lo largo de la costa del estado de Oaxaca, sin embargo nuestros resultados muestran existencia de discrepancias tanto con CONABIO directamente como también de la información de INEGI con respecto a la publicada en el informe de CONABIO, primero con respecto al INEGI y su carta de USV se registraron 219.5787 Km² lo que discrepa en 90.2913 Km² de lo reportado por CONABIO así como al comparar ambos recursos institucionales con los datos obtenidos de imágenes satelitales que obtuvieron solamente 129.1488 Km² lo que dista con respecto a INEGI 90.4298 Km² Y CONABIO 180.7212 Km² lo que claramente indica discrepancias drásticas.

Con respecto al resto de los indicadores obtenidos en este trabajo, resaltan la condición de los manglares en el estado de Oaxaca, primero con respecto al número de parches en las imágenes de SENTINEL-2 se aprecia un total de 29,195 parches en total, de los cuales el tamaño promedio fue de tan solo 0.008649 Km² equivalente a 8649 m² mientras que su longitud de borde reporta una longitud de 4343.52 Km que indica que el total de los fragmentos que componen la comunidad forestal abarcan una porción reducida en área más si a lo largo de la línea costera del estado, más y sin embargo, que abarque tal magnitud no compensa su estado pues de los registros obtenidos el 70.52% del dosel se encuentra con un nivel de deterioro y fragmentado.

Sabana

La sabana comúnmente descrita como regiones extensas cubiertas por pastizales en las que unos cuantos árboles crecen separados unos de otros, son zonas que se encuentran climáticamente relacionadas con las selvas alta, mediana y selva mediana, sin embargo en casi la totalidad de los casos a nivel nacional las condiciones edáficas que permiten la presencia de sabanas han sido inducidas por actividades agropecuarias (Pennington et al., 2005); en lo que respecta al estado de Oaxaca las sábanas se describen principalmente en la región del istmo de Tehuantepec, el presente proyecto consideró únicamente los estratos arbóreos, se registraron 258.4048 Km² de sabana de la cual 114.0625 Km² se clasificaron como dosel abierto lo que significa que el 44.1410% de la superficie registrada se encuentra con un dosel abierto o con grado de deterioro, sin embargo datos de CONABIO en su informe publicado en el año 2022 ni siquiera la cataloga como un ecosistema, lo que apoya la noción de que este fuese inducido por actividades antrópicas, el hecho de que la sábana en el estado de Oaxaca pueda ser originaria o pudiera ser inducida no es del todo interés para el presente proyecto más si lo es el deterioro que está presente, pues los resultados indican valores de cobertura 258.4048 Km² con respecto a SENTINEL-2, mientras que para INEGI se registraron 406.2420 Km², prácticamente el doble de cobertura más dadas las condiciones para que se produzca una sábana tales como lo son la presencia de suelos inestables, es decir con perturbación drástica. Se identificaron 69,727 fragmentos que en total acumularon una longitud de borde de 9,545.75 Km con un tamaño promedio de 0.00819 Km² lo que indica fragmentos bastante pequeños y el 44% como dosel abierto.

Diferencias en imágenes Ráster

Durante la realización de esta disertación surgieron diferencias relativamente similares entre las imágenes obtenidas mediante el satélite SENTINEL-2 y las imágenes obtenidas a partir de los polígonos rasterizados de la serie 7 de INEGI, sin embargo surgieron celdas en las que las diferencias fueron considerablemente significativas, algunas en las que áreas similares presentaron diferencias drásticas en la cobertura forestal, otras donde INEGI catálogos una ínfima fracción de la comunidad forestal y otras que aun cuando las imágenes resultaron diferentes en apariencia arrojaron resultados similares; a continuación se expondrán y analizarán casos de estudio de algunas celdas donde estas diferencias se hicieron notar para cada comunidad forestal (fig. 40).

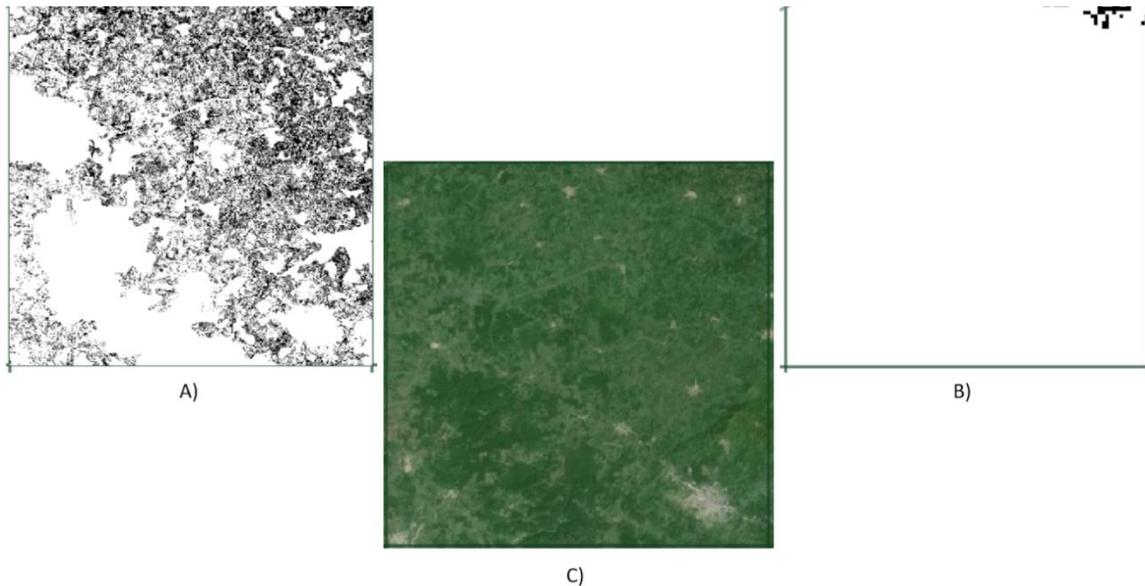


Figura 40. Ejemplo de diferencia en cobertura forestal entre INEGI e imágenes satelitales SENTINEL 2 en la celda 14 de la comunidad forestal "Bosques"; A) Cartografía propuesta; B) Serie 7 INEGI; C) Imagen de alta resolución de GOOGLE EARTH ENGINE (GEE).

Casos de estudio para Bosques

Celda 1

Esta celda muestra aparentemente áreas similares incluso en el caso de la imagen de SENTINEL-2 muestra más área cubierta en la parte izquierda baja de la celda más y sin embargo la imagen de INEGI obtuvo una mayor cobertura forestal, esto se debe claramente a que si bien en la imagen de SENTINEL-2 hay más área cubierta también es cierto que al hacer una diferenciación del dosel buena parte del área superior derecha se encuentra totalmente desprovisto de cobertura arbórea más la imagen de INEGI al no considerar esto únicamente realiza un corte uniforme, errado de la cobertura que pudo abrir puerta a malas gestiones y datos erróneos de las condiciones de los bosques (fig. 41).

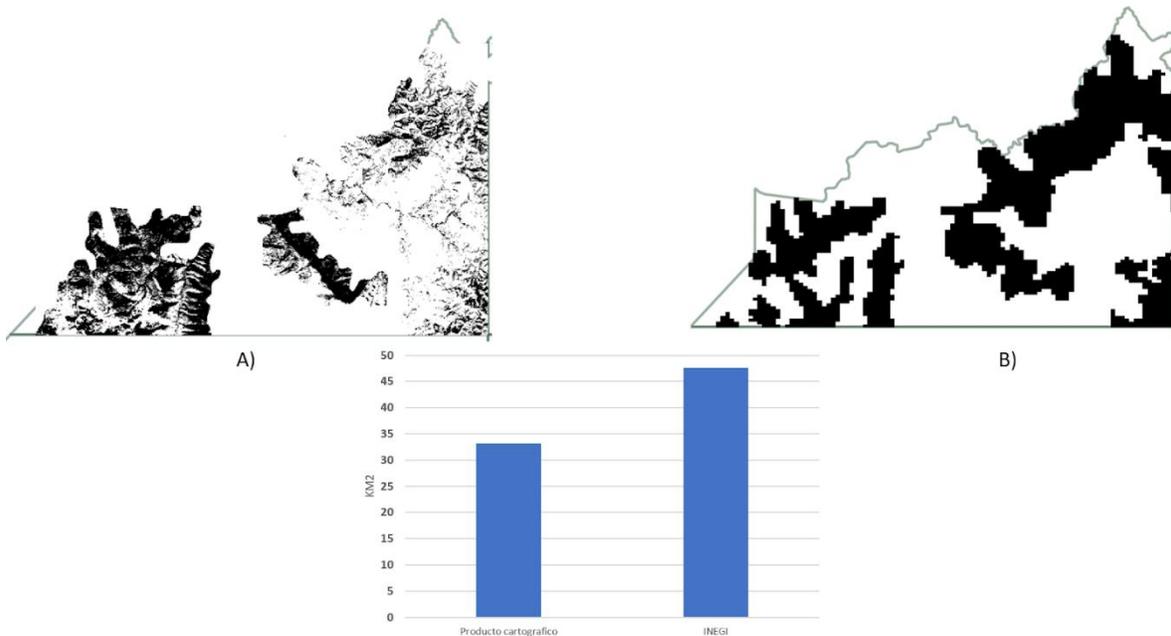


Figura 41. Contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 1 comunidad forestal "Bosques"; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Celda 14

El caso de la celda 14 es particularmente difícil pues la celda posee una amplia cobertura forestal según las imágenes ráster de SENTINEL-2 más también las imágenes de alta resolución obtenidas de GOOGLE Earth Engine que son las mismas disponibles en otras plataformas de la compañía como GOOGLE Maps (imagen); más INEGI cataloga prácticamente el 95% de la celda como pastizal cultivado para lo cual la celda no cumple los criterios que caracterizan a los pastizales, es verdad que hay asentamientos y parcelas más aún existe conectividad de la celda con respecto a sus aledaños que demuestran la presencia de bosques no catalogados (fig. 42).

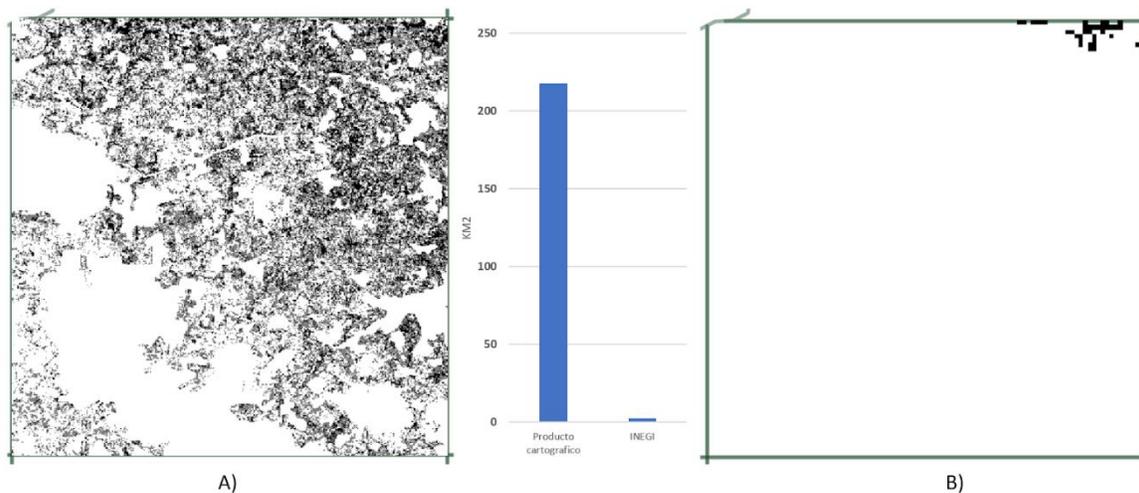


Figura 42. Contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 14 comunidad forestal “Bosques”; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Si bien es verdad que hay asentamientos y parcelas presentes en la celda, aún existe conectividad de la celda con respecto a sus aledaños específicamente con la celda inmediata superior la cual presenta una cobertura amplia similar a la de la celda 14 más de la misma forma se halla documentada por INEGI con un área mínima perteneciente a bosques, que demuestran la necesidad de actualizar los datos y analizar la presencia de bosques no catalogados (fig. 43).



Figura 43. Comparativa de imágenes ráster ampliada de celda 14 y celda superior; A) Cartografía propuesta, B) INEGI.

Celda 23

En este caso se encontró una clara diferencia que apoya la idea de actualizar los datos de INEGI una gran porción de Bosque que se encuentran en la parte izquierda de la celda son ignoradas completamente sin que estas aparenten la forma y uniformidad de parcelas, así mismo la cobertura forestal que se halla en las mismas áreas que INEGI registra se aprecia una diferencia en el estado del dosel, especialmente en la esquina superior derecha donde se aprecia una disminución del dosel cerrado y una serie de huecos en el dosel (fig. 44).

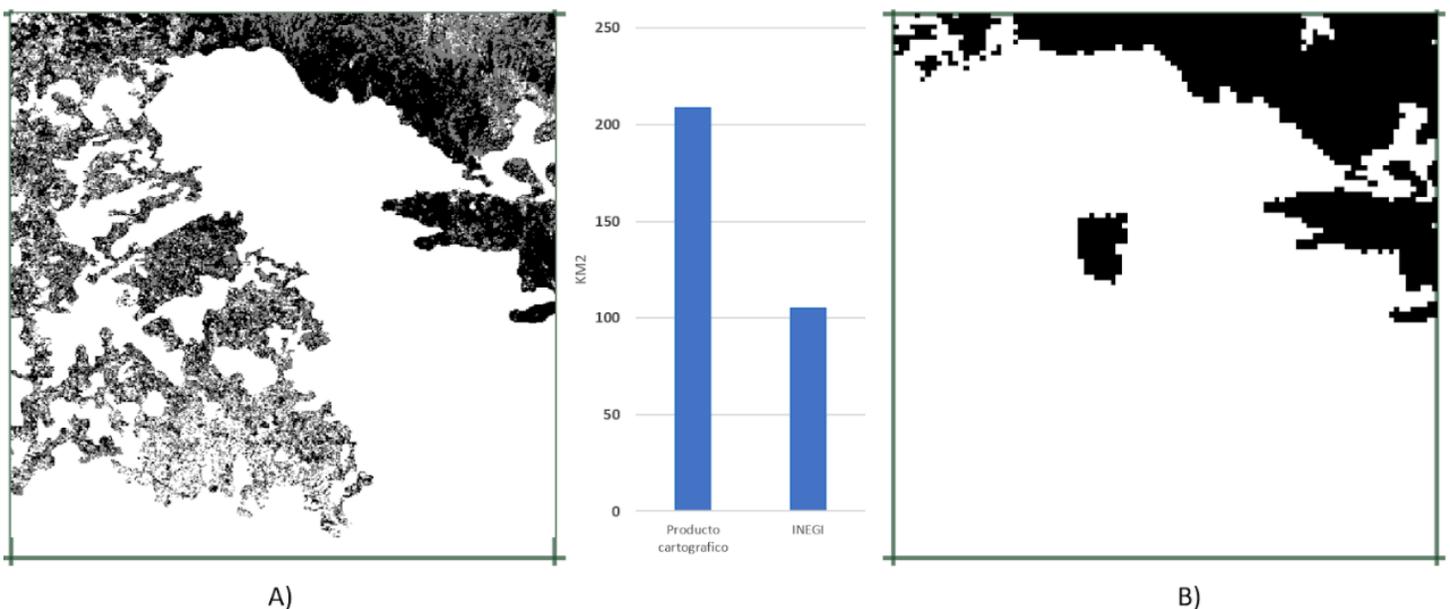


Figura 44. Contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 23 comunidad forestal "Bosques"; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Casos de estudio para Selva Baja

Celda 46

Esta celda presenta áreas similares sino es que idénticas entre ambas fuentes de información en lo que a sus límites compete, más la diferencia en la cobertura es considerablemente grande pues el área izquierda que para INEGI se podría considerar con una presencia clara de bosques en la imagen satelital apenas y registra vegetación lo cual discrepa fuertemente con los datos de INEGI además de que este mismo ignora un área considerable en el extremo derecho de la celda donde la vegetación parece más cerrada.

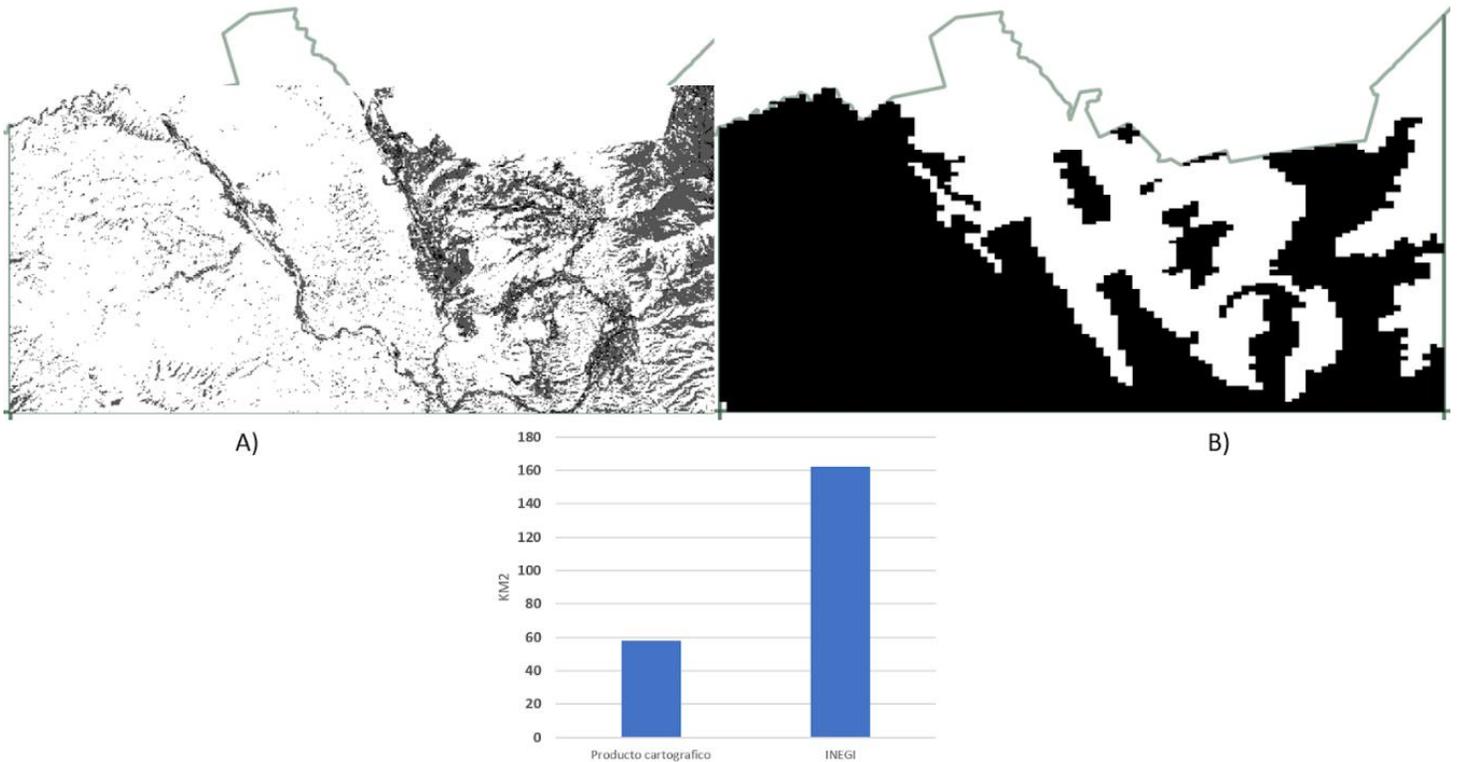


Figura 45. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 46 comunidad forestal "Selva Baja"; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Celda 87

De manera similar a otras celdas donde el área registrada por INEGI sobrestima la cobertura forestal, está además debe considerarse que presente un área menor que la imagen satelital y aun así reporta una cobertura mucho mayor de más de 10 Km² por otro lado es importante resaltar que de las regiones donde ambas fuentes de energía presentan cobertura la imagen satelital reporta de manera más detallada la cobertura y delimita mejor las áreas donde la cobertura prácticamente es inexistente.

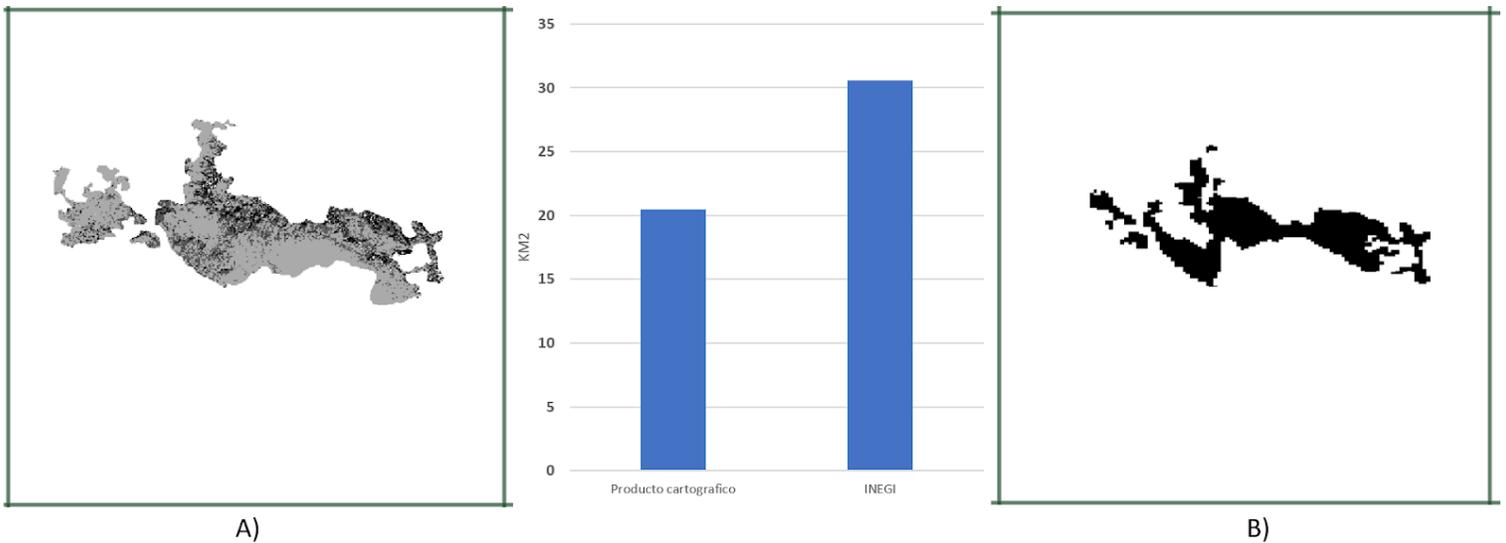


Figura 46. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 87 comunidad forestal “Selva Baja”; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Casos de estudio para Selva Mediana

Celda 23

En esta celda la fragmentación de las imágenes es considerablemente diferente, especialmente en el registro de INEGI más al compararla con la imagen SENTINEL-2 demuestra que hay conectividad entre los espacios que a su vez indica que subestima considerablemente la cobertura forestal.

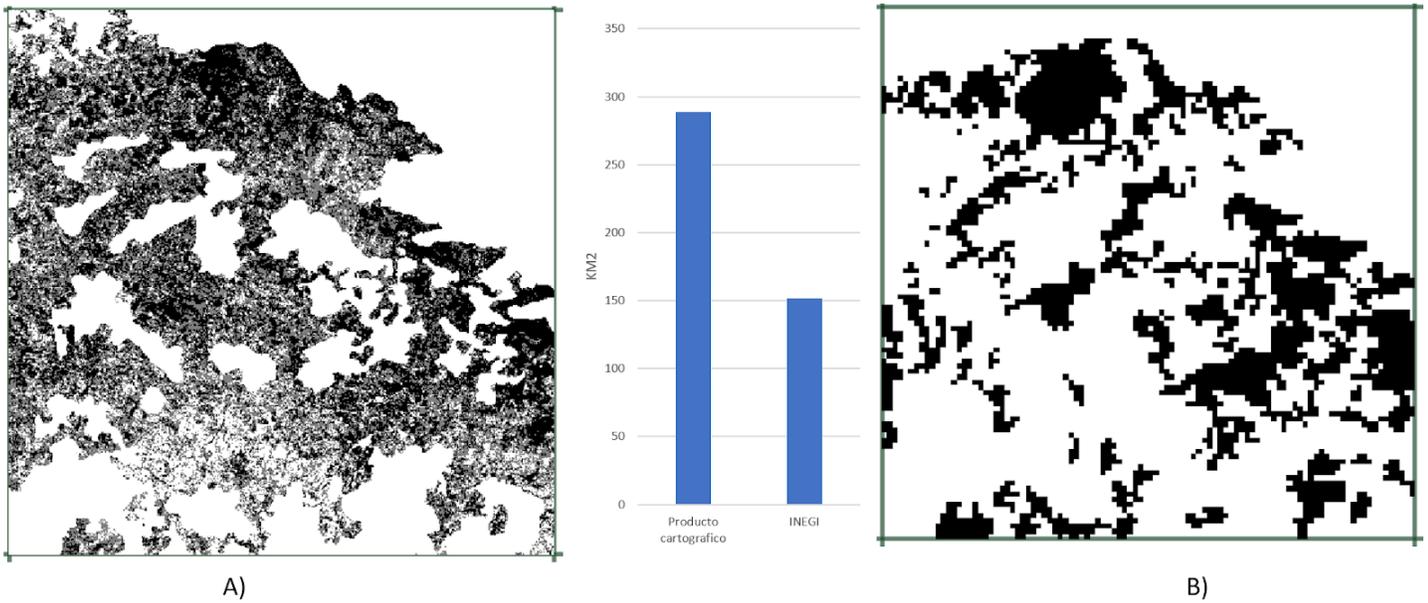


Figura 47. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 23 comunidad forestal "Selva Mediana"; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Celda 91

Esta celda evidencia la sobrestimación de la cobertura forestal con respecto a la serie 7 de INEGI, pues las imágenes son en sus dimensiones prácticamente idénticas más la diferencia entre las coberturas completamente diferentes, es evidente en la imagen satelital que la gran mayoría de la celda se encuentra con el dosel abierto y claramente deteriorado, más la parte sur contiene el área mejor conservada, en contraste con la supuesta uniformidad que las imágenes de INEGI ofrece, hecho que claramente debe remediarse.

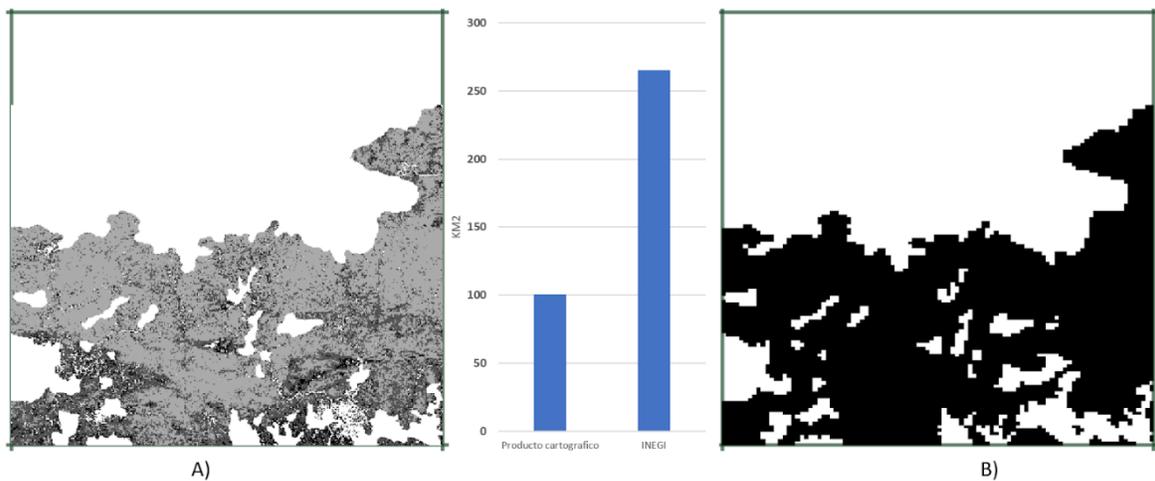


Figura 48. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 91 comunidad forestal “Selva Mediana”; A) imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Casos de estudio para Selva Alta

Celda 69

Para esta celda ocurre similar a con las celdas 91 y 46 las áreas son técnicamente idénticas más la cobertura abismalmente diferente, por un lado, debe resaltarse que la cobertura claramente está dominada por dosel cerrado más la diferencia aun así es considerable, de 13.25 Km² una diferencia factible y que demuestra la eficiencia del producto cartográfico para determinar las coberturas forestales.

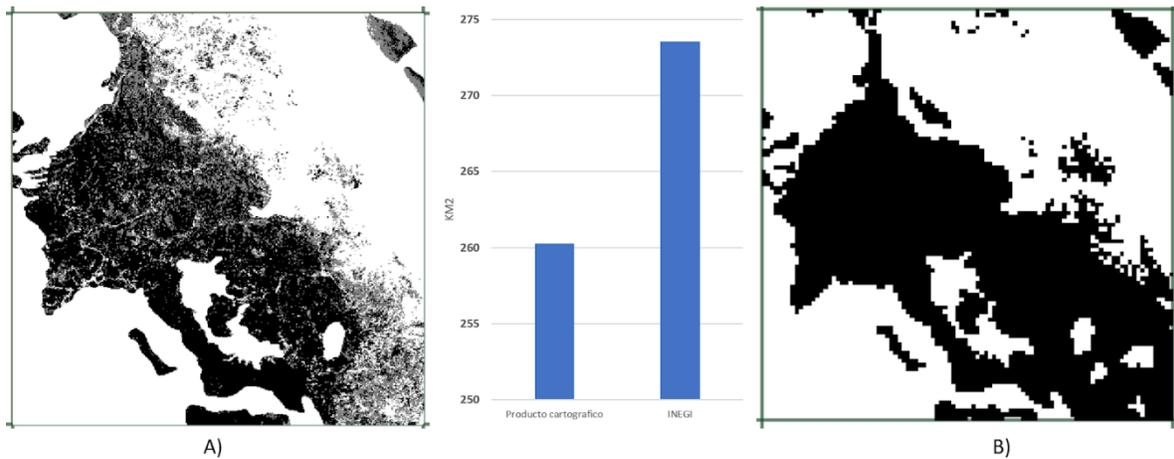


Figura 49. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 69 comunidad forestal "Selva Alta"; A) imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Celda 93

El caso de esta celda denota el lado opuesto de la tendencia pues si bien la mayor parte de las celdas analizadas la cobertura forestal de SENTINEL-2 es menor que la de INEGI en este caso la supera considerablemente, aunque nuevamente evidencia la necesidad de actualizar los datos de INEGI.

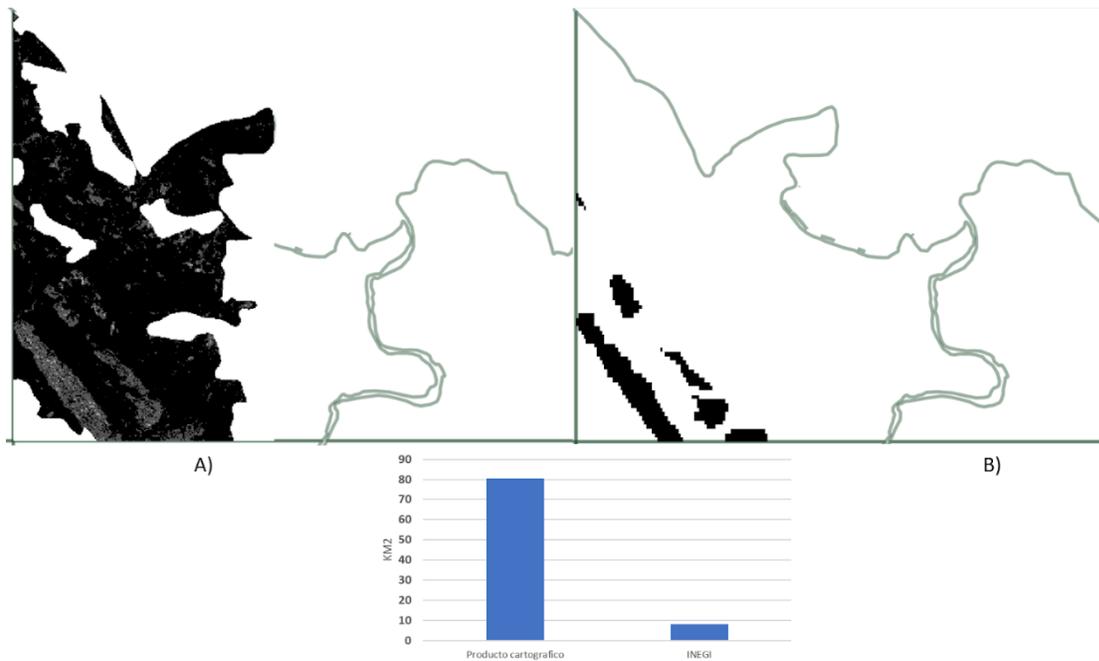


Figura 50. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 93 comunidad forestal “Selva Alta”; A) imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Caso de estudio para Matorral

Celda 17

Esta celda denota un caso que particularmente parece extraño pues si bien continúa con el patrón de aumentar área de cobertura forestal en la imagen satelital esta reporta áreas bastante desprovistas de cobertura que ni siquiera aparecen descritas en los polígonos de INEGI.

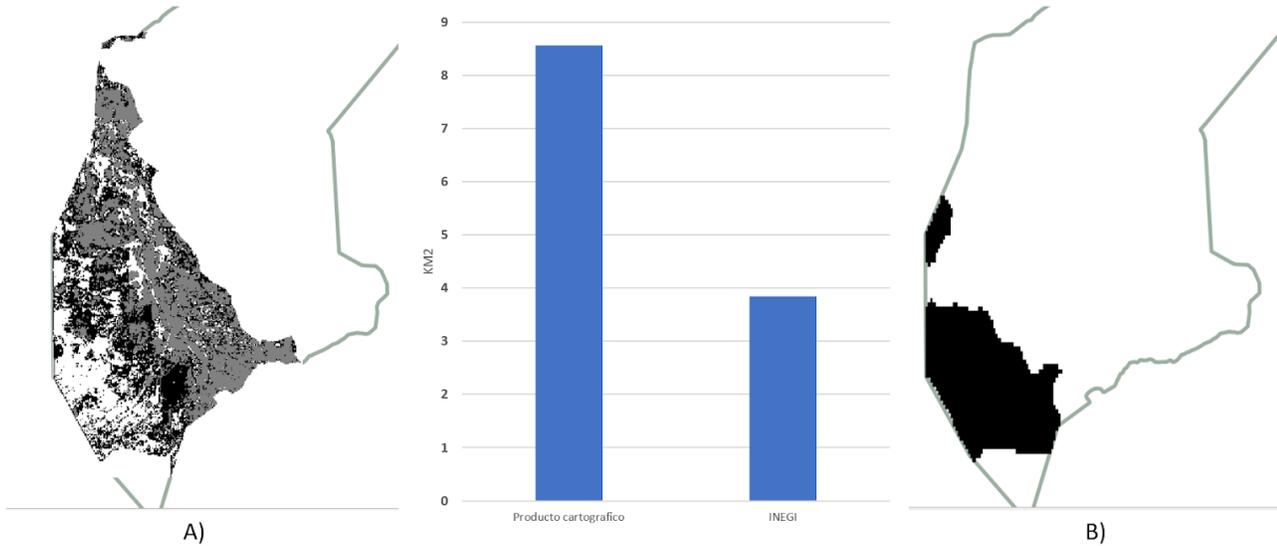


Figura 51. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 17 comunidad forestal "Matorral"; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Caso de estudio para Chaparral

Celda 49

En este caso la imagen de SENTINEL-2 plasma una mayor cobertura y una más diversa pues, así como zonas que para INEGI no están contempladas aparecen mejor clasificadas las regiones que aparecen en ambas fuentes discrepan considerablemente en lo que al estado de su dosel refiere, lo que no sorprende debido al ecosistema del que se trata más eso solo hace más evidente la necesidad de mejorar la especificidad de los datos.

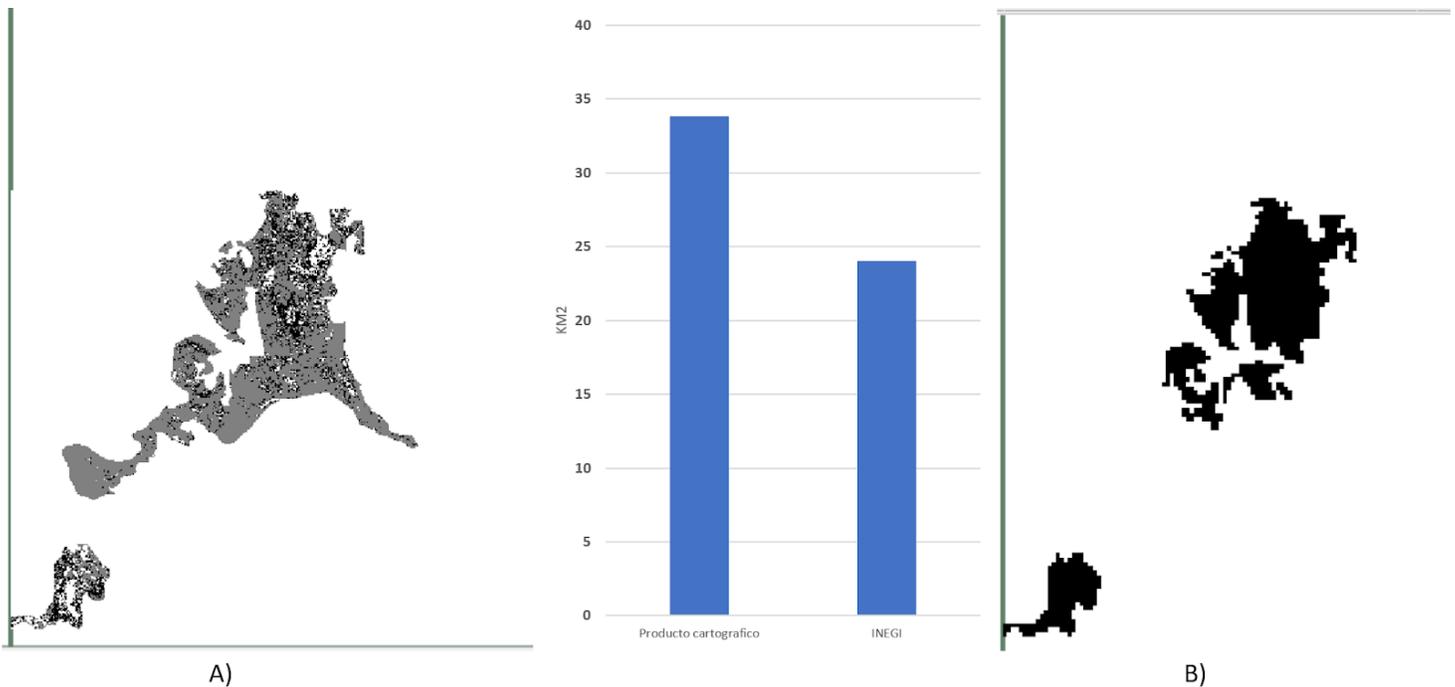


Figura 52. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 49 comunidad forestal “Chaparral”; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Casos de estudio para Manglar

Celda 25

El caso de los manglares es uno considerablemente difícil pues como se mencionó anteriormente la importancia ecológica, social e incluso legal de la conservación de estos ecosistemas es tema de debate y los resultados obtenidos solo parecen exacerbar más la discusión, pues es general el caso de que la información de INEGI subestima considerablemente tanto las extensiones de los manglares más en términos generales la cobertura es mucho menor a la reportada por instituciones como INEGI o CONABIO, en el caso particular de la celda 25 se subestima la cobertura forestal considerablemente mientras que al observar la imagen de SENTINEL-2 es evidente el deterioro que existe en los manglares de la zona.

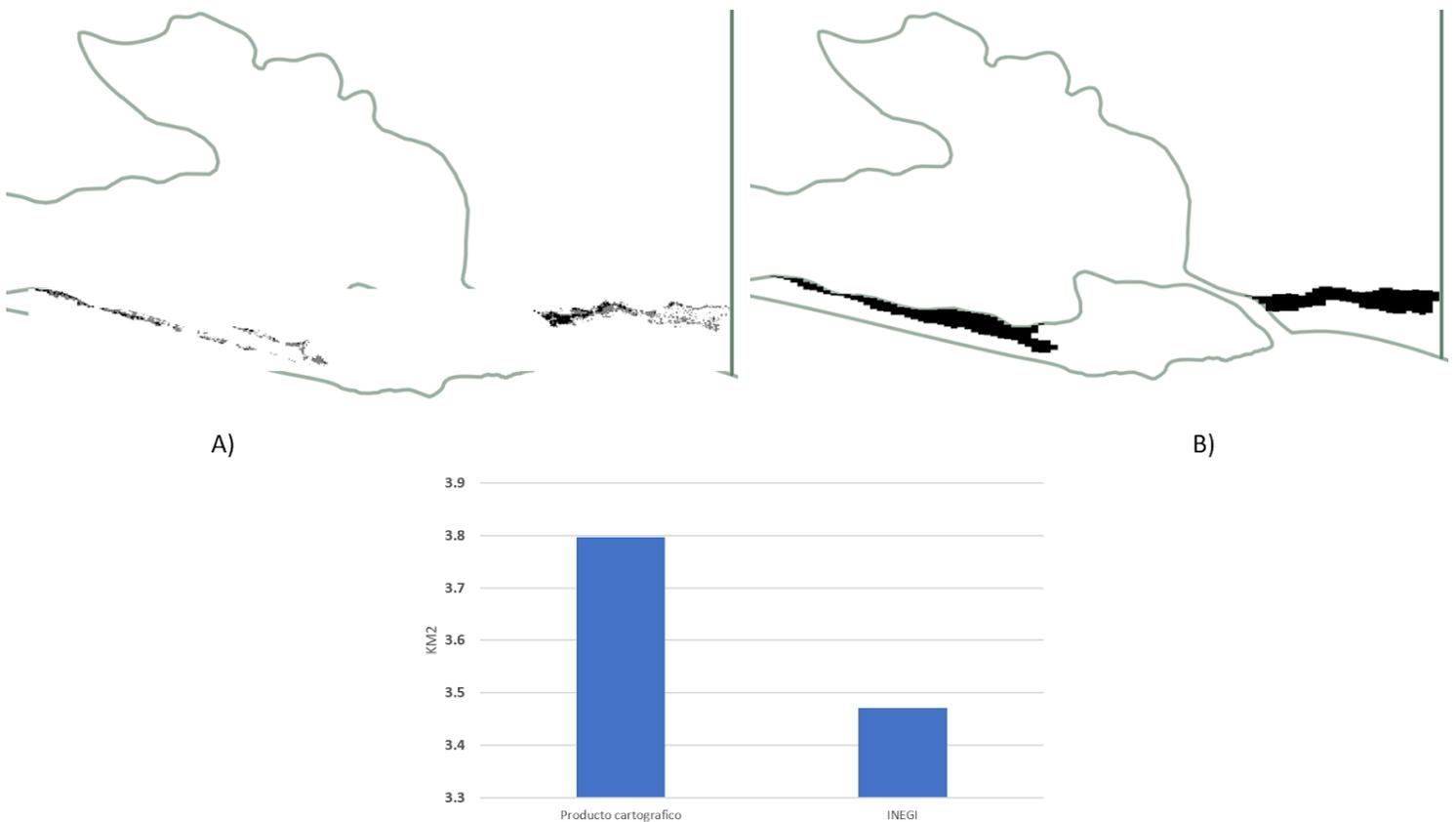


Figura 53. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 25 comunidad forestal "Manglar"; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Celda 128

De manera similar que el caso anterior esta celda muestra una subestimación de la extensión del ecosistema y la cobertura forestal más es curioso que de forma individual los manglares se comportan similar más una vez que se ve la perspectiva a nivel estatal la diferencia es grande esto debido a que si bien hay más extensión de los manglares en las imágenes de SENTINEL-2 también es cierto que evidencia el precario estado de la cobertura forestal de los manglares en la región pues los fragmentos de cobertura son pequeños y considerablemente separados entre sí rodeados de área prácticamente desprovista de vegetación.

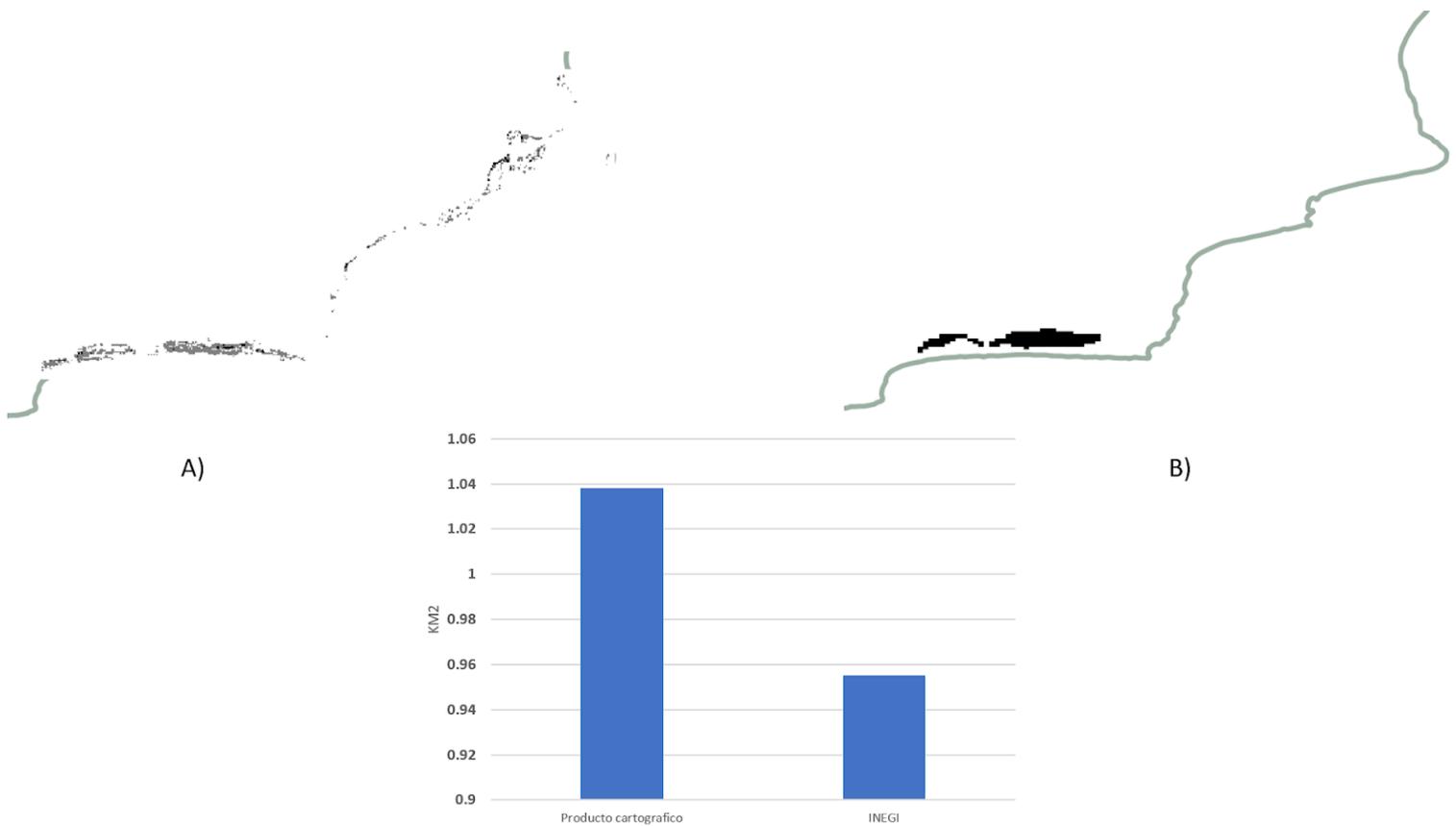


Figura 54. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 128 comunidad forestal “Manglar”; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Casos de estudio para Sabana

Celda 9

la sabana a costa del debate que existe sobre su origen es un hecho que su presencia en el estado es considerablemente dinámica y la presencia de árboles en las zonas que se registran como parte del ecosistema es considerable con respecto al área que abarcan, ejemplo es la celda 9 pues al comparar las imágenes ambas coinciden en las zonas más densamente pobladas y además SENTINEL-2 añade conectividad entre las zonas clasificadas como sabana sea natural o residuos de selva alta o mediana que se ha transformado por las actividades antrópicas el hecho es que sus fragmentos son de los que cuentan con doseles más cerrados en proporción a sus dimensiones.

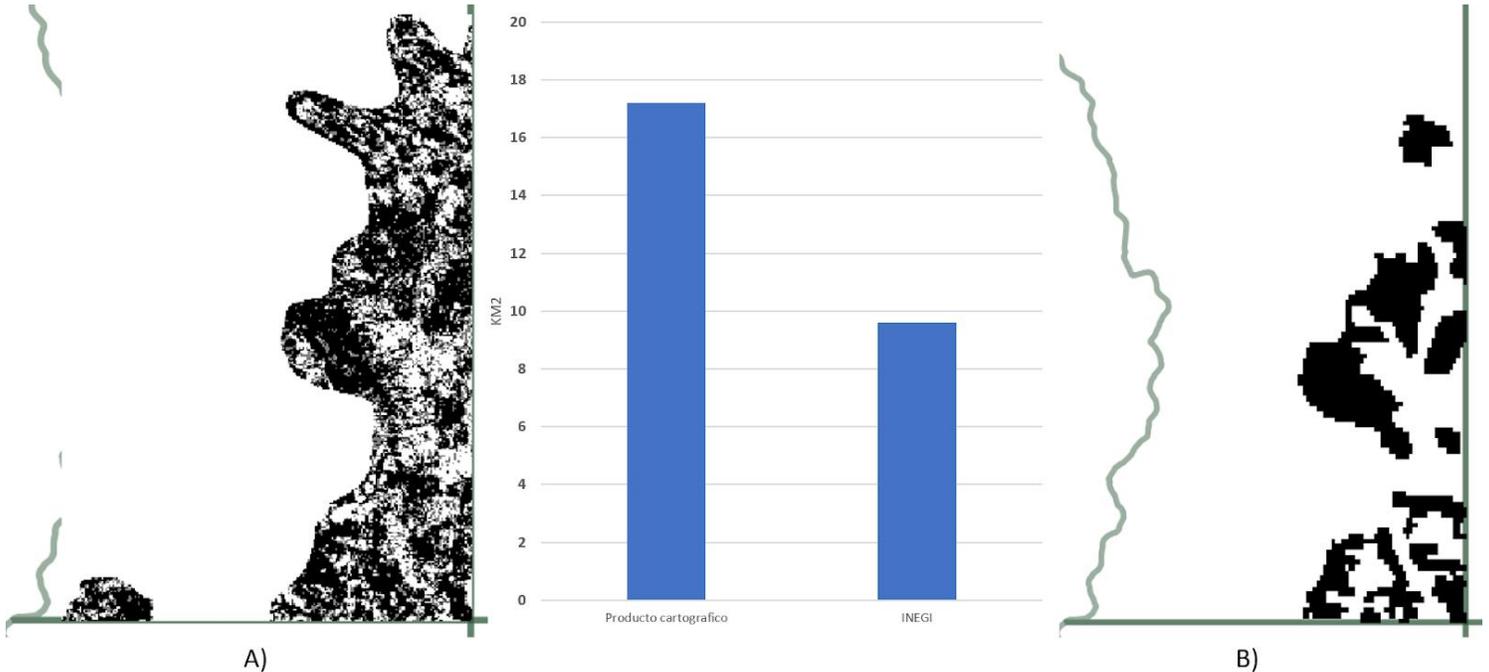


Figura 55. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 9 comunidad forestal "Sabana"; A)Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B)imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Celda 21

En esta celda las imágenes son similares más en la fracción inferior izquierda de la celda de SENTINEL-2 se añaden más cohesión en el ecosistema y es nuevamente a pesar de este gran fragmento de cobertura que se añade que en los números finales aún es inferior, pues al tener áreas delimitadas que no cuentan con mayor detalle al momento de evaluar la cobertura real de los ecosistemas que se dan errores que a su vez provocan confusión y discrepancias aun entre instituciones oficiales.

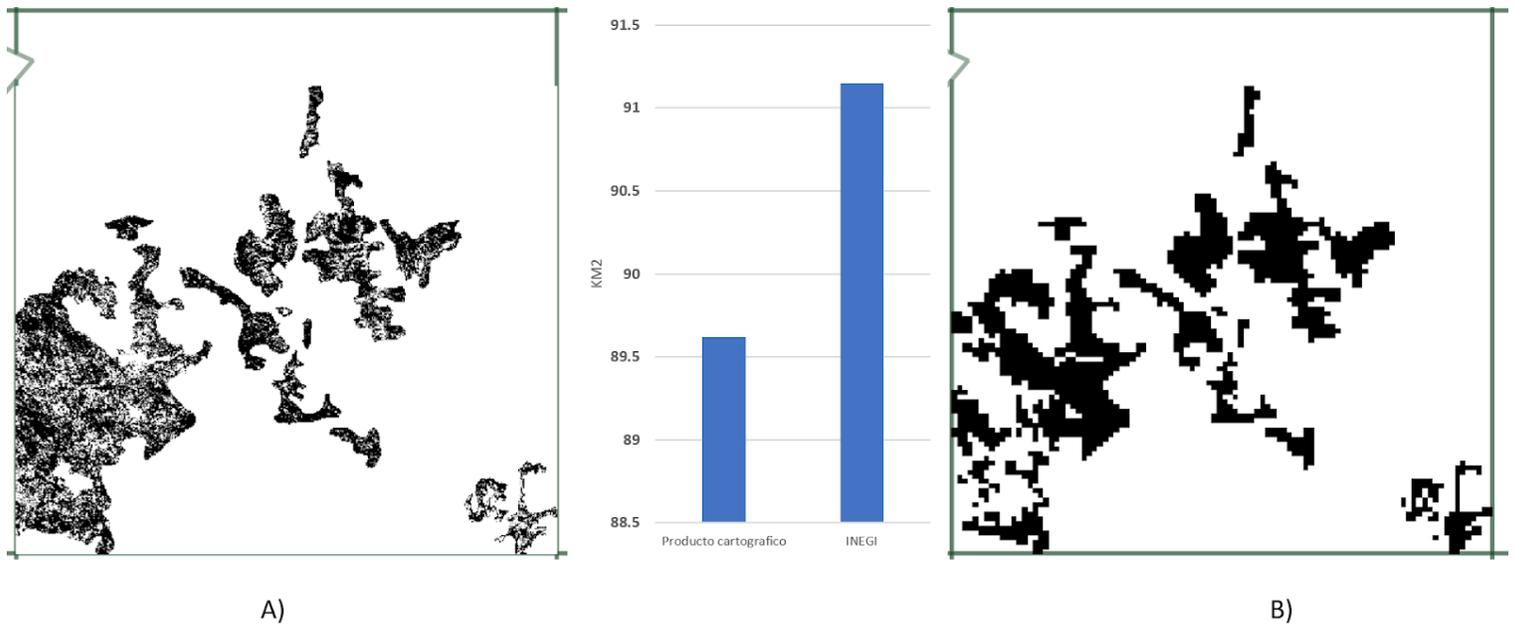


Figura 56. contraste de imágenes ráster y su cobertura forestal en la celda 21 comunidad forestal "Sabana"; A) Imágenes obtenidas en cartografía propuesta, B) imágenes obtenidas a partir de serie 7 INEGI.

Conclusiones

México en el panorama global actual ocupa un lugar preferencial en lo que a recursos naturales respecta, catalogado como uno de los países con mayor biodiversidad en el mundo, título que muy a pesar de lo especial que haga sentir a la población y que ha sido explotado por la política nacional, es una realidad parcial, pues gran parte de esa diversidad se encuentra en condiciones para nada óptimas; por ello el objetivo de este trabajo fue generar un producto cartográfico de alta resolución que permitiese realizar inferencias de la cobertura y estado de fragmentación de la cobertura forestal en el estado de Oaxaca, uno de los estados más biológicamente diversos de México. Al momento de contrastar nuestros resultados contra los datos del inventario Nacional Forestal, así como contra la cartografía de la Serie 7 de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI, se observaron resultados congruentes con ambos productos; sin embargo, al partir de imágenes Sentinel-2 del 2023, la cartografía propuesta describe un escenario más actualizado y un producto de mayor resolución espacial.

En cuanto a la sumatoria de cobertura arbórea, los resultados muestran menores valores de superficie que lo estimado por INEGI y CONABIO; considerando por lo tanto que estas discrepancias son congruentes y están relacionadas al cambio en la resolución espacial así mismo, que las imágenes utilizadas pertenecen a una temporalidad más reciente. Los resultados evidencian que es urgente tomar acciones para mitigar tanto la fragmentación, como la pérdida de cobertura en el estado de Oaxaca.

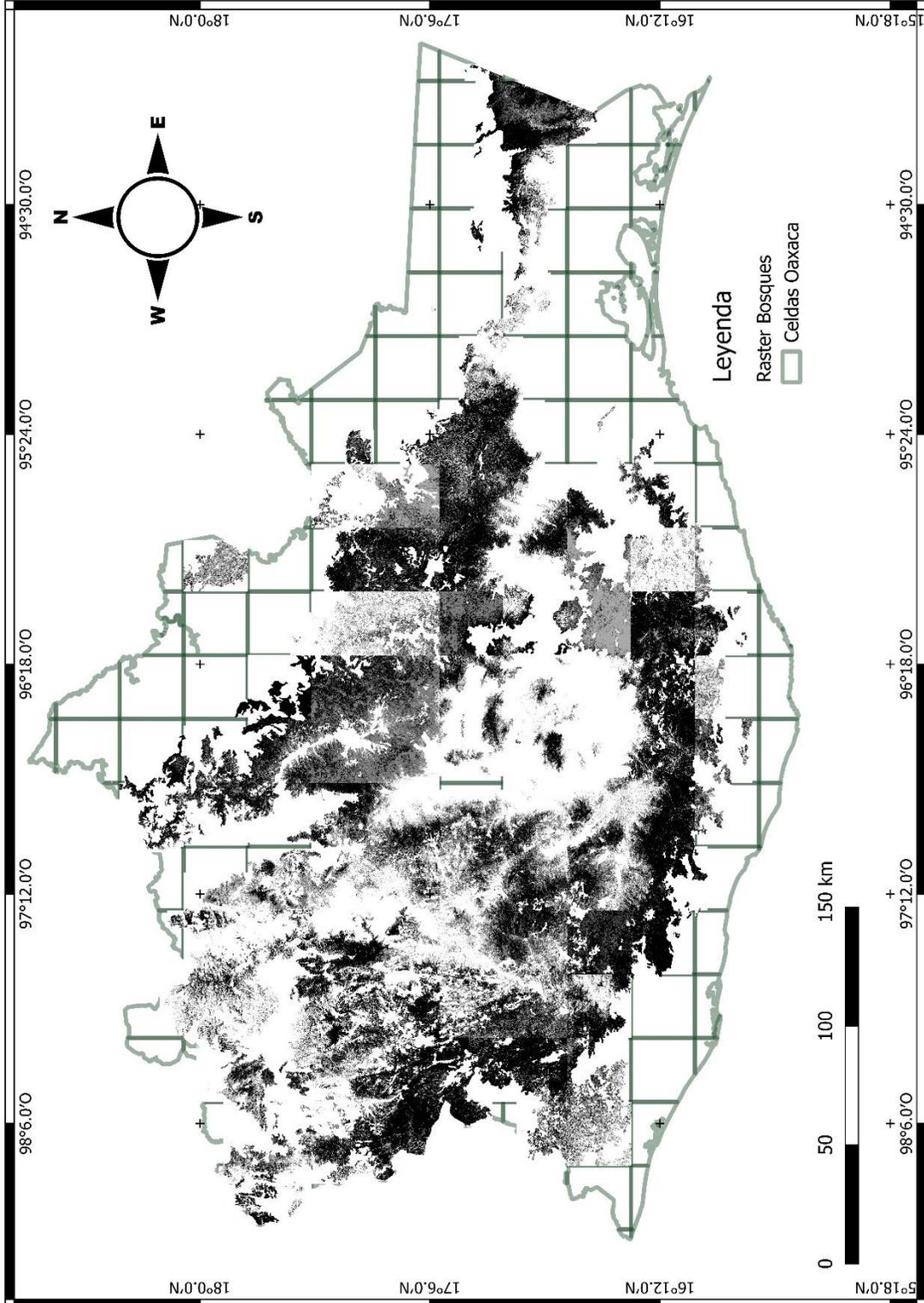
Por lo antes expuesto es que se considera que los productos derivados de este proyecto son una herramienta útil para el diagnóstico y monitoreo de la cobertura arbórea en el estado de Oaxaca; además de ser factible generar este tipo de productos año con año, de forma que sea utilizado en planes de manejo y monitoreos a escala local.

Suplementos

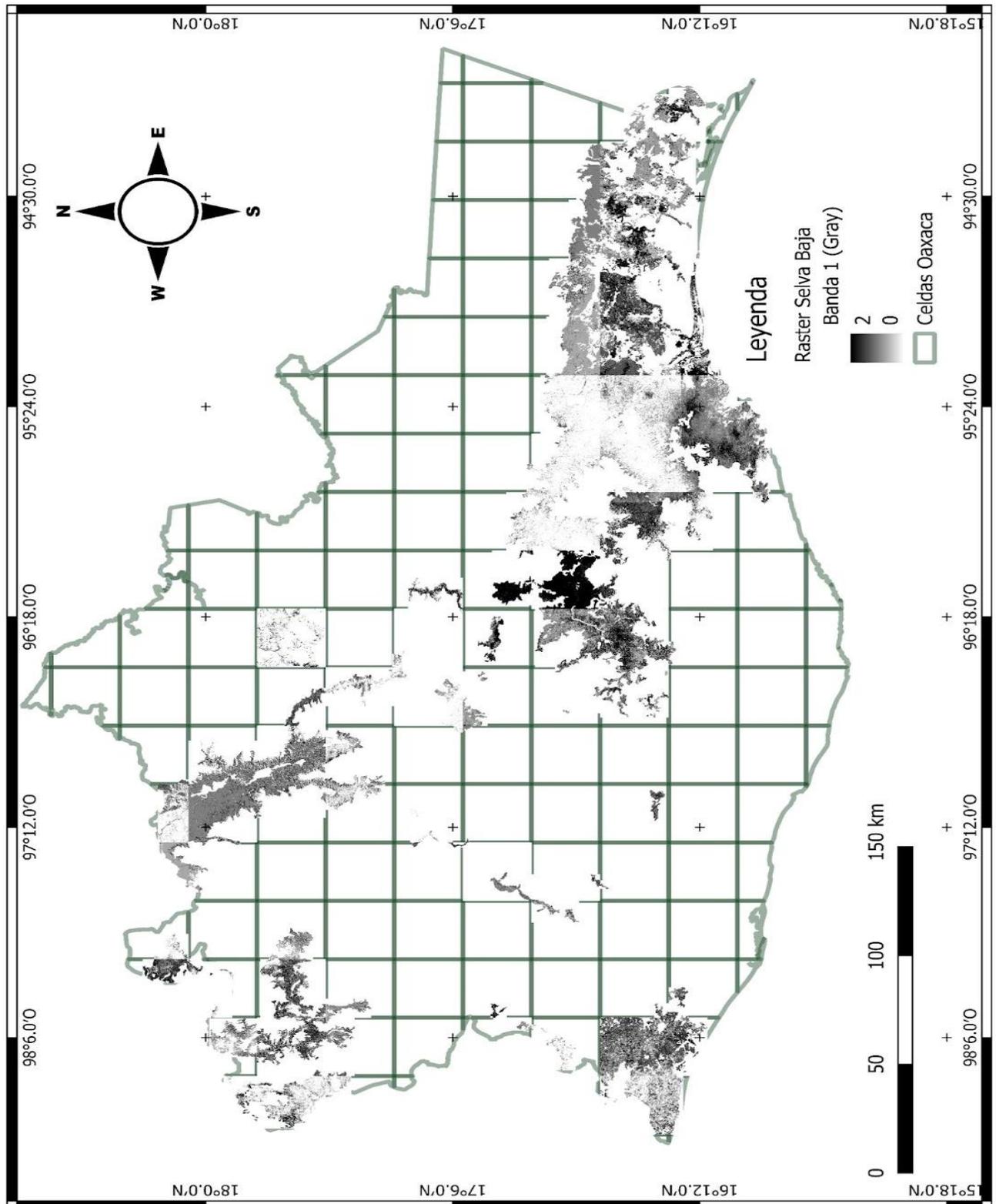
Cartografía

Cartografía desarrollada

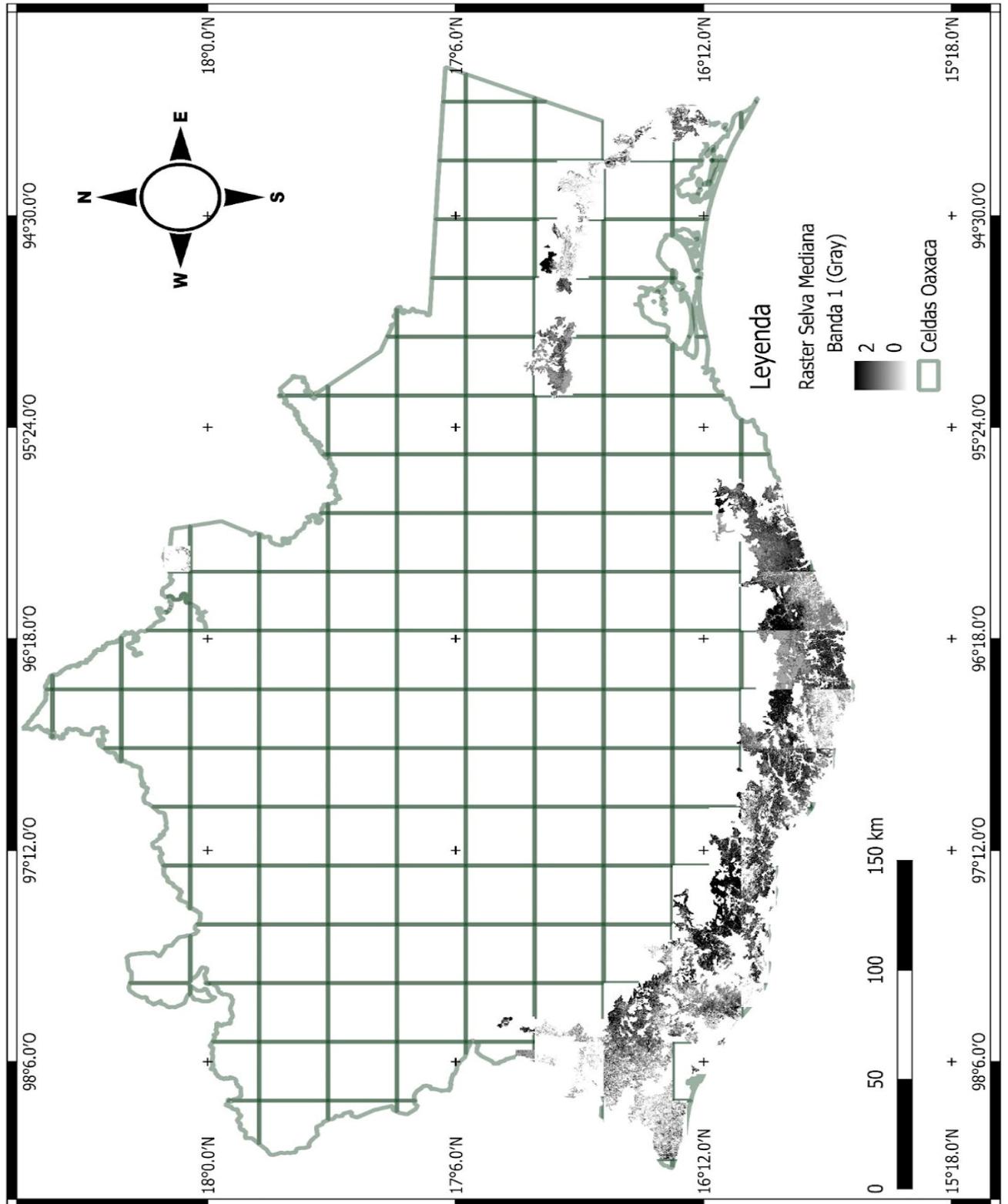
Bosques



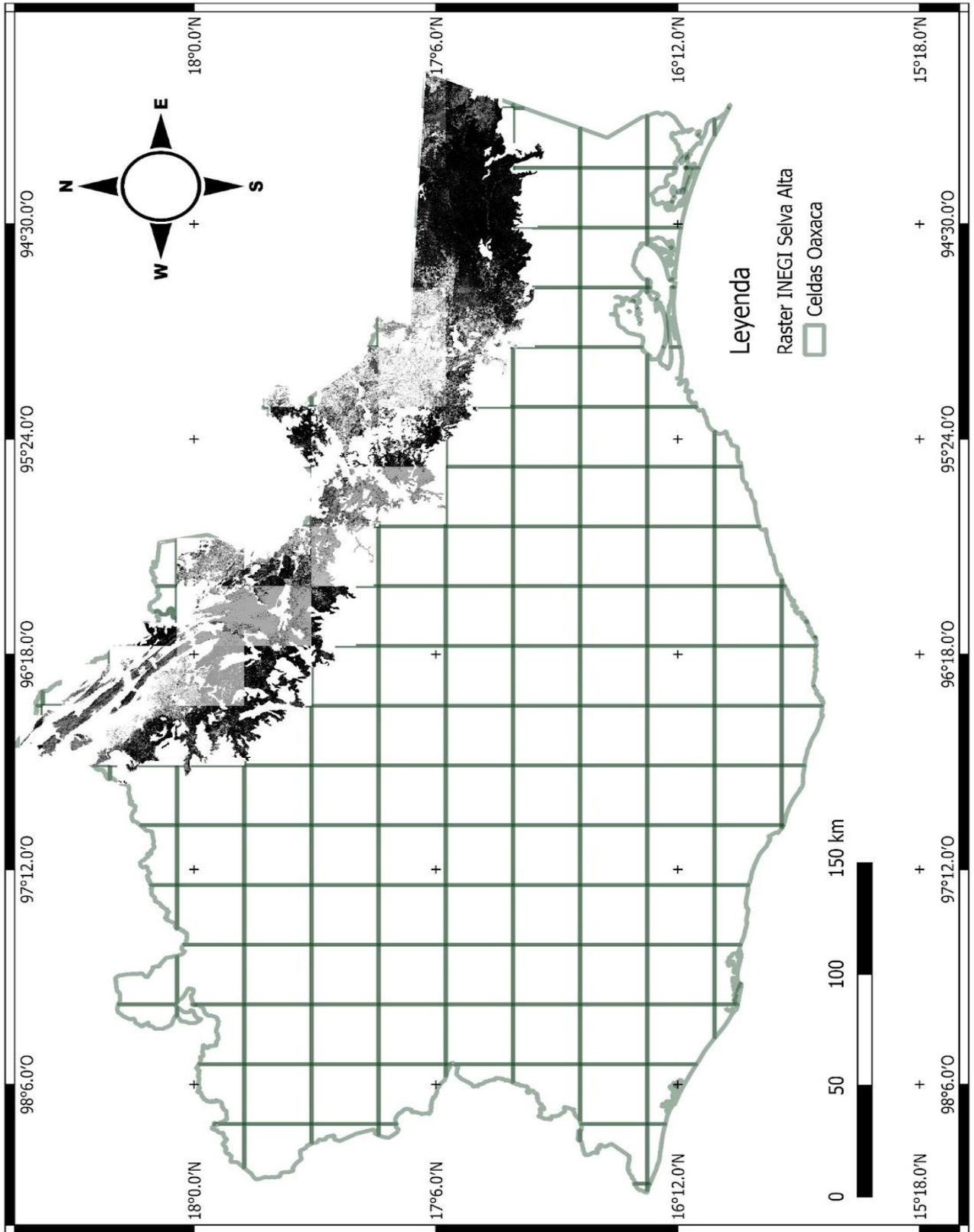
Selva Baja



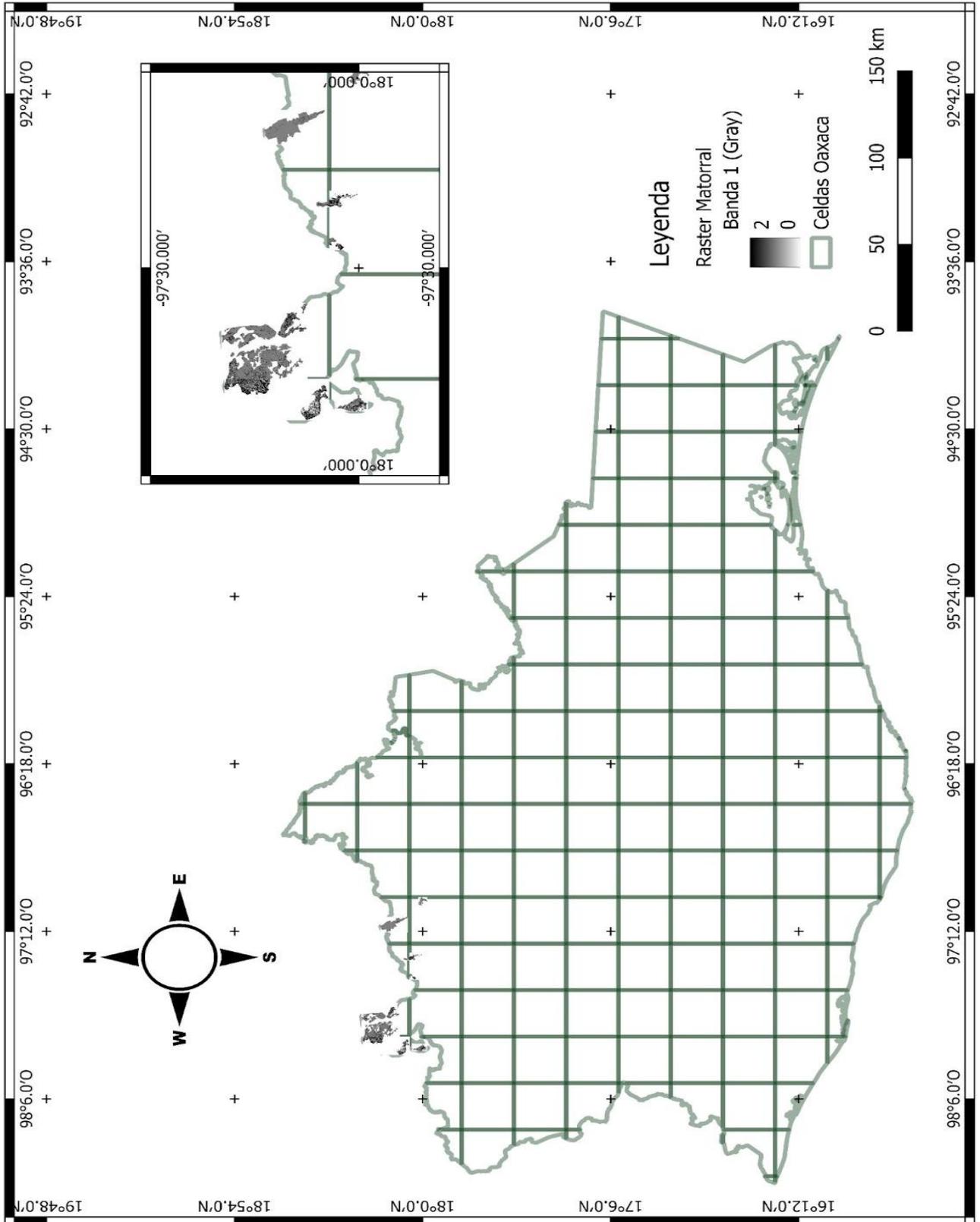
Selva Mediana



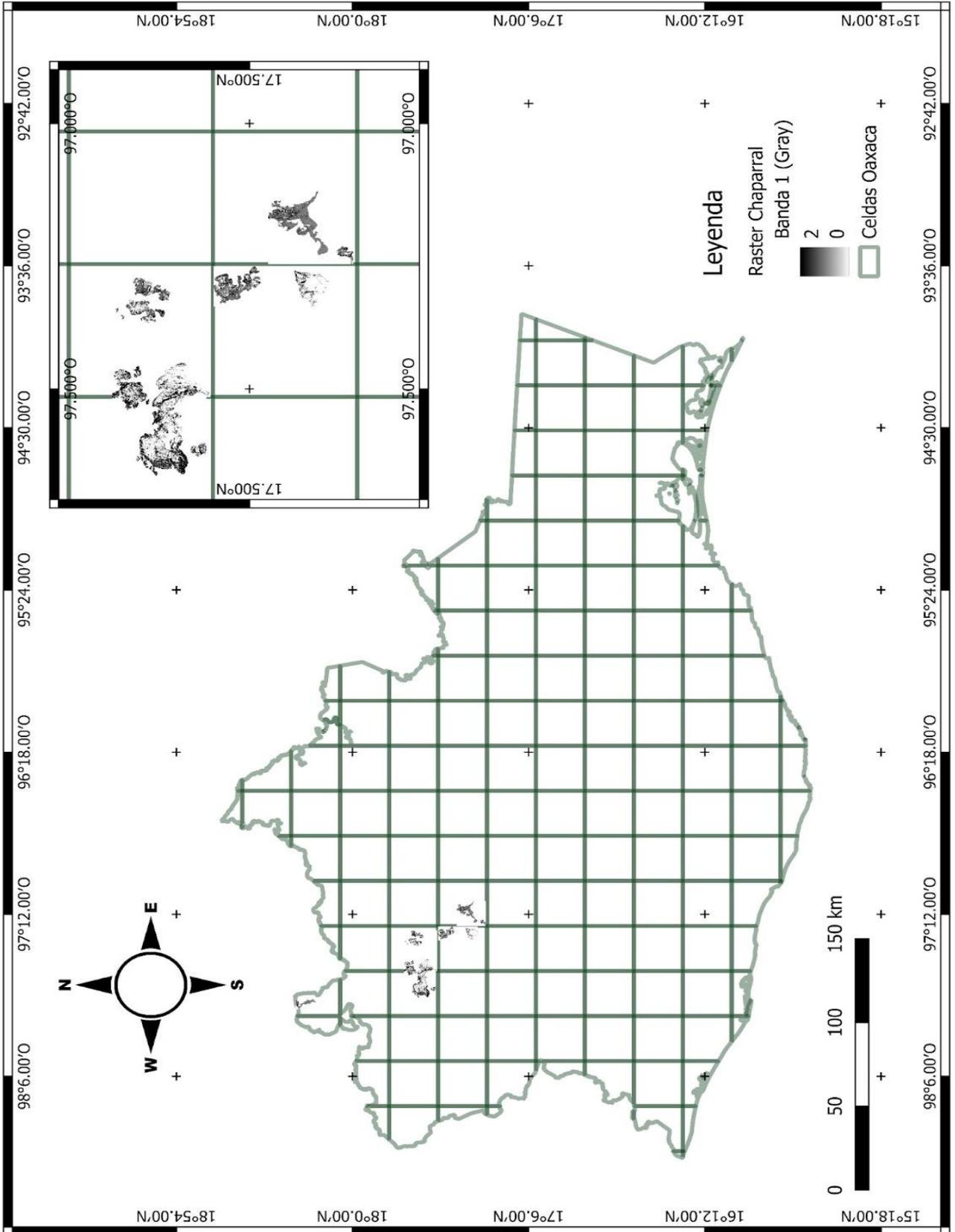
Selva Alta



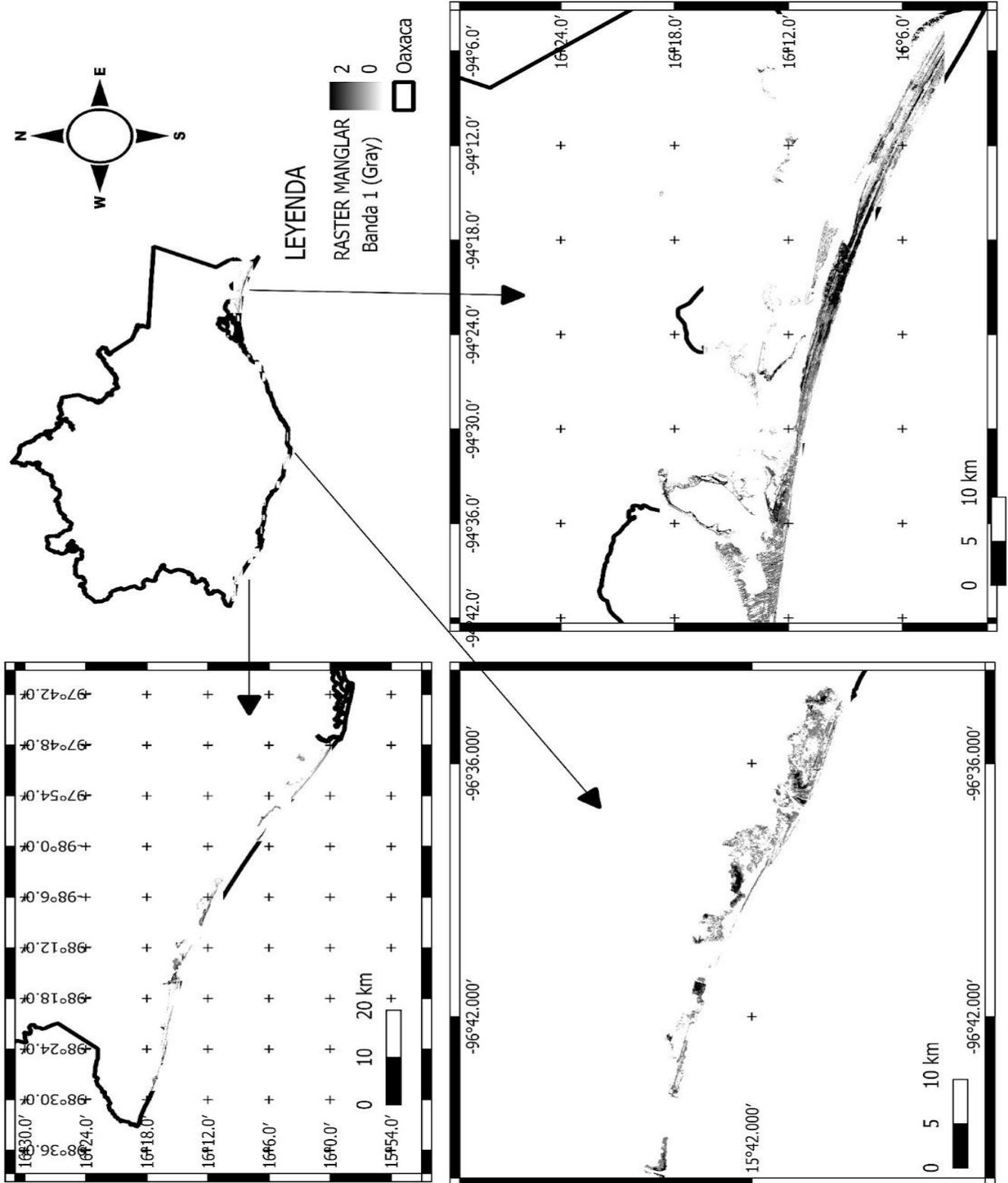
Matorral



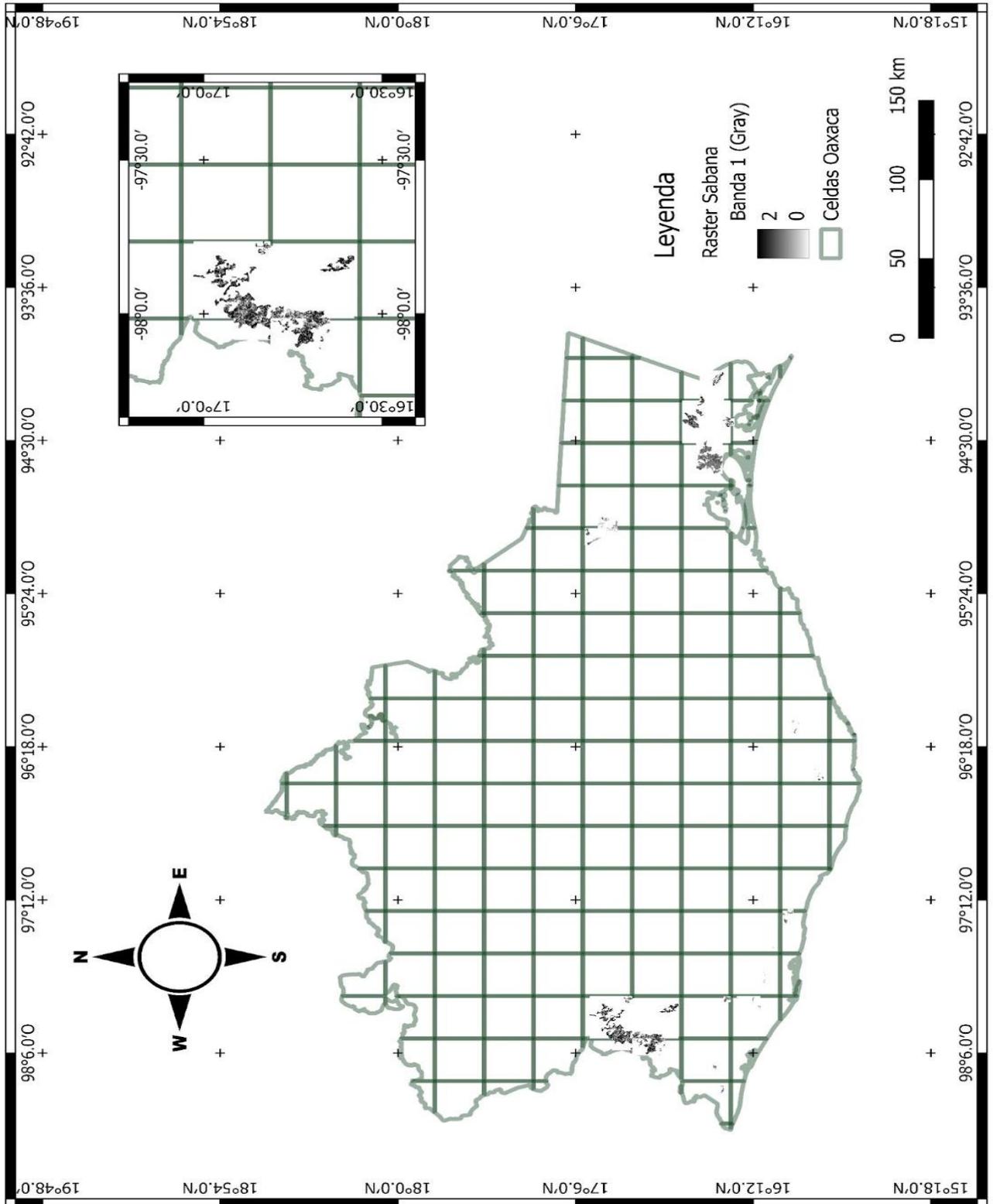
Chaparral



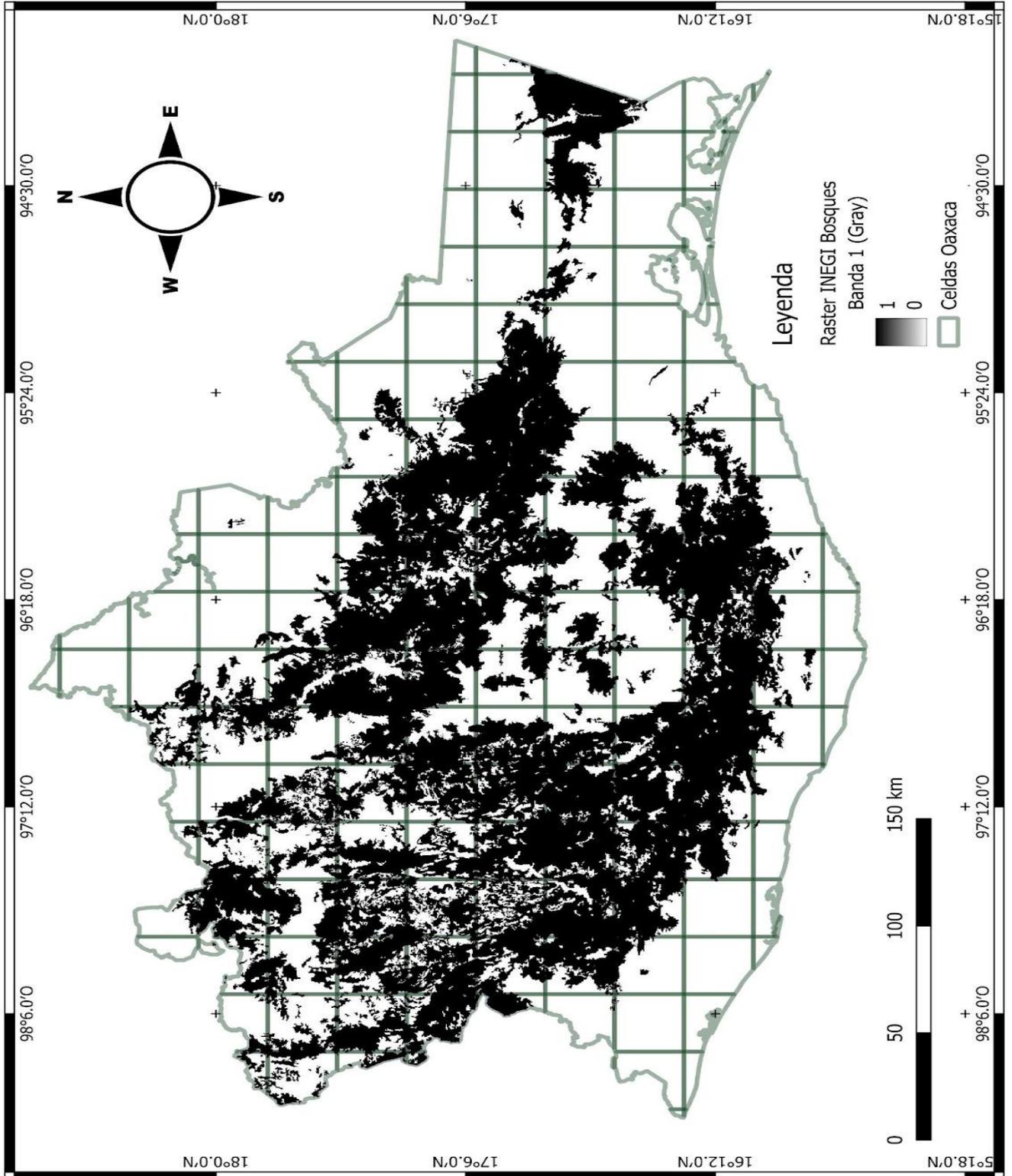
Manglar



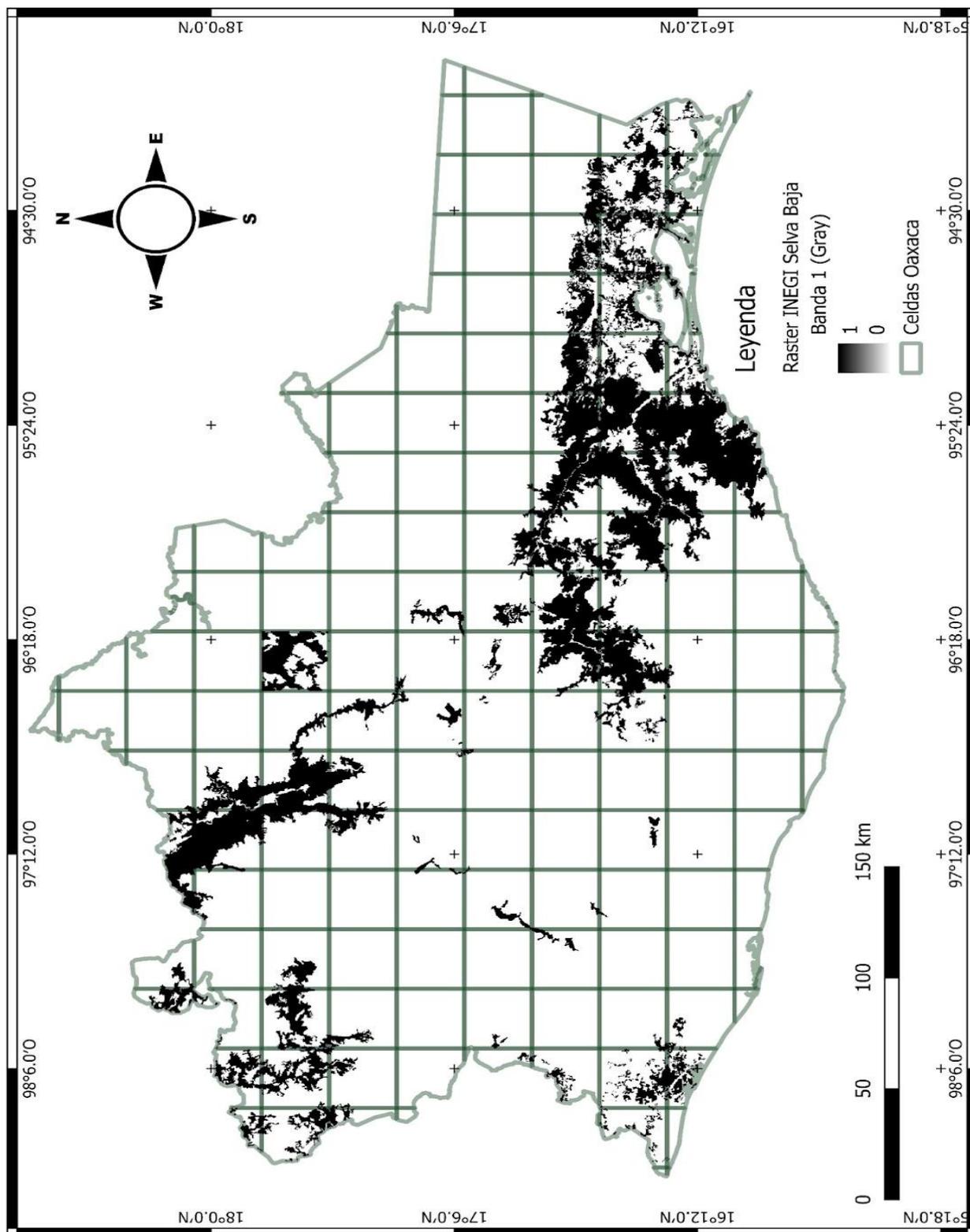
Sabana



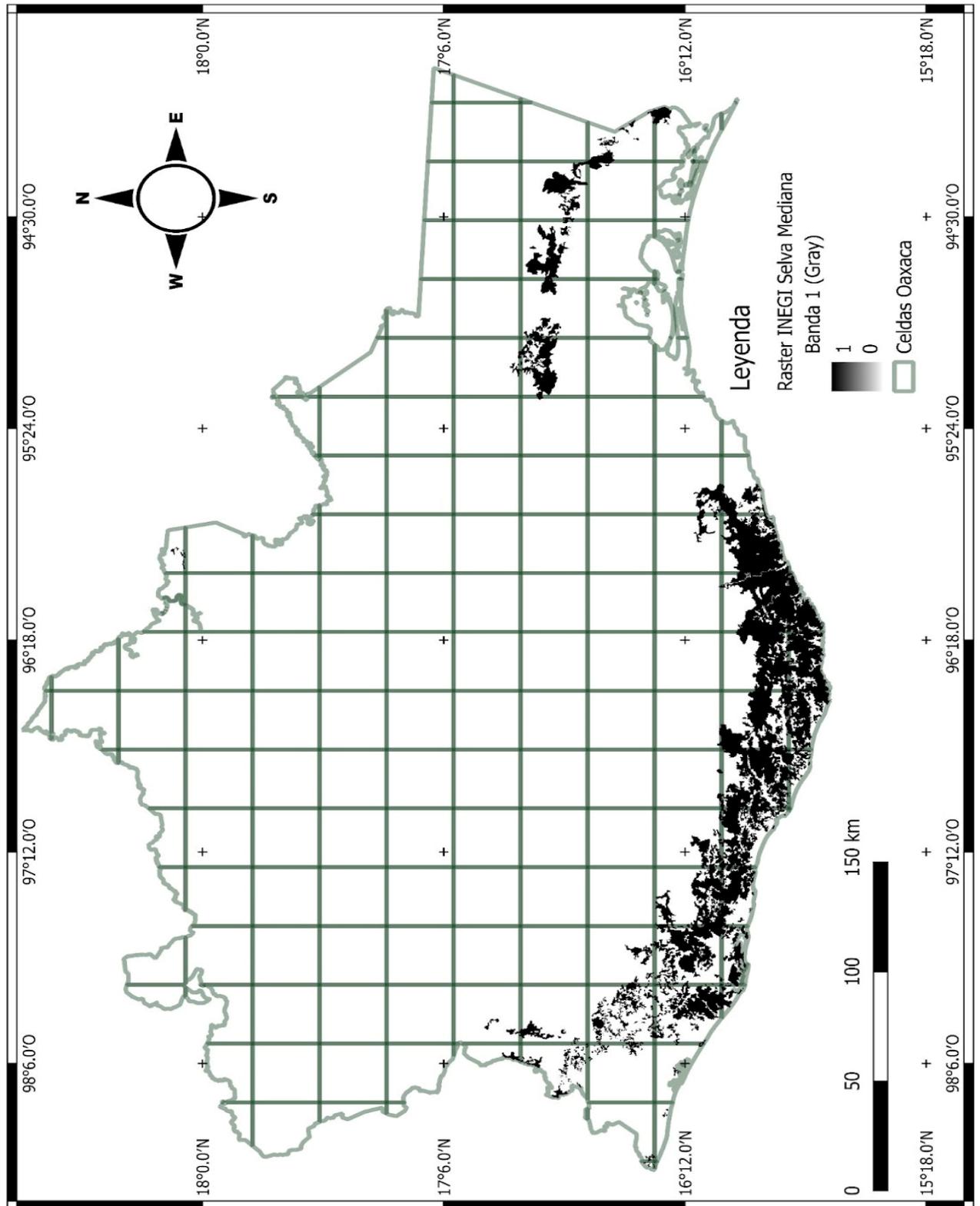
Bosques



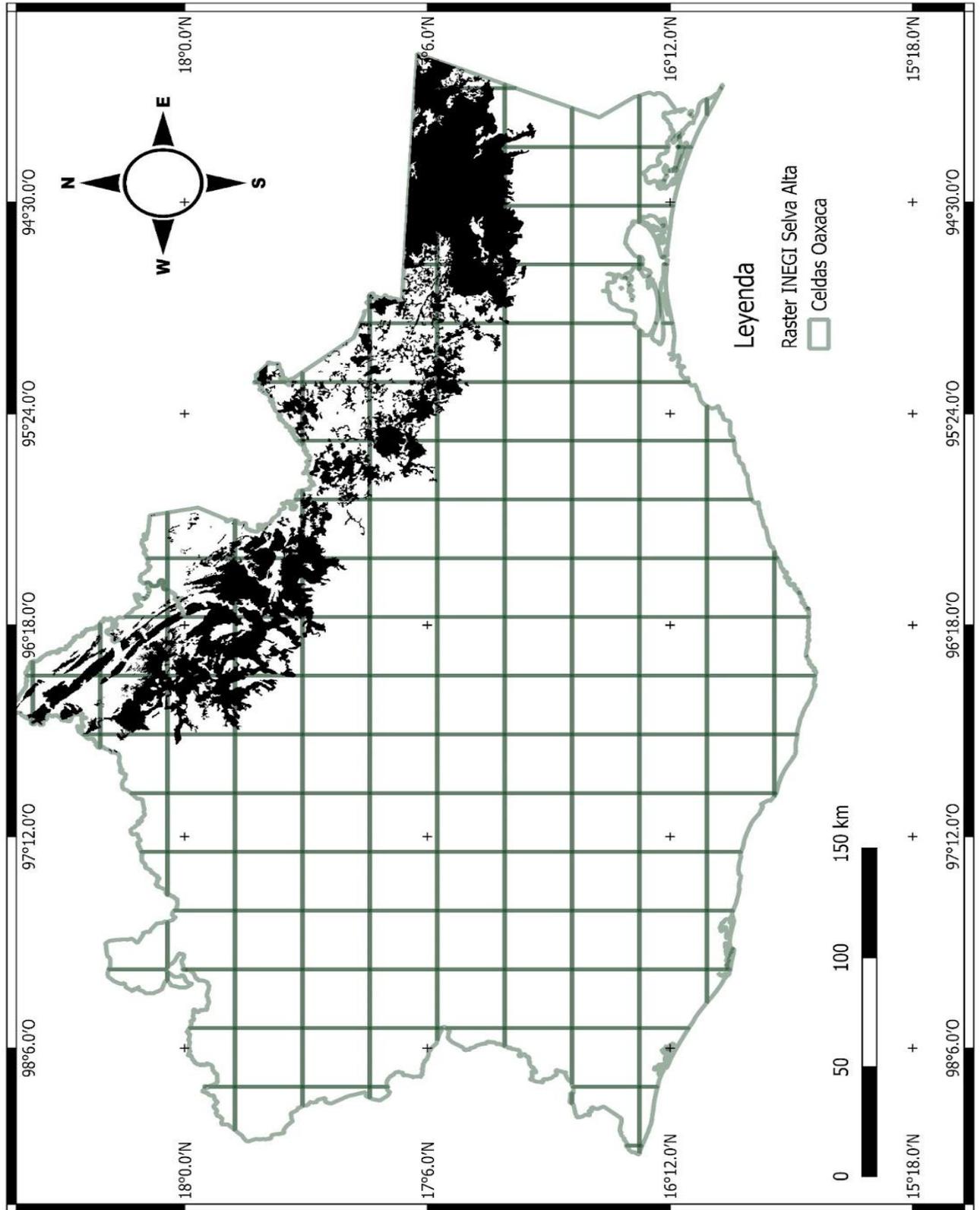
Selva Baja



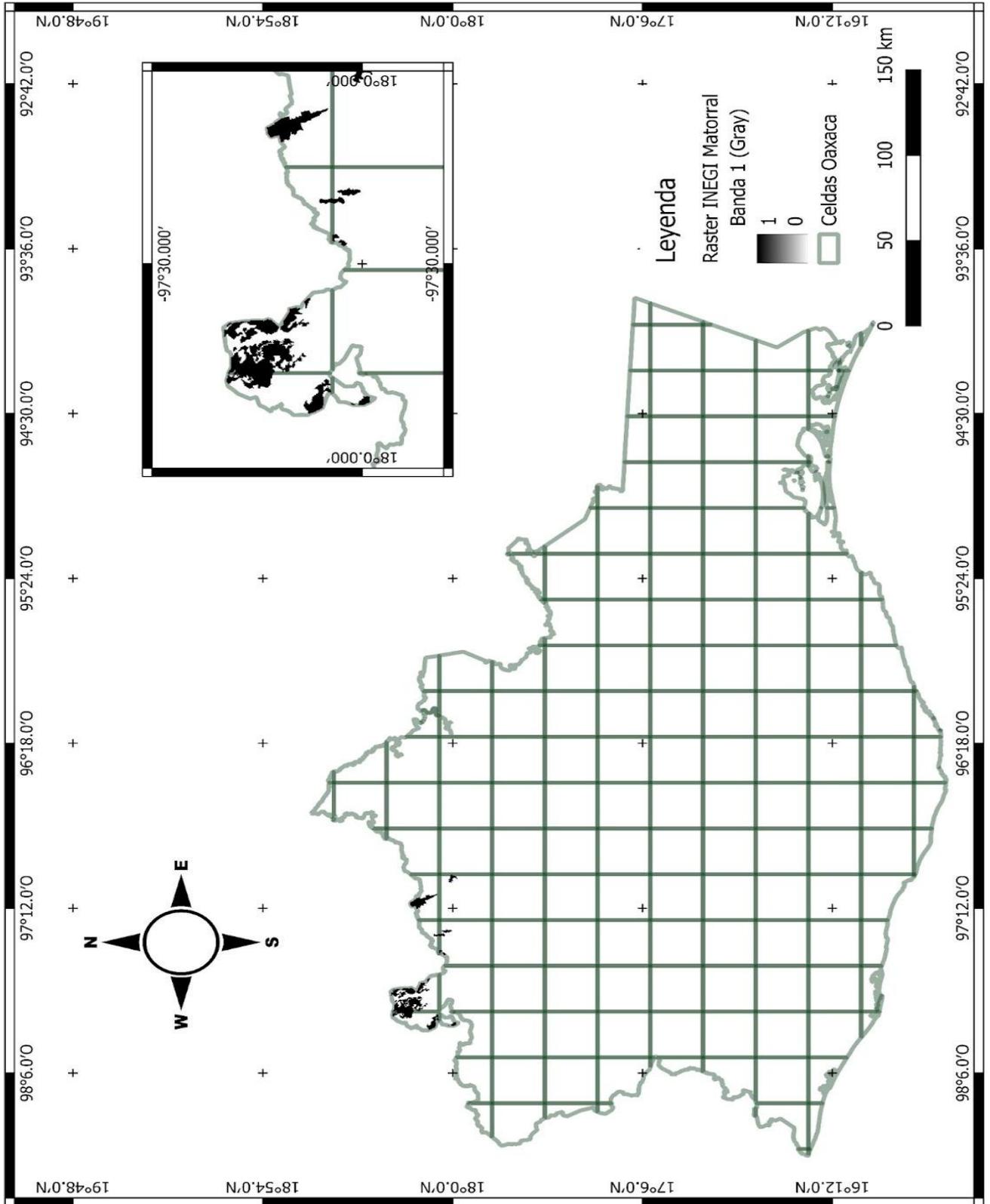
Selva Mediana



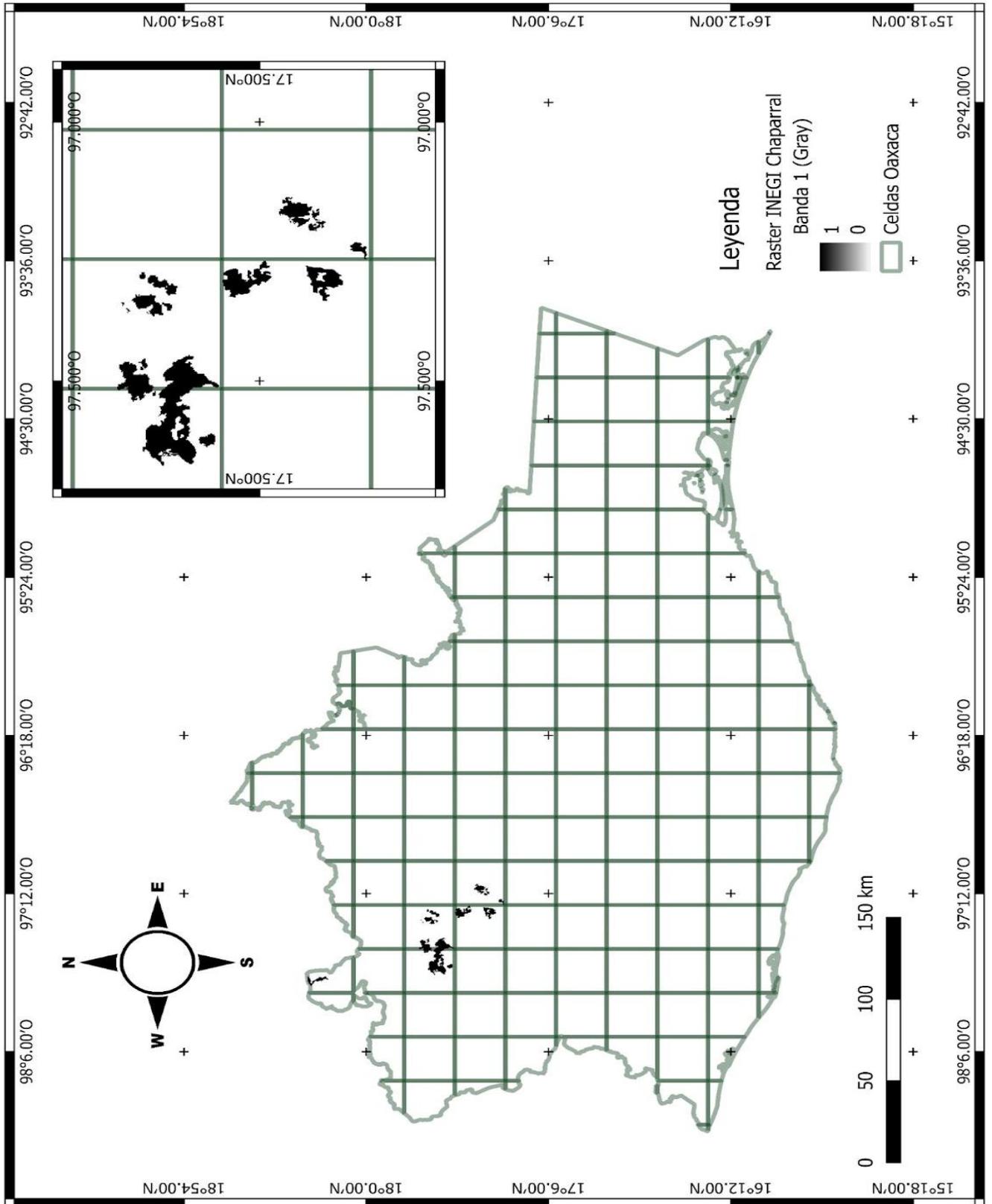
Selva Alta



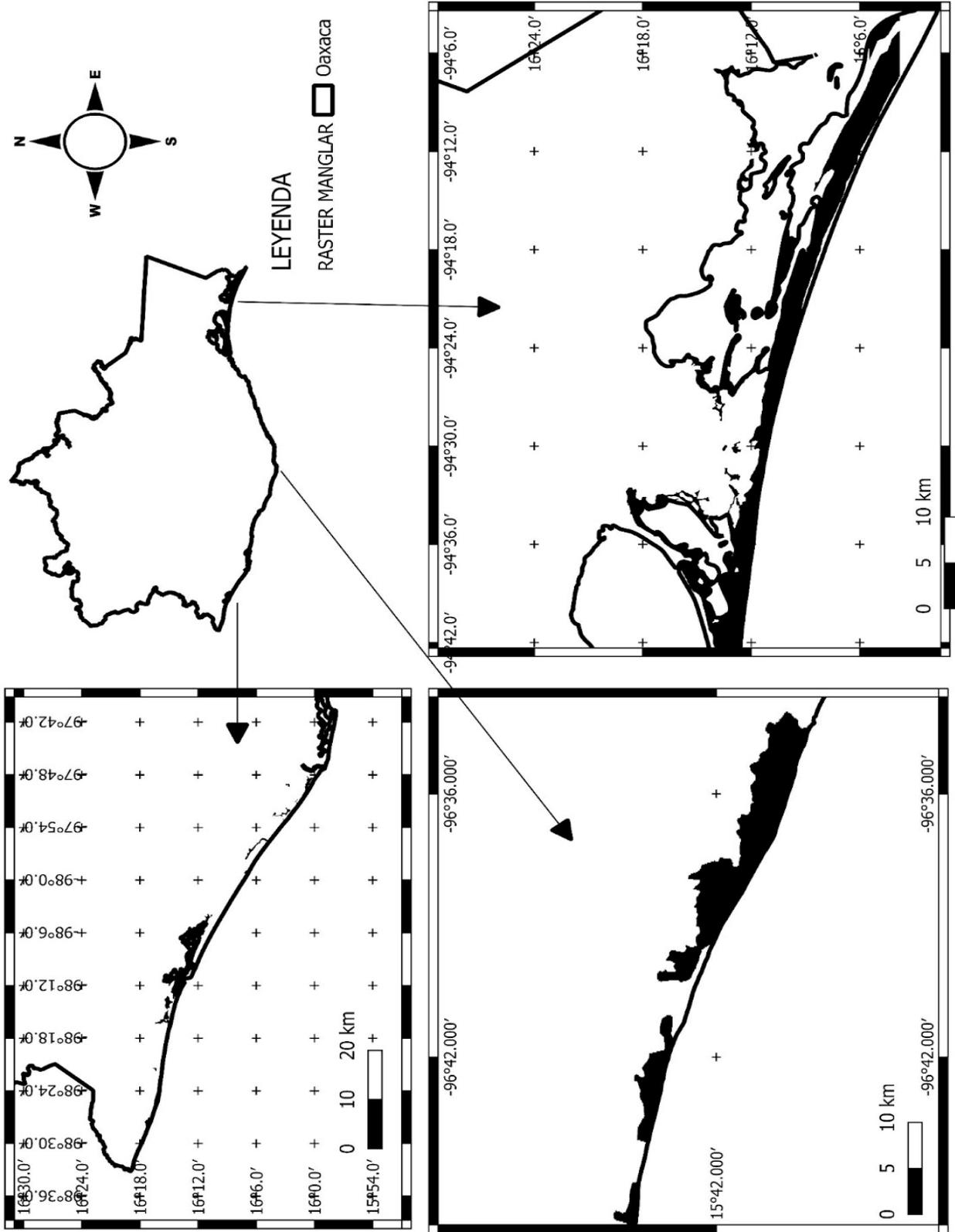
Matorral



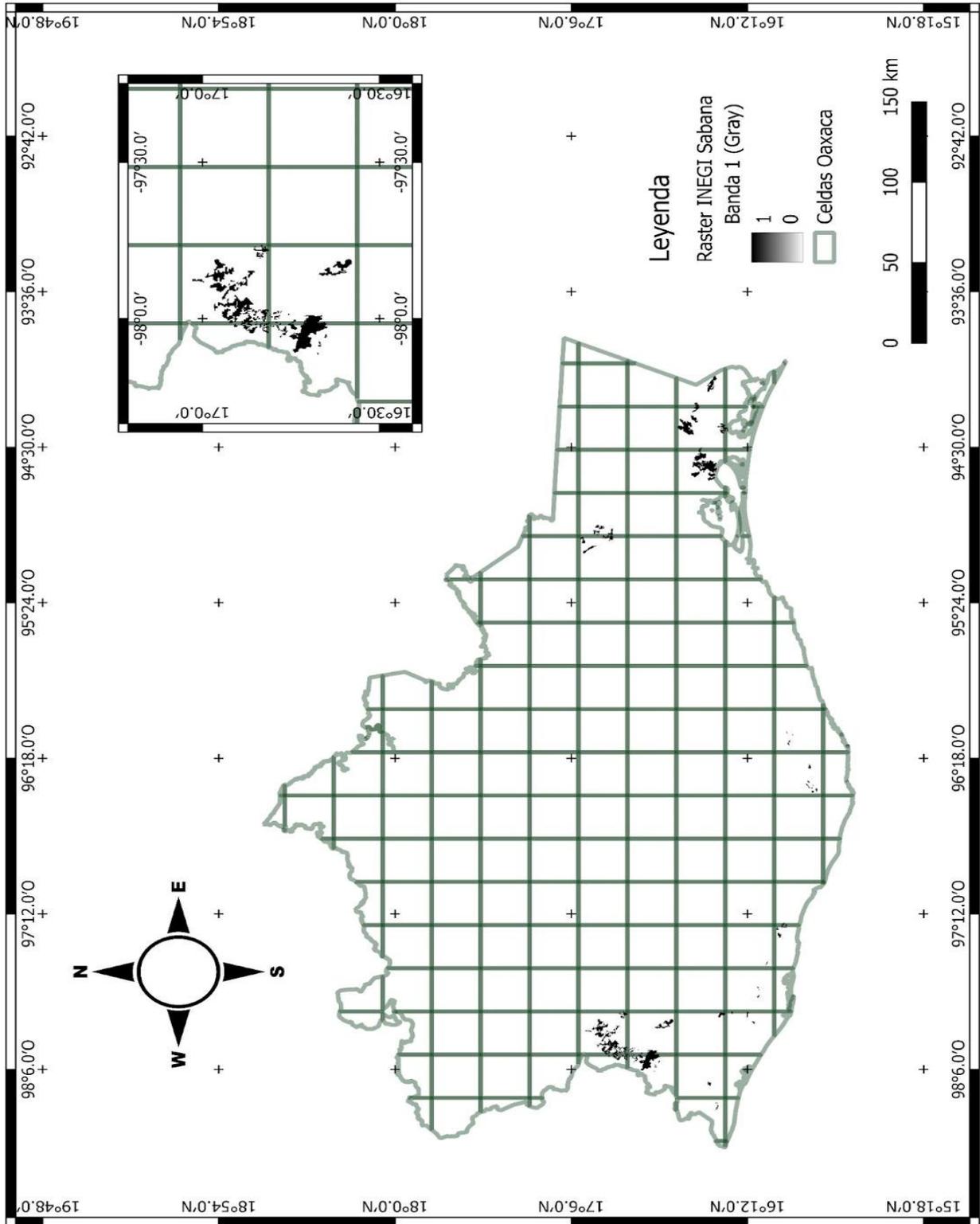
Chaparral



Manglar



Sabana



Tablas

Índices espectrales empleados para cada celda

Celda	Índice	Celda	Índice	Celda	Índice	Celda	Índice	Celda	Índice	Celda	Índice
1	ARVI	28	ARVI	55	GCI	82	ARVI	109	ARVI	136	GCI
2	ARVI	29	ARVI	56	GCI	83	GCI	110	ARVI	137	GCI
3	ARVI	30	ARVI	57	ARVI	84	GCI	111	ARVI	138	GCI
4	ARVI	31	GCI	58	ARVI	85	ARVI	112	ARVI	139	GCI
5	ARVI	32	GCI	59	ARVI	86	GCI	113	GCI	140	GCI
6	ARVI	33	ARVI	60	ARVI	87	ARVI	114	GCI	141	ARVI
7	GCI	34	ARVI	61	GCI	88	ARVI	115	GCI	142	ARVI
8	GCI	35	GCI	62	GCI	89	ARVI	116	GCI	143	ARVI
9	ARVI	36	ARVI	63	ARVI	90	ARVI	117	GCI	144	ARVI
10	ARVI	37	ARVI	64	ARVI	91	GCI	118	GCI	145	ARVI
11	GCI	38	ARVI	65	GCI	92	GCI	119	GCI	146	ARVI
12	GCI	39	ARVI	66	GCI	93	GCI	120	GCI	147	ARVI
13	GCI	40	ARVI	67	GCI	94	GCI	121	GCI	148	ARVI
14	GCI	41	GCI	68	ARVI	95	GCI	122	GCI	149	ARVI

15	GCI	42	GCI	69	ARVI	96	ARVI	123	GCI	150	ARVI
16	ARVI	43	ARVI	70	GCI	97	ARVI	124	ARVI	151	GCI
17	ARVI	44	ARVI	71	GCI	98	GCI	125	ARVI	152	GCI
18	ARVI	45	GCI	72	GCI	99	GCI	126	GCI	153	GCI
19	GCI	46	ARVI	73	ARVI	100	ARVI	127	GCI	154	GCI
20	GCI	47	ARVI	74	ARVI	101	ARVI	128	GCI	155	GCI
21	ARVI	48	ARVI	75	ARVI	102	GCI	129	GCI	156	GCI
22	ARVI	49	ARVI	76	ARVI	103	GCI	130	GCI	157	GCI
23	GCI	50	ARVI	77	ARVI	104	GCI	131	GCI	158	GCI
24	GCI	51	GCI	78	GCI	105	GCI	132	GCI		
25	GCI	52	GCI	79	GCI	106	GCI	133	GCI		
26	GCI	53	GCI	80	GCI	107	ARVI	134	GCI		
27	ARVI	54	GCI	81	ARVI	108	ARVI	135	GCI		

Código fuente de GEE

<https://code.earthengine.google.com/>

```
function maskS2clouds (image) {
  var qa = image.select ("QA60");
  //bits 10 y 11 son nubes y cirrus
  var cludBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;
  //ambos indicadores denben estar en 0, igual q cielo despejado
  var mask = qa.bitwiseAnd (cludBitMask).eq(0)
  .and(qa.bitwiseAnd (cirrusBitMask).eq(0));
  return image.updateMask (mask).divide (10000);
}

var img_1 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")
  .filterDate ("2022-10-01","2023-02-28")/* #### En vegetaciones selva alta/bosque mesofilo,
  pueden incluir hasta abril
  ##### En vegetaciones sela baja, matorral bosques norte de mexico, en caso de ser necesario abrir
  a sep/ago */
  .filter(ee.Filter.lt ("CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE",5)) //lt (less than) #####Arranque en 5 y despues
  ajustar
  .filterBounds(geometry)
  .map (maskS2clouds)
  .map (function (image){return image.clip (geometry)})
  .median();//mediana para el periodo de T def

print (img_1, "img_s2_median");

//criterios de visualización RGB
var rgb_vis = {
  min: 0.0,
  max: 0.2,
  bands: ["B4", "B3", "B2"],
};

Map.centerObject (geometry);

Map.addLayer (img_1, rgb_vis, "sentinel_median");

//////////
////////// NDVI = NIR_Cercano-RED/NIR_Cercano+RED
//////////
/*
var NDVI_1 = img_1.normalizedDifference(["B8", "B4"]);

Map.addLayer ( NDVI_1, {
  max: 0.9,
```

```

min:-0.5,
palette:["FFFFFF","CE7E45","DF923D","F1B555", "FCD163",
        "99B718","74A901","66A000","529400","3E8601",
        "207401","056201","004C00","023B01","012E01",
        "011D01","011301"]}, "NDVI_1");

var ind_clas = ee.Image(1)
  .where(NDVI_1.gt (.57).and (NDVI_1.lte(.8)),1)//Selva Mediana
  .where(NDVI_1.gt (.4).and (NDVI_1.lte(.57)),2)//Selva Mediana Perturbada/Selva Baja
  .where(NDVI_1.gt (.27).and (NDVI_1.lte(.4)),3)//Selva Mediana Perturbada/Cultivos
  .where(NDVI_1.gt (0).and (NDVI_1.lte(.27)),4)//NA
  .clip(geometry);

// Verde obs "076607", Verde Claro "51F60E",Amarillo/verde "E7F5BD",Blanco "F8FAF5"
Map.addLayer (ind_clas, {min:1, max:5,
palette:["076607","51F60E","E7F5BD","F8FAF5","F8FAF5"]}, "Clases");
*/
////////////////////
////////// GCI (Índice De Clorofila Verde)
////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////

var GCI = img_1.expression ("float (((NIR) / (GREEN)) - 1)", {
  "NIR": img_1.select ("B8"),
  "GREEN": img_1.select ("B3")});

Map.addLayer (GCI, {
max: 7,
min: 0,
palette:["FFFFFF","CE7E45","DF923D","F1B555", "FCD163",
        "99B718","74A901","66A000","529400","3E8601",
        "207401","056201","004C00","023B01","012E01",
        "011D01","011301"]}, "GCI");

var ind_clas = ee.Image(1)
  .where(GCI.gt (3.7).and (GCI.lte(6)),1)//
  .where(GCI.gt (2.1).and (GCI.lte(3.7)),2)//
  .where(GCI.gt (1.03).and (GCI.lte(2.1)),3)//
  .where(GCI.gt (-2).and (GCI.lte(1.03)),4)//NA
  //where(GCI.gt (-1.5).and (GCI.lte(1.6)),5)//NA
  .clip(geometry);

// Verde obs "076607", Verde Claro "51F60E",Amarillo/verde "E7F5BD",Blanco "F8FAF5"
Map.addLayer (ind_clas, {min:1, max:4,
palette:["076607","51F60E","BCD350","C4A0F0","DAF6F7"]}, "Clases");

```

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////*
var NDWI = img_1.expression ("(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)", {
  "NIR":img_1.select ("B8"),
  "SWIR":img_1.select ("B11")
});

Map.addLayer (NDWI, {
  max: 0.5,
  min: -0.33,
  palette:["FFFFFF","CE7E45","DF923D","F1B555", "FCD163",
    "99B718","74A901","66A000","529400","3E8601",
    "207401","056201","004C00","023B01","012E01",
    "011D01","011301"]},"NDWI");

var ind_clas = ee.Image(1)
  .where(NDWI.gt (0.35).and (NDWI.lte(0.5)),1)//Selva Mediana
  .where(NDWI.gt (0.3).and (NDWI.lte(0.35)),2)//Selva Mediana Perturbada/Selva Baja
  .where(NDWI.gt (-0.33).and (NDWI.lte(0.3)),3)//Selva Mediana Perturbada/Cultivos
  //.where(NDWI.gt (0).and (NDWI.lte(3)),4)//NA
  .clip(geometry);

// Verde obs "076607", Verde Claro "51F60E",Amarillo/verde "E7F5BD",Blanco "F8FAF5"
Map.addLayer (ind_clas, {min:1, max:5,
palette:["076607","51F60E","E7F5BD","F8FAF5","F8FAF5"]}, "Clases");
*/
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

var ARVI = img_1.expression ('float ((NIR - (2 * RED) + BLUE) / (NIR + (2 * RED) + BLUE))',{
  'NIR': img_1.select ('B8'),
  'BLUE': img_1.select ('B2'),
  'RED': img_1.select ('B4')
});

Map.addLayer (ARVI, {
  max: 0.9,
  min: 0.2,
  palette:["FFFFFF","CE7E45","DF923D","F1B555", "FCD163",
    "99B718","74A901","66A000","529400","3E8601",
    "207401","056201","004C00","023B01","012E01",
    "011D01","011301"]},"ARVI");

var ind_clas2 = ee.Image(1)
  .where(ARVI.gt (0.56).and (ARVI.lte(1)),1)//

```

```

.where(ARVI.gt (0.39).and (ARVI.lte(0.56)),2)//
.where(ARVI.gt (0.19).and (ARVI.lte(0.39)),3)//
.where(ARVI.gt (-1).and (ARVI.lte(0.19)),4)//
//.where(ARVI.gt (-0.5).and (ARVI.lte(0.16)),4)//
.clip(geometry);

// Verde obs "076607", Verde Claro "51F60E",Amarillo/verde "E7F5BD",Blanco "F8FAF5"
Map.addLayer (ind_clas2, {min:1, max:4,
palette:["076607","51F60E","C4A0F0","F8FAF5","F8FAF5"]}, "Clases2");
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

var SIPI = img_1.expression ('float ((NIR - BLUE) / (NIR - RED))',{
  'NIR': img_1.select ('B8'),
  'BLUE': img_1.select ('B2'),
  'RED': img_1.select ('B4')});

Map.addLayer (SIPI, {
max: 5,
min: 1,
palette:["FFFFFF","CE7E45","DF923D","F1B555", "FCD163",
"99B718","74A901","66A000","529400","3E8601",
"207401","056201","004C00","023B01","012E01",
"011D01","011301"]},"SIPI");

var ind_clas = ee.Image(1)
//.where(SIPI.gt (1.32).and (SIPI.lte(2.6)),4)
.where(SIPI.gt (2.1).and (SIPI.lte(11)),4)//
.where(SIPI.gt (1.21).and (SIPI.lte(2.1)),3)//
.where(SIPI.gt (1).and (SIPI.lte(1.21)),2)//
.where(SIPI.gt (0.4).and (SIPI.lte(1)),1)//
//
.clip(geometry);

// Verde obs "076607", Verde Claro "51F60E",Amarillo/verde "E7F5BD",Blanco "F8FAF5"
Map.addLayer (ind_clas, {min:1, max:4,
palette:["076607","51F60E","BBCAAB","F8FAF5","F8FAF5"]}, "Clases");

var dataset2 = ee.ImageCollection('ESA/WorldCover/v200').first().clip(geometry);

var visualization = {
bands: ['Map'],
};

ee.Reducer.frequencyHistogram();/* este reducer contabiliza
el conteo de acuerdo a valores unicos*/
var pixelCountStats_21 = dataset2.reduceRegion({
reducer: ee.Reducer.frequencyHistogram().unweighted(),

```

```

    geometry: geometry,
    scale: 10,
    maxPixels: 1e13
  });

print(pixelCountStats_21,'Counts_Landcover_2021' ;
Map.addLayer(dataset2.clip(geometry), visualization, 'Landcover_2021');
////////////////////////////////////
//mascara
/*
var mask = dataset2.updateMask(
  dataset2.expression(
    "(b('Map')== 90) * 7" +
    "+ (b('Map') == 40) * 6" +
    "+ (b('Map') == 30) * 5" +
    "+ (b('Map') == 50) * 4" +
    "+ (b('Map') == 60) * 3" +
    "+ (b('Map') == 70) * 2" +
    "+ (b('Map') == 80) * 1" +
    "+ 0"
  )
);

Map.addLayer(mask, visualization, 'masked')

mask = mask.toShort().select(0).rename('Map');
var ind_clas_ = ind_clas.toShort().select(0).rename('Map');

var combined_img = ee.ImageCollection.fromImages([ind_clas_, mask])
var mosaic = combined_img.mosaic()
Map.addLayer(mosaic, {
  "min": 1,
  "max": 5
}, 'spatial mosaic')

Map.addLayer (mosaic, {min:1, max:5,
palette:["076607","51F60E","BCD350","C4A0F0","DAF6F7"]}, "Mosaico");

```

Referencias

1. Alonso, D. (2023, 30 enero). *Los 6 índices de vegetación para completar el NDVI*. MappingGIS. <https://mappinggis.com/2020/07/los-6-indices-de-vegetacion-para-completar-el-ndvi/#:~:text=Los%20%C3%8Dndices%20de%20Vegetaci%C3%B3n%20son,suelo%2C%20la%20iluminaci%C3%B3n%2C%20etc.>
2. Arango, Gutierrez, M., Branch, Bedoya, J. W. & Botero, Fernández, V. (2005). CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA DE COBERTURAS VEGETALES SOBRE IMÁGENES DIGITALES DE SENSORES REMOTOS: "LANDSAT-EMT+". *Rev. Fac. Nal. Agr.* Vol. 58 (1). Medellín, Colombia.
3. Ayandale, A. (2017). REMOTE SENSING VEGETATION DYNAMICS ANALYTICAL METHODS: A REVIEW OF VEGETATION ÍNDICES TECHNIQUES. *Geo informática Polonica*. Polska Akademia. No.16. UK.
4. Bentekhici, N., Saad, A., & Zegrar, A. (2022). CONTRIBUTION OF SPECTRAL INDICES OF CHLOROPHYLL (RECL AND GCI) IN THE ANALYSIS OF MULTITEMPORAL MUTATIONS OF CULTIVATED LAND IN THE MOSTAGANEM PLATEAU. *7th International Conference of Image and Signal Processing and their Applications. (ISPA)*.
5. Cano, Salinas, L., Rodríguez, Laguna, R., Valdez, Lazalde, J. R., Acevedo, Sandoval, O. A. & Beltrán, Hernández, R. I. (2017). DETECCIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO EN EL ESTADO DE HIDALGO MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT. *INVESTIGACIONES EOGRÁFICAS. Instituto de Geografía, UNAM*. No. 92. México.
6. Ceceña, Sánchez, M. L., Eaton, González, R., Solís, Cámara, A. B., Delgadillo, Rodríguez, J., Luna, Mendoza, L. & Ortega, Rubio, A. (2021). EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA COBERTURA FORESTAL EN ISLA GUADALUPE MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN. *Madera y Bosques*. Vol. 27 (1).
7. Comisión Estatal Forestal del estado de Oaxaca (COEFO-OAXACA). (2023) <https://www.oaxaca.gob.mx/coesfo/superficie-forestal-estatal/>
8. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). INVENTARIO NACIONAL FORESTAL Y SUELOS (2015-2020). (consultado 1 diciembre de 2023). <https://snmf.cnf.gob.mx/infys/>
9. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2022). LA BIODIVERSIDAD EN OAXACA. Estudio de Campo. *CONABIO*. México.

10. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2018). ESTRATEGIAS PARA LA CONSERVACIÓN Y EL USO SUSTENTABLE DE LA BIODIVERSIDAD DE OAXACA. (1ª edición). CONABIO. México.
11. Correa, J. J., Volante, J. & Seghezzo, L. (2012). ANALISIS DE LA FRAGMENTACIÓN Y LA ESTRUCTURA DEL PAISAJE EN BOSQUES NATIVOS DEL NORTE DE ARGENTINO. *Rev. ASADES*. Vol. 16.
12. Echeverry, M. & Harper, G. (2009). FRAGMENTACIÓN Y DEFORESTACIÓN COMO INDICADORES DEL ESTADO DE LOS ECOSISTEMAS EN EL CORREDOR DE CONSERVACIÓN CHOCO-MANABÍ (COLOMBIA-ECUADOR). *Rev. Recursos Naturales y Ambiente*. No. 58.
13. European Space Agency (ESA), 2023. User guide SENTINEL-2. ESA <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>
14. Faria, D., Morante-Filho, J. C., Baumgarten, J., Bovendorp, R. S., Cazetta, E., Gaiotto, F. A., ... & Benchimol, M. (2023). THE BREAKDOWN OF ECOSYSTEM FUNCTIONALITY DRIVEN BY DEFORESTATION IN A GLOBAL BIODIVERSITY HOTSPOT. *Biological Conservation*, 283, 110126.
15. Flores, Cesáreo, J. C., Bustamante, González, A., Vargas, López, S., Cajuste, L., Escobedo, F. J. & Valadez, Ramírez, M. (2020). CARTOGRAFIA DEL USO DE SUELO EN LA SUBCUENCA HUAQUECHULA, PUEBLA, MÉXICO CON INDICE COMBINADO DE IMÁGENES DE SATÉLITE. *Rev. Investigaciones Geográficas*, UNAM (101). México.
16. Flores, Rodríguez, A. G., Flores, Garnicia, J. G., González, Eguiarte, D. R., Gallegos, Rodríguez, A., Zarazúa, Villaseñor, P. & Mena, Munguía, S. (2021). ANÁLISIS COMPARATIVO DE ÍNDICES ESPECTRALES PARA UBICAR Y DIMENSIONAR NIVELES DE SEVERIDAD DE INCENDIOS FORESTALES. *Investigaciones geográficas*. Instituto de Geografía, UNAM. No. 106.
17. Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., & Christy, A. (2015). NDVI: VEGETATION CHANGE DETECTION USING REMOTE SENSING AND GIS – A CASE STUDY OF VELLORE DISTRICT. *Procedia Computer Science*, 57, 1199-1210.
18. Giltenson, A. A., Vina, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keylan, G., & Leavitt, B. (2003). "REMOTE ESTIMATION OF LEAF AREA INDEX AND GREEN LEAF BIOMASS IN MAIZE CANOPIES". *Geophysical Research Letters*, 30(1248). <https://doi.org/10.1029/2002GL01650>

19. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. (2017). GOOGLE EARTH ENGINE: PLANETARY-SCALE GEOSPATIAL ANALYSIS FOR EVERYONE. *Rev. Remote Sensing of Environmental*. 202 (2017).
20. Granados, C., Serrano, Giné, D. & García, Romero, A. (2014). EFECTO DE BORDE EN LA COMPOSICIÓN Y EN LA ESTRUCTURA DE LOS BOSQUES TEMPLADOS. SIERRA DE MONTE-ALTO, CENTRO DE MÉXICO. *Rev. Caldadia* Vol. 36 No. 2. Colombia.
21. Hernández, Y., López, D. & Moya, O. (2019). MONITOREO AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA PARA EL SEGUIMIENTO CONTINUÓ PREVISTO EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. *Rev. ESPACIOS*. Vol. 40 (3).
22. Huete, A. R. (2012). VEGETATION INDICES, REMOTE SENSING AND FOREST MONITORING. *Rev. Geography Compass*. No. 6.
23. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (19/11/2021). CONJUNTO DE DATOS VECTORIALES. ESCALA 1:250 000. SERIE VII. CONJUNTO NACIONAL. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)*. Aguascalientes, México
24. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2021). NOTA INFORMATIVA. VECTORIALES DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN ESCALA 1:250,000. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)*. Aguascalientes, México
25. Jaskula, J. & Sojka, M. (2019). ASSESSING SPECTRAL INDICES FOR DETECTING VEGETATIVE OVERGROWTH OF RESERVOIRS. *Rev. Pol. Environ. Stud*. Vol. 28 (6).
26. Jiménez, Moreno, M. J., Rodríguez, Laguna, R., Escalona, Maurice, M. J., Razo, Zarate, R. & Acevedo, Sandoval, O. A. (2019). ANALISIS DE INDICADORES AMBIENTALES ESPACIO-TEMPORALES DE AGUA, SUELO Y VEGETACIÓN. *Rev. Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 10 (7). México.
27. Leija Loredo E. G., Reyes Hernández H., Reyes Pérez O., Flores Flores J. L. & Sahagún Sánchez F. J. (2016). CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL, USOS DE LA TIERRA Y ESCENARIOS FUTUROS DE LA REGIÓN COSTERA DEL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO. *Rev. Maderas y Bosques* Vol. 22 (1).
28. López, Contreras, C., Chávez, Costa, C., Barraza, García, S. & Alanís, Rodríguez, E. (2019). BASES CONCEPTUALES Y MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN VISUAL DEL PAISAJE. *Rev. AGROCIENCIAS*. Vol. 53 No. 7. AGRICULTURA. México.

29. Magnago, L. F. S., Edwards, D. P., Edwards, F. A., Magrach, A., Martins, S. V., & Laurance, W. F. (2014). FUNCTIONAL ATTRIBUTES CHANGE BUT FUNCTIONAL RICHNESS IS UNCHANGED AFTER FRAGMENTATION OF BRAZILIAN ATLANTIC FORESTS. *Journal of ecology*, 102(2), 475-485.
30. Manzo, Delgado, L. & Meave, J. A. (2003). LA VEGETACIÓN VISTA DESDE EL ESPACIO: LA FENOLOGÍA FOLIAR A TRAVES DE LA PERCEPCIÓN REMOTA. *Rev Ciencias*. AMC. México
31. Mas, F. J. & Fernández, T. (2003). UNA EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LOS ERRORES EN EL MONITOREO DE LOS CAMBIOS DE COBERTURA COMPARANDO MAPAS. *Rev. Investigaciones Geográficas*. (51). UNAM. CDMX, México.
32. Meave, J. A., Romero, M. A., Salas, Morales, S. H., Pérez, García, E. A. & Gallardo Cruz J. A. (2012). DIVERSIDAD, AMENAZAS Y OPORTUNIDADES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE TROPICAL CADUCIFOLIO EN EL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO. *Rev. Ecosistemas* No. 21. Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET).
33. Muñoz, Aguayo, P. (2013). APUNTES DE TELEDETECCIÓN: INDICES DE VEGETACIÓN. CIREN. Chile.
34. Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Ecológico de la Ciudad de México (PAOT) (s.f) Indicadores Ambientales. <https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/indicadores05/indicadores04/presentacion/indicadores.shtml#:~:text=Seg%C3%BAAn%20la%20OCDE%2C%20un%20indicador,del%20par%C3%A1metro%20en%20s%C3%AD%20mismo>
35. Perilla, G. A., & Mas, J. F. (2020). GOOGLE EARTH ENGINE (GEE): UNA PODEROSA HERRAMIENTA QUE VINCULA EL POTENCIAL DE LOS DATOS MASIVOS Y LA EFICIENCIA DEL PROCESAMIENTO EN LA NUBE. *INVESTIGACIONES GEOGRÁFICAS*. Instituto de Geografía, UNAM. No. 101.
36. Pervochtchikova, M. (Coor). (2020). PAGO POR SERVICIOS ECOLÓGICOS: CASO DE ESTUDIO EN OAXACA Y CIUDAD DE MÉXICO (1ª edición) *Colegio de México, Centro de Estudios demográficos, urbanos y ambientales*.
37. Ricker, M., Villela, S. A., Mondragón, E. (2020). INFORMACION DE CONGLOMERADOS DE INVENTARIO NACIONAL FORESTAL Y DE SUELOS (INFYS). Segunda edición. *CONAFOR*. México.

38. Rivera, Pavón, J. A. & Senna, D. C. (2017). ANÁLISIS DE UNIDADES DE PAISAJE Y EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL COMO HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL MUNICIPAL. CASO DE APLICACIÓN: MUNICIPIO DE TONA. *Luna Azul*, 45(10), 171-200.
39. Rosete, Vergés, F. A., Pérez, Damián, J. L., Villalobos, Delgado, M., Navarro, Salas, E. N., Salinas, Chávez, E. & Redmond, N. R. (2014). EL AVANCE DE LA DEFORESTACIÓN EN MÉXICO 1976-2007. *Rev. Maderas y Bosques* Vol. 20 (1).
40. Rouse, J., Hass, R., Schell, J., Deering, D., & Harian, J. (1974). MONITORING THE VERBAL ADVANCEMENT AND RETROGRADATION (GREENWAVE EFFECT) OF NATURAL VEGETATION. *Greenbelt, MD. USA: NASA/GSFCT*
41. Ruiz, Vicente, M. A. (2020). ESTADO ACTUAL DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL PRESENTE EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA. *Rev. Journal* Vol. 5 (5).
42. Salinas, Zavala, C. A., Martínez, Rincón, R. O. & Morales, Zarate, M. V. (2017). TENDENCIA EN EL SIGLO XXI DEL ÍNDICE DE DIFERENCIAS NORMALIZADAS DE VEGETACIÓN (NDVI) EN LA PARTE SUR DE LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA. *Investigaciones Geográficas*. Instituto de Geografía, UNAM. No. 94.
43. Sandoval, García, R., González, Cubas, R. & Jiménez, Pérez, J. (2021). ANALISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO EN LA COBERTURA DEL SUELO DE LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA. *Rev. Mexicana de Ciencias Forestales*. Vol. 12 No. 66. México.
44. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2022). SISTEMA NACIONAL DE INDICADORES AMBIENTALES (SNIA). https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores13_cd/conjuntob/07_forestales/07_forestales_estado.html
45. Sergieieva, K. (2023, 31 octubre). ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN LA AGRICULTURA DIGITAL. *EOS Data Analytics*. <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>
46. Vázquez, Alamilla, J., Naranjo, Albarrán, L., Fuentes, García, R. & Chávez, Cano, M. (2022). INFERENCIA ESTADÍSTICA. PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS. (1a Edición). *Facultad de Ciencias. UNAM*. Ciudad de México, México
47. Vila, Subiros, J. & Llausás, Pascual, A. (2006). CONCEPTOS Y MÉTODOS FUNDAMENTALES EN ECOLOGÍA DEL PAISAJE. *Una interpretación desde la geografía*. Doc. Anual Geogr. No. 48

48. Wang, L., Diao, C., Xian, G., Yin, D., Lu, Y., Zou, S., & Erickson, T. (2020). A SUMMARY OF THE SPECIAL ISSUE ON REMOTE SENSING OF LAND CHANGE SCIENCE WITH GOOGLE EARTH ENGINE. *Remote Sensing of Environment*, 248, 112002.
49. Wang, X., Blanchet, F. G., & Koper, N. (2014). MEASURING HABITAT FRAGMENTATION: AN EVALUATION OF LANDSCAPE PATTERN METRICS. *Methods in ecology and evolution*, 5(7), 634-646.
50. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N.E., Xu, P., Ramoino, F., Arino, O., (2022). ESA WorldCover 10 m 2021 v200. ([doi:10.5281/zenodo.7254221](https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221))