

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial Especialidad en Geomática

Determinación del daño potencial por ozono (O₃) en el bosque de coníferas y encinos, del Suelo de Conservación del sur CDMX, mediante imágenes de satélite, en la época cálida-seca y fría-seca del año 2022.

Equipo

**Lizbeth Camacho Olivares
Mariana Araceli Jiménez Galicia
Citlalli Mendoza Munguía**

Asesores

**Dra. Mónica Ballinas Oseguera
Dr. Juan Carlos Valdiviezo Navarro**

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este proyecto. En primer lugar, agradecemos a nuestros asesores Dra. Mónica Ballinas Oseguera y Dr. Juan Carlos Valdiviezo Navarro por su invaluable guía y apoyo a lo largo de todo el proceso de investigación. Su conocimiento y experiencia fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados. También queremos agradecer al Dr. José L. Silván, por ser sinodal y por sus valiosas observaciones.

Extendemos nuestro agradecimiento a la Mtra. Cecilia Gutiérrez y al Mtro. Luis Alejandro Castellanos, profesores de la materia de Diseño de Proyectos, quienes nos brindaron las herramientas necesarias para estructurar y consolidar esta investigación.

Asimismo, agradecemos al Dr. Pedro Eloy Mendoza de la Facultad de Ciencias de la UNAM, por su colaboración y aportaciones, que nos ayudaron a abordar de manera integral algunos desafíos científicos que enfrentamos.

No podemos dejar de reconocer el constante apoyo y compañerismo de nuestros colegas de la Especialidad en Geomática, quienes contribuyeron con ideas y ánimos en cada etapa del proyecto.

Nuestro agradecimiento también va para la Lic. Guadalupe Borja por su eficaz apoyo administrativo.

Agradecemos a nuestros familiares por su paciencia, comprensión y respaldo, que fueron esenciales para culminar este proyecto.

Finalmente, queremos reconocer al CentroGeo y al CONAHCYT por el apoyo institucional y los recursos proporcionados. Su compromiso con la investigación y la educación nos permitió desarrollar una investigación de alto nivel, orientada a la conservación ambiental y la sostenibilidad.

ÍNDICE

- I. INTRODUCCIÓN
- II. JUSTIFICACIÓN
- III. OBJETIVOS
 - A. General
 - B. Específicos
- IV. ALCANCES
- V. MODELO CONCEPTUAL
 - A. Modelo de Conocimiento
 - 1. O₃ troposférico, monitoreo y normativas en México
 - 2. El O₃ y sus efectos con la vegetación
 - 3. El estudio de la vegetación a través de sensores remotos
 - B. Modelo Cartográfico
 - C. Modelo Computacional
- VI. METODOLOGÍA
 - A. Recolección y Procesamiento de Datos
 - 1. Delimitación del área de estudio
 - 2. Cálculo de índices espectrales de vegetación
 - 3. Obtención de firmas espectrales
 - 4. Trabajo de campo y validación
 - 5. Integración de datos atmosféricos
 - B. Análisis estadístico y validación
 - C. Desarrollo del indicador de daño potencial por O₃
- VII. RESULTADOS
- VIII. CONCLUSIONES
- IX. BIBLIOGRAFÍA

I. INTRODUCCIÓN

La atmósfera, es una capa gaseosa que rodea a la Tierra, compuesta nitrógeno (78.1%), oxígeno (20.9%), argón (0.93%), dióxido de carbono (0.034%) y otros gases con menos proporción, como helio y ozono (O₃) (Anglés Hernández, et al., 2021). A partir de la Revolución Industrial, las emisiones desmedidas de gases de efecto invernadero, especialmente el dióxido de carbono (CO₂) procedente del uso de combustibles fósiles, han generado cambios significativos en la composición del aire (Boldo, 2016; Zamora, 2015).

La fuente principal de la contaminación atmosférica son los procesos acelerados de urbanización debido al crecimiento poblacional, que ha llegado a cambiar las condiciones de vida del ser humano y de los ecosistemas en todo el planeta (Bermejo, V., et al., 2009). Uno de los contaminantes atmosféricos más nocivos es el ozono troposférico (O₃) (Bermejo, V., et al., 2009), debido a su alta capacidad oxidante, que ha causado daños significativos en la salud humana (Castillejos et al., 1995; Escamilla-Nuñez et al., 2008; Holguín et al., 2003), como en los bosques circundantes (Alvarado R, De Bauer & Galindo A, 1993).

En una zona urbana, las masas de aire locales y regionales, pueden transportar un contaminante hacia zonas alejadas de los focos de emisión, provocando las mayores concentraciones, en este caso de O₃ en las zonas periurbanas, rurales o forestales (Bermejo, V., et al., 2021). Desafortunadamente, las concentraciones elevadas en estas zonas pueden quedar desapercibidas porque las redes de vigilancia y monitoreo de la calidad del aire se encuentran fuera del área de vigilancia; ya que generalmente se encuentran ubicadas en las áreas urbanas e industriales (Bermejo, V., et al., 2021).

La Ciudad de México (CDMX), es un caso donde existe una gran conglomeración urbana e industrial (De Bauer, M. de L., & Hernández-Tejeda, T. (2007).). De acuerdo a la ONU (2023), la población del área metropolitana es aproximadamente de 22,281,442 de habitantes; por lo que es considerada una de las ciudades más pobladas del mundo. Se encuentra rodeada de montañas, lo que propicia el aumento de la temperatura debido a la presencia de sistemas de alta presión y limita la dispersión de contaminantes hacia el exterior (Jáuregui, 2002). En el sur es donde usualmente se detectan las concentraciones más altas de ozono (Jáuregui, 1989; Bravo-Álvarez y Torres-Jardón, 2002), y se han reportado valores máximos de este contaminante durante la temporada cálida-seca (SEDEMA, 2019).

En el siglo pasado, a mediados de los años setenta, se comenzaron a detectar signos de deterioro en los bosques de varias regiones de Norteamérica y Europa, atribuido al O₃ (Bermejo, V., et al., 2009). A finales de esa década, se comenzaron a observar cambios

provocados por este contaminante en los bosques de la Ciudad de México (Krupa & De Bauer, 1976). Los primeros estudios fueron experimentos de campo, laboratorio y jardines controlados (Reyes- Galindo, V., 2019). Estos estudios demostraron que el O₃ penetra en las células a través de las estomas, causando estrés metabólico y produciendo diferentes especies reactivas de oxígeno. Estas moléculas oxidan las membranas y paredes celulares, manifestándose en síntomas visibles, según la severidad del estrés (Bermejo, V., et al., 2021). El daño ocasionado por la contaminación ha sido observado en diferentes especies de pino, especialmente en el oyamel (*Abies religiosa*; (Kunth) Schlttdl. y Cham.), que muestra una coloración rojiza en la superficie superior de sus hojas aciculares (forma de agujas) (Reyes-Galindo et al., 2024). Es importante destacar que, el declive de estos bosques se encuentra asociado con el incremento del contaminante O₃, se ha acelerado debido a la falta de manejo forestal, la extracción excesiva de agua, plagas (principalmente escarabajos barrenadores), e incendios forestales (Alvarado R. et al., 1993 & Reyes G., 2019).

Las plataformas y sensores satelitales en términos de resolución espacial, temporal y radiométrica, así como el acceso y la extracción gratuita de imágenes satelitales multiespectrales, posibilita nuevas opciones para la estimación indirecta de características biofísicas del arbolado (Torres R. et al., 2016). La percepción remota (PR), desempeña un papel importante en la cuantificación y comprensión de la dinámica forestal, y es ampliamente reconocida como una herramienta para monitorear los bosques (Decuyper et al., 2021).

En este trabajo, nos enfocaremos en la estimación de un atributo forestal clave: daño por ozono a la vegetación, la estimación de atributos forestales mediante sensores remotos es de particular interés en el manejo del área de vegetación, ya que ofrece la posibilidad de obtener información consistente, coherente y transparente, además de permitir el acceso a áreas de difícil acceso (Torres R. et al., 2016). Esta estimación se divide en dos enfoques principales: métodos estadísticos y métodos físicos. Los métodos estadísticos utilizan estimaciones basadas en la correlación estadística entre los datos satelitales y las variables de interés (Aguirre-Salado et al. 2012a; Song, 2013; Wulder et al., 2014), mientras que los métodos físicos implican mediciones directas en campo que sirven como variables auxiliares en las estimaciones estadísticas (GOFC-GOLD, 2011).

Es por ello, que esta investigación permitirá conocer por medio de la construcción de un indicador, el daño potencial que puede tener el O₃ en la vegetación, calculándolo mediante el manejo de imágenes satelitales, en lugares donde se cuenten con estaciones de monitoreo

ambiental en sitio o cercanos a estas. Este indicador, además, podrá ser aplicado a cualquier área con vegetación que cuente con las características físicas y climáticas similares a las del área de estudio. La información proporcionada, dará pauta para la creación de nuevas políticas públicas orientadas a la preservación del suelo de conservación importante para los habitantes de la Ciudad de México.

II. JUSTIFICACIÓN

La pérdida de vegetación en el Suelo de Conservación desencadena una serie de problemas progresivos, como la reducción en la captación de agua de lluvia, la alteración de los ecosistemas y la disminución del área como sumidero de carbono. Ante esta problemática, preservar el suelo de conservación en la Ciudad de México es vital para la sostenibilidad de la región, ya que ayuda a mitigar el cambio climático, regula el ciclo hidrológico y mantiene la riqueza biológica.

Uno de los inconvenientes actuales es que las redes de monitoreo de la calidad del aire suelen estar ubicadas en áreas urbanas, lo que limita la capacidad para detectar y cuantificar los daños en zonas rurales y forestales. Por ello, se propone determinar el daño causado por el O₃ mediante índices espectrales obtenidos de imágenes satelitales. Estos índices permitirán identificar las áreas más afectadas y las temporadas críticas, proporcionando datos esenciales para desarrollar estrategias de mitigación efectivas.

Este proyecto se enfocará en construir un indicador que permita conocer el daño potencial que el ozono provoca en la vegetación, principalmente en especies del bosque del Suelo de Conservación en el sur de la Ciudad de México, utilizando técnicas de percepción remota. Este indicador facilitará la visualización del daño potencial por ozono y permitirá generar una base de datos (BD) histórica, esencial para monitorear la evolución del impacto ambiental a lo largo del tiempo.

La importancia de este estudio radica en su capacidad para proporcionar información precisa y oportuna, lo cual es fundamental para la toma de decisiones en el manejo y conservación de los bosques. La creación de políticas públicas basadas en datos concretos permitirá implementar acciones correctivas y preventivas de manera más efectiva, contribuyendo a la preservación del suelo de conservación. En última instancia, esto favorecerá la sostenibilidad ecológica y la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México y sus alrededores.

III. OBJETIVOS

A. General

Proponer un indicador que permita conocer el daño potencial provocado por el O₃ en el bosque de coníferas y encinos del sur del Suelo de Conservación de la CDMX en la época cálida-seca y fría-seca en el año 2022, mediante el análisis de imágenes satelitales y con ello promover la creación de nuevas políticas públicas para su preservación.

B. Específicos

- Determinar el daño potencial por O₃ en el bosque de coníferas y encino del Suelo de Conservación del sur de la Ciudad de México a partir del cálculo de índices espectrales en las temporadas cálida-seca y fría-seca del año 2022.
- Obtener la correlación entre las concentraciones de ozono, obtenidas mediante el análisis estadístico de datos de las estaciones de monitoreo atmosférico de la Red Automática del Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) y las zonas que presentan alteraciones detectadas por los índices de vegetación. Para validar que los cambios en la vegetación están relacionados con el contaminante.
- Construir una fórmula a partir de los resultados obtenidos en la correlación que permita calcular un indicador de daño potencial por ozono para visualizar en mapas coropléticos
- Desarrollar un algoritmo que muestre los resultados a través de una página web, que pueda ser utilizado como alternativa para conocer el daño histórico en el bosque que pertenece al suelo de conservación.

IV. ALCANCES

El alcance de este proyecto es desarrollar una página web interactivo que muestre el daño potencial por ozono en los bosques de coníferas y encinos en el Suelo de Conservación del sur de la CDMX (SC de la CDMX). A partir del desarrollo y validación de un algoritmo, que contiene la fórmula del indicador resultante de los análisis estadísticos, de mediciones precisas de los niveles de este contaminante a través de los datos obtenidos de la RAMA del SIMAT, y del cálculo de índices espectrales de vegetación (validados mediante

comparaciones con datos de campo), que detectan alteraciones en las plantas mediante imágenes de satélite de alta resolución.

V. MODELO CONCEPTUAL

A. MODELO DE CONOCIMIENTO

1. O₃ troposférico, monitoreo y normativas en México

El O₃ es una molécula inestable compuesta por tres átomos de oxígeno que se encuentra tanto en la estratosfera, donde forma la "capa de ozono", que protege la vida en la Tierra de la radiación ultravioleta, en la Troposfera, actúa como un contaminante dañino (NASA, 2001).

El O₃ es un contaminante secundario, esto quiere decir que su formación es producto de una reacción química en la atmósfera (Ballester, 2005). Esta reacción ocurre por la degradación de compuestos que están formados por nitrógeno y oxígeno (NO_x), esta degradación forma NO (monóxido de nitrógeno), NO₂ (dióxido de nitrógeno) y posteriormente O₃ en presencia de luz solar (Atkinson, 2000). Las concentraciones de O₃ troposférico han aumentado significativamente desde la era preindustrial debido a las emisiones de precursores como NO_x, CO (monóxido de carbono), CH₄ (metano) y compuestos orgánicos volátiles (Jurán et al., 2021).

La exposición al O₃ se ha relacionado en diversos estudios con un incremento en la mortalidad (SEDEMA, SMAGEM, SEMARNAT y SEMARNAT, 2021). Además de causar problemas respiratorios, el ozono puede exacerbar enfermedades preexistentes y reducir la función pulmonar (SEDEMA & SIMAT, 2018).

Para regular y monitorear al O₃, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido una Guía de Calidad del Aire que proporciona referencias de concentraciones a las cuales existen riesgos asociados entre la contaminación, la salud y la calidad del ambiente (SEDEMA, 2019). Estas guías sirven para que los países fijen metas respecto a la reducción de contaminantes importantes para la calidad del aire, aunque cada país puede tener límites permisibles diferentes según su legislación y contexto. En México, los "contaminantes criterio" son aquellos que tienen una legislación o norma que establece un límite máximo permisible para preservar la salud humana, el O₃ es considerado de estos contaminantes debido a su impacto significativo en la salud y el medio ambiente (COFEPRIS, 2017). La Norma Oficial

Mexicana (NOM-172-SEMARNAT-2019, 2019) establece que los gobiernos deben difundir el Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud de forma continua y horaria, preferiblemente a través de una plataforma electrónica (SEMARNAT, 2019).

En la Ciudad de México (CDMX), el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) consta de 34 estaciones de monitoreo continuo que conforman la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) (SEDEMA & SIMAT, 2018), las cuales registran datos por hora todos los días. Sin embargo, de acuerdo con el cálculo de áreas de representatividad del SIMAT, la zona sur y suroeste de la Ciudad de México no tiene cobertura suficiente, ya que los radios de representatividad de las estaciones cercanas no alcanzan a cubrir el Suelo de Conservación en específico de las alcaldías Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan, Milpa Alta y Xochimilco, donde se encuentra parte del suelo de conservación de la CDMX (Figura 1).

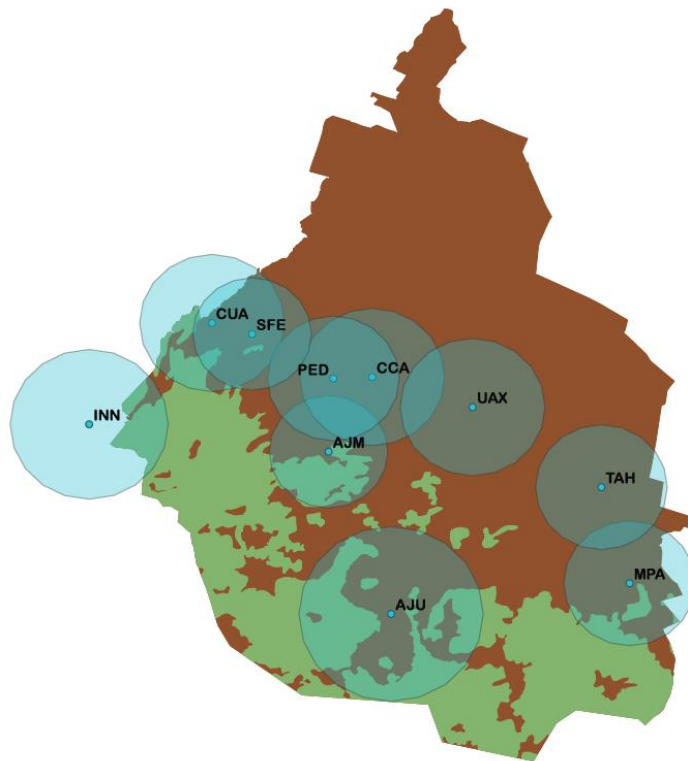


Figura 1. Áreas de representatividad de las estaciones ubicadas cercanas al Suelo de Conservación de la CDMX (Adaptado de SIMAT, CDMX, 2021). El área verde claro, corresponde al área de estudio. El área en color café representa el área total de la CDMX. El círculo verde oscuro, corresponde a las estaciones: INN, Instituto Nacional de...; CUA, Cuajimalpa; SFE, Santa Fe; PED, Pedregal; CCA, Centro de Ciencias de la Atmósfera; AJM, Ajusco Medio; UAX, Universidad Autónoma de Xochimilco; AJU, Ajusco; TAH, Tláhuac; MPA, Milpa Alta.

2. El O₃ y sus efectos en la vegetación

Desde los años ochenta, el O₃ ha sido considerado uno de los contaminantes más relevantes para la salud de la vegetación (Kruppa et al., 1988). En las últimas décadas, los efectos del O₃ sobre las plantas han sido ampliamente estudiados en diversas condiciones controladas, como laboratorios y jardines experimentales (Calatayud et al., 2010; Reyes-Galindo, V., 2019). Estos estudios han permitido conocer con mayor detalle las respuestas fisiológicas y bioquímicas que el contaminante provoca en las plantas.

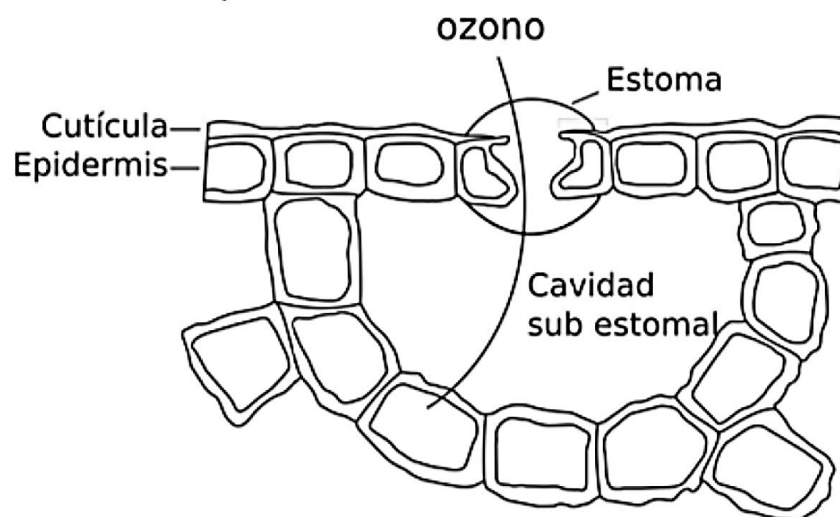


Figura 2. Proceso de absorción de O₃ por las estomas en la planta. (Modificado de Reyes, V. 2019).

El O₃ penetra en las células vegetales a través de los poros de la epidermis de las hojas (estomas), lo que provoca estrés metabólico al transitar por las paredes celulares y los espacios intercelulares (apoplasto) (**Figura 2**). Este estrés metabólico produce diversas especies reactivas de oxígeno, las cuales tienen una fuerte capacidad oxidante (Tausz, Grulke & Vieser, 2007) y pueden causar la destrucción de los cloroplastos. Como resultado, se observa una senescencia prematura en las hojas, ya que los cloroplastos almacenan el pigmento verde llamado clorofila (Cano et al., 2007) (**Figura 3**).

Respuesta de la planta ante la exposición al O₃

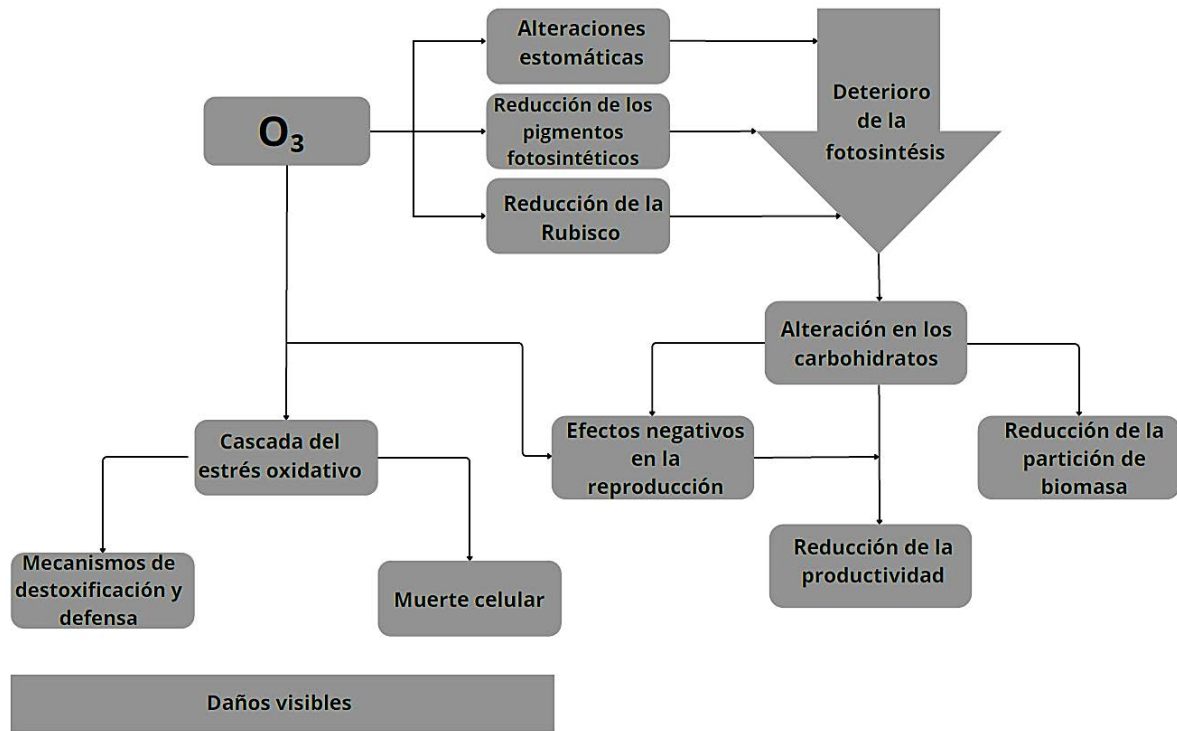


Figura 3. Respuesta de las plantas ante la exposición al O₃. El diagrama muestra cómo la exposición al ozono afecta a las plantas a nivel fisiológico y bioquímico (Modificada de Palomares, A., 2010).

El daño causado por la contaminación a la vegetación ha sido observado en diversas especies de coníferas forestales de México (**Tabla 1**). En particular, el daño en los oyameles (*Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham), se manifiesta como una coloración rojiza en la parte superior de las agujas (acículas u hojas alargadas características de las coníferas) en las ramas (Alvarado-Rosales & Hernández-Tejeda, 2002; Reyes, G., 2019) (**Figura 4**).

Tabla 1. Sensibilidad a los oxidantes fotoquímicos (O₃, H₂O₂, entre otras.) de las especies de pino en el Valle de México según observaciones de campo. (Modificado de De Bauer et al., 2007).

Especies	Sensibilidad
<i>Pinus hartwegii</i>	Alta
<i>P. radiata</i>	Alta
<i>P. montezumae</i>	Alta
<i>P. montezumae var. lindleyi</i>	Alta
<i>P. leiophylla</i>	Alta
<i>P. patula</i>	Moderada
<i>P. teocote</i>	Moderada
<i>P. rudis</i>	Moderada
<i>P. pseudostrobus</i>	Moderada
<i>P. cembroides</i>	Baja
<i>P. ayacahuite</i>	Baja



Figura 4. Intensificación de los síntomas foliares con el envejecimiento de los verticilos de agujas en las ramas de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Desierto de los Leones. (De Bauer et al., 2007).

3. El estudio de la vegetación a través de sensores remotos

La teledetección es una ciencia que, a través del análisis de datos adquiridos por un sensor, permite obtener información de un área, objeto o fenómeno sin estar en contacto directo con ellos. Este tipo de estudios facilita la obtención de grandes volúmenes de información en diferentes resoluciones espaciales, espectrales y temporales (Lillesand et al., 2015).

Los sensores remotos permiten cualificar y cuantificar la radiancia de los diferentes elementos del espacio geográfico. En el caso de la vegetación, los factores que inciden en su comportamiento espectral y que permiten caracterizar y evaluar su estado de salud incluyen la fisiología, morfología, fenología, así como factores ambientales y estacionales (Almorox & García Antonio, 1999).

El comportamiento de las hojas en el espectro electromagnético está influenciado por pigmentos, agua, carbono y nitrógeno. Entre los pigmentos, la clorofila, los carotenoides y las antocianinas son los principales responsables del color de las hojas. Cuando la vegetación es vigorosa, la respuesta espectral es mayor en el canal del infrarrojo cercano ($0,78-1,1 \mu\text{m}$) y es baja en el canal del visible ($0.4-0.7 \mu\text{m}$), con un pico en la porción del verde alrededor de los $0.55 \mu\text{m}$. Esta característica es la que hace que el ojo humano perciba la vegetación en color verde (Chuvienco Salinero, 1995., Lanfri, 2010).

Cuando las plantas sufren estrés debido a sequías, problemas nutricionales o cambios estacionales, la producción de clorofila disminuye. Como resultado, la clorofila se degrada, permitiendo que los pigmentos naturales de las plantas, como los carotenoides y antocianinas, se vuelven perceptibles. En el caso de los carotenoides, esto da lugar a hojas de tonalidades amarillentas, mientras que, en la vegetación senescente, las antocianinas generan un color rojo. Estos pigmentos naturales provocan que la respuesta espectral de la vegetación disminuya en el canal del infrarrojo, pero presente un incremento en el visible, con un pico en la región del rojo (0.6 a $0.7 \mu\text{m}$) (Chuvienco Salinero, 1995).

El agua es el componente mayoritario en las plantas y un elemento vital para los procesos bioquímicos de la vegetación (Ruscitti, 2015). Aunque el canal del infrarrojo cercano muestra una mayor reflectancia en las plantas, esta disminuye en el infrarrojo medio debido al fuerte efecto absorbente del agua en las hojas en estas longitudes de onda, conocidas también como bandas de absorción de agua. Esta característica está relacionada con el grosor de la hoja y la salud de la vegetación. En la **figura 5**, se observa un pico entre $1.6 \mu\text{m}$ y $2.2 \mu\text{m}$, donde la absorción del agua es pronunciada. Estudiar la vegetación en este rango del

espectro permite conocer su vigor a partir de su contenido de humedad (Chuvieco Salinero, 1995; Lillesand et al., 2015).

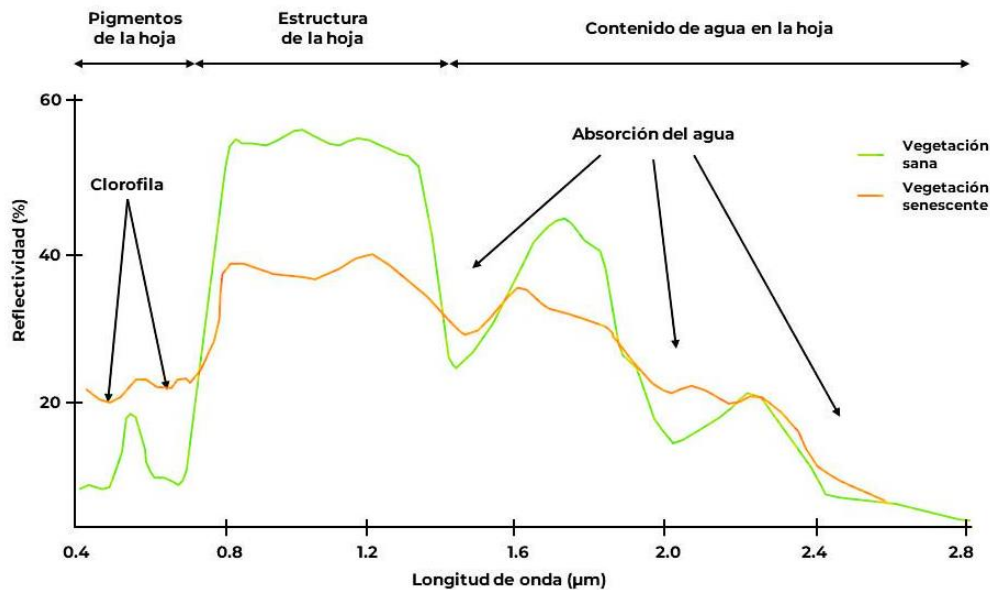


Figura 5. Firmas espectrales de la vegetación en el espectro electromagnético. Elaboración propia basado en Chuvieco Salinero, (1995), y Lanfri, (2010).

La PR aplicada al manejo forestal comprende principalmente cuatro categorías: clasificación de la cobertura forestal, estimación de atributos forestales, detección de cambios en el bosque y modelado espacial (Torres R. et al., 2016). El monitoreo del fenotipo de las hojas, incluyendo el contenido de clorofila y la fotosíntesis, es muy efectivo mediante la reflectancia espectral (Ramya, 2021).

Para el estudio de la vegetación, se han desarrollado diversos índices espectrales con el objetivo de evaluar su vigor a partir de su estructura, cantidad de clorofila y contenido de agua. Estos índices utilizan principalmente los valores de reflectividad de los canales del visible y el infrarrojo (Bannari & Huete, 2010; Lanfri, 2010), minimizando las perturbaciones causadas por elementos como la atmósfera y el suelo (Gilabert et al., 1997; Jackson et al., 1983). Los índices de banda estrecha en el borde rojo son sensibles a las concentraciones de clorofila y han demostrado ser efectivos en la detección temprana de estrés. La relación entre el borde rojo y el infrarrojo cercano es eficaz para la detección de estrés previsual (Ramya, 2021).

Por ejemplo, índices espectrales como el NIR (Infrarrojo Cercano), NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), NBR (Índice de Calcinación Normalizado), EVI (Índice de Vegetación Mejorado), NBRT (Índice de Quemado Normalizado), BAI (Índice de Área Quemada), OSAVI (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index), GCI (Índice de Clorofila Verde), SIPI (Índice de Protección del Suelo), GNDVI (Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada Verde) y GRMI (Índice de Vegetación de la Relación Verde-Rojo), calculados a partir de imágenes Landsat 8 (OLI) en la Sierra de Tapalpa, ubicada en el estado de Jalisco, México, obtenidas después del incendio han sido utilizados para identificar áreas quemadas y niveles de severidad en cuanto al daño o los cambios en la vegetación después de estos eventos. Estos índices se utilizaron para clasificar la severidad del incendio en tres categorías: sin quemar, severidad moderada y severidad muy alta, generando mapas temáticos para visualizar la severidad del incendio. Para seleccionar el mejor índice, se realizó una matriz de confusión para determinar la precisión de cada uno, resultando el NBR como el mejor índice en general, aunque la precisión varió según la temporalidad de las imágenes (Rodríguez et al., 2021).

El NDVI, es un índice espectral que se ha utilizado como un parámetro importante para caracterizar los cambios en la vegetación de la superficie terrestre y que se ha utilizado ampliamente para investigar el impacto del cambio climático y las actividades humanas en la vegetación (Jurán et al., 2021).

En un estudio realizado en China, se utilizó el NDVI como un indicador clave para evaluar cuantitativamente el impacto de la contaminación por ozono y el cambio climático en la actividad de la vegetación terrestre. La metodología aplicada incluyó el uso de datos de NDVI de registros climáticos, combinados con datos de la proporción de mezcla de masa de ozono (OMR, por sus siglas en inglés) a 1000 hPa, temperatura (T), precipitación (P) y radiación neta de superficie (SSR, por sus siglas en inglés) durante el período de 1982 a 2020. Se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple para evaluar de manera cuantitativa los efectos de la contaminación por ozono y el cambio climático en el crecimiento de la vegetación durante la temporada de crecimiento. Esta metodología no solo profundiza la comprensión de los efectos de la contaminación por ozono y el cambio climático en el crecimiento de la vegetación, sino que también proporciona un marco de investigación para el monitoreo a gran escala de la salud de la vegetación utilizando datos de teledetección (Wang, 2021).

El ReCI (Índice de Clorofila de Borde Rojo) es una herramienta clave para medir la actividad fotosintética de la vegetación, permitiendo evaluar la densidad de la biomasa y el estado de

salud de las plantas, siendo particularmente sensible al contenido de clorofila, que está relacionado con los niveles de nitrógeno. El GCI estima el contenido de clorofila en las hojas, reflejando el estado fisiológico de la vegetación, útil para identificar áreas de cultivo en buen estado y monitorear el impacto de factores ambientales. En un estudio en la meseta de Mostaganem, Argelia, se emplearon los índices ReCI y GCI junto con datos multitemporales de Landsat para evaluar cambios en áreas cultivadas y biomasa vegetal de 1989, 2011 y 2021, analizando la actividad fotosintética y el estado de salud de la vegetación (Nadjla et al., 2022).

La continua evolución de las tecnologías de la información espacial ha revolucionado la forma en que se monitorean los ecosistemas, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones y la gestión ambiental. Los recursos forestales son esenciales para la humanidad debido a su valor ecológico, económico, estético y recreativo. Por ello, es crucial conocer y vigilar su estado de salud, así como su respuesta a factores ambientales que puedan causarles daño. En este contexto, los sensores remotos emergen como una poderosa herramienta para obtener información sobre la vegetación en diversas resoluciones espaciales y temporales, destacando sus características y diferencias con alta precisión y fiabilidad.

B. MODELO CARTOGRÁFICO

El modelo cartográfico consiste en el uso de funciones básicas en una secuencia lógica para resolver problemas espaciales complejos (Demers M. 1997). El modelo de este proyecto (**Figura 6**) consistió en la obtención final de tres productos: primero, mapas de daño a la vegetación, aplicando tres índices de vegetación (NDVI, ReCI y GCI). Segundo, mapas de cluster de vegetación con daño por el contaminante O₃, y tercero, mapas de daño potencial en la vegetación por O₃. La obtención de estos productos se basó en la secuencia descrita a continuación:

Recolección y procesamiento de datos:

Se descargaron capas de uso de suelo del INEGI (1 y 2) para identificar el bosque de coníferas y encinos (4). A la par se descargaron imágenes Sentinel 2 - LA2 del año 2022 (1.1). Con lo cual, se calcularon los índices de vegetación (2.1) en dos épocas: cálida-seca y fría-seca.

Utilizando el software SNAP (Sentinel Application Platform), se obtuvieron firmas espectrales de puntos estratégicos (7). Así mismo, se obtuvieron las firmas espectrales (7.2) del trabajo de campo (7.1). Se obtuvieron polígonos de vegetación sana y con daño (7.3), que ayudaron a la creación de la base de datos (7.4), para validar el trabajo de investigación (11.2).

Análisis y Validación:

Se realizaron análisis estadísticos (11.1 y 11.3), incluyendo pruebas de correlación (I de Morán) (16), para validar la relación entre los índices de vegetación (14) y las concentraciones de O₃ obtenidas de la RAMA y SIMAT (12.1, 12.2 y 12.3).

Construcción de fórmula de daño potencial a la vegetación por O₃ (18):

Se desarrolló una fórmula para calcular un indicador de daño potencial por ozono (IDPO)(18).

Construcción de mapas:

Finalmente se generaron mapas que reflejan la distribución espacial del daño potencial en la vegetación por O₃ (20)

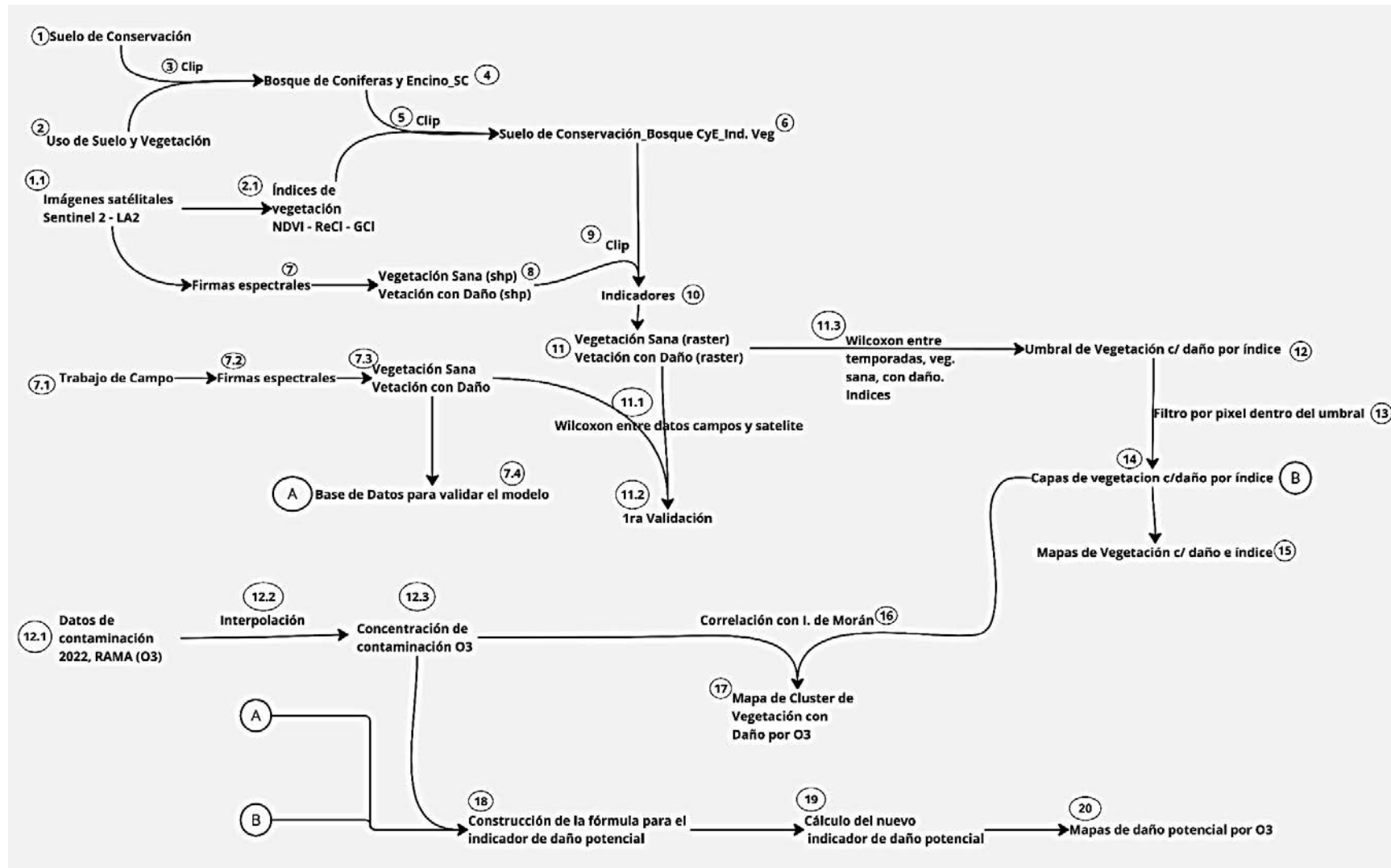


Figura 6. Modelo cartográfico del proyecto de investigación en la Especialidad en Geomática, CentroGeo, CDMX.

C. MODELO COMPUTACIONAL

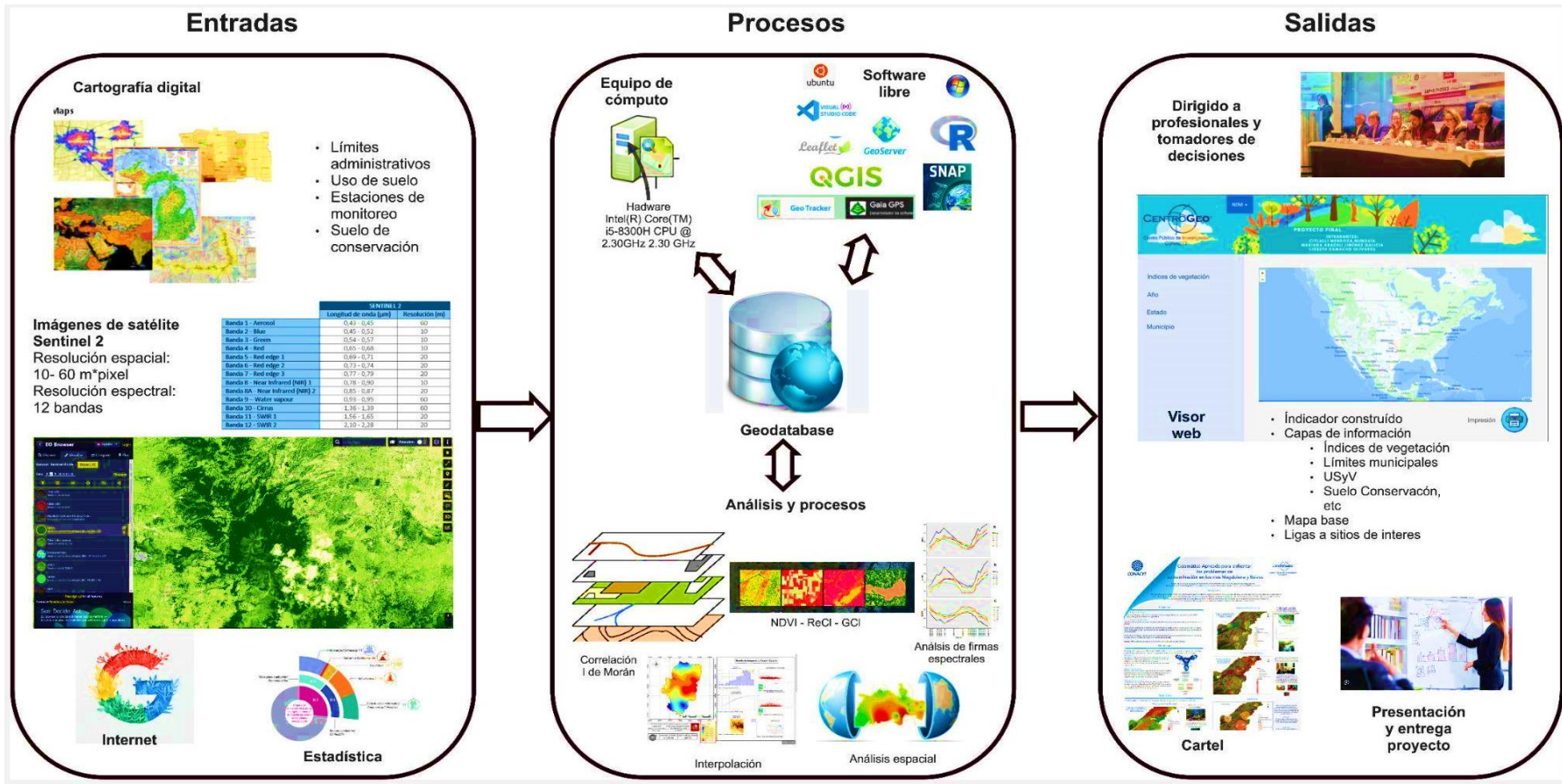


Figura 7. Modelo computacional del proyecto de investigación de la Especialidad en Geomática, CentroGeo, CDMX, organizado en tres secciones principales: entradas, procesos y salidas.

- **Entradas:**

El modelo comienza con la integración de datos vectoriales, ráster y estadísticos. Entre los datos vectoriales, se incluyeron límites administrativos, uso del suelo y vegetación, el suelo de conservación y estaciones de monitoreo. Los datos ráster se obtuvieron a partir de la plataforma libre Copernicus Browser de la Agencia Espacial Europea (ESA), utilizando imágenes Sentinel 2 - LA2 con resoluciones que varían de 10 a 60 metros por píxel y una resolución espacial de 12 bandas. Los datos horarios del contaminante O₃ para el año 2022 se obtuvieron de la página web del SIMAT. Estos datos proporcionaron la base para la evaluación del daño potencial causado por ozono.

- **Procesos:**

Para el procesamiento de las imágenes satelitales y datos atmosféricos, se empleó un hardware especializado con tarjeta de video de alto rendimiento, que cumplió con las especificaciones necesarias para procesar grandes volúmenes de datos. Los cálculos de índices de vegetación (SNAP), el análisis estadístico (R y R Studio) y la creación de la página web (Linux, Visual Studio Code) se realizaron utilizando software libre y de código abierto, garantizando flexibilidad y accesibilidad.

- **Salidas:**

Los resultados del modelo se presentaron en una página web interactiva que mostró el indicador de daño potencial por O₃, calculado a partir de la fórmula generada. Así como capas de información relevantes como el NDVI, ReCI y GCI, el uso del suelo, el suelo de conservación y la vegetación. La página web incluyó un mapa base y un menú que permitirá a los usuarios consultar diferentes años de interés. Además, se generó un cartel informativo, una presentación y un documento escrito para comunicar los resultados. Cabe destacar, que todos estos productos están destinados a profesionales y tomadores de decisiones interesados en la gestión y conservación de los bosques afectados por O₃.

VI. METODOLOGÍA

La problemática antes descrita se abordó a través de una investigación cuantitativa, ya que ello permitió dar cuenta de las características del ozono en los bosques de coníferas y encinos del Suelo de Conservación de la CDMX, así como de su impacto en la zona. Para ello, se utilizaron técnicas y herramientas de análisis estadístico y matemático que posibilitaron una óptima descripción del fenómeno del ozono.

En la presente sección se describen detalladamente cada uno de los procesos principales de los que se deriva la información procesada y analizada para la obtención de resultados.

A. Recolección y procesamiento de datos

1. Delimitación área de estudio

El proyecto se desarrolló en el Suelo de Conservación del sur de la Ciudad de México, delimitado por las coordenadas 19.2527 N, -99.2082 W al norte, 19.2527 N, -99.2080 W al sur, 19.3228 N, -99.1490 W al este y 19.3228 N, -99.2080 W al oeste (**Figura 8**). Esta área limita al norte con la zona urbana de la CDMX, al sur con el estado de Morelos, y al este y oeste con el Estado de México. Tiene una extensión de 40,356 hectáreas (ha), lo que representa el 46% del total del Suelo de Conservación de la CDMX, que abarca 87,291 ha. La zona presenta paisajes irregulares con altitudes que varían entre 2,500 y 4,000 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Las comunidades vegetales del área incluyen bosques y pastizales. Los bosques se localizan en las partes de mayor altitud, por encima de los 2,500 msnm, con especies dominantes como Oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham.), Pino-Ocote (*Pinus* spp. Linnaeus) y Encino (*Quercus* spp. Linnaeus). Los pastizales se encuentran en zonas deforestadas de climas fríos y secos, a partir de los 2,250 msnm, con especies dominantes como Zacate (*Festuca* sp. Linnaeus), Zacatón (*Muhlenbergia* spp. Schreb.) y Jarilla (*Senecio* sp. Linnaeus).

En este estudio, el foco de interés fue el bosque de coníferas y encinos. Esta clasificación se tomó del Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación (USyV), escala 1:250000 serie VI del INEGI, que define:

- **Bosque de coníferas:** "Comunidades arbóreas, subarbóreas u ocasionalmente arbustivas de origen septentrional (Holártico), principalmente de las regiones templadas y semifrías con diferentes grados de humedad; por lo común con mínima

variación de especies de coníferas y frecuentemente con pocos bejuocos o sin ellos. Su desarrollo es consecuencia del clima y del suelo de una región, en la que sensiblemente no han influido otros factores para su establecimiento" (INEGI, 2017).

- **Bosque de encino:** *"Comunidades arbóreas, subarbóreas u ocasionalmente arbustivas integradas por múltiples especies del género Quercus (encinos, robles) que, en México, salvo condiciones muy áridas, se ubican prácticamente desde los 300 hasta los 2,800 m. Se encuentra muy relacionado con los bosques de pino, formando una serie de bosques mixtos con especies de ambos géneros" (INEGI, 2017).*

Utilizando la información de vegetación y la capa vectorial del Suelo de Conservación del Distrito Federal proporcionada por la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX (PAOT), se realizó un corte para obtener el polígono general del "Bosque de Coníferas y Encinos del sur del Suelo de Conservación" (BCESC), que sirvió como base para los procesos posteriores.

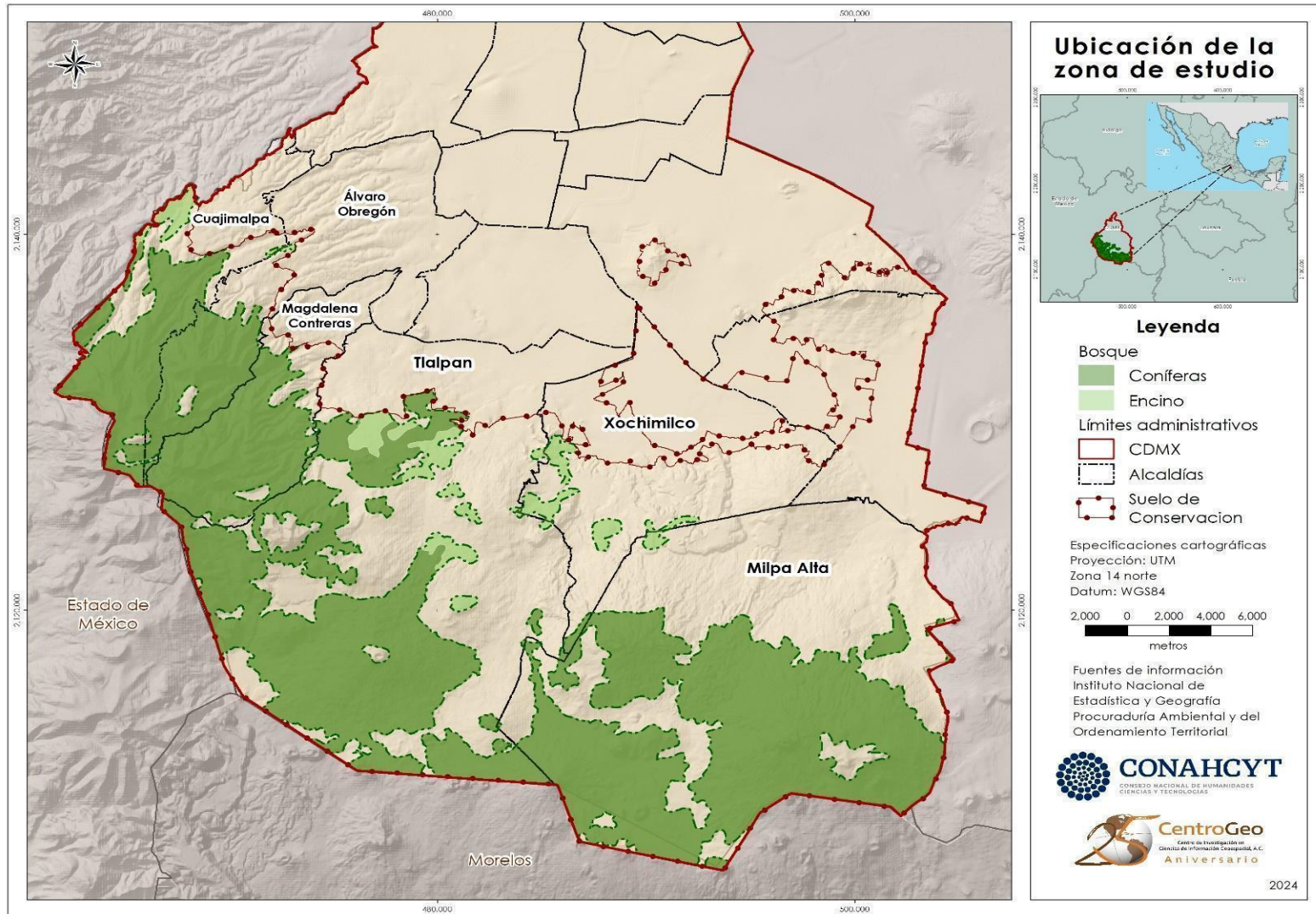


Figura 8. Área de estudio, correspondiente al BCESC en el sur de la Ciudad de México.

2. Cálculo de índices espectrales de vegetación

Para este estudio, se obtuvieron imágenes satelitales Sentinel-2 LA2 correspondientes a los meses de la época cálida-seca (marzo, abril, mayo) y de la época fría-seca (octubre, noviembre y diciembre) del año 2022 (**Tabla 2**).

Las imágenes fueron elegidas de acuerdo con los siguientes criterios:

- Como máximo 30% de nubosidad, de acuerdo con el porcentaje de nubosidad que el software de descarga te muestra.
- Que de forma visual la nubosidad presente no este situada, preferentemente sobre el área de estudio.
- Cobertura total del área de estudio.

Tabla 2. Imágenes Sentinel-2 LA2 elegidas para el cálculo de índices espectrales y posterior análisis. Se incluye una columna de clasificación por temporada, seca caliente (SC) y seca fría (SF).

Mes	Fecha	Nombre imagen	Clasificación temporada
marzo	02/03/2022	S2A_MSIL2A_20220302T170221_N0400_R069_T14QMG	SC
	12 /03/2022	S2A_MSIL2A_20220312T170111_N0400_R069_T14QMG	SC
abril	01/04/2022	S2A_MSIL2A_20220401T165851_N0400_R069_T14QMG	SC
	06/04/2022	S2B_MSIL2A_20220406T165839_N0400_R069_T14QMG	SC
mayo	16/05/2022	S2B_MSIL2A_20220516T165849_N0400_R069_T14QMG	SC
	26/05/2022	S2B_MSIL2A_20220526T165849_N0400_R069_T14QMG	SC
octubre	03/10/2022	S2B_MSIL2A_20221003T170129_N0400_R069_T14QMG	SF
	13/10/2022	S2B_MSIL2A_20221013T170239_N0400_R069_T14QMG	SF
noviembre	02/11/2022	S2B_MSIL2A_20221102T170449_N0400_R069_T14QMG	SF
diciembre	07/12/2022	S2A_MSIL2A_20221207T170711_N0509_R069_T14QMG	SF
	17/12/2022	S2A_MSIL2A_20221217T170721_N0509_R069_T14QMG	SF

Estas imágenes permitieron calcular los índices espectrales ReCI, NDVI y GCI para evaluar el grado de salud de la vegetación en las áreas de interés.

Como se discute en el punto 3 de la sección A. Modelo de conocimiento, existen una serie de índices que se han utilizado ampliamente para el estudio de la vegetación bajo diferentes contextos como el cambio climático, la contaminación y la salud de la vegetación antes y después de la ocurrencia de incendios forestales. Sin embargo, de acuerdo con las

características y la concordancia entre la información que se proporciona contra los daños a nivel celular, estructural y visual que la contaminación puede provocar en la vegetación, se eligieron los índices ReCI, NDVI y GCI para la elaboración de este análisis.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de los índices espectrales elegidos se describen a continuación.

1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

$$\text{NIR} = \text{b8}$$

$$\text{Red} = \text{b4}$$

2. Índice de Clorofila de la Banda Roja (ReCI):

$$\text{ReCI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{Red})$$

$$\text{NIR} = \text{b8}$$

$$\text{Red} = \text{b4}$$

3. Índice de Clorofila Verde (GCI):

$$\text{GCI} = (\text{NIR} / \text{Green}) - 1$$

$$\text{NIR} = \text{b8}$$

$$\text{Green} = \text{b3}$$

Donde **NIR** es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano, **Red** es la reflectancia en la banda del rojo y **Green** es la reflectancia en la banda del verde (Ahamed et al., 2011; Hunt Jr. et al., 2011).

Después de obtener los índices aplicando la fórmula, cada una de las imágenes se cortó con respecto a la capa BCESC creada para fines de este proyecto.

3. Obtención de firmas espectrales

La metodología de firmas espectrales es una técnica esencial para el análisis de datos obtenidos mediante sensores remotos. Se utiliza para identificar y clasificar materiales basándose en su respuesta a diferentes longitudes de onda de luz (Hernández & Montaner, 2004). En este proyecto, se obtuvieron las firmas en dos ocasiones: primero en gabinete y

luego para validar los datos de campo. Para ello, se utilizaron imágenes del satélite Sentinel-2A y el software SNAP (Sentinel Application Platform) de la Agencia Espacial Europea (ESA).

- Firmas en gabinete

Para la toma de muestras en gabinete, se generaron dos combinaciones de bandas: una en color real (RGB: b4, b3, b2) y otra en falso color infrarrojo (RGB: b8, b4, b3). El objetivo fue discriminar, mediante análisis visual, entre dos grupos de píxeles: vegetación con daño y vegetación sana. En el primer caso, se identificaron como vegetación con daño aquellos píxeles con una tonalidad rojiza oscura-amarillenta y sus vecinos con características similares (**Figura 9**). Para asegurar la exactitud de la selección de los píxeles con daño, se realizó una comparación con píxeles de vegetación vigorosa, que presentaban tonalidades de verde brillante (color real) o rojo brillante (falso color).

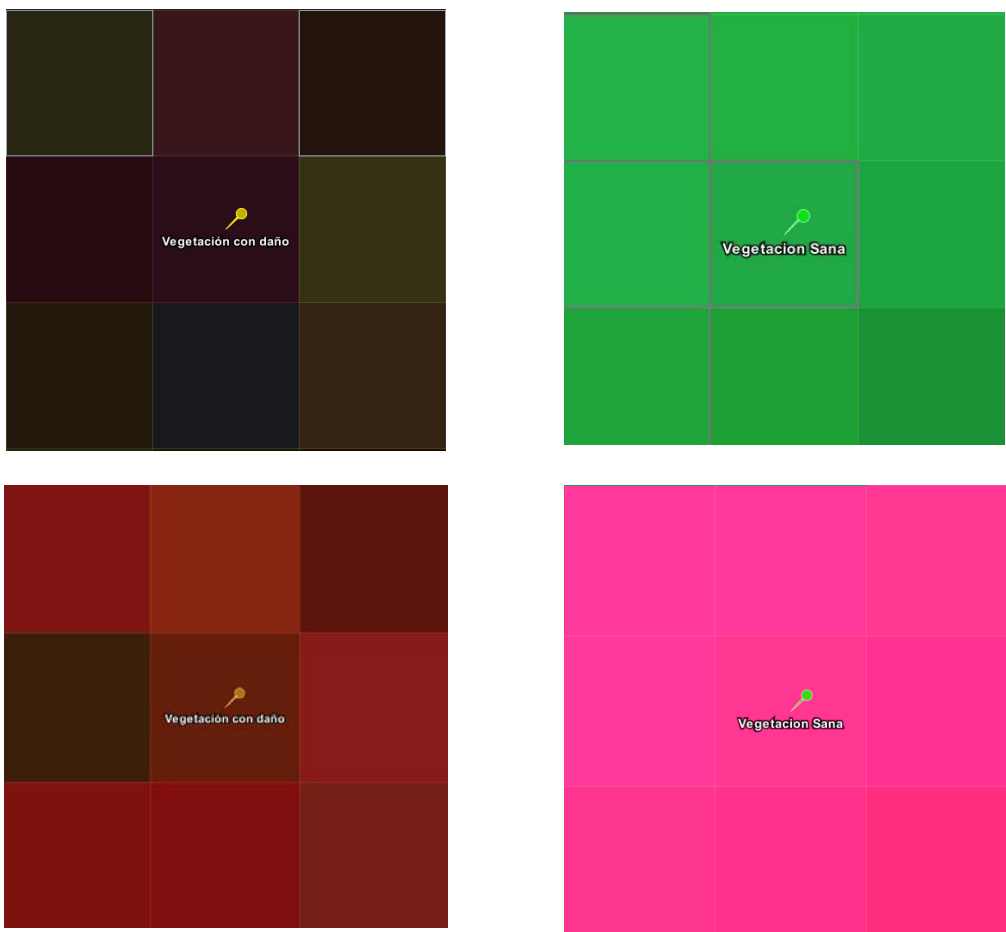


Figura 9. Píxeles seleccionados para discriminar vegetación con daño y vegetación vigorosa, en la primera fila se muestra en color real la diferencia entre sano y con daño, en el segundo grupo de imágenes se muestra lo mismo, pero en falso color.

Posteriormente, se observó el comportamiento de la firma espectral. Como muestra la **Figura 10**, la curva de reflectancia de la vegetación con daño es más plana en comparación con la de la vegetación vigorosa. Esto indica una menor respuesta espectral, característica de alteraciones en la vegetación.

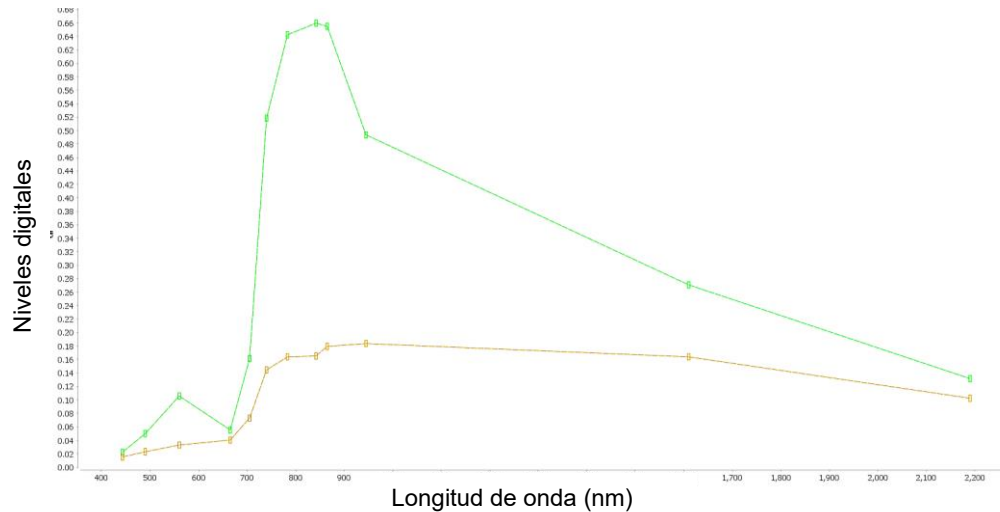


Figura 10. Comparación de firmas espectrales de vegetación con daño y vegetación sana.

En el caso de la vegetación sana en gabinete, se buscaron zonas en donde la vegetación fuera densa y las tonalidades de verde y rojo fueran lo más homogéneas posibles, al igual que sus vecinos (**Figura 11**). Sin embargo, en general el BCESC, presenta tonalidades verdes oscuro (color real) o rojo oscuro (falso color) y poco brillantes, esto puede ser indicio de que en general la vegetación del SC presenta algún tipo de afectación.

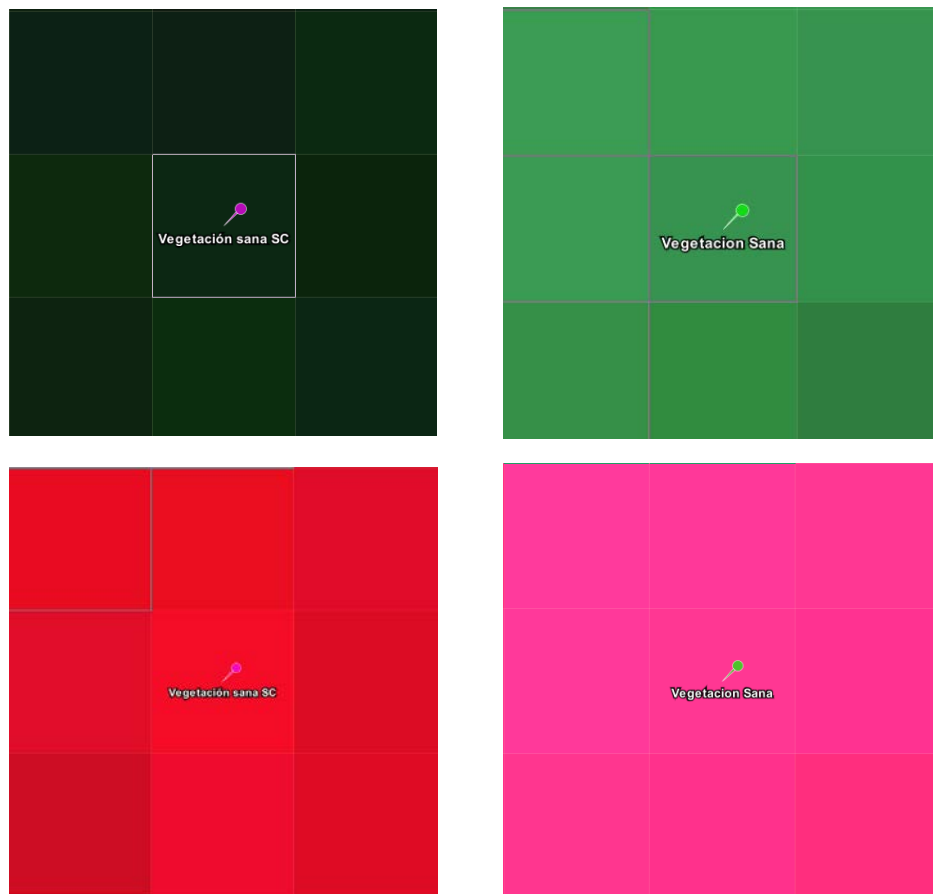


Figura 11. Píxeles seleccionados para discriminar vegetación sana del SC y vegetación vigorosa, en la primera fila se muestra en color real y en el segundo grupo de imágenes en falso color.

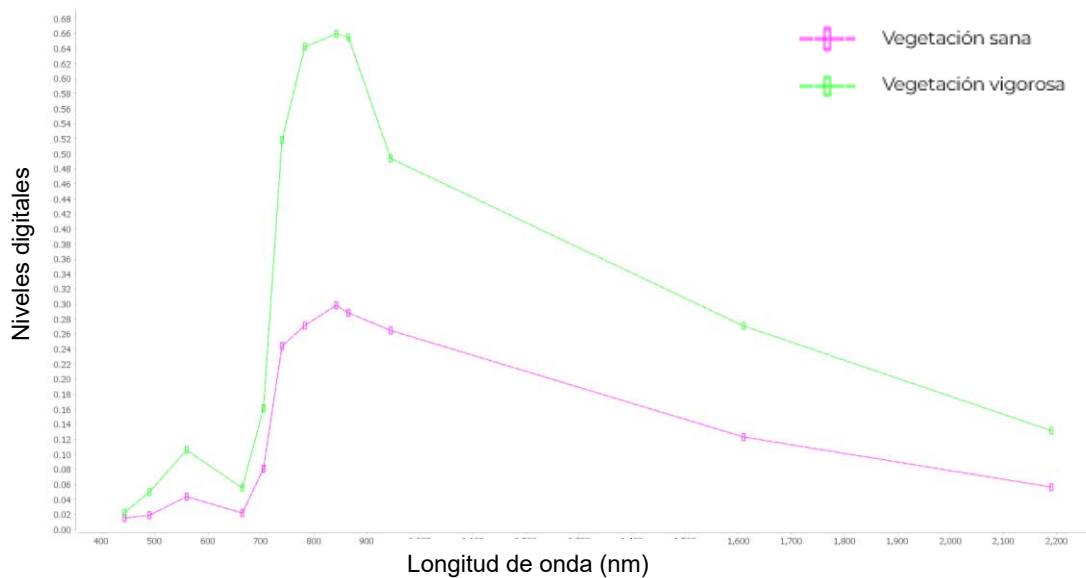


Figura 12. Firmas espectrales de vegetación sana del SC y vegetación vigorosa.

En la **figura 12**, se observa que la firma del bosque sano del SC, tiene una alta reflectancia en el infrarrojo, sin embargo, en comparación con la vegetación vigorosa presenta una caída importante, probable indicativo de estrés en la planta.

- Firmas de campo

El análisis de firmas espectrales de los sitios visitados en trabajo de campo se hizo utilizando las imágenes Sentinel en RGB color real (b4, b3, b2). Los píxeles seleccionados se generaron a partir de la ubicación de las coordenadas tomadas en los lugares de muestreo. En este caso, en campo, se consideró como vegetación con daño, lugares en donde los árboles presentaran tonalidades amarillentas-rojizas en sus hojas, dónde hubiera individuos caídos o muertos. Como vegetación sana, se contemplaron puntos en donde la cobertura de copa fuera cerrada, las tonalidades de las hojas verdes vigorosas, dónde hubiera renuevos y ramas jóvenes (**Figura 13,14**).



Figura 13. Selección de píxeles a partir de vegetación sana y con daño a partir de las coordenadas tomadas en campo y su comparativo con vegetación vigorosa.

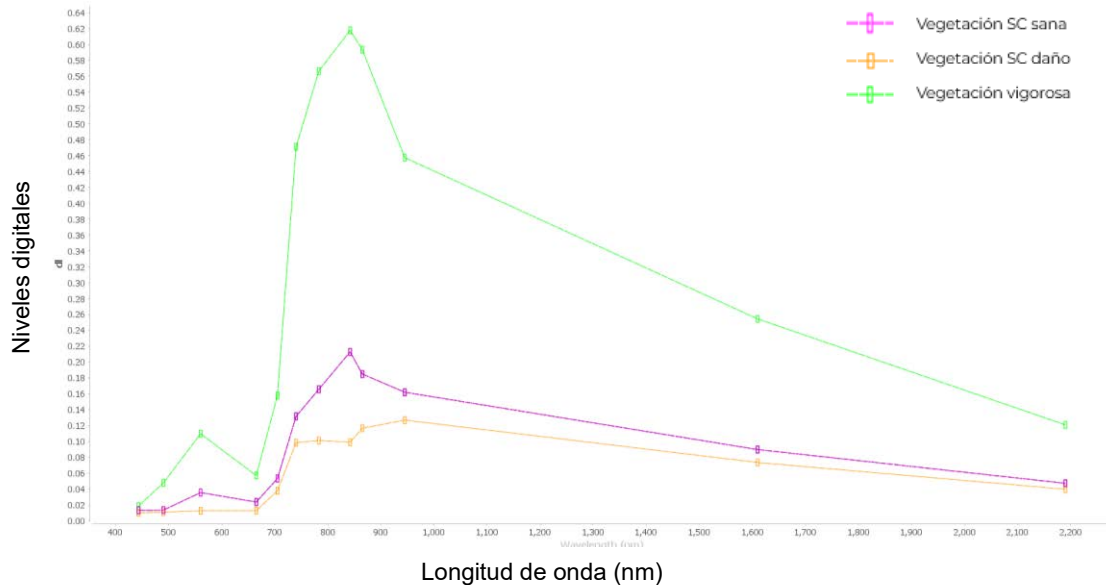


Figura 14. Firmas espectrales de vegetación sana y con daño en el SC y vegetación vigorosa.

Como resultado del análisis de firmas, se obtuvieron cuatro capas de información, dos de vegetación sana y dos de vegetación con daño en el SC. En el caso, los datos de gabinete se utilizaron para delimitar los umbrales de los índices de vegetación y en con las firmas de campo, se validaron los datos de los índices con el indicador final.

4. Trabajo de campo y validación

El trabajo de campo consistió en la visita a tres sitios dentro del área de interés: Desierto de los Leones, los Dinamos y el Parque Ejidal San Nicolás Totolapan (**Tabla 3**). Cada sitio fue seleccionado debido a su ubicación estratégica y su relevancia dentro del contexto de la temática de estudio. El objetivo principal del recorrido fue identificar áreas de vegetación con daño visible por O_3 y áreas de vegetación sana.

Para definir los sitios de muestreo, se consideraron criterios establecidos en estudios previos realizados en viveros en donde se ha expuesto a la vegetación a dosis controladas de O_3 (**Figura 15**), en donde se ha observado que la vegetación presenta signos de daño como cambio en la coloración a tonalidades rojizas (necrosis) en la parte superior de las agujas (Reyes, G., 2019), senescencia prematura (**Figura 4**); y aparición de manchas en las hojas (moteado) (SEDEMA, 2018).

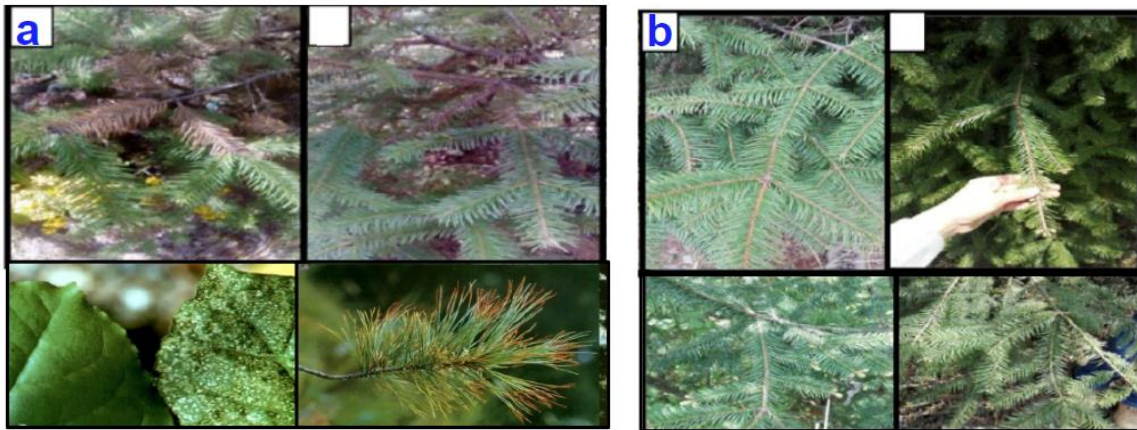


Figura 15. a) Síntomas de daño inducido por O₃. b) Ramas de vegetación sana. (Reyes, G., 2019 & SEDEMA, 2018)



Figura 16. Fotografías propias, tomando en cuenta los estudios previos como referencia. a) Síntomas de daño inducido por O₃. b) Ramas de vegetación sana.

Se comenzó el recorrido, haciendo observaciones de los individuos del sitio, comparando con la referencia de las características que presenta la vegetación de daños por O₃ y los que visiblemente se veían sanos. Cuando se identificaba un sitio de interés (**Figura 16**), se georreferenciaba el punto por medio aplicaciones de navegación satelital (Geo Tracker, Gaia GPS), obteniendo sus coordenadas y altitud (**Tabla 3**). En la Tabla 3, se presentan las coordenadas de los seis puntos muestreados de vegetación sana y con daño.

Tabla 3. Coordenadas de los sitios muestreados dentro del área de estudio.

Sitios	Categoría	Coordenadas (Latitud, Longitud)
Desierto de los Leones	Vegetación sana	19.302710640000004, -99.316794799999997
Desierto de los Leones	Vegetación con daño	19.310621730000001, -99.313989000000007
Los Dinamos	Vegetación sana	19.265219229999992, -99.295917490000008
Los Dinamos	Vegetación con daño	19.264829549999998, -99.296002280000010
San Nicolás Totolapan	Vegetación sana	19.249281520000007, -99.250775809999993
San Nicolás Totolapan	Vegetación con daño	19.252013219999991, -99.247787759999994

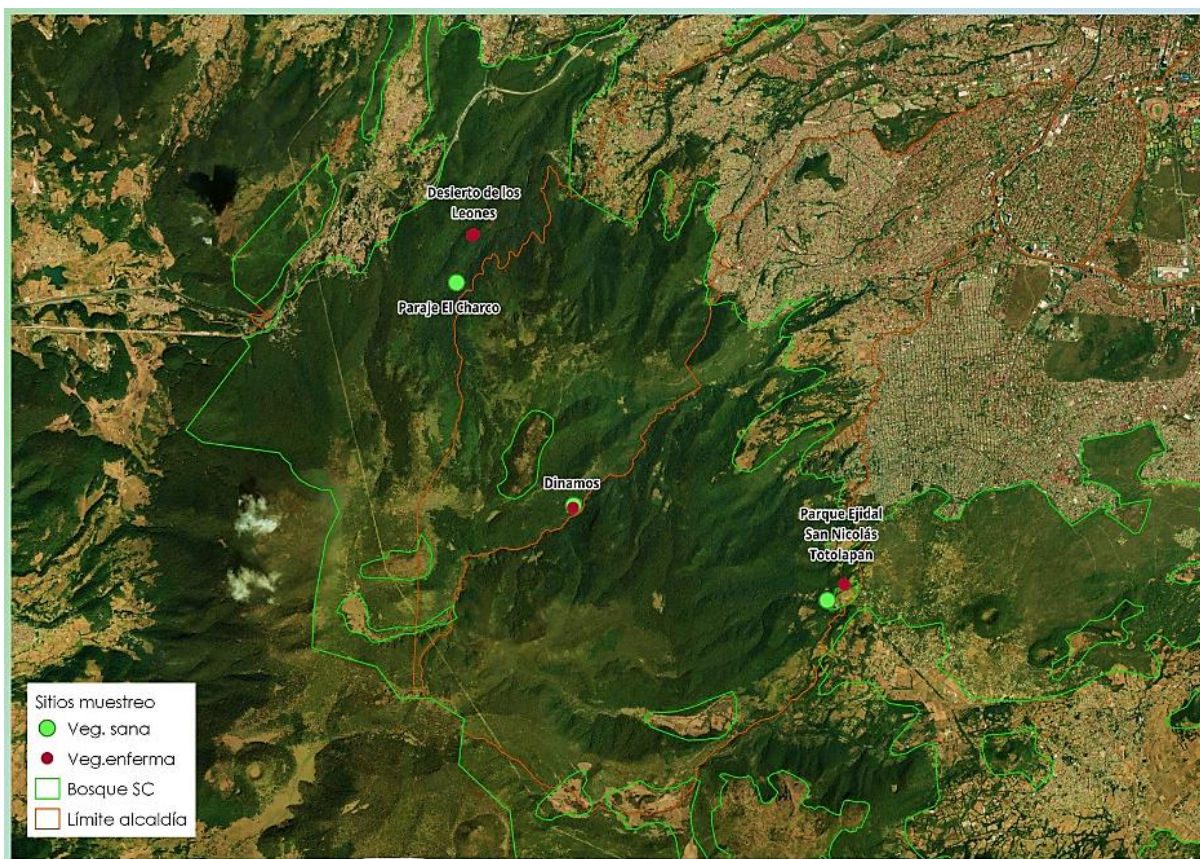


Figura 17. Localización de los sitios muestreados en el trabajo de campo.

En cada punto de muestreo, se delimitó un radio de 10 m con ayuda de un flexómetro para establecer el área de observación y simular la cobertura del pixel de la imagen que era de 10*10 metros. Posteriormente se procedió a contabilizar todos los árboles presentes dentro del área, tomando en cuenta el diámetro del tronco y estimando un porcentaje en la cobertura de la copa.

Los datos recolectados en este trabajo de campo proporcionaron una base sólida para la validación en los análisis posteriores.

5. Integración de datos atmosféricos

Para obtener una capa con información de las concentraciones de O₃ con la resolución espacial de las imágenes Sentinel, con la cual se pudiera asignar un valor de este contaminante a cada pixel, se realizó una interpolación de la siguiente manera:

Se descargaron insumos de las mediciones de concentraciones de O₃ de la página del SIMAT de la CDMX, la base de datos (BD) del año 2022, estaba conformada por concentraciones horarias de 34 estaciones de monitoreo (**Figura 18**).

date	id_station	id_parameter	valor	unit
31/12/2021 00:00	ACO	O3	NA	1
31/12/2021 00:00	AJM	O3	NA	1
31/12/2021 00:00	ATI	O3	20	1
31/12/2021 00:00	BJU	O3	1	1
31/12/2021 00:00	CAM	O3	2	1
31/12/2021 00:00	CCA	O3	3	1
31/12/2021 00:00	CHO	O3	30	1
31/12/2021 00:00	CUA	O3	24	1
31/12/2021 00:00	FAC	O3	19	1
31/12/2021 00:00	FAR	O3	1	1
31/12/2021 00:00	HGM	O3	NA	1
31/12/2021 00:00	INN	O3	41	1
31/12/2021 00:00	IZT	O3	2	1
31/12/2021 00:00	LLA	O3	1	1
31/12/2021 00:00	LPR	O3	1	1
31/12/2021 00:00	MER	O3	1	1
31/12/2021 00:00	MGH	O3	0	1
31/12/2021 00:00	MON	O3	NA	1
31/12/2021 00:00	MPA	O3	48	1
31/12/2021 00:00	NEZ	O3	1	1
31/12/2021 00:00	PED	O3	36	1
31/12/2021 00:00	SAG	O3	1	1

Figura 18. Captura de pantalla de la estructura de la BD descargada, de la página del SIMAT: La base descargada incluyó el último día del año 2021.

Debido a que para la interpolación se tendría que realizar una malla de 10x10 metros, como el tamaño del pixel de las imágenes Sentinel, el proceso era muy tardado y pesado computacionalmente hablando. Además, ya que solo se necesitaban los datos del polígono BCESC, se decidió elegir las estaciones cercanas a dicho polígono, las estaciones cercanas se eligieron de acuerdo con dos criterios: Que contarán con al menos 75% de los datos por mes (suficiencia mensual de información), en los meses de interés (marzo-mayo y octubre-diciembre). Que estas se encontraran exclusivamente dentro del área que abarca el polígono de BCESC o en su defecto a 5 km a la redonda (trazando un buffer) de los límites del polígono BCESC.

De esta forma, del total de 34 estaciones de monitoreo con medición continua de O₃ en la Zona Metropolitana de la CDMX, se seleccionaron 10 estaciones (**Tabla 4**).

Tabla 4. Estaciones de monitoreo seleccionadas para el análisis.

Abreviatura	Longitud	Latitud	Nombre	Dirección	Delegación
AJM	-99.207658	19.2721	Hospital del Ajusco Medio	Encinos No. 42. Col. Ampliación Miguel Hidalgo. 4a Secc.. Tlalpan. C.P. 14250	Tlalpan
AJU	-99.162459	19.154674	Ajusco	Km 36.5 Carretera Federal Mexico-Cuernavaca. Delegacion Tlalpan. Mexico D.F. C.P. 14500	Tlalpan
CCA	-99.1761	19.3262	Centro de Ciencias de la Atmosfera	Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n. Ciudad Universitaria. Coyoacan. C.P. 04510	Coyoacan
CUA	-99.291705	19.365313	Cuajimalpa	Monte Encino No. 14. Col. Jesus del Monte. Cuajimalpa de Morelos. C.P. 05260	Cuajimalpa de Morelos
INN	-99.38052	19.291968	Instituto de Investigaciones Nucleares	Carretera México-Toluca s/n. La Marquesa. Ocoyoacac. C.P. 52750	Ocoyoacac
MPA	-98.990189	19.1769	Milpa Alta	Prof. Raul Mejia Zuniga s/n. col. Santa Ana Tlacotencom Milpa Alta. C.P. 12900	Milpa Alta
PED	-99.204136	19.325146	Pedregal	Caniana No. 370. Col. Jardines del Pedregal. alvaro Obregon. C.P. 01900	Alvaro Obregon
SFE	-99.262865	19.357357	Santa Fe	Av. Carlos Lazo s/n. entre Tamaulipas y Sta. Fe. Col. Prados de la Montania. Cuajimalpa de Morelos. C.P. 05619	Cuajimalpa de Morelos
TAH	-99.010564	19.246459	Tlahuac	Escudo Nacional s/n. Col Nativitas. Xochimilco. C.P. 16790	Xochimilco
UAX	-99.103629	19.304441	UAM Xochimilco	Calz.del Hueso 1100. Col. Villa Quietud. Coyoacan. C.P. 04960	Coyoacan

El indicador con el que se realizó la interpolación fue el promedio total de los meses de las temporadas seca caliente (SC) y seca fría (SF), de las horas donde la concentración de ozono es alta (De acuerdo con el perfil horario del O₃, (**Figura 19**)). Para realizar esto se filtraron primero las 10 estaciones de la RAMA de la columna "id_station" de la BD, después se utilizó la columna date para cortar el mes y la hora en dos columnas separadas, por medio de las cuales se filtraron los meses 3 al 5 y 10 al 12, así como las horas 13 a 17 hora local. Después de esto se calculó el promedio por cada estación.

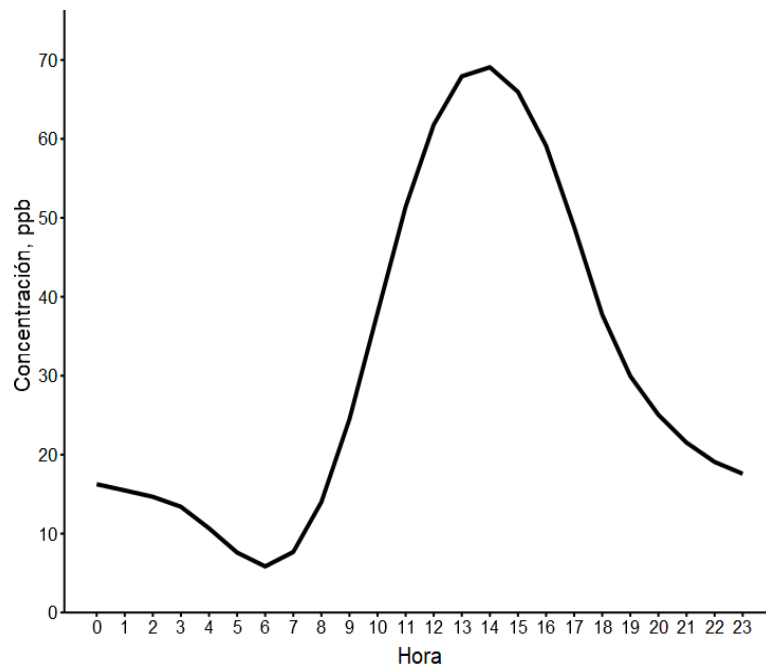


Figura 19. Perfil horario de las concentraciones de la RAMA del SIMAT que miden O_3 , calculado a partir de la BD horarios anual descargada de la página del SIMAT.

B. Análisis estadístico y validación

En esta sección, explicaremos a detalle las herramientas estadísticas que se aplicaron para analizar los datos previamente recopilados en nuestro estudio. El objetivo principal es comprender las relaciones, tendencias y patrones presentes en nuestra BD.

- Análisis Exploratorio de Datos (AED):

Se realizó un análisis exploratorio con los *shapefiles* que contenían los polígonos clasificados como “vegetación sana” y “vegetación no sana”, obtenidos en el punto 3, por medio del análisis de firmas espectrales.

Este análisis tuvo la finalidad de conocer la distribución y las características básicas de los valores de los píxeles que se encontraron dentro de los polígonos “sanos” y “no sanos”, para cada una de las imágenes y los 3 índices.

Para esto se calcularon los máximos, mínimos y promedios de los valores de los píxeles que caían dentro de los polígonos sanos y no sanos, para cada una de las imágenes, resultando

en dos CSV, uno con los estadísticos para los pixeles seleccionados como “sanos” y otro para los “no sanos” (Tabla 5 y Tabla 6).

Tabla 5. Máximos, mínimos, medias y desviación estándar por imagen, de los pixeles clasificados como “no sanos” del área del SC de la CDMX.

Fecha	Media_CLV	SD_CLV	Max_CLV	Min_CLV	Media_CLR	SD_CLR	Max_CLR	Min_CLR	Media_NDVI	SD_NDVI	Max_NDVI	Min_NDVI
20220302T1	0.8220536	0.2586013	1.2813954	0.3392857	0.8411751	0.3323872	1.4282179	0.2600807	0.2860343	0.0894427	0.4166065	0.1150758
20220312T1	0.7532299	0.2176092	1.1931982	0.3729181	0.7859966	0.2963771	1.3791208	0.2539682	0.2738059	0.0816086	0.4081301	0.1126761
20220401T1	0.8970744	0.2896317	1.3860431	0.3805668	0.9304956	0.3741016	1.5940275	0.2900379	0.3057809	0.0960527	0.4435212	0.126652
20220406T1	0.7475269	0.2232091	1.0803108	0.3644918	0.8075772	0.3102977	1.313669	0.2853717	0.2786958	0.0842804	0.3964394	0.1248688
20220516T1	1.0945078	0.2995539	1.5714285	0.5568106	1.2045388	0.4115241	1.9491525	0.448084	0.3650067	0.088522	0.4935622	0.1830346
20220526T1	1.0770669	0.294433	1.658107	0.5442536	1.212851	0.4111179	1.9217741	0.4760101	0.3669224	0.0864467	0.4900267	0.1922489
20221003T1	0.9790377	0.2052718	1.4476535	0.6812159	1.1328228	0.234941	1.6588235	0.8171862	0.3582626	0.0461677	0.4533762	0.2900718
20221013T1	0.9373918	0.1706716	1.3135376	0.6507093	1.0471486	0.2051071	1.4747267	0.6896552	0.3408589	0.0430482	0.4244152	0.2564103
20221102T1	1.0035591	0.2404368	1.5378268	0.5377698	1.0931973	0.2718769	1.8167939	0.5760368	0.3488242	0.0545011	0.476	0.2236136
20221207T1	0.8552841	0.2226647	1.5060565	0.5636364	0.9010072	0.2540777	1.7023411	0.5228332	0.305952	0.0551785	0.4598013	0.2072405
20221217T1	0.7698548	0.1969355	1.3395023	0.4526786	0.7950806	0.2242335	1.4335349	0.4777476	0.280337	0.0535208	0.4175099	0.1928152

Tabla 6. Máximos, mínimos, medias y desviación estándar por imagen, de los pixeles clasificados como “sanos” del área del SC de la CDMX.

Fecha	Media_CLV	SD_CLV	Max_CLV	Min_CLV	Media_CLR	SD_CLR	Max_CLR	Min_CLR	Media_NDVI	SD_NDVI	Max_NDVI	Min_NDVI
20220302T1	1.292945703	0.304845135	2.264546633	0.919484735	1.467093724	0.401956106	2.78134799	0.976146817	0.416346232	0.060199423	0.581707895	0.327990144
20220312T1	1.215442123	0.272756726	2.015527964	0.838375807	1.403405192	0.36538165	2.38799715	0.930601954	0.406095994	0.059608788	0.544211209	0.317546368
20220401T1	1.426362465	0.385042191	2.262717724	0.90152669	1.67162468	0.534934426	2.87816453	1	0.44469731	0.074378623	0.590009749	0.333333343
20220406T1	1.206242206	0.370399731	1.977216721	0.71330595	1.42485922	0.474135398	2.359972239	0.816678643	0.405424686	0.07827889	0.541281462	0.289943844
20220516T1	1.508769137	0.352031625	2.334941387	0.951369882	1.83765196	0.449581581	2.802325487	1.070082903	0.472065767	0.059185492	0.583535135	0.34855178
20220526T1	1.474581252	0.329291456	2.424767017	0.959256649	1.82948242	0.438305428	3.056782246	1.095565796	0.471356331	0.057084863	0.604491591	0.353914559
20221003T1	1.179605748	0.183278898	1.704418182	0.910404682	1.42948933	0.262694266	2.115412235	1.054389954	0.413565156	0.043392507	0.514021933	0.345204771
20221013T1	1.151773711	0.190796302	1.595146894	0.86477983	1.357135431	0.252667434	1.944927454	0.97996664	0.401025147	0.043736276	0.493019849	0.328851551
20221102T1	1.190736536	0.215426008	1.786929846	0.785102725	1.390661567	0.297893511	2.292319775	0.91988945	0.405894637	0.049505251	0.534051478	0.315042585
20221207T1	1.133179951	0.243658373	1.826147318	0.734657049	1.28882015	0.319933974	2.268255234	0.755251169	0.386583356	0.055803558	0.531424463	0.274113357
20221217T1	1.023479027	0.232405326	1.738433123	0.662127614	1.149403977	0.287657171	2.074099779	0.705676913	0.360052198	0.055052488	0.509094	0.260813415

Para tener un panorama visual de los estadísticos se realizaron gráficos de caja de cada estadístico, clasificando los grupos (cajas) por cada uno de los índices y separando vegetación “sana” de “no sana”.

Los gráficos de caja mostraron que para todos los indicadores de forma visual había una diferencia entre el grupo de vegetación “sana” y “no sana” comparando la vegetación

clasificada por índice. Sin embargo, se decidió trabajar con las medias por las características generales de esta medida de tendencia central, como el representar el valor típico de una variable y nos permite conocer la tendencia general de los datos. Por otro lado, al analizar los mínimos y máximos, el no tener valores extremos y tener una muestra pequeña, sugiere que las medias no se ven afectadas por algún valor demasiado alto o bajo.

- **Pruebas Estadísticas Aplicadas:**

Se aplicaron 3 pruebas estadísticas clave:

Test de Wilcoxon: Se utilizó esta prueba no paramétrica para comparar las muestras de las medias entre los grupos “sano” y “no sano”, debido a que el número de muestras (11) era demasiado pequeño para asumir la normalidad de los datos. Considerando una comparación entre temporadas y tipo de vegetación y posteriormente solo pruebas entre los grupos de vegetación “sana” y “no sana”. El objetivo fue determinar si existían diferencias significativas entre los grupos por temporadas CS - FS y posteriormente entre los grupos “sana” y “no sana”.

Principalmente se buscó comprobar que al ser diferentes los grupos de vegetación, se pudiera tomar un umbral de vegetación “no sana” para posteriormente filtrar los píxeles debajo del umbral, asignar un valor de O_3 provenientes de la interpolación y comprobar la autocorrelación espacial.

Índice I de Moran: Para evaluar la autocorrelación espacial, el índice I de Moran fue importante en la segunda etapa de este proyecto. Esta prueba estadística, nos permitió detectar patrones de agrupamiento o dispersión en nuestros datos geoespaciales. Esta prueba se aplicó sobre la capa obtenida a partir de aplicar un filtro, de acuerdo con nuestra clasificación o umbral de vegetación “no sana”.

Se realizó el filtro de píxeles por debajo del umbral para cada índice, posteriormente se aplicó un promedio de las 11 imágenes seleccionadas para cada índice y se realizó una unión espacial con los datos (capa) de O_3 provenientes de la interpolación.

Prueba de Proporciones: Empleamos esta prueba para evaluar si había diferencias significativas en las proporciones de los índices entre dos grupos o categorías. Esta prueba

se utiliza para comparar proporciones muestrales con proporciones poblacionales conocidas o hipotéticas.

El grupo muestral a evaluar fue el número de píxeles por arriba del umbral “sano”, dentro de un radio o matriz de 3x3, trazado a partir de los puntos de muestreo clasificados de manera visual como “sanos”.

El grupo poblacional fue el total de píxeles en la matriz o radio trazados alrededor de los puntos de muestreo clasificados como “sanos”. La prueba se aplicó únicamente para el ReCI y el GCI.

La prueba de proporciones nos permitió validar las imágenes con los índices calculados a partir de los datos de campo y los sitios de muestreo.

C. Desarrollo del indicador de daño potencial por O₃.

Un indicador se define como una medida objetiva que proporciona una representación cuantitativa o cualitativa de una situación, tendencia o cambio (Martín et al., 2017).

En este proyecto se planteó poder conformar un indicador con base en los índices espectrales que mostraran una mejor correlación con el ozono. Para poder conformar un indicador combinado a partir de los índices se propuso normalizarlos, por dos razones:

- Asegura que todos los datos estén en la misma escala, lo que facilita la comparación y el análisis (Gonzalez & Woods, 2018).
- Dado que menor valor en cualquiera de los tres índices seleccionados se puede interpretar como cambios o mayor daño en la vegetación, la normalización fue una herramienta para no solo convertir los valores a una misma escala sino invertir los valores de tal forma que un menor valor del índice significa mayor daño potencial.

D. Implementación de la página web

La página web es uno de los insumos entregables del proyecto. El diseño es una interfaz intuitiva, amigable y fácil de manipular para cualquier usuario interesado en conocer el daño potencial por O₃ en los bosques de coníferas y encinos del Suelo Conservación del sur de la CDMX. El visor se elaboró en Ubuntu sistema distribuido por Linux, con un código desarrollado en el software Visual Studio Code. La programación se llevó a cabo utilizando HTML y CSS para la estructura y estilo del sitio web. Además, se empleó JavaScript para la integración, gestión y carga de mapas, y Leaflet.js para la manipulación y funcionalidades interactivas de los mapas.

La página web consta de varias secciones principales, cada una con funcionalidades específicas:

- **Geovisor:** Esta sección presenta los mapas interactivos donde los usuarios pueden cargar capas correspondientes a los índices calculados (NDVI, ReCI, GCI) y el mapa del indicador de daño por O₃. También incluye opciones de filtrado para elegir entre las temporadas cálida-seca y fría-seca.
- **Acerca del proyecto:** En esta sección se describe detalladamente el proyecto, incluyendo un resumen de la problemática, justificación, objetivos, marco teórico, metodología y resultados obtenidos, complementados con diagramas y gráficos.
- **Índices e indicadores:** Aquí se explicarán los índices de vegetación utilizados en el proyecto de investigación (NDVI, ReCI y GCI), y la justificación de su selección. Posteriormente se describe el proceso del cálculo del indicador de daño potencial por O₃, donde se integraron datos atmosféricos y espectrales.
- **Galería:** Se muestran las fotografías del trabajo de campo, evidenciando el daño por O₃. Las fotos se organizaron de acuerdo con los sitios visitados (Desierto de los Leones, Los Dinamos y San Nicolás Totolapan). Cada foto incluye una descripción.
- **Contacto:** Se proporciona información de contacto del equipo de investigación para consultas adicionales.

La implementación de la página web fue esencial dentro de la metodología de este proyecto, ya que permite tanto a los expertos como interesados interactuar con los datos y facilita la comprensión del impacto del ozono en la vegetación del Suelo de Conservación del sur de la CDMX.

VI. RESULTADOS

1. Índices espectrales de vegetación

A continuación, se ilustran los resultados del proceso de cálculo de los índices ReCI, GCI y NDVI. Así como su posterior corte con la capa BCESC (**Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25**).

Las imágenes están representadas con el índice calculado y su fecha representativa que abarcan tanto la época cálida-seca como la fría-seca del año 2022. Estas fechas son las siguientes:

ÌNDICE_20220302T1: 2 de marzo de 2022
ÌNDICE_20220312T1: 12 de marzo de 2022
ÌNDICE_20220401T1: 1 de abril de 2022
ÌNDICE_20220406T1: 6 de abril de 2022
ÌNDICE_20220516T1: 16 de mayo de 2022
ÌNDICE_20220526T1: 26 de mayo de 2022
ÌNDICE_20221003T1: 3 de octubre de 2022
ÌNDICE_20221013T1: 13 de octubre de 2022
ÌNDICE_20221102T1: 2 de noviembre de 2022
ÌNDICE_20221207T1: 7 de diciembre de 2022
ÌNDICE_20221217T1: 17 de diciembre de 2022

En las Figuras 24 y 25, muestran la distribución espacial de los valores de los índices (ReCI, GCI y NDVI) dentro del polígono de BCESC. Se observa que los valores de los índices varían a lo largo del año, ya que refleja los cambios estacionales en la cobertura vegetal. Durante los meses de marzo a mayo, correspondientes a la época cálida-seca, se aprecia una tendencia a valores de los índices relativamente bajos, lo cual se refleja en tonalidades más claras en las imágenes. Este comportamiento podría estar asociado a la exposición de la vegetación a condiciones de sequía, ya que en estos meses las lluvias son escasas en la CDMX. Es posible que la vegetación esté experimentando un tipo de estrés que se ve reflejado en los valores de los índices. No obstante, en las imágenes de mayo, se aprecia un ligero incremento en los valores, posiblemente indicando el inicio de lluvias, lo que sugiere una leve recuperación en la actividad fotosintética de la vegetación.

En contraste, durante la época fría-seca (octubre a diciembre), los valores de los índices muestran un ligero aumento, especialmente en octubre, lo que podría indicar una recuperación temporal de la vegetación, debido a que las temperaturas se han moderado y la acumulación de humedad en el suelo. Sin embargo, en diciembre, los valores de los índices tienden a disminuir, debido a las bajas temperaturas.

La vegetación está sujeta a variaciones estacionales que afectan su vigor y salud, debido a factores de estrés ambiental.

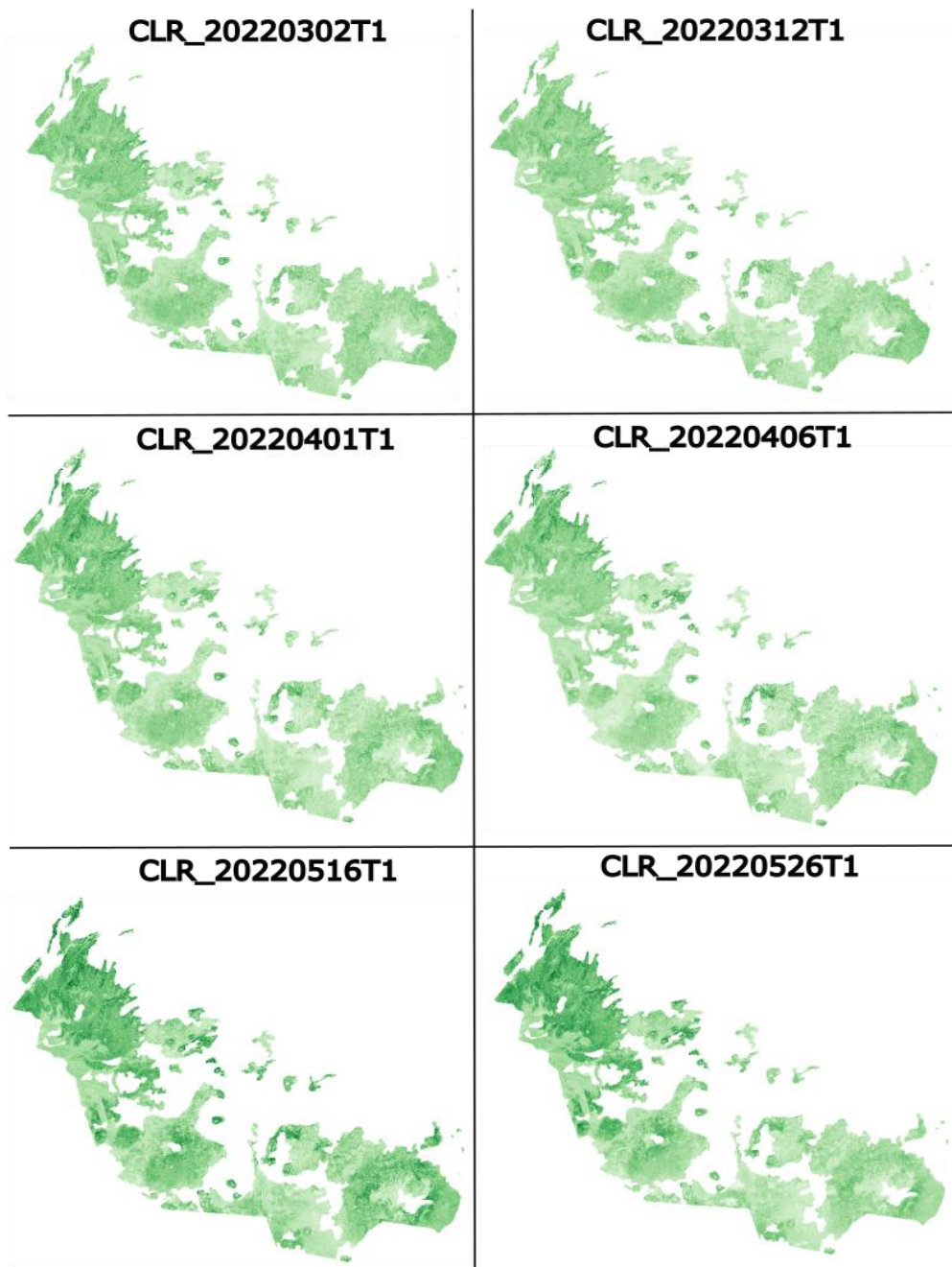


Figura 20. Parte uno de las imágenes de los ráster con el índice ReCI calculado en los meses de la temporada SC y SF del 2022.

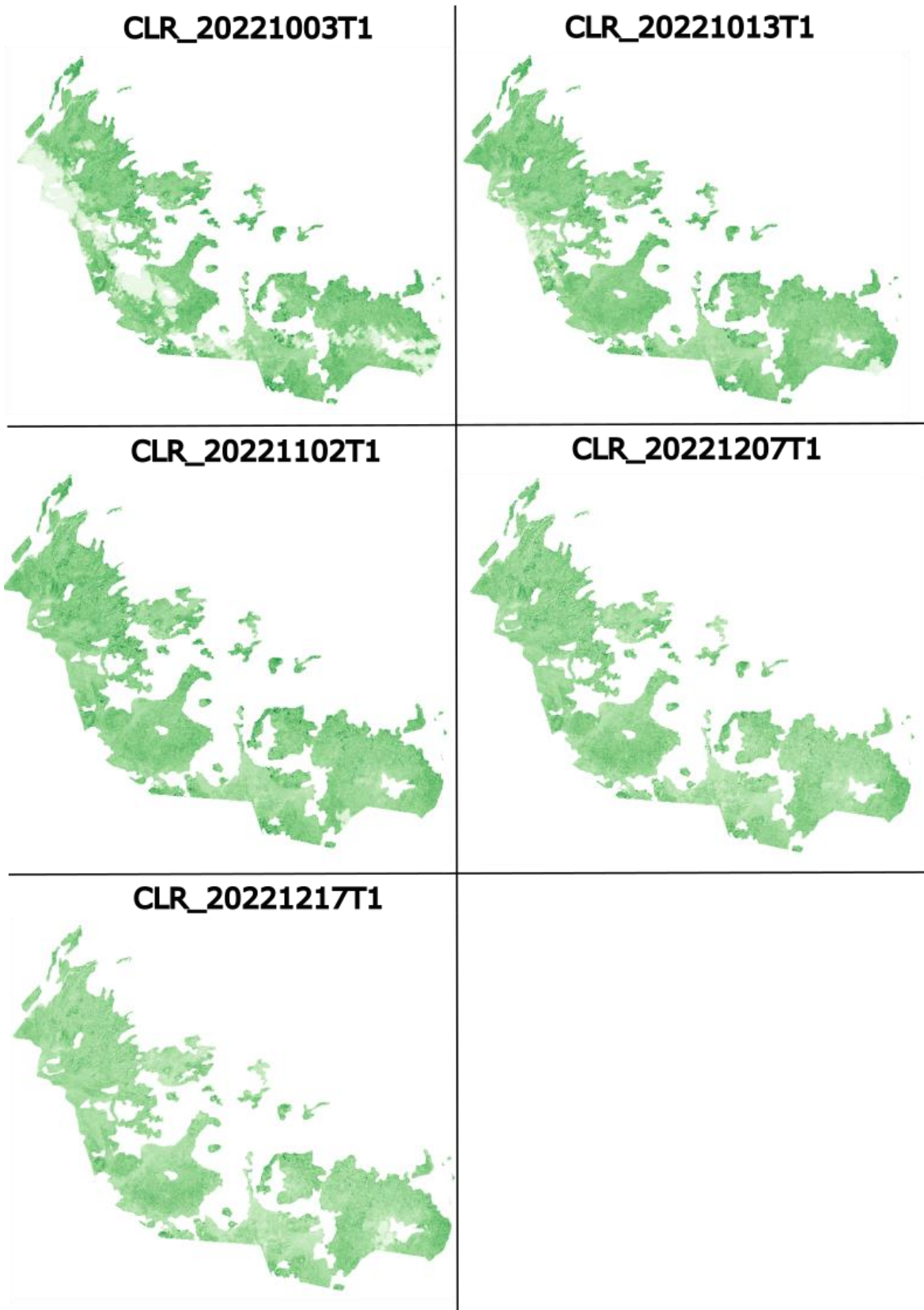


Figura 21. Parte dos de las imágenes de los raster con el índice ReCI calculado en los meses de la temporada SC y SF del 2022.

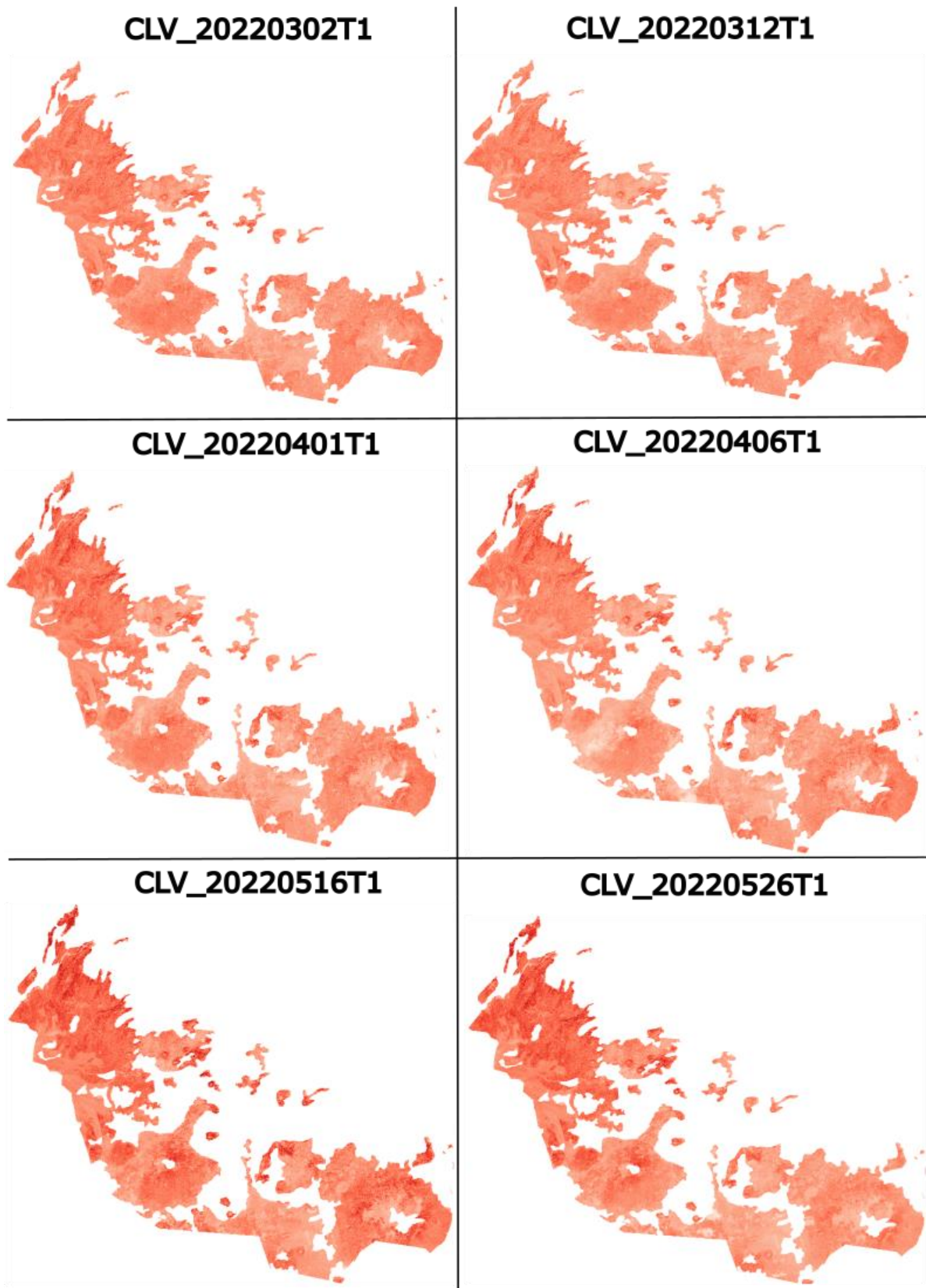


Figura 22. Parte uno de las imágenes de los raster con el índice GCI calculado en los meses de la temporada SC y SF del 2022.

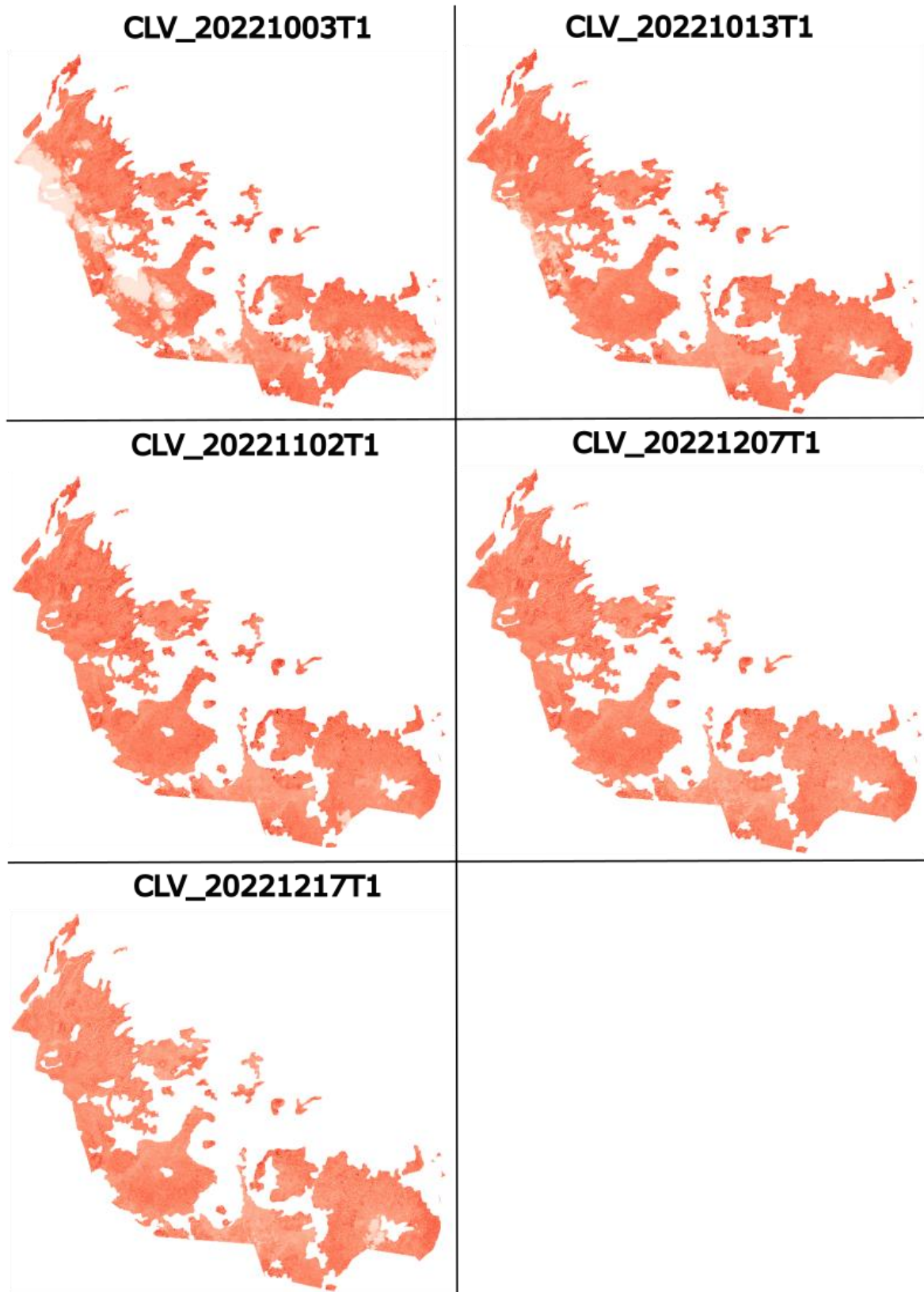


Figura 23. Parte dos de las imágenes de los raster con el índice GCI calculado en los meses de la temporada SC y SF del 2022.

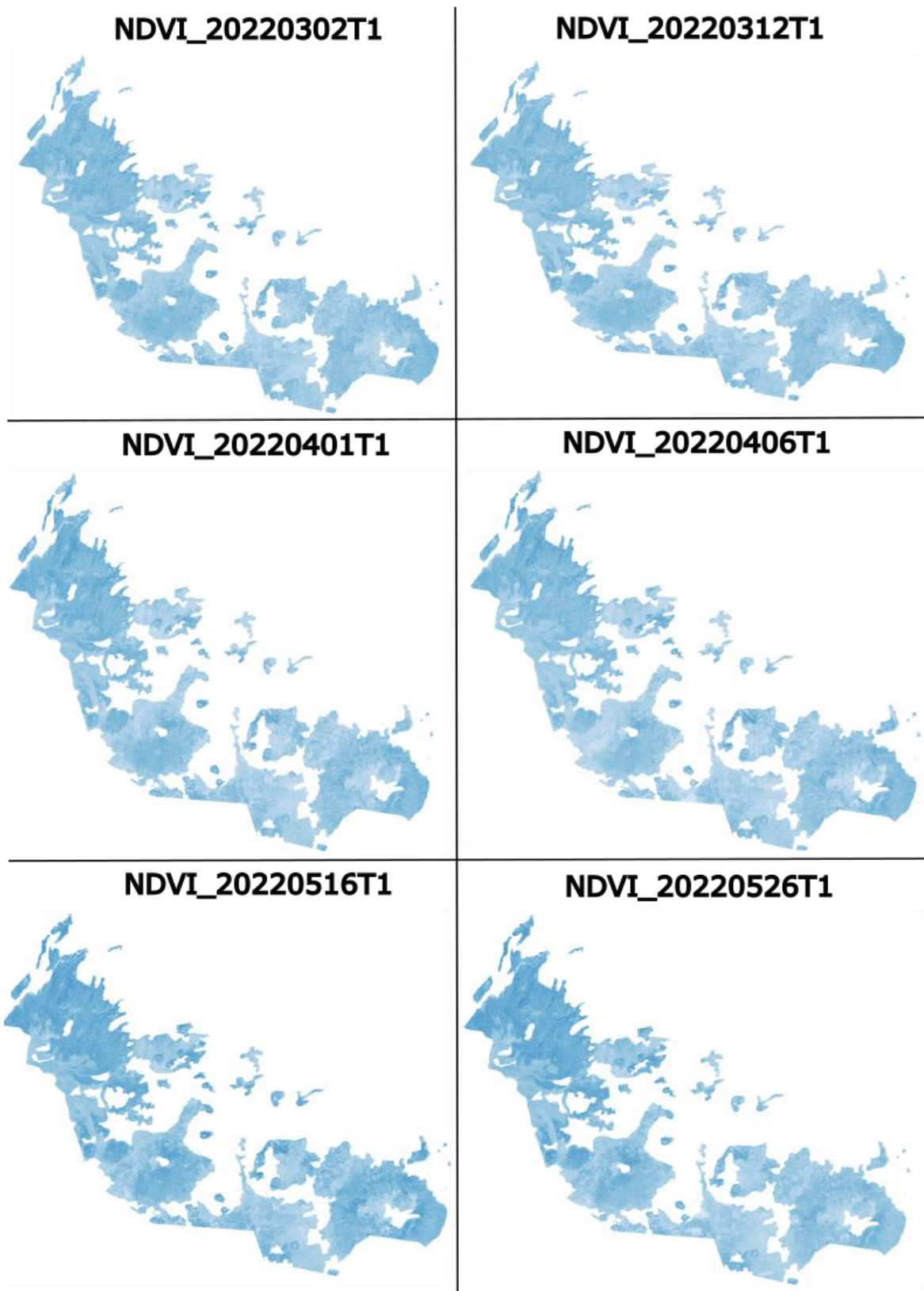


Figura 24. Parte uno de las imágenes de los raster con el índice NDVI calculado en los meses de la temporada SC y SF del 2022.

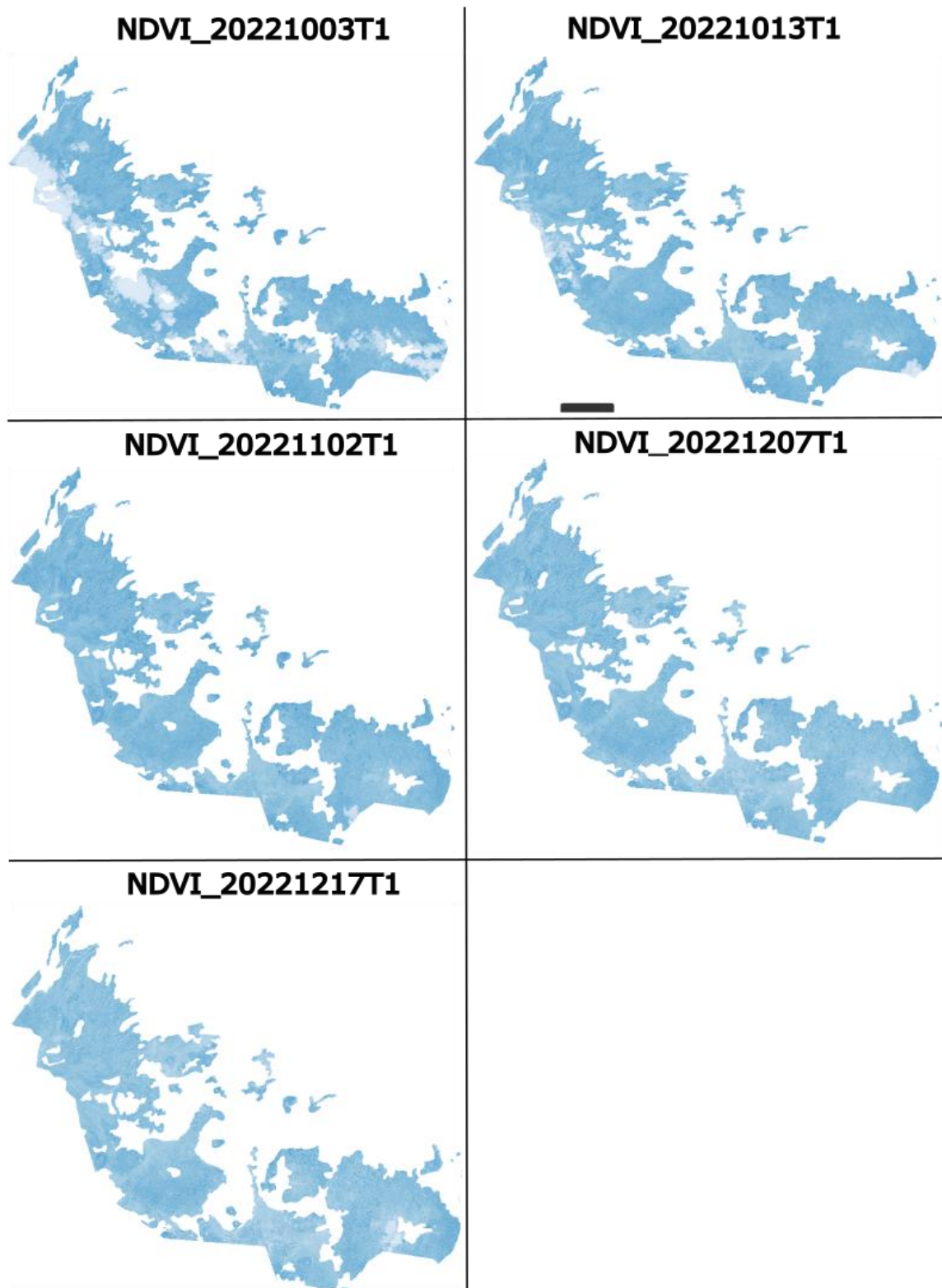
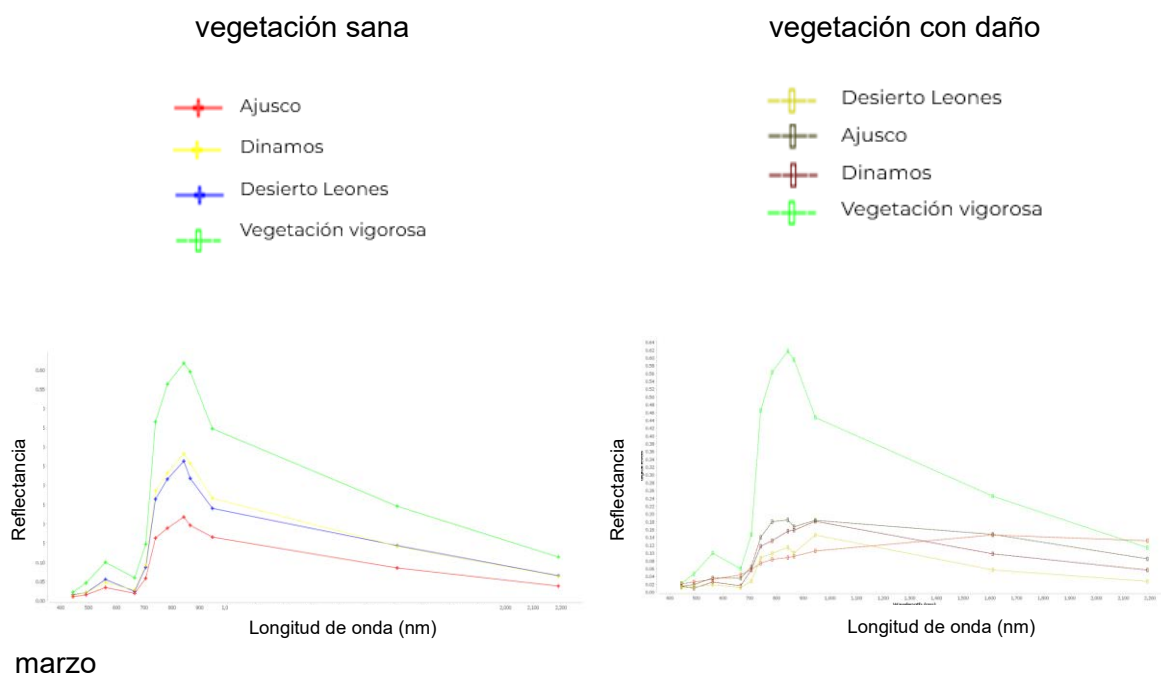


Figura 25. Parte dos de las imágenes de los raster con el índice NDVI calculado en los meses de la temporada SC y SF del 2022.

2. Firmas espectrales

Tomando como base el comportamiento espectral de la firma de la vegetación vigorosa, se observa que en general en las dos temporadas seleccionadas (seca-caliente, seca-fría), la respuesta del bosque de coníferas y encinos es similar entre las vegetaciones con daño, en donde las curvas son planas en el infrarrojo cercano, con valores distantes a la firma de vegetación vigorosa (**Figura 26 y 27**). En el caso de la vegetación sana, se observa en la **figura 26**, que las curvas de reflectancia en los meses de marzo a mayo presentan un pico significativo en la región de infrarrojo y en el verde, alcanzando los valores máximos en el mes de abril, pero en la **Figura 27**, correspondiente a la temporada seca-fría, se observa una caída en la reflectancia, presentando valores mínimos en diciembre.

Temporada seca-caliente (datos de gabinete)



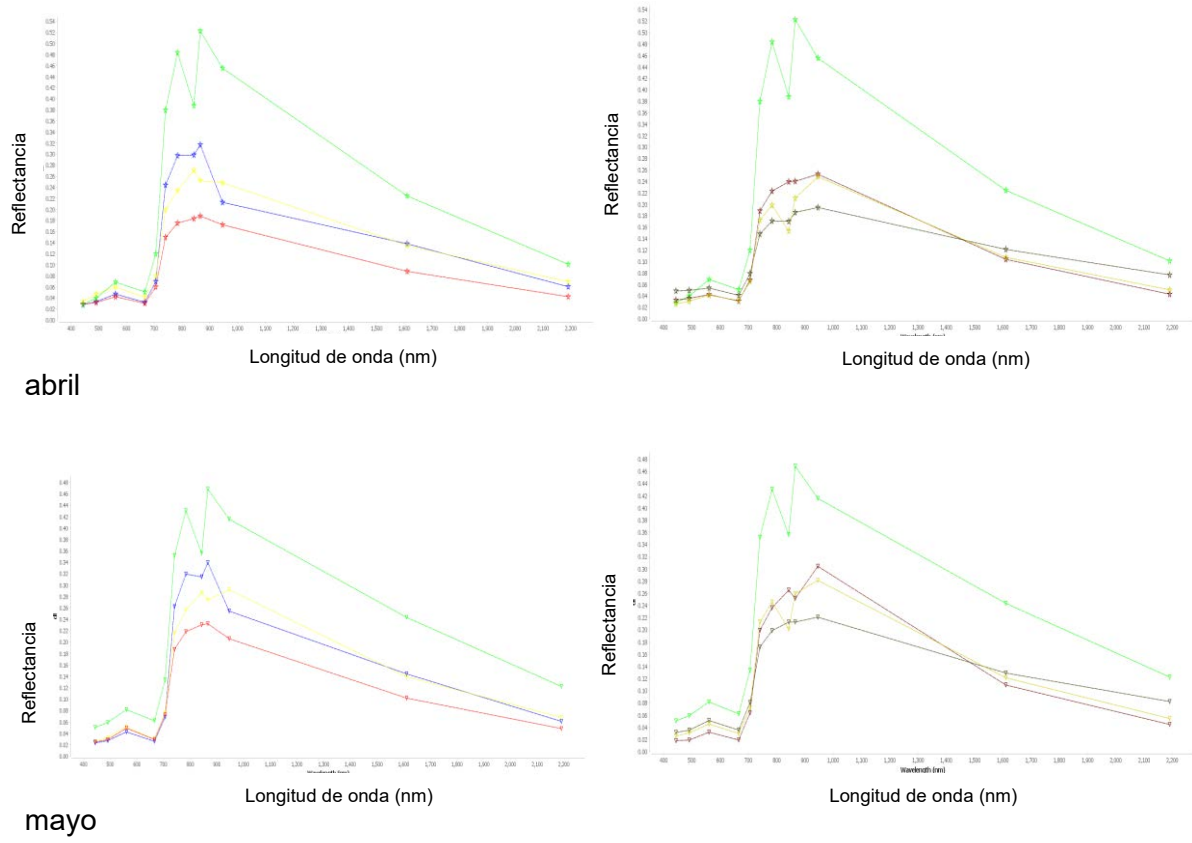
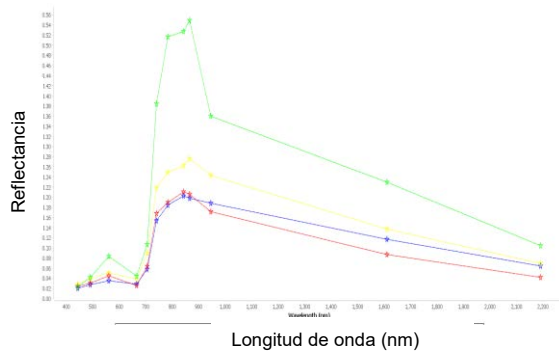


Figura 26. Firmas espectrales de vegetación sana y con daño de la temporada seca-caliente, con datos de gabinete

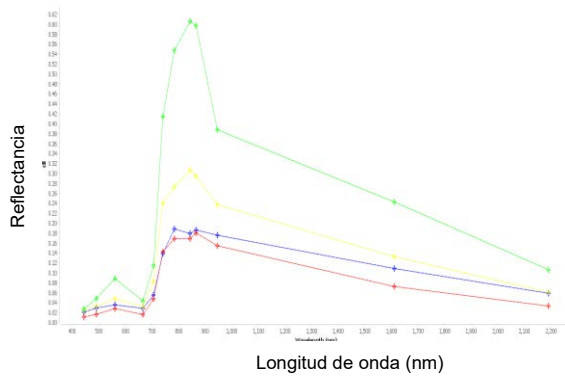
Temporada seca-fría (datos de gabinete)

vegetación sana

- + Ajusco
- + Dinamos
- + Desierto Leones
- + Vegetación vigorosa



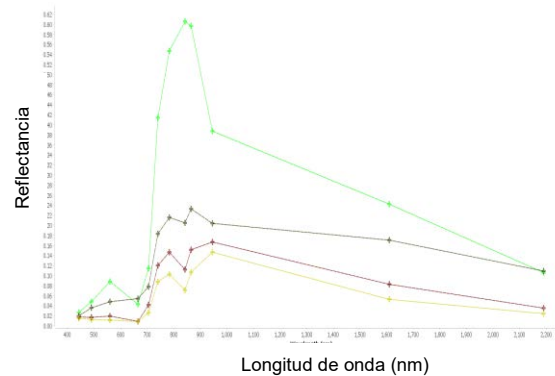
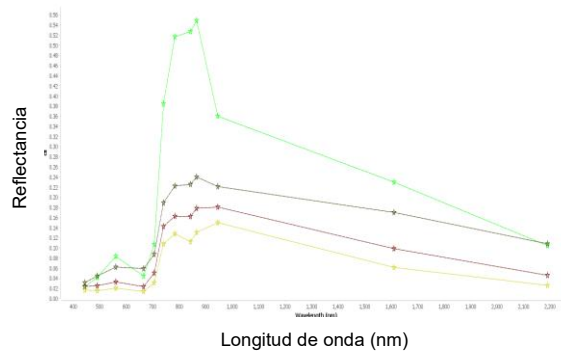
octubre

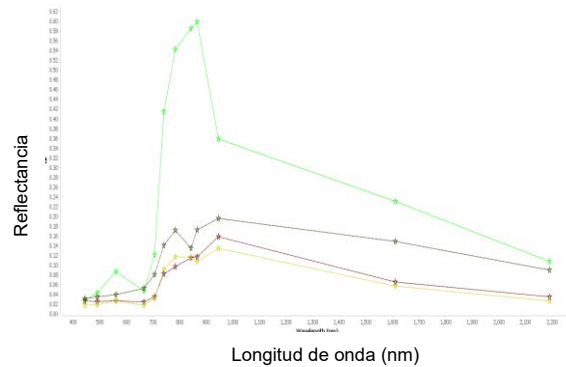
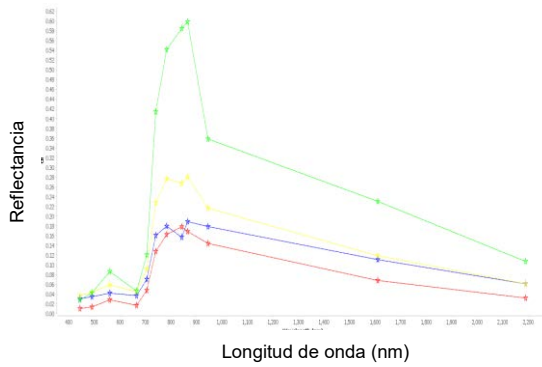


noviembre

vegetación con daño

- + Desierto Leones
- + Ajusco
- + Dinamos
- + Vegetación vigorosa





diciembre

Figura 27. Firmas espectrales de vegetación sana y con daño de la temporada seca-fría, con datos de gabinete

La respuesta espectral de los datos de campo muestra un comportamiento similar tanto en la vegetación sana como en la afectada por daño en ambas temporadas (cálida-seca y fría-seca). En ambos casos, las curvas presentan una baja reflectancia en los canales del infrarrojo y del verde. El sitio de muestreo que presentó una reflectancia mayor fue el Parque Ejidal de San Nicolás Totolapan, en donde la vegetación que prevalecía eran coníferas en específico pinos. Los Dinamos, presentó resultados interesantes, puesto que al ser uno de los pulmones más grandes de la CDMX.

Temporada seca-caliente (datos de campo)

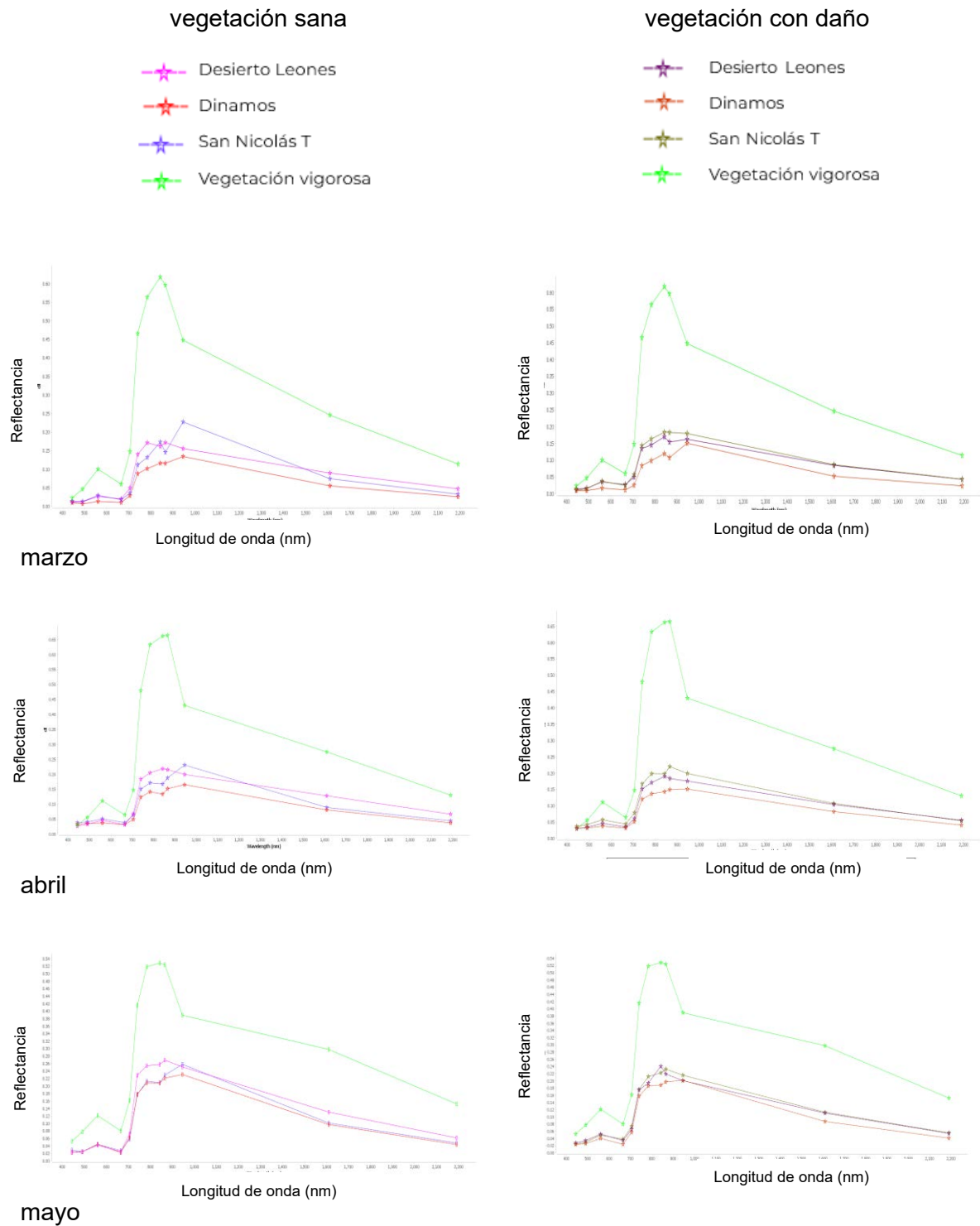
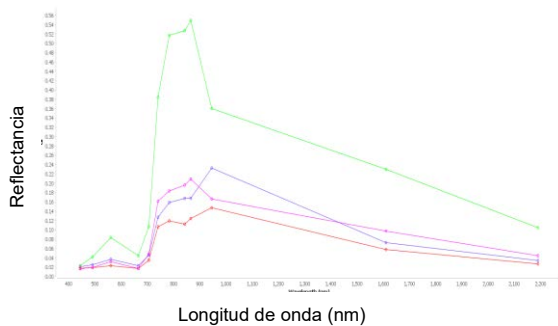


Figura 28. Firmas espectrales de vegetación sana y con daño de la temporada seca-caliente, con datos de campo

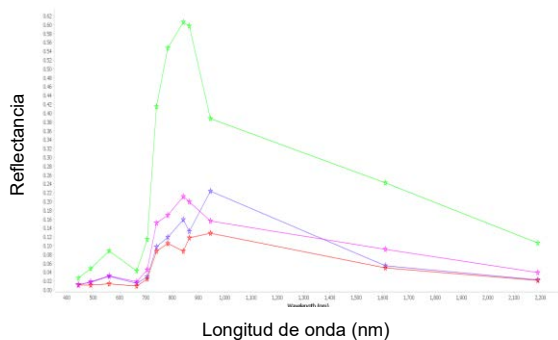
Temporada fría-seca (datos de campo)

vegetación sana

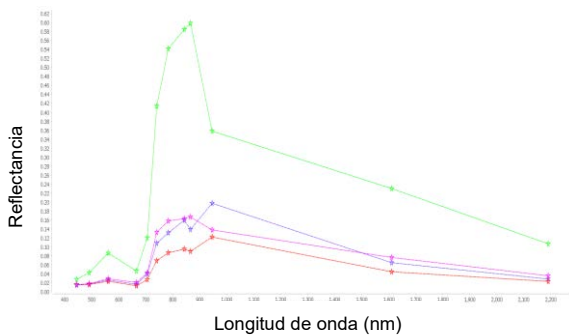
- ★ Desierto Leones
- ★ Dinamos
- ★ San Nicolás T
- ★ Vegetación vigorosa



octubre



noviembre



diciembre

vegetación con daño

- ★ Desierto Leones
- ★ Dinamos
- ★ San Nicolás T
- ★ Vegetación vigorosa

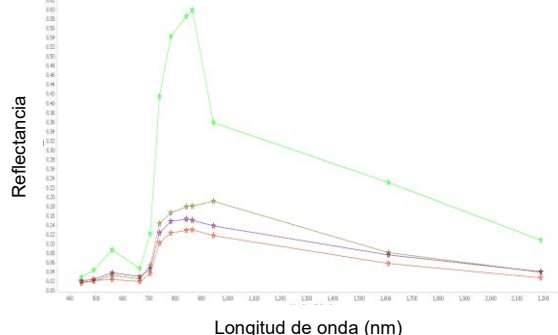
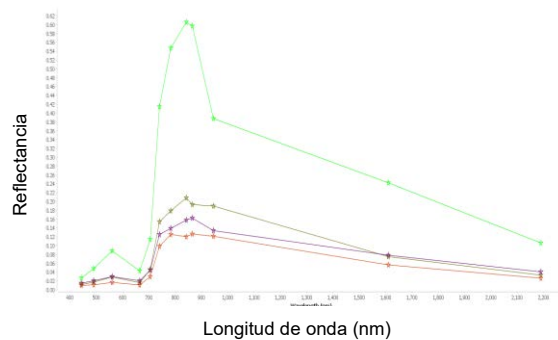
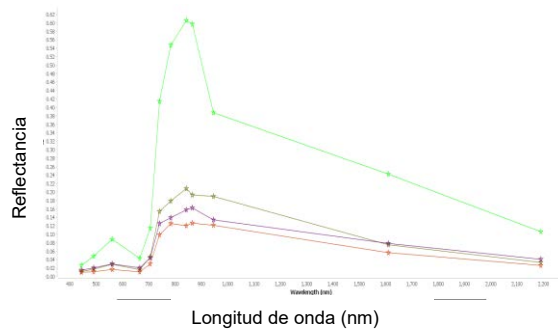


Figura 29. Firmas espectrales de vegetación sana y con daño de la temporada seca-fría, con datos de campo

Los resultados de este análisis, permitió definir los umbrales de vegetación “no sana”. Esto se plantea debido a que si bien, en el ReCI y el GCI, los valores más bajos indican vegetación más estresada, se consideró necesario verificar o validar con otro tipo de análisis. Para ello, utilizando las firmas espectrales y la inspección visual se seleccionaron polígonos donde la vegetación parece estar más estresada y menos estresada. A estos polígonos que se utilizaron para cortar y analizar los valores de las imágenes con los índices calculados se les llamó polígonos de umbral de vegetación sana (PUVS) y polígonos de umbral de vegetación no sana (PUNS).

3. Análisis estadísticos

Al graficar para explorar de manera visual la distribución de las medias para cada uno de los índices y así poder distinguir entre los grupos de vegetación “sana” y “no sana”, se apreció que existe una clara diferencia entre este último grupo, cabe señalar que estos grupos se seleccionaron con ayuda de las firmas espectrales, provienen de los cortes y selección de píxeles con los shapefiles PUVS y PUNS (**sección A, punto 3 de la metodología**).

Este patrón es consistente por temporadas, es decir, en el gráfico de cajas donde se compara “vegetación sana” y “no sana”, durante la temporada SC se observa una diferencia entre las medianas y la distribución general de los datos, comparando entre tipo de vegetación. Lo mismo ocurre cuando se observa la gráfica de la temporada SF. Para los tres índices (**Figura 30, Figura 31**).

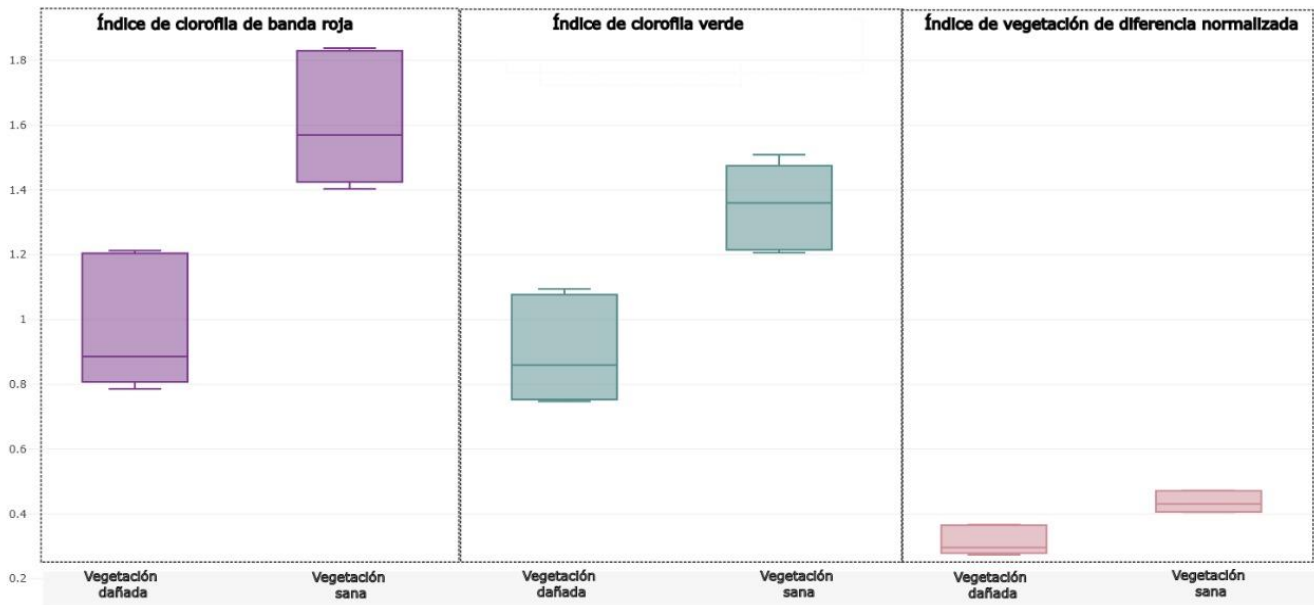


Figura 30. Gráfico de caja de las medias de los pixeles seleccionados y clasificados como “vegetación sana” y “vegetación no sana” por medio del análisis de firmas. Para cada índice (ReCI, GCI y NDVI) se hace el comparativo entre “vegetación no sana” y “vegetación sana”. Temporada SC.

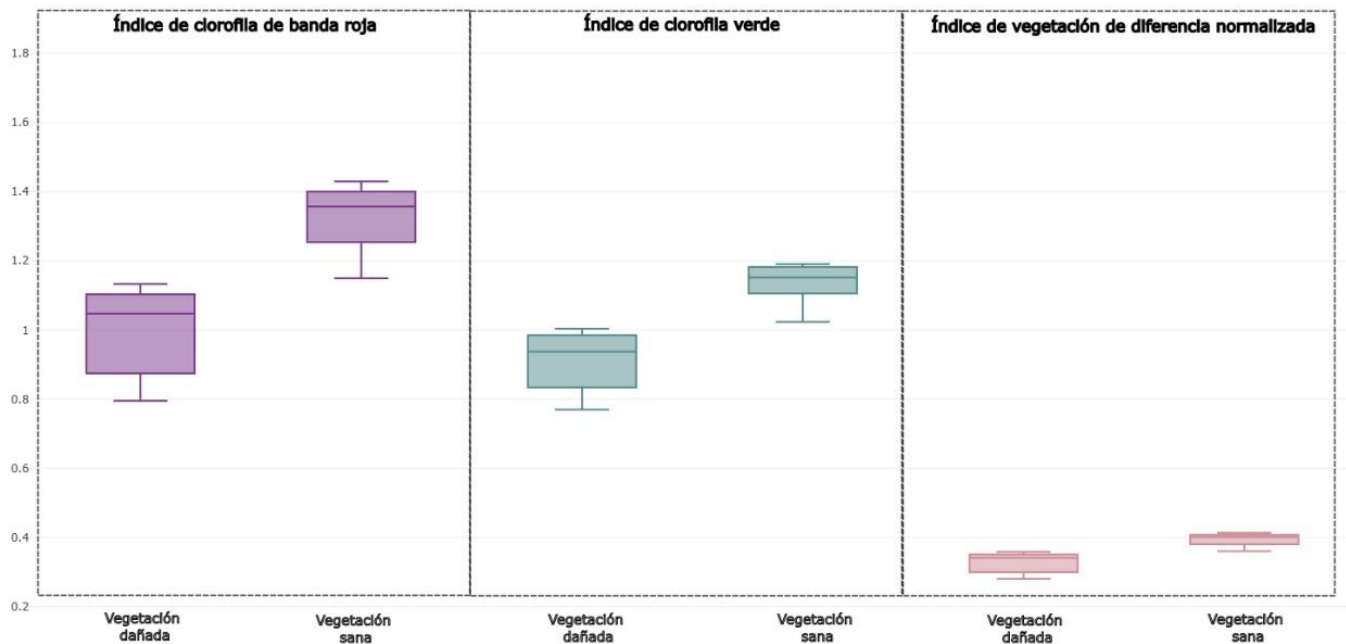


Figura 31. Gráfico de caja de las medias de los pixeles seleccionados y clasificados como “vegetación sana” y “vegetación no sana” por medio del análisis de firmas. Para cada índice (ReCI, GCI y NDVI) se hace el comparativo entre “vegetación no sana” y “vegetación sana”. Temporada SF.

Test de Wilcoxon (Prueba U de Mann-Whitney):

El primer test de Wilcoxon que se aplicó para conocer si los grupos de datos de las medias entre cada uno de los índices y categorización de la vegetación (“sana” y “no sana”), difieren entre sí, la prueba arrojó los siguientes resultados:

a)

índice	p_valor
CLV_	0.004329
CLR_	0.01731602
NDVI	0.03030303

b)

índice	p_valor
CLV_	0.79220779
CLR_	0.93073593
NDVI	0.66233766

Figura 32. Resultados de la prueba de Wilcoxon. a) Entre temporada seca fría y seca caliente para cada índice, solo vegetación sana. b) Entre temporada seca fría y seca caliente para cada índice, solo vegetación dañada.

Con un nivel de significancia del 5%, en la vegetación sana, no existe suficiente evidencia para señalar que para el ReCI (CLR) y NDVI, existe una diferencia significativa entre los grupos (**Figura 32 - a**). Entre la vegetación dañada, de acuerdo con los valores p-value, de igual forma, no se tiene suficiente evidencia para afirmar diferencias significativas en las medianas (**Figura 32 - b**). Tomando en cuenta las siguientes hipótesis:

- **Hipótesis nula (H0):** Las medianas de ambos grupos son iguales.
- **Hipótesis alternativa (H1):** Las medianas de ambos grupos son diferentes.

En ambos casos se acepta la hipótesis nula. En este caso, se esperaba que pudiera haber alguna diferencia entre temporadas CS y FS, sin embargo, la evidencia señaló lo contrario.

Por otro lado, debido al resultado anterior, se decidió trabajar con todos los valores e las imágenes sin diferenciar entre temporada. A continuación, se revisó de forma visual y estadística si se puede diferenciar entre el grupo “sano” y “no sano”.

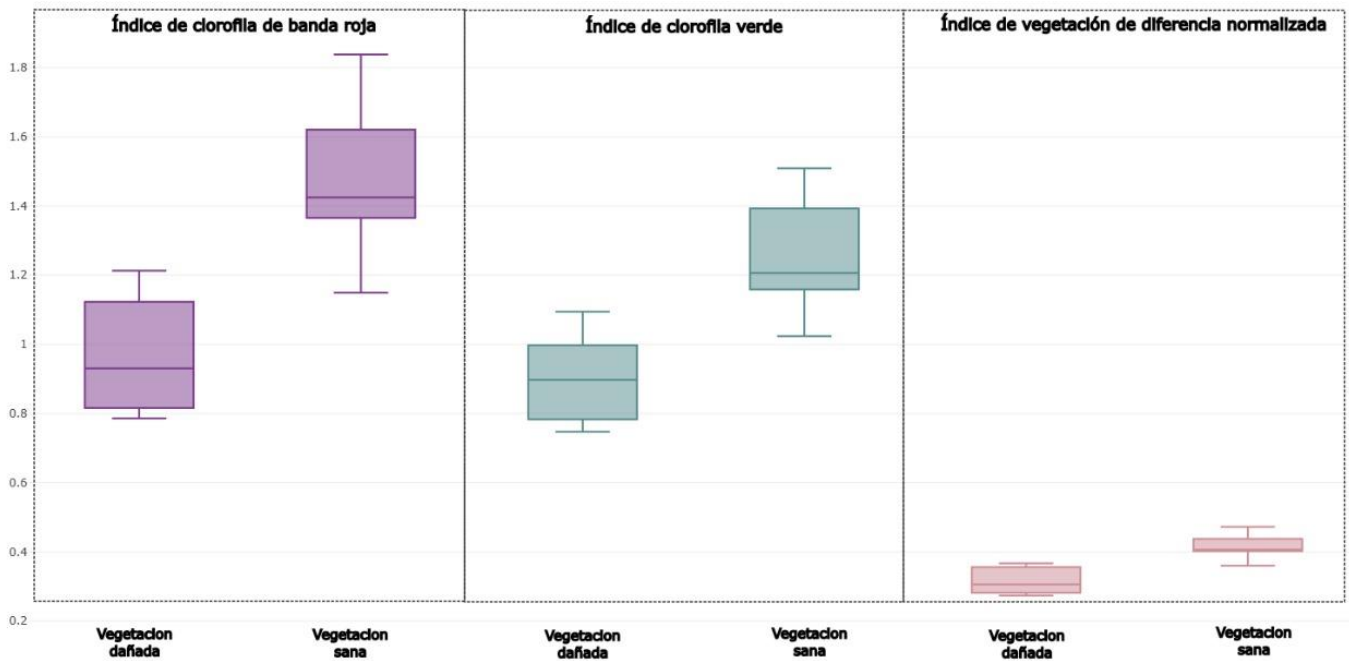


Figura 33. Gráfico de caja de las medias de los pixeles seleccionados y clasificados como “vegetación sana” y “vegetación no sana” por medio del análisis de firmas. Para cada índice (ReCI, GCI y NDVI) se hace el comparativo entre “vegetación no sana” y “vegetación sana”. Sin distinción entre temporada.

De forma visual, es posible distinguir que se puede diferenciar entre ambos grupos de vegetación “sana” y “no sana”. Esto se comprueba de forma estadística con la prueba de Wilcoxon, entre tipo de vegetación, se rechaza la hipótesis nula de que las medianas entre los dos conjuntos de datos son iguales, es decir estadísticamente existe una diferencia entre estos grupos de datos, cuando se analiza para cada índice de forma individual, pero sin distinguir entre temporada (Figura 33 y 34).

índice	p_valor
CLV_	0.000011341
CLR_	0.000011341
NDVI	0.000011341

Figura 34. Resultados de la prueba de Wilcoxon entre vegetación “sana” y “no sana”.

Este resultado es favorable para poder proponer un umbral, de acuerdo con el grupo “no sano”. Es así como, de acuerdo con la distribución de los valores que se puede observar en

la **Figura 33**, se decidió tomar el tercer cuartil como umbral para diferenciar a la vegetación “no sana” de la “sana”, en el SC de la CDMX.

Estos valores de los terceros cuartiles o valores umbral para cada índice fueron:

NDVI = 0.3059

ReCI = 0.6812

GCI = 0.9304

Índice I de Moran:

ReCI:

Los resultados de la prueba de autocorrelación espacial de Morán (Índice de Morán), mostraron una autocorrelación espacial positiva para el ReCI y GCI. Sin embargo, esta autocorrelación espacial es débil, debido a que el resultado es más cercano a cero (0.018, **Figura 35**).

Al realizar la prueba de significancia estadística, el p-valor con 999 permutaciones tuvo un valor de 0.001000 (**Figura 36**), el p-valor bajo (cercano a cero) sugiere que la autocorrelación espacial observada no es el resultado del azar. Dado que el p-valor es muy pequeño, se rechaza la hipótesis nula de que no hay autocorrelación espacial, y se puede decir que hay evidencia significativa de autocorrelación espacial en los datos (O_3 comparado con ReCI).

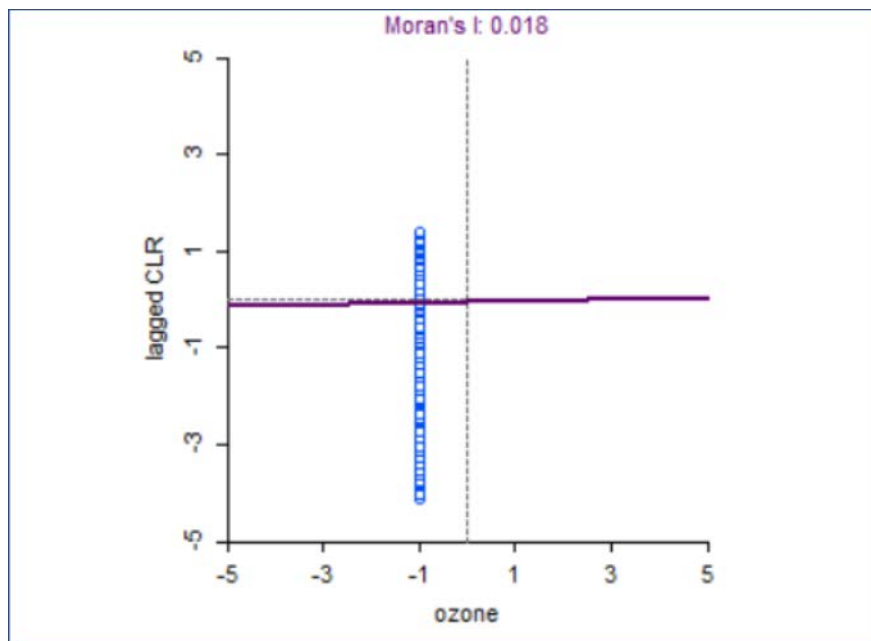
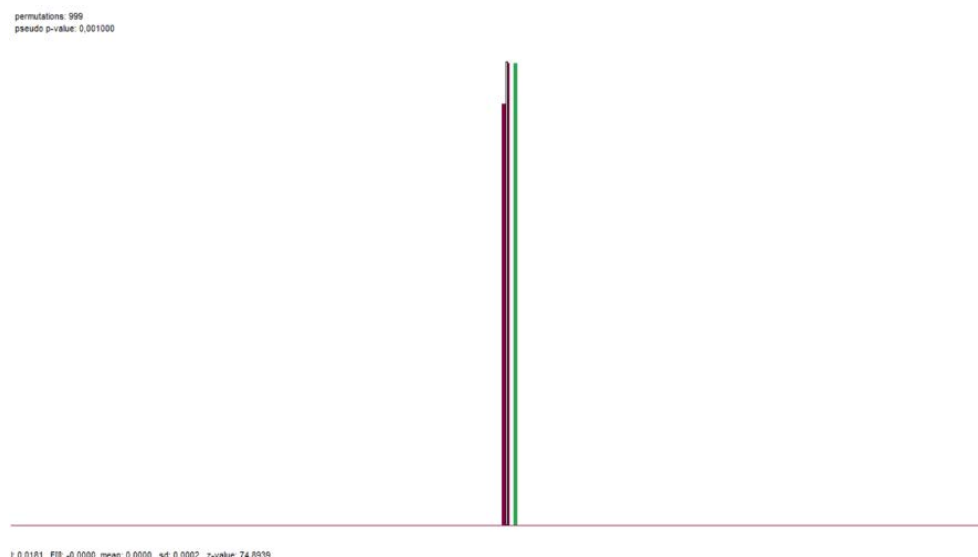


Figura 35. Diagrama de dispersión de Morán del ReCI.

Figura 36. Prueba de pseudosignificancia, I de Morán Global con 999 permutaciones. ReCI.



GCI:

Los resultados de la prueba de autocorrelación espacial de Morán (Índice de Morán), para el O₃ y GCI mostraron un valor positivo lo cual indica autocorrelación positiva. Sin embargo, tal como sucede entre el O₃ y el ReCI, esta autocorrelación espacial es débil, debido a que el resultado es más cercano a cero (0.018, **Figura 37**).

Al realizar la prueba de significancia estadística, el p-valor con 999 permutaciones tuvo un valor de 0.001000 (**Figura 38**), el p-valor bajo (cercano a cero) sugiere que la autocorrelación espacial observada no es el resultado del azar. Dado que el p-valor es muy pequeño, se rechaza la hipótesis nula de que no hay autocorrelación espacial, y se puede decir que hay evidencia significativa de autocorrelación espacial en los datos (O₃ comparado con GCI). Adicionalmente, el z valor alto refuerza que la autocorrelación observada no es aleatoria y es estadísticamente significativa.

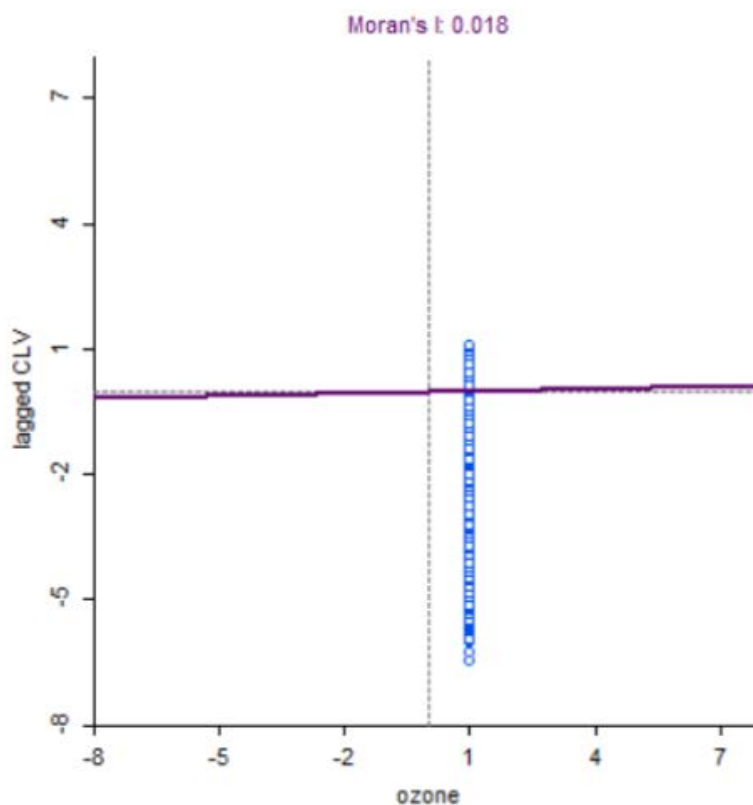


Figura 37. Diagrama de dispersión de Morán del GCI.

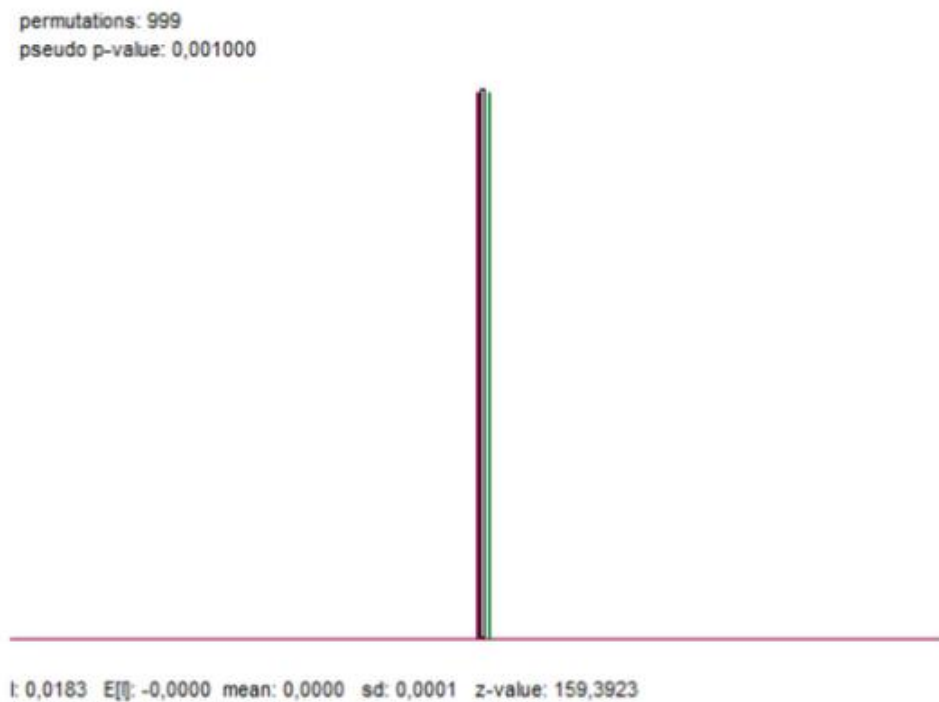


Figura 38. Prueba de pseudosignificancia, I de Morán Global con 999 permutaciones. GCI.

LISA (Local Indicators of Spatial Association):

GCI:

En el mapa, los clusters representan áreas geográficas con características similares en términos de las variables que estás evaluando (O_3 y GCI). En este sentido, bajo el contexto de las variables, los cluster bajo - alto que prevalecen en el mapa resultante, nos podrían indicar que en estas áreas tienen valores bajos de una variable (O_3) pero altos de la otra (GCI). También se aprecian, aunque en menor cantidad, clusters bajo - bajo. Estas áreas tienen valores bajos tanto para el O_3 como para el GCI. Son coldspots de baja concentración (**Figura 39**).

En el mapa de significancias predominan los colores verde oscuro y verde (significancias de 0.001, 0.01 respectivamente), en menor cantidad se observan valores de significancias de 0.05 en color verde claro. Estas áreas muestran que existe una gran significancia estadística en cuanto a los clusters que se mostraron en el mapa de clusters, es decir que nos indican que es probable que los patrones observados no sean resultado del azar (**Figura 40**).

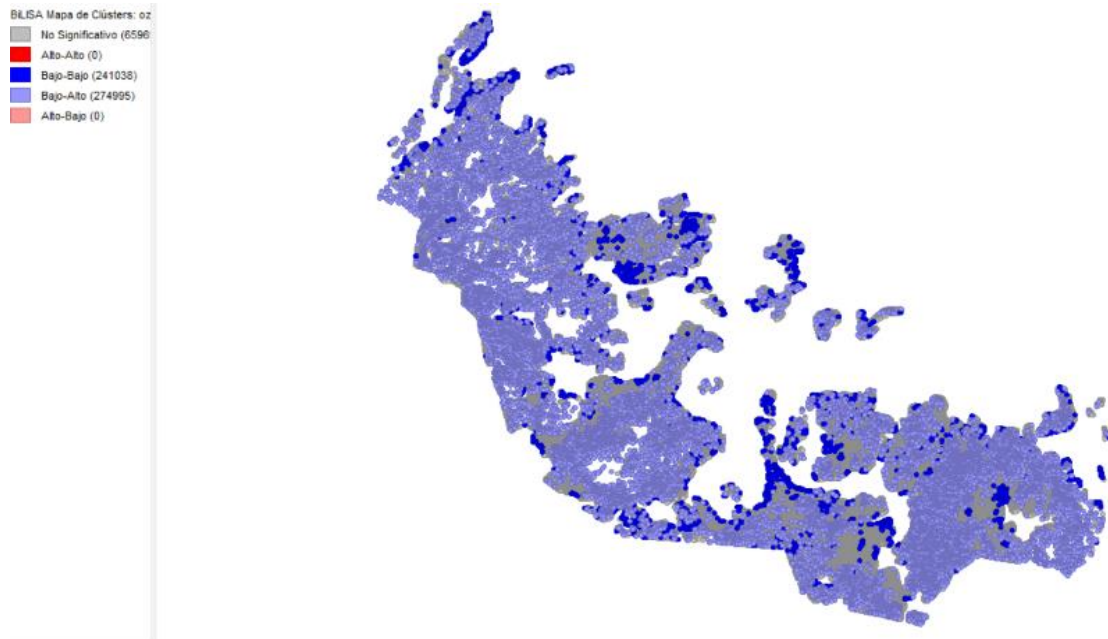


Figura 39. Mapa de clusters de la prueba LISA bivariada, entre las variables O₃ y GCI.

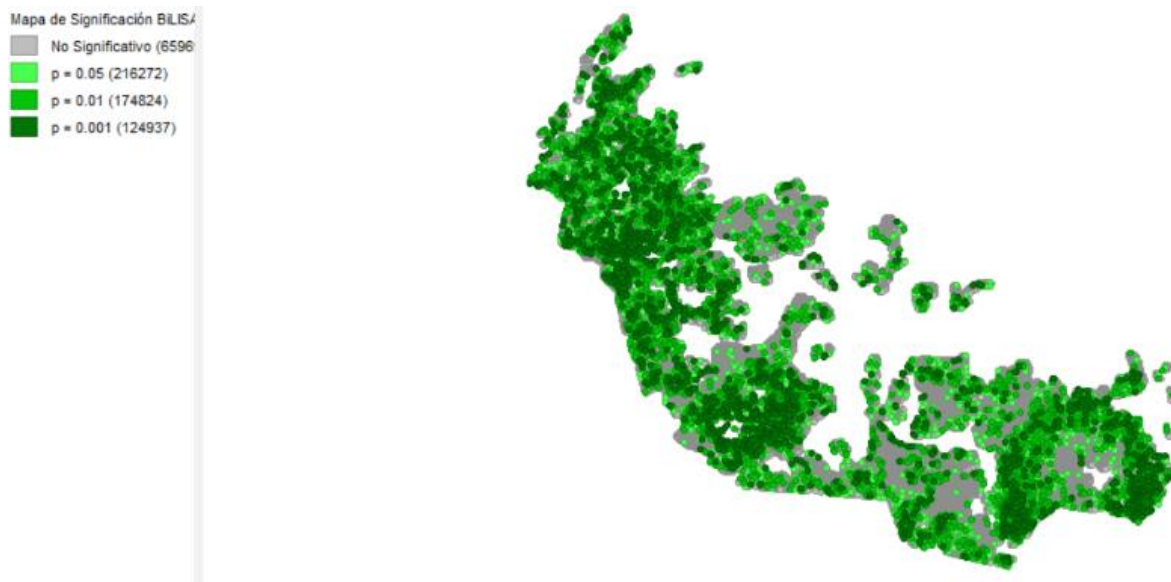


Figura 40. Mapa de significancias de la prueba LISA bivariada, entre las variables O₃ y GCI.

ReCI:

En el mapa de clusters evaluando las variables O_3 y ReCI, observamos predominantemente clusters de tipo alto - alto, estos nos podrían indicar que en estas áreas tienen valores altos de la primera variable (O_3) y altos también de la segunda variable (ReCI). También se aprecian, aunque en menor cantidad, clusters alto - bajo. Estas áreas tienen valores altos para el O_3 y bajos para el ReCI (**Figura 41**).

En el mapa de significancias predominan los colores verde oscuro y verde claro (significancias de 0.001, 0.05 respectivamente), Estas áreas, de igual forma muestran que existe una gran significancia estadística en cuanto a los clusters que se mostraron en el mapa de clusters, es decir que nos indican que es probable que los patrones observados no sean resultado del azar (**Figura 42**).

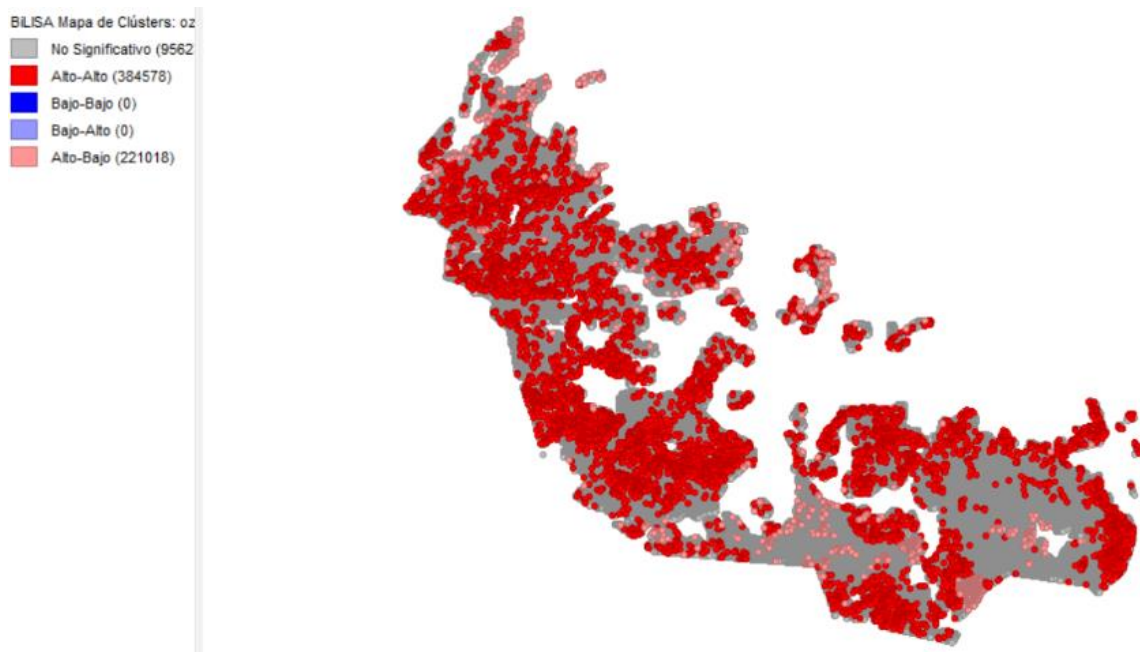


Figura 41. Mapa de clusters de la prueba LISA bivariada, entre las variables O_3 y ReCI.



Figura 42. Mapa de significancias de la prueba LISA bivariada, entre las variables O₃ y ReCI.

Prueba de Proporciones:

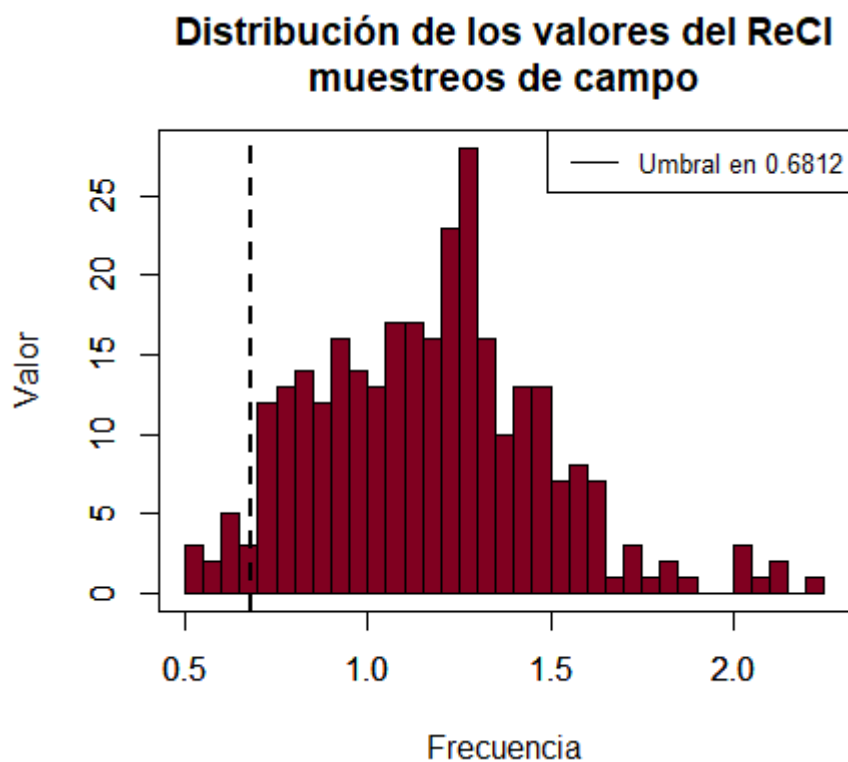


Figura 43. Histograma de los valores de los píxeles filtrados por medio de los polígonos de 3x3, resultado de los muestreos de campo. En las imágenes con el ReCI calculado.

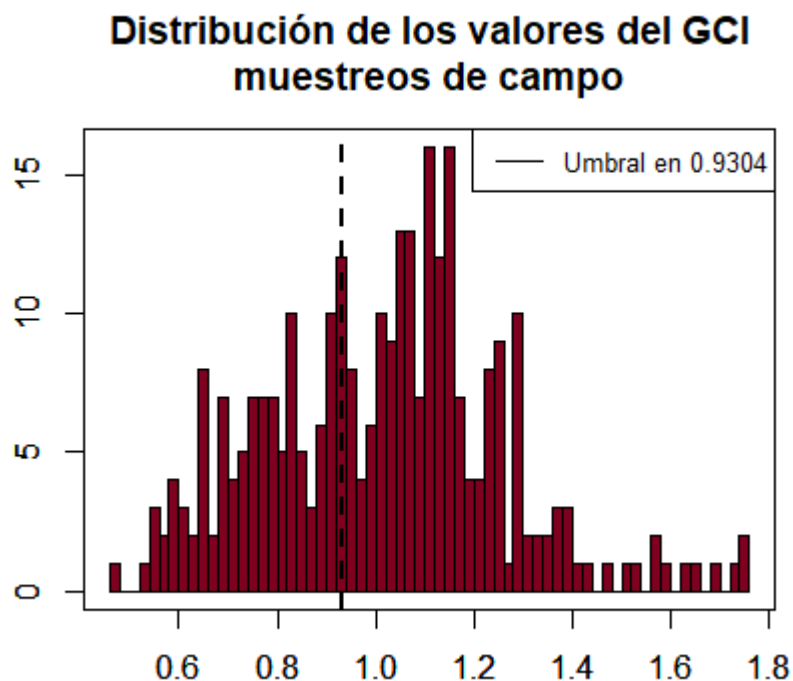
Como hipótesis nula se estableció que la proporción de valores por encima del umbral es igual a 0.6 (la proporción poblacional conocida o hipotética). En el caso del ReCI se rechaza la hipótesis nula y se aprueba la alterna. La hipótesis alternativa sugiere que la proporción verdadera no es igual a 0.6.

El valor p (p-value) es extremadamente pequeño ($p\text{-value} < 2.2e-16$), lo que significa que hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula. Esto sugiere de igual forma que la proporción de valores por encima del umbral no es igual a 0.6.

La estimación de la proporción basada en los datos de ReCI es 0.956229. Esa es la proporción de valores seleccionados como sanos de acuerdo a los muestreos de campo, que se encuentran por encima del umbral de vegetación “no sana” (**Figura 43**).

En el caso del GCI, no se puede afirmar que la proporción de valores por encima del umbral sea significativamente diferente de 0.6. Sin embargo, el intervalo de confianza sugiere que la verdadera proporción podría estar en ese rango. Cabe señalar que el intervalo de confianza es del 95% (0.582, 0.694) esto indica que la verdadera proporción probablemente está dentro de este rango. La estimación de la proporción basada en los datos de GCI es 0.640 (**Figura 44**).

Figura 44. Histograma de los valores de los pixeles filtrados por medio de los polígonos de 3x3, resultado de los muestreos de campo. En las imágenes con el GCI calculado.



4. Integración de datos atmosféricos

El tipo de interpolación que se realizó fue una IDW (Interpolación de Distancia Inversa Ponderada). El método IDW se basa en el principio de que los puntos más cercanos son más similares y, por lo tanto, tienen mayor peso e influencia en la estimación del punto desconocido. Los puntos de muestreo se ponderan de tal manera que su influencia disminuye con la distancia desde el punto a estimar. Para controlar cómo disminuye esta influencia, se utiliza un coeficiente de ponderación (Beltran Ortega, 2020).

Otro método de interpolación ampliamente utilizado es el Kriging. Este método es una técnica geoestadística avanzada que permite estimar una superficie por medio de un conjunto de puntos dispersos con valores conocidos. Este método implica varios pasos, incluyendo un análisis estadístico exploratorio, el modelado de variogramas, la creación de la superficie estimada y el examen de la superficie de varianza. La fórmula de Kriging se basa en una suma ponderada de los datos medidos cercanos para predecir valores en ubicaciones no muestreadas. Para ello utiliza un semivariograma, para ajustar el semivariograma empírico, se pueden emplear diferentes modelos, tales como el circular, esférico, exponencial, gaussiano y lineal (Beltran Ortega, 2020).

En nuestro caso, se eligió IDW debido a que por la estructura espacial de las mediciones de O_3 parecía no ser adecuada para una interpolación por el método de Kriging. Al realizar el semivariograma e intentar ajustar con algún modelo empírico, los datos no se ajustaban a este adecuadamente, dejando muchos puntos fuera del variograma.

Después de realizar la interpolación, se obtuvo una nueva capa con puntos donde cada punto tuviera asignado un valor y coordenadas, dentro de la malla de 10 x 10 metros. De tal forma que por medio de la columna con coordenadas se logró unir la capa con las concentraciones de O_3 y los ráster con los valores de los índices para trabajar la correlación espacial.

El resultado de la interpolación por el método de IDW se muestra a continuación (**Figura 45**) con el corte de la capa BCEESC.

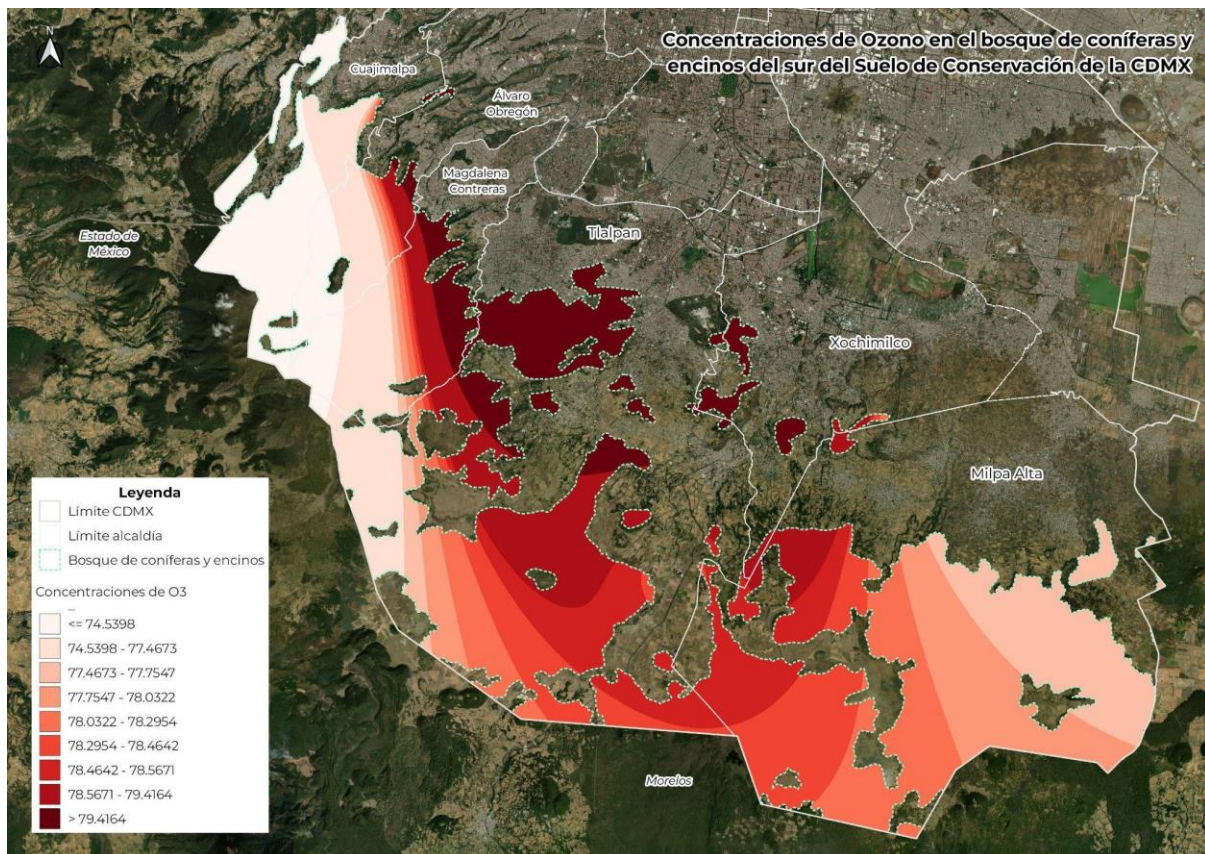


Figura 45. Interpolación con IDW, se realizó corte con la capa BCESC.

5. Indicador de Daño Potencial por O₃ (IDPO)

La fórmula que se utilizó para normalizar los valores y al mismo tiempo invertir la escala fue la siguiente:

Índice normalizado

$$IN = \frac{\max(IV_{i,j}) - IV_{i,j}}{\max(IV_{i,j}) - \min(IV_{i,j})}$$

Donde **IV** es la matriz del índice de vegetación calculado.

Después de aplicar esta normalización a los valores del ráster con los pixeles que corresponden al umbral de vegetación “no sana”, para los índices que mejor tuvieron

correlación con el O₃, se construyó un indicador combinado. Un indicador combinado, asigna un peso o valor a cada índice (u otro indicador) de manera individual y después los resultados se suman o multiplican dependiendo lo que se desea obtener (Nuñez-Peñaloza et al., 2023; Rodríguez et al., 2021; Valencia Cruzaty et al., 2022), como se muestra a continuación:

Indicador daño potencial por O₃

$$IDPO = (IN_{ReCl})^{w_1} * (IN_{GCl})^{w_2}$$

Donde: IN se refiere al índice normalizado y w_1 , w_2 son los pesos asignados.

El peso que se le asignó a cada índice normalizado fue de 0.5, es decir que w_1 y w_2 valen exactamente los mismo (0.5), esto sería igual a aplicar una raíz cuadrada a cada valor del IN antes de multiplicarlos entre sí, por lo que esto asegura que ambos índices tengan un peso similar en el indicador combinado.

La normalización previa asegura que los valores de los índices estén en una escala comparable, lo que puede ser útil para evitar que un índice domine al otro en la combinación (Gonzalez & Woods, 2018).

En el mapa final de IDPO del 2022 (**Figura 46**) se puede observar que prácticamente todo el suelo de conservación, en específico que tiene vegetación de coníferas y encinos, se encuentra bajo estrés constante a causa de la contaminación y por otros factores que no se estudian en este trabajo, sin embargo, la exposición constante al ozono puede ser uno de esos principales factores de daño a la vegetación. Es la causa además de que bajo el estrés que sufre la vegetación, posteriormente lleguen plagas y otro tipo de afecciones.

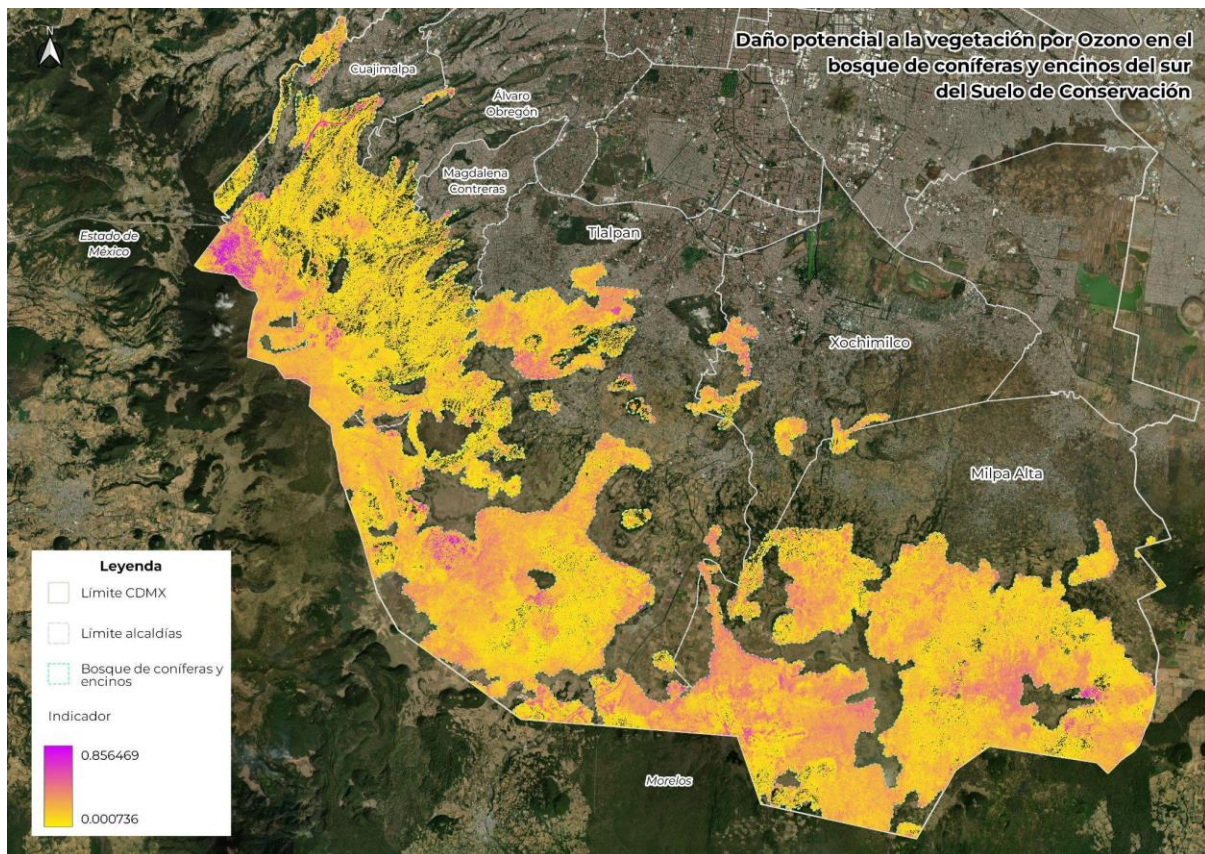


Figura 46. Mapa resultante del cálculo del indicador combinado IDPO. Los tonos magenta son las zonas que presentan un mayor riesgo potencial.

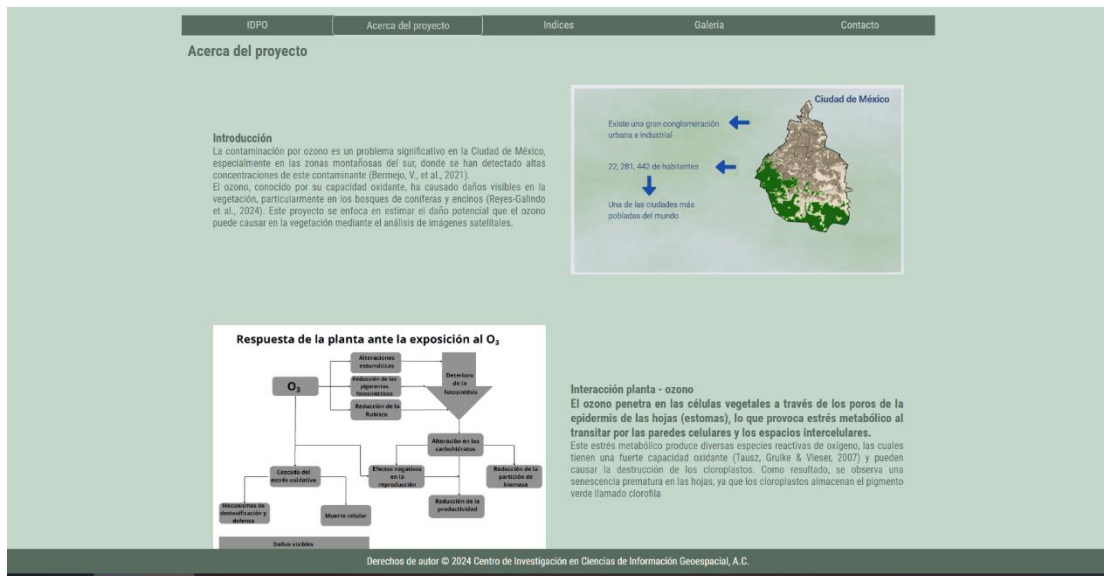
6. Portal web

Como parte de los resultados se desarrolló un portal web, con cinco secciones. La primera pestaña contiene información del indicador y las fórmulas con las que se desarrolló, además del mapa de daño potencial.



Figura 47. Página principal del portal web

En la segunda pestaña, contiene información general del proyecto, se lee de los objetivos, el marco teórico que refiere acerca del Ozono y las afectaciones de este contaminante a la vegetación.



Acerca del proyecto

Introducción
La contaminación por ozono es un problema significativo en la Ciudad de México, especialmente en las zonas montañosas del sur, donde se han detectado altas concentraciones de este contaminante (Bermego, V. et al., 2021). El ozono, conocido por su capacidad oxidante, ha causado daños visibles en la vegetación, particularmente en los bosques de coníferas y encinos (Reyes-Galindo et al., 2024). Este proyecto se enfoca en estimar el daño potencial que el ozono puede causar en la vegetación mediante el análisis de imágenes satelitales.

Existe una gran conglomeration urbana e industrial
22,281,442 de habitantes
Una de las ciudades más pobladas del mundo

Respuesta de la planta ante la exposición al O₃

Interacción planta - ozono
El ozono penetra en las células vegetales a través de los poros de la epidermis de las hojas (estomas), lo que provoca estrés metabólico al transitar por las paredes celulares y los espacios intercelulares. Este estrés metabólico produce diversas especies reactivas de oxígeno, las cuales tienen una fuerte capacidad oxidante (Tausz, Grulke & Vieset, 2007) y pueden causar la destrucción de los cloroplastos. Como resultado, se observa una senescencia prematura en las hojas, ya que los cloroplastos almacenan el pigmento verde llamado clorofila.

Derechos de autor © 2024 Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C.

Figura 48. Pestaña, “Acerca del proyecto”. Resumen del proyecto

En la tercera pestaña se encuentra la información de los índices de vegetación y las fórmulas que se ocuparon para calcularlo.



Índices

Introducción a los índices
Un índice es un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena, (Gilbert et al, 1997). Los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes multispectrales permiten determinar el estado de salud de los cultivos, a partir de diferentes características, como contenido de clorofila, estado nutricional, estado hídrico y deficiencias estructurales, todo esto con alta resolución espacial. Diversos estudios han mostrado que el desempeño de algunos índices de vegetación difieren en relación con los parámetros específicos que se desean estimar, por ejemplo, EVI indica contenido de agua; NDVI, GCI y SR calculan biomasa, densidad vegetal, biodiversidad y abundancia vegetal, NDVI*SR, SR y mNDblue estiman nitrógeno y clorofila.

- Índice de Clorofila de Borde Rojo (ReCI)
El ReCI mide la actividad fotosintética de la vegetación, evaluando la densidad de la biomasa y el estado de salud de las plantas, siendo particularmente sensible al contenido de clorofila, que está relacionado con los niveles de nitrógeno. El ReCI se calcula usando la reflectancia del infrarrojo cercano (pNIR) y la de borde rojo (pRed Edge).
Fórmula:
 $CI\ red-edge = pNIR/pred_edge - 1$

7-dic-22

Derechos de autor © 2024 Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C.

Figura 49. Pestaña, “Índices”. Resumen de los índices NDVI, ReCI y NCI

La cuarta pestaña contiene una galería fotográfica del trabajado de campo y de la vegetación de los diferentes sitios de muestreo.

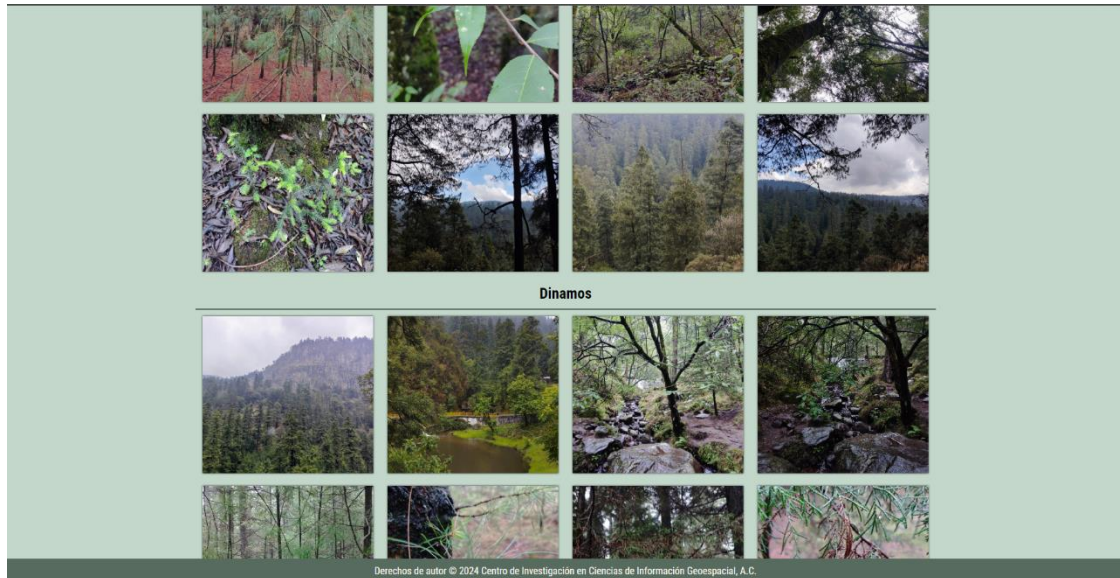


Figura 50. Pestaña, “Galería”. Fotografías del trabajo de campo.

En la última pestaña se han incluido los contactos de los integrantes del equipo. Si alguien necesita más información sobre el proyecto, puede enviar un correo a cualquiera de ellos.

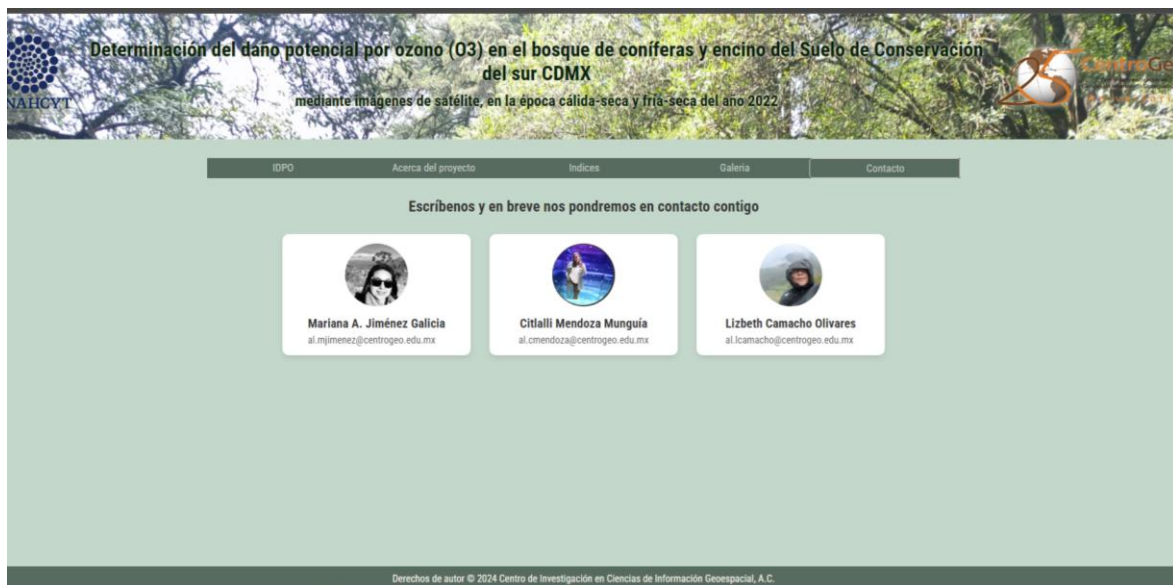


Figura 51. Pestaña, “Contacto”. Correo electrónico con contactos.

Link portal web

<http://104.168.61.56/Geovisor/IDPO.html>

Portal web

<http://104.168.61.56/Geovisor/IDPO.html>

O escanea el código QR.



VII. CONCLUSIONES

El estudio realizado sobre el daño potencial del O₃ en los bosques de coníferas y encinos del Suelo de Conservación del sur de la Ciudad de México demostró que el uso de índices espectrales obtenidos de imágenes satelitales podría ser una herramienta eficaz para identificar y cuantificar el impacto de este contaminante en la vegetación.

Los resultados indican que existe una correlación entre las concentraciones de O₃ y los cambios en la vegetación, lo que impulsó a la creación de un indicador de daño potencial. Adicionalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba LISA, el cómo se relacionan estas concentraciones con los efectos observados en los valores de los índices y cómo pueden influir otros factores como la orografía, el viento, temperatura o radiación solar, son temas de estudio que requieren de una mayor exploración en futuras investigaciones, ya que no se encuentran dentro de los alcances del presente proyecto.

Por otro lado, es importante mencionar que los muestreos de campo para validar la información no fueron lo suficientemente robustos, por lo que para aplicar una mejor validación y obtener mejores resultados, sería importante contar con más puntos de muestreo y aplicar otras técnicas como el uso de espectroradiómetros.

El indicador, implementado en una página web interactivo, proporciona una base para el monitoreo continuo y la formulación de políticas públicas orientadas a la preservación de los bosques de coníferas y encinos. Además, con la implementación de este indicador se puede dar cuenta del desgaste que existe en la zona del SC de la CDMX, ya que prácticamente toda la vegetación presenta algún tipo de afección, por lo que es de gran importancia este tipo de estudio para la documentación de la conservación ambiental en el sur de la CDMX.

La metodología empleada y los hallazgos obtenidos subrayan que es esencial integrar tecnologías de percepción remota y análisis estadístico robusto para abordar problemas ambientales complejos y promover la sostenibilidad ecológica en áreas urbanas y periurbanas.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

Aguirre-Saldo, C. A., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Miranda-Aragón, L., Valdez-Lazalde, J. R., Aguirre-Salado, A. I., & Sánchez-Díaz, G. (2012). *Forest cover mapping in north-central Mexico: A comparison of digital image processing methods*. *GIScience and Remote Sensing*, 49(6), 895-914.

Ahamed, T., Tian, L., Zhang, Y., & Ting, K. C. (2011). *A review of remote sensing methods for biomass feedstock production*. *Biomass & Bioenergy*, 35(7), 2455-2469. doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.028

Almorox, J., & García Antonio, R. (1999). *Aplicación de sensores remotos en la detección y evaluación de plagas y enfermedades en la vegetación*. *Teledetección: Avances y aplicaciones*, pp. 63-67.

Alvarado-Rosales, D., & Hernández-Tejeda, T. (2002). Decline of sacred fir in the Desierto de los Leones National Park. In M. E. Fenn, L. I. de Bauer, & T. Hernández-Tejeda (Eds.), *Urban air pollution and forests: Resources at risk in the Mexico City Air Basin*. Ecological Studies Series, vol. 156. Springer-Verlag, New York, pp. 243-260.

Alvarado R, D., De Bauer, L. I., & Galindo A, J. (1993). *Decline of sacred fir (Abies religiosa) in a forest park south of Mexico City*. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 80(2), 115–121.

Anglés-Hernández, M., Rovalo-Otero, M., & Tejedo-Gallegos, M. (2021). *Manual de derecho ambiental mexicano, primera reimpresión*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Jurídicas.

Atkinson, R. (2000). *Atmospheric chemistry of VOCs and NOx*. *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 2063-2101. doi:10.1016/S1352-2310(99)00460-4

Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), 159-175.

https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1135-57272005000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Bannari, A. A., & Huete, A. (2010). *A review of vegetation indices*. Tucson, AZ: Remote Sensing Reviews.

Beltran Ortega, P. A. (2020). *Comparación de técnicas de interpolación espacial (IDW y Kriging) utilizando medidas de campo eléctrico en la Comuna Dos de la ciudad de San José de Cúcuta*. <http://hdl.handle.net/11349/24828>

Bermejo, V., Alonso, R., Elvira, S., Rábago, I., García, M., et al. (2009). *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Bermejo, V., Rábago, I., Ben Amor, A., García-Gómez, H., Nagaz, K., Alonso, R., & González-Fernández, I. (2021). *Cooperación internacional e intergubernamental para abordar la mejora de la calidad del aire en el marco del cambio climático: El ozono troposférico y sus efectos en cultivos*. *Revista Española de Desarrollo y Cooperación*, (48), 105-130. doi:10.5209/redc.81181

Boldo, E. (2016). *La contaminación del aire*. Editorial Catarata. doi:10.4321/repisalud.7274

Bravo-Alvarez, H., & Torres-Jardón, R. (2002). *Air pollution levels and trends in the Mexico City Metropolitan Area*. In M. E. Fenn, L. I. de Bauer, & T. Hernández-Tejeda (Eds.), *Urban air pollution and forests: Resources at risk in the Mexico City Air Basin* (Vol. 156, pp. 121-159). Springer-Verlag.

Calatayud, V., Marco, F., Cerveró, J., Sánchez-Peña, G., & Sanz, M. J. (2010). *Contrasting ozone sensitivity in related evergreen and deciduous shrubs*. *Environmental Pollution*, doi:10.1016/j.envpol.2010.08.013

Cano, I., Calatayud, V., Cerveró, J., & Sanz, M. J. (2007). *Ozone effects on three Sambucus species*. *Environmental Monitoring Assessment*, 128, pp. 83-91.

Castillejos, M., Gold, D. R., Damokosh, A. I., Serrano, P., Allen, G., McDonnell, W. F., & Hayes, C. (1995). *Acute effects of ozone on the pulmonary function of exercising schoolchildren from Mexico City*. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 152(5 Pt 1), 1501–1507. doi:10.1164/ajrccm.152.5.7582284

Chuvieco Salinero, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Ambiental* (2nd ed.). Madrid: Ariel.

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos. (2017). *Clasificación de los contaminantes del aire ambiente*. gov.mx. <http://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente>

De Bauer, M. de L., & Hernández-Tejeda, T. (2007). *A review of ozone-induced effects on the forests of central Mexico*. *Environmental Pollution*, 147(3), 489-507. doi:10.1016/j.envpol.2006.12.020

Decuyper, M., Chávez, R. O., Lohbeck, M., Lastra, J. A., Tsendbazar, N., Hackländer, J., Herold, M., & Vågen, T.-G. (2021). *Continuous monitoring of forest change dynamics with satellite time series*. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112829. doi:10.1016/j.rse.2021.112829

Demers M. (1997). *Fundamentals of Geographic Information Systems*. Wiley & Sons, USA.

Escamilla Nuñez, M. C., Barraza Villarreal, A., Hernandez Cadena, L., Moreno Macias, H., Ramirez Aguilar, M., Sienna Monge, J. J., & Romieu, I. (2008). *Traffic-related air pollution and respiratory symptoms among asthmatic children, resident in Mexico City: The EVA cohort study*. *Respiratory Research*, 9(1), 74. doi:10.1186/1465-9921-9-74

Gilabert, M., González Piqueras, J., & García Haro, J. (1997). *Acerca de los índices de vegetación*. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, pp. 1-10.

Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOFD-GOLD). (2011). *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gain and losses of*

carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. Report Version COP17-1. Alberta, Canada. 235 p.

Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (Fourth edition, global edition). Pearson.

Hernández, J., & Montaner, D. (2004). *Patrones de respuesta espectral*. Lab. Geomática y Ecología del Paisaje (GEP), Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile

Holguín, F., Tellez Rojo, M., Hernández, M., Cortez, M., Chow, J., Watson, J., & Romieu, I. (2003). *Air pollution and heart rate variability among the elderly in Mexico City*. 14(5), 521–527.

Hunt Jr., E. R., Daughtry, C. S. T., Eitel, J. U. H., & Long, D. S. (2011). *Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index*. *Agronomy Journal*, 103, 1090-1099.

Jackson, T., Slater, P. N., & Pinter, P. J. (1983). *Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres*. *Remote Sensing of Environment*, pp. 187-208.

Jáuregui, E. (1989). *The dust storms of Mexico City*. *Int. J. Climatol.* 9, 169-180.

Jáuregui, E. (2002). *The climate of the Mexico City air basin: Its effects on the formation and transport of pollutants*. In M. E. Fenn, L. I. de Bauer, & T. Hernández-Tejeda (Eds.), *Urban air pollution and forests: Resources at risk in the Mexico City Air Basin* (pp. 86–117). doi:10.1007/978-0-387-22520-3_5

Juráñ, S., Grace, J., & Urban, O. (2021). *Temporal changes in ozone concentrations and their impact on vegetation*. *Atmosphere*, 12(1), 82. doi:10.3390/atmos12010082

Krupa, S. V., & De Bauer, L. I. (1976). *La ciudad daña los pinos del Ajusco*. *Panagfa* 4, 5-7 (México).

Krupa, S. V., & Manning, W. J. (1988). *Atmospheric ozone: Effects on vegetation*. *Environmental Pollution*, 101, pp. 137-141.

Lanfri, S. (2010). *Vegetation analysis using remote sensing - Master in Emergency Early Warning and Response Space Applications*. Instituto Mario Gulich, Universidad Nacional de Córdoba, pp. 4-20.

Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.

Martín, S. G., & Lafuente, V. (2017). *Referencias bibliográficas: Indicadores para su evaluación en trabajos científicos*. *Investigación bibliotecológica*, 31(71), 151-180. doi:10.22201/iibi.0187358xp.2017.71.57814

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2001). *Ozono. NASA Facts: The Earth Science Enterprise Series*. Goddard Space Flight Center. <https://cloud1.arc.nasa.gov/solve11/outreach/spanishlink2.pdf>

Nadjla, B., Assia, S., & Ahmed, Z. (2022). *Contribution of spectral indices of chlorophyll (Recl and gci) in the analysis of multi-temporal mutations of cultivated land in the Mostaganem plateau*. 2022 7th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA), 1-6. doi:10.1109/ISPA54004.2022.9786326

Núñez-Peñaloza, J. L., Pérez-Nieto, J., Prado-Hernández, J. V., Núñez-Peñaloza, J. L., Pérez-Nieto, J., & Prado-Hernández, J. V. (2023). *Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 14(6). doi:10.29312/remexca.v14i6.3148

Palomares Palacios, A. (2010). *Niveles de ozono y riesgos para la vegetación en la Comunidad Valenciana* [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Valencia]. Escuela Politécnica Superior de Gandía.

Ramya, A., Dhevagi, P., Rakesh, S. S., Maheswari, M., Karthikeyan, S., Saraswathi, R., Chandrasekhar, C. N., & Venkataramani, S. (2021). *Detection of ozone stress in*

rice cultivars using spectral reflectance. *Environmental Advances*, 3, 100129.
doi:10.1016/j.envadv.2021.100129

Reyes Galindo, V. (2019). *Análisis transcriptómico de la tolerancia a ozono troposférico en Abies religiosa* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de México]. Repositorio de la Universidad Autónoma de México.

Reyes-Galindo, V., Jaramillo-Correa, J. P., Shishkova, S., Sandoval-Zapotitla, E., Flores-Ortiz, C. M., Piñero, D., Spurgin, L. G., Martin, C. A., Torres-Jardón, R., Zamora-Callejas, C., & Mastretta-Yanes, A. (2024). *Histologic, metabolomic, and transcriptomic differences in fir trees from a peri-urban forest under chronic ozone exposure*. *Ecology and Evolution*. Advance online publication. doi:10.1002/ece3.11343

Rodríguez, A. G. F., Flores-Garnica, 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*, 106. doi:10.14350/rig.60396

Ruscitti, M. F. (2015). *Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE)*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.

SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH, & SEMARNAT. (2021). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021-2030)*.
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/aire/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire2021-2030/pdf/ProAireZMVM2021-2030-VersionCompleta.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2019). *NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud*. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de dof.gob.mx

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018). *Exposición de la vegetación al ozono en la Ciudad de México*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) & Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). (2018). *Objetivos del monitoreo de la calidad del aire de la RAMA*. Recuperado el 18 de marzo de 2024 de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/objetivos-redes/objetivos-monitoreo-calidad-aire-rama.html>

Song, C. (2013). *Optical remote sensing of forest leaf area index and biomass*. *Progress in Physical Geography*, 37, 98-113.

Tausz, M., Grulke, N. E., & Wieser, G. (2007). *Defense and avoidance of ozone under global change*. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 147(3), 525–531. doi:10.1016/j.envpol.2006.08.042

Torres-Rojas, G., Romero-Sánchez, M. E., Velasco-Bautista, E., & González-Hernández, A. (2016). *Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota*. *Revista Mexicana de Cuencas Forestales*, 7(36), 7-24.

Valencia Cruzaty, L. E., Castillo Gallo, C. M., Hernández Bonilla, B. E., Reyes Tomalá, M. V., González Vázquez, À. E., Valencia Cruzaty, L. E., Castillo Gallo, C. M., Hernández Bonilla, B. E., Reyes Tomalá, M. V., & González Vázquez, À. E. (2022). *Metodologías de generación de indicadores educativos: Una revisión sistemática usando el análisis estadístico implicativo*. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(4), 313-323.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2218-36202022000400313&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Wang, Z. (2021). *Satellite-observed effects from ozone pollution and climate change on growing-season vegetation activity over China during 1982–2020*. *Atmosphere*, 12(11), 1390. doi:10.3390/atmos12111390

Wulder, M. A., Orllepp, S. M., White, J. C., & Maxwell, S. (2014). *Evaluation of Landsat-7 SLC-off image products for forest change detection*. Canadian Journal of Remote Sensing, 34(2), 93-99.