



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGÍA

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS SUELOS SALINOS
EN LA ZONA AGRÍCOLA DE IXMIQUILPAN, HIDALGO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A :

NATHALIA JOCELYN SALCEDO HERRERA

JURADO DE EXAMEN

DIRECTOR: M. en C. RAMIRO RÍOS GÓMEZ

ASEROR: M. en C. FAUSTINO LÓPEZ BARRERA

ASESOR: Dr. JORGE ALBERTO GUTIERRÉZ GALLEGOS

SINODAL: M. en C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS

SINODAL: M. en C. JUAN MANUEL VALDERRÁBANO GÓMEZ



CIUDAD DE MÉXICO

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

A mis padres *Claudia Sofía Herrera Mojica y Rafael Salcedo Hernández, por su apoyo y amor incondicional.*

Mamá, *gracias por enseñarme el significado de ser noble y siempre agradecer, estos son los valores que más me han ayudado en la vida.*

Papá, *gracias por sembrar en mí las semillas del esfuerzo y la dedicación, sin tus enseñanzas no habría conseguido ser la persona que soy.*

A mis hermanos *Valeria Sofía y Carlos Alberto Salcedo Herrera. Sin ustedes mi vida simplemente no sería la misma.*

Vale, *llegaste a nuestras vidas como la mejor de las sorpresas, gracias por todas tus muestras de cariño, por recibirme con siempre con un abrazo y por ser la hermana más divertida.*

Carlitos, *mi compañero de travesuras y hoy uno de mis mejores consejeros, gracias por ser el hermano más protector, cariñoso y molesto.*

Los amo.

Agradecimientos

A mi director de tesis el Maestro Ramiro Ríos Gómez, por brindarme su apoyo desde el principio para formar parte de la Unidad De Investigación En Sistemática Vegetal Y Suelo, por todas sus enseñanzas tanto académicas como de vida y por enseñarme que siempre hay que tomar el solecito y las cosas con calma.

A mi asesor el Maestro Faustino López Barrera por ser mi guía en el mundo los sistemas de información geográfica y teledetección, gracias por todas esas tardes que poco a poco dieron forma a este trabajo.

A mi asesor el Doctor Jorge Alberto Gutiérrez Gallegos por permitirme hacer mi servicio social bajo su tutela, por enseñarme a tenerle más cariño al mundo de las plantas y por siempre motivarme a lograr más.

A mis sinodales, los maestros Eliseo Cantellano y Rosas y Juan Manuel Valderrábano Gómez, porque ustedes me iniciaron en el uso de los SIG y la aplicación de la teledetección que hoy en día y siempre me parecerán maravillosos.

A mis amigas Itzel, Karina, Roxana y Ari, gracias por ser mi apoyo durante toda la carrera, por escucharme, por hacer mis días más divertidos, por todas las risas, los consejos, las tardes en los pastos y las pijamadas.

A mi hermana de otra familia, Leticia Bonilla Romero. Mujercita, gracias por quererme desde que nos conocimos en CCH, por ser mi confidente, mi pañuelo de lágrimas, mi compañera de locuras, por ser mi mejor amiga.

A mi tío Miguel Ángel Herrera Mojica, gracias por apoyarme siempre, por sus consejos y por enseñarme el valor del esfuerzo.

A mis abuelos Isabel e Ismael, a mi tía Kary, a mis primos Gabriel, Fátima, Cris, a mi tío Isma, a mi tía Rosa, mis tíos Armando Jenny y Adriana, a mis primos Adrián, Ulises, Jonny, Uriel, Rodrigo y sus familias, a mi Tía Magda, a mi tío José Luis y a Fanny, a mi tía Maru y los Lozano-Reyes, gracias familia por todo su cariño, su apoyo y por siempre preocuparse por mí.

A la familia Motos Marqués, que durante medio año me abrió las puertas de su hogar en una de las experiencias más importantes de mi formación profesional y personal. Gracias abuela Eladia por tu sabiduría, por enseñarme que la edad es solo un número y que la vida se construye día a día.

A Gama, gracias por ser mi compañero durante los últimos cinco años y por siempre apoyarme en mi carrera y en mis sueños, gracias por escribir historia conmigo.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, que se volvió mi segunda casa desde mi ingreso al Colegio de Ciencias y Humanidades Oriente y durante el curso de mi carrera en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Finalmente agradezco a lo más importante para un biólogo, a la vida misma, a mi ser y al Universo por permitirme lograr con esfuerzo, este sueño tan importante para mí.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
I. Resumen	8
II. Introducción	9
III. Marco teórico	11
3.1 Suelos salinos	11
3.2 Suelos salinos secundarios	12
3.3 Efectos de la salinidad en el suelo	12
3.4 Efectos de la salinidad en la vegetación	13
3.5 Salinidad y suelos agrícolas	14
3.6 Teledetección	15
3.7 Índices de teledetección	17
3.8 Índice de Salinidad (IndSal)	17
3.9 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	18
3.10 Interpretación de imágenes satelitales	19
3.11 Clasificación supervisada	20
3.12 Coeficiente de correlación de Pearson-Spearman	21
IV. Planteamiento del problema	22
V. Pregunta de investigación	22
VI. Hipótesis	23
VII. Objetivos	23
VIII. Material y métodos	24
8.1 Área de estudio	24
8.2 Delimitación del área de estudio	25
8.3 Cálculo de los índices IndSal y NDVI	27
8.4 Selección preliminar de sitios de muestreo	27
8.5 Muestreo de suelo	29
8.6 Preparación y análisis de las muestras de suelo	29

8.7 Interpretación de imágenes satelitales y remodelación de polígonos de suelos salinos	30
8.8 Análisis estadístico	30
8.9 Clasificación supervisada	30
IX. Resultados	33
9.1 Cálculo de los índices IndSal y NDVI	33
9.2 Análisis de conductividad eléctrica	36
9.3 Análisis de correlación y modelos de regresión	39
9.4 Interpretación de imágenes satelitales	44
9.5 Clasificación supervisada y mapa final	46
X. Análisis y discusión de resultados	49
10.1 Conductividad eléctrica	49
10.2 Vegetación halófila	50
10.3 Análisis de correlación de la temporada húmeda	52
10.4 Análisis de correlación de la temporada seca	54
10.5 Interpretación de imágenes satelitales, clasificación supervisada y mapa final	60
XI. Conclusiones	63
XII. Referencias	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.	Título	Pág.
1	Acumulación de sales en la superficie del suelo en parcela en desuso del municipio de Ixmiquilpan	10
2	Ubicación geográfica del municipio de Ixmiquilpan	25
3	Zona agrícola del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo	26

4	Polígonos de suelos potencialmente salinos y sitios preliminares de muestreo.	28
5	Puntos de entrenamiento en la zona agrícola de Ixmiquilpan	32
6	Imágenes y valores de IndSal para la zona agrícola de Ixmiquilpan	34
7	Imágenes y valores de NDVI para la zona agrícola de Ixmiquilpan	35
8	Valores de CE para las 54 muestras de suelo del área agrícola irrigada con aguas residuales en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo	36
9	Número de muestras por clase de salinidad	38
10	Modelo de relación entre IndSal y la conductividad eléctrica en las muestras de suelo de noviembre de 2021	40
11	Modelo de relación entre NDVI y la conductividad eléctrica en las muestras de suelo de noviembre de 2021	40
12	Modelo de relación entre IndSal y NDVI en las muestras de suelo de noviembre de 2021	41
13	Modelo de relación entre IndSal y la conductividad eléctrica en las muestras de suelo de mayo de 2022	42
14	Modelo de relación entre NDVI y la conductividad eléctrica en las muestras de suelo de mayo de 2022	43
15	Modelo de relación entre IndSal y NDVI en las muestras de suelo de mayo de 2022	43
16	Polígonos de las clases de suelos salinos generados a partir de la interpretación de imágenes satelitales	45
17	Distribución de suelos salinos en la zona agrícola del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo	48
18	Comparación entre imágenes satelitales Google Earth y la cobertura de especies halófilas	51
19	Líneas de tendencia entre la CE y el IndSal para noviembre del 2021	52

20	Líneas de tendencia entre la CE y el NDVI para noviembre del 2021	53
21	Histograma e imagen del NDVI para noviembre de 2021	56
22	Histograma e imagen del NDVI para mayo de 2022	57
23	Histograma e imagen del IndSal para noviembre de 2021	58
24	Histograma e imagen del IndSal para mayo de 2022	59
25	Diferencia de tonos entre suelos salinos y no salinos	61
26	Depósitos salinos. Vista en campo e imágenes satelitales.	62

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Título	Pág.
1	Clasificación de la salinidad en suelos (Richards,1954)	37
2	Coeficientes de correlación entre los índices y la CE de las muestras suelo tomadas en noviembre de 2021	39
3	Coeficientes de correlación entre los índices y la CE de las muestras suelo tomadas en mayo de 2021	42
4	Número de polígonos de suelo por clase de salinidad en la zona agrícola de Ixmiquilpan, Hidalgo	46
5	Superficies y porcentajes por clase de uso de suelo	47
6	Superficies y porcentajes por clase de salinidad en los suelos de la zona agrícola de Ixmiquilpan	47
7	Número de muestras de suelo por clase de salinidad según la escala de Richards (1954) tomadas en noviembre de 2021 y mayo de 2022	49

I. Resumen

El municipio de Ixmiquilpan se ubica en la zona centro-oeste en Hidalgo, su actividad económica principal es la agricultura de riego en la que se emplean aguas de mala calidad, lo que ha traído consigo la acumulación excesiva de sales en los suelos cultivados afectando la producción. La presente investigación se hizo con el propósito de validar los índices de teledetección IndSal (Índice de Salinidad) y NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) para la identificación suelos salinos en la zona agrícola de Ixmiquilpan. La interpretación de los índices IndSal y NDVI permitió seleccionar sitios de muestreo de suelos potencialmente salinos; en cada muestra se determinó el valor de Conductividad Eléctrica (CE) como medida de la salinidad, la CE fue comparada con los índices usando el análisis de correlación de *Pearson-Spearman*.

Como resultados se encontró que la época de estío influye en las características de reflectancia del suelo y que los valores de los índices no necesariamente están asociados a la salinidad, por lo tanto, la temporada húmeda es más adecuada para la selección de imágenes satelitales. La relación entre la CE y los índices de la temporada húmeda fue moderadamente inversa con valores de correlación alrededor de -0.5; la relación entre los índices fue fuerte y directa cercana a 0.8 lo que indica que el NDVI asociado con el IndSal puede evidenciar estrés vegetal relacionado con salinidad. Finalmente se obtuvo el mapa de distribución de suelos salinos de la zona agrícola de Ixmiquilpan a partir de la clasificación supervisada del IndSal de noviembre de 2021. Se concluye que la temporada de secas, no es adecuada para la identificación de suelos salinos y que en la temporada húmeda la relación entre los índices y la CE no resulta ser estadísticamente significativa por lo que se recomienda el desarrollo de técnicas y tecnologías que incrementen la resolución de imágenes satelitales que hagan posible una interpretación más detallada.

II. Introducción

El proceso de salinización de los suelos agrícolas es una problemática que restringe la producción de especies vegetales cultivables debido al efecto tóxico de los iones presentes en las sales. Las sales son incorporadas al suelo por medios naturales y antrópicos siendo estos últimos los de mayor y más rápido aporte. La salinización es una problemática sencilla de solucionar en términos técnicos, pero de alto costo en suministros.

En el municipio de Ixmiquilpan el desarrollo de la agricultura propició la implementación de sistemas de riego con aguas residuales de mala calidad, las cuales transportan contaminantes suspendidos y disueltos (Velázquez *et al.*, 2002), esta situación ha provocado durante más de dos décadas la acumulación gradual de sales en los suelos de los campos de cultivo (figura 1); motivando el abandono de las tierras productoras (Hernández *et al.*, 2018).

Problemáticas como la que sucede en este municipio han generado la necesidad de investigar, desarrollar y perfeccionar técnicas que permitan la detección oportuna de la salinidad en los suelos para dimensionar el problema y buscar soluciones.

En este contexto, la teledetección se ha convertido en una herramienta útil que permite visualizar y rastrear diferentes fenómenos ambientales, entre ellos la degradación y contaminación del suelo. Con la teledetección se han podido desarrollar fórmulas a partir de las cuales se generan imágenes que al interpretarse ofrecen información sobre la condición de una porción de la superficie terrestre, dichas fórmulas constituyen índices

que asocian un valor a una característica ambiental determinada en una ubicación espacial como lo es la salinización de los suelos.

La presente investigación tuvo el propósito de validar el uso de los índices de teledetección IndSal, un índice sugerido para la identificación de suelos salinos, y NDVI, asociado al vigor de la vegetación, empleando la correlación de *Pearson-Spearman*, con respecto de la Conductividad Eléctrica (CE), un parámetro fisicoquímico indicador de salinidad para identificar suelos salinos en la zona agrícola de Ixmiquilpan, Hidalgo,



Figura 1. Acumulación de sales en la superficie del suelo en parcela en desuso del municipio de Ixmiquilpan. Se observa la dominancia de especies halófilas

III. Marco Teórico

3.1 Suelos salinos

Los suelos salinos son aquellos cuya concentración de sales solubles limitan el desarrollo vegetal y presentan una conductividad eléctrica (CE) igual o mayor a 4 dS/m (Osman, 2018). La CE es medida en la solución del suelo con ayuda de un electrodo capaz de recibir la señal magnética que acompaña a la corriente eléctrica generada por los iones que conforman a las sales (Hardie y Doyle, 2012) entre los que se encuentran los iones cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}), enlazados con sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+), siendo el cloruro de sodio (NaCl) la sal más abundante encontrada en suelos afectados por salinidad (Fassbender, 1994; Osman, 2018).

De acuerdo con la Base Referencial Mundial del recurso suelo (WRB), la mayoría de los suelos con elevadas concentraciones de sales se clasifican como Solonchaks (IUSS Working Group WRB, 2022). El término Solonchak deriva de los vocablos rusos "sol" que significa sal y "chak" que significa área salina; este tipo de suelos poseen una capacidad de aprovechamiento reducida por lo que son comúnmente utilizados para establecer pastizales extensivos sin ningún tipo de uso agrícola.

Los suelos salinos se encuentran principalmente en regiones áridas y semiáridas (Allison *et al.*, 1990), debido a que no existe un agente que lave las sales de manera constante como en las zonas donde el clima es húmedo y la lluvia contribuye al movimiento de éstas. La fuente más directa de salinidad encontrada en estas regiones es la intemperización de los minerales primarios. Otra fuente salina natural es el océano, que puede aportar sales a los suelos bajos que se encuentran a lo largo de las costas; de la

misma manera las sales pueden ser transportadas por la brisa o por el movimiento de las aguas superficiales y subterráneas (Allison *et al.*, 1990).

3.2 Suelos salinos secundarios

El aporte de sales a los suelos por medios naturales suele ocurrir de manera lenta, mientras que las sales provenientes de los ambientes antrópicos llegan con mayor rapidez y concentración dando origen a los suelos salinos secundarios. El riego con aguas de mala calidad que transportan sales solubles es la causa más frecuente de salinización en conjunto con el aporte por el uso de fertilizantes, otra fuente antrópica de sales son las descargas de drenaje municipal que van directo al suelo, y en zonas de campos petrolíferos también son derramadas aguas salinas que son bombeadas junto con el petróleo (Tránsito *et al.*, 2020; Porta y López-Acevedo, 2008;).

Cada una de las problemáticas antes mencionadas es exacerbada por el cambio climático que propicia sequías cada vez más recurrentes y prolongadas lo que ha dado como resultado el incremento de áreas de suelos salinos en diferentes partes del mundo como California y Minnesota en Estados Unidos y en otros países como Bangladesh y Australia (Corwin, 2020). Para el caso de México se estima que alrededor del 3% de los suelos en su territorio ya se encuentran afectados por la salinidad (SEMARNART, 2018).

3.3 Efectos de la salinidad en el suelo

El incremento de sales solubles en la solución del suelo degrada su estructura (Seoáñez *et al.*, 1999), esto es causado por la acción dispersante del sodio que se acumula en los

sitios de intercambio del coloide del suelo y provoca una expansión excesiva de las arcillas en presencia de humedad; cuando la humedad disminuye las partículas de suelo se fragmentan perdiendo su estructura, además la presencia de sales disminuye la permeabilidad lo que propicia el anegamiento de agua en la superficie (Rueda, 2019), como resultado el suelo pierde su capacidad para retener cobertura vegetal. Los suelos salinos también presentan bajos niveles de materia orgánica y muestran una disminución significativa de la actividad microbiológica lo que repercute directamente en la pérdida de su fertilidad (Zhang *et al.*, 2019).

La recuperación de suelos salinos es una problemática sencilla de solucionar y para ello pueden ser utilizados diferentes tipos de métodos de los cuales el lavado y la irrigación continua para movilizar y extraer la sales son los más comunes, pero también existen métodos químicos de mejoramiento como el aporte de yesos o carbonatos para que desplacen al sodio y disminuyan la CE (Terrazas, 2019), así mismo existen métodos de recuperación con microorganismos y plantas halófilas, sin embargo la limitación para la recuperación de los suelos salinos suele ser el alto costo de los suministros necesarios (O'Geen, 2018).

3.4 Efectos de la salinidad en la vegetación

Los efectos que tiene la salinidad sobre las plantas son variados, por ejemplo, la presencia de sales aumenta la presión osmótica y por lo tanto la disponibilidad de los nutrimentos se reduce por lo que las plantas se ven obligadas a emplear más energía para la absorción de los mismos, como consecuencia, los vegetales que son sometidos

a un alto estrés tienden a ser de menor tamaño (Porta y López-Acevedo, 2008). La presencia de sales en los tejidos vegetales también disminuye la actividad estomática impidiendo el intercambio gaseoso en las plantas (Arif *et al.*, 2020).

Además de los defectos ocasionados por el desbalance osmótico, los ambientes edáfo-salinos propician el desarrollo de condiciones tóxicas debido a la alta concentración de iones Cl^- y Na^+ , que al ser acumulados en el tejido vegetal compiten por los sitios de transporte de los macronutrientes, deshidratan a las macromoléculas necesarias para el metabolismo, propician la desnaturalización proteica y desestabilizan la membrana celular (Taiz y Zeiger, 2006). El incremento de la salinidad también trae consigo el aumento en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) que son capaces de acumularse en el citoplasma y degradar el material genético de las células vegetales (Kataria y Verma, 2018).

Es así como el constante estrés provocado por el aumento de la salinidad en el suelo compromete procesos fundamentales como la fotosíntesis y la producción de biomasa lo que lleva al deterioro de los tejidos, posteriormente a la abscisión y finalmente a la senescencia de los organismos; como consecuencia se limita el establecimiento y mantenimiento de la cobertura vegetal.

3.5 Salinidad y suelos agrícolas

Entre los principales factores que influyen en el proceso de salinización de los suelos agrícolas se encuentran el aporte de sales disueltas en el agua de riego de mala calidad y el uso de fertilizantes; este proceso que supone la modificación química, física y

biológica de los suelos, afecta de manera directa y negativa a su calidad (Tránsito *et al.*, 2012) y por lo tanto a su productividad.

Nachtergaele (2005) reporta que un estimado del 6% de los suelos en el mundo presenta restricciones de uso debido a la salinidad, una problemática que asociada a otros tipos de agentes restrictivos como la erosión y la falta de profundidad pone en riesgo la seguridad alimentaria mundial. Por otra parte, la degradación de los suelos agrícolas por desertificación, erosión y salinización también implica un impacto directo a los campesinos habitantes de las zonas productivas, quienes al perder la productividad de sus tierras como medio de sustento se ven obligados a cambiar el uso de suelo y en ocasiones a retirarse de sus lugares de origen (Ceja, 2008)

La falta de estrategias para mantener en buen estado y recuperar este recurso, ha llevado a la búsqueda de alternativas que incluyen mejoras en las técnicas de labranza, riego, enriquecimiento en las propiedades físicas y químicas, y el uso de alta tecnología (*High-Tech*) que en su conjunto fortalecen el manejo integral de los suelos; así mismo, el uso de la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) representan insumos de mayor alcance para el diagnóstico situacional de los suelos agrícolas (Pérez-Vázquez *et al.*, 2018).

3.6 Teledetección

La teledetección o percepción remota, es una herramienta que permite obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno de manera indirecta a través de su imagen espectral; es decir la imagen que es generada por las diferentes interacciones

de la luz (transmitancia, absorbanza y reflectancia) con un objeto. Dicha información es mostrada en un dispositivo y también puede ser procesada e interpretada en un contexto de aplicación (Chuvienco, 1996 y Pettorelli, 2019).

La aplicabilidad de la teledetección se sustenta en la obtención de información a partir del proceso en donde la energía del sol incide en la superficie terrestre e interactúa con todos sus elementos como la vegetación, cuerpos de agua, suelos, asentamientos urbanos, entre otros, esta interacción es diferente con cada cuerpo, y en ella parte de la energía es absorbida y otra reflejada, la cual es captada por un sensor montado en un satélite (Chuvienco, 1996). Esta información es codificada digitalmente y los datos almacenados representan la respuesta espectral (reflectancia) de los objetos captados por el sensor, y son enviados a estaciones receptoras en la Tierra que se encargan de procesarlos y distribuirlos. Con esta tecnología se producen imágenes generadas a partir de la información espectral que, mediante programas de sistemas de información geográfica, es posible visualizarlas, interpretarlas y procesarlas para obtener datos significativos que permitan crear cartografía y otros productos aplicables al conocimiento y diagnóstico de las condiciones en que se encuentran los elementos de la superficie terrestre representados en la imagen.

Uno de los propósitos de la teledetección es nutrir la toma de decisiones para la planificación del uso del territorio, la ordenación de los recursos naturales, la conservación de la diversidad biológica, la prevención de riesgos (Martínez-Vega *et al.*, 2010) o bien para dar atención a problemas ambientales como la degradación de suelos (González y Rodríguez, 2013).

3.7 Índices de teledetección

Se define a los índices de teledetección como los indicadores cuantitativos producidos por operaciones algebraicas realizadas a partir de los valores numéricos de la reflectancia de los píxeles de una imagen, que corresponden a una o más bandas de la misma escena cuyos rangos ofrecen información sobre una característica determinada de algún elemento presente en la superficie captada por una imagen satelital (Sobrino, 2001).

Los índices de teledetección pueden ser aplicados para evaluar diferentes indicadores ambientales como la precipitación, la cobertura vegetal o el color de los cuerpos de agua (Yuan *et al.*, 2020). Para el caso del suelo se han desarrollado índices para medir su humedad, temperatura superficial y hasta su fertilidad (Dwivedi, 2017).

La información que ofrecen los índices también puede ser utilizada de manera aislada o en conjunto para el análisis de situaciones más complejas. La agricultura de precisión es un ejemplo claro de que al integrar diferentes indicadores ambientales obtenidos por teledetección es posible tomar decisiones más acertadas para el manejo correcto de las zonas de cultivo (Shanmugapriya, 2019).

3.8 Índice de Salinidad (IndSal)

El uso de técnicas de percepción remota para localizar y evaluar suelos salinos ha sido implementado desde la década de 1960 las cuales iniciaron con la interpretación y análisis de fotografías aéreas estereoscópicas. El avance científico también ha permitido

implementar los índices de teledetección y relacionarlos con la CE para aplicarlos en la detección y cuantificación de la salinidad en la superficie de los suelos (Gorji *et al.*, 2017).

El índice de salinidad (IndSal) propuesto por Al-Khaier (2003) está basado en la identificación de la reflectancia de las sales minerales correspondientes con los rangos 1.56 a 1,65 y 2,10 a 2.28 μm de longitud de onda de las bandas 11 y 12 o bandas SWIR (bandas de infrarrojo de onda corta) del satélite Sentinel-2.

Los valores del índice van de -1 a 1, dónde el valor mínimo se interpreta como la presencia de alta salinidad en la superficie del suelo, mientras que el valor máximo indica la ausencia de sales. Éste índice ha sido propuesto para evaluar la salinidad de suelos cultivados con resultados favorables (Sigueñas *et al.*, 2019; Soca *et al.*, 2016) sin embargo, es recomendable utilizar el IndSal acompañado de otros índices que evalúen características de los elementos asociados, por ejemplo, la cobertura y las condiciones de la vegetación como lo indica Al-Khaier (2003).

3.9 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), propuesto por Kriegler y colaboradores (1969) se basa en la detección del comportamiento de las bandas de luz roja (RED), absorbida en gran parte por los órganos fotosintetizadores de las plantas, y la banda del infrarrojo cercano (NIR), que es reflejada en su mayoría. Este índice puede ser estimado para evaluar diferentes propiedades de la vegetación como la biomasa, cobertura, concentración de clorofila y el estrés vegetal entre otras (Huang *et al.*, 2021).

El NDVI además de ser el índice más utilizado para evaluar las condiciones de diferentes tipos de la vegetación, también ha sido ampliamente utilizado en el estudio de las condiciones ambientales relacionando el estado de la cobertura vegetal con indicadores como la calidad del aire, calidad del agua, conurbación, cambios de uso de suelo, humedad y temperatura (Tello-Cifuentes y Díaz-Paz, 2021)

Este índice también ha sido útil para la identificación de alteraciones en la vegetación derivadas del estrés salino que disminuye la actividad fotosintética lo que repercute de manera directa en las condiciones de la cubierta vegetal, además el NDVI es capaz de diferenciar los diferentes patrones de crecimiento estacional de las zonas cultivadas (Aimetta *et al.*, 2020; Djuraev *et al.*, 2021). Lo anterior convierte al NDVI en una herramienta de gran utilidad para la identificación de suelos salinos en conjunto con el IndSal.

3.10 Interpretación de imágenes satelitales

La interpretación de información cartográfica digital y satelital es una técnica que permite obtener, de manera remota, descripciones de sitios de interés. Previo a la visita del sitio se recopilan datos sobre la vegetación, elevaciones, uso de suelo rutas de acceso, clima, hidrología, entre otros, una vez obtenida la información se deben seleccionar puntos de verificación para complementar, validar o corregir la información con datos de campo. Este trabajo genera información adicional georreferenciada y validada en los sitios de verificación para generar una descripción de mayor precisión de la zona (INEGI, 2016).

Gracias a este método es posible clasificar tipos de vegetación en área remotas y extensas (Speranza y Zerda, 2005), detectar cambios de coberturas (Jaramillo y Antunes, 2018) además de localizar y estimar la extensión del impacto por algún contaminante en los suelos (Guerrero y Pineda, 2016), esto lo convierte en un método vigente y ampliamente probado.

En el caso de zonas agrícolas, la interpretación y procesamiento de imágenes satelitales se ha vuelto un instrumento de gran utilidad para el monitoreo de los cultivos, ya que es posible obtener información de indicadores como el estrés hídrico de las plantas además de distintas propiedades del suelo como el pH, la conductividad eléctrica, textura, contenido de macronutrientes, entre otras (Hernández, 2021).

3.11 Clasificación supervisada

Las técnicas de clasificación supervisada son una herramienta que permite diferenciar distintas coberturas en una imagen satelital de acuerdo con las características espectrales de los objetos que representan; de manera general, estas técnicas se basan en modelos estadísticos que buscan agrupar patrones espectrales similares; algunos de estos modelos pueden ser el Bayesiano, el modelo de análisis discriminante, árboles de decisión, entre otros (Richards, 2013).

Para la clasificación de una imagen es necesario asignar el número de clases que deseamos obtener y cada una de ellas será respaldada por sitios de entrenamiento, es decir, puntos conocidos que cuenten con las características correspondientes a cada clase (Borras *et al.*, 2017), por ejemplo, una clase urbana deberá coincidir con sitios de

entrenamiento dónde se puedan apreciar construcciones, concreto o carreteras, mientras que una clase de cubierta vegetal será generada a partir de puntos dónde se conozca que existe la vegetación que se desea identificar.

Entre las aplicaciones de la clasificación supervisada se encuentran la diferenciación de coberturas en zonas urbanas, agrícolas y zonas de conservación (Ma *et al.*, 2017), el ordenamiento territorial de zonas de interés (Sanson *et al.*, 2012) la evaluación de unidades del paisaje (de León Mata *et al.*, 2014); todas ellas aplicaciones prácticas para la toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales.

3.12 Coeficiente de correlación de Pearson-Spearman

La correlación de Pearson y de Spearman permite establecer similitudes o disimilitudes entre variables, el coeficiente tiene un rango entre -1 y 1. Cuando es positivo (+) la relación es directa entre las variables, si es negativo (-) la relación es inversa y si es igual a 0 son independientes; la relación será cada vez más fuerte cuanto más se acerque a los valores enteros (Restrepo y Gonzáles, 2007). Los valores de correlación pueden ser expresados como porcentaje donde los valores enteros positivos o negativos de 0 y 1 representan el 0% y 100% de correlación respectivamente.

El uso del coeficiente de correlación es útil para identificar si existe relación entre dos variables (Roy-García *et al.*, 2019), esta prueba estadística es utilizada ampliamente para evaluar la dependencia entre grupos de datos y para la validación de supuestos (Restrepo y Gonzáles, 2007), como la relación entre un parámetro ambiental y la respuesta de un organismo o la relación entre la calidad ambiental y algún indicador.

Soca y sus colaboradores (2016) lograron demostrar gracias al análisis de correlación que existe una relación entre la salinidad y los índices IndSal y NDVI en cultivos de caña de azúcar; una metodología similar se presenta en un estudio de caso de la salinidad en cultivos de arroz (Sigueñas *et al.*, 2019). Sin embargo, el análisis de correlación no es exclusivo para el estudio de relaciones entre parámetros físicos y características del suelo, también se proponen el análisis multivariado y de componentes principales que combinan además de la salinidad, indicadores como la humedad y la biomasa (Richards, 2013)

IV. Planteamiento del problema

El exceso de salinidad originado principalmente por el riego de los cultivos con aguas de mala calidad en la zona agrícola de Ixmiquilpan, Hidalgo, ha ocasionado el abandono de las tierras y el cambio de uso de los suelos destinados originalmente para la producción de alimentos, por lo tanto, se propone validar los índices IndSal, NDVI y la CE para identificar, clasificar y representar espacialmente los suelos salinos de la zona agrícola de Ixmiquilpan, Hidalgo

V. Pregunta de investigación

¿La validación y correlación entre los valores de los índices de teledetección IndSal y NDVI respecto de la CE permitirá establecer la clasificación y distribución espacial de los suelos salinos de la zona agrícola de Ixmiquilpan, Hidalgo

VI. Hipótesis

Los índices IndSal y NDVI han sido utilizados para el mapeo del impacto de la salinidad en zonas cultivadas con resultados positivos. En este trabajo se propone que si la correlación entre los valores de los índices IndSal, NDVI y la CE es inversa y significativa, entonces será posible identificar, clasificar y representar espacialmente los suelos salinos de la zona agrícola de Ixmiquilpan, Hidalgo

VII. Objetivos

General

Establecer la distribución de los suelos salinos de la zona agrícola de Ixmiquilpan, Hidalgo, a partir de la aplicación de los índices de teledetección IndSal y NDVI y su correlación con los valores de CE de los suelos.

Particulares

- Investigar la correlación entre los valores de IndSal, NDVI y CE de los suelos agrícolas de Ixmiquilpan, Hidalgo.
- Determinar la aplicabilidad de los índices de teledetección IndSal y NDVI en la clasificación e identificación de la distribución espacial de suelos salinos en la zona agrícola de Ixmiquilpan, Hidalgo.
- Clasificar a los suelos salinos de la zona agrícola del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo de acuerdo con el parámetro de CE.

VIII. Material y métodos

8.1 Área de estudio

El municipio de Ixmiquilpan se ubica en el centro-oeste del Estado de Hidalgo con coordenadas 20° 29" latitud norte, 99° 13" longitud oeste y a 1,700 metros sobre el nivel del mar (figura 2). Está conformado en un 70% por llanuras y lomeríos que corresponden a la zona del Eje Volcánico Transmexicano, el otro 30% se localiza en la Sierra Madre Oriental, sus elevaciones principales son los cerros: La Palma, Thito, La Muñeca, Xintza, Guadril, Temboo, Dexitzo (La Cruz) y Daxhie.

Su ubicación corresponde a la Región Hidrológica del Pánuco, en la cuenca del río Moctezuma, su clima predominante es BS1kw (estepario semiseco) de acuerdo con la clasificación climática de Köppen (García, 2004) con temperatura de 18.5°C, precipitación de 563.8 mm, valores anuales promedio, siendo los meses de junio y septiembre los de mayor precipitación mientras que febrero y diciembre corresponden a los meses más secos.

El municipio cuenta con una superficie de 486.84 kilómetros cuadrados los mismos que cuentan con los siguientes suelos de acuerdo con la WRB (2014) y porcentajes de acuerdo con el INEGI, (2014): Leptosols en un 45.0%, Phaeozems 35.0%, Vertisols 10.0%, Calcisols 5.2% y Regosols en 1.0%. Si bien el municipio se encuentra en una zona semiseca, la implementación de los sistemas de riego ha permitido el establecimiento de campos extensivos de cultivo por lo que el uso mayoritario de los suelos en el municipio es el agrícola ocupando un 30% del territorio donde se cultiva maíz, frijol, alfalfa, diversas hortalizas y tomate rojo o jitomate; entre otros, además de

especies frutales. La vegetación natural representa en el territorio un 20.0% de matorral, 13.2% bosque y 7.0% pastizal.

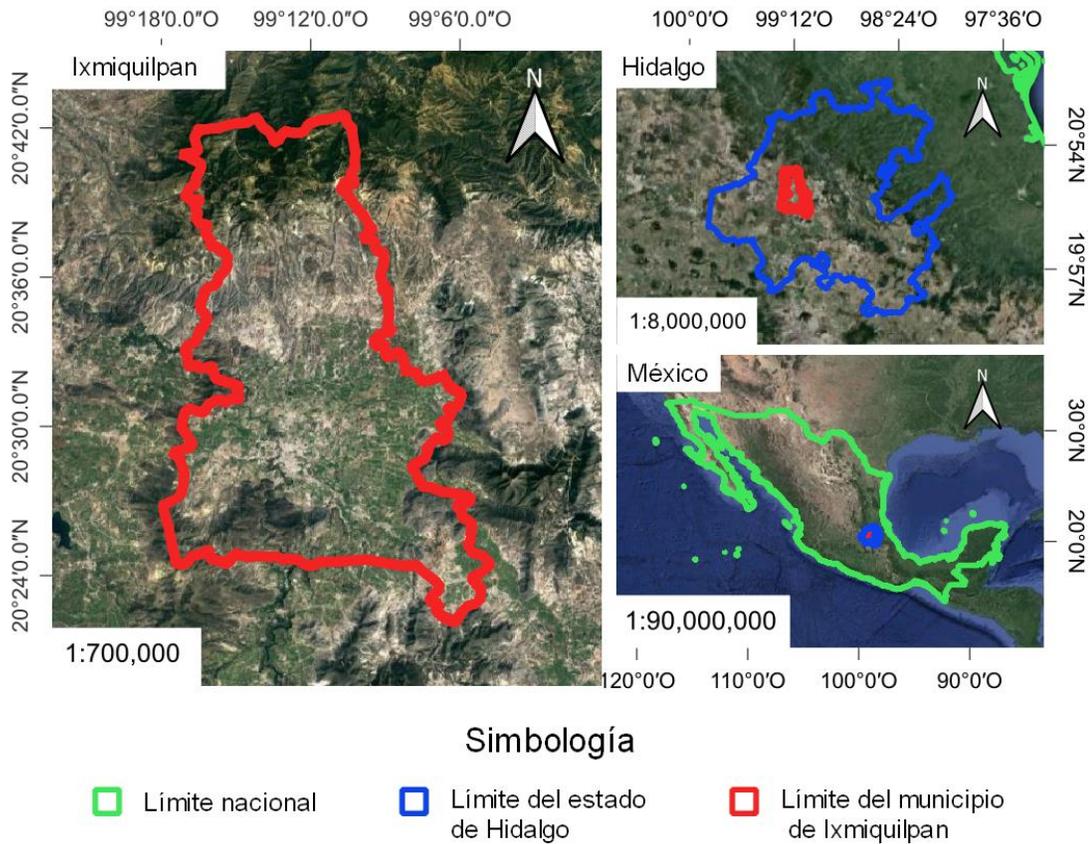


Figura 2. Ubicación geográfica del municipio de Ixmiquilpan. Elaboración propia. Datos INEGI, 2020. *Software Qgis Hannover 3.16*

8.2 Delimitación del área de estudio

El límite de Ixmiquilpan se extrajo de la capa de municipios de México de 2020 (archivo shape) escala 1:250 000 del INEGI (www.inegi.org), a partir de éste, se delimitó su zona agrícola por medio de la interpretación visual de la combinación de bandas 11, 8 y 2 (figura 3) que resalta las zonas con uso agrícola, lo anterior en una imagen Sentinel-2 de octubre de 2021 con resolución espacial de 20 m tipo S2MSI2A con corrección

atmosférica, obtenida a través de la plataforma *The Copernicus Open Access Hub* de la Agencia Espacial Europea (ESA) y que fue correspondiente con la zona con menor pendiente acotada entre las elevaciones de 1800 y 1900 msnm, todo lo anterior se realizó empleando el software *Qgis Hannover 3.16*.

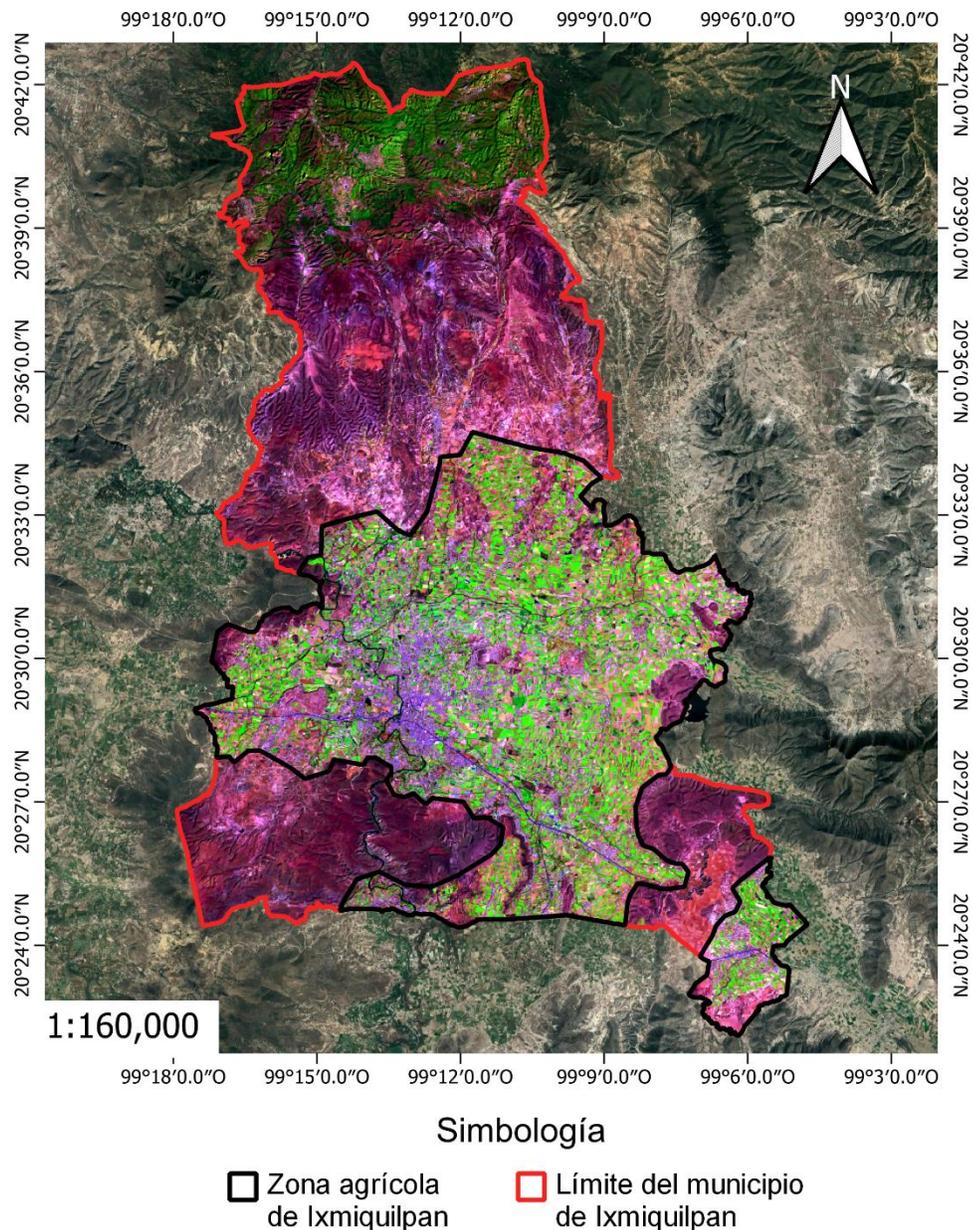


Figura 3. Zona agrícola del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo. La combinación de bandas 11, 8 y 2 resalta en verde brillante las zonas de cultivo. Ubicación geográfica de Ixmiquilpan. Datos INEGI, 2020. *Software Qgis Hannover 3.16*

8.3 Cálculo de los índices IndSal y NDVI

Ambos índices, Indsal y NDVI, se calcularon con la herramienta *Raster Calculator* del software *Qgis Hannover 3.16* de acuerdo con las fórmulas propuestas por Al-Khaier (2003) y Rouse, *et al.* (1974) respectivamente (fórmulas 1 y 2) lo anterior, a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 con resolución espacial de 20m tipo S2MSI2A para noviembre de 2021 y mayo de 2022 correspondientes con las fechas de muestreo de suelo.

Fórmula 1.

$$\text{IndSal} = \frac{\text{SWIR1} - \text{SWIR2}}{\text{SWIR1} + \text{SWIR2}}$$

Donde:

SWIR 1 y 2 bandas de infrarrojo de onda corta.

Fórmula 2.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$$

Donde:

NIR es banda de infrarrojo cercano
RED es banda del rojo.

8.4 Selección preliminar de sitios de muestreo

Las imágenes generadas con el cálculo de los índices IndSal y NDVI se interpretaron visualmente aumentando la precisión con una imagen *Google Earth* con resolución espacial de 2.5 m, se delimitaron 25 polígonos de zonas con suelos potencialmente salinos y 12 puntos de muestreo (figura 4), lo anterior tomando en cuenta los límites de los cultivos y la apariencia del terreno, cabe mencionar que en algunos casos la acumulación de sales era visible como zonas blanquecinas que tomando en cuenta su valor de IndSal sugerían la presencia de sales

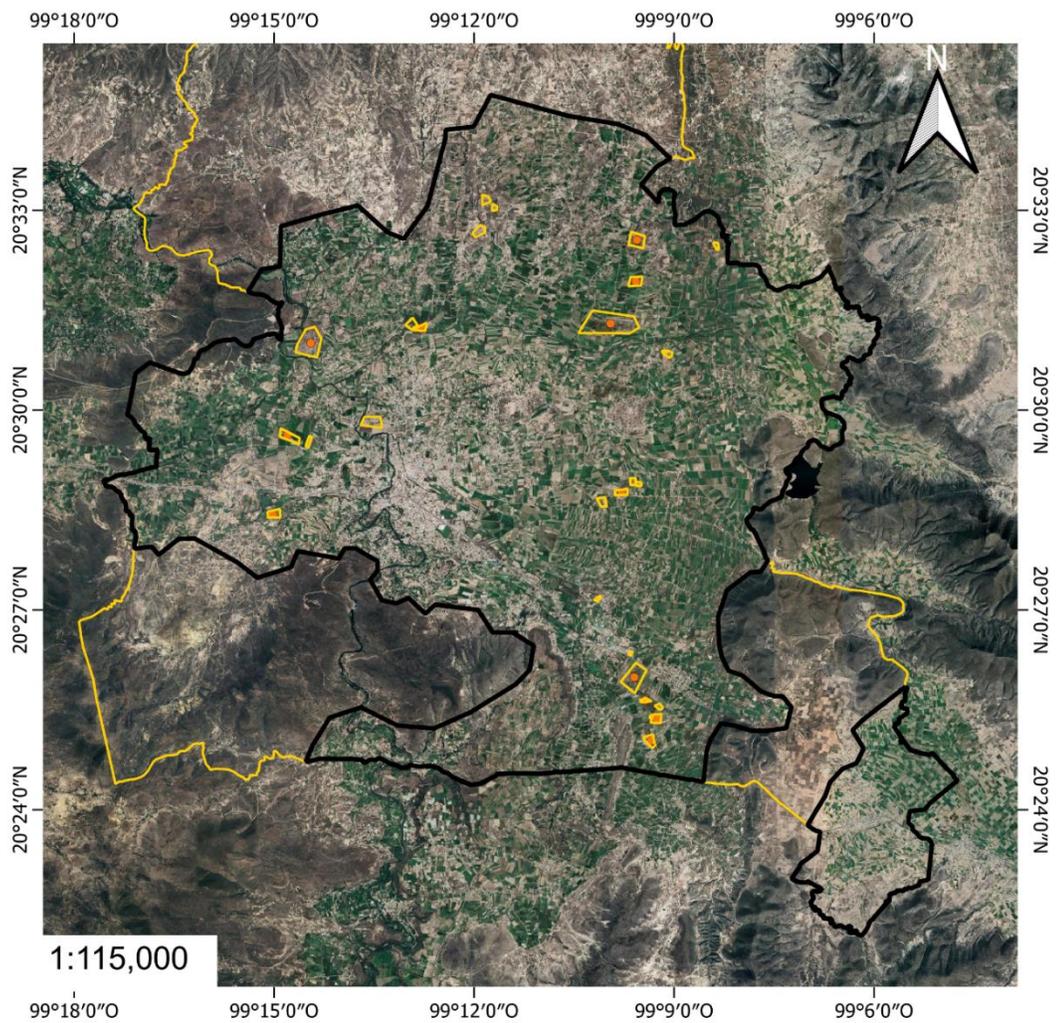


Figura 4. Polígonos de suelos potencialmente salinos y sitios preliminares de muestreo. Seleccionados a partir de la interpretación de los índices de teledetección IndSal y NDVI. Elaboración propia. Datos INEGI, 2020. *Software Qgis Hannover 3.16*

8.5 Muestreo de suelo

El muestreo de suelos se realizó durante los meses de noviembre de 2021 y abril de 2022 tomando muestras simples de los primeros 10 cm de suelo, en cada una de las zonas delimitadas como polígonos de suelos potencialmente fueron recolectados datos sobre las características físicas de los sitios como la presencia de sales superficiales y de vegetación halófila siendo estos los criterios aplicados para la toma de muestras. Además, se referenciaron geográficamente sitios que no mostraban indicios de salinidad para tomarlos como puntos de control adicionales.

8.6 Preparación y análisis de las muestras de suelo

Las muestras de suelo fueron trasladadas al laboratorio de la Unidad de Investigación en Sistemática Vegetal y Suelo, Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza (UMIEZ), planta alta, laboratorio 8, en la FES Zaragoza de la UNAM, para ser procesadas de acuerdo con la metodología descrita por la IUSS (2022) para el análisis de la CE en extracto de pasta de saturación.

Una vez secas y tamizadas con luz de malla de 2 mm, de cada muestra se prepararon pastas de saturación con 120g de suelo y agua destilada. Después de 24 horas de reposo se obtuvieron los extractos de saturación por el sistema Buchner-Kitasato y bomba de vacío. Finalmente, a cada extracto se le midió la CE con un potenciómetro marca *Conductronic* modelo PC18.

8.7 Interpretación de imágenes satelitales y remodelación de polígonos de suelos salinos

Con la información referenciada se reinterpretaban visualmente las imágenes satelitales generadas con los cálculos de los índices IndSal y NDVI y se obtuvieron los polígonos definitivos de suelos salinos.

Esta capa de polígonos de suelos salinos se clasificó de acuerdo con los valores de CE obtenidos de las muestras de los puntos de muestreo y tomando como referencia la escala propuesta por Richards (1954) basada en dicho parámetro.

8.8 Análisis estadístico

El cálculo del coeficiente de correlación entre los índices IndSal y NDVI y la CE se realizó con el complemento *XRealStatics* del *Software Excel* versión 2007, asimismo, se obtuvieron los modelos regresión y las gráficas correspondientes.

8.9 Clasificación supervisada

La elaboración del mapa final para la clasificación y distribución espacial de suelos salinos de la zona agrícola del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, se realizó mediante una clasificación supervisada con la aplicación del complemento *dzetsaka: Classification tool* versión 3.70 desarrollada por Karasiak (2021) para el *software Qgis* cuyo algoritmo de clasificación se basa en el modelo de mezcla Gaussiana. Los campos de entrenamiento se definieron de acuerdo con los polígonos obtenidos anteriormente y los datos recabados en campo. Se ubicaron 10 puntos para cada una de las siguientes

categorías: uso no agrícola, uso urbano tomando en cuenta elementos visuales en las imágenes satelitales como la presencia de construcciones o vegetación natural; para el caso de las clases de suelos no salinos, suelos ligeramente salinos, moderadamente salinos, fuertemente salinos y extremadamente salinos (Figura 5) se tomaron puntos de entrenamiento dentro de los polígonos antes clasificados a partir del muestreo de suelos.

La clasificación final fue revisada de manera sistemática para corregir aquellas zonas que no correspondieran con suelo agrícola y fueran asignadas a la clase de uso no agrícola o urbano según fuese el caso.

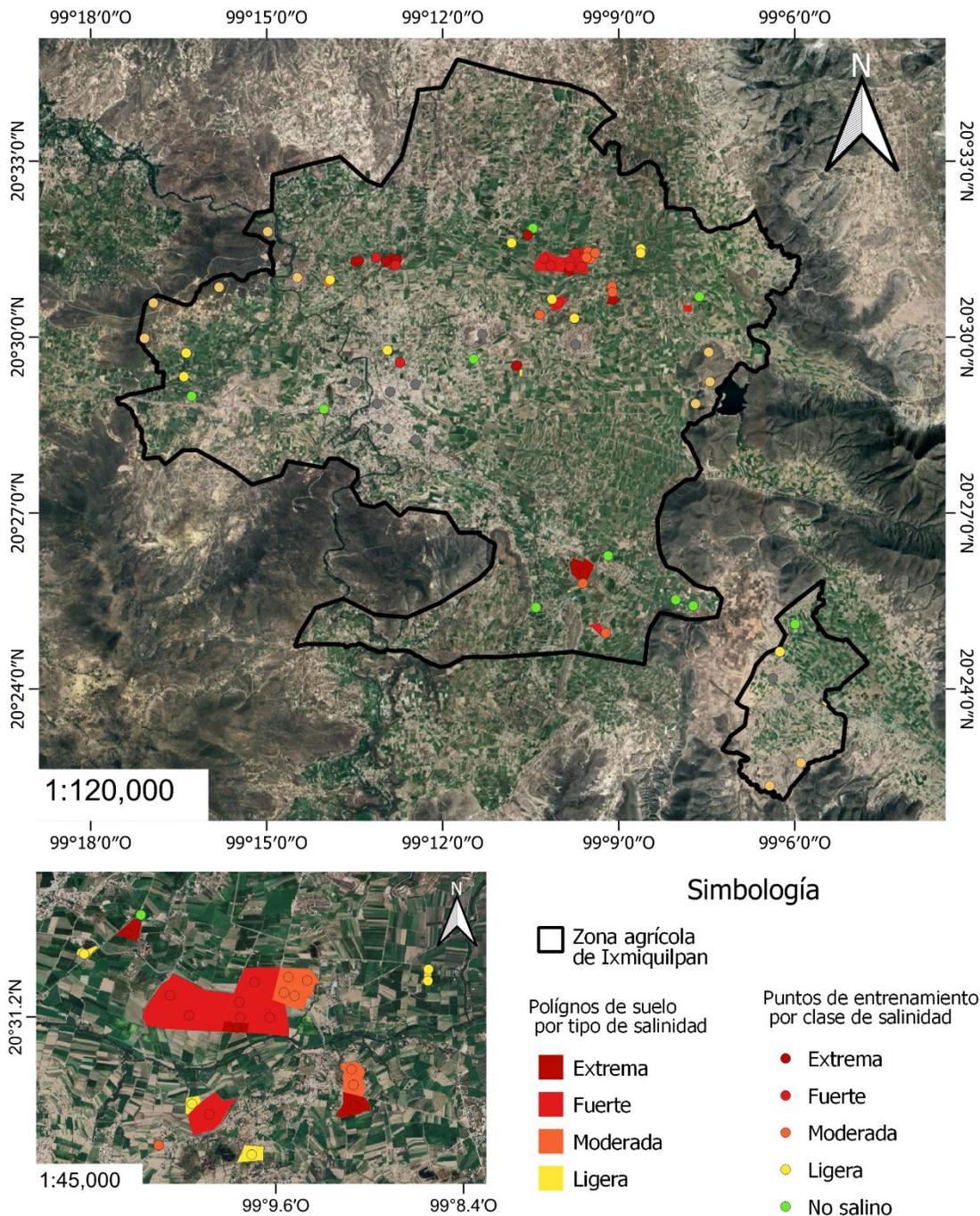


Figura 5. Puntos de entrenamiento en la zona agrícola de Ixmiquilpan. Tomados con base en los polígonos obtenidos de la interpretación de imágenes satelitales y datos de campo. Elaboración propia. Datos INEGI, 2020. *Software Qgis Hannover 3.16.*

IX. Resultados

9.1 Cálculo de los índices IndSal y NDVI

Los valores del IndSal para el mes de noviembre de 2021 fueron de -0.051 a 0.410 (figura 6a) y para mayo de 2022 de -0.072 a 0.249 (figura 6b). El NDVI mostró valores de -0.269 a 0.944 y de -0.064 a 0.683 para noviembre de 2021 (figura 7a) y mayo de 2022 (figura 7b) respectivamente.

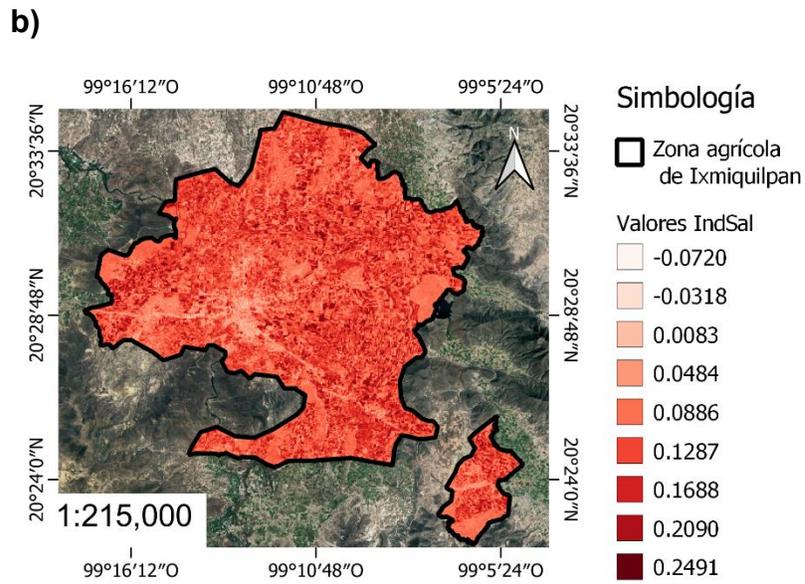
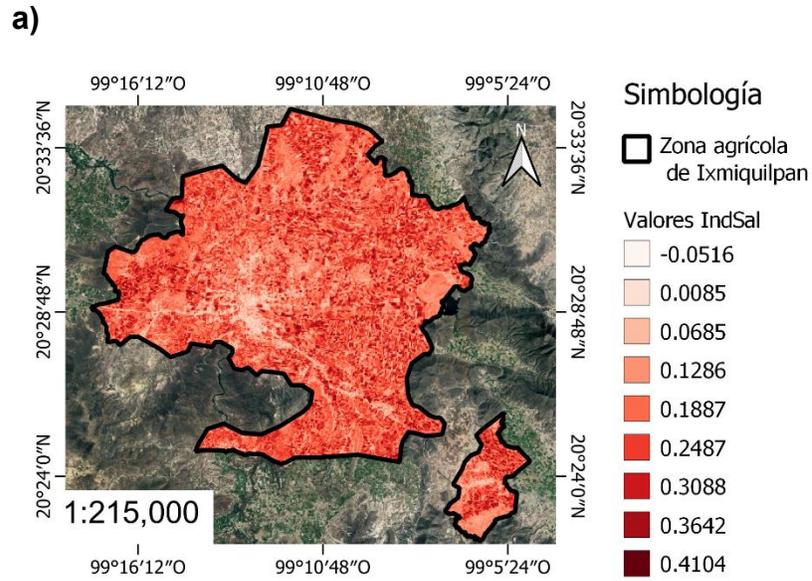


Figura 6. Imágenes y valores de IndSal para la zona agrícola de Ixmiquilpan.
a) Imagen y valores de IndSal para noviembre de 2021. **b)** Imagen y valores de IndSal para mayo de 2022.

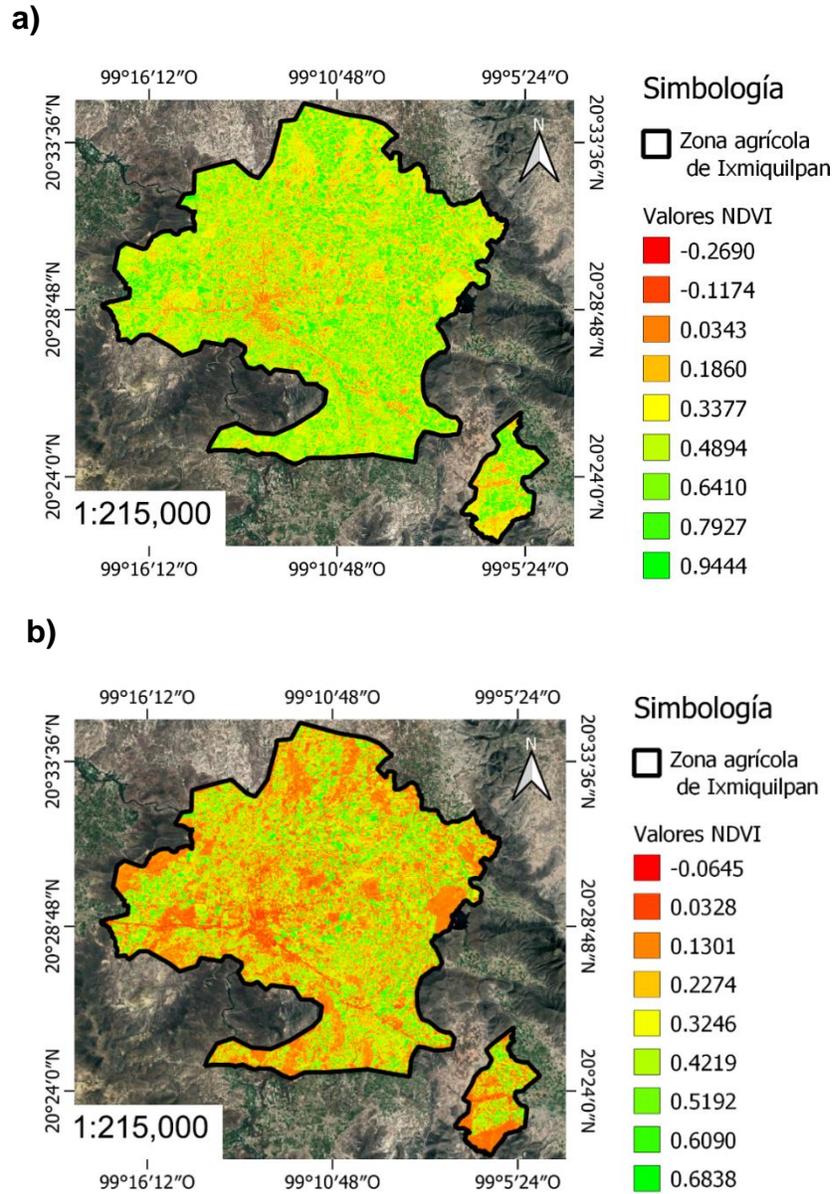


Figura 7. Imágenes y valores de NDVI para la zona agrícola de Ixmiquilpan.
a) Imagen y valores de NDVI para noviembre de 2021. **b)** Imagen y valores de NDVI para mayo de 2022.

9.2 Análisis de conductividad eléctrica

Con base en los criterios aplicados en el trabajo de campo se tomaron muestras en 42 sitios seleccionados como potencialmente salinos que presentaron una conductividad eléctrica entre los 2.06 y 19.85 dS/m, mientras que para los sitios de control de suelos no salinos se tomaron 12 muestras cuyo rango de CE fue de 0.9 a 1.97 dS/m (figura 8).

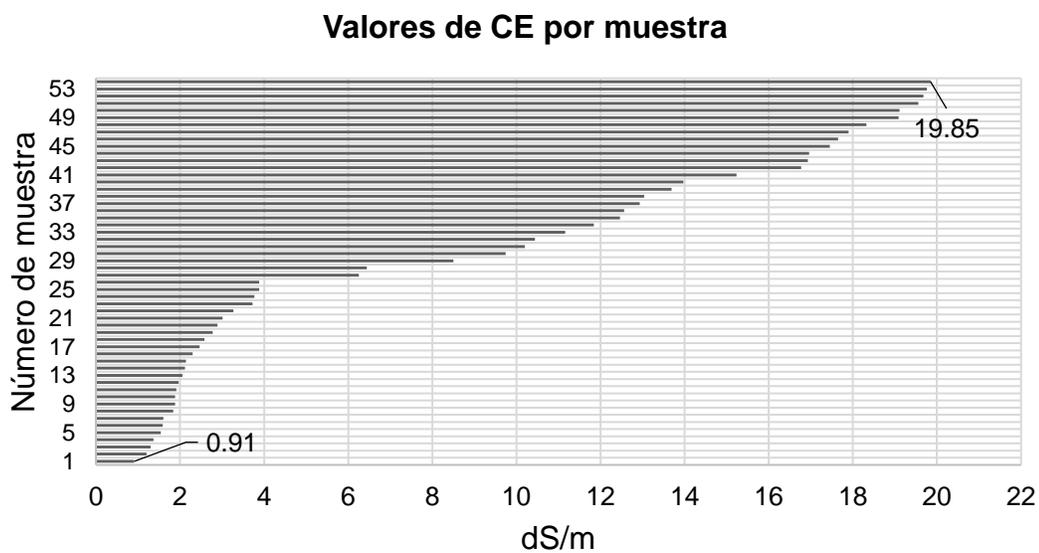


Figura 8. Valores de CE para las 54 muestras de suelo del área agrícola irrigada con aguas residuales en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo.

Los datos de campo mostraron que, en aquellos sitios con menor CE, entre los 0.9 y 1.97 dS/m, predominaron los campos de cultivo de alfalfa, maíz y cebolla, productivas en toda su extensión. Por el contrario, en los sitios donde la CE fue mayor a los 6.0 dS/m se observaron casos de baja productividad y el abandono de las parcelas; también se observó el predominio de especies vegetales pertenecientes a los géneros *Cynodon*,

Chenopodium, *Tamarix*, *Thypa* y *Rosmarinus*. En los casos donde la CE superó los 13 dS/m se observó una tendencia hacia el cambio de uso de suelo del agrícola al habitacional.

Las muestras también fueron agrupadas de acuerdo con la clasificación de Richards (1954) (cuadro 1). Los suelos clasificados con salinidad ligera fueron los predominantes representados por 14 de las 42 muestras tomadas de suelos clasificados con algún grado de salinidad, seguidos por aquellos con salinidad fuerte y extrema con 13 muestras cada uno, siendo los que presentaron una salinidad moderada los menos representados con solo dos muestras (figura 9).

Cuadro 1. Clasificación de la salinidad en suelos (Richards, 1954)

CE (dSm⁻¹)	Clase de salinidad
0-2	No salino
2-4	Ligeramente salino
4-8	Moderadamente salino
8-16	Fuertemente salino
>16	Extremadamente salino

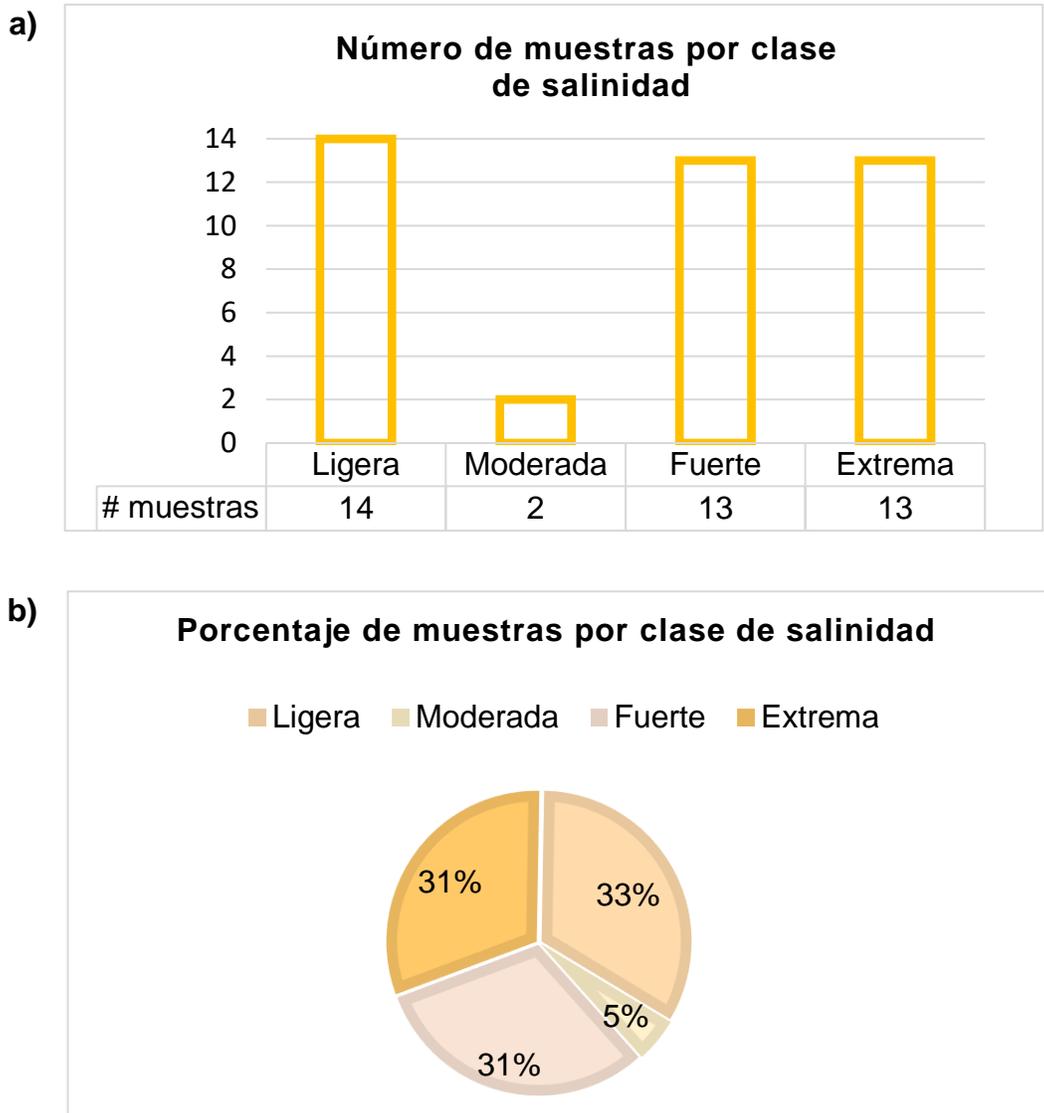


Figura 9. Número de muestras por clase de salinidad. Valores en número de muestras **(a)** y en porcentaje **(b)**.

9.3 Análisis de correlación y modelos de regresión

Los valores de correlación entre la CE de las muestras y los índices NDVI e Indsal correspondientes al mes de noviembre de 2021 evidenciaron una relación moderadamente inversa (Roy-García *et al.*, 2019) con valores alrededor de -0.55 (cuadro 2) recordando que el valor de máxima correlación es de 1. Un tercer ensayo de correlación fue realizado entre ambos índices demostrando tener una relación fuerte y proporcional con un valor superior a 0.80 (cuadro 2).

Cuadro 2. Coeficientes de correlación entre los índices y la CE de las muestras suelo tomadas en noviembre de 2021

Correlación	Coefficiente de correlación
IndSal vs CE	-0.558
NDVI vs CE	-0.551
NDVI vs IndSal	0.878

El modelo de regresión lineal entre el IndSal y la CE (figura 10) resultó tener una R^2 (coeficiente de determinación) de 0.3091, es decir, alrededor de un 30% de relación. Para el caso del modelo entre el NDVI y la CE se obtuvo una relación similar (figura 11). El modelo entre el IndSal y el NDVI (figura 12) mostró el valor de R^2 más alto, por encima del 0.7 o 70%.

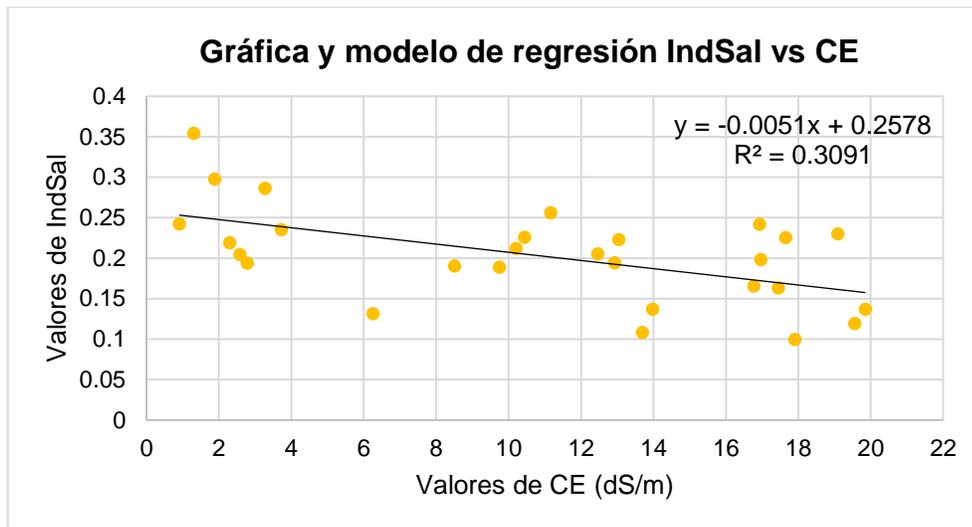


Figura 10. Modelo de relación entre IndSal y la conductividad eléctrica en las muestras de suelo de noviembre de 2021

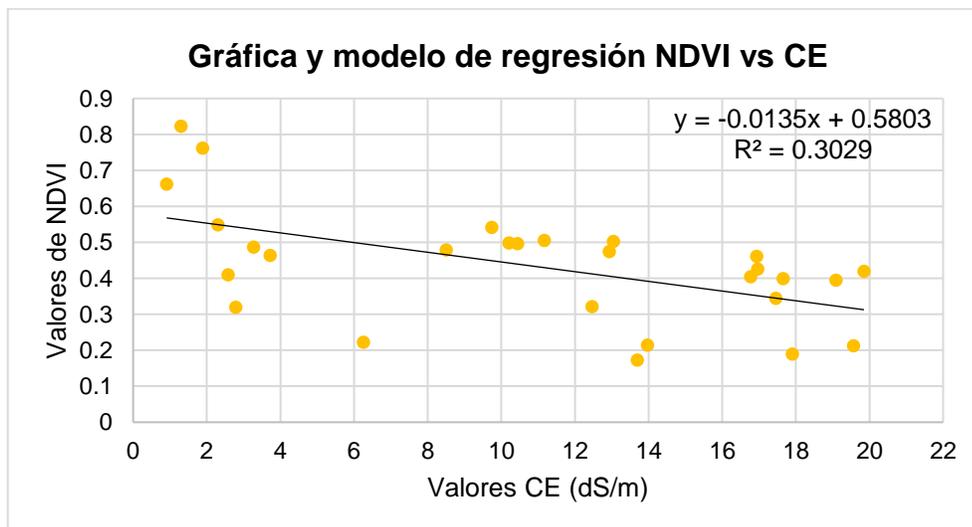


Figura 11. Modelo de relación entre NDVI y la conductividad eléctrica en las muestras de suelo de noviembre de 2021

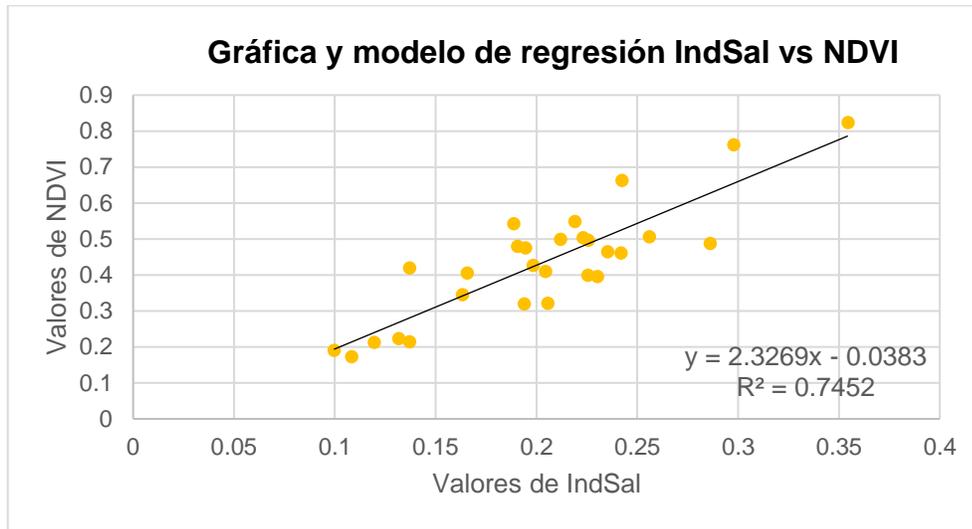


Figura 12. Modelo de relación entre IndSal y NDVI en las muestras de suelo de noviembre de 2021

Los valores de correlación entre el parámetro CE obtenidos para las muestras e índices de mayo de 2022 resultaron ser contrastantes con respecto de los obtenidos para la temporada anterior. El coeficiente de correlación entre la CE y el Indsal para este caso mostró un valor de 0.323, es decir una correlación directa y débil (Roy-García *et al.*, 2019), similar a la relación entre el parámetro físico y el NDVI (cuadro 3). La correlación entre índices resultó ser la más alta con un coeficiente de 0.902.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación entre los índices y la CE de las muestras suelo tomadas en mayo de 2021

Correlación	Coefficiente de correlación
IndSal vs CE	0.323
NDVI vs CE	0.312
NDVI vs IndSal	0.902

Los modelos de regresión lineal para los índices y la CE (figuras 13 y 14) mostraron también relaciones poco significativas para mayo de 2022. En ambos casos el coeficiente de determinación se encontró alrededor del 0.1 o 10%. El modelo de regresión entre los índices (figura 15) demostró un valor de R^2 0.8 es decir 80% de relación (Palma, 2022).

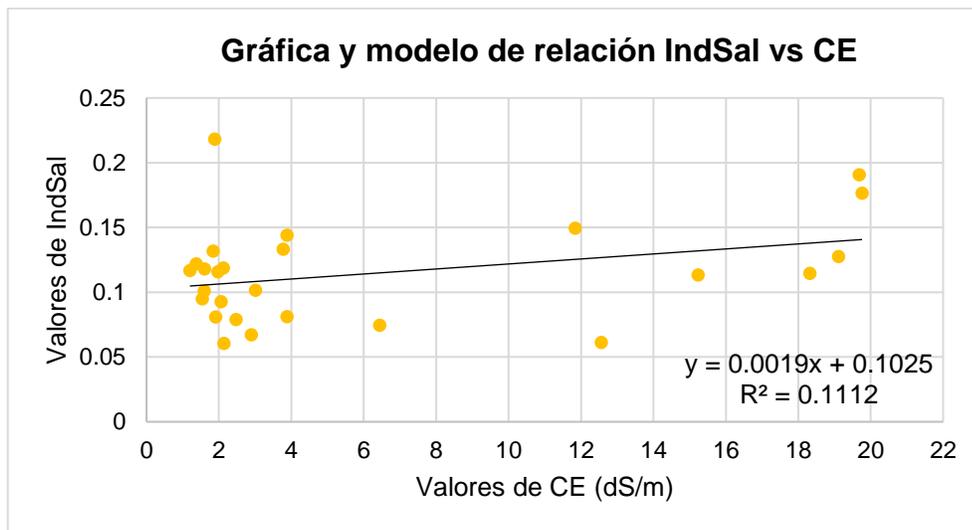


Figura 13. Modelo de relación entre IndSal y la conductividad eléctrica en las muestras de suelo de mayo de 2022

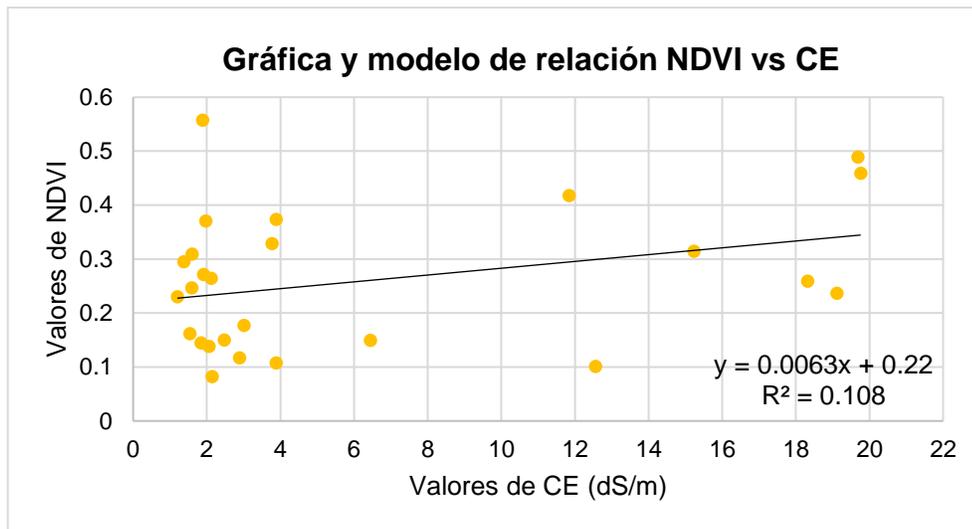


Figura 14. Modelo de relación entre NDVI y la conductividad eléctrica en las muestras de suelo de mayo de 2022

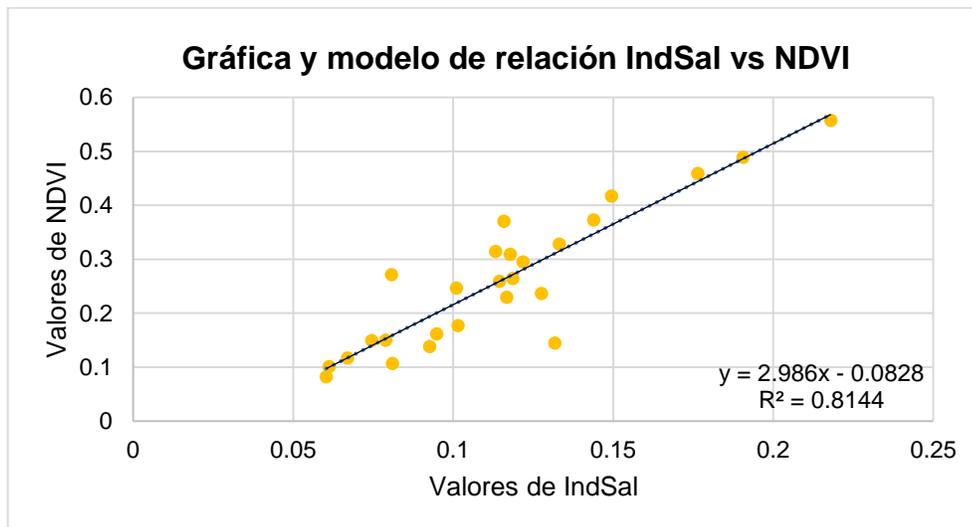


Figura 15. Modelo de relación entre IndSal y NDVI en las muestras de suelo de mayo de 2022

9.4 Interpretación de imágenes satelitales

Para la interpretación final de los índices se seleccionó la imagen de noviembre de 2021 al tener la mayor significancia estadística de acuerdo con el análisis de correlación. Como resultado de la interpretación de los índices IndSal y NDVI, los datos de campo y de CE se obtuvieron 37 polígonos que fueron a su vez clasificados en las clases de suelos salinos propuestas anteriormente (figura 16). Los suelos fuertemente salinos y ligeramente salinos fueron predominantes con 12 polígonos cada uno, sin embargo la clase de suelos fuertemente salinos está mayormente representada con 12.9 ha mientras que la clase de suelos ligeramente salinos se representa por 1.7 ha; los suelos extremadamente salinos se representan con 7 polígonos y poco más de 7 ha en suma, finalmente los suelos moderadamente salinos ocuparon 3.2 ha distribuidas en 6 polígonos (cuadro 4).

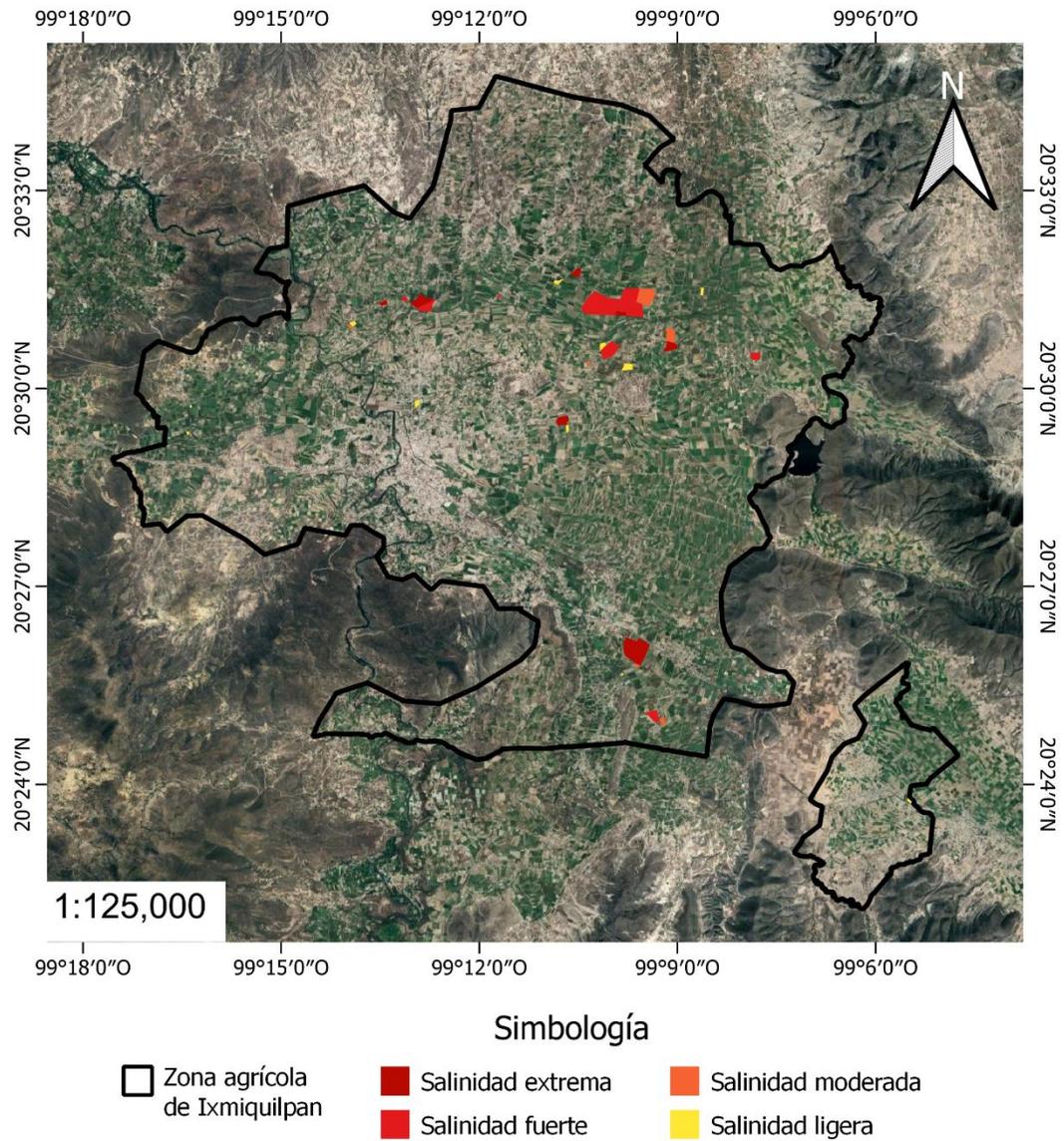


Figura 16. Polígonos de las clases de suelos salinos generados a partir de la interpretación de imágenes satelitales. Elaboración propia. Datos INEGI, 2020. *Software Qgis Hannover 3.16*

Cuadro 4. Número de polígonos y superficies de suelo por clase de salinidad en la zona agrícola de Ixmiquilpan, Hidalgo

Clase de salinidad	Número de polígonos	Área (ha)
Ligeramente salino	12	1.783
Moderadamente salino	6	3.209
Fuertemente salino	12	12.291
Extremadamente salino	7	7.069

9.5 Clasificación supervisada y mapa final

La clasificación supervisada de la imagen de noviembre de 2021 demostró que la superficie dedicada al uso agrícola dentro del municipio ocupa aproximadamente 12071.31 ha (cuadro 5), la categoría de suelos afectados por salinidad extrema es la predominante con el 42.2% del total de la superficie de suelos agrícolas, la siguiente categoría con mayor superficie fue la de los suelos no salinos la cual ocupa poco más del 28%, seguida la ligera, moderada y fuertemente salinos respectivamente (cuadro 6). La representación de los datos se muestra a continuación como el mapa de distribución de áreas de los suelos salinos dentro de la zona agrícola de Ixmiquilpan en la figura 17.

Cuadro 5. Superficies y porcentajes por clase de uso de suelo

Clase	Área (ha)	%
Uso agrícola	12071.31	53.13%
Uso no agrícola	8506.86	37.44%
Uso urbano	2142.76	9.43%
Total	22720.93	100%

Cuadro 6. Superficies y porcentajes por clase de salinidad en los suelos de la zona agrícola de Ixmiquilpan

Nombre	Área (ha)	%
Extremadamente salino	5094.39	42.20%
Fuertemente salino	31.2	0.26%
Moderadamente salino	1428.88	11.84%
Ligeramente salino	2053.21	17.01%
No salino	3463.63	28.69%
Total	12071.31	100.00%

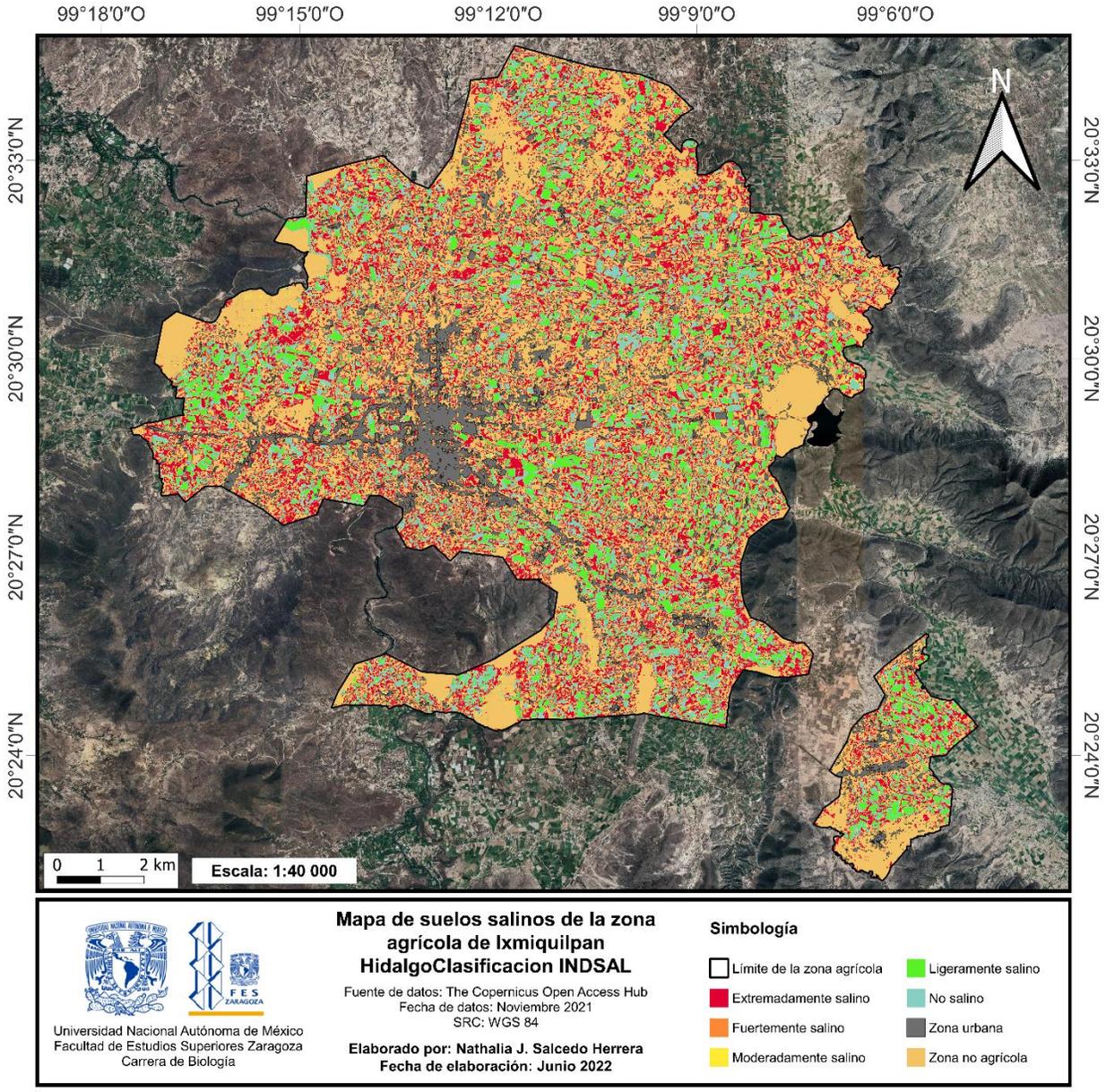


Figura 17. Distribución de suelos salinos en la zona agrícola del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo.

X. Análisis y discusión de resultados

10.1 Conductividad eléctrica

La correspondencia de los valores de CE de las 42 muestras de los sitios seleccionados previamente como potencialmente salinos y su clasificación de salinidad de acuerdo con los valores sugeridos por Richards (1954) (cuadro 7), con la interpretación del índice IndSal en conjunto con el NDVI, demuestra que es posible identificar suelos salinos. Los valores de CE de los sitios de control comparados con los valores sugeridos por la misma escala para los suelos no salinos también apoyan la utilidad de los índices para localizar suelos no afectados salinidad.

Cuadro 7. Número de muestras de suelo por clase de salinidad según la escala de Richards (1954) tomadas en noviembre de 2021 y mayo de 2022

Escala de Richards (1954)		Muestras	Número de muestras
Clase de salinidad	CE (dSm⁻¹)	CE (dSm⁻¹)	
No salino	0-2	0.91-1.97	12
Ligeramente salino	2-4	2.06-3.88	14
Moderadamente salino	4-8	6.25-6.44	2
Fuertemente salino	8-16	8.5-15.23	13
Extremadamente salino	>16	16.77-19.85	13

10.2 Vegetación halófila

La presencia de especies halófilas pertenecientes a los géneros *Cynodon*, *Chenopodium*, *Spergularia* y *Thypa* (Guerra, 2014; Gonzáles *et al.*, 2008), es un indicador que puede ser visualizado en las imágenes satelitales de mayor resolución como las obtenidas a través de Google Earth. Las formas herbáceas y arbustivas, como las de las especies de los géneros *Cynodon* o *Chenopodium*, son visibles en las imágenes satelitales como parches irregulares de vegetación (figura 18 a y b). En el caso del tule (*Thypa*), este también es visible como figuras en color verde oscuro de forma irregular (figura 17 c y d), ambos grupos de plantas halófilas son fácilmente distinguibles una vez que contrastan con la disposición regular de las especies cultivables (figura 18 e y f).

En este contexto, la presencia de vegetación halófila no solo es una característica práctica para identificar suelos salinos en campo, sino que también es un elemento útil en la interpretación de información satelital para identificar suelos salinos en aquellas áreas no visitadas o sin reconocimiento previo.

a)



b)



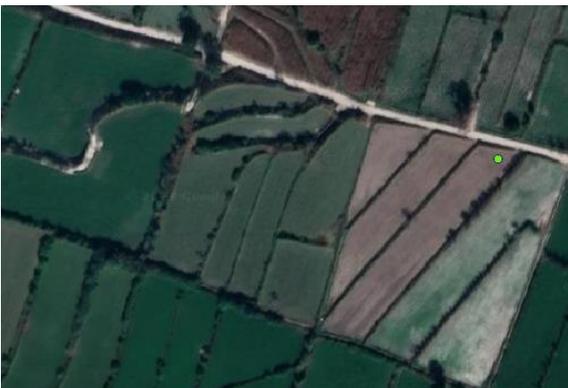
c)



d)



e)



f)



Figura 18. Comparación entre imágenes satelitales Google Earth y la cobertura de especies halófilas. **a)** Imagen satelital de especies herbáceas y arbustivas halófitas (sitios de muestreo en puntos rojos) y **b)** vista en campo; **c)** imagen satelital los tulares (sitios de muestreo en puntos amarillos), **d)** vista de tulares en campo; **e)** imagen satelital que muestra zonas de cultivo y **f)** vista en campo.

10.3 Análisis de correlación de la temporada húmeda

El análisis de correlación entre el índice IndSal y la CE de las imágenes de noviembre de 2021 mostró una relación moderada y proporcionalmente inversa de acuerdo con el valor de -0.558 mostrando la tendencia esperada, es decir, el IndSal disminuye cuando al CE aumenta (figura 19). Resultados similares se encontraron en la aplicación de dichos índices en el estudio de la salinidad relacionada con la productividad de cultivos de arroz y azúcar (Soca, *et al.*, 2016; Sigueñas *et al.*, 2019) sin embargo, los trabajos antes mencionados toman para su modelo de regresión el uso de bandas separadas y no los valores de reflectancia integrados en índices. Por otro lado, el modelo de regresión entre el IndSal y la CE resulta más cercano al modelo presentado por Al-Khaier (2003), autor del índice.

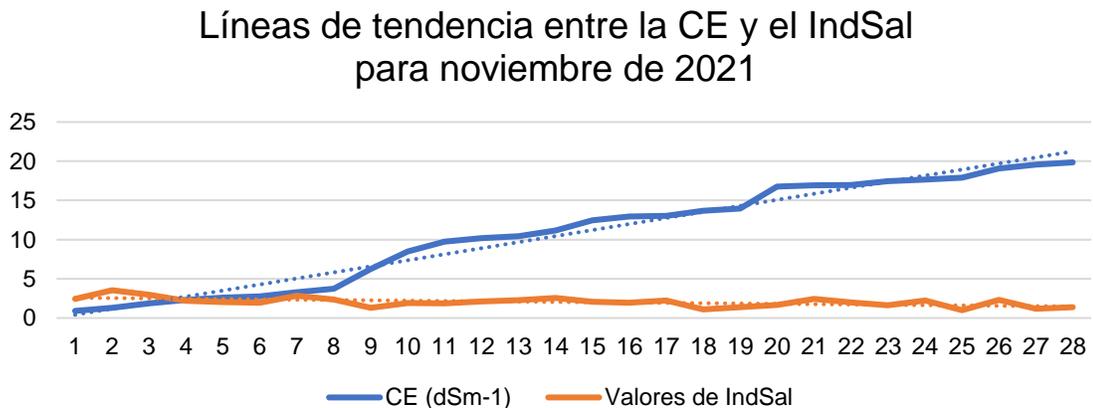


Figura 19. Líneas de tendencia entre la CE y el IndSal para noviembre del 2021. Se observa que cuando la CE aumenta el IndSal disminuye. Los valores del índice fueron multiplicados por 10 para igual la magnitud de la CE.

La relación moderadamente inversa representada por el valor de -0.551 en el análisis de correlación, entre el NDVI y la CE para noviembre de 2021 demuestra que a mayor concentración de salinidad menor es el vigor de la vegetación (figura 20). El NDVI como índice de alta confiabilidad basado en la respuesta espectral de la actividad fotosintética y del vigor de la vegetación (Muñoz, 2013), mostró una fuerte correlación con el IndSal; las zonas con bajos valores de NDVI están relacionadas con el aumento de estrés en el desarrollo de las plantas, por lo tanto, al tener una relación directa con el IndSal y con la salinidad de suelos corroborada por la CE, se interpreta que dicho estrés es ocasionado por salinidad. Basados en dicha interpretación Aimetta y colaboradores (2020) demostraron que en efecto es posible detectar cultivos que se encuentran bajo estrés provocado por el aumento de sales en el suelo a partir del NDVI en conjunto con otros tipos de información cartográfica y datos de campo.

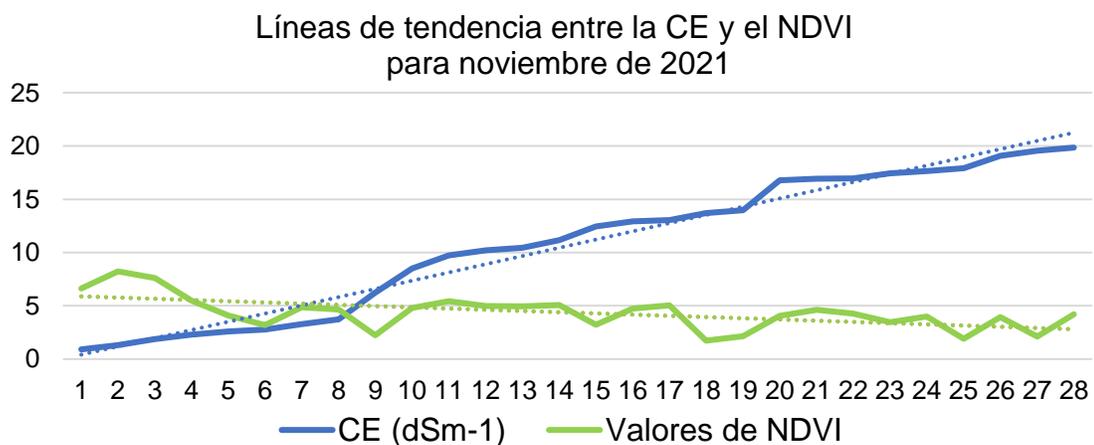


Figura 20. Líneas de tendencia entre la CE y el NDVI para noviembre del 2021. Se observa que cuando la CE aumenta el NDVI disminuye. Los valores del índice fueron multiplicados por 10 para igual la magnitud de la CE.

10.4 Análisis de correlación de la temporada seca

El análisis de correlación entre los índices IndSal y NDVI con la CE demostró que existe influencia de la época del año en la respuesta espectral de los suelos salinos, lo que se refleja en los valores de los índices calculados con datos satelitales.

De acuerdo con los datos obtenidos, la relación entre los índices y la CE de los suelos en los puntos muestreados en noviembre de 2021 presentó valores con una relación moderada, mientras que los datos de mayo de 2022 resultaron relacionados con bajo coeficiente, a continuación, se presentan algunas de las causas que podrían explicar la diferencia en el comportamiento de la relación de los índices con la CE entre la época húmeda y la de estío.

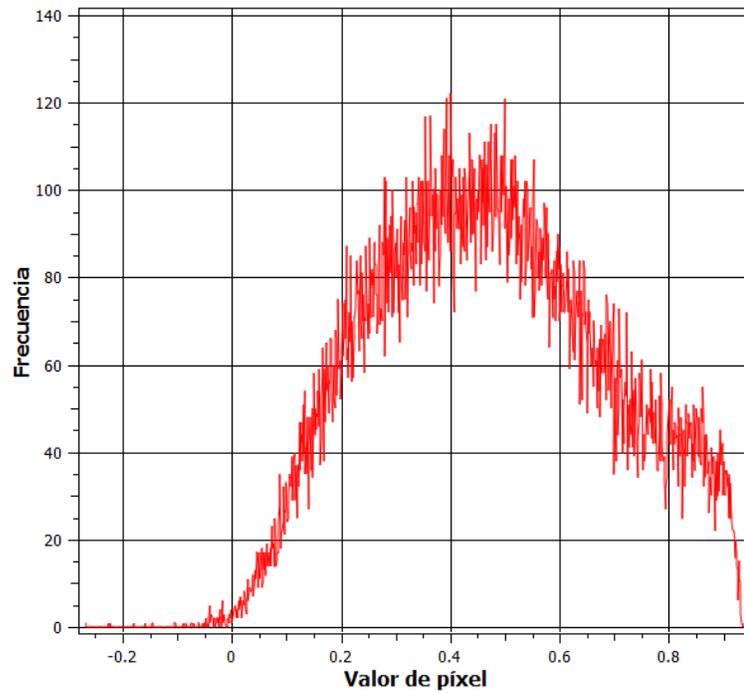
El mes de noviembre corresponde a la época de lluvia, por lo que los cultivos y la vegetación se encuentran más activos, lo que se refleja en el NDVI con valores cercanos a 1 (Muñoz, 2013) (figura 21), además de que las sales superficiales son lixiviadas en el suelo gracias a la lluvia, por el contrario, durante mayo que corresponde a la época de estío, las sales se acumulan en el suelo debido a la evaporación del agua, pero también en esta temporada se comienzan a preparar las parcelas y el suelo agrícola se encuentra descubierto, la vegetación natural también reduce su actividad y se presentan valores de NDVI bajos (Muñoz, 2013) (figura 22) que no necesariamente se relacionan con el efecto de la salinidad en la vegetación.

En cuanto al IndSal éste índice demostró tener un bajo contraste entre los valores de los suelos salinos y los suelos descubiertos o con baja actividad vegetal en la imagen de mayo tomada durante la época de estío (figura 23), mientras que en la imagen de la

temporada de lluvias (figura 24) es más clara la diferencia de los suelos que se encuentran afectados por salinidad, la vegetación natural y los cultivos en buen estado.

La diferencia entre el comportamiento estadístico de ambas temporadas sugiere que para obtener una interpretación más confiable del IndSal debe ser calculado en imágenes de los meses húmedos cuando el vigor de las especies cultivadas permite diferenciar las zonas sin cobertura vegetal asociada a salinidad y reduce la posibilidad de clasificar suelos en reposo con suelos salinos; lo anterior respalda la decisión de ejecutar la clasificación supervisada del IndSal a partir de las imágenes tomadas durante noviembre de 2021 para obtener el mapa final de los suelos salinos de la zona agrícola de Ixmiquilpan.

a)



b)

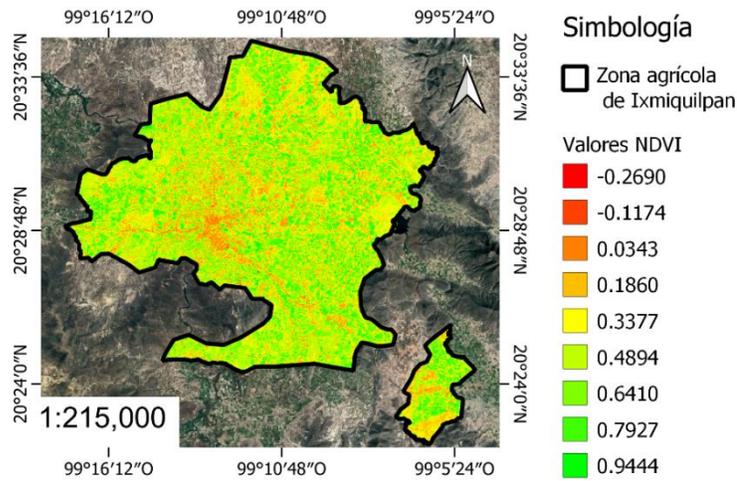
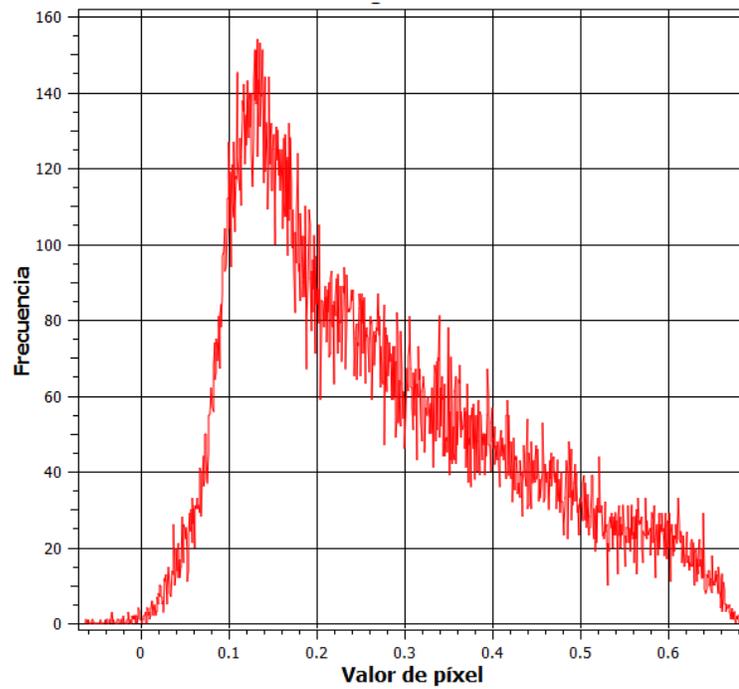


Figura 21. a) Histograma e **b)** imagen y valores del NDVI para noviembre de 2021. Valor mínimo: -0.269036. Valor máximo=0.94438

a)



b)

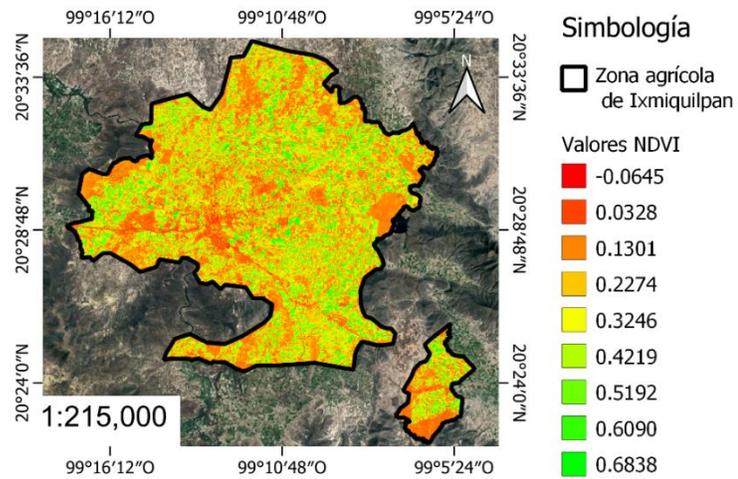
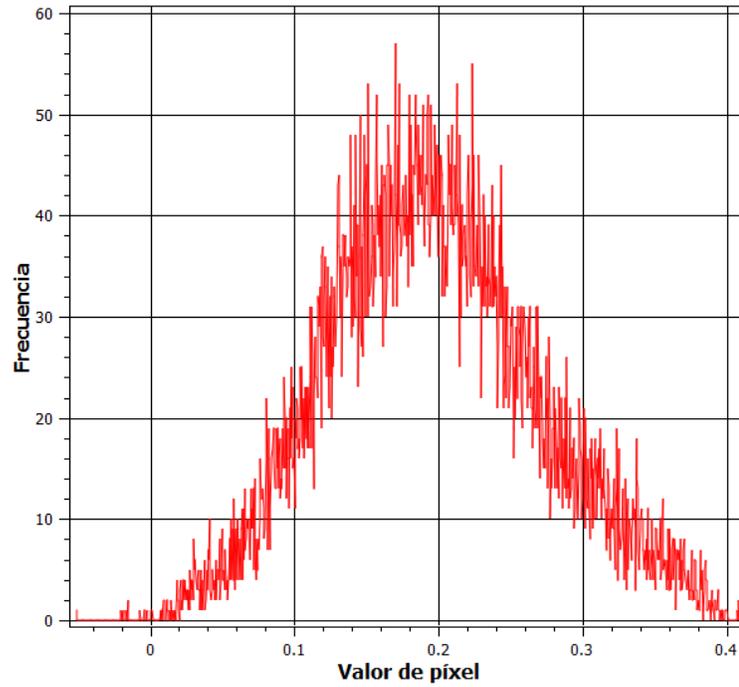


Figura 22. a) Histograma e b) imagen y valore del NDVI para mayo de 2022. Valor mínimo: -0.0644593. Valor máximo= 0.68380

a)



b)

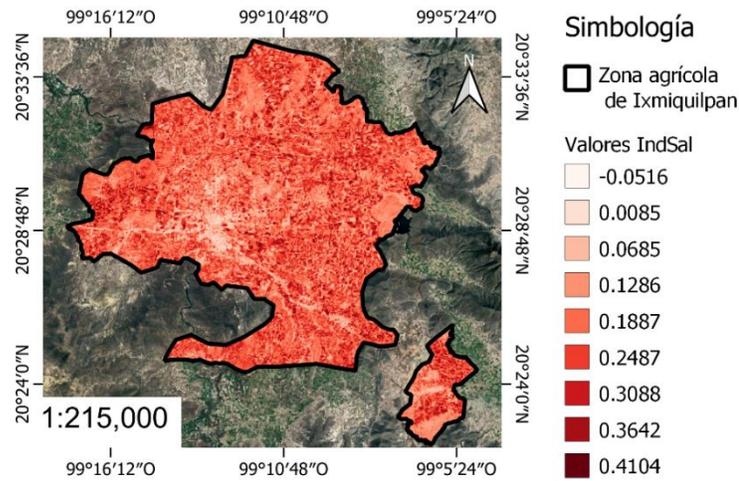


Figura 23. a) Histograma e b) imagen del IndSal para noviembre de 2021. Valor mínimo: -0.0516088. Valor máximo= 0.410443

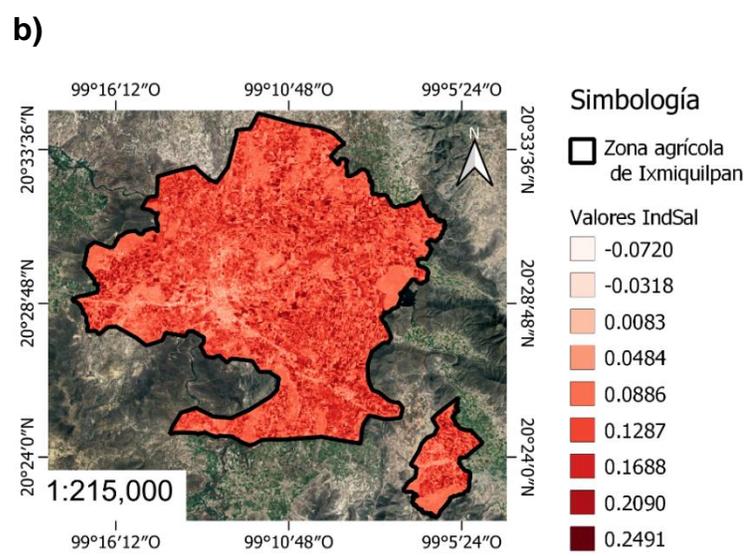
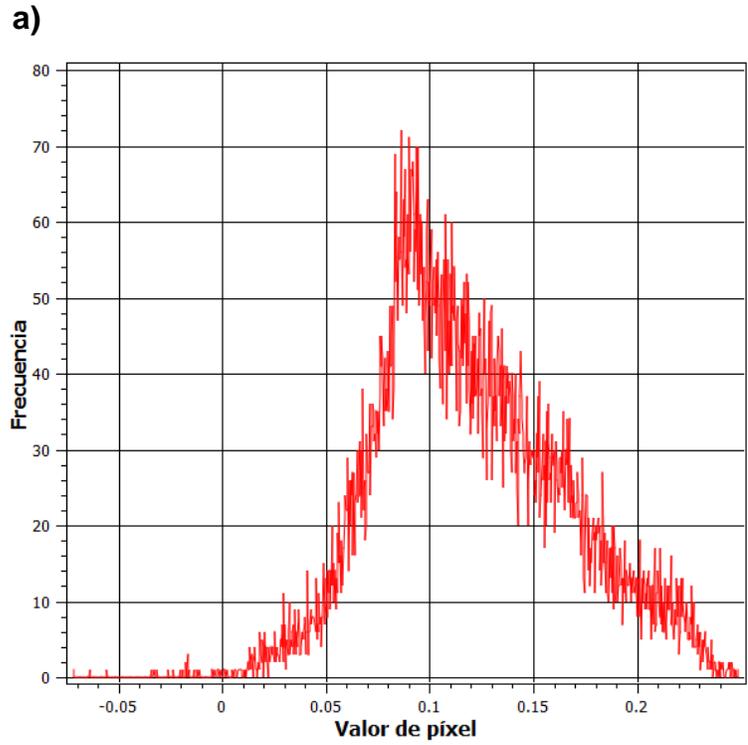


Figura 24. a) Histograma e b) imagen del IndSal para mayo de 2022. Valor mínimo: -0.0719603 . Valor máximo= 0.24911

10.5 Interpretación de imágenes satelitales, clasificación supervisada y mapa final

De acuerdo con la metodología de interpretación visual de imágenes satelitales es posible identificar patrones asociados a distintas características relacionadas directamente con la respuesta espectral de los elementos que cubren el suelo (Dwivedi, 2017). Gracias al IndSal es posible observar que los suelos salinos presentan patrones de tonos desordenados y oscuros (figura 25a) los cuales son asociados con la presencia de vegetación halófila, acompañados por manchas de tonos más claros que de acuerdo con la escala de rojos seleccionada para representar el IndSal indican valores bajos del índice, es decir, presencia de salinidad (Al-Khaier, 2003). Al comparar la misma zona con la imagen del NDVI es posible observar que los patrones antes descritos coinciden con los tonos amarillos, naranjas o rojos que representan niveles bajos de vigor vegetal de acuerdo con la rampa de color utilizada para la representación del NDVI (figura 25b).

La identificación de los diferentes patrones de color, al igual que con las imágenes de apariencia real, es más sencilla gracias a la notoria diferencia que hay con las zonas donde los cultivos no han sido afectados por la salinidad, donde el IndSal muestra patrones más regulares (figura 25c) asociados con el acomodo de las especies cultivables y el NDVI presenta tonos verdes más vivos que indican un mayor vigor vegetal (figura 25d). Cabe destacar que los suelos clasificados como extremadamente salinos fueron los más sencillos de identificar en las imágenes satelitales, lo anterior debido a la alta visibilidad de los depósitos salinos sobre la superficie del suelo (figura 26).

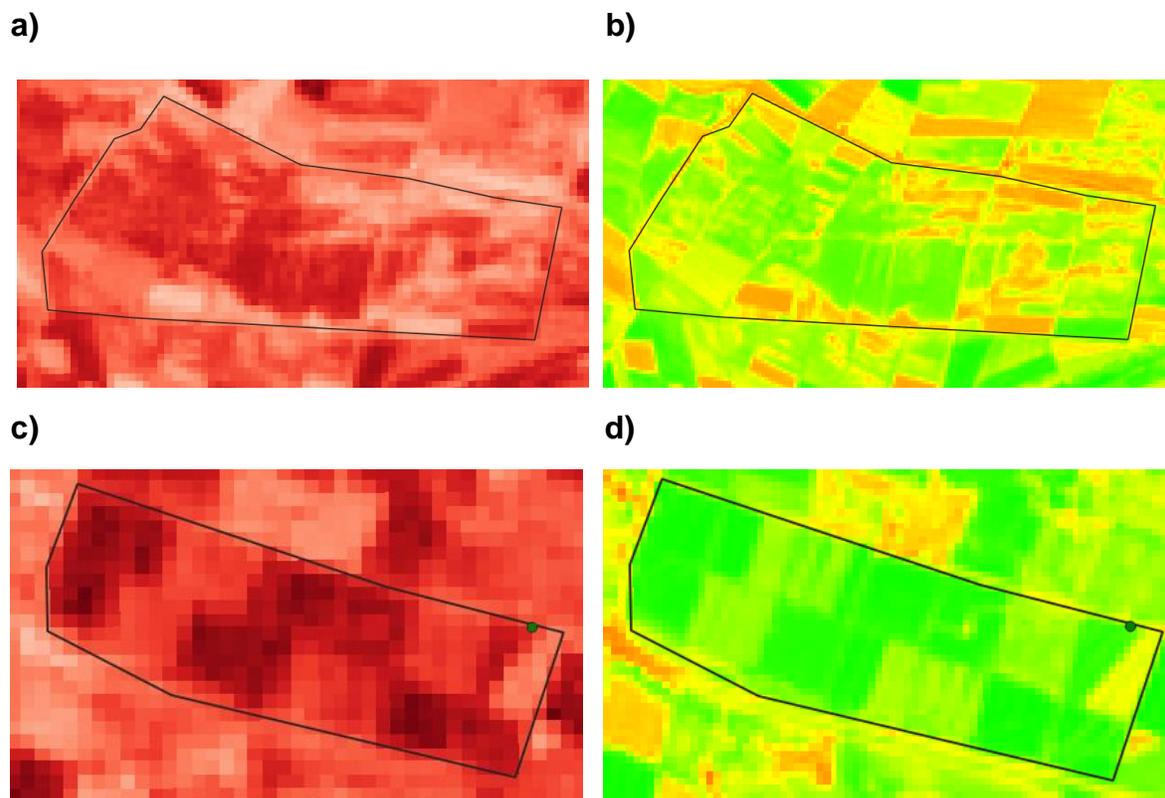


Figura 25. Diferencia de tonos entre suelos salinos y no salinos. **a)** Apariencia del IndSal en suelos salinos, se observan formas irregulares en color rojo oscuro asociadas a vegetación halófila y blancas asociadas a la presencia de sales. **b)** Apariencia del NDVI en suelos salinos, se observan formas irregulares de color verde claro y naranja lo que indican bajo vigor vegetal. **c)** Apariencia del IndSal en suelos no salinos, se observa un tono verde brillante más uniforme característico de la vegetación cultivada. **d)** Apariencia del NDVI en suelos no salinos, el verde más oscuro y brillante indica un buen vigor vegetal.

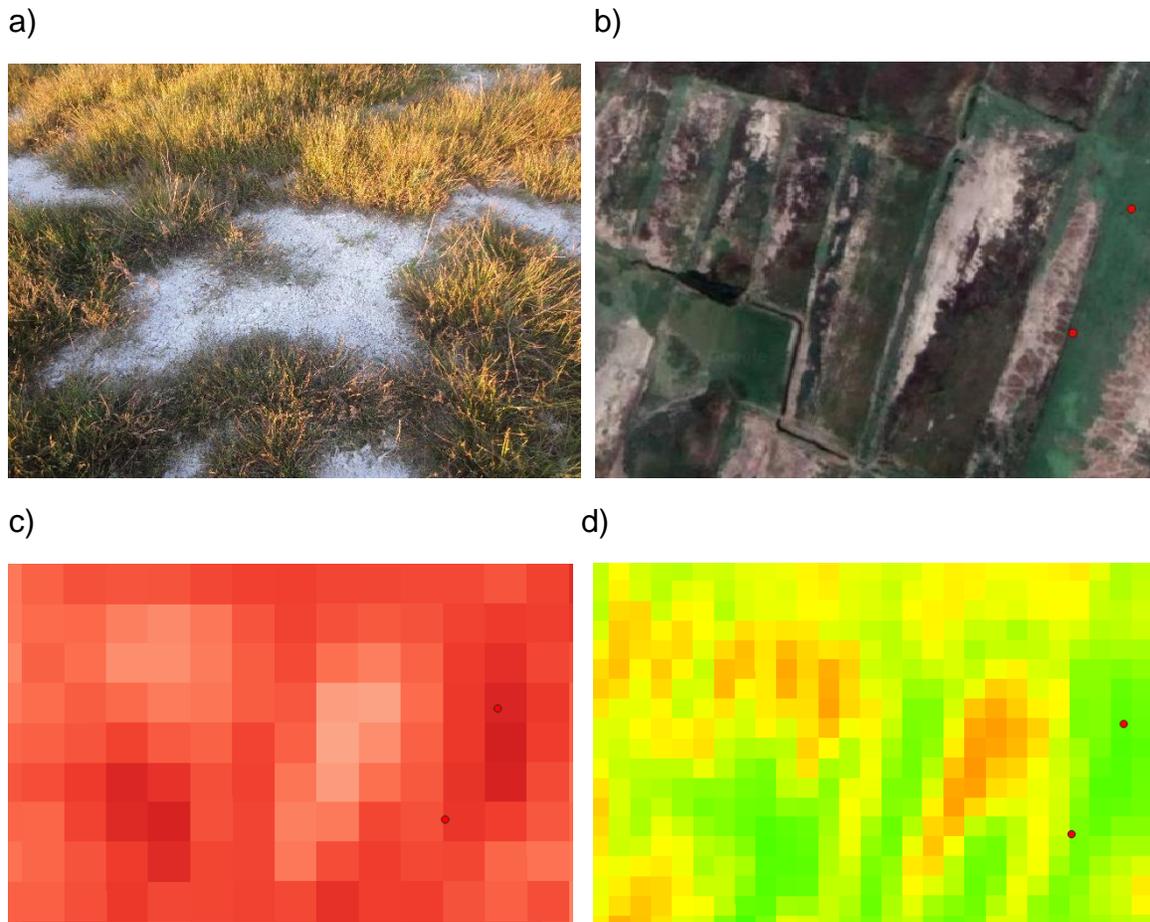


Figura 26. Depósitos salinos. Vista en campo e imágenes satelitales. **a)** Muestra directa de la acumulación de sales en la superficie del suelo. **b)** Vista de los depósitos salinos desde imágenes Google Earth, las zonas blancuecinas corresponden a dichos depósitos. **c)** El IndSal muestra la acumulación de sales con los tonos más claros. **d)** El NDVI la muestra como zonas de bajo vigor vegetal.

Para obtener la clasificación final de la imagen de noviembre de 2021 fue necesario realizar correcciones como la reclasificación de píxeles que correspondían con zonas urbanas o con zonas de vegetación natural, este tipo de interferencias pueden deberse a diferentes factores como la resolución de las imágenes, fenómenos atmosféricos o condiciones del terreno (Richards, 2013).

De acuerdo con la clasificación supervisada de la imagen de noviembre de 2021 cerca del 70% del territorio agrícola de Ixmiquilpan se encuentra afectado por algún grado de salinidad siendo la condición extremadamente salina la predominante. Sin embargo, es preciso acotar que dichas afirmaciones se presentan a reserva de que los resultados del análisis de correlación que demostraron que la correlación entre el IndSal y la CE no son estadísticamente significativos (Roy-García *et al.*, 2019).

XI. Conclusiones

De acuerdo con los resultados encontrados, durante la temporada de secas no es adecuado el uso de la metodología planteada en este trabajo para la identificación de suelos salinos a partir de la interpretación de los índices IndSal y NDVI. En el caso de la temporada húmeda la relación entre los índices y la CE se mostró una relación como la esperada en la hipótesis, sin embargo esta resultó ser estadísticamente poco significativa por lo que a fin de aumentar la certidumbre en el uso de los índices IndSal y NDVI en la identificación de suelos salinos en áreas cultivadas se recomienda el desarrollo y el uso de técnicas y tecnologías que hagan posible una interpretación más detallada e incrementen la certidumbre en el uso de los índices como la obtención de imágenes de mayor resolución espacial con drones. Los objetivos de esta investigación fueron cubiertos en orden de los productos generados a partir de la obtención del mapa de distribución de suelos salinos para el municipio de Ixmiquilpan.

XII. Referencias

- Acosta, J., Jansen, B., Kalbitz, K., Faz, A. y Martínez-Martínez, S. (2011). Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 85(8)1318-1324. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.07.046>
- Aimetta, M. B., Muñoz, S. A., Bustos, D., Davidenco, V., Cazorla, C. R., Galarza, C. M. y Salvaggiotti, F. (2020). Cuantificación del uso agrícola de suelos con limitantes salinas y sódicas mediante el índice NDVI. *Ciencia del suelo*, 38(1), 174-186.
- Al-Khaier, F. (2003) *Soil Salinity Detection Using Satellite Remote Sensing*. [Tesis de maestría]. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.
- Allison, E., Brown, J., Hayward, H., Richards, L., Bernstein, L., Fireman, M., y Reeve, R. (1990). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. (3ªed.). Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas.
- Arif, Y., Singh, P., Siddiqui, H., Bajguz, A. y Hayat, S. (2020). Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 64-77.
- Azcón-Bieto, J. y Talon, M. (2008) *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Universitat de Barcelona
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira-Sandoval, M., Morassi, G. y Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, (48), 55-66. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133>
- Ceja, C. (2008) Degradación de los suelos y pobreza en México. *Economía Informa*, (350), 89-93.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. (2ª ed.). Ediciones Rialp S.A.
- Corwin, D. (2020). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862. <https://doi.org/10.1111/ejss.13010>
- de León Mata, G. D., Álvarez, A. P. y Guerrero, J. H. M. (2014). Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2014(84), 42-53. <https://doi.org/10.14350/rig.36568>
- Djuraev, A., Mirdjalalov, D., Nuratdinov, A., Khushvaktov, T. y Karimov, Y. (2021). Evaluation of soil salinity level through NDVI in Syrdarya province, Uzbekistan. [Conferencia] Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region". Chelyabinsk, Russia. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125803017>

- Dwivedi, R. S. (2017). *Remote sensing of soils*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53740-4>
- Fassbender, H. y Bornemisza, E. (1994). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. (2ª ed.) Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- González Elizondo, M. S., González Elizondo, M., Tena Flores, J. A., López Enriquez, I. L., Reznicek, A. A. y Diego-Pérez, N. (2008). Sinopsis de Scirpus sl (cyperaceae) para México. *Acta botánica mexicana*, (82), 15-41.
- González, M. y Rodríguez, M. (2013). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (61), 285-308.
- Gorji, T., Sertel, E. y Tanik, A. (2017). Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey. *Ecological indicators*, 74, 384-391. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.043>
- Guerra, F. (2014) *Bioacumulación de metales pesados en halófitas dominantes de Maguey Blanco*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guerrero, M. E. y Pineda, V. (2016). Contaminación del suelo en la zona minera de Rasgatá Bajo (Tausa). Modelo conceptual. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 57-74. <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1664>
- Hardie, M. y Doyle, R. (2012). Measuring soil salinity. En Shabala, S., y Cuin, T. A. (Eds.) *Plant Salt Tolerance Methods and Protocols* (pp. 414-425). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-986-0_28
- Hernández, D., Muñoz, D., López, F., y Hernández, M. (2018). Impacto del uso de la tierra en la calidad del suelo en una zona semiárida del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *BIOCYT Biología Ciencia y Tecnología*, (11), 41-42.
- Hernández, R. (2021). La Agricultura de Precisión. Una necesidad actual. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(1), 67-74.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y. y Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2014). 'Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional)', escala: 1:250000. Edición 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México.

- INEGI (2017). Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie VI / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México INEGI, c2017.
- IUSS Working Group WRB (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. (4^a ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS).
- Jaramillo, L. V. y Antunes, A. F. (2018). Detección de cambios en la cobertura vegetal mediante interpretación de imágenes Landsat por redes neuronales artificiales (RNA). Caso de estudio: Región Amazónica Ecuatoriana. *Revista de teledetección*, (51), 33-46. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8995>
- Kataria, S. y Verma, S. (2018). Salinity Stress Responses and Adaptive Mechanisms in Major Glycophytic Crops: The Story So Far. En Kumar, V., Wani, S., Suprasanna, P., Tran, L.S. (eds) *Salinity Responses and Tolerance in Plants, Volume 1*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75671-4_1
- Kriegler, F. J., Malila, W. A., Nalepka, R. F. y Richardson, W. (1969). Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. *Remote sensing of environment*, 6, 97-132
- Ma, L., Li, M., Ma, X., Cheng, L., Du, P. y Liu, Y. (2017). A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 277-293. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.001>
- Martínez-Vega, J., Martín, M. P., Díaz Montejo, J. M., López Vizoso, J. M. y Muñoz Recio, F. J. (2010). *Guía didáctica de teledetección y medio ambiente*. Red Nacional de Teledetección Ambiental.
- Muñoz Aguayo, P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales.
- Nachtergaele, F. O. (2005). Recursos del suelo y seguridad alimentaria. En Callaba, A., Iribarren, I. y Fernández, P., *Protección del suelo y el desarrollo sostenible: Seminario Europeo: Soria, 15-17 de mayo de 2002* (pp. 77-90). Instituto Geológico y Minero de España.
- O'Geen, A. (2018). *Drought Tip: Reclaiming Saline, Sodic, and Saline-Sodic Soils*. University of California. <https://doi.org/10.3733/ucanr.8629>.
- Osman, K. (2018). *Management of Soil Problems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75527-4>
- Palma, R. P. (2022). Análisis crítico del coeficiente de determinación (R²), como indicador de la calidad de modelos lineales y no lineales. *Matemática*, 20(2), 1-12.

- Pérez Vázquez, A., Leyva Trinidad, D. A. y Gómez Merino, F. C. (2018). Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1), 175-189. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.857>
- Pettorelli, N. (2019) *Satellite remote sensing and the management of natural resources*. Oxford University Press
- Porta, J. y López-Acevedo, M. (2008). *Introducción a la Edafología uso y protección del suelo*. (2ª ed.). Mundi-Prensa.
- Restrepo, L. F. y González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.
- Richards, J. A., (2013). *Remote sensing digital image analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6>
- Richards, L. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. US Department of Agriculture.
- Rouse Jr, J., Haas, R., Deering, D., Schell, J. y Harlan, J. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. Remote Sensing Center, Texas A&M University.
- Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M. y Palacios-Cruz, L. (2019). Correlación: no toda correlación implica causalidad. *Revista Alergia México*, 66(3), 354-360. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>
- Rueda, J. M. T. (2019). Aprovechamiento del suelo salino: agricultura salina y recuperación de suelos. *Apthapi*, 5(1), 1539-1563.
- Sanson, L. M., Cruz, C. T., Andrade, D. G. y Camacho, H. M. (2012). Ordenamiento ecológico territorial participativo del municipio de Santiago el Pinar, Chiapas. *Scripta Nova*, 16, 1-15.
- Semarnat. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*, edición 2018. Semarnat.
- Seoanez Calvo, M., Chacón Auge, A., Gutiérrez de Ojesto, A. y Angulo Aguado, I. (1999). *Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión*. Mundi-Prensa
- Shanmugapriya, P., Rathika, S., Ramesh, T. y Janaki, P. (2019). Applications of remote sensing in agriculture-A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(1), 2270-2283.
- Sigueñas, R., Ocola, L. y Guerrero, J. (2019). Vigilancia de la salinidad del suelo en cultivos de arroz en Lambayeque, periodo 2001-2014 utilizando imágenes de satélite y conductividad eléctrica. *Revista de Investigación de Física*, 22 (2), 9-17.
- Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de Valencia.

- Soca, R., Rojas, J., Willems, L., Ocola, C., Fernández, R. y Pérez, J. (2016). Identificación de las tierras degradadas por la salinidad del suelo en los cultivos de caña de azúcar mediante imágenes de satélite. *Revista de investigación de física*, 19(1), 1-9.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal*. (3ª ed.). Universitat Jaume
- Tello-Cifuentes, L. y Díaz-Paz, J. P. (2021). Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de componentes principales. *TecnoLógicas*, 24 (50), 22-41. <https://doi.org/10.22430/22565337.1710>
- Terrazas Rueda, J. (2019). Aprovechamiento del suelo salino: agricultura salina y recuperación de suelos. *Apthapi*, 5 (1), 1539-1563.
- Tránsito, J. A. S., Vélez, O. P., Spínola, A. G., Reyes, F. G. y Sáenz, E. M. Efecto de la calidad de agua del acuífero Valle de Guadalupe en la salinidad de suelos agrícolas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3 (1), 79-95.
- Yuan, Q., Shen, H., Li, T., Li, Z., Li, S., Jiang, Y., y Zhang, L. (2020). Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 241, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111716>