



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

CAMPUS SAN LUIS POTOSÍ

POSTGRADO EN
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

ESTADO DE CONSERVACIÓN DEL HÁBITAT DE LA HORMIGA ESCAMOLERA (*Liometopum apiculatum* Mayr) EN EL CENTRO-NORTE DE MÉXICO

Víctor García Sandoval

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México
2023

La presente tesis titulada: **ESTADO DE CONSERVACIÓN DEL HÁBITAT DE LA HORMIGA ESCAMOLERA (*Liometopum apiculatum* Mayr) EN EL CENTRO-NORTE DE MÉXICO**, realizada por el alumno **Víctor García Sandoval**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada y aceptada por el mismo como requisito para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

Consejo Particular.

Consejero:

(Director de Tesis)



Dr. Luis Antonio Tarango Arámbula

Codirector:



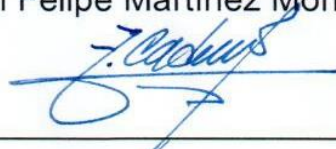
Dr. Jonathan Gabriel Escobar Flores

Asesor:



Dr. Juan Felipe Martínez Montoya

Asesor:



Dr. Jorge Cadena Íñiguez

Asesor:



Dr. Saul Ugalde Lezama

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí

Diciembre de 2022

ESTADO DE CONSERVACIÓN DEL HÁBITAT DE LA HORMIGA ESCAMOLERA (*Liometopum apiculatum* Mayr) EN EL CENTRO-NORTE DE MÉXICO

Víctor García Sandoval, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2023

RESUMEN GENERAL

Las larvas de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr), conocidas como escamoles, tienen un valor nutricional alto, gastronómico y económico. Sin embargo, se desconoce sobre las condiciones del hábitat de esta hormiga en el centro-norte de México. Esta investigación tuvo como objetivos: A) Llevar a cabo un análisis retrospectivo del NDVI en sitios de anidación de la hormiga escamolera, B) Realizar un análisis exploratorio de las variables topográficas y espectrales del hábitat de la hormiga escamolera y C) Conducir un análisis del entorno del hábitat de la hormiga escamolera mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado. Esta tesis se conforma de tres capítulos. En el primer capítulo se evalúan los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de la cobertura vegetal relacionada con sitios de anidación de la hormiga escamolera en cinco ejidos dedicados a la extracción de escamoles en el Altiplano Potosino-Zacatecano mediante imágenes Sentinel-2 en el periodo de 2016-2021. Para ello, se consideró el periodo de lluvias y seco de cada año. En el segundo capítulo se especifica el análisis de cinco variables topográficas derivadas del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 y tres variables espectrales derivadas de imágenes Sentinel-2 correspondientes a sitios de anidación en cinco ejidos del Altiplano Potosino-Zacatecano. En el tercer capítulo se establece la evaluación de la autocorrelación espacial y el grado de agrupamiento de los parches de coberturas presentes en un área con presencia de sitios de anidación mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado. Los resultados indican que los valores NDVI de los periodos secos oscilaron entre 0.21 – 0.31 y en los periodos de lluvia fueron entre 0.19 – 0.42, las variables topográficas y espectrales fueron evaluadas mediante un Análisis de Componentes Principales uno realizado a nivel del área de estudio y otro en sitios de sitios de anidación. A nivel de área de estudio, el primer componente presentó la mayor

varianza con 32% y se conformó por las variables inclinación de la pendiente, elevación, la Medida de Rugosidad Vectorial (VRM) y el Índice de Posición Topográfica (TPI). El primer componente de los periodos de lluvias tuvo el 61.25% de la varianza y se conformó por las variables NDWI y BSI. En los periodos secos, el primer componente registró el 70.96% de la varianza y se explicó por la variable NDVI. El análisis en sitios de anidación identificó que estos sitios no ocurrieron dentro del primer componente, el cual registró la mayor varianza, pero si se presentó en las zonas del segundo componente, el cual incluyó variables que ofrecían a la hormiga una mayor cobertura vegetal y termal. Las imágenes tomadas con el Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) se procesaron mediante el procedimiento de Análisis de Imágenes Basado en Objetos (OBIA) y en el área de estudios se identificaron cinco clases de cobertura. El análisis de autocorrelación realizado con el Índice de Moran señaló que los parches de las cinco clases tuvieron una distribución agrupada (I de Moran= 0.56). El grado de agrupamiento Alto/Bajo se analizó con el Índice G general de Getis-Ord, el cual registró que todas las clases tuvieron un grado de agrupamiento alto (G obtenida = 0.000984 > G esperada = 0.000983, $p=0.01$, $Z = 2.38$). Los resultados de esta investigación sirven para complementar la información disponible sobre el hábitat de *L. apiculatum* en el centro-norte de México. En esta investigación se proponen metodologías que pueden ser consideradas en investigaciones futuras tendientes al aprovechamiento sostenible y sustentable de los escamoles sobre la conservación y manejo del hábitat de la hormiga escamolera.

Palabras Clave: Sistemas de Información Geográfica, Teledetección, Vegetación, Parches

GENERAL ABSTRACT

CONSERVATION STATUS OF THE ESCAMOLERA ANT (*Liometopum apiculatum* Mayr) HABITAT IN CENTRAL-NORTHERN MEXICO

Víctor García Sandoval, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2023

GENERAL SUMMARY

The larvae of the scamolera ant (*Liometopum apiculatum* Mayr), known as escamoles, have a high nutritional, gastronomic and economic value. However, the habitat conditions of this ant in north-central Mexico are unknown. The objectives of this research were: A) To carry out a retrospective analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in nesting sites of the escamolera ant, B) To conduct an exploratory analysis of the topographic and spectral variables of the escamolera ant habitat, and C) To conduct an analysis of the environment of the escamolera ant habitat by means of images taken with an unmanned aerial vehicle. This thesis consists of three chapters. The first chapter evaluates the NDVI values of vegetation cover related to nesting sites of the escamolera ant in five ejidos dedicated to the extraction of escamoles in the Potosino-Zacatecan Altiplano using Sentinel-2 images in the period of 2016-2021. For this purpose, the rainy and dry periods of each year were considered. The second chapter specifies the analysis of five topographic variables derived from the Mexican Elevation Continuum 3.0 and three spectral variables derived from Sentinel-2 images corresponding to nesting sites in five ejidos of the Potosino-Zacatecan Altiplano. The third chapter evaluates the spatial autocorrelation and the degree of clustering of the cover patches present in an area with the presence of nesting sites by means of images taken with an unmanned aerial vehicle. The results indicate that NDVI values for dry periods ranged between 0.21 - 0.31 and for rainy periods were between 0.19 - 0.42. Topographic and spectral variables were evaluated by means of a Principal Component Analysis, one performed at the study area level and the other at nesting site locations. At the study area level, the first component presented the highest variance with 32% and consisted of the variables slope inclination, elevation, the Vector Roughness Measure (VRM) and the Topographic Position Index (TPI). The first component of the rainy periods had 61.25% of the variance and consisted

of the variables NDWI and BSI. In dry periods, the first component registered 70.96% of the variance and was explained by the NDVI variable. The analysis in nesting sites identified that these sites did not occur within the first component, which registered the greatest variance, but did occur in the zones of the second component, which included variables that offered the ant a greater vegetation and thermal cover. The images taken with the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) were processed using the Object Based Image Analysis (OBIA) procedure and five cover classes were identified in the study area. The autocorrelation analysis performed with Moran's Index indicated that the patches of the five classes had a clustered distribution (Moran's $I = 0.56$). The degree of High/Low clustering was analyzed with the overall Getis-Ord Index G , which recorded that all classes had a high degree of clustering (G obtained = 0.000984 > G expected = 0.000983, $p=0.01$, $Z = 2.38$). The results of this research serve to complement the available information on the habitat of *L. apiculatum* in north-central Mexico. This research proposes methodologies that can be considered in future research aimed at the sustainable and sustainable use of escamoles for the conservation and management of the habitat of the escamolera ant.

Key words: Geographic Information Systems, Remote Sensing, Vegetation, Patches.

Dedicatoria

A mi familia, mis padres y mis hermanos por todo el apoyo que me brindaron durante mi maestría, a mis tíos Osvaldo y Víctor Hugo quienes me acogieron y me apoyaron en mi estancia.

A todos los integrantes de mi Consejo Particular, gracias por guiarme.

A mis amigos realizados en el COLPOS gracias por su amistad.

A mi novia por haberme acompañado en una parte del camino.

A todos los doctores del COLPOS Campus San Luis Potosí, gracias por el conocimiento compartido.

Y a todos los que de una u otra manera hicieron posible esta investigación

GRACIAS INFINITAS

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por haberme otorgado la beca para realizar los estudios de posgrado y que permitió que esta investigación pudiese realizarse con éxito.

Al Colegio de Postgraduados (COLPOS) Campus San Luis Potosí, por haberme aceptado como estudiante y por haber facilitado recursos que permitieron mi investigación y a sus doctores por las clases y los conocimientos que adquirí en el Posgrado de Innovación en Manejo de Recursos Naturales.

Al Dr. Luis Antonio Tarango Arámbula, por haberme hablado sobre el COLPOS, haberme motivado a realizar mi maestría y por haber fungido como mi Profesor Consejero y guía; gracias por los consejos, paciencia y conocimientos brindados en las clases impartidas, y por haberme acompañado en la visita a los ejidos, a las pláticas con los comisariados y en la realización de los vuelos sobre las áreas de estudio.

Al Dr. Jonathan Gabriel Escobar Flores, del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Durango, por ser parte de mi Consejo Particular y por fungir como Codirector de tesis, por haberme guiado y sumergido en el campo de la percepción remota, por haberme ayudado en el procesamiento e interpretación, y el haber permitido una estancia en el CIIDIR para la realización de mi tesis, gracias por la paciencia, por la perseverancia y por ser un ejemplo de tenacidad y modelo académico a seguir.

Al Dr. Juan Felipe Martínez Montoya, por ser parte de mi Consejo Particular, por los conocimientos otorgados, por guiarme y ayudarme durante la maestría y en las clases impartidas.

Al Dr. Jorge Cadena Íñiguez, por formar parte de mi Consejo Particular, por los conocimientos otorgados que me ayudaron a la realización de esta tesis y a la redacción de los artículos derivados.

Al Dr. Saul Ugalde Lezama, por ser integrante de mi Consejo Particular y por los consejos para la investigación y la redacción de tesis y artículos.

Al Dr. Domingo Cruz Labana, por haber compartido los datos de los sitios de anidación de la hormiga escamolera y por haber sido mi guía para conocer los ejidos donde se realizó esta investigación, también gracias por la amistad y los consejos.

A mi familia, por haber creído en mí, mis padres Everardo y Silvia que me apoyaron durante todo el proceso, a mis hermanos Everardo y José María por haber ayudado en todo lo que estuvo en sus manos, a mi tío Osvaldo García Saucedo por haberme acogido en Durango durante mi estancia y por los consejos que fueron de gran ayuda para la investigación, a mi tío Víctor Hugo García Saucedo por haberme guiado y ayudarme a moverme y adaptarme a la ciudad de Durango.

A mis Amigos y compañeros conocidos durante esta maestría y en Salinas: Nayeli, Alberto, Alejandro, Yaneli y Domingo, por su amistad y consejos.

A Miriam Nayeli, gran amiga quien me habló del COLPOS y me ayudó a conocer al Dr. Luis Antonio Tarango Arámbula.

A Alberto García Reyes, gran amigo y compañero, gracias por la amistad, por la confianza y por ayudarme en las áreas donde mis conocimientos y habilidades flaqueaban.

A los ejidos Santa Teresa, Ahualulco y Estación Ipiña del estado de San Luis Potosí, y Santiago y Tolosa del estado de Zacatecas, por permitirme realizar mi investigación, y gracias también a sus comisariados quienes permitieron y nos acompañaron en los vuelos, Sr. Anacleto Ramírez de Santa Teresa, Sr. Margarito Oliva de Estación Ipiña y Sr Epifanio Pérez de Tolosa.

Al CIIDIR Unidad Durango y al laboratorio de Geomática, que permitió mi estancia en la que obtuve conocimientos para procesar las imágenes capturadas, descargadas e interpretar los resultados; también me ayudaron a mejorar mi manejo de Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT).

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
LITERATURA CITADA.....	3
CAPÍTULO I	5
ANÁLISIS DE NDVI EN SITIOS DE ANIDACIÓN DE LA HORMIGA ESCAMOLERA (<i>Iiometopum apiculatum</i> Mayr), EN EL ALTIPLANO POTOSINO-ZACATECANO.....	5
1.1 RESUMEN	5
1.2 ABSTRACT.....	6
1.3 INTRODUCCIÓN	7
1.4 MATERIALES Y METODOS.....	8
1.4.1 Área de estudio.....	8
1.4.2 Registro de los nidos.	10
1.4.3 Estimación del NDVI en los sitios de anidación	10
1.4.3.1 Descarga y procesamiento de las imágenes de satélite.....	10
1.4.4 Análisis estadísticos	11
1.5 RESULTADOS.....	12
1.5.1 Periodo seco.....	12
1.5.2 Periodo de lluvias	13
1.6 DISCUSIÓN.....	14
1.7 CONCLUSIONES	17
LITERATURA CITADA	18
CAPITULO II	24
VARIABLES TOPOGRÁFICAS Y ESPECTRALES DEL HÁBITAT DE LA HORMIGA ESCAMOLERA EN EL ALTIPLANO POTOSINO-ZACATECANO.....	24
2.1 RESUMEN	24
2.2 ABSTRACT.....	25

2.3 INTRODUCCIÓN	26
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
2.4.1 Área de estudio.....	27
2.4.2 Descarga del CEM 3.0 y las imágenes Sentinel-2.....	29
2.4.3 Procesamiento de las variables fisiográficas	30
2.4.4 Procesamiento de las variables espectrales.....	31
2.4.5 Análisis exploratorio del hábitat	32
2.4.6 Análisis estadístico	32
2.5 RESULTADOS.....	33
2.5.1 Descripción de las variables de los nidos	33
2.5.1.1 Variables topográficas	33
2.5.1.2 Variables espectrales	33
2.5.2 ACP de las variables topográficas	34
2.5.3 ACP Periodo seco	36
2.5.4 ACP Periodo de lluvias	38
2.6 DISCUSIÓN	40
2.7 CONCLUSIONES	42
LITERATURA CITADA	43
CAPÍTULO III	49
ANÁLISIS DEL ENTORNO DEL HÁBITAT DE LA HORMIGA ESCAMOLERA MEDIANTE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO.....	49
3.1 RESUMEN	49
3.2 ABSTRACT	50
3.3 INTRODUCCIÓN	51
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS	52

3.4.1 Área de estudio.....	52
3.4.2 Parámetros de vuelo.....	53
3.4.3 Captura de imágenes en campo.....	53
3.4.4 Procesado de las imágenes.....	54
3.4.5 Análisis OBIA.....	55
3.4.6 Análisis de parches.....	55
3.4.7 Análisis de distribución y análisis de agrupamiento alto/bajo	56
3.5 RESULTADOS.....	59
3.5.1 Análisis OBIA.....	59
3.5.2 Análisis de parches.....	66
3.5.3 Análisis de autocorrelación espacial y de agrupamiento alto/bajo.....	72
3.6 DISCUSIÓN	73
3.7 CONCLUSIONES	75
LITERATURA CITADA	77
CONCLUSIONES GENERALES.....	83
Literatura General	85

Lista de cuadros

Cuadro 1.2. Fechas de las imágenes del satélite Sentinel-2 por periodo y trayectoria del satélite.....	10
Cuadro 1.3. Ejemplo de tabla de valores NDVI exportada de cuatro fechas para la región de estudio.....	11
Cuadro 1.4. Resultados de la prueba de Tukey para los valores de NDVI por periodo seco, indicando las diferencias significativas ($P < 0.0001$).	13
Cuadro 1.5. Resultados de la prueba de Tukey para los valores de NDVI registrados en los periodos de lluvia indicando las diferencias significativas ($P < 0.0001$)......	14
Cuadro 2.1 Coordenadas de las comunidades consideradas para esta investigación.	28
Cuadro 2.2 Fechas de las imágenes Sentinel-2 descargadas.	29
Cuadro 2.4 Componentes Principales del ACP de las variables espectrales del periodo seco, su eigenvalor y su porcentaje de varianza.....	38
Cuadro 2.5 Componentes Principales del ACP de las variables espectrales del periodo de lluvias, su eigenvalor y su porcentaje de varianza.	40
Cuadro 3.1. Coordenadas del área de vuelo en el ejido Tolosa, Zacatecas.	53

Lista de figuras

Figura 1.1. Ubicación geográfica de las comunidades muestreadas y nidos analizados en el Altiplano Potosino-Zacatecano.....	9
Figura 1.2. Valores promedio, máximos y mínimos de NDVI de la vegetación de los sitios de anidación de <i>Liometopum apiculatum</i> Mayr, 2016-2021.....	12
Figura 1.3. Valores promedio, mínimos y máximos de NDVI de la vegetación en los sitios de anidación de <i>Liometopum apiculatum</i> Mayr, 2016-2021.....	14
Figura 2.1. Ejidos muestreados y nidos analizados en el Altiplano Potosino-Zacatecano.....	28
Figura 2.2. Análisis de Componentes Principales con variables topográficas del área de estudio, señalando la localización de los sitios de anidación.....	34
Figura 2.3. Gráfico del ACP de las variables topográficas señalando su contribución en cada componente.....	36
Figura 2.4. Análisis de Componentes Principales de las variables espectrales del periodo seco.....	37
Figura 2.5. Gráficos de las variables y su influencia dentro de los tres componentes principales del ACP del periodo seco. *s = periodo seco.....	38
Figura 2.6. Análisis de Componentes Principales de las variables espectrales del periodo de lluvias.....	39
Figura 2.7. Gráficos de las variables que conforman los tres componentes principales analizados y la influencia de cada variable dentro de cada componente. *ll = periodo de lluvias.....	40
Figura 3.1. Ortofoto del área de vuelo realizado en el ejido Tolosa, Pinos, Zacatecas.	59
Figura 3.2. Imagen segmentada del área muestreada en el ejido Tolosa, Pinos, Zacatecas.....	60
Figura 3.3. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los valores ND del espectro RGB (a) y de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes a los agaves registrados.....	61

Figura 3.4. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los valores ND del espectro RGB (a) y valores de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes a las palmas registradas.	62
Figura 3.5. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los Valores ND des espectro RGB (a) y de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes a las cactaceas registradas.	63
Figura 3.6. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los Valores ND del espectro RGB (a) y de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes a las especies micrófilas registradas.	64
Figura 3.7. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los Valores ND del espectro RGB (a) y de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes al suelo.....	65
Figura 3.8. Parches por clase presentes en el área de vuelo.	66
Figura 3.9. Cantidad del borde total de los parches por clase en el área de vuelo.	67
Figura 3.10. Densidad de bordes de los parches por clase en el área de vuelo.	68
Figura 3.11. Índice de forma media de los parches por clase en el área de vuelo.....	69
Figura 3.12. Nivel de compacidad de los segmentos en el área de vuelo.....	70
Figura 3.13. Nivel de rectangularidad de los segmentos en el área de estudio.	71
Figura 3.14. Gráfico de índice de Moran que indica que las clases presentaron un patrón de distribución agrupado.	72
Figura 3.15. Gráfico de Agrupamiento Alto/Bajo que indica que las clases presentaron un agrupamiento alto.....	73

INTRODUCCIÓN GENERAL

En México se han registrado 1,174 especies y subespecies de hormigas en las familias y subfamilias *Myrmicinae*, *Formicinae*, *Ponerinae*, *Dorylinae*, *Dolichoderinae*, *Pseudomyrmecinae*, entre otras. En el estado de Zacatecas se han registrado cinco especies pertenecientes a la subfamilia *Dolichoderinae* siendo estas, *Forelius pruinosus*, *Linepithema dispertitum*, *Liometopum apiculatum*, *Liometopum luctuosum* y *Liometopum occidentale*, y en el estado de San Luis Potosí *Dolichoderus lutosus*, *Dorymyrmex bicolor*, *Dorymyrmex flavus*, *Dorymyrmex insanus*, *Dorymyrmex insanus*, *Forelius keiferi*, *Forelius mccooki*, *Forelius pruinosus*, *Liometopum apiculatum* y *Liometopum luctuosum* (Janicki *et al.* 2016, Guénard B. *et al.* 2017, Global Ant Biodiversity Informatics database).

La hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr) del orden *Hymenoptera*, familia *Formicidae* y subfamilia *Dolichoderinae* ha sido registrada en 15 Estados de México desde el norte al sureste del país. La distribución de la hormiga escamolera se describe en los estados de Hidalgo, Michoacán, Oaxaca, Tlaxcala, Estado de México, Puebla, Guanajuato, Ciudad de México, Querétaro y el Altiplano Potosino-Zacatecano (Tarango-Arámbula, 2012). Las áreas de mayor distribución de la hormiga escamolera se presentan en matorrales áridos y semiáridos y bosques templados y menor distribución en selvas tropicales (Tarango-Arámbula, 2012; Cruz-Labana, 2013).

Debido a su distribución en el territorio mexicano, la hormiga escamolera se presenta en zonas de suelo del tipo: Feozem (ricos en materia orgánica y nutrientes), leptosol (roca continua de textura gravosa), regosol (suelos de grano fino), yermosol y xerosol (suelos con presencia de minerales arcillosos y que varían en la cantidad de materia orgánica) (Berumen-Jiménez, 2018; FAO, 2008). La hormiga escamolera puede anidar en suelos de arcillosos, limosos, con contenidos altos de arena y grava (Cruz-Labana, 2013), así como en diversos climas, tales como: BSok(x') (Árido, templado), BS1kw (Semiárido, templado), BSohw (Árido, semicálido), C(w1) (Templado subhúmedo), Cb(w2) (Semifrío, subhúmedo, con verano fresco largo), BS1hw (Semiárido, semicálido), BSo(h') (x') (Árido, cálido), BWhw (Muy árido, semicálido), (A)C(w1) (Semicálido, subhúmedo del grupo C), A(C)w2(w) (Semicálido, subhúmedo), Aw1(x') (Cálido, subhúmedo), y C(f)

(Templado, húmedo) (Berumen-Jiménez *et al.*, 2021). La hormiga escamolera realiza sus actividades cuando la temperatura exterior va de los 8 a 38°C, mientras que dentro del nido se encuentran en temperaturas que van de 16.1 a 22°C, en las áreas del Altiplano Potosino-Zacatecano (Shapley, 1920; Cruz-Labana, 2013).

La recolecta del escamol en el Altiplano Potosino-Zacatecano, así como de otros insectos comestibles como el gusano blanco (*Aegiale hersperiaris*) y el gusano rojo (*Comadia redtembacheri*) del maguey, proveen ingresos económicos importantes a las comunidades rurales durante su recolección, lavado y venta, percibiendo ganancias que van de los 150\$ MXN a los 550\$ MXN por kilogramo de escamol, variando este precio según la temporada y la producción de escamol por nido (Tarango-Arámbula, 2012; De Luna-Valadez *et al.*, 2013; Dinwiddie *et al.*, 2013; Lara-Juárez *et al.*, 2016). La extracción y sobreexplotación de los escamoles, la falta de organización por parte de los pobladores, la ausencia de buenas prácticas para el aprovechamiento del escamol, son factores que directamente influyen en el estado de conservación del hábitat de la hormiga escamolera (Tarango-Arámbula, 2012; Cruz-Labana *et al.*, 2014; Berumen-Jiménez *et al.* 2021). Otras actividades antrópicas como la ganadería extensiva, la modificación de la cobertura vegetal, así como el cambio de uso de la tierra y factores ambientales como la irregularidad de la precipitación, propician la fragmentación y el deterioro del hábitat de los sitios de anidación de la hormiga escamolera (Tarango-Arámbula, 2012; Lara-Juárez *et al.*, 2016; Tarango-Arámbula & Méndez-Gallegos, 2018; Berumen-Jiménez *et al.* 2021).

Esta tesis tuvo como objetivo evaluar el estado de conservación del hábitat de la hormiga escamolera mediante variables ambientales evaluadas con herramientas de percepción remota, realizando: A) Un análisis retrospectivo del NDVI en sitios de anidación de la hormiga escamolera, B) un análisis exploratorio de las variables topográficas y espectrales del hábitat de la hormiga escamolera y C) Un análisis del entorno del hábitat de la hormiga escamolera mediante imágenes tomadas con cámaras transportadas en un vehículo aéreo no tripulado.

LITERATURA CITADA

- AntWeb. Version 8.75.3. California Academy of Science, online at <https://www.antweb.org>.
- Berumen-Jimenez M. (2018). *Evaluación de riesgo de extinción de *Liometopum apiculatum* Mayr, y descripción de las etapas de recolección, limpieza-lavado-drenado y almacenamiento de sus larvas*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados
- Berumen-Jiménez, M., Valdez-Cepeda, R. D., Méndez-Gallegos, S.D.J., Cadena-Íñiguez, J., Esparza-Orozco, A., & Tarango-Arámbula, L. A. (2021). Determination of the conservation status of the “escamolera” ant (*Liometopum apiculatum* MAYR) in Mexico by the species risk assessment methodology – MER. *Agrociencia*, 55(6), 539-555. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i6.2558>
- Cruz-Labana, J.D. (2013). *Variables del hábitat de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum*) en el municipio de Charcas, San Luis Potosí, México*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- Cruz-Labana, J.D., Tarango-Arámbula, L.A., Alcántara-Carbajal, J.L., Pimentel-López, J., Ugalde-Lezama, S., Ramírez-Valverde, G., & Méndez-Gallegos, S.D.J. (2014). Habitat use by the “Escamolera” ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) in central Mexico. *Agrociencia*, 48(6) 569-582.
- FAO, (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo: Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional*. Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, Italia.
- Guénard, B., Weiser, M. D., Gomez, K., Narula, N., & Economo, E. P. (2017). The Global Ant Biodiversity Informatics (GABI) database: synthesizing data on the geographic distribution of ant species (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News/Osterreichische Gesellschaft für Entomofaunistik*, 24, 83-89.
- Janicki, J., Narula, N., Ziegler, M., Guénard, B., & Economo, E.P. (2016). Visualizing and interacting with large-volume biodiversity data using client-server web-mapping

applications: The design and implementation of antmaps. org. *Ecological Informatics*, 32, 185-193.

Kozon, I., & Roussel, J. (2013). Impact of habitat shift driven by humans on ants biodiversity and foraging strategies.

Lara-Juárez, P., Castillo-Lara, P., Tristán-Patiño, F. M., Rendón-Huerta, J. A., & Aguirre-Rivera, J. R. (2016). Efectos del sitio y la condición de agostadero en la densidad de hormigueros de escamoles (*Liometopum apiculatum* Mayr). *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22(3), 285-302

Shapley, H. (1920). Thermokinetics of *Liometopum apiculatum* Mayr. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 6, 204-211.

Tarango-Arámbula L.A. (2012). Los escamoles y su producción en el altiplano potosino-zacatecano, *RESPYN: Revista Salud Publica y Nutrición*, 4, 139-144.

Tarango-Arámbula, L.A., & Méndez-Gallegos, S.D.J., (2018). Insectos comestibles en el centro-norte de México. *El pasado del futuro alimentario: los alimentos ancestrales americanos*. 1: 358-380. Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora. Ciudad de México.

CAPÍTULO I

ANÁLISIS DE NDVI EN SITIOS DE ANIDACIÓN DE LA HORMIGA ESCAMOLERA (*Liometopum apiculatum* MAYR), EN EL ALTIPLANO POTOSINO-ZACATECANO

1.1 RESUMEN

En México, la recolecta de escamoles, larvas de la hormiga (*Liometopum apiculatum* Mayr) beneficia económicamente a los habitantes de comunidades rurales, y su supervivencia depende del forrajeo en especies vegetales perennes. El objetivo de este estudio fue estimar por primera vez los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) relacionados con la cobertura vegetal del hábitat de la hormiga escamolera, proponiendo como hipótesis que los datos NDVI de doce periodos tienen valores similares. Los NDVI de 2016 a 2021 de los periodos de lluvias y secas se obtuvieron utilizando imágenes Sentinel-2 de 106 nidos de hormiga. Los valores de NDVI altos correspondieron al periodo seco y oscilaron entre 0.21-0.31; sin embargo, en el periodo de lluvias de 2016 se registró un valor muy alto de NDVI = 0.6 relacionado con eventos de lluvias inusuales. El NDVI más bajo se registró en el periodo de lluvias del año 2020 (0.09). Se recomienda que los estudios futuros analicen la relación entre el NDVI y su efecto en la actividad forrajera de la hormiga, sobre la producción (cantidad de larvas) de los nidos y la relación entre el NDVI y el efecto de forrajeo intensivo. Esta información será útil para diseñar planes de manejo y conservación de la hormiga de acuerdo con la variación de la cobertura vegetal.

Palabras Clave: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI, Hábitat, hormiga escamolera

1.2 ABSTRACT

In Mexico, the collection of escamoles from the ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) is economically beneficial to the inhabitants of rural communities, and their survival depends on foraging on perennial plant species. The objective of this study was to estimate for the first-time Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values related to the vegetation cover of the escamolera ant habitat, proposing as a hypothesis that NDVI data from twelve periods have similar values. NDVI from 2016 to 2021 for rainy and dry periods were obtained using Sentinel-2 images of 106 ant nests. High NDVI values corresponded to the dry period and ranged from 0.21-0.31; however, a very high value of NDVI = 0.6 related to unusual rainfall events was recorded in the 2016 rainy period. The lowest NDVI record was recorded in the 2020 rainy period (0.09). It is recommended that future studies analyze the relationship between NDVI and its effect on ant foraging activity, on the production (number of larvae) of nests and the relationship between NDVI and the effect of intensive foraging. This information will be useful to design ant management and conservation plans according to the variation of vegetation cover.

Key words: Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, Habitat.

1.3 INTRODUCCIÓN

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se utiliza para estimar la cantidad y el vigor de la vegetación en una superficie (Pettoreli *et al.*, 2011). El NDVI tiene como fundamento analizar los patrones de absorción y reflexión de la energía solar por la vegetación en las regiones del rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético (Rouse *et al.*, 1974). Los valores del NDVI varían entre -1 y 1, donde los valores negativos refieren a ausencia de vegetación (Justice *et al.*, 1985). Valores cercanos a 0 corresponden a sitios rocosos, arenas o nieve, mientras que valores entre 0.2 y 0.3 son sitios con vegetación dispersa como matorrales y pastizales. Los valores altos de NDVI (>0.5) son comunes en comunidades vegetales densas como bosques templados y tropicales, así como cultivos que están en su máximo crecimiento (Jensen 2007; Neigh *et al.*, 2008).

El NDVI se ha relacionado con diferentes parámetros de la vegetación; por ejemplo, se ha reportado que el NDVI tiene una alta correlación con la producción primaria neta, asimilación de carbono y evapotranspiración (Myneni *et al.*, 1995; Hicke *et al.*, 2002). El NDVI permite aumentar el entendimiento de la ecología de las plantas, ya que a partir de este índice es posible analizar la distribución, abundancia, patrones de crecimiento y estado fenológico de las coberturas vegetales de los ecosistemas del mundo (Keddy, 2007; Pettorelli, 2013).

Uno de los beneficios de explorar la relación del NDVI con la vida silvestre es la posibilidad de determinar el efecto del clima sobre el uso y selección de un hábitat por las especies, y, por lo tanto, la posibilidad de predecir su distribución (Bunnefeld *et al.*, 2006; Reynolds-Hogland & Mitchell 2007). En el caso de insectos, se ha reportado que las poblaciones de hormigas se relacionan positivamente con valores de NDVI > 0.5 en bosques, y por ello, se han utilizado como bioindicadores del estado natural de los bosques de Siramau en las Islas Ambon (Latumahina, 2021). El NDVI también ha sido útil para la detección remota de los sitios de anidación de hormigas; por ejemplo, en Ghats, India, las especies de hormigas depredadoras en climas tropicales se localizaron en sitios con NDVI < 0.4 , mientras que especies de hormigas especialistas y oportunistas de climas cálidos, los nidos se localizaron en sitios con valores de NDVI > 0.20 (Narendra & Ramanchandra, 2008).

En el área del Altiplano Potosino-Zacatecano, la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr) se asocia con las comunidades vegetales de: matorral xerófilo, matorral rosetófilo, matorral crasicaule y zacatal (Cruz-Labana *et al.*, 2014 Figueroa-Sandoval *et al.*, 2018; Rafael-Valdez *et al.*, 2017; 2019), mostrando preferencia por el maguey mezcalero (*Agave salmiana*), nopal rastrero (*Opuntia rastrera*), yuca (*Yucca spp.*) y ramoncillo (*Dalea bicolor*) como sustrato de anidación (Rafael-Valdez *et al.*, 2017), mientras registraron preferencia para forrajeo en las especies: yuca (*Yucca spp.*), maguey mezcalero (*Agave salmiana*), nopal rastrero (*Opuntia rastrera*), mezquite (*Prosopis spp.*) y huizache (*Acacia farnesiana*) (Rafael-Valdez *et al.*, 2017; 2019).

Para entender la relación entre la hormiga escamolera y las especies vegetales que utiliza y con las que coexiste, el objetivo de este estudio fue estimar por primera vez los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) relacionados con la cobertura vegetal del hábitat de la hormiga escamolera durante 2016-2021 con evaluaciones para cada periodo del año.

1.4 MATERIALES Y METODOS

1.4.1 Área de estudio.

El estudio se realizó en cinco comunidades rurales ubicadas en el Altiplano Potosino-Zacatecano, México (Figura 1.1, Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1 Coordenadas de las comunidades consideradas para esta investigación.

Estado	Municipio	Comunidad	LN	LO
San Luis	Ahualulco	Santa Teresa	22°23'10.70"N	- 101°18'10.99"O
Potosí		Estación Ipiña	22°29'27.99"N	- 101°16'27.00"O
		Ejido el Centro	22°24'11.45"N	- 101° 7'47.22"O
		Ahualulco		
Zacatecas	Pinos	Santiago	22°27'15.85"N	- 101°27'31.99"O
		Tolosa	22°31'13.40"N	- 101°21'22.64"O
				-

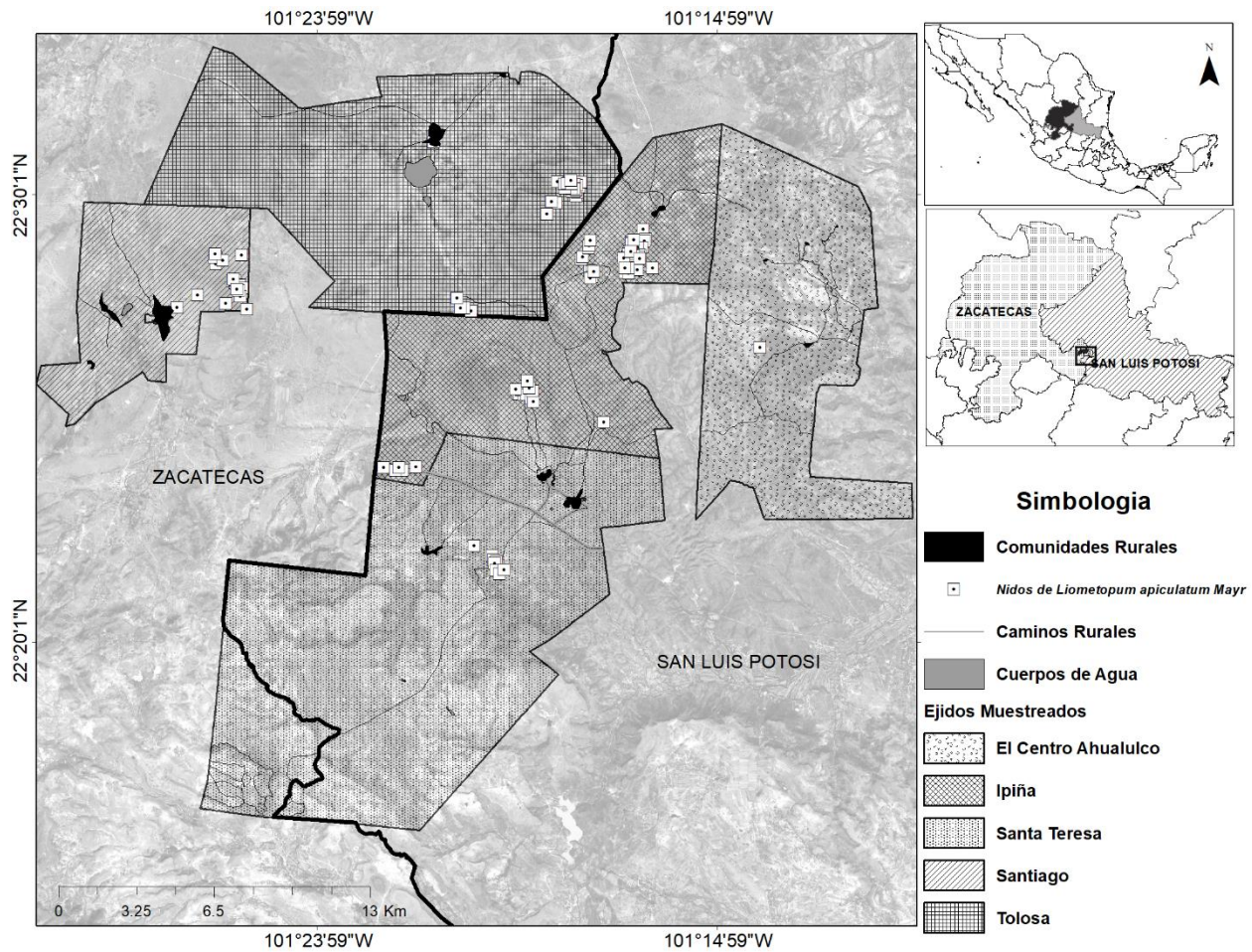


Figura 1.1. Ubicación geográfica de las comunidades muestreadas y nidos analizados en el Altiplano Potosino-Zacatecano.

El Altiplano Potosino-Zacatecano es una región que se localiza en la denominada Planicie Central (Ferrusquia-Villafranca, 1993) y abarca las altiplanicies del centro y norte del estado de San Luis Potosí y del sureste del estado de Zacatecas (Luna-Cavazos *et al.*, 2007). Se caracteriza por la presencia de matorral xerófilo (*Agave* spp, *Hechtia* spp y *Yucca* spp), matorral crasicauale (*Opuntia* spp, *Prosopis* spp, entre otras), matorral desértico micrófilo (*Larrea tridentata*, *Flouencia cernua*) y matorral desértico rosetófilo (especies del género *Opuntia* spp, *Agave* spp, *Yucca* spp y *Dasyilirion* spp) (Rzedowski, 2006; Luna-Cavazos *et al.*, 2007; INEGI, 2016).

El clima es semiárido y templado, con temperaturas medias anuales entre 12 y 18 °C correspondiente a los climas BS-BW. El periodo más cálido (mayo-julio) tiene una

temperatura mayor de 22 °C, presenta lluvias de verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual (García, 2004).

1.4.2 Registro de los nidos.

Los nidos fueron registrados por Cruz-Labana *et al.* (2018), reportando n=106 para las regiones de estudio (Figura 1.1). Estos autores realizaron recorridos de campo durante enero y febrero de 2016 con el apoyo de guías de campo (recolectores de escamoles) para localizar los sustratos de anidación de la hormiga escamolera y sus coordenadas geográficas, las cuales se registraron con un equipo GPS GPSmap® 60CSx.

1.4.3 Estimación del NDVI en los sitios de anidación

1.4.3.1 Descarga y procesamiento de las imágenes de satélite.

El NDVI del hábitat de la hormiga escamolera se estimó en n=106 nidos. De la plataforma de la USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), se adquirieron 12 imágenes del satélite Sentinel-2 sensor MSI (Multispectral Instrument). Los años considerados fueron del 2016 al 2021, descargando dos imágenes por año, una para representar el período seco (abril a julio) y otra para indicar el período de lluvias (octubre a diciembre) (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2. Fechas de las imágenes del satélite Sentinel-2 por periodo y trayectoria del satélite.

Fecha			
Año	Período seco	Período de lluvias	Trayectoria del Satélite
2016	25 de mayo de 2016	12 de octubre de 2016	13QHE-13QHF-14QKK-14QKL
2017	10 de abril de 2017	01 de diciembre de 2017	13QHE-13QHF-14QKK-14QKL
2018	04 de junio de 2018	01 de diciembre de 2018	13QHE-13QHF-14QKK-14QKL
2019	20 de mayo de 2019	01 de diciembre de 2019	13QHE-13QHF-14QKK-14QKL
2020	13 de julio de 2020	25 de diciembre de 2020	13QHE-13QHF-14QKK-14QKL
2021	08 de junio de 2021	15 de noviembre de 2021	13QHE-13QHF-14QKK-14QKL

A cada una de las imágenes se les realizó la corrección atmosférica mediante la sustracción de objeto oscuro (Chávez, 1988) a las bandas infrarrojo cercano (banda 8) y el rojo (banda 4), para eliminar el efecto de las condiciones atmosféricas. Una vez realizada la corrección, estas se recortaron al tamaño de las regiones de estudio en el programa ArcGIS 10.8 usando la herramienta *clip*.

La estimación del NDVI se realizó en el software ArcGIS 10.8, usando la calculadora ráster; para ello, se aplicó la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Banda 8 (Infrarroja}^{\text{º}}) - \text{Banda 4(Rojo}^{\text{º}})}{\text{Banda 8 (Infrarroja}^{\text{º}}) + \text{Banda 4(Rojo}^{\text{º}})}$$

El símbolo ^º indica que la imagen ya fue corregida atmosféricamente. La información geográfica de los 106 nidos se convirtió de una base de datos en Excel a un archivo vectorial de puntos, esta capa fue añadida al software ArcGIS 10.8 y mediante la herramienta *extract by multi values to points* se extrajeron los valores NDVI de cada nido por periodo, y la tabla de atributos del archivo vectorial de los nidos fue exportada al software Past 4.08 (Cuadro 1.3).

Cuadro 1.3. Ejemplo de tabla de valores NDVI exportada de cuatro fechas para la región de estudio.

ID	Longitud	Latitud	NDVI16_S	NDVI16_LL	NDVI17_S	NDVI17_LL
48	-101.44	22.48	0.21	0.50	0.24	0.26
50	-101.29	22.42	0.15	0.25	0.18	0.19
51	-101.28	22.47	0.25	0.28	0.23	0.22
52	-101.30	22.47	0.13	0.30	0.21	0.25
53	-101.30	22.47	0.15	0.33	0.21	0.21
54	-101.30	22.47	0.15	0.24	0.18	0.24

* NDVI16_S = NDVI periodo seco de 2016; NDVI16_LL = NDVI periodo de lluvias de 2016. NDVI17_S = NDVI periodo seco de 2017; NDVI17_LL = NDVI periodo de lluvias de 2017.

1.4.4 Análisis estadísticos

A la base de datos que se generó para cada período se le realizó un análisis de homogeneidad de la varianza mediante la prueba de Levene. Los períodos que resultaron significativos de la prueba, se les aplicó un ANOVA de una vía para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los valores del NDVI correspondientes a los nidos en cada uno de los periodos de manera independiente. Estos análisis se hicieron en el software PAST 4.08, bajo las siguientes hipótesis:

H_0 = La información de los 12 periodos son iguales

H_1 = Existe diferencia por lo menos en uno de los 12 periodos.

Para determinar en qué período se registraron las diferencias se realizó una prueba Post Hoc de Tukey con un alfa = 0.5.

1.5 RESULTADOS

1.5.1 Periodo seco

Los valores promedio del NDVI para el periodo seco oscilaron entre 0.21 y 0.30, encontrando los valores máximos en el año 2017 (NDVI = 0.54) y 2020 (NDVI = 0.50). El valor más bajo se registró en el 2020 (NDVI = 0.08; Figura 1.2) localizado en un sitio de suelo desnudo. El análisis de varianza mostró diferencias significativas por periodo seco ($F_{5,630} = 54.68$ $P < 0.0001$). Los valores promedios del NDVI para los años 2020 y 2021 fueron significativamente más altos a los años del 2016 al 2019 (Tukey's $p < 0.0001$). También se encontró que en el año 2019 los valores promedio de NDVI fueron menores a los años 2017 y 2018 (Tukey's $p < 0.0001$; Cuadro 1.4).

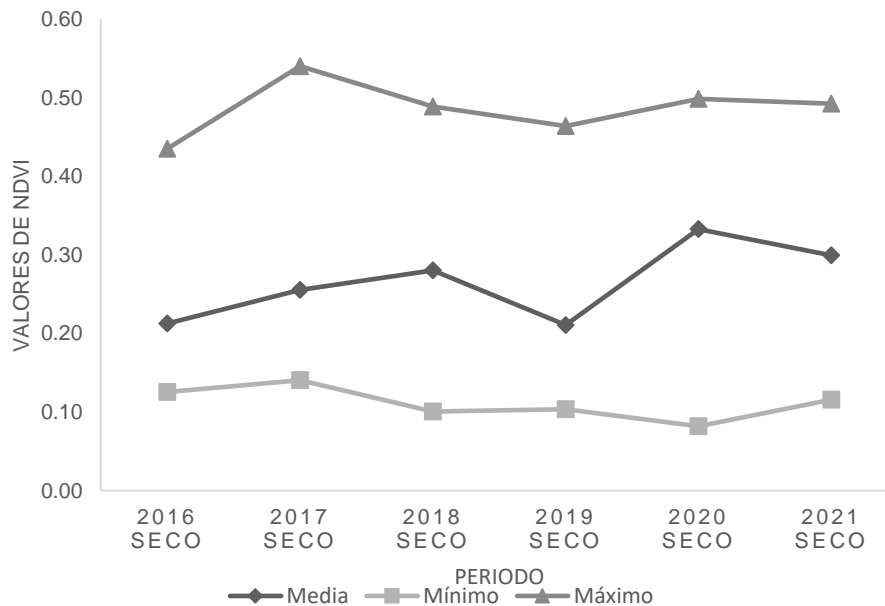


Figura 1.2. Valores promedio, máximos y mínimos de NDVI de la vegetación de los sitios de anidación de *Liometopum apiculatum* Mayr, 2016-2021.

Cuadro 1.4. Resultados de la prueba de Tukey para los valores de NDVI por periodo seco, indicando las diferencias significativas ($P < 0.0001$).

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
2016		<u>P <0.0001</u>	<u>P <0.0001</u>	1	<u>P <0.0001</u>	<u>P <0.0001</u>
2017	6.574		0.08962	<u>P <0.0001</u>	<u>P <0.0001</u>	<u>P <0.0001</u>
2018	10.31	3.732		<u>P <0.0001</u>	<u>P <0.0001</u>	0.2988
2019	0.2009	6.775	10.51		<u>P <0.0001</u>	<u>P <0.0001</u>
2020	18.36	11.78	8.052	18.56		<u>0.004397</u>
2021	13.25	6.674	2.942	13.45	5.11	

1.5.2 Periodo de lluvias

Los valores promedio de NDVI registrados en los periodos secos variaron de 0.19 a 0.42 (Figura 1.3). Los valores máximos se registraron en el periodo seco del año 2016 (NDVI = 0.60) y 2021 (NDVI = 0.51). El valor más bajo se presentó en 2020 (NDVI = 0.09). El análisis de varianza mostró que en este periodo hubo diferencias significativas ($F_{5, 630} = 130$ $P < 0.0001$). El año de 2016 fue el que registró el valor promedio del NDVI más alto, seguido de los años 2018 y 2021 que registraron valores muy similares y diferentes estadísticamente a los años de 2017, 2019 y 2020 (Tukey's <0.0001). Los valores promedio del NDVI más bajos se encontraron en el año 2020 presentando una diferencia notable a los años de 2017 y 2019 (Tukey's $p < 0.0001$; Cuadro 1.5).

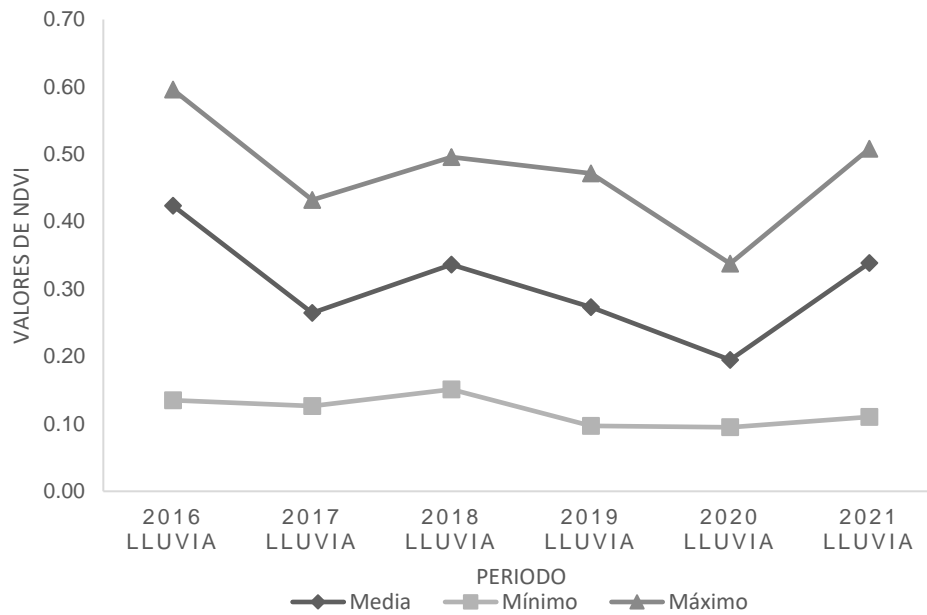


Figura 1.3. Valores promedio, mínimos y máximos de NDVI de la vegetación en los sitios de anidación de *Liometopum apiculatum* Mayr, 2016-2021.

Cuadro 1.5. Resultados de la prueba de Tukey para los valores de NDVI registrados en los periodos de lluvia indicando las diferencias significativas ($P < 0.0001$).

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
2016		<u>$P < 0.0001$</u>	<u>$P < 0.0001$</u>	<u>$P < 0.0001$</u>	<u>$P < 0.0001$</u>	<u>$P < 0.0001$</u>
2017	23.09		<u>$P < 0.0001$</u>	0.9397	<u>$P < 0.0001$</u>	<u>$P < 0.0001$</u>
2018	12.74	10.34		<u>$P < 0.0001$</u>	<u>$P < 0.0001$</u>	0.9995
2019	21.78	1.31	9.032		<u>$P < 0.0001$</u>	<u>$P < 0.0001$</u>
2020	33.16	10.07	20.41	11.38		<u>$P < 0.0001$</u>
2021	12.28	10.81	0.4639	9.496	20.88	

1.6 DISCUSIÓN

Los valores de NDVI estimados para los sitios de anidación de la hormiga escamolera fueron similares a los reportados en ecosistemas áridos y semiáridos de otras zonas del mundo (Dall’Olmo & Karnieli, 2002; Escobar-Flores *et al.*, 2019; He *et al.*, 2021). Sin embargo, en el periodo de lluvias del año 2016, destacó el valor promedio de NDVI de 0.42, el cual es muy alto e indica un sitio con vegetación densa similar a la de un bosque o una selva mediana perennifolia (Pettorelli *et al.* 2006; Parent & Verbyla 2010). De acuerdo con Chang *et al.* (2022), en los ecosistemas áridos la variable principal que

influye en el aumento del NDVI es la precipitación acumulada de varios meses, lo cual coincide con lo observado en la imagen que se analizó en periodo de secas del año 2016. Esta imagen fue precedida por eventos extraordinarios de lluvias para la región con cuatro meses que acumularon 363 mm (estación meteorológica de Pinos #32068 Cuenca San Pablo) y con una tasa menor de evaporación (129.7 mm). Se ha reportado que en diferentes ecosistemas (pastizales, cultivos y bosques) de América (Wang *et al.*, 2003) los eventos continuos de lluvias promueven el crecimiento de la vegetación y los valores de NDVI pueden ser mayores a 0.5, como se obtuvo en uno de los sitios de anidación (NDVI = 0.60) analizados en el presente estudio. Autores como Wu *et al.* (2011), mencionan que los efectos positivos de la precipitación se relacionan con balances hídricos que promueven la humedad en el suelo, la cual influye directamente en el crecimiento de la vegetación.

En el mismo año (2016), el periodo seco destacó por ser el año con los valores promedio más bajos de NDVI (0.21), y también fue precedido por cuatro meses que acumularon únicamente 38 mm y coincidió con los periodos de evaporación más altos (abril con 218.58 mm, mayo con 241.1 mm). La temperatura influye en la transpiración de la vegetación, y este proceso está ligado a la fotosíntesis y al intercambio gaseoso de la planta (Bruna-Lavilla & Ortega-Salinas, 2018), lo cual tiene marcada influencia en la densidad de la vegetación. De acuerdo con Chuvieco (2019) la vegetación cuenta con inercia térmica alta, con el aumento de la temperatura ambiental aumenta la transpiración de las plantas para mantener su equilibrio térmico. En ambientes semiáridos la evapotranspiración comúnmente induce a la vegetación a adaptarse a condiciones que le permitan soportar el estrés hídrico ocasionado por la irregularidad de la precipitación y temperaturas altas (Navejas-Jimenes *et al.*, 2011).

Uno de los años con los valores más bajos de NDVI (0.26) fue el 2017, incluso con valores similares entre los periodos de lluvias y secas. Las dos imágenes que se analizaron en este año precedían de meses prácticamente sin precipitación; por ejemplo, para el período seco de los meses de enero a marzo, únicamente se registraron 10.2 mm, y para el período de lluvias 6.8 mm. De acuerdo con Piao *et al.* (2011) y Camberlin *et al.* (2007) en las zonas áridas y semiáridas el NDVI es afectado por la precipitación.

En los periodos secos el NDVI tiende a incrementarse y en los periodos de lluvias a disminuir por la escasa humedad en el suelo y por altas temperaturas y tasas elevadas de evapotranspiración (Tiedemann & Zerda, 2008). En algunos pastizales del estado de Zacatecas, Olmos-Trujillo *et al.* (2020) estimaron índices de vegetación más altos en la temporada húmeda (verano) y los más bajos en la seca (invierno).

La vegetación y cobertura del suelo provee a la hormiga escamolera de sustratos de anidación y de forrajeo, así como de protección contra las temperaturas altas, del viento y radiación solar (Rafael-Valdez *et al.*, 2017; 2019). Estudios realizados por Cruz-Labana *et al.* (2014), mostraron que el estado de conservación del hábitat de la hormiga escamolera influye en la densidad de nidos, registrando en las áreas de suelos desnudos y áreas sobre pastoreadas la menor densidad. En cuanto a cantidad recolectada de escamol por cada nido, Figueroa-Sandoval *et al.* (2018) mencionan que los nidos con mayor posibilidad de recolección estuvieron relacionados con el estado de conservación del hábitat de la hormiga escamolera.

En este estudio se utilizaron imágenes satelitales con resolución espacial de 10 m². Con esta resolución, no fue posible identificar el NDVI específico del sustrato de anidación de la hormiga escamolera, sólo fue posible calcular el valor de ese pixel de la imagen. Por ello, se recomienda que en futuras investigaciones que se realicen para entender los requerimientos ecológicos de la hormiga, se utilicen tecnologías o imágenes de resolución mayor, que permita estimar con mayor precisión el NDVI de la planta en que esta hormiga anida.

Para diferenciar el estado de conservación de los sitios de anidación con mayor precisión, se sugiere aumentar el tamaño de muestra (número de nidos) y relacionar el nivel de conservación del hábitat con la densidad de nidos, tamaño de la colonia y con el rendimiento de escamoles. Esta información será útil para llevar a cabo acciones de conservación de las colonias de *Liometopum apiculatum* y de su hábitat, así como para elaborar normas y planes de manejo para el aprovechamiento sustentable de esta especie en el Altiplano Potosino-Zacatecano.

1.7 CONCLUSIONES

Los valores del NDVI del análisis retrospectivo (2016-2021) realizado por primera vez en sitios de anidación de la hormiga escamolera (*L. apiculatum*) variaron de 0.21 a 0.42 y correspondieron a valores registrados en ambientes áridos similares. El NDVI dependió de la precipitación, específicamente con eventos extraordinarios de lluvia. Resaltan valores altos de NDVI (periodo de lluvia 2016 NDVI = 0.60) y bajos (periodo seco 2020 NDVI = 0.08). La información generada en esta investigación contribuye al conocimiento de requerimientos ecológicos de esta especie en el centro-norte de México.

LITERATURA CITADA

- Bruna-Lavilla, P., & Ortega-Salinas, M. (2018). *Introducción a la evapotranspiración del agua en las plantas cultivadas*. Informaciones técnicas / Centro de Transferencia Agroalimentaria, 269, 8. Dirección General de Desarrollo Rural, Gobierno de Aragón. <https://rica.chil.me/post/introduccion-a-la-evapotranspiracion-del-agua-en-las-plantas-cultivadas-223124>
- Bunnefeld, N., Linnell, J.D.C., Odden, J., & Van Duijn, M.A.J., ANDERSEN, R. (2006). Risk tasking by Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in a human-dominated landscape: effects of sex and reproductive status. *Journal of Zoology*. 270: 31-39 <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2006.00107.x>
- Camberlin, P., Martiny, N., Philippon, N., & Richard, Y. (2007). Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sensing of Environment*. 106, 199–216. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.009>
- Chang, J., Gong, L., Zeng, F., Xue, J., Mao, D., Cao, Y., Mu, G., & Wang, S. (2022). Using hydro-climate elasticity estimator and geographical detector method to quantify the individual and interactive impacts on NDVI in oasis-desert ecotone. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 3131-3148. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02184-4>
- Chuvieco, S.E. (2019). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Digital Reasons. ISBN: 9788412031546
- Chávez Jr., P.S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3): 459-479.
- Cruz-Labana, J.D., Tarango-Arámbula, L.A., Alcántara-Carbajal, J.L., Pimentel-López, J., Ugalde-Lezama, S., Ramirez-Valverde, G., & Méndez-Gallegos, S.D.J. (2014). Habitat use by the "Escamolera" ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) in central Mexico. *Agrociencia*, 48(6): 569-582.

- Cruz-Labana, J.D., Crosby-Galván, M.M., Delgado-Alvarado, A., Alcántara-Carbajal, J.L., Cuca-García, J.M., & Tarango-Arámbula, L.A. (2018). Nutritional content of *Liometopum apiculatum* Mayr larvae (“escamoles”) by vegetation type in north-central Mexico. *Journal of Asia-Pacific Entomology*. 21, 1239–1245. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2018.09.008>
- Dall'olmo, G., & Karnieli, A. (2002). Monitoring phenological cycles of desert ecosystems using NDVI and LST data derived from NOAA-AVHRR imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 23 (19), 4055-4071, <https://doi.org/10.1080/01431160110115988>
- Escobar-Flores, J.G., Sandoval, S., Valdez, R., Shahriary, E., Torres, J., Álvarez-Cárdenas, S., Gallina-Tesaro, P. (2019). Waterhole detection using a vegetation index in desert bighorn sheep (*Ovis canadensis cremnobates*) habitat. *PLOS ONE* 14(1). e0211202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211202>
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1993), *Geology of Mexico: A Synopsis*. En Ramammoorthy, T.P., Bye, R.A., Lot, A., Fa., J. (eds.), *Biological diversity of Mexico: Origins and distribution*. Oxford University Press. New York.
- Figueroa-Sandoval, B., Ugalde-Lezama, S., Pineda-Pérez, F.E., Ramírez-Valverde, G., Figueroa Rodríguez, K.A., & Tarango-Arámbula, L.A. (2018). Producción de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr 1870) y su hábitat en el Altiplano Potosino-Zacatecano, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 15(2), 235-245.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional autónoma de México. Serie Libro N° 6. México, D. F.
- He, P., Xu, L., Liu, Z., Jing, Y., & Zhu, W. (2021). Dynamics of NDVI and its influencing factors in the Chinese Loess Plateau during 2002–2018. *Regional Sustainability*, 2(1), 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2021.01.002>

- Hicke, J.A., Asner, G.P., Randerson, J.T., Tucker, C.J., Los, S.O., Birdsey, R., Jenkins, J.C., & Field, C.B. (2002). Trends in North American net primary productivity derived from satellite observations, 1982–1998. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1018-1032. <https://doi.org/10.1029/2001GB001550>
- INEGI, (2016). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), Edición: 1.* Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. URL: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Jensen, J.R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, 608 Pearson Prentice Hall. United States. ISBN: 978-0131889507
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, B.N., & Tucker, C.J. (1985). Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8),1271-1318.
- Keddy, P.A. (2007). *Plants and Vegetation*. Cambridge University Press, Cambridge, 680. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511812989>
- Latumahina, F. (2021). Ants as a climate change bioindicator in Sirimau Forest at Ambon Island. *AIP Conference Proceedings*, 2360 (1). 040005. <https://doi.org/10.1063/5.0059861>
- Luna-Cavazos, E., Romero-Manzanares, A., & Moya, G. (2007). Distribución geográfica y ecológica de papas silvestres (*Solanum L.*) del altiplano Potosino-Zacatecano, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 13(1), 35-41.
- Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., & Marshack, A.L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE transactions on geoscience and Remote Sensing*, 33, 481-486. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1995.8746029>
- Narendra, A., & Ramachandra, T.V. (2008). Remote detection and distinction of ants using nest-site specific LISS-derived Normalised Difference Vegetation Index. *Asian Myrmecology*. 2, 51-62

- Navejas-Jiménez, J., Nieto-Garibay, A., Fraga-Palomino, H. C., Rueda-Puente, E. O., & Ávila-Serrano, N. Y. (2011). Comparación de métodos para estimar la evapotranspiración en una zona árida citrícola del noroeste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 147-155.
- Neigh, C.S., Tucker, C.J., & Townshend, J.R. (2008). North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1749-1772. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.018>
- Olmos-Trujillo, E., González-Trinidad, J., Júnez-Ferreira, H., Pacheco-Guerrero, A., Bautista-Capetillo, C., Avila-Sandoval, C., & Galván-Tejada, E. (2020). Spatio-temporal response of vegetation indices to rainfall and temperature in a semiarid region. *Sustainability*, 12(5): 1939. <https://doi.org/10.3390/su12051939>
- Parent, M.B., & Verbyla, D. (2010). The Browning of Alaska's Boreal Forest. *Remote Sensing*, 2(12), 2729-2747. <https://doi.org/10.3390/rs2122729>
- Pettorelli, N., Gaillard, J.M., Mysterud, A., Duncan, P., Chr. Stenseth, N., Delorme, D., Van Laere, G., Toïgo, C., & Klein, F. (2006). Using a proxy of plant productivity (NDVI) to find key periods for animal performance: the case of roe deer. *Oikos*, 112: 565-572. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2006.14447.x>
- Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jedrzejewska, B., Lima, M., Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. *Climate Research*, 46, 15-27. <https://doi.org/10.3354/cr00936>
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press. ISBN:978-0-19969-316-0.
- Piao, S., Wang, X., Ciais, P., Zhu, B., Wang, T., & Liu, J. (2011). Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global change biology*, 17(10): 3228-3239. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02419.x>

- Rafael-Valdez, J., Tarango-Arámula, L.A., Ugalde-Lezama, S., Lozano-Cavazos, E.A., Ruíz-Vera, V.M., & Bravo-Vinaja, A. (2017). Sustratos forrajeros y de anidación de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr, *Hymenoptera: Formicidae*) en Villa González Ortega, Zacatecas, México. *Agrociencia*, 51(7), 755-769.
- Rafael-Valdez, J., Tarango-Arámula, L.A., Ugalde-Lezama, S., Cruz-Labana, J.D., Clemente-Sánchez, F., & Cadena-Iñiguez, J. (2019). Foraging amplitude of the escamolera ant (*Liometopum apiculatum* Mayr, *Hymenoptera: Formicidae*) in a semi-arid area of the Zacatecan highlands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 18(1), 5-19.
- Reynolds-Hogland, M.J., & Mitchell, M.S. (2007). Effects of roads on habitat quality for bears in the southern Appalachian: a long-term study. *Journal of Mammalogy*. 88 (4), 1050–1061. <https://doi.org/10.1644/06-MAMM-A-072R1.1>
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Sehell, J.A., & Harlan J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep. RSC 1978-4, Texas A&M University Remote Sensing Center., College Station, Texas.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*, 1ra. Edición, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México
- Tiedemann, J.L., & Zerda, H.R. (2008). Relación temporal NDVI - Precipitación del bosque y pastizal natural de Santiago del Estero, Argentina = Temporary NDVI - Precipitation relation of natural forest and grassland in Santiago del Estero, Argentina. *Ciencia e Investigación Forestal*. 14 (3), 497–507. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2008.304>.
- Wang, J., Rich, P.M., & Price, K.P. (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International journal of remote sensing*, 24(11), 2345-2364. <https://doi.org/10.1080/01431160210154812>
- Wu, C., Chen, J.M., & Huang, N. (2011). Predicting gross primary production from the enhanced vegetation index and photosynthetically active radiation: Evaluation and

calibration. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3424-3435.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.006>

CAPITULO II

VARIABLES TOPOGRÁFICAS Y ESPECTRALES DEL HÁBITAT DE LA HORMIGA ESCAMOLERA EN EL ALTIPLANO POTOSINO-ZACATECANO

2.1 RESUMEN

La recolecta de los escamoles es económicamente importante para las comunidades rurales del Altiplano Potosino-Zacatecano. El objetivo de este estudio fue realizar un análisis exploratorio de las variables topográficas y espectrales relacionadas a los sitios de anidación de la hormiga escamolera en cinco ejidos del Altiplano Potosino-Zacatecano, mediante cinco variables topográficas derivadas del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 y tres variables espectrales relacionadas a doce imágenes satelitales Sentinel-2. La información de las variables se evaluó con un Análisis de Componentes Principales realizado por área de estudio y por sitios de anidación. El primer componente de las variables topográficas explicó el 32% de la varianza y estuvo compuesto principalmente por pendiente, elevación, la Medida de Rugosidad Vectorial (VRM) y el Índice de Posición Topográfica (TPI). El primer componente del periodo de lluvias registró el 61.25% de la varianza y estuvo conformado por las variables Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) e Índice de Suelo Desnudo (BSI) de todos los periodos. En el periodo seco, el primer componente presentó el 70.96% de la varianza y se conformó por el NDVI de todos los periodos. El mayor número de sitios de anidación fue asociado a los segundos componentes de los tres análisis debido a que estos componentes presentaron variables importantes para el hábitat de la hormiga escamolera: una mayor cobertura vegetal y mejor refugio térmico.

Palabras Clave: *Liometopum apiculatum*, Sentinel-2, Continuo de Elevaciones Mexicano. 3.0, Componentes Principales.

2.2 ABSTRACT

The collection of escamoles is economically important for the rural communities of the Potosino-Zacatecan Altiplano. The objective of this study was to perform an exploratory analysis of the topographic and spectral variables related to the nesting sites of the escamolera ant in five ejidos of the Potosino-Zacatecan Highlands using five topographic variables derived from the Mexican Elevation Continuum 3.0 and three spectral variables related to twelve Sentinel-2 satellite images. The information of the variables was evaluated with a Principal Component Analysis performed at the study area level and at the nesting site level. The first component of the topographic variables explained 32% of the variance and was mainly composed of slope, elevation, the Vector Roughness Measure (VRM) and the Topographic Position Index (TPI). The first component of the rainy period recorded 61.25% of the variance and was composed of the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Bare Soil Index (BSI) variables of all periods. In the dry period, the first component presented 70.96% of the variance and was confirmed by the NDVI of all periods. The greatest number of nesting sites was associated with the second components of the three analyses because these components presented important variables for the nesting habitat of the escamolera ant: a greater vegetation cover and better thermal refuge.

Key words: *Liometopum apiculatum*, Sentinel-2, Mexican Elevation Continuum C.E.M. 3.0, Principal Components.

2.3 INTRODUCCIÓN

En México, el escamol nutricionalmente es importante. Su porcentaje de proteína ronda el 42.7% (en 100 gr de escamol) también aporta vitaminas y minerales como sodio, potasio, calcio, magnesio, entre otros (Cruz-Labana *et al.*, 2018; Lara-Juárez *et al.*, 2015). El aprovechamiento del escamol beneficia económicamente a las comunidades rurales, el escamol se vende entre \$150.00 MXN y los \$500.00 MXN por kilogramo, lo que representa ingresos importantes para los habitantes de las comunidades donde se recolectan (Tarango-Arámbula, 2012; Rafael-Valdez *et al.*, 2017).

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística que tiene por objetivo reducir la dimensionalidad de un número dado de variables originales convirtiéndolas en un número menor de variables denominadas componentes principales sin que se pierda la variación original (Pearson, 1901). Además de la reducción de la dimensionalidad de los datos el ACP también ayuda a eliminar información redundante (Harris, 1975). Este análisis ha sido aplicado en las ciencias biológicas para analizar la abundancia de insectos y los factores que afectan esta abundancia (Bravo *et al.*, 2011; Triana *et al.*, 2015), así como en estudios sobre la distribución de especies vegetales y el análisis de las variables topográficas y climáticas que influyen en la distribución de dichas especies vegetales (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2014; Sandoval *et al.*, 2020).

En el Altiplano Potosino-Zacatecano la hormiga escamolera se asocia con comunidades vegetales de matorral xerófilo, matorral rosetófilo, matorral crasicaule y pastizal (Cruz-Labana *et al.* 2014; Figueroa-Sandoval *et al.*, 2018; Rafael-Valdez *et al.*, 2017; 2019), las cuales utiliza como sustrato de anidación y forrajeo. Prefiere para anidar al maguey mezcalero (*Agave salmiana*), nopal rastrero (*Opuntia rastrera*), yuca (*Yucca* spp.) y ramoncillo (*Dalea bicolor*) y para forrajear a la yuca (*Yucca* spp.), maguey mezcalero (*Agave salmiana*), nopal rastrero (*Opuntia rastrera*), mezquite (*Prosopis* spp.) y huizache (*Acacia farnesiana*) (Rafael-Valdez *et al.*, 2017; 2019). A nivel topográfico, la hormiga escamolera se registra en alturas entre los 1000 y 2500 msnm (Cruz-Labana *et al.*, 2014; Hernández-Roldan *et al.*, 2017), y muestran preferencia por sitios planos con inclinaciones entre 0 -10 ° (Cruz-Labana *et al.*, 2018).

Los cambios en el uso de suelo, eventos meteorológicos como sequías o precipitaciones irregulares, un sobrepastoreo en las áreas de anidación, la falta de prácticas y normativas adecuadas de recolección y venta del escamol, han provocado la fragmentación y pérdida del hábitat y con ello una disminución de nidos de hormiga escamolera (Tarango-Arámbula, 2012; Rafael-Valdez *et al.*, 2017). El estado de conservación del hábitat de la hormiga escamolera tiene impacto en el rendimiento de escamol por nido, los nidos con estado de conservación bueno pueden presentar rendimiento aproximado de 1500 g por nido, mientras que los nidos de sitios perturbados presentan rendimientos aproximados entre 150 – 257 g por nido (Figueroa-Sandoval *et al.*, 2018). Se tiene además falta de conocimientos de los aspectos biológicos-ecológicos de la hormiga escamolera, estos conocimientos podrían favorecer el diseño de estrategias para el manejo y aprovechamiento de los escamoles, así como el diseño de una normatividad para evitar su sobreexplotación y la destrucción de su hábitat. (Tarango-Arámbula, 2012; Cruz-Labana *et al.*, 2014, Lara-Juárez *et al.*, 2015).

Este estudio tuvo como objetivo realizar el análisis exploratorio de las variables topográficas y espectrales que se relacionan con los sitios de anidación de la hormiga escamolera en cinco ejidos del Altiplano Potosino-Zacatecano, mediante variables derivadas del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 e imágenes del satélite Sentinel-2 en dos periodos de los años 2016 a 2021, así como indagar sobre las variables que tienen mayor influencia en los sitios de anidación y ver si hay cambios en la contribución de las variables según el periodo del año (periodo de lluvias y periodo seco).

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Área de estudio

La investigación se realizó de septiembre a diciembre de 2021 dentro del Altiplano Potosino-Zacatecano. El Altiplano Potosino-Zacatecano es una región localizada en la Planicie Central (Ferrusquía-Villafranca, 1993) y abarca las altiplanicies del centro y norte del estado de San Luis Potosí y del sureste del estado de Zacatecas (Luna-Cavazos *et al.*, 2007). El área de estudio incluyó cinco ejidos del Altiplano Potosino-Zacatecano (Figura 2.1), los ejidos Santa Teresa, Estación Ipiña y ejido el Centro Ahualulco del

municipio de Ahualulco, San Luis Potosí y los ejidos Santiago y Tolosa del municipio de Pinos, Zacatecas (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Coordenadas de las comunidades consideradas para esta investigación.

Estado	Municipio	Comunidad	Latitud	Longitud
San Luis Potosí	Ahualulco	Santa Teresa	22°23'10.70"N	-101°18'10.99"O
		Estación Ipiña	22°29'27.99"N	-101°16'27.00"O
		Ejido el Centro	22°24'11.45"N	-101° 7'47.22"O
		Ahualulco		
Zacatecas	Pinos	Santiago	22°27'15.85"N	-101°27'31.99"O
		Tolosa	22°31'13.40"N	-101°21'22.64"O

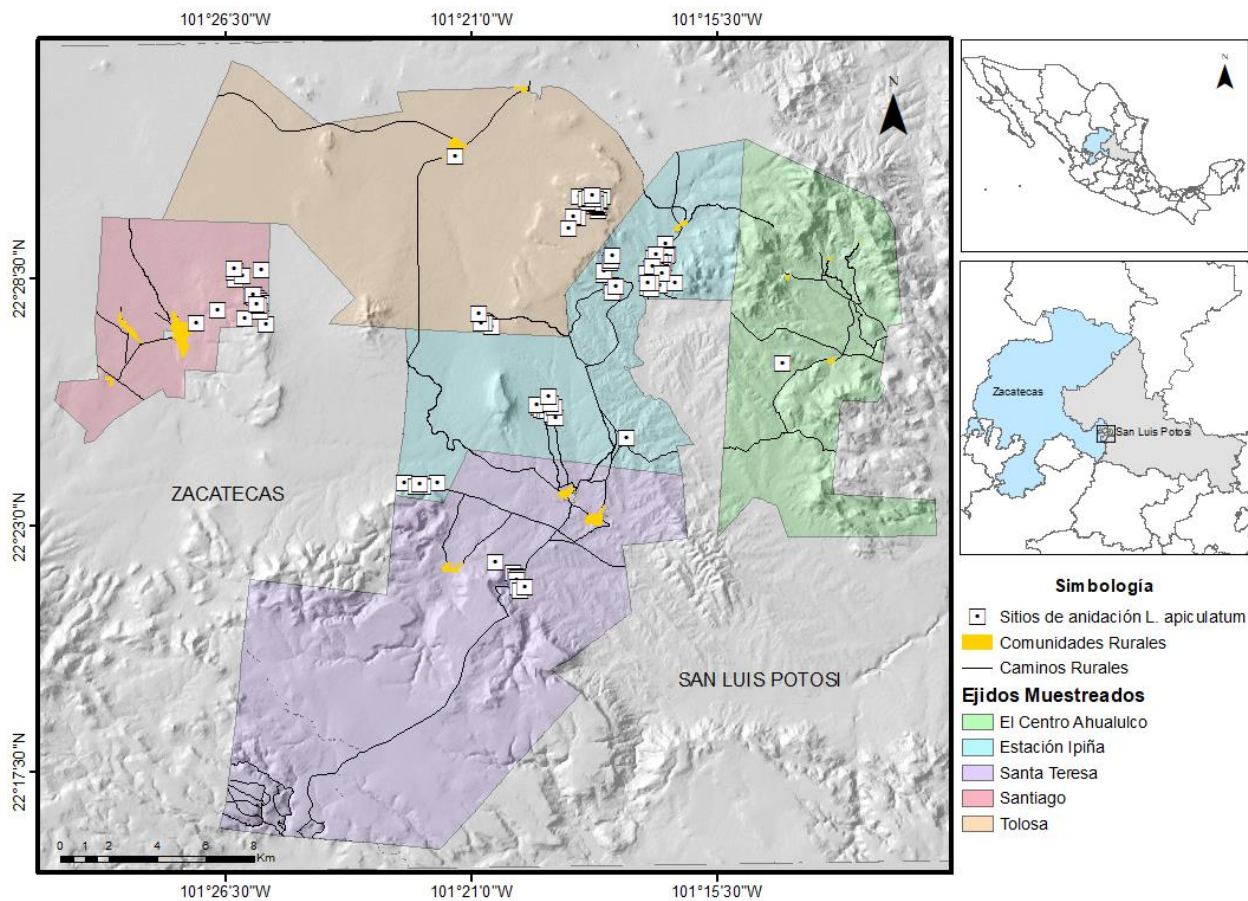


Figura 2.1. Ejidos muestreados y nidos analizados en el Altiplano Potosino-Zacatecano. La vegetación del área de estudio se caracteriza por la presencia de matorral xerófilo, matorral crasicaule, matorral desértico microfilo y matorral desértico rosetófilo. (Rzedowski, 2006; Luna-Cavazos *et al.*, 2007; INEGI, 2016). El área de estudio presenta

climas semiáridos y templados, con temperaturas medias anuales entre 12 y 18 °C correspondiente a los climas BS-BW. El periodo más cálido es entre mayo-julio, el cual tiene una temperatura mayor de 22°C, con lluvias en verano el promedio de precipitación anual va de 240 a 770 mm (Cuanalo *et al.*, 1989; García, 2004). A nivel topográfico el área de estudio presenta altitudes entre 1000 y 2500 msnm y su fisiografía se constituye por serranías, planicies y valles (INECC, 2007; Hernández-Oria, 2010; CONABIO, 2021).

2.4.2 Descarga del CEM 3.0 y las imágenes Sentinel-2

Para el área de estudio Cruz-Labana *et al.* (2018) reportaron 106 nidos de hormiga escamolera. Los datos los recolectaron de enero a febrero de 2016, para localizar los sitios de anidación de la hormiga escamolera fueron guiados por recolectores de escamoles, las coordenadas geográficas las registraron con un equipo GPS GPSmap® 60CSx.

El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) presenta una resolución de 15 metros y se obtuvo de la plataforma del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a través del enlace: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>. Donde se descargaron los archivos correspondientes a los estados de San Luis Potosí y Zacatecas.

Las imágenes de satélite utilizadas se adquirieron del repositorio de la USGS <https://earthexplorer.usgs.gov/>, donde se descargaron 2 imágenes por año, entre los años 2016 a 2021. Una imagen correspondió al periodo de lluvias (abril a junio) y la otra al periodo seco (octubre a diciembre) (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 Fechas de las imágenes Sentinel-2 descargadas.

Año	Fecha de adquisición de las imágenes	
	Período seco	Período de lluvias
2016	25 de mayo de 2016	12 de octubre de 2016
2017	10 de abril de 2017	01 de diciembre de 2017
2018	04 de junio de 2018	01 de diciembre de 2018
2019	20 de mayo de 2019	01 de diciembre de 2019
2020	13 de julio de 2020	25 de diciembre de 2020
2021	08 de junio de 2021	15 de noviembre de 2021

2.4.3 Procesamiento de las variables fisiográficas

Los Continuos de Elevaciones correspondientes a los estados de San Luis Potosí y Zacatecas fueron recortados al tamaño del área de estudio mediante el software ArcGIS 10.1 y un archivo vectorial del área de estudio. Los archivos resultantes se unieron mediante la herramienta Mosaic to new raster para crear el Modelo Digital de Elevación (MDE). Al MDE se le realizó un proceso de relleno de pixeles vacíos a partir de sus vecinos para obtener un MDE con valores completos.

El MDE se usó para obtener la elevación del área de estudio (msnm) y para generar cinco variables topográficas: 1) Pendiente, que indica el grado de inclinación del terreno, expresada en grados, 2) Curvatura, que señala el tipo de perfil de curvatura que tiene la pendiente, donde los valores positivos se asocian a zonas convexas, los negativos a zonas cóncavas y los valores cercanos a cero indican área plana, 3) La Medida de Rugosidad Vectorial (VRM, Vectorial Ruggedness Measure) que evalúa la irregularidad del terreno, sus resultados se expresan en escala de 0 al 1 donde las áreas planas se denotan en valores cercanos al cero y conforme aumenta la irregularidad del terreno los valores se aproximan más al 1 (Sappington *et al.* 2007), 4), El índice de Carga de Calor (HLI, Heat Load Index) estima la cantidad de radiación solar que recibe un terreno en valores de cero (pendientes más frías) a 1 (pendientes más cálidas) (McCune y Keon, 2002), 5) El Índice de Posición Topográfica (TPI, Topographic Position Index) método que clasifica la altitud de un punto comparándolo con puntos vecinos. Si el punto es más alto que sus vecinos, se denomina como cresta y sus valores son positivos. Si el punto es más bajo que sus vecinos, se le denomina como valle y sus valores son negativos, los valores cercanos al cero indican zonas planas (Jenness, 2006).

La pendiente y la curvatura se procesaron con herramientas de ArcGIS 10.1 (Slope y Curvature, respectivamente) y para el procesamiento del VRM, HLI y TPI se requirió de la descarga e instalación de dos cajas de herramientas externas a ArcGIS, la caja Terrain tools para el VRM y la caja Topographic Tools para realizar el HLI y el TPI. Las variables topográficas se estandarizaron con el fin de reducir los efectos debido a la diferencia de magnitudes de las variables.

2.4.4 Procesamiento de las variables espectrales

Previo a la obtención de las variables espectrales, las imágenes del satélite Sentinel-2 se sometieron (de manera independiente) al procedimiento de corrección atmosférica de sustracción de objeto oscuro (Chávez, 1988), éste elimina el efecto de las condiciones climáticas atmosféricas. Este procedimiento se realizó en el software QGIS 3.16 mediante el complemento *Semi-automatic Classification Plugin*. Las imágenes satelitales corregidas se recortaron al tamaño del área de estudio mediante un archivo vectorial del área de estudio y la herramienta clip en ArcGIS 10.1.

Las variables espectrales consideradas fueron el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI Normalized Difference Vegetation Index*), Índice de Agua de Diferencia Normalizada (*NDWI Normalized Difference Water Index*) y el Índice de Suelo Desnudo (*BSI Bare Soil Index*).

El NDVI se usó para estimar la cantidad y el vigor vegetal en una superficie con valores del -1 al 1, los valores negativos indican la presencia de cuerpos reflectantes, mientras que del 0 a 1 indican el aumento de la actividad y de la densidad vegetal (Kriegler *et al.* 1969), su procesamiento requirió de la banda 4 (rojo) y la banda 8 (infrarrojo cercano) de cada imagen y la calculadora Raster de ArcGIS 10.1, usando la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{\text{Banda } 8^{\varphi} - \text{Banda } 4^{\varphi}}{\text{Banda } 8^{\varphi} + \text{Banda } 4^{\varphi}}$$

El símbolo φ indica que la imagen ya ha sido corregida atmosféricamente.

El NDWI se utilizó para detectar cuerpos de agua presentes en un área, mediante la reflectancia de la misma, los valores positivos altos se asocian a cuerpos de agua y los valores negativos cercanos a 0 indican la ausencia de ellos y presencia de vegetación y suelo (McFeeters, 1996), el NDWI se obtuvo mediante las bandas 3 (verde) y la banda 8 (infrarrojo cercano) y la calculadora raster de ArcGIS 10.1, mediante la expresión:

$$NDWI = \frac{\text{Banda } 3^{\varphi} - \text{Banda } 8^{\varphi}}{\text{Banda } 3^{\varphi} + \text{Banda } 8^{\varphi}}$$

El BSI fue usado para detectar áreas de suelo desnudo, los valores más bajos corresponden a suelos cubiertos y los valores positivos más altos corresponden a suelos

desnudos (Rikimaru y Miyatake, 1997). El BSI se obtuvo usando la calculadora raster de ArcGIS 10.1 y las bandas corregidas: banda 2 (azul), banda 4 (rojo), banda 8 (infrarrojo cercano) y banda 11 (infrarrojo de onda corta), la expresión usada fue:

$$\text{BSI} = \frac{(\text{Banda } 11^{\text{º}} + \text{Banda } 4^{\text{º}}) - (\text{Banda } 8^{\text{º}} + \text{Banda } 2^{\text{º}})}{(\text{Banda } 11^{\text{º}} + \text{Banda } 4^{\text{º}}) + (\text{Banda } 8^{\text{º}} + \text{Banda } 2^{\text{º}})}$$

2.4.5 Análisis exploratorio del hábitat

El ACP con las variables topográficas de toda el área de estudio requirió de ingresar las variables topográficas al ArcGIS 10.1 y posteriormente se eligió la herramienta *Principal Components*. El resultado fue un archivo Raster en el que se visualizaron los componentes principales presentes y una base de datos en el que se describieron los componentes principales y la varianza de cada uno de ellos. El procedimiento se ejecutó dos veces más, pero cambiando las variables topográficas por las variables espectrales del periodo de lluvias y otro con las variables espectrales de los periodos secos.

Se realizó también un análisis de los componentes principales de los sitios de anidación, para ello se usó un archivo vectorial de puntos correspondiente a los sitios de anidación dentro del área de estudio y con la herramienta *extract multivalued to points* se extrajo la información de las 18 variables para posteriormente exportar la tabla de atributos del archivo vectorial en formato .txt.

La tabla de atributos del registro de los puntos fue abierta en Excel, donde la información se separó en tres bases de datos independientes por tipo de variable y por periodo. Estas bases de datos se guardaron de nuevo en formato .txt y fueron importadas al software PAST 4.08, donde se realizaron tres ACP correspondientes a cada base de datos. Previo al ACP, la información de la base de datos se interpretó para identificar cual fue la preferencia del sitio de anidación de acuerdo a cada variable.

2.4.6 Análisis estadístico

Los ACP del área de estudio se usaron para identificar el componente con la mayor varianza, así como cuál de ellos presentó la mayor distribución para el nivel de área de estudio y por sitios de anidación, esto se realizó mediante una tabulación cruzada en ArcGIS 10.1.

Los ACP de los sitios de anidación permitieron identificar la influencia y la varianza de los componentes en los nidos y cuáles fueron las variables de mayor peso dentro de cada componente. Con el software PAST 4.08 se elaboraron gráficos de barras en los que se visualiza la influencia de cada variable por componente. Asimismo, se elaboraron cuadros en los que se señalan los porcentajes de varianza de cada componente.

2.5 RESULTADOS

2.5.1 Descripción de las variables de los nidos

2.5.1.1 Variables topográficas

Las variables topográficas de los sitios de anidación comprenden de 2070 a 2288 msnm de altitud con promedio de 2164.8. La pendiente varió de 0 a 28° y únicamente 20 sitios de anidación se localizaron en inclinaciones del terreno mayores a 10°. La curvatura varió más en cuanto al número de sitios de anidación, de los 106, 49 se encontraron en zonas de curvatura convexa (-3.5 a -0.44) que son áreas donde el flujo del agua es más rápido evitando así la acumulación del agua y por ende que la zona no se inunde, 37 en zonas de curvatura cóncava (0.44 a 3.08) áreas donde el flujo del agua es más lento y aumenta la acumulación del agua y 20 en zonas planas (0). Respecto a la Rugosidad Vectorial (VRM) los sitios de anidación se distribuyeron principalmente en zonas planas (VRM 0.000006 – 0.004). Con base al Índice de Carga de Calor (HLI), 44 sitios de anidación se ubicaron en pendientes frescas (HLI < 0.58) y 62 en cálidas (HLI > 0.58). En lo tocante al Índice de Posición Topográfica (TPI), 49 sitios de anidación se localizan en valles (zonas de baja altitud TPI < -0.18), 54 en crestas (zonas de alta altitud TPI > 0.09) y tres en zonas planas (TPI= 0).

2.5.1.2 Variables espectrales

Las variables espectrales variaron de acuerdo al periodo. Los valores NDVI promedio de los periodos secos se encontraron entre 0.21 – 0.33, el valor más bajo se registró en 2020 (NDVI = 0.08) y el más alto en 2017 (NDVI = 0.54). En los periodos de lluvia, los valores promedio del NDVI variaron entre 0.19 – 0.42, el valor más bajo fue en 2019 (NDVI = 0.09) y el más alto en 2016 (NDVI = 0.59). Con base al NDWI se puede decir que no hubo presencia de agua superficial en los sitios de anidación (NDWI < 0), los valores NDWI promedio de los periodos secos se presentaron entre -0.68 a -0.23,

mientras que en los periodos de lluvia éstos variaron entre -0.60 y -0.23. Respecto al BSI, los sitios de anidación se encontraron en sitios con poco suelo desnudo, el valor de BSI fue < 0.33 en época seca y < 0.32 en época de lluvias.

2.5.2 ACP de las variables topográficas

Con base a la tabulación cruzada (Figura 2.2) el componente que tuvo mayor extensión dentro del área de estudio es la componente 3 con 20,231.59 ha. El componente 2 presentó la segunda mayor extensión con 18,404.64 ha y la componente 1 la menor (13,711.77 ha). Asimismo, con la tabulación cruzada se identificó que el componente asociado a mayor cantidad de sitios de anidación fue la componente 2 con 58 sitios, la 3 tuvo 25 y la 1 tuvo 20 sitios de anidación asociados.

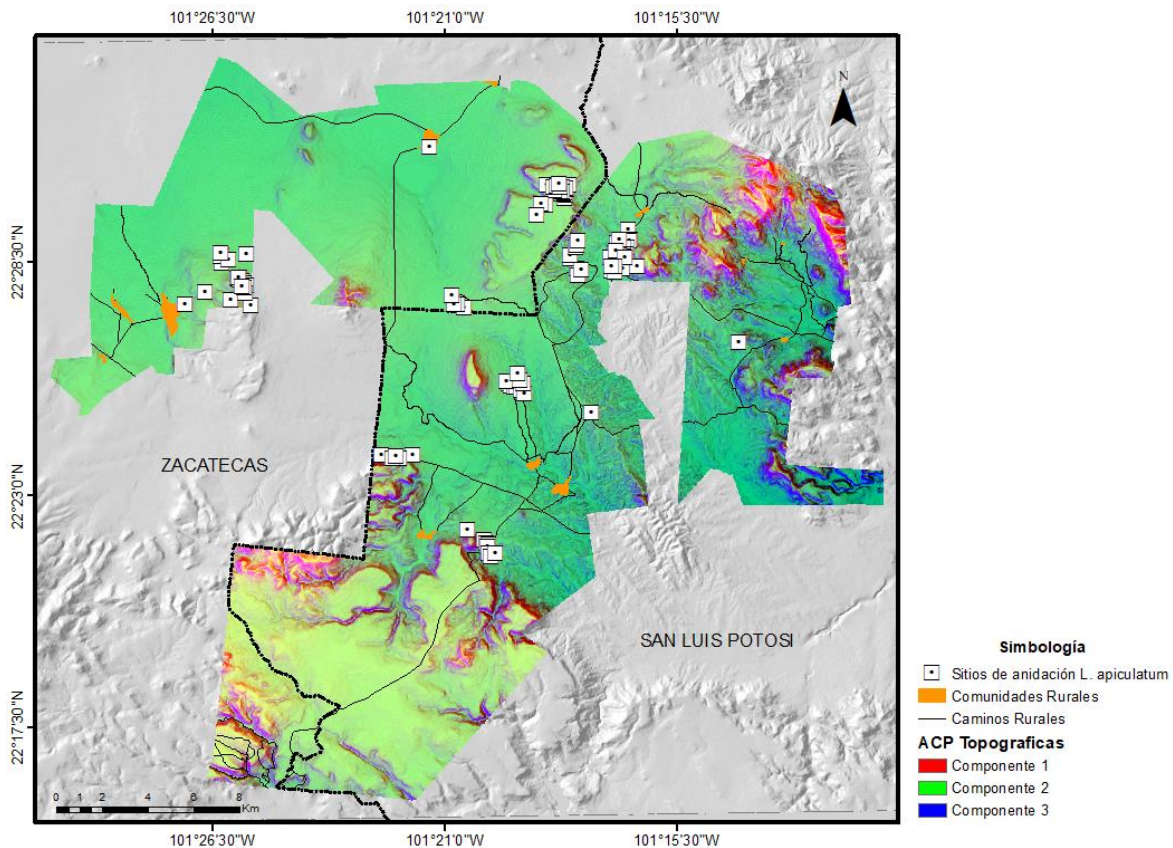


Figura 2.2. Análisis de Componentes Principales con variables topográficas del área de estudio, señalando la localización de los sitios de anidación. Componente 1 donde la variable de mayor peso fue la pendiente. Componente 2 la variable de mayor peso es el HLI. Componente 3 la variable de mayor peso fue la curvatura.

El ACP específico de las variables topográficas (Cuadro 2.3) muestra que el primer componente explicó el 32.07% de la varianza y la variable de mayor influencia dentro de éste fue la pendiente, el VRM, TPI y elevación (Figura 2.3). Con el segundo componente se explica el 21.31 % de la varianza, en este componente el HLI tuvo la mayor influencia junto con la pendiente y el VRM. Con el tercer componente se explica el 15.34% de la variación y las variables que más contribuyeron a este componente fueron la pendiente, curvatura y VRM. Con el cuarto componente se explica el 14.04% de la varianza y estuvo conformado por las variables pendiente, curvatura, HLI y TPI. La pendiente puede señalarse como una de las variables topográficas que más contribuyó, presentándose en los cuatro componentes analizados, después el VRM que contribuyó en 3 componentes.

Cuadro 2.3. Componentes Principales del ACP de las variables topográficas, su eigenvalor y su porcentaje de varianza.

Componente	Eigenvalor	% varianza	% varianza acumulada
1	1.92434	32.07	32.07
2	1.27916	21.31	51.39
3	0.920376	15.34	66.73
4	0.842891	14.04	80.77

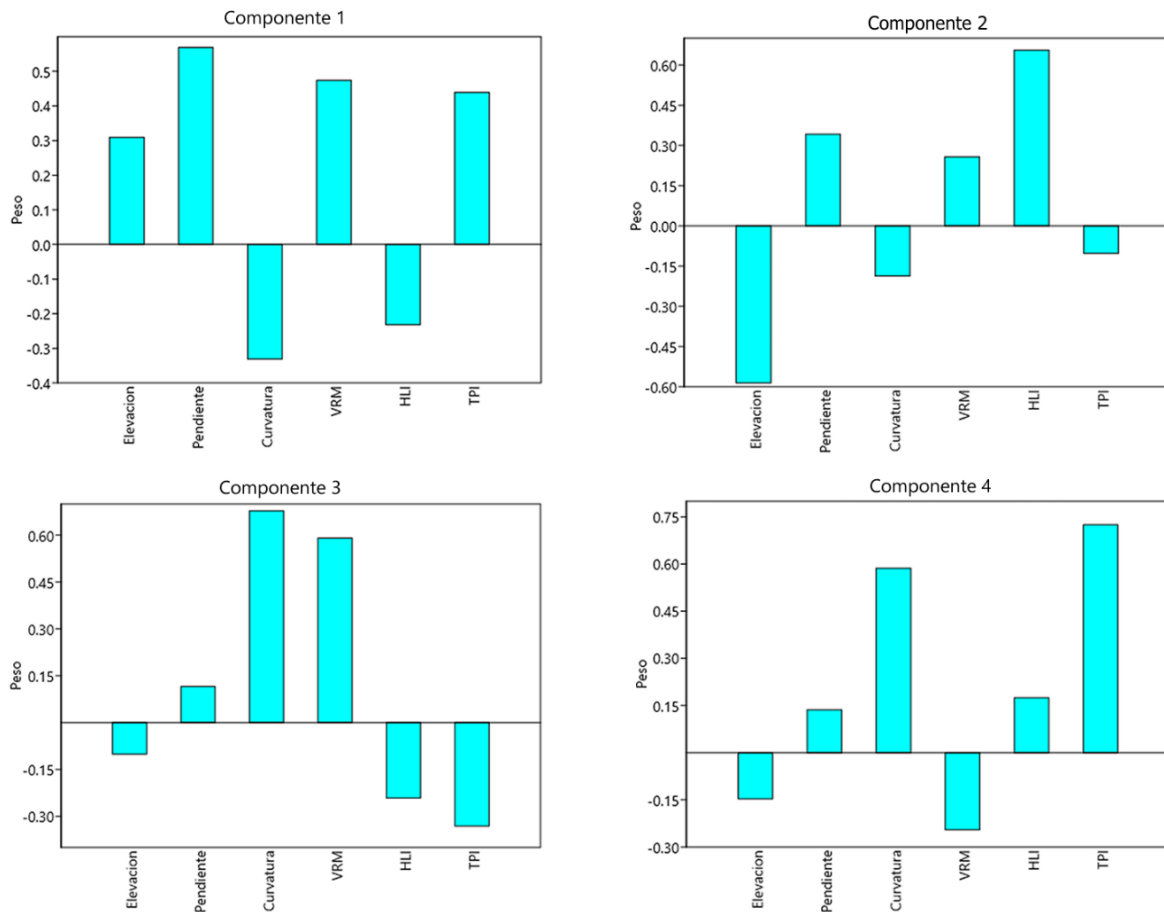


Figura 2.3. Gráfico del ACP de las variables topográficas señalando su contribución en cada componente.

2.5.3 ACP Periodo seco

En el ACP del periodo de la época seca, el componente 3 tuvo una mayor extensión en el área de estudio con 25,655.38 ha, luego el componente 2 con 20,187.93 ha, mientras que el componente 1 tuvo la menor extensión con 6,506.97 ha (Figura 2.4). Con la tabulación cruzada se encontraron 72 sitios de anidación asociados a la componente 2 tuvo, 14 a la componente 3 tuvo 14 y diez a la componente 1.

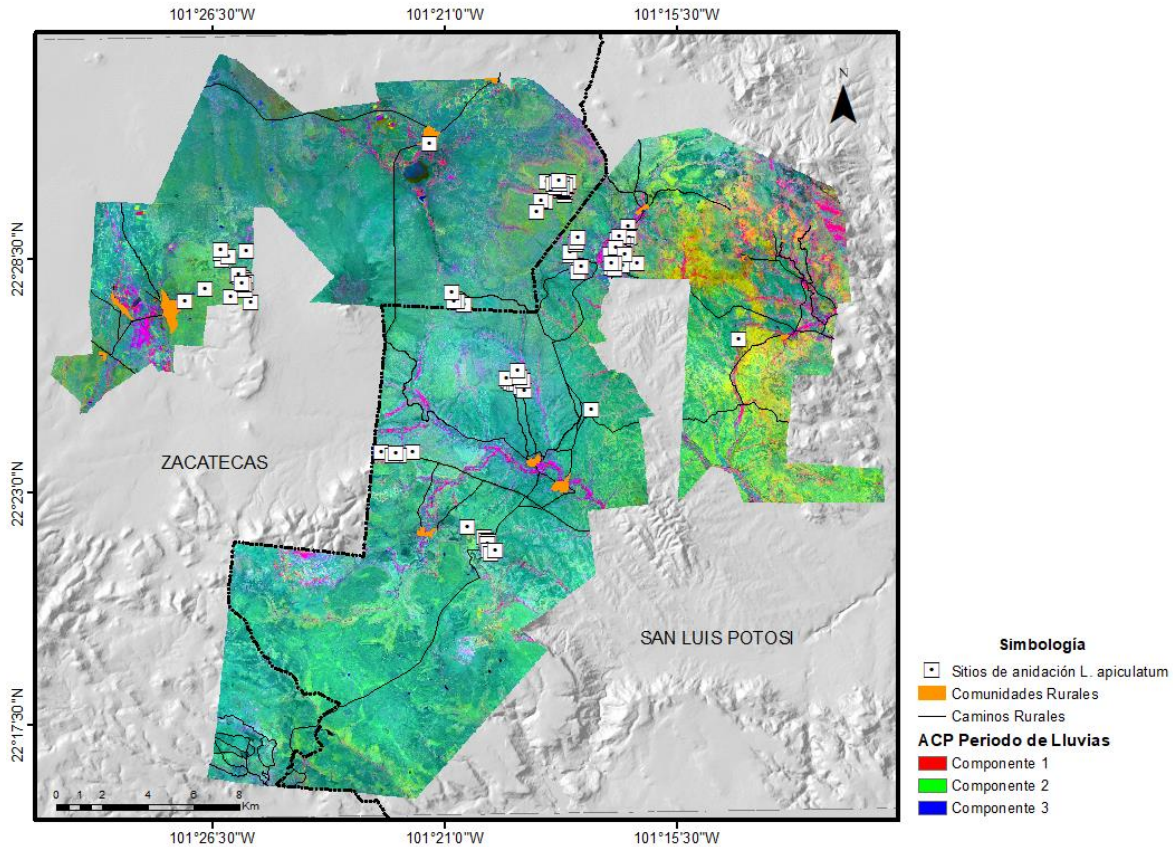


Figura 2.4. Análisis de Componentes Principales de las variables espectrales del periodo seco. En el componente 1 la variable con mayor aporte de varianza fue el NDWI, la cual se relaciona claramente con los arroyos. En el componente 2 la variable con mayor influencia fue el NDVI y muestra áreas con mayor verdor o actividad fotosintética. En el componente 3 la variable de mayor peso fue el BSI, en este componente se registró la menor cantidad de nidos.

La primera componente del ACP del periodo seco (Cuadro 2.4) comprende el 61.25% de la varianza, donde las variables que más contribuyeron fueron NDWI y BSI de los seis periodos, siendo los NDWI de 2021, 2020 y 2017 los que tuvieron mayor contribución (Figura 2.5). La componente 2 contiene el 13.40% de la varianza y las variables que contribuyeron más fueron NDWI 2021, NDVI de 2018 y 2016 y el componte 3 únicamente tiene el 9% de la varianza y las variables que más contribuyeron en éste fueron BSI de 2021, 2016, 2017 y NDVI de 2018.

Cuadro 2.4 Componentes Principales del ACP de las variables espectrales del periodo seco, su eigenvvalor y su porcentaje de varianza

Componente	Eigenvvalor	% varianza	% varianza acumulada
1	0.033038	61.25	61.25
2	0.00723	13.4	74.65
3	0.005015	9.29	83.95

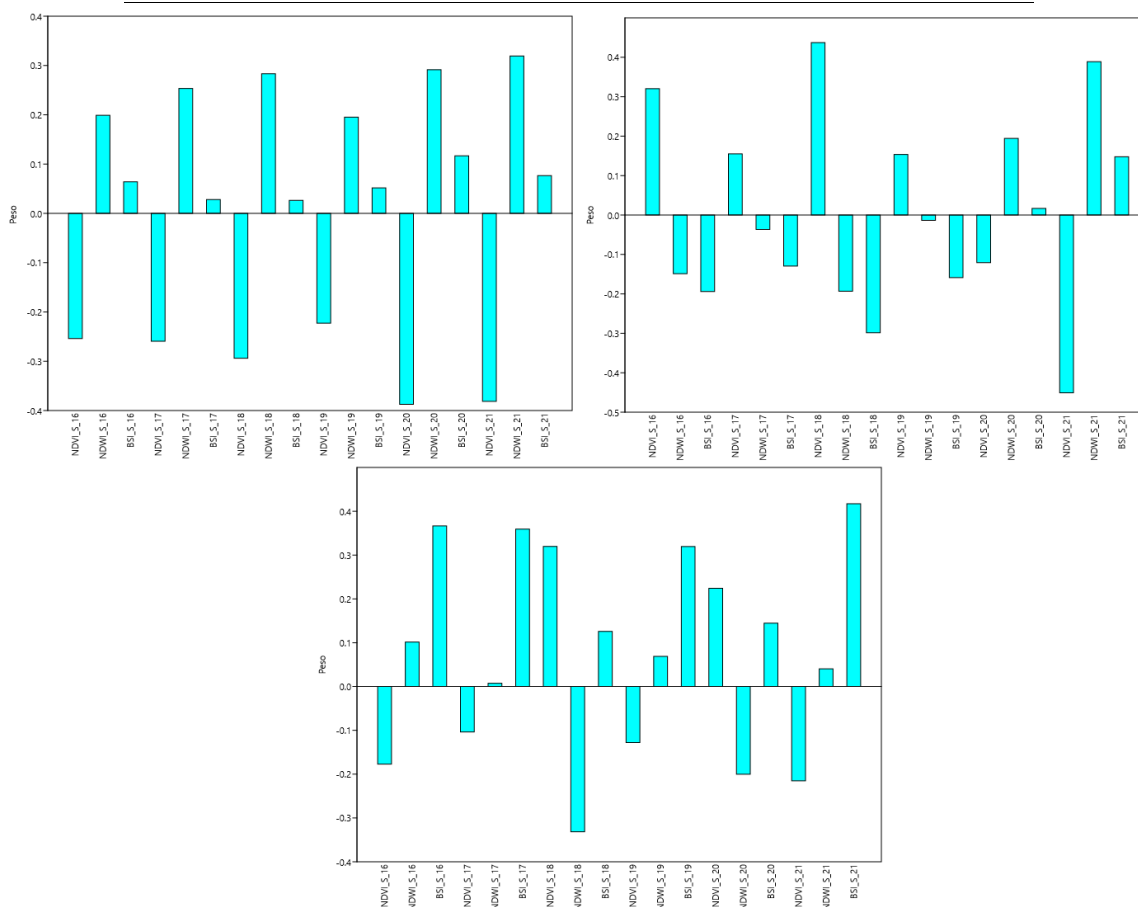


Figura 2.5. Gráficos de las variables y su influencia dentro de los tres componentes principales del ACP del periodo seco. *s = periodo seco.

2.5.4 ACP Periodo de lluvias

En el periodo de lluvias, el componente 2 abarcó la mayor extensión del área de estudio con 22,273.74 ha (Figura 2.6). El componente 3 tuvo 20,394.37 ha, y el componente 1 tuvo la menor extensión con 9,762.74 ha. Con el conteo de los sitios de anidación realizado con la tabulación cruzada, en el componente 2 se asoció con 52 sitios de

anidación; el componente 1 tuvo 36 sitios asociados y el componente 3 se le asociaron 16 sitios.

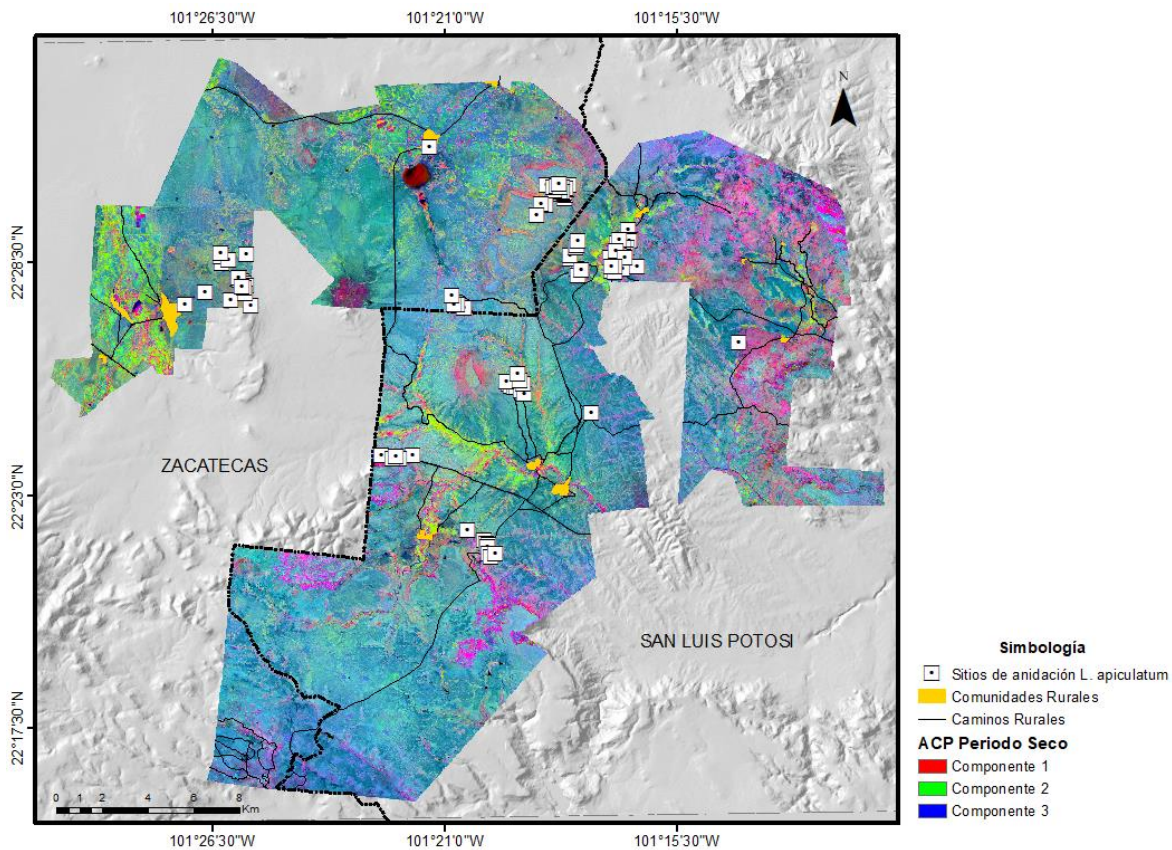


Figura 2.6. Análisis de Componentes Principales de las variables espectrales del periodo de lluvias. En el componente 1 (colores rosas a rojos) la variable que más aportó fue el NDVI que señala las áreas con más vegetación y/o actividad fotosintética. Componente 2 (colores verdes) la mayor influencia provino de la variable BSI que con más cantidad de suelo desnudo.

El análisis señaló que con la primera componente del ACP del periodo de lluvias (Cuadro 2.5) se explica el 70% de la varianza donde la mayor contribución fue de los NDVI de los 6 periodos. Los NDVI más altos fueron los de 2016, 2021 y 2018; además, se tuvo una contribución muy pequeña del BSI de 2020 (Figura 2.7). El segundo componente se asocia al 8.0% de la varianza y la mayor contribución provino de los BSI de los años 2018, 2020, 2019 y 2017. El tercer componente se relaciona con el 6.36% de la varianza y sus variables más altas fueron los BSI de 2021 y 2016, y el NDVI de 2019.

Cuadro 2.5 Componentes Principales del ACP de las variables espectrales del periodo de lluvias, su eigenvvalor y su porcentaje de varianza.

Componente	Eigenvvalor	% varianza	% de varianza acumulada
1	0.039917	70.96	70.96
2	0.004502	8	78.96
3	0.003578	6.36	85.32

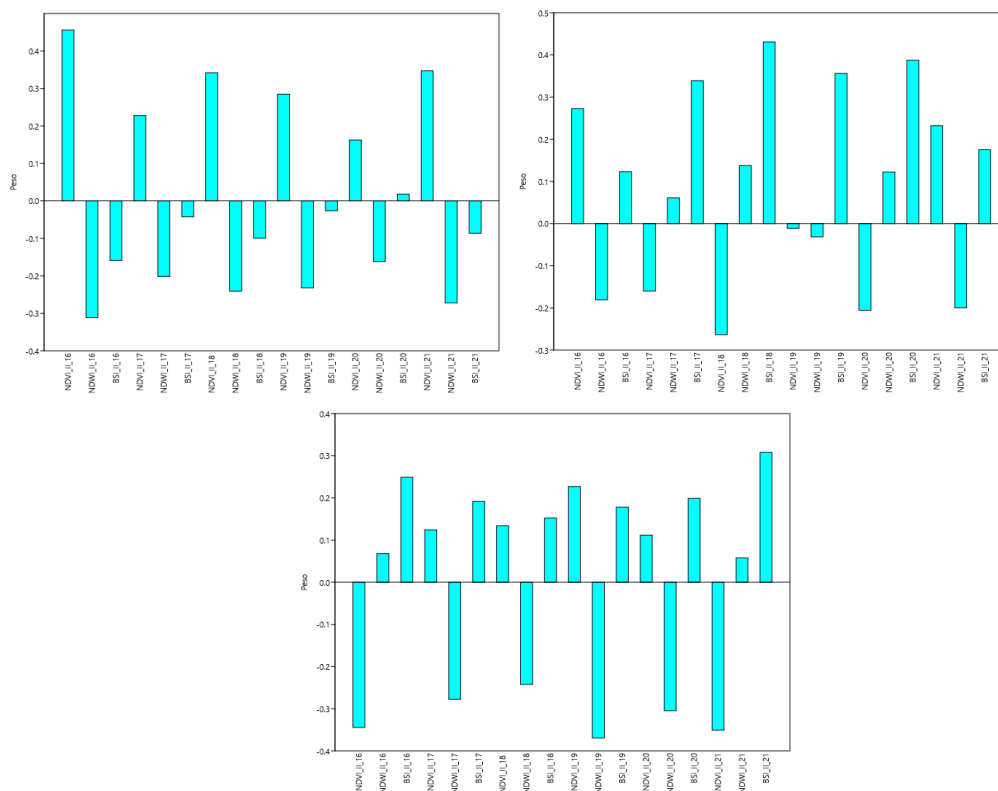


Figura 2.7. Gráficos de las variables que conforman los tres componentes principales analizados y la influencia de cada variable dentro de cada componente. *Il = periodo de lluvias.

2.6 DISCUSIÓN

Las alturas registradas en este estudio coinciden con las reportadas sobre el hábitat de la hormiga escamolera en el Altiplano Potosino-Zacatecano en ejidos en los municipios de Ahualulco y Charcas, San Luis Potosí, las cuales se ubican entre 2000 y 2300 msnm (Cruz-Labana *et al.*, 2014; Lara-Juárez *et al.*, 2015). Además, se ha señalado que la hormiga muestra preferencia por sitios con pendientes <10°, esta preferencia concuerda con los valores de pendiente y VRM registrados, donde la mayoría de los nidos se

registraron en zonas planas y las áreas más inclinadas son usadas por la hormiga escamolera de acuerdo a su disponibilidad (Cruz-Labana *et al.*, 2014; Rafael-Valdez *et al.*, 2017; 2019). Asimismo, los sitios de anidación analizados por Cruz-Labana *et al.* (2014) fueron más frecuentes en sitios con exposición suroeste, exposición que coincide con la orientación de las pendientes cálidas registradas en el HLI (McCune & Keon, 2002; Sandoval *et al.*, 2020).

En el presente estudio, la variable topográfica más sobresaliente en el componente principal que explicó la mayor varianza fue la pendiente. Los valores registrados indican distribución de sitios de anidación más marcada en sitios planos o de pendiente baja ($< 10^\circ$), lo cual coincide por lo reportado por Klotz (1986) y Robinson *et al.* (2008) quienes indican que las hormigas prefieren construir sus nidos en sitios planos o con pendiente muy baja.

Olmos-Trujillo *et al.* (2020) señalaron que los valores NDVI en áreas de matorral y de pastizal en Zacatecas presentaron aumento considerable en los meses posteriores a los eventos de precipitación. El valor promedio de NDVI en áreas de pastizal fue de 0.1 ± 0.3 y en el matorral de 0.1 ± 0.4 . Estos valores disminuyeron conforme a la disminución de la precipitación. La precipitación incrementa la humedad del suelo, influye en el balance hídrico de las plantas, promueve su crecimiento e incrementa la vegetación que puede ser captada por los sensores remotos (Wang *et al.* 2003; Wu *et al.*, 2011). En los altiplanos semiáridos del centro de México, en zonas de baja cobertura y con vegetación predominante del tipo xerófilo, los valores BSI variaron entre 0.01 y 3.2. Los valores BSI dependen del tipo de vegetación, de los regímenes de lluvia y del uso actual del suelo (Becerril-Piña *et al.* 2015).

Por medio de los Análisis de Componentes Principales es posible identificar las características topográficas y espectrales más importantes para el establecimiento de los nidos por las hormigas. Los mapas generados en el presente estudio pueden ser utilizados para localizar sitios óptimos de anidación, los cuales, a través de su manejo y reforestación mejoraría la productividad y beneficiaría económicamente a los ejidos. La información referente a la cobertura vegetal y la exposición térmica permitirá identificar áreas idóneas para la conservación de los sitios de anidación, y también identificar áreas

impactadas en donde se restrinja la presencia de ganado que pueda afectar la cobertura vegetal, así como identificar áreas potenciales para localizar nidos de hormiga escamolera o para la introducción de nuevos nidos.

Una limitante de la metodología utilizada en este estudio es la resolución de las imágenes del satélite Sentinel-2 que es 10 m² y la resolución de los continuos de elevación 15 metros, resoluciones que no permitieron la identificación precisa del sitio de anidación, por lo que se sugiere, para futuras investigaciones, se utilicen imágenes satelitales con mayor resolución espacial, por ejemplo las provenientes del satélite Pléiades, imágenes con resolución de 30 cm que tienen un precio aproximado de 600 pesos por km², o bien el uso de imágenes capturadas por vehículos aéreos no tripulados con los cuales se podrían obtener resoluciones menores al satélite Pléiades, y es posible la identificación precisa de los sitios de anidación, así como la generación de un modelo digital del terreno en el que se pueda reconocer de manera más exacta las condiciones del terreno de mayor influencia en el habita de la hormiga escamolera.

2.7 CONCLUSIONES

En las áreas con mayor variación espectral y topográfica se encontraron menos sitios de anidación. En todos los análisis, la mayor cantidad de nidos se registran en las variables comprendidas en el componente 2. Estas variables son importantes para el establecimiento de sitios de anidación, los cuales se caracterizan por una mayor cobertura vegetal independientemente del periodo (lluvia-seco), se ubican en laderas con exposición sureste, que representan refugios térmicos.

LITERATURA CITADA

- Becerril-Piña, R., Mastachi-Loza, C. A., González-Sosa, E., Díaz-Delgado, C., & Bâ, K. M. (2015). Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 120, 4-13.
- Bravo, J. C., Somarriba, E., & Arteaga, G. (2011). Factores que afectan la abundancia de insectos polinizadores del cacao en sistemas agroforestales. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1), 119-131.
- Chávez Jr., P.S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3), 459-479.
- Coordinación de Estrategias de Biodiversidad y Cooperación-CONABIO. (2021). *Resumen de La biodiversidad en Zacatecas. Estudio de Estado*. CONABIO, México. URL: https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/estudios/ee_zacatecas
- Coordinación de Estrategias de Biodiversidad y Cooperación-CONABIO. (2021). *Resumen de La biodiversidad en San Luis Potosí. Estudio de Estado*. CONABIO, México. URL: https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/estudios/ee_sanluispotosi
- Cruz-Cárdenas, G, López-Mata, L, Villaseñor, JL, & Ortiz, E. (2014). Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 188-199. <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>
- Cruz-Labana, J.D., Tarango-Arámbula, L.A., Alcántara-Carbajal, J.L., Pimentel-López, J., Ugalde-Lezama, S., Ramirez-Valverde G, & Méndez-Gallegos S.D.J. (2014). Habitat use by the " Escamolera" ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) in central Mexico. *Agrociencia*, 48(6), 569-582.
- Cruz-Labana, J.D., Crosby-Galván, M.M., Delgado-Alvarado, A., Alcántara-Carbajal, J.L., Cuca-García, J.M., & Tarango-Arámbula, L.A. (2018). Nutritional content of

- Liometopum apiculatum* Mayr larvae (“escamoles”) by vegetation type in north-central Mexico. *Journal of Asia-Pacific Entomology*. 21, 1239–1245. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2018.09.008>
- Cuanalo, C., H; Ojeda T. E, Santos O. A, & Ortíz S.C.A. (1989). Provincias, regiones y subregiones terrestres de México. Centro de Edafología del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Chapingo, México.
- Dall'olmo, G., & Karnieli, A. (2002). Monitoring phenological cycles of desert ecosystems using NDVI and LST data derived from NOAA-AVHRR imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 23 (19), 4055-4071, <https://doi.org/10.1080/01431160110115988>
- Escobar-Flores, J.G., Sandoval, S., Valdez, R., Shahriary, E., Torres, J., Álvarez-Cárdenas, S., Gallina-Tesaro, P. (2019). Waterhole detection using a vegetation index in desert bighorn sheep (*Ovis canadensis cremnobates*) habitat. *PLOS ONE* 14(1): e0211202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211202>
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1993), *Geology of Mexico: A Synopsis*. En Ramammoorthy, T.P., Bye, R.A., Lot, A., Fa., J. (eds.), *Biological diversity of Mexico: Origins and distribution*. Oxford University Press. New York. 3–107.
- Figuroa-Sandoval, B., Ugalde-Lezama S., Pineda-Pérez F.E., Ramírez-Valverde G., Figuroa Rodríguez K.A., & Tarango-Arámbula L.A. (2018). Producción de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr 1870) y su hábitat en el Altiplano Potosino-Zacatecano, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 15(2), 235-245.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional autónoma de México. Serie Libro N° 6. México, D. F.
- Harris, R.J. 1975. *A primer of Multivariate Statistics*. New York: Academic Press.

- Hernández-Oria, J. G. (2010). Patrones de diversidad regional en las Cactaceae amenazadas del Desierto Chihuahuense, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 14(1), 35-49.
- Hernández-Roldan, E., Tarango-Arámbula, L.A., Ugalde-Lezama, S., Hernández-Juárez, A., Cortez-Romero, C., Cruz-Miranda, Y., & Morales-Flores, F. J. (2017). Hábitat y densidad de nidos de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr) en una UMA de Zacatecas, México. *AGROProductividad*, 10(5), 10-17
- INEGI, (2016). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), Edición: 1.* Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. URL: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- INECC, (2007). *Caracterización ambiental de México.* URL: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/443/cap2.html>
- Jenness, J. (2006). *Topographic position index (TPI) v. 1.2.* Jenness Enterprises.
- Klotz, J. H. (1986). Effects of substrate slope on nest construction by *Formica pallidefulva* Latreille and *Formica subsericea* Say (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 59(3), 409-414.
- Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., & Richardson, W. (1969). Preprocessing transformations and their effect on multispectral recognition. *Proceedings of the sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor University of Michigan, 97-131
- Lara-Juárez, P., Aguirre Rivera, J. R., Castillo Lara, P., Reyes Agüero, J. A. (2015). Biología y aprovechamiento de la hormiga de escamoles, *Liometopum apiculatum* Mayr (Hymenoptera: Formicidae). *Acta zoológica mexicana*, 31(2), 251-264.
- Lara-Juárez, P., Castillo-Lara, P., Tristán-Patiño, F. M., Rendón-Huerta, J. A., & Aguirre-Rivera, J. R. (2016). Efectos del sitio y la condición de agostadero en la densidad

- de hormigueros de escamoles (*Liometopum apiculatum* Mayr). *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22(3), 285-302
- Luna-Cavazos, E., Romero-Manzanares, & A., Moya, G. (2007). Distribución geográfica y ecológica de papas silvestres (*Solanum L.*) del altiplano Potosino-Zacatecano, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 13(1), 35-41.
- McCune, B., & Keon, D. (2002). Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *Journal of vegetation science*, 13(4), 603-606.
- Mcfeters S. K. (1996) The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7), 1425-1432
- Olmos-Trujillo, E., González-Trinidad, J., Júnez-Ferreira, H., Pacheco-Guerrero, A., Bautista-Capetillo, C., Ávila-Sandoval, C., & Galván-Tejada, E. (2020). Spatio-temporal response of vegetation indices to rainfall and temperature in a semiarid region. *Sustainability*, 12(5), 1939.
- Pearson, K. (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, 2(11), 559-572.
- Rikimaru, A., & Miyatake, S. (1997). Development of Forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model using Indices of Vegetation, Bare soil and Shadow. *Proceedings of the 18th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) 1997*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Robinson, E. J. H., Holcombe, M., & Ratnieks, F. L. W. (2008). The organization of soil disposal by ants. *Animal Behaviour*, 75(4), 1389-1399. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2007.09.013>
- Sandoval, S., Escobar-Flores J.G., & Hernández-Ramírez C.I. (2020). Análisis topográfico y climático de un bosque de pino detectado en una isla de montaña en Baja California. *Innovaciones Tecnológicas y Metodológicas en el Análisis Geoespacial*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 85-99.

- Sappington, J. M., Longshore, K. M., & Thompson, D. B. (2007). Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using bighorn sheep in the Mojave Desert. *The Journal of wildlife management*, 71(5), 1419-1426.
- Rafael-Valdez J., Tarango-Arámbula L.A., Ugalde-Lezama S., Lozano-Cavazos E.A., Ruíz-Vera V.M., & Bravo-Vinaja A. (2017). Sustratos forrajeros y de anidación de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr, *Himenoptera: Formicidae*) en Villa González Ortega, Zacatecas, México. *Agrociencia*, 51(7), 755-769.
- Rafael-Valdez, J., Tarango-Arámbula, L.A., Ugalde-Lezama, S., Cruz-Labana, J.D., Clemente-Sánchez, F., & Cadena-Iñiguez, J. (2019). Foraging amplitude of the escamolera ant (*Liometopum apiculatum* Mayr, Hymenoptera: Formicidae) in a semi-arid area of the Zacatecan highlands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 18(1), 5-19.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*, 1ra. Edición, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Robinson, E. J. H., Holcombe, M., & Ratnieks, F. L. W. (2008). The organization of soil disposal by ants. *Animal Behaviour*, 75(4), 1389-1399. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2007.09.013>
- Rouibah, K., & Belabbas, M. (2020). Applying Multi-Index approach from Sentinel-2 Imagery to Extract Urban Area in dry season (Semi-Arid Land in North East Algeria). *Revista de Teledetección*, (56), 89-101.
- Tarango-Arámbula, L.A. (2012). Los escamoles y su producción en el altiplano potosino-zacatecano, *RESPYN Revista Salud Pública y Nutrición*, 04 ,139 – 144.
- Triana, S. P., Rousseau, G. X., Da Piedad, A. R., Celentano, D., Zelarayán, M. L. C., & Braun, H. (2015). La macrofauna del suelo como indicadora de degradación de bosques ribereños en la amazonia oriental brasilera. *Revista de la Facultad de Agronomía*, UANLP, Argentina, 114(1), 49-60.

Wang, J., Rich, P.M, & Price, K.P. (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International journal of remote sensing*, 24(11), 2345-2364. <https://doi.org/10.1080/01431160210154812>

Wu, Z., Dijkstra, P., Koch, G.W., Penuelas, J., & Hungate, B.A. (2011). Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 17, 927 – 942.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DEL ENTORNO DEL HÁBITAT DE LA HORMIGA ESCAMOLERA MEDIANTE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO

3.1 RESUMEN

La recolecta de escamoles (estados larvarios de la casta reproductora de la hormiga escamolera) es una actividad económicamente importante para las comunidades rurales del centro norte de México. Por ello, conocer las condiciones de los hábitats en donde la hormiga escamolera se distribuye es importante para su aprovechamiento adecuado. El objetivo de este estudio fue analizar parches de cinco clases de vegetación ubicados en un área con presencia de sitios de anidación de la hormiga escamolera. Este trabajo se realizó con imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT), y el procesamiento de las imágenes se realizó con el algoritmo de Análisis de Imágenes Basado en Objetos (OBIA) que clasifica segmentos agrupándolos de acuerdo a sus valores de nivel de brillo (ND) pixeles en la región visible (RGB) y las formas. Con los resultados de la segmentación se analizó la autocorrelación espacial y el índice de agrupamiento de los parches de cada clase de cobertura a través de los análisis de I de Moran y el análisis de Agrupamiento de Getis-Ord. Los valores RGB correspondientes a los agaves se registraron entre 0 a 200 ND, de 0 a 220 ND en palmas, cactáceas entre 0 a 230 ND, especies microfilas de 0 a 180 ND y suelo de 0 a 230 ND, en todas las clases los segmentos mostraron figuras con formas semicirculares (compacidad 0.7-0.9) pero con poco parecido a formas rectangulares (rectangularidad 0.4-0.6). El I de Moran indica que las clases tuvieron un patrón de distribución agrupado (I de Moran = 0.56, $p < 0.001$) y el análisis de agrupamiento indicó que todas las clases presentaron un patrón de agrupamiento en valores alto de ND (G obtenida = 0.000984 > G esperada = 0.000983, $p=0.01$, $Z = 2.38$).

Palabras clave: OBIA, VANT, segmentación, autocorrelación espacial, agrupamiento.

3.2 ABSTRACT

The collection of escamoles (larval stages of the reproductive caste of the escamolera ant) is an economically important activity for rural communities in north-central Mexico. Therefore, it is important to know the conditions of the habitats in which the escamolera ant is distributed in order to make adequate use of it. The objective of this study was to analyze patches of five vegetation classes located in an area with the presence of nesting sites of the escamolera ant. This work was carried out with images taken with an unmanned aerial vehicle (UAV), and image processing was performed with the Object Based Image Analysis (OBIA) algorithm that classifies segments by grouping them according to their brightness level (ND) values of pixels in the visible region (RGB) and shapes. With the segmentation results, the spatial autocorrelation and clustering index of the patches of each cover class were analyzed through Moran's I analysis and Getis-Ord clustering analysis. The RGB values corresponding to agaves were recorded between 0 to 200 ND, from 0 to 220 ND in palms, cacti between 0 to 230 ND, microphyll species from 0 to 180 ND and soil from 0 to 230 ND, in all classes the segments showed figures with semicircular shapes (compactness 0.7-0.9) but with little resemblance to rectangular shapes (rectangularity 0.4-0.6). Moran's, I indicates that the classes had a clustered distribution pattern (Moran's I = 0.56, $p < 0.001$) and clustering analysis indicated that all classes presented a clustering pattern at high ND values (obtained $G = 0.000984 >$ expected $G = 0.000983$, $p = 0.01$, $Z = 2.38$).

Key words: OBIA, VANT, segmentation, spatial autocorrelation, clustering.

3.3 INTRODUCCIÓN

El OBIA (*Object-Based Image Analysis*) o GEOBIA (*Geographic Object-Based Image Analysis*) hacen referencia a una categoría de enfoques de análisis de imágenes digitales de teledetección con las que se estudian entidades geográficas mediante la delimitación y el análisis de objeto-imagen en lugar de píxeles individuales (Hay & Castilla, 2008; Blaschke, 2010; Chen *et al.*, 2018). El objeto-imagen es el elemento metodológico central del procedimiento OBIA, y se le define como un grupo de píxeles que comparten propiedades espectrales, espaciales y texturas similares (Gómez-Palacios & Torres-Rodríguez, 2017). Un objeto-imagen tiene propiedades asociadas a su tamaño, su forma, su respuesta espectral, entre otras, y cada una de estas propiedades tiene información adicional que no está disponible en los píxeles individuales como pueden ser los valores medios, mínimos, máximos y desviación estándar por banda; pero la información espacial aportada es la de mayor importancia (Blaschke *et al.*, 2008; 2014).

El procedimiento OBIA no es lineal sino iterativo, ya que no se trata de una clasificación de imágenes sino de un análisis de imágenes que permite el uso de diferentes clases de objetos, de dominios específicos, entre otros. Este procedimiento se basa en dos fundamentos metodológicos: 1) en la segmentación/regionalización, anidadas y a escala y 2) en clasificadores basados en reglas para explicitar las propiedades espectrales y geométricas (Lang, 2008). La segmentación es uno de los pasos claves del procedimiento OBIA y divide la imagen en regiones que tienen elementos en común como puede ser la textura, el color, la forma, tamaño y nivel de gris, además de que disminuye el nivel de detalle, reduce la complejidad de la imagen y hace que su contenido sea más comprensible (Lucchese & Mitray, 2001; Hossain & Chen, 2019).

El análisis del paisaje y de sus métricas ayudan a generar información sobre las interacciones de las especies de insectos o animales con su entorno y a partir de esta información tomar decisiones sobre su conservación o manejo (Beckler *et al.* 2004; Uemaa *et al.* 2009), mientras que con el análisis de las especies vegetales se pueden diseñar estrategias para prevenir la pérdida de cobertura vegetal y el aumento de la erosión del suelo (Gómez-Ruiz *et al.* 2021).

En México, la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr) se distribuye en 19 Estados del centro, norte y sur (Tarango-Arámbula, 2012; Lara-Juárez *et al.* 2015). En los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, a la hormiga escamolera se le ha registrado en elevaciones que rondan los 2900 msnm, y en áreas con vegetación de matorral crasicaule, matorral desértico microfilo, matorral desértico rosetófilo y pastizal, en las que encuentra sitios de anidación y forrajeo (Cruz-Labana *et al.*, 2014; Lara-Juárez *et al.*, 2015; Rafael-Valdez *et al.*, 2017; 2019).

Debido a la demanda, recolección y venta de escamoles, la sobre explotación de los nidos y la falta de prácticas de aprovechamiento adecuadas, el hábitat de la hormiga escamolera se ha visto afectado; y con ello, la producción de escamoles y densidad de nidos (Tarango-Arámbula, 2012; Rafael-Valdez *et al.*, 2017; Figueroa-Sandoval *et al.*, 2018). Otras actividades de origen antrópico (como la ganadería) realizadas en las áreas de distribución de la hormiga también afectan la estructura vegetal, el estado de conservación del suelo y el número de nidos (Lara-Juárez *et al.*, 2016). Berumen-Jiménez *et al.* (2021) señalaron el impacto de la actividad humana sobre el estado de conservación de la hormiga escamolera de acuerdo al Método de Evaluación de Riesgo (MER) de la NOM-059-SEMARNAT-2010. Mediante el MER los autores señalan que la hormiga escamolera debe incluirse como una especie sujeta a protección especial dentro de la NOM-059.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el hábitat y de los parches de vegetación de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr) utilizando imágenes tomadas por cámaras transportadas en un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT).

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Área de estudio

El ejido Tolosa (Pinos, Zacatecas), por el número de nidos y la conformación de su vegetación fue seleccionado para realizar el vuelo. Este ejido se caracteriza por presentar matorrales de tipo microfilo, rosetófilo y crasicaule (Rzedowski, 2006; Luna-Cavazos *et al.*, 2007). Tiene climas de los subtipos BS1kw- BS0kw (temperaturas medias anuales entre 12 y 18°C, mes más cálido temperatura media mayor a 22°C y mes más

frio temperatura media entre -3 a 18°C, lluvia de verano con un porcentaje de lluvias de invierno mayor a 10.2% del total anual) (García, 2004). La fisiografía de la zona comprende serranías, mesetas y valles, con una elevación de entre 1000 y 2250 msnm (Hernández-Oria, 2010; CONABIO, 2021).

3.4.2 Parámetros de vuelo

El ejido Tolosa se eligió de acuerdo a la base de datos de ubicación de los sitios de anidación de la hormiga escamolera compartida por el Dr. José Domingo Cruz Labana. A partir de esta base de datos, se eligió el área con mayor densidad de nidos y que pudiera ser recorrida por un VANT DJI Mavic mini SE, considerando la capacidad de vuelo del equipo, la duración de la batería y de las condiciones meteorológicas.

El área de vuelo se diseñó en el software Google Earth; para ello, se importaron dos archivos .kmz, el primero con la información de los nidos del área de estudio y el otro con los límites del ejido. Las coordenadas correspondientes al ejido Tolosa (Cuadro 3.1) se exportaron a un equipo GPS etrex x22 y posteriormente se convirtieron de formato .KMZ a formato .GPX.

Cuadro 3.1. Coordenadas del área de vuelo en el ejido Tolosa, Zacatecas.

Vértice	Latitud norte	Longitud oeste
1	22° 30' 10.40"	101°18'19.18"
2	22° 30' 11.88"	101°18'21.51"
3	22° 30' 14.58"	101°18'19.54"
4	22° 30' 13.53"	101°18'17.21"
5	22° 30' 12.78"	101°18'17.63"
6	22° 30' 12.66"	101°18'17.54"

3.4.3 Captura de imágenes en campo

Previo a los vuelos con el dron (VANT), se verificó que las condiciones climáticas fueran adecuadas. Para ello, se usó la aplicación *UAV forecast* en un celular Android (Versión 10 QKQ), con esta aplicación sabemos si las condiciones son favorables para volar, y considera las variables clima, sol (amanecer y anochecer), temperatura, velocidad del viento, ráfagas del viento, dirección del viento, probabilidad de precipitación, porcentaje

de cobertura de nubes, visibilidad, número de satélites visibles, índice de tormenta geomagnética (medido en Kp) y satélites bloqueados. Para el dron Mavic Mini SE, utilizado en este estudio las condiciones climáticas registradas en la aplicación fueron:

- Clima soleado
- Temperaturas entre 20 a 30°C
- Viento y ráfagas menores a 32 km/h
- Porcentaje de precipitación de 0 a 20%
- Visibilidad entre 5 a 16 km

El vuelo del VANT se realizó el 9 de mayo de 2022 en modo cine (modo de baja velocidad, velocidad máxima 4 metros por segundo, velocidad de ascenso 1.5 m/s y velocidad de descenso de 1 m/s) y la altura de vuelo se mantuvo entre 20 a 50 metros (dependiendo de la inclinación de la zona). Se tomaron un total de 132 imágenes que mantuvieron un traslape entre fotos de entre 50 y 70% para evitar la pérdida de información (huecos en el ortomosaico), la cámara del dron se mantuvo en un ángulo Nadir, el equipo cuenta con un campo IFOV de 83° y una resolución de 12 megapíxeles.

3.4.4 Procesado de las imágenes

Con las imágenes capturadas se realizó un ortomosaico en el software Aegisoft Photoscan; para ello, se creó un espacio de trabajo (*workspace*) con la herramienta *add chunk*, se ingresaron las imágenes del área y en la sección *reference* se usó la herramienta *convert* para convertir el sistema de coordenadas geográficas de las imágenes a UTM (WGS 84 Z14).

En la pestaña *workflow* se seleccionó la herramienta Alinear fotos (*Align photos*) con precisión alta, en la misma pestaña se usó la herramienta de crear nube de puntos (*Build Dense Cloud*) en una calidad alta. Posteriormente se construyó una malla (modelo 3D) (Herramienta *Build Mesh*) donde se usó la nube de puntos con una cantidad de polígonos alta.

El siguiente paso fue construir una textura, seleccionando como modo de mapeo "ortofoto". Posteriormente se elaboró el Modelo Digital de Elevación (DEM), usando

coordenadas en formato UTM (WGS 84 Z14), la fuente de datos fue la malla (*Mesh*) y se asignó la interpolación por defecto, y por último se construyó el ortomosaico con la malla (*Mesh*) como parámetro de superficie.

3.4.5 Análisis OBIA

El ortomosaico referido en el paso 3.3.4 se procesó en el software ArcGIS 10.6 mediante la herramienta *Segment Mean Shift*, la cual permite la identificación de objetos a partir de sus características espectrales (color y forma del objeto), el resultado de este proceso fue una imagen segmentada del área de estudio. Posteriormente esta imagen se analizó con la herramienta *Compute Segment Attributes*, con la cual se obtuvieron los valores de nivel de brillo (ND) en la región visible RGB (Valores de la banda Roja, Verde y Azul), la rectangularidad y la compacidad de cada segmento.

3.4.6 Análisis de parches

Forman y Godron (1986) definen el término paisaje como un área terrestre en la que aparecen, de manera heterogénea, grupos de ecosistemas que varían en estructura, función o en las especies que lo componen. Con base a la ecología del paisaje, en un paisaje se pueden identificar tres elementos: matrices, corredores y parches, estos últimos se definen como unidades relativamente discretas que se diferencian dentro de un territorio y que tienen condiciones ambientales relevantes para la presencia del organismo de interés (Wiens, 1976; Vila-Subirós *et al.* 2006). En el área de estudio del ejido Tolosa se identificaron cinco clases de cobertura:

- Agaves (*Agave spp.*)
- Palmas (*Yucca spp.*)
- Cactáceas
- Especies microfilas
- Suelo

Para cada clase se creó un archivo vectorial en el cual, de forma aleatoria, se elaboraron 30 polígonos respetando la forma de cada clase. Una vez generados los archivos vectoriales se usó la herramienta *extract by mask* y la imagen segmentada para obtener los valores RGB, de rectangularidad y de compacidad obteniéndose un archivo raster de cada clase.

En la extensión *Patch Analyst*, se introdujeron los archivos raster de las cinco clases y se seleccionaron las siguientes métricas del paisaje:

- **Número de parches** (*Number of Patches*): Se refiere a la cantidad de parches en cada clase.
- **Borde total** (*Total Edge*): se refiere al perímetro de los parches de cada clase.
- **Densidad del borde** (*Edge Density*): representa la cantidad del borde relativo al área del paisaje. Calculándose como: $\text{Densidad del borde} = \frac{\text{Sumatoria del Borde Total de cada clase}}{\text{Área del paisaje}}$.
- **Índice de forma media** (*Mean Shape Index*): se relacionan con la complejidad de la forma, si el valor de este índice es igual a 1, significa que todos los parches tienen forma regular (cuadrada o circular) y conforme el valor del índice aumenta, la forma del parche tiende a ser más irregular.

En el análisis de la información, también se consideraron las métricas *Rectangularidad* y *Compacidad*, las cuales se obtienen del cómputo de los atributos de los segmentos:

- **Rectangularidad** (*Rectangularity*) (ESRI, 2016): función que mide el grado de rectangularidad de cada segmento, expresando los resultados en valores del 0 a 1, donde los valores cercanos a 0 indican formas irregulares y los valores cercanos a 1 corresponden a figuras rectangulares.
- **Compacidad o circularidad** (*Compactness*) (ESRI, 2016): función que mide el grado de circularidad de los segmentos en valores de 0 a 1, donde los valores cercanos a 0 indican una forma irregular y los valores cercanos a 1 representa figuras circulares.

3.4.7 Análisis de distribución y análisis de agrupamiento alto/bajo

Con el índice de Moran, desarrollado por Alfred Pierce Moran en 1950, se analiza y evalúa estadísticamente la autocorrelación de los valores de los vecinos más cercanos entre clases. Esta autocorrelación es positiva cuando los valores de los vecinos se agrupan, cuando están dispersos es autocorrelación negativa y cuando la dispersión es aleatoria entonces indica que no hay autocorrelación entre los valores (Moran 1948; Bucheli 2019).

Matemáticamente este índice (Ramírez, 2015) se representa como:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n Z_j^2}$$

Donde:

Z_j es la desviación de un atributo de una unidad espacial i desde su media ($X_i - \bar{x}$)

W_{ij} es la ponderación geográfica entre la unidad espacial i y la unidad espacial j .
e.g. Clase agaves y clase palmas

n es igual al número total de unidades espaciales

S_0 es la sumatoria de todos los pesos espaciales

La hipótesis nula de este índice, se refiere a que los objetos del área de estudio se distribuyen de manera aleatoria. Esta hipótesis se rechaza cuando el valor de P es estadísticamente significativo, y cuando el puntaje de Z es positivo significa que los objetos se agrupan con un nivel mayor a su distribución aleatoria, en cambio si el valor de Z es negativo indica que la dispersión de los objetos es mayor de lo que se esperaría si su distribución fuera aleatoria (Moran, 1948; Bucheli, 2019; Gonzáles-Domínguez, 2019).

Para calcular la autocorrelación espacial (Índice de Moran) fue necesario la clasificación supervisada, mediante la herramienta *Maximum Likelihood Classification*, usando las firmas espectrales, la imagen segmentada (paso 3.3.5) y la función *training sample manager* de la herramienta *image classification*; se generó un archivo en formato “. GSG” que contenía la información de los niveles de brillo del RGB de 30 polígonos aleatorios de cada clase.

El índice de Moran se calculó en el software ArcGIS 10.6. Para ello, se utilizaron archivos raster de las clases de vegetación y de la clasificación supervisada. Asimismo, se utilizó la herramienta *Spatial Autocorrelation (Moran I)* en la cual se introdujeron los archivos raster. Para conceptualizar las relaciones espaciales se eligió la opción de distancia inversa (*inverse distance*) y la opción de Distancia Manhattan porque los polígonos

corresponden a clases discretas. El software ArcGIS 10.6 por defecto realiza un movimiento tipo alfil (*Bishop*) en el cálculo de la contigüidad de la matriz.

El análisis de Agrupamiento Alto/Bajo (G general de Getis-Ord) (Getis & Ord, 1992) mide el agrupamiento de los valores en un sitio determinado. Ramírez (2015) indica que el análisis de agrupamiento Alto/Bajo se representa matemáticamente por:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}, \forall j \neq i$$

Donde:

X_i y X_j son los valores de los atributos de las unidades espaciales i y j

$w_{i,j}$ es la ponderación del peso espacial entre las unidades i y j . e.g clase agaves y clase palmas

n es el número de unidades espaciales que conforman el conjunto de datos

$\forall j \neq i$ indica que las unidades espaciales i y j no pueden ser las mismas

Este análisis establece una hipótesis nula que propone que los objetos analizados no presentan un agrupamiento espacial. Esta hipótesis se rechaza cuando el valor de P es estadísticamente significativo. Cuando la hipótesis nula es rechazada la puntuación de Z toma una mayor importancia; si la puntuación de Z es positiva y el valor de G observada es mayor al valor de G esperada, significa que el agrupamiento de los objetos analizados es alto; por el contrario, si la puntuación de Z es negativa y el valor de G observada es menor al valor de G esperada indica bajos valores de agrupamiento (Getis & Ord, 1992; Ramírez, 2015).

Este análisis se realizó con el software Arcgis 10.6 con el uso de los archivos ráster usados en el análisis de autocorrelación espacial y el uso de la herramienta *High/Low Clustering (Getis-Ord General G)* con los mismos parámetros establecidos para Moran I. Para conceptualizar las relaciones espaciales se estableció distancia inversa (*inverse distance*) y distancia Manhattan como método de distancia, asimismo se activó la casilla

de generar reporte. Al igual que con Moran I, el cálculo de la contigüidad de la matriz se realiza mediante un movimiento tipo alfíl.

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Análisis OBIA

El ortomosaico (Figura 3.1) generado con las fotos del VANT, tuvo una superficie de 0.84 ha y una resolución de 12 megapíxeles.

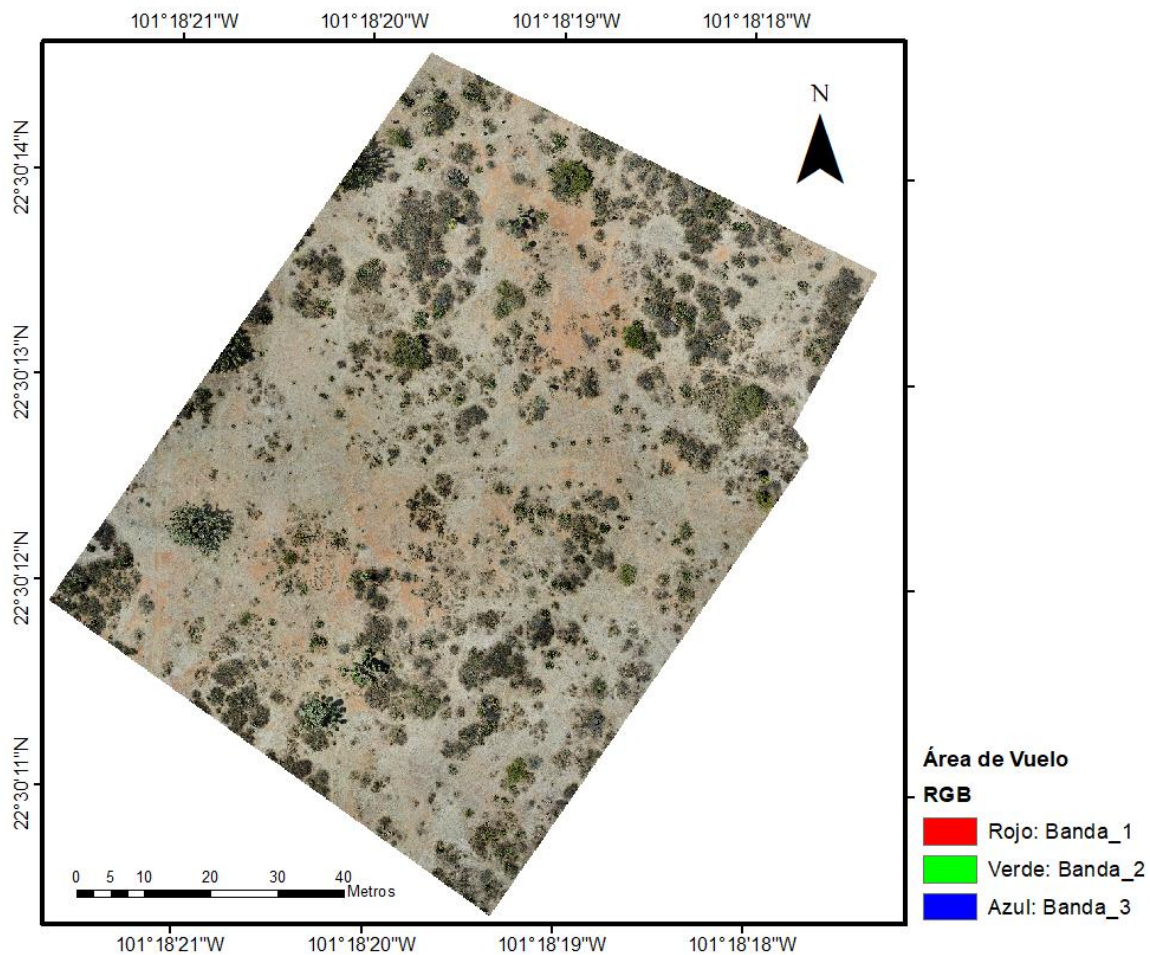


Figura 3.1. Ortofotomosaico del área de vuelo realizado en el ejido Tolosa, Pinos, Zacatecas.

La imagen segmentada del área de vuelo presentó 595,846 segmentos en total. Visualmente se identifican cambios en el ortomosaico (Figura 3.2) al compararse con la ortofoto del área de vuelo, uno de los cambios más notorios se encuentra en el suelo, que presenta color similar en comparación a la ortofoto que presenta mayor cantidad de tonalidades de café; esto se debe a que con el software se identificaron valores similares

de RGB y los agrupó en un mismo segmento. En el caso de la vegetación, visualmente es muy similar, tanto en el ortomosaico como en la ortofoto, pero con el software se tuvo mayor distinción de segmentos debido a variación de los valores RGB en la vegetación.

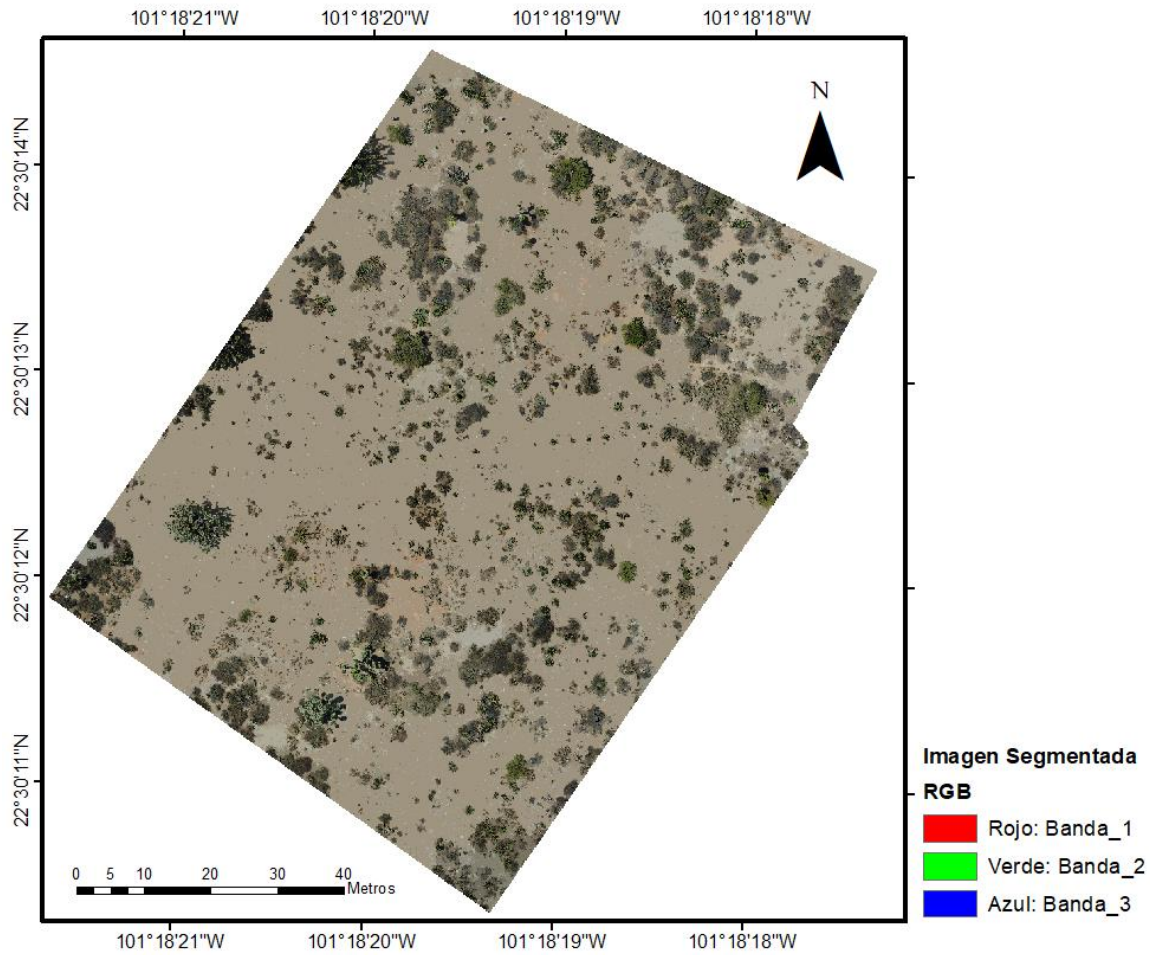


Figura 3.2. Imagen segmentada del área muestreada en el ejido Tolosa, Pinos, Zacatecas.

La segmentación indicó que el área estudiada se conforma por segmentos con valores específicos RGB, de compacidad y rectangularidad:

- **Agaves:** La banda del rojo presentó valores más altos, agrupados principalmente entre 130-180 ND y un valor máximo cercano a 230 ND (Figura 3.3). La banda del color verde presentó valores ligeramente inferiores a los de la banda del color rojo. Los valores de la banda del color azul oscilaron entre 100 y 140 ND y valor más alto de 200 ND. Los valores de rectangularidad de los segmentos que agruparon a los agaves variaron entre 0.4 y 0.6, indicando que los segmentos no son rectangulares y los valores de compacidad que oscilan entre 0.8 indica un parecido a figuras circulares (Figura 3.3).

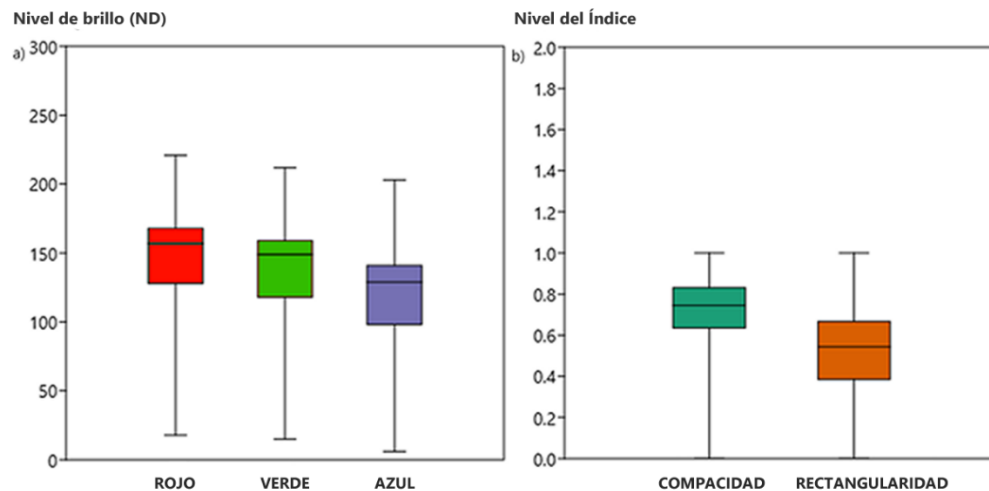


Figura 3.3. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los valores ND del espectro RGB (a) y de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes a los agaves registrados.

- **Palmas:** La banda verde presentó los valores más altos, sus valores oscilaron entre 60 y 130 ND con un máximo de 210 ND (Figura 3.4). La banda de color rojo tuvo valores ligeramente menores a los de la banda del color verde y los de la banda del color azul oscilaron entre 20 ND y 60 ND, con un valor máximo de 180 ND. Los segmentos que conformaron las palmas tuvieron valores de compacidad de entre 0.70 y 0.90 indicando un parecido a figuras circulares

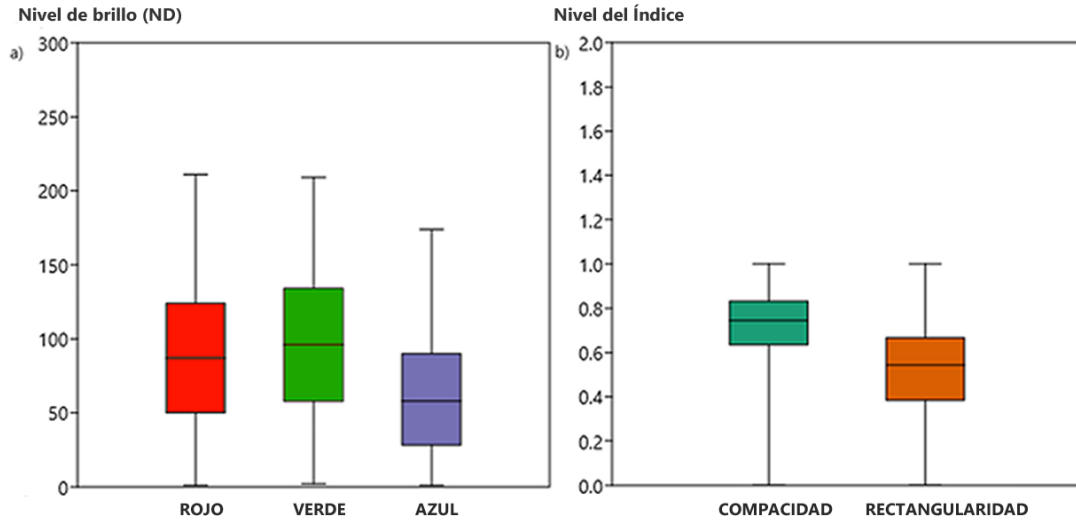


Figura 3.4. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los valores ND del espectro RGB (a) y valores de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes a las palmas registradas.

- **Cactáceas:** La banda del color rojo presentó los valores que oscilaron entre 40 a 110 ND y un valor máximo de 180 ND (Figura 3.5), la banda del color verde tuvo valores que oscilaron entre 40 a 110 ND y un valor máximo de 180 ND, y la banda del color Azul tuvo valores que oscilaron entre 30 a 80 ND y un valor máximo de 160 ND. Los segmentos tuvieron una gran similitud a figuras circulares con valores de compacidad que rondaron el 0.8, y una forma más irregular con valores de rectangularidad presentes entre 0.4 a 0.6.

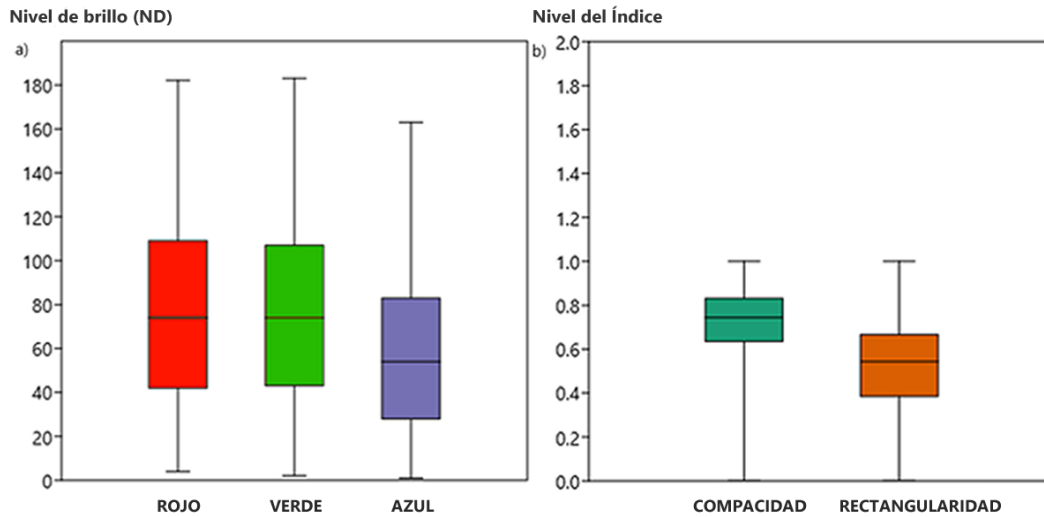


Figura 3.5. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los Valores ND des espectro RGB (a) y de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes a las cactaceas registradas.

- **Especies Micrófilas:** La banda del color rojo y la banda del color verde tuvieron valores similares presentando valores que oscilaron entre 50 a 80 ND y un máximo de 180 ND, siendo la banda del color verde la que presentó una media ligeramente mayor, la banda del color azul tuvo valores que oscilaron entre 30 a 60 ND y un valor máximo de 160 ND (Figura 3.6). La compacidad y la rectangularidad indican que los segmentos presentan formas semicirculares (compacidad entre 0.7 y 0.9) y figuras irregulares (rectangularidad entre 0.4 y 0.6).

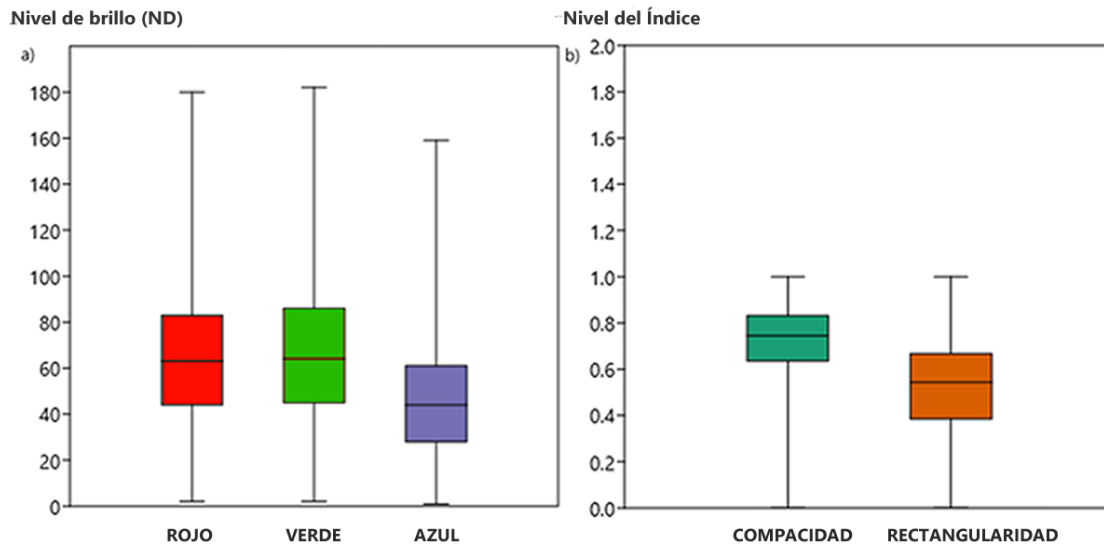


Figura 3.6. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los Valores ND del espectro RGB (a) y de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes a las especies micrófilas registradas.

- **Suelo:** La Banda del color rojo tuvo valores que oscilaron entre 130 a 160 ND y un valor máximo de 230 ND, (Figura 3.7), la banda del color verde presentó valores que rondaron entre 120 a 150 ND y un valor máximo de 220 ND, la banda del color azul tuvo valores que oscilaron entre 100 a 130 ND y un valor máximo de media cercana a los 200 ND. La rectangularidad indicó que los segmentos tenían formas irregulares no parecidas a rectángulos (Rectangularidad 0.4 - 0.6) y la compacidad indicó forma parecidas a círculos (Compacidad 0.7 – 0.9)

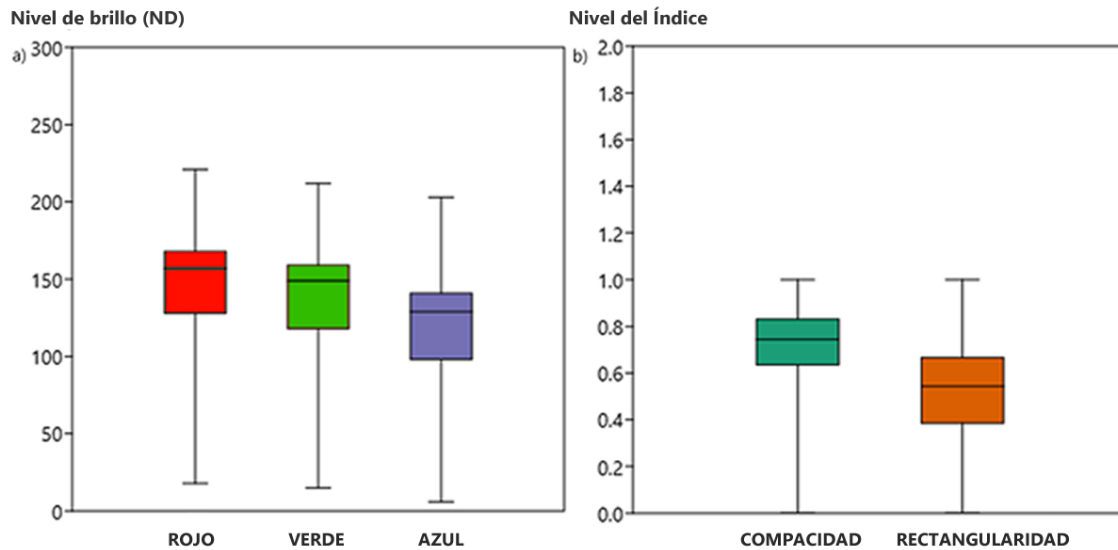


Figura 3.7. Gráfico de barras y bigotes correspondientes a los Valores ND del espectro RGB (a) y de compacidad y rectangularidad (b) correspondientes al suelo.

3.5.2 Análisis de parches

Numero de parches

Con el análisis de parches se encontró que la clase que presentó número mayor de parches fueron las cactáceas con 86,603 parches (Figura 3.8). Las especies microfilas y los agaves presentaron, cada una de ellas, 32,865 parches y las palmas sólo tuvieron 9,295 parches.

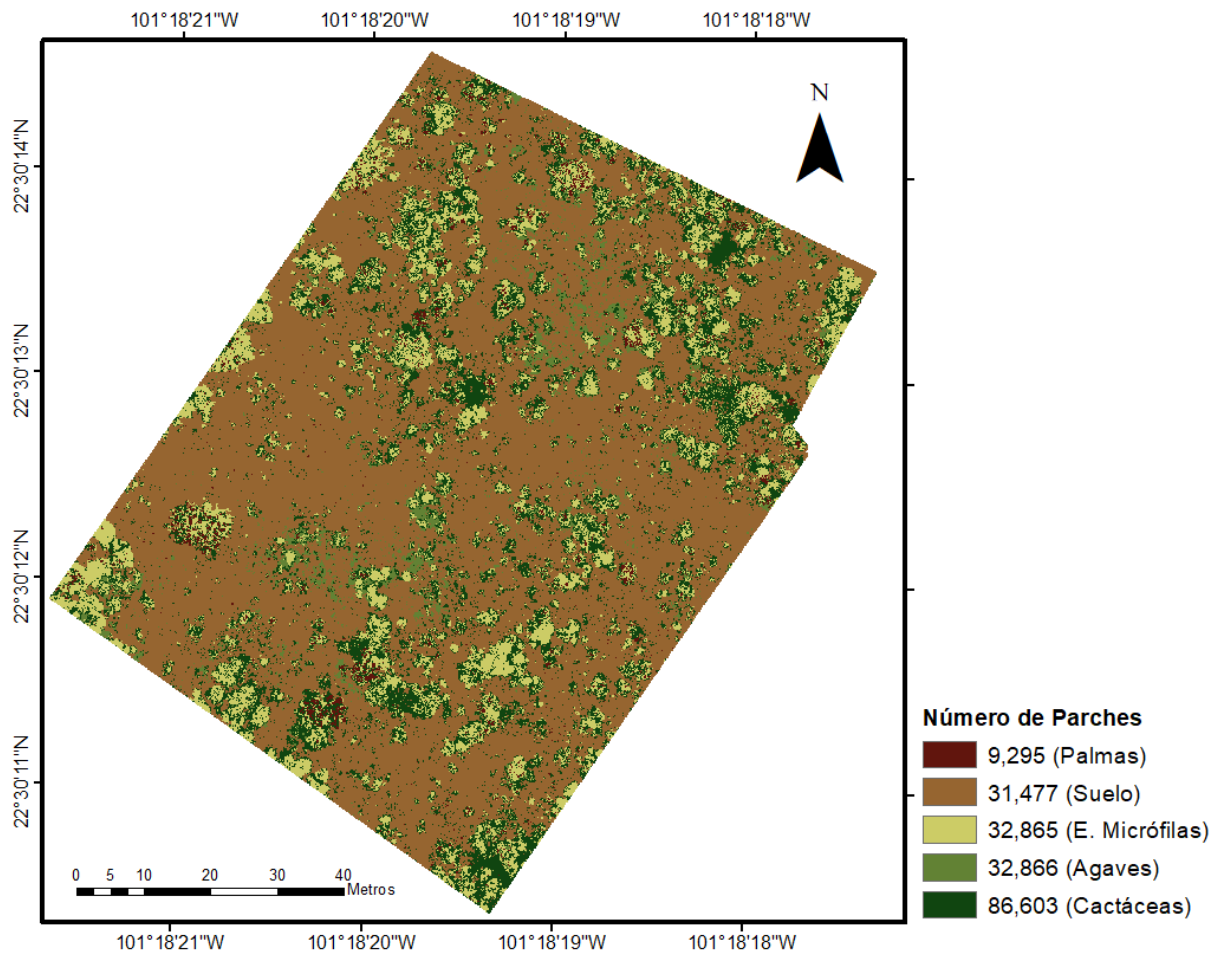


Figura 3.8. Parches por clase presentes en el área de vuelo.

Borde Total

La clase cactáceas tuvo la mayor cantidad de borde (47,925 m; Figura 3.9). Las clases palmas y suelo fueron las que tuvieron menor borde con extensión, cada una de ellas, de 5,625.76 m.

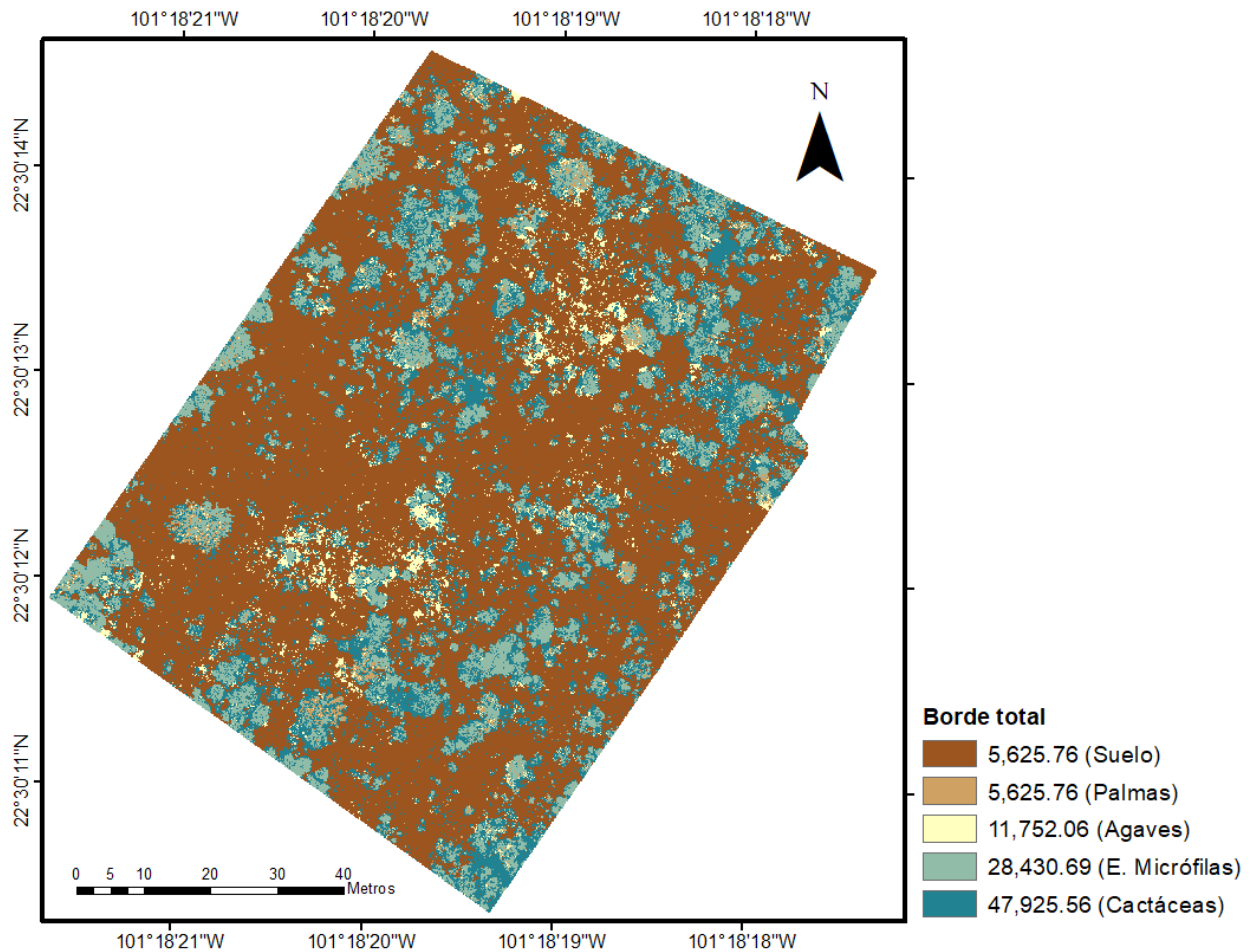


Figura 3.9. Cantidad del borde total de los parches por clase en el área de vuelo.

Densidad de Bordes

Las cactáceas (Figura 3.10) presentaron la mayor densidad de bordes con 56,377.2 m/0.84 ha. Por el contrario, las palmas presentaron densidad menor (6,617.86/0.84 ha).

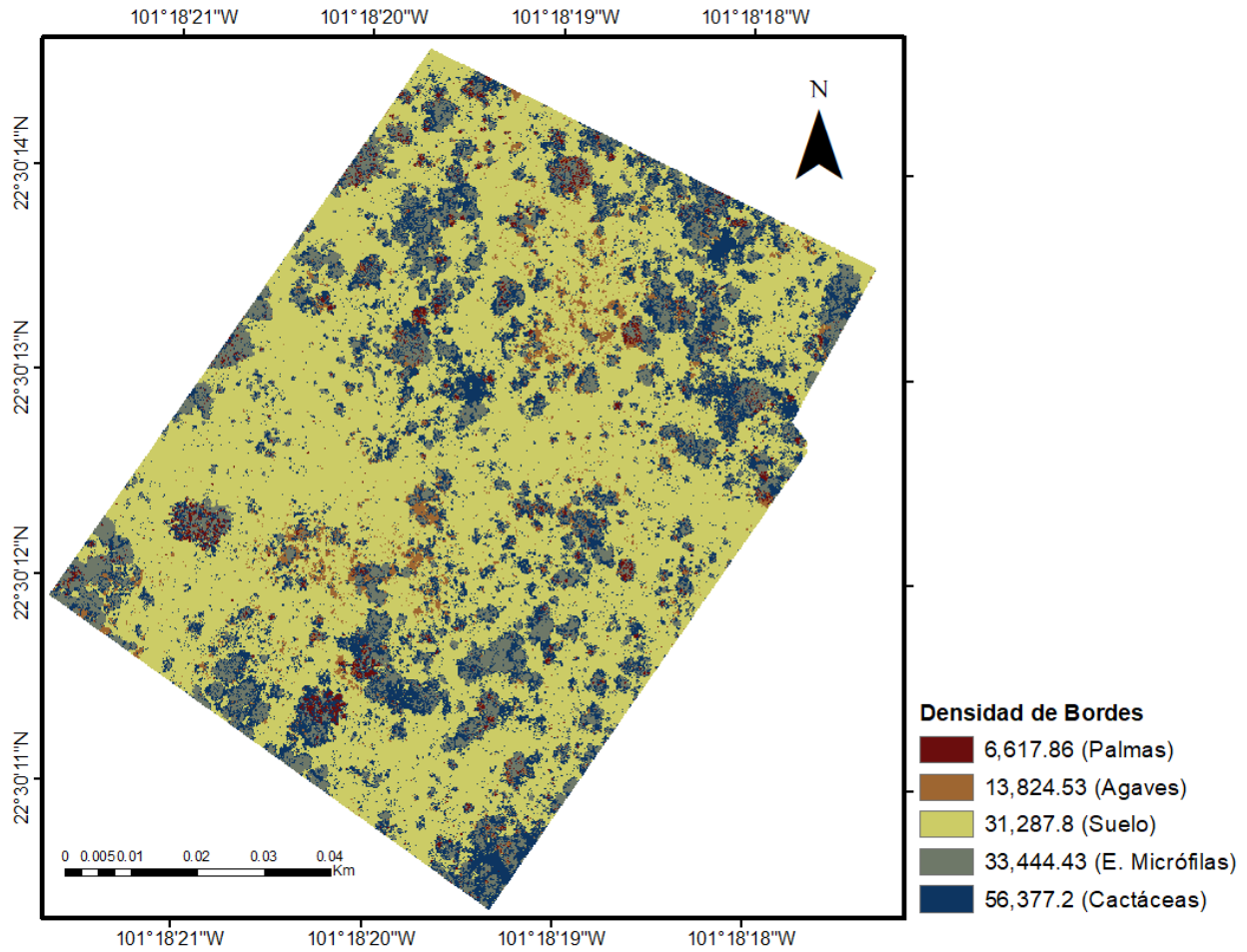


Figura 3.10. Densidad de bordes de los parches por clase en el área de vuelo.

Índice de Forma Media

Con base al índice de Forma Media, las formas de los parches por clase no se asemejan a una forma circular o rectangular, debido a que sus valores fueron > 1 . La clase con el índice más bajo fue Suelo (1.34) y la que tuvo el más alto fue la clase de especies Micrófilas (1.66) (Figura 3.11).

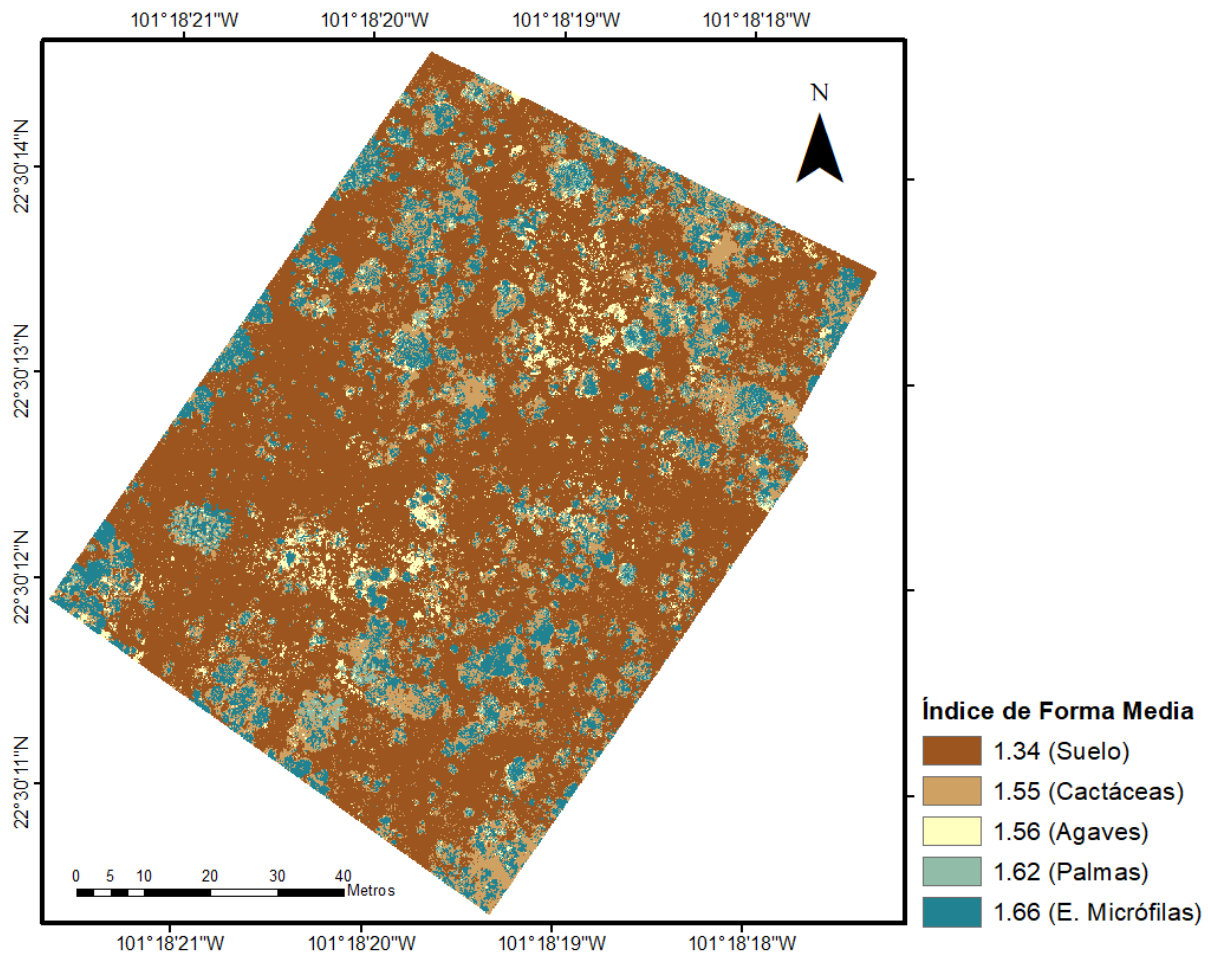


Figura 3.11. Índice de forma media de los parches por clase en el área de vuelo.

Compacidad

La compacidad analizada indicó que la mayoría de los segmentos presentaron valores de compacidad entre 0.3 y 0.6. Las áreas con valores de entre 0.8 y 1, se asemejan más a un círculo y estas corresponden a la vegetación (Figura 3.12).

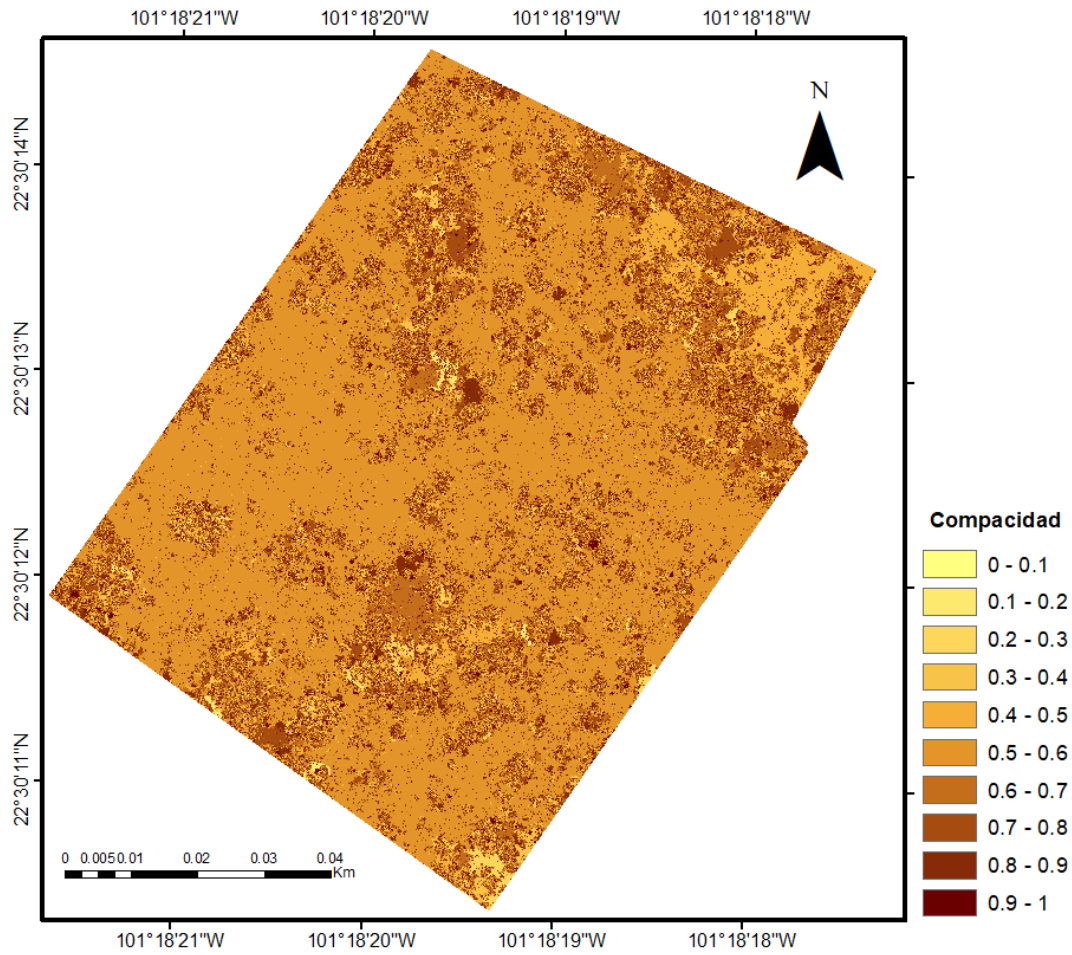


Figura 3.12. Nivel de compacidad de los segmentos en el área de vuelo.

Rectangularidad

Con base a los valores de rectangularidad de los segmentos, la forma de la mayoría de ellos no se asemeja a la de un rectángulo. Sus valores se presentaron en el rango de 0 a 0.2. En menor proporción, existen segmentos más parecidos a un rectángulo (0.8-1.0) (Figura 3.13).

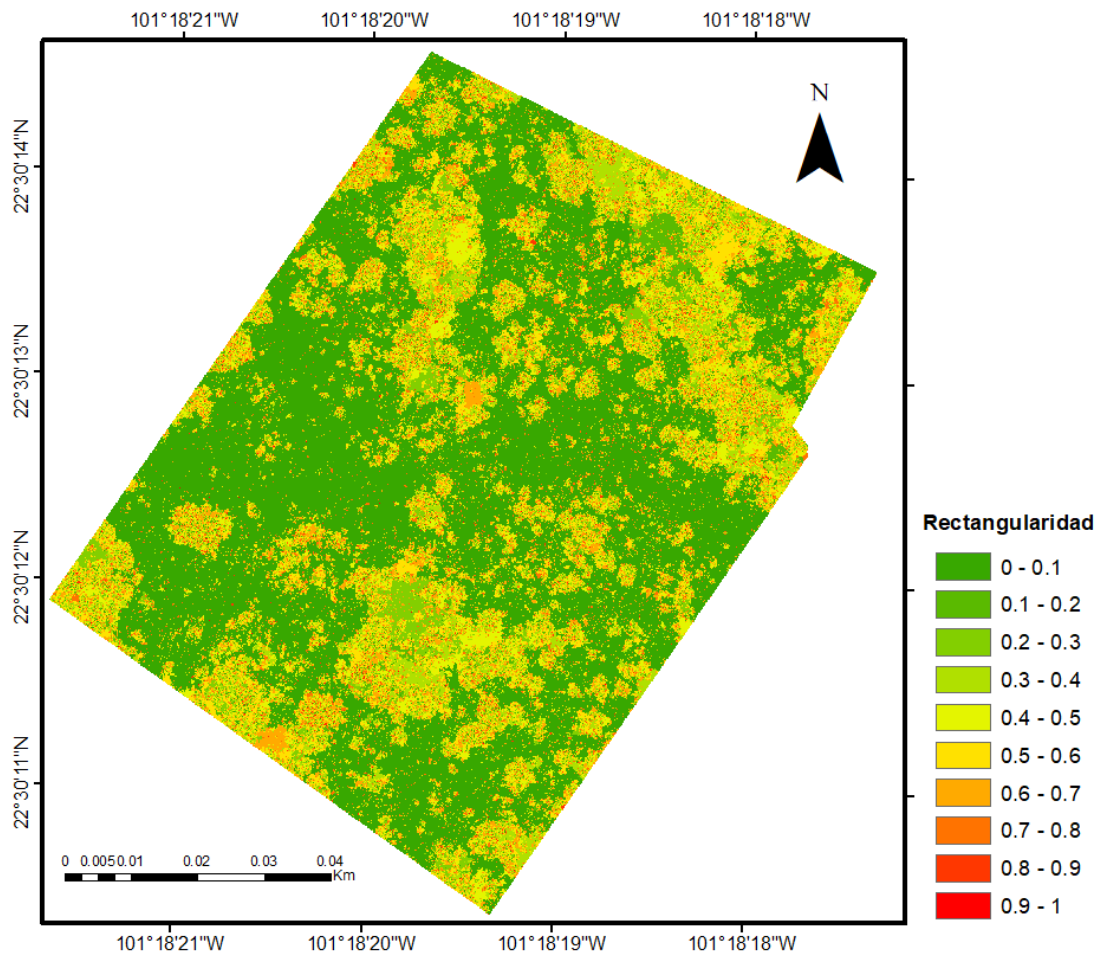


Figura 3.13. Nivel de rectangularidad de los segmentos en el área de estudio.

3.5.3 Análisis de autocorrelación espacial y de agrupamiento alto/bajo.

Con el índice de Moran se encontró que los parches de las clases (Suelo, Agaves, Cactáceas, Palmas, E. Micrófilas) en el área de estudio tienen distribución agrupada (Clustered; I de Moran= 0.056, $p < 0.01$), y el valor de p es un parámetro que permite rechazar la hipótesis nula, con la que se establece que la distribución es aleatoria, con base al puntaje de Z ($Z = 260.622$) (Figura 3.14) existe probabilidad menor al 1% de que el patrón agrupado sea el resultado de una distribución aleatoria.

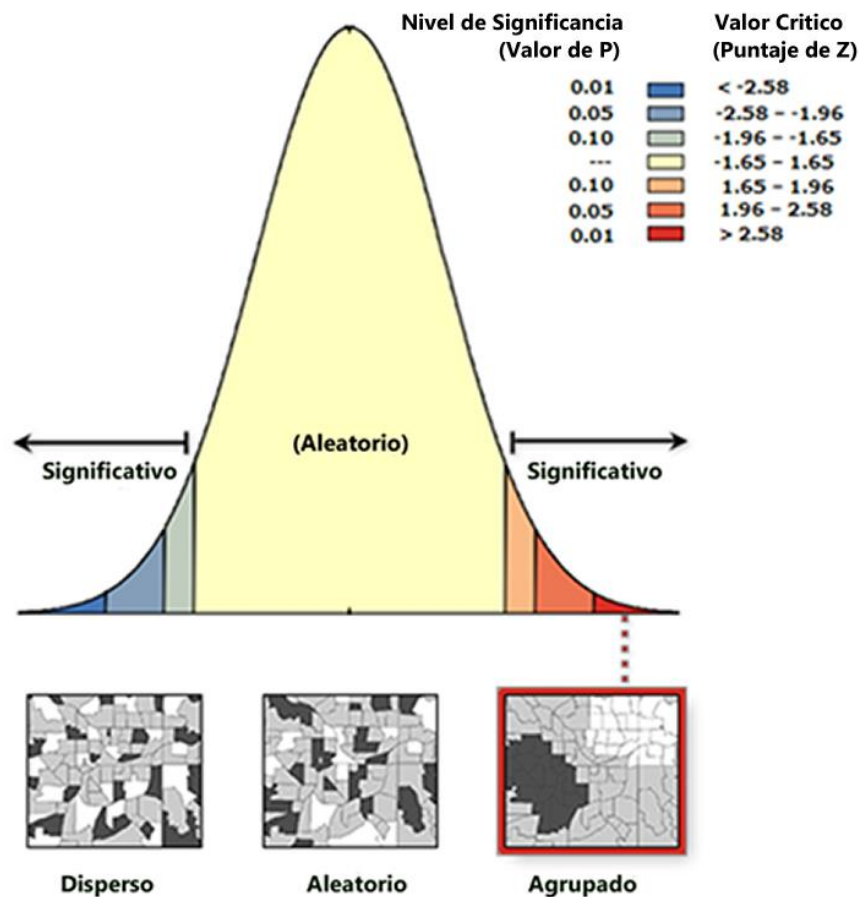


Figura 3.14. Gráfico de índice de Moran que indica que las clases presentaron un patrón de distribución agrupado.

El índice de Agrupamiento Alto-Bajo señaló que el patrón de agrupamiento de todas las clases fue alto (G observada= 0.000984 > G esperada = 0.000983, $p < 0.01$), el puntaje de Z ($Z = 2.38$) (Figura 3.15). El puntaje de Z señaló que existe una probabilidad menor al 5% de que el agrupamiento alto sea aleatorio; por ello, se rechaza la hipótesis nula que indica que el agrupamiento fue resultado de la aleatoriedad.

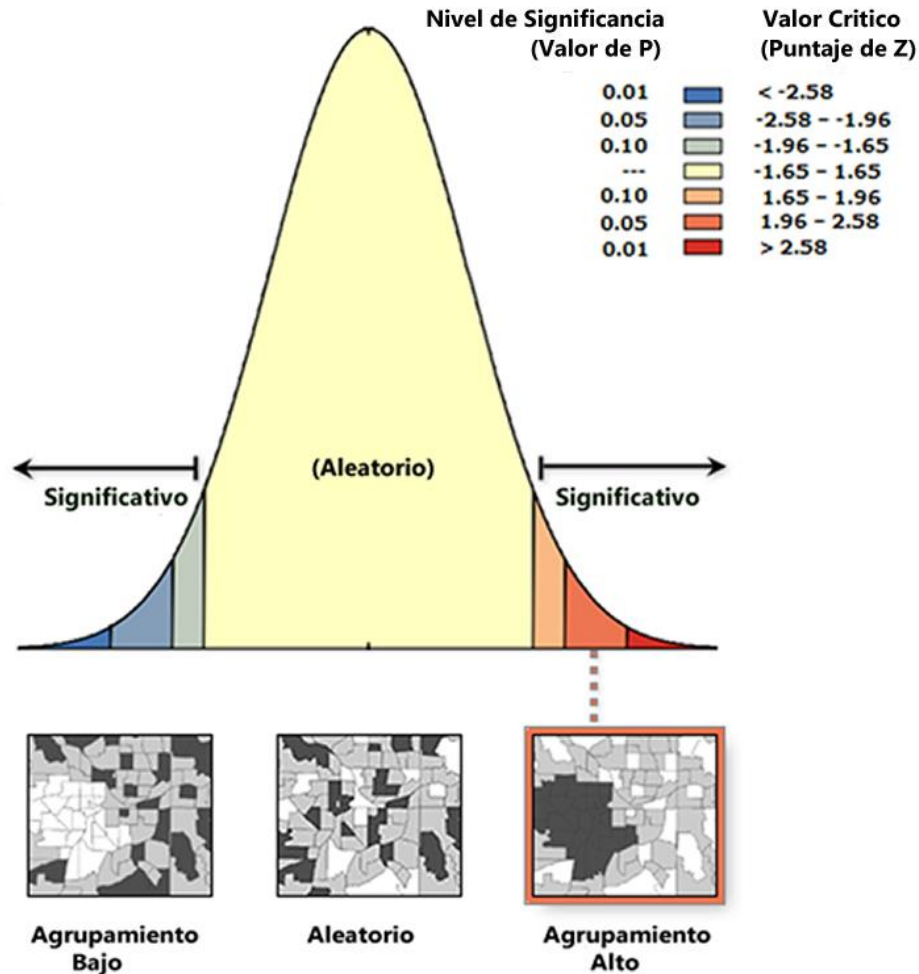


Figura 3.15. Gráfico de Agrupamiento Alto/Bajo que indica que las clases presentaron un agrupamiento alto.

3.6 DISCUSIÓN

De la vegetación del Altiplano Potosino-Zacatecano, los agaves son una de las principales especies usadas como sustrato de anidación y de forrajeo por la hormiga escamolera (Cruz-Labana *et al.* 2014; Rafael-Valdez *et al.* 2017), por lo que el conocimiento del estado de esta especie junto con otras especies vegetales e.g. palmas, cactáceas y otras (Rafael-Valdez *et al.* 2019), permiten la identificación de áreas potenciales de distribución de la hormiga escamolera.

Los valores de la banda del intervalo del verde registrados para la clase Agaves variaron entre 30 y 80 ND, con un máximo de 200 ND. La banda del color rojo tuvo valores similares a los de la banda color verde (valores oscilantes entre 30 y 80 ND, Max 200

ND). La banda del color azul tuvo valores entre 20 a 60 ND con un máximo de 180 ND. Los valores de la banda del color verde son semejantes a los reportados por Flores *et al.* (2021), Estos autores, en su análisis de Agaves mediante VANT, reportaron valores de 82 a 255 ND en la banda del color verde. Sin embargo, los valores de la banda del color rojo (65-85 ND) y de la banda azul (90-255 ND) difirieron con los encontrados en el presente estudio. El análisis de la distribución de los agaves con el uso de un VANT puede registrar diferencias según el algoritmo de identificación de los agaves, como la Red neuronal convolucional (*Convolutional neural network*) (Flores *et al.* 2021; Calvario *et al.* 2022). Escobar-Flores *et al.* (2022) señalan que, de los algoritmos disponibles para la segmentación y la búsqueda de agaves, el algoritmo OBIA es el que presenta precisión mayor.

González-Domínguez (2021) indica que la identificación de agaves mediante VANT e I de Moran se ve afectado por la elevación del terreno, pendiente y orientación del terreno, dependiendo de la especie de agave. La elevación puede modificar los patrones de distribución debido a la creación de mosaicos de suelo y/o de microclimas (Beatty, 1984). Al respecto, Martínez-Salvador *et al.* (2005) señalan que la presencia de *Agave salmiana*, uno de los principales sustratos de anidación y forrajeo de la hormiga escamolera (Cruz-Labana *et al.* 2014; Rafael-Valdez *et al.* 2017; 2019) en el Altiplano Potosino-Zacatecano en mesetas al sureste del estado de Zacatecas, disminuye conforme la edad del agave (la densidad de agaves juveniles es mayor a la densidad de agaves maduros). Asimismo, establecen que esta especie coexiste con comunidades de *Opuntia* y otras especies arbustivas con y sin espinas.

Uuemaa *et al.* (2009) indican que el análisis de métricas del paisaje como el número de parches y la densidad de los bordes en estudios referentes a insectos, ayudan a generar información sobre la relación entre las especies de insectos con los parches en términos de interacciones biológicas, como la diversidad y la abundancia de algunas especies de insectos (Maguire *et al.*, 2016; Stilley & Gabler, 2021). Asimismo, permiten evaluar los cambios en la estructura del paisaje como su tamaño, forma y número de parches. Entender las interacciones de las especies de insectos con el paisaje proporciona elementos para la toma de decisiones sobre su manejo (Radeloff *et al.* 2000; Beckler *et*

al. 2004). Gómez-Ruiz *et al.* (2021) establecen que el análisis de parches aplicado a especies de agaves, permite evaluar el estado del paisaje y su nivel de fragmentación y que esta información es útil para realizar acciones enfocadas a la prevención de la erosión del suelo y a la pérdida de la vegetación, que provee refugio y alimento a especies de vertebrados e invertebrados del hábitat.

Este estudio presentó varias limitaciones, algunas referentes a las condiciones meteorológicas que no permitieron el uso del VANT en las fechas previstas, por lo que fue necesario re agendar los vuelos, entre las limitaciones técnicas se encontró la baja duración de las baterías del equipo (en comparación a equipos con mayor capacidad de vuelo) que no permitieron el análisis de una mayor área, y se presentó falta de información referente a estudios realizados mediante un VANT y otras especies vegetales como palmas, cactáceas o especies microfilas, o con especies de insectos. Para futuras investigaciones se recomienda el uso de equipos VANT con una capacidad de vuelo mayor al equipo usado en esta investigación, que permita realizar un análisis en área de mayor tamaño; se sugiere, además que se utilice un equipo con cámara multiespectral que permita diversificar los análisis que pueden ser realizados con las imágenes capturadas, como equipos cuadricópteros como los de la línea *phantom* de DJI que cuenta con un FOV mayor (94°) o un equipo de ala fija como el equipo Parrot Disco Pro, ambas marcas cuentan con la posibilidad de cambiar la cámara del equipo por una cámara multiespectral. El conocimiento de los parches de vegetación de las áreas de anidación y forrajeo de la hormiga escamolera, además de identificar áreas de distribución potencial, permite predecir las condiciones del paisaje y con ello diseñar planes que permitan aminorar el impacto de actividades que afecten directamente en la cobertura vegetal sin tener que dejar de aprovechar recursos como el escamol o el agave.

3.7 CONCLUSIONES

Esta investigación presenta por primera vez el uso de un VANT y el análisis de las imágenes obtenidas mediante el algoritmo OBIA, el Índice de autocorrelación espacial (índice de Moran) y el Índice de Agrupamiento Alto/Bajo (G general de Getis-Ord). Esta metodología permitió identificar parches de cinco clases de cobertura con distribución

agrupada (I de Moran = 0.56, $p = 0.00$). Esta distribución no fue producto de la aleatoriedad ($Z=260.622$); el grado de agrupamiento fue alto para todas las clases (G observada= 0.000984 > G esperada = 0.000983, $p < 0.01$) y no fue aleatorio ($Z= 2.38$). Esta información está disponible para contribuir en la toma de decisiones para el aprovechamiento sustentable del escamol y en la conservación de su hábitat, y además la metodología usada reduce el tiempo y el esfuerzo en la obtención de información relacionada con los ecosistemas, sus características y nivel de conservación.

LITERATURA CITADA

- Beatty, S.W. (1984). Influence of microtopography and canopy species on spatial patterns of forest understory plants. *Ecology*, 65(5):1406-1419.
- Beckler, A. A., French, B. W., Chandler, L. D. (2004). Characterization of western corn rootworm (*Coleoptera: Chrysomelidae*) population dynamics in relation to landscape attributes. *Agricultural and Forest Entomology*, 6(2), 129-139.
- Berumen-Jiménez, M., Valdez-Cepeda, R.D., Méndez-Gallegos, S.J., Cadena-Íñiguez, J., Esparza-Orozco, A., & Tarango-Arámbula, L.A. (2021). Determination of the conservation status of the “escamolera” ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) in Mexico by the species risk assessment methodology – MER. *Agrociencia*, 55(6), 539-555. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i6.2558>
- Blaschke, T, Lang, S, & Hay, G. (2008). *Object-based image analysis: spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*. Springer Science & Business Media.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 65(1), 2-16.
- Blaschke, T., Hay, G.J., Kelly, M., Lang, S., Hofmann, P., Addink, E., Queirozfeitosa, R., Van Der Meer, F., Van Der Werff, H., Van Coillie, F., & Tiede, D. (2014). Geographic Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 180-191.
- Bucheli, G. E. H. (2019). Uso del Índice de Moran y LISA para explicar el ausentismo electoral rural en Ecuador. *Revista Geográfica*, (160), 91-108. <https://doi.org/10.35424/regeo.160.2019.746>
- Calvario, O. H., Florián, F., Otero, M. G. S., & George, H. A. (2022). Conteo de plantas de agave usando redes neuronales convolucionales e imágenes adquiridas desde un vehículo aéreo no tripulado. *RISTI: Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (45), 64-76.

- Chen, G., Weng, Q., Hay, G. J., & He, Y. (2018). Geographic object-based image analysis (GEOBIA): Emerging trends and future opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 55(2), 159-182. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1426092>
- Coordinación de Estrategias de Biodiversidad y Cooperación-CONABIO. (2021). *Resumen de La biodiversidad en Zacatecas. Estudio de Estado*. CONABIO, México. URL: https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/estudios/ee_zacatecas
- Cruz-Labana, J.D., Tarango-Arámbula, L.A., Alcántara-Carbajal, J.L., Pimentel-López, J., Ugalde-Lezama, S., Ramírez-Valverde, G., & Méndez-Gallegos, S.D.J. (2014). Habitat use by the " Escamolera" ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) in central Mexico. *Agrociencia*, 48(6), 569-582.
- Escobar-Flores, J. G., Sandoval, S., & Gámiz-Romero, E. (2022). Unmanned aerial vehicle images in the machine learning for agave detection. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(41), 61662-61673. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18985-7>
- ESRI. (2016). *Calcular atributos de segmento—Ayuda*. Arcgis.com. Recuperado el 20 de septiembre de 2022, de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/compute-segment-attributes.htm>
- Figueroa-Sandoval, B., Ugalde-Lezama, S., Pineda-Pérez, F.E., Ramírez-Valverde, G., Figueroa Rodríguez, K.A., & Tarango-Arámbula, L.A. (2018). Producción de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr 1870) y su hábitat en el Altiplano Potosino-Zacatecano, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 15(2), 235-245.
- Flores, D., González-Hernández, I., Lozano, R., Vázquez-Nicolas, J. M., & Hernández Toral, J. L. (2021). Automated Agave Detection and Counting Using a Convolutional Neural Network and Unmanned Aerial Systems. *Drones*, 5(1), 4. <https://doi.org/10.3390/drones5010004>
- Forman, R.T.T., & Godron, M. (1986). *Landscape Ecology*. Nueva York: Wiley and Sons.

- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional autónoma de México. Serie Libro N° 6. México, D. F.
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- Gómez-Ruiz, E.P., Lacher Jr., T.E., Moreno-Talamantes, A., & Flores Maldonado, J.J. (2021). Impacts of land cover change on the plant resources of an endangered pollinator. *Biodiversity and conservation*. <https://doi.org/10.7717/peerj.11990>
- Gómez-Palacios D, & Torres-Rodríguez J, (2017). *Análisis de Imágenes Orientado a Objetos GEOBIA*. Laboratorio de Geomática. Departamento de Ciencias de la Computación. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- González-Domínguez, A.A. (2019). *Patrones de distribución espacial de agaves utilizados en la industria mezcalera en la región de Nombre de Dios, Durango*. [Tesis que presenta para obtener el grado de Ingeniero en manejo ambiental] Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
- Hay, G., & Castilla, G. (2008). *Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): A new name for a new discipline*. En Blaschke T., Lang S., & Hay G.J. (Eds.), *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*, 75-89. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_4
- Hernández-Oria, J. G. (2010). Patrones de diversidad regional en las Cactaceae amenazadas del Desierto Chihuahuense, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 14(1), 35-49.
- Hossain, M. D., & Chen, D. (2019). Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective.

- ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 150, 115-134.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009>
- Lang, S. (2008). *Object-based image analysis for remote sensing applications: modeling reality – dealing with complexity*. En: Blaschke, T., Lang, S., & Hay, G.J. (eds) *Object-Based Image Analysis. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 3-27. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_1
- Lara-Juárez, P., Aguirre Rivera, J.R., Castillo Lara, P., & Reyes Agüero, J.A. (2015). Biología y aprovechamiento de la hormiga de escamoles, *Liometopum apiculatum* Mayr (Hymenoptera: Formicidae). *Acta Zoológica Mexicana*, 31(2), 251-264
- Lara-Juárez, P., Castillo-Lara, P., Tristán-Patiño, F., Rendón-Huerta, J.A., & Aguirre-Rivera, J.R. (2016). Efectos del sitio y la condición de agostadero en la densidad de hormigueros de escamoles (*Liometopum apiculatum* Mayr). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 285-302.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.04.016>
- Lucchese, L., & Mitray, S.K., (2001). *Color image segmentation: A state-of-the-art survey*. In: Indian National Science Academy (INSA-A). Delhi, India, 207–221.
<https://doi.org/10.1.1.84.4896>.
- Luna-Cavazos, E., Romero-Manzanares, A., & Moya, G. (2007). Distribución geográfica y ecológica de papas silvestres (*Solanum L.*) del altiplano Potosino-Zacatecano, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 13(1), 35-41.
- Maguire D.Y., Buddle C.M., & Bennett E.M. (2016). Within and Among Patch Variability in Patterns of Insect Herbivory Across a Fragmented Forest Landscape. *PLOS ONE* 11(3): e0150843. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150843>
- Martínez-Salvador, M., Valdez-Cepeda, R., Arias, H. R., Beltrán-Morales, L. F., Murillo-Amador, B., Troyo-Diéguez, E., & Ortega-Rubio, A. (2005). Distribution and density of maguey plants in the arid Zacatecas Plateau, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 61(4), 525-534. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.10.002>

- Moran, P. A. (1948). The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 10(2), 243-251.
- Radeloff, V. C., Mladenoff, D. J., & Boyce, M. S. (2000). The changing relation of landscape patterns and jack pine budworm populations during an outbreak. *Oikos*, 90(3), 417-430.
- Rafael-Valdez, J., Tarango-Arámbula, L.A., Ugalde-Lezama S., Lozano-Cavazos, E.A., Ruíz-Vera, V.M., & Bravo-Vinaja, A. (2017). Sustratos forrajeros y de anidación de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr, Hymenoptera: *Formicidae*) en Villa González Ortega, Zacatecas, México. *Agrociencia*, 51(7), 755-769.
- Rafael-Valdez J., Tarango-Arámbula L.A., Ugalde-Lezama S., Cruz-Labana J.D., Clemente-Sánchez F., & Cadena-Iñiguez J. (2019). Foraging amplitude of the escamolera ant (*Liometopum apiculatum* Mayr, Hymenoptera: *Formicidae*) in a semi-arid area of the Zacatecan highlands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 18(1), 5-19.
- Ramírez, L. (2015). Autocorrelación espacial: analogías y diferencias entre el índice de Moran y el índice Getis y Ord. *V Congreso Nacional de Geografía de Universidades Públicas "Geografías por venir"*, 1483-1495.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*, 1ra. Edición, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México
- Stilley, J.A., & Gabler, C.A. (2021). Effects of Patch Size, Fragmentation, and Invasive Species on Plant and Lepidoptera Communities in Southern Texas. *Insects*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/insects12090777>
- Tarango-Arámbula, L.A. (2012). Los escamoles y su producción en el altiplano potosino-zacatecano, *RESPYN Revista Salud Pública y Nutrición*, 04 ,139 – 144.
- Uuemaa, E., Antrop, M., Roosaare, J., Marja, R., & Mander, Ü. (2009). Landscape metrics and indices: an overview of their use in landscape research. *Living reviews in landscape research*, 3(1), 1-28.

Vila-Subirós, J., Varga, D., Llausàs I Pascual, A., & Ribas-Palom, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 2006, 48, 151-166.

Wiens, J. A. (1976). Population responses to patchy environments. *Annual review of ecology and systematics*, 7(1), 81-120.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.07.110176.000501>

CONCLUSIONES GENERALES

La hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr) es un insecto cuyas larvas, conocidas como escamoles, representan fuente de nutrientes para quienes la consumen y fuente de ingresos para los recolectores. Sin embargo, el estado de conservación del hábitat de esta hormiga no se ha evaluado, aspecto que limita la producción y el aprovechamiento sustentable del escamol.

Con el análisis del NDVI se encontró que en los sitios de anidación sus valores cambian con el periodo del año. En el periodo de lluvias se registraron valores entre 0.21-0.30 y en el periodo seco entre 0.19-0.42, en ambos casos se señaló que los valores NDVI dependen de la precipitación. El conocimiento del NDVI de la vegetación puede convertirse en un referente para la toma de decisiones en la conservación del hábitat de la hormiga escamolera y en su aprovechamiento sustentable.

Mediante el Análisis de Componentes Principales se encontró que, no hubo relación entre tamaño de área y frecuencia de nidos. Las áreas correspondientes al componente 2 fue donde se registró la frecuencia mayor de sitios de anidación, en este componente (en los tres casos) se tuvo mayor cobertura vegetal y refugios térmicos. Con el ACP y el análisis de las variables topográficas y espectrales se pueden identificar parámetros importantes relacionados con el hábitat de la hormiga escamolera y del establecimiento de sus colonias.

El uso de un VANT, el algoritmo OBIA y los Índices de Moran y G general de Getis-Ord, se identificó que los parches de las clases del hábitat de la hormiga escamolera en el ejido Tolosa, Pinos, Zacatecas se distribuyen en forma de grupo (I de Moran=0.056, $p<0.01$) en la categoría de agrupación alta (G observada= 0.000984 > G esperada = 0.000983, $P = 0.01$). La combinación de estas metodologías permite capturar la información en un menor tiempo y esfuerzo, y sus resultados están disponibles para la toma de decisiones referentes a la conservación del hábitat de la hormiga escamolera y el aprovechamiento sustentable del escamol.

Esta investigación complementa la información disponible sobre la hormiga escamolera, su hábitat y relaciones biológicas y ofrece el uso de metodologías y tecnologías para

conocer más sobre los requerimientos de esta especie y la generación de propuestas de manejo, aprovechamiento y conservación de la hormiga escamolera, de una forma más rápida en el centro-norte de México.

LITERATURA GENERAL

- AntWeb. Version 8.75.3. California Academy of Science, online at <https://www.antweb.org>.
- Beatty, S.W. (1984). Influence of microtopography and canopy species on spatial patterns of forest understory plants. *Ecology*. 65(5):1406-1419.
- Becerril-Piña, R., Mastachi-Loza, C. A., González-Sosa, E., Díaz-Delgado, C., & Bâ, K. M. (2015). Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 120, 4-13.
- Beckler, A. A., French, B. W., Chandler, L. D. (2004). Characterization of western corn rootworm (*Coleoptera: Chrysomelidae*) population dynamics in relation to landscape attributes. *Agricultural and Forest Entomology*, 6(2), 129-139.
- Berumen-Jimenez M. (2018). *Evaluación de riesgo de extinción de Liometopum apiculatum Mayr, y descripción de las etapas de recolección, limpieza-lavado-drenado y almacenamiento de sus larvas*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados
- Berumen-Jiménez, M., Valdez-Cepeda, R. D., Méndez-Gallegos, S.D.J., Cadena-Íñiguez, J., Esparza-Orozco, A., & Tarango-Arámbula, L. A. (2021). Determination of the conservation status of the “escamolera” ant (*Liometopum apiculatum* MAYR) in Mexico by the species risk assessment methodology – MER. *Agrociencia*, 55(6), 539-555. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i6.2558>
- Blaschke, T., Lang, S., & Hay, G. (2008). *Object-based image analysis: spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*. Springer Science & Business Media.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 65(1), 2-16.
- Blaschke, T., Hay, G.J., Kelly, M., Lang, S., Hofmann, P., Addink, E., Queirozfeitosa, R., Van Der Meer, F., Van Der Werff, H., Van Coillie, F., & Tiede, D. (2014). Geographic

- Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 180-191.
- Bravo, J. C., Somarriba, E., & Arteaga, G. (2011). Factores que afectan la abundancia de insectos polinizadores del cacao en sistemas agroforestales. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1), 119-131.
- Bruna-Lavilla, P., & Ortega-Salinas, M. (2018). *Introducción a la evapotranspiración del agua en las plantas cultivadas*. Informaciones técnicas / Centro de Transferencia Agroalimentaria, 269, 8. Dirección General de Desarrollo Rural, Gobierno de Aragón. <https://rica.chil.me/post/introduccion-a-la-evapotranspiracion-del-agua-en-las-plantas-cultivadas-223124>
- Bucheli, G. E. H. (2019). Uso del Índice de Moran y LISA para explicar el ausentismo electoral rural en Ecuador. *Revista Geográfica*, (160), 91-108. <https://doi.org/10.35424/regeo.160.2019.746>
- Bunnefeld, N., Linnell, J.D.C., Odden, J., & Van Duijn, M.A.J., ANDERSEN, R. (2006). Risk tasking by Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in a human-dominated landscape: effects of sex and reproductive status. *Journal of Zoology*. 270: 31-39 <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2006.00107.x>
- Calvario, O. H., Florián, F., Otero, M. G. S., & George, H. A. (2022). Conteo de plantas de agave usando redes neuronales convolucionales e imágenes adquiridas desde un vehículo aéreo no tripulado. *RISTI: Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (45), 64-76.
- Camberlin, P., Martiny, N., Philippon, N., & Richard, Y. (2007). Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sensing of Environment*. 106, 199–216. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.009>
- Chang, J., Gong, L., Zeng, F., Xue, J., Mao, D., Cao, Y., Mu, G., & Wang, S. (2022). Using hydro-climate elasticity estimator and geographical detector method to quantify the individual and interactive impacts on NDVI in oasis-desert ecotone.

- Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 3131-3148.
<https://doi.org/10.1007/s00477-022-02184-4>
- Chávez Jr., P.S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3): 459-479.
- Chen, G., Weng, Q., Hay, G. J., & He, Y. (2018). Geographic object-based image analysis (GEOBIA): Emerging trends and future opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 55(2), 159-182. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1426092>
- Chuvienco, S.E. (2019). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Digital Reasons. ISBN: 9788412031546
- Coordinación de Estrategias de Biodiversidad y Cooperación-CONABIO. (2021). *Resumen de La biodiversidad en San Luis Potosí. Estudio de Estado*. CONABIO, México. URL: https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/estudios/ee_sanluispotosi
- Coordinación de Estrategias de Biodiversidad y Cooperación-CONABIO. (2021). *Resumen de La biodiversidad en Zacatecas. Estudio de Estado*. CONABIO, México. URL: https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/estudios/ee_zacatecas
- Cruz-Cárdenas, G, López-Mata, L, Villaseñor, JL, & Ortiz, E. (2014). Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 188-199. <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>
- Cruz-Labana, J.D. (2013). *Variables del hábitat de la hormiga escamolera (Liometopum apiculatum) en el municipio de Charcas, San Luis Potosí, México*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- Cruz-Labana, J.D., Tarango-Arámbula, L.A., Alcántara-Carbajal, J.L., Pimentel-López, J., Ugalde-Lezama, S., Ramírez-Valverde, G., & Méndez-Gallegos, S.D.J. (2014).

Habitat use by the "Escamolera" ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) in central Mexico. *Agrociencia*, 48(6) 569-582.

Cruz-Labana, J.D., Crosby-Galván, M.M., Delgado-Alvarado, A., Alcántara-Carbajal, J.L., Cuca-García, J.M., & Tarango-Arámbula, L.A. (2018). Nutritional content of *Liometopum apiculatum* Mayr larvae ("escamoles") by vegetation type in north-central Mexico. *Journal of Asia-Pacific Entomology*. 21, 1239–1245. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2018.09.008>

Cuanalo, C., H; Ojeda T. E, Santos O. A, & Ortiz S.C.A. (1989). Provincias, regiones y subregiones terrestres de México. Centro de Edafología del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Chapingo, México.

Dall'olmo, G., & Karnieli, A. (2002). Monitoring phenological cycles of desert ecosystems using NDVI and LST data derived from NOAA-AVHRR imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 23 (19), 4055-4071, <https://doi.org/10.1080/01431160110115988>

Escobar-Flores, J. G., Sandoval, S., & Gámiz-Romero, E. (2022). Unmanned aerial vehicle images in the machine learning for agave detection. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(41), 61662-61673. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18985-7>

Escobar-Flores, J.G., Sandoval, S., Valdez, R., Shahriary, E., Torres, J., Álvarez-Cárdenas, S., Gallina-Tesaro, P. (2019). Waterhole detection using a vegetation index in desert bighorn sheep (*Ovis canadensis cremnobates*) habitat. *PLOS ONE* 14(1). e0211202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211202>

ESRI. (2016). *Calcular atributos de segmento—Ayuda*. Arcgis.com. Recuperado el 20 de septiembre de 2022, de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/compute-segment-attributes.htm>

FAO, (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo: Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional*. Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, Italia.

- Ferrusquía-Villafranca, I. (1993), *Geology of Mexico: A Synopsis*. En Ramammoorthy, T.P., Bye, R.A., Lot, A., Fa., J. (eds.), *Biological diversity of Mexico: Origins and distribution*. Oxford University Press. New York.
- Figuroa-Sandoval, B., Ugalde-Lezama S., Pineda-Pérez F.E., Ramírez-Valverde G., Figuroa Rodríguez K.A., & Tarango-Arámbula L.A. (2018). Producción de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr 1870) y su hábitat en el Altiplano Potosino-Zacatecano, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 15(2), 235-245.
- Flores, D., González-Hernández, I., Lozano, R., Vázquez-Nicolas, J. M., & Hernández Toral, J. L. (2021). Automated Agave Detection and Counting Using a Convolutional Neural Network and Unmanned Aerial Systems. *Drones*, 5(1), 4. <https://doi.org/10.3390/drones5010004>
- Forman, R.T.T., & Godron, M. (1986). *Landscape Ecology*. Nueva York: Wiley and Sons.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional autónoma de México. Serie Libro N° 6. México, D. F.
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- Gómez-Palacios D, & Torres-Rodríguez J, (2017). *Análisis de Imágenes Orientado a Objetos GEOBIA*. Laboratorio de Geomática. Departamento de Ciencias de la Computación. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Gómez-Ruiz, E.P., Lacher Jr., T.E., Moreno-Talamantes, A., & Flores Maldonado, J.J. (2021). Impacts of land cover change on the plant resources of an endangered pollinator. *Biodiversity and conservation*. <https://doi.org/10.7717/peerj.11990>
- González-Domínguez, A.A. (2019). *Patrones de distribución espacial de agaves utilizados en la industria mezcalera en la región de Nombre de Dios, Durango*.

[Tesis que presenta para obtener el grado de Ingeniero en manejo ambiental]
Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales y
Ambientales

- Guénard, B., Weiser, M. D., Gomez, K., Narula, N., & Economo, E. P. (2017). The Global Ant Biodiversity Informatics (GABI) database: synthesizing data on the geographic distribution of ant species (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News/Osterreichische Gesellschaft fur Entomofaunistik*, 24, 83-89.
- Harris, R.J. 1975. *A primer of Multivariate Statistics*. New York: Academic Press.
- Hay, G., & Castilla, G. (2008). *Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): A new name for a new discipline*. En Blaschke T., Lang S., & Hay G.J. (Eds.), *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*, 75-89. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_4
- He, P., Xu, L., Liu, Z., Jing, Y., & Zhu, W. (2021). Dynamics of NDVI and its influencing factors in the Chinese Loess Plateau during 2002–2018. *Regional Sustainability*, 2(1), 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2021.01.002>
- Hernández-Oria, J. G. (2010). Patrones de diversidad regional en las Cactaceae amenazadas del Desierto Chihuahuense, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 14(1), 35-49.
- Hernández-Roldan, E., Tarango-Arámbula, L.A., Ugalde-Lezama, S., Hernández-Juárez, A., Cortez-Romero, C., Cruz-Miranda, Y., & Morales-Flores, F. J. (2017). Hábitat y densidad de nidos de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr) en una UMA de Zacatecas, México. *AGROProductividad*, 10(5), 10-17
- Hicke, J.A., Asner, G.P., Randerson, J.T., Tucker, C.J., Los, S.O., Birdsey, R., Jenkins, J.C., & Field, C.B. (2002). Trends in North American net primary productivity derived from satellite observations, 1982–1998. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1018-1032. <https://doi.org/10.1029/2001GB001550>

- Hossain, M. D., & Chen, D. (2019). Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 150, 115-134. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009>
- INECC, (2007). *Caracterización ambiental de México*. URL: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/443/cap2.html>
- INEGI, (2016). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.* URL: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Janicki, J., Narula, N., Ziegler, M., Guénard, B., & Economo, E.P. (2016). Visualizing and interacting with large-volume biodiversity data using client-server web-mapping applications: The design and implementation of antmaps. org. *Ecological Informatics*, 32, 185-193.
- Jenness, J. (2006). *Topographic position index (TPI) v. 1.2*. Jenness Enterprises.
- Jensen, J.R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, 608 Pearson Prentice Hall. United States. ISBN: 978-0131889507
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, B.N., & Tucker, C.J. (1985). Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8),1271-1318.
- Keddy, P.A. (2007). *Plants and Vegetation*. Cambridge University Press, Cambridge, 680. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511812989>
- Klotz, J. H. (1986). Effects of substrate slope on nest construction by *Formica pallidefulva* Latreille and *Formica subsericea* Say (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 59(3), 409-414.
- Kozon, I., & Roussel, J. (2013). Impact of habitat shift driven by humans on ants biodiversity and foraging strategies.

- Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., & Richardson, W. (1969). Preprocessing transformations and their effect on multispectral recognition. *Proceedings of the sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor University of Michigan,97-131
- Lang, S. (2008). *Object-based image analysis for remote sensing applications: modeling reality – dealing with complexity*. En: Blaschke, T., Lang, S., & Hay, G.J. (eds) *Object-Based Image Analysis. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 3-27. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_1
- Lara-Juárez, P., Aguirre Rivera, J. R., Castillo Lara, P., Reyes Agüero, J. A. (2015). Biología y aprovechamiento de la hormiga de escamoles, *Liometopum apiculatum* Mayr (*Hymenoptera: Formicidae*). *Acta zoológica mexicana*, 31(2), 251-264.
- Lara-Juárez, P., Castillo-Lara, P., Tristán-Patiño, F. M., Rendón-Huerta, J. A., & Aguirre-Rivera, J. R. (2016). Efectos del sitio y la condición de agostadero en la densidad de hormigueros de escamoles (*Liometopum apiculatum* Mayr). *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22(3), 285-302
- Latumahina, F. (2021). Ants as a climate change bioindicator in Sirimau Forest at Ambon Island. *AIP Conference Proceedings*, 2360 (1). 040005. <https://doi.org/10.1063/5.0059861>
- Lucchese, L., & Mitray, S.K., (2001). *Color image segmentation: A state-of-the-art survey*. In: Indian National Science Academy (INSA-A). Delhi, India,207–221. <https://doi.org/10.1.1.84.4896>.
- Luna-Cavazos, E., Romero-Manzanares, & A., Moya, G. (2007). Distribución geográfica y ecológica de papas silvestres (*Solanum L.*) del altiplano Potosino-Zacatecano, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 13(1), 35-41.
- Maguire D.Y., Buddle C.M., & Bennett E.M. (2016). Within and Among Patch Variability in Patterns of Insect Herbivory Across a Fragmented Forest Landscape. *PLOS ONE* 11(3): e0150843. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150843>

- Martínez-Salvador, M., Valdez-Cepeda, R., Arias, H. R., Beltrán-Morales, L. F., Murillo-Amador, B., Troyo-Diéguez, E., & Ortega-Rubio, A. (2005). Distribution and density of maguey plants in the arid Zacatecas Plateau, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 61(4), 525-534. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.10.002>
- McCune, B., & Keon, D. (2002). Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *Journal of vegetation science*, 13(4), 603-606.
- Mcfeters S. K. (1996) The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7), 1425-1432
- Moran, P. A. (1948). The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 10(2), 243-251.
- Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., & Marshack, A.L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE transactions on geoscience and Remote Sensing*, 33, 481-486. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1995.8746029>
- Narendra, A., & Ramachandra, T.V. (2008). Remote detection and distinction of ants using nest-site specific LISS-derived Normalised Difference Vegetation Index. *Asian Myrmecology*. 2, 51-62
- Navejas-Jiménez, J., Nieto-Garibay, A., Fraga-Palomino, H. C., Rueda-Puente, E. O., & Ávila-Serrano, N. Y. (2011). Comparación de métodos para estimar la evapotranspiración en una zona árida citrícola del noroeste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 147-155.
- Neigh, C.S., Tucker, C.J., & Townshend, J.R. (2008). North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1749-1772. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.018>
- Olmos-Trujillo, E., González-Trinidad, J., Júnez-Ferreira, H., Pacheco-Guerrero, A., Bautista-Capetillo, C., Avila-Sandoval, C., & Galván-Tejada, E. (2020). Spatio-temporal response of vegetation indices to rainfall and temperature in a semiarid region. *Sustainability*, 12(5): 1939. <https://doi.org/10.3390/su12051939>

- Parent, M.B., & Verbyla, D. (2010). The Browning of Alaska's Boreal Forest. *Remote Sensing*, 2(12), 2729-2747. <https://doi.org/10.3390/rs2122729>
- Pearson, K. (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, 2(11), 559-572.
- Pettorelli, N., Gaillard, J.M., Mysterud, A., Duncan, P., Chr. Stenseth, N., Delorme, D., Van Laere, G., Toïgo, C., & Klein, F. (2006). Using a proxy of plant productivity (NDVI) to find key periods for animal performance: the case of roe deer. *Oikos*, 112: 565-572. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2006.14447.x>
- Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jedrzejewska, B., Lima, M., Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. *Climate Research*, 46, 15-27. <https://doi.org/10.3354/cr00936>
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press. ISBN:978-0-19969-316-0.
- Piao, S., Wang, X., Ciais, P., Zhu, B., Wang, T., & Liu, J. (2011). Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global change biology*, 17(10): 3228-3239. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02419.x>
- Radeloff, V. C., Mladenoff, D. J., & Boyce, M. S. (2000). The changing relation of landscape patterns and jack pine budworm populations during an outbreak. *Oikos*, 90(3), 417-430.
- Rafael-Valdez, J., Tarango-Arámbula, L.A., Ugalde-Lezama, S., Lozano-Cavazos, E.A., Ruíz-Vera, V.M., & Bravo-Vinaja, A. (2017). Sustratos forrajeros y de anidación de la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* Mayr, *Himenoptera: Formicidae*) en Villa González Ortega, Zacatecas, México. *Agrociencia*, 51(7), 755-769.
- Rafael-Valdez J., Tarango-Arámbula L.A., Ugalde-Lezama S., Cruz-Labana J.D., Clemente-Sánchez F., & Cadena-Iñiguez J. (2019). Foraging amplitude of the

- escamolera ant (*Liometopum apiculatum* Mayr, Hymenoptera: Formicidae) in a semi-arid area of the Zacatecan highlands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 18(1), 5-19.
- Ramírez, L. (2015). Autocorrelación espacial: analogías y diferencias entre el índice de Moran y el índice Getis y Ord. *V Congreso Nacional de Geografía de Universidades Públicas "Geografías por venir"*, 1483-1495.
- Reynolds-Hogland, M.J., & Mitchell, M.S. (2007). Effects of roads on habitat quality for bears in the southern Appalachian: a long-term study. *Journal of Mammalogy*. 88 (4), 1050–1061. <https://doi.org/10.1644/06-MAMM-A-072R1.1>
- Rikimaru, A., & Miyatake, S. (1997). Development of Forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model using Indices of Vegetation, Bare soil and Shadow. *Proceedings of the 18th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) 1997*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Robinson, E. J. H., Holcombe, M., & Ratnieks, F. L. W. (2008). The organization of soil disposal by ants. *Animal Behaviour*, 75(4), 1389-1399. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2007.09.013>
- Rouibah, K., & Belabbas, M. (2020). Applying Multi-Index approach from Sentinel-2 Imagery to Extract Urban Area in dry season (Semi-Arid Land in North East Algeria). *Revista de Teledetección*, (56), 89-101.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Sehell, J.A., & Harlan J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep. RSC 1978-4, Texas A&M University Remote Sensing Center., College Station, Texas.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*, 1ra. Edición, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México
- Sandoval, S., Escobar-Flores J.G., & Hernández-Ramírez C.I. (2020). Análisis topográfico y climático de un bosque de pino detectado en una isla de montaña en

- Baja California. *Innovaciones Tecnológicas y Metodológicas en el Análisis Geoespacial*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 85-99.
- Sappington, J. M., Longshore, K. M., & Thompson, D. B. (2007). Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using bighorn sheep in the Mojave Desert. *The Journal of wildlife management*, 71(5), 1419-1426.
- Shapley, H. (1920). Thermokinetics of *Liometopum apiculatum* Mayr. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 6, 204-211.
- Stilley, J.A., & Gabler, C.A. (2021). Effects of Patch Size, Fragmentation, and Invasive Species on Plant and Lepidoptera Communities in Southern Texas. *Insects*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/insects12090777>
- Tarango-Arámbula L.A. (2012). Los escamoles y su producción en el altiplano potosino-zacatecano, *RESPYN: Revista Salud Publica y Nutrición*, 4, 139-144.
- Tarango-Arámbula, L.A., & Méndez-Gallegos, S.D.J., (2018). Insectos comestibles en el centro-norte de México. *El pasado del futuro alimentario: los alimentos ancestrales americanos*. 1: 358-380. Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora. Ciudad de México.
- Tiedemann, J.L., & Zerda, H.R. (2008). Relación temporal NDVI - Precipitación del bosque y pastizal natural de Santiago del Estero, Argentina = Temporary NDVI - Precipitation relation of natural forest and grassland in Santiago del Estero, Argentina. *Ciencia e Investigación Forestal*. 14 (3), 497-507. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2008.304>.
- Triana, S. P., Rousseau, G. X., Da Piedad, A. R., Celentano, D., Zelarayán, M. L. C., & Braun, H. (2015). La macrofauna del suelo como indicadora de degradación de bosques ribereños en la amazonia oriental brasilera. *Revista de la Facultad de Agronomía*, UANLP, Argentina, 114(1), 49-60.
- Uuemaa, E., Antrop, M., Roosaare, J., Marja, R., & Mander, Ü. (2009). Landscape metrics and indices: an overview of their use in landscape research. *Living reviews in landscape research*, 3(1), 1-28.

- Vila-Subirós, J., Varga, D., Llausàs I Pascual, A., & Ribas-Palom, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 2006, 48, 151-166.
- Wang, J., Rich, P.M, & Price, K.P. (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International journal of remote sensing*, 24(11), 2345-2364. <https://doi.org/10.1080/01431160210154812>
- Wang, J., Rich, P.M., & Price, K.P. (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International journal of remote sensing*, 24(11), 2345-2364. <https://doi.org/10.1080/01431160210154812>
- Wiens, J. A. (1976). Population responses to patchy environments. *Annual review of ecology and systematics*, 7(1), 81-120. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.07.110176.000501>
- Wu, C., Chen, J.M., & Huang, N. (2011). Predicting gross primary production from the enhanced vegetation index and photosynthetically active radiation: Evaluation and calibration. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3424-3435. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.006>
- Wu, Z., Dijkstra, P., Koch, G.W., Penuelas, J., & Hungate, B.A. (2011). Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 17, 927 – 942.