



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE MUÉRDAGO ENANO
(*Arceuthobium globosum*) EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA
MARIPOSA MONARCA EN EL ESTADO DE MÉXICO

ARTÍCULO
QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN FLORICULTURA

PRESENTA:

NANCY MARTÍNEZ MARTÍNEZ

(No. de cuenta: 1122080)

(Generación 39)

MODALIDAD: ARTÍCULO

ASESORES:

DR. JOSÉ FRANCISCO RAMÍREZ DÁVILA

M. en C. FIDEL LARA VÁZQUEZ

CAMPUS UNIVERSITARIO "EL CERRILLO", EL CERRILLO
PIEDRAS BLANCAS, MUNICIPIO DE TOLUCA, MÉXICO.

FEBRERO DE 2019



ÍNDICE

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos.....	II
Índice.....	IV
Lista de cuadros.....	V
Lista de figuras.....	VI
Resumen.....	1
Introducción.....	2
Métodos.....	3
Análisis espacial por Índices de distancia SADIE.....	4
Análisis geoestadístico.....	5
Estimación de parámetros del modelo de semivariograma.....	5
Validación del modelo teórico.....	5
Nivel de dependencia espacial.....	6
Elaboración de mapas.....	6
Resultados.....	7
Discusión	12
Conclusiones.....	17
Referencias.....	17

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Valores de los índices I_a y J_a y sus posibilidades P_a y Q_a en la población de <i>A. globosum</i>	7
2	Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de <i>A. globosum</i>	8
3	Valores de los estadísticos de la validación cruzada de los semivariogramas obtenidos en los muestreos de <i>A. globosum</i> : media de los errores de estimación (MEE), error cuadrático medio (ECM), error cuadrático media adimensional (ECMA).....	9

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Semivariogramas de la distribución espacial de <i>A. globosum</i> en el Santuario Piedra Herrada.....	10
2	Mapas de densidad de las poblaciones de <i>A. globosum</i> en el Santuario Piedra Herrada.....	11

Distribución Espacial de Muérdago Enano (*Arceuthobium globosum*) en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en el Estado de México.

Nancy Martínez-Martínez^a, José Francisco Ramírez-Dávila^{b*}, Fidel Lara-Vazquez^{a,c},

^a Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Cerrillo Piedras Blancas. Toluca, México.

*Autor para correspondencia: ^b Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, México, tel.: 7221952195, jframirez@uaemex.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas. Toluca, México.

RESUMEN

La migración de la mariposa monarca constituye el fenómeno más importante en México, sin embargo la pérdida de los parajes boscosos se ve afectada por diversos factores entre ellos la presencia de muérdago enano, ha hecho que las poblaciones de monarca se vean diezmadas, siendo una clara señal de alarma para establecer estrategias de conservación encaminadas a revertir esta situación. El muérdago enano planta parásita de gran impacto ecológico, ocasiona un debilitamiento general del huésped, habiendo una predisposición al ataque de insectos y enfermedades. El objetivo del presente trabajo fue determinar la distribución espacial de las poblaciones de muérdago enano (*Arceuthobium globosum*) en *Pinus pseudostrobus*, mediante el uso de técnicas de estadística espacial (SADIE y Geoestadística), en 12 parcelas de cuatro hectáreas, en el Santuario Piedra Herrada. Los resultados mostraron que las poblaciones de *A. globosum* presenta una distribución agregada y se ajustan a modelos esféricos y gaussianos. Adicional a ello, se pudo determinar la superficie infestada por *A. globosum*. En ningún caso la infestación provocada por esta parásita alcanzo el 100 % debido a que no presento una infestación uniforme dentro de las parcelas, lo que permitirá dirigir certeramente las

medidas de control en las áreas con mayor infestación a través de los mapas de densidad. De esta manera permitirá llevar a cabo un programa de manejo dirigido hacia los focos específicos de infestación, con ello se busca contribuir a la protección y conservación de la riqueza forestal del Santuario Piedra Herrada.

Palabras clave: Geoestadística, haustorios, infestación, krigeado, SADIE.

INTRODUCCIÓN

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca se ubica en los Estados de Michoacán y México; el área la constituye una superficie total de 56. 259 hectáreas. El bosque predominante es de clima templado con especies como: oyamel y pino. La reserva es una zona prioritaria para la conservación, pues en ella se presenta el fenómeno natural de la migración de la mariposa monarca, quien viaja desde Canadá, pasando por Estados Unidos, para llegar a México (Galindo y Rendón 2005). Las especies del género *Arceuthobium* son conocidas comúnmente como muérdago enano: sus principales hospederos pertenecen a las familias Pinaceae y Cupressaceae. Dentro de la Reserva se encuentra presente el muérdago enano (*Arceuthobium globosum* Hawksw & Wiens) plantas hemiparásitas con un gran impacto ecológico y económico en especies del género *Pinus*. Los muérdagos enanos se distribuyen desde los 1 475 a 3 990 msnm., constituyendo una de las causas más importantes en la pérdida de cobertura forestal, después de los incendios forestales y de insectos descortezadores (Mathiasen *et al.* 2008).

El ciclo de vida del muérdago enano se divide en cuatro fases: dispersión, establecimiento, incubación y reproducción, estas plantas florecen cuando tienen de cuatro a seis años y los frutos maduran de 5 a 16 meses, liberan sus semillas hacia una distancia aproximada de 20 metros, las semillas están cubiertas por una sustancia pegajosa llamada viscina que hace posible que se adhiera a cualquier superficie de contacto. Son plantas de 17 a 35 cm de altura, forman agrupaciones globosas con los tallos de color amarillo claro o amarillo-verdosos. La floración ocurre de junio a mayo y la dispersión de la semilla de junio a octubre del siguiente año. Sus hospedantes principales son: *Pinus michoacana* Mart, *Pinus montezumae* Lamb, *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham, *Pinus hartwegii* Lindl, *Pinus pseudostrobus* Lindl, *Pinus douglasiana* Martínez y *Pinus rudis* Endl (Hawksworth *et al.* 2002).

Las especies del género *Arceuthobium* dependen completamente de su huésped para satisfacer sus demandas de soporte físico, carbohidratos, agua y sales minerales, a través de sus haustorios (raíces modificadas). Los síntomas que muestra el hospedero están relacionados con cambios en la forma, reducción de la altura del fuste, volumen con alteración en la calidad de madera, disminución de la producción de conos, cantidad y calidad de las semillas, y sensibilización al ataque de otras plagas y enfermedades, en infestaciones muy severas provocan la muerte del huésped. Todos estos síntomas, a su vez, se ven afectados por la edad del hospedero, la competencia, la calidad del sitio y el clima (Leimu, 2010; Varo *et al.* 2016).

Por lo anterior es necesario saber cómo se distribuye el muérdago enano en la superficie de estudio, a través de mapas de distribución espacial, con los cuales se pueden generar programas de manejo, debido a que constituyen una herramienta útil para dirigir las medidas de control hacia zonas donde existe mayor porcentaje de infestación y con ello optimizar recursos económicos y una reducción en el impacto ambiental por el uso de agroquímicos, además permite realizar acciones de tipo preventivo con las cuales se puede tener niveles de infestaciones bajas.

El conocimiento de la distribución espacial de las poblaciones de muérdago enano (*Arceuthobium globosum*) es obligado para la elaboración de programas de manejo integrado, debido a la importancia ecológica que tiene esta parásita, por ello el objetivo del presente trabajo fue determinar la distribución espacial de muérdago enano (*Arceuthobium globosum*) en *Pinus pseudostrobus*, en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en el Estado de México en el Santuario de Piedra Herrada, mediante el uso de técnicas de SADIE y Geoestadística, con la visualización en mapas, para establecer los grados de infestación que requieran un control inmediato, así como detectar zonas que no presenten.

MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en el Estado de México, en el Santuario Piedra Herrada, el cual se encuentra ubicado a 25 km de Valle de Bravo, situado en las faldas del Nevado de Toluca, ubicado entre las coordenadas geográficas: **Latitud 19°11'18"N Longitud 99°57'32.1"W. Es un Bosque** con árboles forestales de las especies de oyamel y pino, así como una gran cantidad de vegetación de especies de flora y fauna endémicas de la región.

El paisaje está constituido por imponentes montes de más de 3000 msnm. El sitio de muestreo presenta un clima Cm (W), templado húmedo con abundantes lluvias en verano.

Para lograr los objetivos, en la zona de estudio se establecieron 12 parcelas de cuatro hectáreas cada una, con un rango altitudinal de 2800 a 3200 msnm, en dichas parcelas se encontraron árboles forestales de las especies de: *P. pseudostrobus*, *P. montezumae* y *P. leiophylla*, sin embargo para realizar el presente trabajo sólo se muestrearon árboles forestales de la especie *P. pseudostrobus*, que tuvieran la presencia de muérdago enano (*Arceuthobium globosum* Hawksw & Wiens).

En cada parcela se estableció una malla rectangular dividida en cuadrantes, cada cuadrante de 30x30 metros, cubriendo cuatro hectáreas, considerando 20 cuadrantes tomados al azar y de cada uno se consideraron seis árboles tomados en forma arbitraria para un total de 120 árboles, en donde se cuantifico el número de muérdago presentes en cada árbol, cada unidad de muestreo fue georeferenciado utilizando un DGPS (Modelo SPS 351. Trimble) y fue debidamente etiquetado para obtener su ubicación espacial (Ramírez y Porcayo, 2010). Debido a la altura que se encuentra *A. globosum* el conteo e identificación se hizo con el uso de binoculares (Modelo Vanta). El período de los muestreos se distribuyó entre agosto y diciembre de 2016 para las primeras cinco parcelas, y de enero a julio de 2017 las siete parcelas restantes, cada muestreo solo se llevó a cabo por una única vez. Se realizó una exploración estadística de los datos originales de las poblaciones de *A. globosum* para cada muestreo.

Estadística espacial (SADIE). Es una técnica desarrollada por Joe Perry y colaboradores en la estación experimental de Rothamsted (Harpen, Reino Unido) es una herramienta fundamental para explorar, si una variable sigue un patrón espacial determinado, ya sea homogéneo, heterogéneo o aleatorio y se basa en la utilización de índices de distancia. SADIE lleva a cabo una prueba de permutaciones donde los valores de las variables son distribuidos al azar en el espacio (Ramírez y Porcayo, 2009).

Perry (1995) desarrollo y extendió el uso del índice de la distancia para la regularidad (I_a) para el establecimiento de la estructura espacial de las poblaciones de insectos. Además, introdujo dos diagramas de diagnóstico como ayuda a la interpretación y un índice nuevo para estimar el número de focos de agrupamiento de una población, el índice J_a . Además, señaló que la escala de muestreo es un determinante importante del patrón espacial total.

Para la detección de agregados en el área de estudio se utiliza el índice de agregación (I_a): es una medida del patrón espacial general en un grupo de datos en un área de estudio determinada. Cuando $I_a > 1$ el patrón espacial es agregado, $I_a = 1$ el patrón espacial es aleatorio y si $I_a < 1$ el patrón

espacial es regular. Como en el caso del índice I_a , valores de $J_a > 1$ usualmente indican una muestra agregada, $J_a = 1$ representa datos especialmente aleatorios y $J_a < 1$ muestras regulares. De esta manera, los valores del índice J_a sirven para corroborar los resultados obtenidos con el índice I_a (Ramírez y Porcayo, 2009).

Análisis geoestadístico. Se obtuvo el semivariograma experimental a partir del valor promedio de *A. globosum* en cada muestreo utilizando el programa variowin 2.2 (Software for spatial data analysis en 2D. Springer verla, New York USA). El valor experimental del semivariograma fue calculado con la siguiente expresión (Isaaks y Srivastava, 1989):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad [1]$$

Donde,

$\gamma^*(h)$ = Es el valor experimental del semivariograma para el intervalo de distancia h .

$n(h)$ = Es el número de pares de puntos muestrales separados en el intervalo de distancia.

$z(x_i)$ = Es el valor de la variable de interés en el punto muestral x_i .

$z(x_i+h)$ = Es el valor de la variable de interés en el punto muestra x_i+h .

Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma. Una vez obtenido el semivariograma experimental, se realiza su ajuste a algún semivariograma teórico (esférico, gaussiano, etc.) (Englund y Sparks, 1988), para ajustar los semivariogramas experimentales a los semivariogramas teóricos en cada parcela se utilizó el programa Variowin versión 2.2 de Variowin (Software for spatial data analysis in 2D. Spring Verlag, New York. USA).

Validación del modelo teórico. Una vez que los semivariogramas experimentales fueron ajustados a alguno de los modelos teóricos, la validación de dichos modelos se realizó con el procedimiento denominado validación cruzada (Hevesi *et al.* 1992). Los parámetros del modelo a validar C_0 (efecto pepita), $C+C_0$ (meseta) y a (rango o alcance) se fueron ajustando de forma interactiva (prueba y error)

hasta la obtención de estadísticos de validación cruzada adecuados. Una vez determinado el parámetro del modelo se valida a través de cuatro parámetros estadísticos de validación cruzada (Samper y Carrera, 1996). Estos estadísticos son:

- Media de los errores de estimación (MEE): La MEE no debe ser significativamente distinta de 0 (prueba de t), en cuyo caso, indicaría que el modelo de semivariograma permite el cálculo de estimadores no sesgados.
- Error cuadrático medio (ECM): Un modelo de semivariograma se considera adecuado si, como regla práctica, el valor del estadístico es cercano a cero (Hevesi *et al.* 1992).
- Error cuadrático medio adimensional (ECMA): La validez del modelo se satisface si ECMA está comprendido entre los valores $1 \pm 2 (2/N) 0,5$ (Ramírez y Porcayo, 2009).
- Otro estadístico adicional que consiste en que el valor de la varianza de los errores sea menor a la varianza muestral.

Nivel de dependencia espacial. Se calculó con el fin de determinar el grado de relación entre los datos de muestreo. El valor se obtiene al dividir el efecto pepita entre la meseta y expresando en porcentaje su resultado. Si el resultado es menor de 25 % el nivel de dependencia espacial es alta, si se encuentra entre 26 y 75 % el nivel de dependencia espacial es moderada y si es mayor al 76 % el nivel de dependencia es bajo (Ramírez y Porcayo, 2009).

Elaboración de mapas. Una vez que los modelos de los semivariogramas correspondientes fueron validados se utilizó el método geoestadístico denominado krigado ordinario para la elaboración de mapas de densidad de las poblaciones de *A. globosum*. Se utilizó el krigado para obtener la estimación de la densidad de esta parásita en puntos donde no se contabilizó la presencia de dicha planta y así mismo obtener las estimaciones correspondientes. Cada estimación obtenida fue representada en forma de mapa mediante el uso del programa Surfer 9 (Surface-Mapping System, Golden Software inc. 809, 4 th Street. Golden, Colorado 80401-1866.USA).

El cálculo de la superficie infestada se realizó con base en mapas de densidad después de validar los semivariogramas obtenidos mediante el krigado ordinario, debido a que se conocía la media y la varianza, se determinó el porcentaje de infestación establecido por *A. globosum* en cada una de las parcelas experimentales (Ramírez y Porcayo, 2009).

RESULTADOS

Análisis espacial por índices de distancia (SADIE). Los datos obtenidos con la aplicación de los índices de distancia (SADIE) permitieron conocer el índice I_a ; el valor más alto se registró en la parcela ocho, que fue de 1,72 y el más bajo en la parcela dos, con un valor de 1,35. En todos los casos el índice I_a fue significativamente superior a uno (Cuadro 1), lo cual define una distribución agregada de *A. globosum* en las parcelas de estudio. En lo referente al índice J_a el valor mayor se dio en la parcela nueve, que fue de 1,24 y el más bajo en la parcela dos, que fue de 1,07. El índice J_a en todas las parcelas también fue superior a uno, confirmando la agregación, esto permite determinar que la distribución espacial de las poblaciones de *A. globosum* se concentró en diferentes centros de agregación en las 12 parcelas de estudio.

La distribución que guarda *A. globosum* en las parcelas en las diferentes fechas de muestreo, se puede apreciar en los mapas generados, ya que en estos se observan varios y diferentes focos de agregación (Figura 2), lo que corrobora lo establecido por los índices de distancia SADIE, respecto a que se encuentra en una distribución agregada (I_a) y en diferentes centros de agregación (J_a).

Cuadro 1. Valores de los índices I_a y J_a y sus posibilidades P_a y Q_a en la población de *A. globosum*.

Parcela	I_a	P_a	J_a	Q_a
1	1,46	0,009 ^s	1,10	0,175 ^{ns}
2	1,35	0,011 ^s	1,07	0,133 ^{ns}
3	1,70	0,005 ^s	1,13	0,178 ^{ns}
4	1,48	0,003 ^s	1,20	0,195 ^{ns}
5	1,51	0,013 ^s	1,19	0,156 ^{ns}
6	1,67	0,012 ^s	1,09	0,129 ^{ns}
7	1,49	0,010 ^s	1,11	0,167 ^{ns}
8	1,72	0,005 ^s	1,23	0,231 ^{ns}
9	1,60	0,016 ^s	1,24	0,249 ^{ns}
10	1,57	0,011 ^s	1,12	0,170 ^{ns}
11	1,52	0,004 ^s	1,08	0,211 ^{ns}
12	1,61	0,008 ^s	1,14	0,207 ^{ns}

ns: no significativo al 5 %, s: significativo al 5%

Con la ayuda de la geoestadística y los datos obtenidos de los muestreos, fue posible la modelación espacial y el mapeo de las poblaciones de *A. globosum* y su representación mediante

mapas, así mismo se estableció el porcentaje de infestación en cada una de las parcelas de estudio, se construyeron semivariogramas (Figura 1) y con posterioridad, se ajustaron a modelos teóricos, en donde dos de las doce parcelas (1 y 9) se ajustaron al modelo gaussiano y el resto se ajustaron al modelo esférico (Cuadro 2). En todas las parcelas muestreadas el efecto pepita fue igual a cero, dicho valor es indicativo de que la escala de muestreo utilizada en el presente trabajo fue la adecuada y el error de muestreo fue mínimo (Cuadro 2).

En todos los modelos se presentó un alto nivel de dependencia espacial para cada una de las fechas de muestreo (Cuadro 2). Los valores de rango se ubicaron entre siete y 20,8 metros correspondientes a la parcela cinco y once respectivamente, siendo el rango la distancia máxima hasta la cual existe relación espacial entre los datos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de *A. globosum*.

P	Modelo	Varianza	Pepita	Rango	Meseta	Pepita/ meseta (%)	D.E.	S.I. (%)	S.N.I. (%)
1	Gaussiano	0,02	0	8,97	0,026	0	Alta	56	44
2	Esférico	0,07	0	9,66	0,025	0	Alta	80	20
3	Esférico	7,04	0	7,7	6,74	0	Alta	78	22
4	Esférico	16,96	0	9,8	14,79	0	Alta	81	19
5	Esférico	0,79	0	7	0,61	0	Alta	55	45
6	Esférico	2002,12	0	17,59	131,2	0	Alta	85	15
7	Esférico	1995,22	0	12,8	120	0	Alta	92	8
8	Esférico	671,71	0	17,6	129,6	0	Alta	98	2
9	Gaussiano	363,62	0	12	307,1	0	Alta	86	14
10	Esférico	28,87	0	16	69,75	0	Alta	74	26
11	Esférico	144,67	0	20,8	13,05	0	Alta	87	13
12	Esférico	1005,38	0	18,4	17,43	0	Alta	47	53

P= Parcela, D.E.= Dependencia Espacial, S.I.= Superficie infestada, S.N.I.= Superficie no infestada

Los parámetros estadísticos de validación cruzada (Cuadro 3), permitieron validar los valores de los modelos ajustados, al hallarse dentro de los rangos de aceptación matemática, es decir; el ajuste del modelo es adecuado encontrándose dentro del rango permisible. Los mapas elaborados con el método del krigado ordinario (Figura 2) en ellos se pueden distinguir los diferentes focos de

agregación de las poblaciones de *A. globosum* en las parcelas estudiadas, donde el color rojo indica la mayor cantidad de muérdagos contabilizados en cada caso; por lo contrario el color blanco indica la ausencia de dicha planta parásita en la parcela. Para el caso de la parcela uno hay diferentes focos de agregación mostrando que *A. globosum* se ubicaron en centros de agregación, es decir, su distribución se localiza en puntos específicos en diferentes lugares de la parcela, los centros de agregación se ubican en la parte inferior derecha en relación a la parte superior los focos de agregación se encuentran distribuidos en la parte central (Figura 2).

La superficie infestada por *A. globosum* en todas la parcelas no alcanzo el 100 %, no obstante en todos los muestreos hubo superficie infestada en menor o en mayor porcentaje; la superficie menos infestada se presentó en la parcela 12 con 47 %, mientras que la parcela que tuvo mayor porcentaje de infestación fue la ocho con un 98 % (Cuadro 2).

Cuadro 3. Valores de los estadísticos de la validación cruzada de los semivariogramas obtenidos en los muestreos de *A. globosum*: media de los errores de estimación (MEE), error cuadrático medio (ECM), error cuadrático media adimensional (ECMA).

Parcelas	Tamaño muestra	Media muestral	Varianza muestral	MEE	Varianza de los errores	ECM	ECMA
1	121	0,09	0,02	0,07 ^{ns}	0,01	0,11	1.13
2	121	0,08	0,07	0,11 ^{ns}	0,05	0,13	1.09
3	121	2,14	7,04	0,10 ^{ns}	3,92	0,09	1.1
4	121	5,53	16,96	0,14 ^{ns}	10,32	0,1	1.07
5	121	0,69	0,79	0,08 ^{ns}	0,51	0,12	1.11
6	121	119,78	2.002,12	0,11 ^{ns}	1.951,34	0,11	1.09
7	121	340,93	1.995,22	0,13 ^{ns}	12.628,1	0,06	1.12
8	121	122,41	671,71	0,10 ^{ns}	439,02	0,14	1.1
9	121	41,09	363,62	0,12 ^{ns}	317,18	0,1	1.14
10	121	8,44	28,87	0,06 ^{ns}	22,95	0,08	1.13
11	121	22,33	144,67	0,09 ^{ns}	128,65	0,12	1.07
12	121	231,91	20,38	0,010 ^{ns}	16,72	0,11	1.08

ns: diferencia no significativa al 5 %

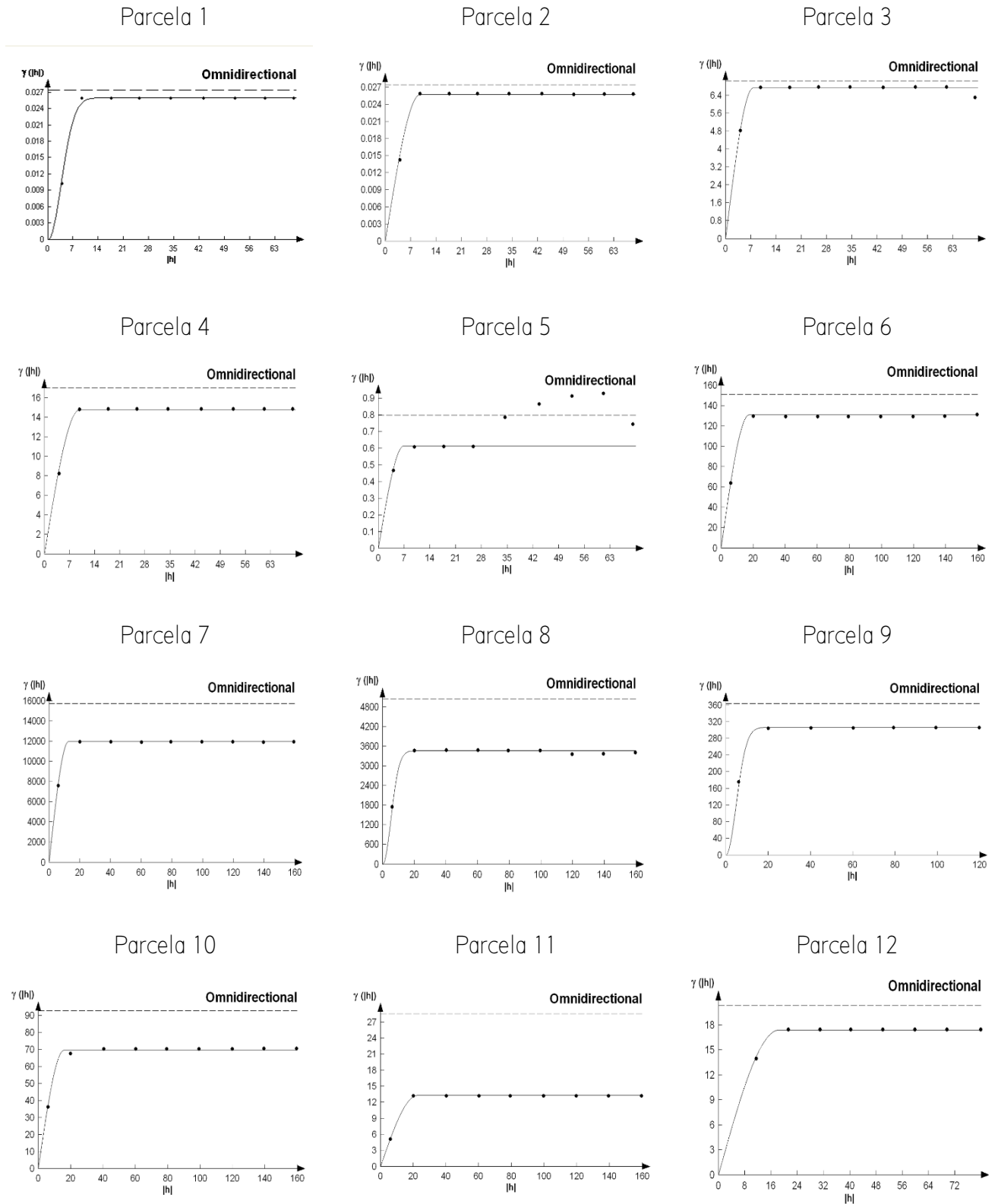


Figura 1. Semivariogramas de la distribución espacial de *A. globosum* en el Santuario Piedra Herrada.

Distribución espacial de muérdago enano (*Arceuthobium globosum*)

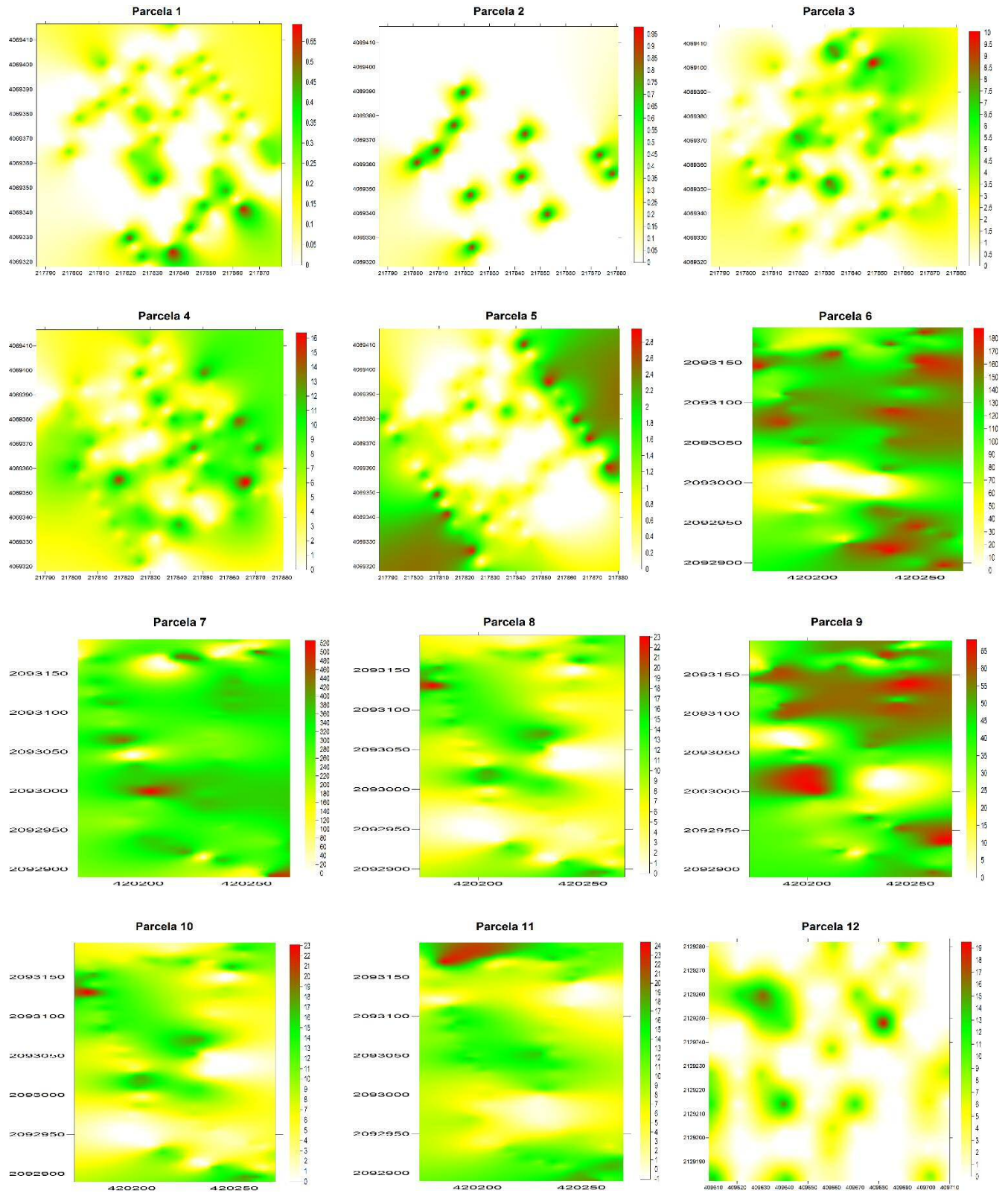


Figura 2. Mapas de densidad de las poblaciones de *A. globosum* en el Santuario Piedra Herrada.

DISCUSIÓN

El estudio del presente trabajo se llevó a cabo con el propósito de que la información generada permita la intervención oportuna y la generación de un programa de manejo para evitar la degradación o destrucción del hábitat de la mariposa monarca, ante la amenaza de la expansión de *A. globosum* en el Santuario Piedra Herrada.

Con los resultados obtenidos mediante el análisis espacial por índices de distancia (SADIE), se permitió distinguir el patrón espacial de tipo agregado que se guarda en las parcelas, por lo que los índices I_a y J_a corroboran la distribución espacial de las poblaciones de *A. globosum*. El índice I_a determinó una distribución agregada y el índice J_a indica que estos se encuentran en diferentes centros de agregación. La cantidad de centros de agregación encontradas en las parcelas, se pueden observar en los mapas (Figura 2), por consiguiente al conocer la distribución espacial de *A. globosum* dentro de las parcelas, permite focalizar las estrategias de manejo adecuado hacia puntos específicos de infestación.

Los índices de distancia SADIE se han utilizado con éxito en otros estudios para establecer la distribución espacial de organismos biológicos. De manera que Ramírez y Porcayo (2009), realizaron estudios de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en el Nevado de Toluca, México, utilizando el método de índice de distancias SADIE, de lo cual dentro de sus principales conclusiones indican que con esta metodología permite determinar el comportamiento espacial de las poblaciones de muérdago enano. De igual forma en el presente trabajo se puede indicar que los índices de distancia SADIE permiten determinar el comportamiento espacial, resultado que se corrobora con ayuda de la geoestadística.

Solís y Suzán (2014) en su estudio sobre el análisis de la distribución espacial de muérdago (*Phoradendron californicum* Nutt) en el sur del Desierto Sonorense, mencionan que los índices de agregación obtenidos por SADIE, se realizaron por medio de diferentes tamaños de cuadrantes, de lo cual los resultados varían, es decir a mayor tamaño o área los índices incrementa y se observa un patrón agregado más fuerte, es probable que la diferencia en el tamaño de las áreas de muestreo no permita ver la agregación en los sitios más pequeños, esto impide encontrar agregación en las poblaciones, por lo anterior habría que determinar si el tamaño de los cuadrantes en realidad juega un papel importante para determinar el nivel de agregación de *A. globosum*, esta metodología no se llevó a cabo en este estudio, sin embargo sería muy interesante analizar los resultados en estudios posteriores.

Para determinar el tipo de distribución espacial de las poblaciones de organismos biológicos existen dos métodos: estadística clásica (Índice de dispersión, Índice de Green, Poisson y Binomial negativa) y estadística espacial (Geoestadística y SADIE), donde Jiménez *et al.* (2008) a través de la estadística clásica realizó el estudio sobre la distribución y mapeo de *Curculio elephas* Gyllenhal en encina (*Quercus ilex* L.), de lo cual obtuvo una distribución agregada del ente biológico estudiado, sin embargo con esta metodología no se puede precisar cómo se encuentra distribuida dentro de las parcelas de estudio, ya que los datos que se tomaron no consideraron su localización georeferenciada dentro de la parcela.

Por otra parte Ramírez y Figueroa, (2013) realizaron estudios sobre modelización y mapeo de la distribución espacial de *Bactericera cockerelli* Sulc (Hemíptera: Triozidae) en la papa en el Estado de México, utilizando estadística clásica y espacial (Geoestadística), de lo cual determinaron que la estadística clásica es inconsistente para determinar la ubicación física que guarda dentro de la parcela la agregación del insecto, por otra parte el uso de la estadística espacial es más adecuada, ya que a través de mapas se puede visualizar la distribución espacial de las poblaciones. Por lo anterior en el presente trabajo el uso de técnicas geoestadísticas permitió determinar la distribución espacial de *A. globosum* bajo una estructura agregada en las 12 parcelas.

Los semivariogramas teóricos que se obtuvieron solo fueron de dos tipos (esférico y gaussiano), dichos modelos ajustados tienen un 98 % de fiabilidad lo anterior da pie a deducir que más del 90 % de la variación total es debida a la dependencia espacial encontrada en la escala de muestreo utilizada, dicho de otra manera, más del 90 % de la variación de la distribución de las poblaciones de *A. globosum* se logró explicar por la estructura espacial establecida con los semivariogramas, además, las funciones estadísticas permitieron validar los modelos del tipo esférico y gaussiano en las parcelas experimentales (Maldonado *et al.* 2016).

El modelo gaussiano en las parcelas uno y nueve es indicativo de que el comportamiento de agregación de *A. globosum*, se da de forma continua dentro de las parcelas, ya que la infestación de esta planta, con respecto a su avance es entre los árboles vecinos de *P. pseudostrabus*, resultados similares fueron obtenidos por Sánchez *et al.* (2015) los autores trabajaron sobre el patrón espacial del carbón de la espiga de maíz en diferentes localidades del Estado de México, en donde concluye que los semivariogramas que se ajustaron a los modelos gaussianos, indican que los focos de la enfermedad se expresaron en una expansión continua respecto a los puntos muestreado, permitiendo inferir la existencia de diversos factores ambientales que le favorecen, por otra parte Contreras *et al.* (2017), en su estudio del comportamiento espacial de Zebra chip y *Bactericera cockerelli*

(Sulc)(Hemiptera: Triozidae) en *Solanum tuberosum* L. en Valles Altos de México, indica que los semivariogramas que se ajustaron al modelo Gaussiano, nos expresa que el comportamiento espacial se da de forma continua dentro de la parcela avanzando entre plantas vecinas.

El modelo esférico, se presentó en 10 de las 12 parcelas experimentales, lo que nos indica, que las poblaciones de *A. globosum* se presentan en mayor cantidad en ciertas zonas de la parcela respecto al resto de puntos considerados en el muestreo, es decir, los centros de agregación son aleatorios, estando dentro de la zona de infestación de la parcela, posiblemente causada por el tipo de diseminación, ocasionado por la exposición del sol o los vientos predominantes, lo que coincide con los resultados realizados por Nafarrate *et al.* (2018) en su trabajo de modelización y mapeo estacional del índice de área foliar en un bosque tropical seco usando imágenes de satélite de alta resolución, así mismo Ramírez y Figueroa (2013) en modelización y mapeo de la distribución espacial de *Bactericera cockerelli* Sulc (Hemiptera: Triozidae) en papa en el Estado de México.

El nivel de dependencia espacial fue alta en las parcelas muestreadas, valor que se obtuvo al dividir el efecto pepita entre el valor de la meseta del semivariograma, así mismo los valores de efecto pepita indicaron una alta dependencia espacial y un nivel de agregación alto, dichos resultados concuerdan con lo obtenido por Ramírez y Porcayo (2010) en su estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera Norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México, por otra parte Arce *et al.* (2016) determinó un nivel alto de agregación en estudios realizados sobre factores bióticos asociados a la distribución espacial de *Psittacanthus calyculatus* (DC.) G. Don en un bosque tropical caducifolio del centro de México. Esto permite suponer la existencia de condiciones medio ambientales que favorecen el desarrollo y diseminación de esta planta parásita, sin embargo Queijeiro y Cano (2015), menciona que aparte de los factores ambientales se debe de tomar en cuenta los disturbios antropogénicos, ya que estos favorecen a una mayor incidencia y rebrotes severos posteriores.

La determinación de áreas libres de muérdago en las parcelas se determinó mediante la realización de mapas a partir del krigeado ordinario, mismos que ayudaron a determinar el porcentaje de infestación en la zona, estos resultados concuerda con lo reportado por Ramírez *et al.* (2011) en el estudio sobre Estabilidad Espacio Temporal de la Distribución del Carbón de la Espiga del Maíz (*Sporisorium reilianum*) en el Estado de México, y Arce *et al.* (2016) quienes obtuvieron los mismos resultados en su estudio sobre factores bióticos asociados a la distribución espacial de muérdago *Psittacanthus calyculatus* (DC.) G. Don en un bosque tropical caducifolio de México. En ninguno de los casos la infestación alcanzo el 100 % del área de estudio lo que permite dirigir de forma precisa

sobre las zonas específicas las diferentes medidas de control, generando beneficios económicos y ambientales al aplicar de forma dirigida los herbicidas o los controles mecánicos.

En el presente estudio se encontró una distribución agregada dentro de las parcelas, donde se encontraron infestaciones altas a menor altitud y pendiente, debido a que la altitud y la pendiente van muy ligados con la incidencia y en particular con el terreno donde se establece. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Varo (2016) en la caracterización de infestación por muérdago enano (*Arceuthobium globosum* Hawksw & Wiens subsp. *grandicaule*) en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cara sur del pico de Orizaba, quien encontró que a menor altitud junto con una menor pendiente, mayor es la infestación, así mismo Queijeiro y Cano (2015) en su estudio de la dinámica temporal de la infestación por muérdago enano (*Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum* Willd) en Zoquiapan (Parque Nacional Iztaccihuatl Popocatépetl), quienes encontraron que la infestación es altamente variable entre fechas, especies y sitios, esto debido a que su incidencia se puede ver afectada por sucesos naturales (incendios) o antropogénicos (apertura de nuevos caminos y tala de árboles), no obstante Roxburgh y Nicolson, (2005) menciona que los patrones de distribución de los muérdagos son afectados tanto por la disponibilidad de hospederos adecuados como por el comportamiento de los dispersores.

Existen alternativas en las que se tiene mayor conocimiento y que pueden proveer de métodos efectivos para reducir el impacto de las plantas parásitas. Los métodos de control más empleados incluyen el cultural, biológico, químico y manejo silvicultural. En cuanto a control biológico Rietman *et al.* (2005) evaluaron la eficiencia del hongo nativo *Neonectria neomacrospora* como un agente de control biológico para *Arceuthobium tsugense* (Rosendahl) G. N Jones, por otra parte Alvarado *et al.* (2010), identificaron organismos asociados a síntomas de necrosis y defoliación en follaje, frutos, brotes en dos especies de muérdagos verdaderos, así mismo Arriola *et al.* (2012), analizaron la presencia de dos especies de insectos que inducen daño sobre el muérdago, Vázquez y Madrigal (2005) utilizaron varias dosis de etephon en el control de *Arceuthobium globosum* Hawksw & Wiens; Coria *et al.* (2010) evaluó el impacto de tierra de diatomeas sobre *Arceuthobium globosum* Hawksw & Wiens subsp. *grandicaule* en *Pinus pseudostrubus* Lindl, por último Bobadilla *et al.* (2014) determinaron secuencias específicas de genes de defensa en *Abies religiosa* como apoyo en el manejo y control de muérdago enano y descortezadores.

La conservación de los bosques es importante para asegurar la continuidad del fenómeno de hibernación de las mariposas y detener la degradación del ambiente natural. La pérdida o deterioro del hábitat representan un gran riesgo para las poblaciones de mariposa monarca, debido a que tan

solo la remoción de algunos árboles modifica las propiedades del microclima, pues la densidad de los árboles y su estructura producen un ambiente específico de temperatura, vientos y otros factores, sin estas condiciones favorables las mariposas sufren alta mortandad cuando se presentan heladas seguidas por lluvias. Dicha conservación proporciona beneficios económicos (turismo) y ambientales en la conservación de especies de flora y fauna. También lo es para mantener las relaciones con los organismos y su medio (procesos ecológicos) y los servicios ambientales como la calidad y cantidad de agua y la prevención de erosión y fijación de carbono.

El uso de algunos herbicidas en el control de muérdago ocasionan fitotoxicidad al hospedante, especies aledañas o al hombre. Algunos herbicidas utilizados son Karmex (Diurón), Esteron 47M (2,4-D), Gramoxone (Paraquat) y Fitoamina (2, 4-D), Tierra de diatomeas, Etephon, Glifosato, aunque Gramoxone y Fitoamina son fitotóxicos para el hospedante. El químico más empleado a la fecha en México, ha sido etephon, producto promisorio en el manejo y control de *Arceuthobium* y *Phoradendron*. Se ha evaluado la efectividad con una dosis de 2500 ppm, se ha demostrado en diversos hospedantes ya que ocasiona caída del 100 % de la porción aérea de la planta parásita sin dañar al hospedante, sin embargo en ninguno de los casos hay eliminación del sistema endófito, por esta razón se desarrollan nuevos brotes aéreos uno o dos años después del tratamiento; por lo tanto, se reduce la dispersión de la semilla durante un periodo superior a cuatro años (Coria *et al.* 2010). Por otro lado, la aspersion realizada con equipo terrestre es muy efectiva, mientras que en forma aérea es ineficaz, pues la cantidad del químico en contacto con el muérdago es insuficiente para causarle la muerte. La aplicación del herbicida es influenciada por la etapa fisiológica del muérdago y la época de aplicación, la efectividad es mayor en invierno porque el hospedante esta en reposo y el muérdago fisiológicamente activo absorbe el producto químico y reduce el daño a los tejidos del árbol, pero en primavera la efectividad no es del todo segura. Una sola aplicación con dosis adecuada logra resultados favorables que van desde la clorosis de hojas, necrosis, defoliación parcial o total, abscisión de brotes y finalmente la muerte.

Al conocer la superficie infestada visualizada en los mapas, es posible llevar a cabo una aplicación dirigida hacia los focos de infestación, y con ello tener ahorros económicos y la reducción de la contaminación ambiental, al disminuir el uso y la cantidad de herbicidas en el control de esta plaga. En la actualidad en la comunidad de estudio se hace uso de dos herbicidas, Etephon y Fitoamina (2, 4-D), los cuales en dosis recomendadas tiene un efecto contaminante en suelo, aire y agua, así como efectos nocivos en la salud humana, las dosis de herbicidas van de 2 a 4 L/Ha., dependiendo del grado de infestación, el costo por litro en promedio es de 20 y 15 dólares respectivamente. De esta

manera si se cuenta con la localización exacta de *A. globosum* y los porcentajes de infestación, se puede tener ahorros considerables, ya que las aplicaciones, ya no se realizarían de manera homogénea en las parcelas, por ello es recomendable llevar a cabo la presente metodología, ya que da pauta para justificar el uso de las técnicas de la agricultura de precisión para controlar *A. globosum* en las zonas boscosas.

CONCLUSIONES

Las técnicas geoestadísticas y el análisis SADIE permitieron modelar la distribución espacial de *A. globosum* en *P. pseudostrabus* en el Santuario Piedra Herrada, presentando un comportamiento agregado en cada una de las parcelas experimentales. Así mismo se determinó que *A. globosum* no presenta una infestación uniforme en su distribución, esto permitirá un manejo más eficiente y focalizado en las poblaciones de esta planta parásita, ya que causa gran impacto ecológico y económico en la pérdida de diferentes tipos de ecosistemas (áreas naturales, plantaciones y parques). Los disturbios antropogénicos como la deforestación favorecen a una mayor incidencia y rebrotes severos de *A. globosum* en árboles remanentes, puesto que reciben una mayor incidencia de luz, la cual es necesaria para la producción de estructuras vegetativas y reproductivas. Por ende, los resultados obtenidos sientan las bases para poder elaborar un programa de manejo de *A. globosum* que pueda ser de utilidad por las autoridades competentes y contribuir a la protección y conservación de la riqueza forestal con ello se trata de garantizar el arribo de la mariposa durante su hibernación; y conservar la biodiversidad y calidad ambiental de la región.

REFERENCIAS

- Alvarado D, L Saavedra, A Almaraz. 2010. Determinación taxonómica de los hongos presentes en las diferentes especies de muérdago I arbolado del Distrito Federal. Informe técnico. SEDEMA. 25.
- Arce I, H Suzán, O García. 2016. Biotic factors associated with the spatial distribution of the mistletoe *Psittacanthus calyculathus* in a tropical deciduous forest of central Mexico. *Botanical Sciences*, 94(1):89-96. Doi:10.17129/botsci.263.

- Arriola VJ, F Reséndiz, MP Chaires, R Medellín, M Pérez. 2012. Insecta asociada a muérdago enano (*Arceuthobium* spp.) en los parques Nacionales Izta-Popo y La Malinche. 829-834.
- Contreras A, AT Gutiérrez, JR Sánchez, HV Silva, A Laguna. 2017. Comportamiento espacial de Zebra chip y *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemíptera: Triozidae) en *Solanun tuberosum* L. en Valles altos de México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(1):175-184.
- Coria VM, I Vázquez, HJ Muñoz, J Villa. 2010. Impacto de tierra de diatomeas sobre *Arceuthobium globosum* Hawksworth y Wiens subsp. *Grandicaule* en *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Revista mexicana*, 1(1):39-46.
- Englund E, A Sparks. 1988. GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) User's Guide. U.S. Environmental Protection Agency Document EPA/600/488/033. Environmental Monitoring Systems Laboratory. Las Vegas, NV, USA: p. 186.
- Galindo C, E Rendon. 2005. Danaidas: Las maravillosas mariposas monarca. WWF México-Telcel. Publicación especial No. 1. WWF-Telcel. p. 82.
- Hawksworth FG, D Wiens, BW Geils. 2002. *Arceuthobium* in North America, in: Geils, B.W, J, Cibrián T. y B. Moody (eds.). Mistletoes of North American Conifers. Reporte Técnico General RMRS-GTR-98. United States Department of Agriculture, Forest Service. Fort Collins. p. 29-56.
- Heredia RL, A Martin, G Gutiérrez, JC Santillan, D Cibrián, AR Endara. 2014. Genes de defensa en *Abies religiosa*. *Botanical Sciences* 92(4):623-628.
- Hevesi J, J Istok, A Flint. 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part. I. Structural analysis. *Journal of applied meteorology* 31(7):661-676.
- Isaaks E, R M Srivastava. 1989. An introduction to applied Geostatistics. New York, USA. Oxford University Press, p. 561.
- Jiménez A, MA López, JL González, ME Ocete, FJ Soria. 2008. Distribución espacial y mapeo de *Curculio elephas* Gyllenhal en encina (*Quercus ilex* L.). *Agrociencia*, 12:35-43.
- Leimu R. 2010. Habitat quality and population size as determinants of performance of two endangered hemiparasites. *Annales Botanici Fennici*, 47: 1-13.
- Maldonado FI, JF Ramírez, M Rubí, A Nemiga, AV Lara. 2016. Distribución espacial de trips en aguacate en Coatepec de Harinas, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(4):845-856.
- Mathiasen L, C Shaw, D Nickrent, D Watson. 2008. Mistletoes. Pathology, Systematics, Ecology, and Management. *Plant Disease*, 92(7):988-1006.

- Nafarrate AC, JM Dupuy, SP George, JL Hernández. 2018. Modelización y mapeo estacional del índice de área foliar en un bosque tropical seco usando imágenes de satélite de alta resolución. *Madera y bosques*, 24(3):1–17. Doi:10.21829/myb.2018.2431666.
- Perry J. 1995. Spatial Analysis by distance indices. *Journal of Animal Ecology*, 64:303–314.
- Queijeiro ME, Z Cano. 2015. Dinámica temporal de la infestación por muérdago enano (*Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum*) en Zoquiapan (Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl), México. *Ciencia UAT*, 9(2): 06–14.
- Ramírez JF, E Porcayo. 2009. Estudios de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en el Nevado de Toluca, México, utilizando el método de SADIE. *Madera y Bosques*, 15(2): 93–112.
- Ramírez JF, E Porcayo. 2010. Estudio comparativo de la distribución espacial de muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del parque nacional nevado de Toluca, México. *Revista Bosque*, 31(1):28–38.
- Ramírez JF, JR Sánchez, C de León. 2011. Estabilidad espacio temporal del carbón de la espiga del maíz (*Sporisorium reilianum*) en el Estado de México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 29(1):1–14.
- Ramírez JF, DK Figueroa. 2013. Modelización y mapeo de la distribución espacial de *Bactericera cockerelli* Sulc (Hemiptera: Trioziidae) en papa en el Estado de México. *Revista Centro Agrícola*, 40(3):57–70.
- Rietman L, B Karp, S Shamoun. 2005. Assesment of neonectria neomacrospora (*anamorph cylindroides*) as an inundative biocontrol agent against hemlock dwarf mistletoe. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 27(4):603–609.
- Roxburgh L, S W Nicolson. 2005. Patterns of host use in two African mistletoes: the importance of mistletoe–host compatibility and avian disperser behavior. *Func Ecol*, 19:865–873.
- Samper FJ, J Carrera. 1996. Geoestadística: Aplicaciones a la hidrología subterránea. Barcelona, España. Centro Internacional de Métodos en Ingeniería. p. 484.
- Sánchez JR, JF Ramírez, A González, C de León. 2015. Patrón espacial del carbón de la espiga del maíz en diferentes localidades del Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrarias*, 6(7):1467–1480.
- Solís V, H Suzán. 2014. Análisis de la distribución espacial de muérdago (*Phoradendron californicum*) en el desierto Sonorense. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas*, 59(1):11–28.

Varo R, V Ávila, J Heredia. 2016. Caracterización de infestación por muérdago enano (*Arceuthobium globosum* subsp. *grandicaule*) en el bosque de *Pinus hartwegii* en la cara sur del pico de Orizaba. Universidad de Quintana Roo, Cozumel, México. *Teoría y Praxis*, 19:11–31.

Vázquez I, S Madrigal. 2005. Control químico de muérdago enano (*Arceuthobium globosum*) en regeneración de *Pinus pseudostrobus*. *Revista Ciencia Nicolaita*, 41:68–82.