



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Análisis de la dinámica temporal de la vegetación
mediante mediciones satelitales en la Reserva
Ecológica del Pedregal de San Ángel, Ciudad de
México, México.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Biólogo

P R E S E N T A:

Jorge Bernardo Tercero Medina

Director de tesis:

Dra. María de la Luz Espinosa Fuentes





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno

**Tercero
Medina
Jorge Bernardo
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
309129631**

2. Datos del Asesor

**Dra.
María de la Luz
Espinosa
Fuentes**

3. Datos Sinodal 1

**Dra.
Nathalie Roberte Chantal
Cabirol**

4. Datos de Sinodal 2

**Dra.
María Guadalupe
Barajas
Guzmán**

5. Datos de Sinodal 3

**Dra.
Alicia
Cruz
Martínez**

6. Datos de Sinodal 4

**Dra.
Olivia
Salmerón
García**

7. Datos de la tesis

**Análisis de la dinámica temporal de la vegetación mediante mediciones satelitales en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México.
59 p.
2020**

AGRADECIMIENTOS

A mi directora de tesis, la Doctora María de la Luz Espinosa Fuentes por su apoyo, guía, confianza y conocimiento para poder realizar este trabajo, por ser una parte importante en mi formación como biólogo.

A la Dra. Nathalie Roberte Chantal Cabirol, a la Dra. María Guadalupe Barajas Guzmán, a la Dra. Alicia Cruz Martínez y a la Dra. Olivia Salmerón García, por formar parte de mi comité y por compartir su tiempo y conocimiento conmigo en el desarrollo de este trabajo.

A la Bióloga Ma Eugenia González del Castillo Aranda por su ayuda, paciencia, esfuerzo y dedicación en todos esos momentos de confusión, por ser parte fundamental en el desarrollo de este trabajo y por ser un ejemplo del biólogo que aspiro y espero llegar a ser.

A la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme las herramientas para desarrollarme en el ámbito escolar, personal y profesional y a la Facultad de Ciencias por expandir mi manera de ver el mundo, a través de las personas que conocí y las experiencias que viví.

Al Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía por apoyarme con el uso de los datos meteorológicos *in situ* para este trabajo.

DEDICATORIAS

A mi padre, Jorge, por todo su apoyo, amor y dedicación durante toda mi vida. Por impulsarme a seguir adelante y no rendirme a pesar de las adversidades. Por ser mi ejemplo a seguir.

A mi hermana Alethia, por todos esos momentos de diversión y alegría, por hacer de mi infancia una gran aventura y sobre todo por animarme en los momentos más difíciles.

A Mónica Vázquez Gómez, por acompañarme y animarme a continuar durante esta travesía, tu cariño fue el impulso que necesité para poder lograr mis objetivos. Siempre te estaré agradecido.

A todos los amigos, amigas y compañeros que conocí a lo largo de los años, por las experiencias que tuvimos y los recuerdos que conservo. Gracias a Joana, Ricardo, Diana, Diego, Jerónimo, Brenda. Gracias por permitirme vivir con ustedes grandes momentos.

A mis tíos y tías por cada palabra de aliento y por cada ayuda brindada. Cuando más lo necesitamos siempre estuvieron.

Para mi mamá, Patricia Medina Fong.

Cuando tenía tres años y jugamos a ser leones.

Hoy te vuelvo a decir “¡Ruge mamá!”

Ya no somos leones, mejor aún, somos pumas.

Siempre estarás en mi corazón y en mis recuerdos más felices.

Te amo.

Índice de figuras

Figura 1. Reflectancia típica de las plantas según la longitud de onda.....	3
Figura 2. Delimitación actual de la REPSA	5
Figura 3. Servicios ecosistémicos de la REPSA.....	6
Figura 4. Ángulo de visión del sensor MODIS	8
Figura 5. Sitio de estudio, Zona Núcleo oriente de la REPSA	13
Figura 6. Área de la REPSA correspondiente a los valores del producto MODIS/MOD09A1.	15
Figura 7. Comparación de EVI2 y NDVI del producto MOD09A1V006 de MODIS.....	18
Figura 8. Serie interanual de EVI2 y NDVI con filtro Savitzky-Golay	19
Figura 9. Curva típica de los IV durante el ciclo hídrico	23
Figura 10. Serie interanual de EVI2 y precipitación (mm).....	28
Figura 11. Sedimentación entre los eigenvalores y los componentes.....	30
Figura 12. ACP entre el EVI2 y los parámetros meteorológicos.	30
Figura 13. Serie interanual de EVI2 con el filtro Savitzky-Golay y precipitación (mm).	32
Figura 14. Promedio interanual de EVI2 y precipitación	34
Figura 15. Parámetros de estacionalidad de EVI2 por TIMESAT	36
Figura 16. Tendencia de los parámetros de estacionalidad de EVI2	39

Índice de tablas

Tabla 1. Estudios sobre fenología de la comunidad vegetal de la REPSA.....	10
Tabla 2. Comparación del SOS y EOS entre EVI2 y NDVI	20
Tabla 3. Análisis de componentes principales	29
Tabla 4. Análisis de regresión para los parámetros de estacionalidad.....	40

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Fenología.....	1
1.2. Productos satelitales.....	1
1.3. Índices de vegetación.	2
1.3.1. Índice de Vegetación de diferencia Normalizada, NDVI.	2
1.3.2. Índice de Vegetación Mejorado, EVI2.....	3
1.4. Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA).	4
1.4.1. Servicios ecosistémicos.....	5
2. ANTECEDENTES / MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Historia del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS).....	6
2.1.1. Especificaciones del sensor MODIS.	7
2.1.2. MODIS como herramienta de monitoreo.	8
2.2. Estudios en la REPSA.	9
3. JUSTIFICACIÓN.....	11
4. HIPÓTESIS.....	12
5. OBJETIVOS.....	12
6. MÉTODO.....	13
6.1. Sitio de estudio.	13
6.2. Obtención y procesamiento de datos.....	13
6.3. Cálculo de NDVI y EVI2.....	14
6.4. Parámetros de TIMESAT.....	15
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
8. CONCLUSIONES.....	46
9. BIBLIOGRAFÍA.....	47

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Fenología

La fenología es el estudio de los eventos del ciclo de vida de los seres vivos. En el caso de la vegetación, estas fases son debidas tanto a factores endógenos como a factores ambientales como la precipitación, la cantidad de luz solar, el tipo de suelo y la temperatura.

El estudio de la fenología vegetal tradicionalmente se realiza a partir de mediciones *in situ*, con las desventajas de que se basaba en el ciclo de vida de una especie en particular y en los gastos económicos que suponen la instalación de equipos de monitoreo en las zonas a estudiar (Morissette *et al.*, 2009). Actualmente, las series de datos necesarias para el estudio de la cubierta vegetal en una región determinada se pueden obtener a través de sensores remotos colocados en satélites, dichas imágenes satelitales permiten registrar los cambios en el tiempo de la vegetación de la zona de estudio. Se le denomina fenología de superficie de suelo (LSP, por sus siglas en inglés) a los estudios fenológicos que emplean imágenes satelitales para el registro de la actividad espectral de la cubierta vegetal (Helman, 2018).

También estudia los ciclos abióticos del ecosistema como los flujos de carbono, el ciclo del agua y las dinámicas de nutrientes en la red trófica. Por estas razones, la fenología se considera una ciencia ambiental interdisciplinaria (Schwartz, 2003).

1.2. Productos satelitales.

Las series temporales de productos satelitales permiten analizar con detalle los cambios en el funcionamiento de la vegetación, por ejemplo, la estacionalidad, la fenología vegetativa y reproductiva, la respuesta a cambios en la disponibilidad de agua y otros factores abióticos, lo cual permite facilitar la gestión de áreas protegidas ante fenómenos que puedan poner en riesgo el ecosistema en cuestión (Alcaraz-Segura *et al.*, 2008).

1.3. Índices de vegetación.

Los índices de vegetación (IV) funcionan como mediciones ópticas del “verdor” del dosel en un ecosistema. El verdor es una propiedad de la vegetación que combina indicadores de cantidad de clorofila foliar, área foliar, así como estructura y cobertura del dosel (Jiang *et al.*, 2008). Los IV, por lo tanto se utilizan como indicadores de la cantidad de vegetación presente en el área, su estructura, composición, vitalidad, y nivel de actividad fotosintética. Los IV son derivados de la cuantificación de dos o más bandas espectrales y se diseñan con el objetivo de acentuar la contribución de la vegetación a las propiedades espectrales de la superficie. De este modo, los cambios observados en estos IV pueden relacionarse con eventos temporales o espaciales en la cobertura vegetal y con la influencia de factores ambientales sobre características como la actividad fotosintética o la estructura del dosel de un ecosistema (Jiang *et al.*, 2008).

1.3.1. Índice de Vegetación de diferencia Normalizada, NDVI.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), es el índice espectral más utilizado para evaluar la respuesta vegetativa ante cambios ambientales, ya que funciona como un buen estimador tanto de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación como de la productividad primaria (Paruelo, 2008). El NDVI se calcula a partir de las diferencias en la cantidad de luz reflejada por la superficie terrestre en la porción del rojo visible (R) y del infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético. El principal pigmento de las plantas, la clorofila, absorbe fuertemente la radiación en las porciones azul y roja del espectro, y por lo tanto refleja poco en estas regiones; por otro lado, las células del mesófilo esponjoso de la vegetación, son altamente reflejantes en la porción del infrarrojo cercano (Gu *et al.*, 2007). Por lo tanto, una superficie cubierta por vegetación abundante y en buen estado, presentará una alta reflectancia en el NIR y una baja reflectancia en la región R. En contraste, una superficie escasamente cubierta por vegetación o desprovista de ella, presentará un menor contraste entre la reflectancia de estas dos regiones. Un alto valor de NDVI representa, usualmente, una mayor capacidad fotosintética (o más verdor) por parte de la vegetación local (Tucker,

1979; Chen y Brutsaert, 1998). La figura 1 muestra la reflectancia esperada por las plantas en diferentes longitudes de onda, en general, las plantas absorben la luz azul, verde y parte de la luz roja, mientras que reflejan una mayor cantidad del NIR.

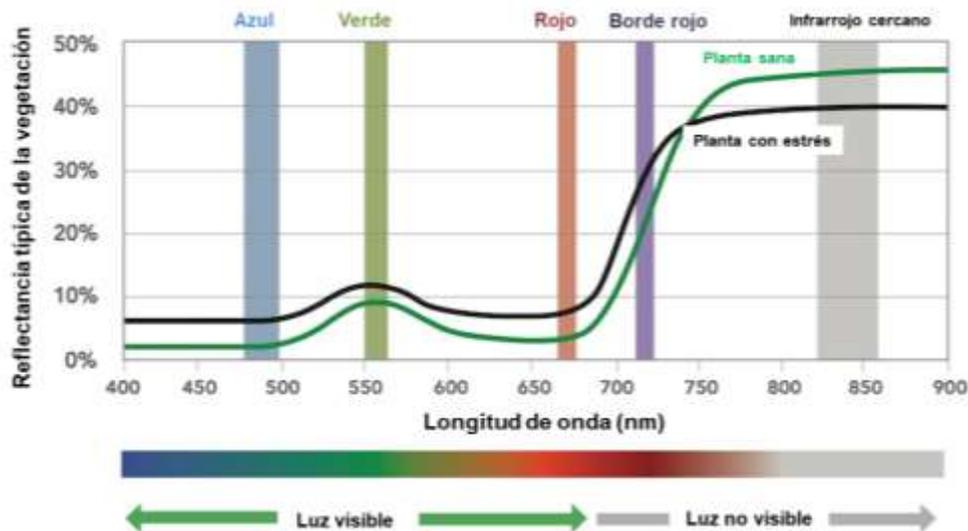


Figura 1. Reflectancia típica de las plantas según la longitud de onda presente. Obtenida de <https://www.micasense.com/faq>

1.3.2. Índice de Vegetación Mejorado, EVI2

El Índice de Vegetación Mejorado 2 (EVI2, por sus siglas en inglés), cumple la misma función que el NDVI en cuanto al estudio y evaluación de las propiedades espaciales y temporales de la vegetación en un ecosistema definido. Sin embargo, la diferencia entre los índices NDVI y EVI2 se encuentra en su enfoque de análisis, mientras que el NDVI es sensible y responde a los niveles de clorofila de la vegetación, el EVI2 es más sensible a las variaciones estructurales en el dosel forestal como el índice de área de las hojas, tipo de doseles, fisonomía de la vegetación, y arquitectura del dosel (Gao *et al.*, 2000). El EVI2 ha mostrado ser menos propenso a la saturación en climas templados y tropicales (Huete *et al.*, 2006), por lo que resulta más efectivo en el monitoreo de variaciones estacionales, interanuales y de largo plazo de la estructura de la vegetación en estos ambientes. Puede ser particularmente útil en regiones donde la degradación o

adelgazamiento del dosel es más prevalente y en zonas donde ciertas técnicas de monitoreo distante no logran percibir cambios sutiles en la estructura vegetal.

1.4. Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA).

La REPSA es catalogada como un relicto que ocupa 237 hectáreas del ecosistema del pedregal de la cuenca de México. Se ubica al sur de la Ciudad de México en la zona oriente de la delegación Coyoacán dentro de Ciudad Universitaria entre las coordenadas 19°18'21''N – 99° 12'4''W, en un intervalo altitudinal de 2, 292 a 2, 365 m.s.n.m., bajo protección de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

La Reserva está constituida por un estrato herbáceo bien desarrollado, uno arbustivo ligeramente inferior, con pocos elementos arbóreos. Las plantas presentes en la reserva son variadas en cuanto a su forma de crecimiento, ya que existen árboles, arbustos, semiarbustos, herbáceas anuales y perennes, crasicaulas áfidos, globosos y arbustivos, rosetófilas crasas, trepadoras, helechos, musgos y epífitas (Cano-Santana, 1994; Lot y Cano-Santana, 2009). La gran diversidad vegetal presente en la REPSA puede ser resultado de la diversidad de microambientes originados por la heterogeneidad topográfica, la variación altitudinal y la volatilidad climática de la Ciudad.

Actualmente, la vegetación está compuesta en su mayoría por el matorral xerófilo *Senecionetum praecosis*, debido a la abundancia de la especie *Pittocaulon praecox* o 'palo loco' (Santibáñez-Andrade *et al.*, 2009). El matorral *Senecionetum* se desarrolló sobre el conjunto de formaciones basálticas hoy conocidas como el Pedregal de San Ángel, y que se originaron por la solidificación de los flujos de lava que derramó la erupción del volcán Xitle hace 1, 670 años aproximadamente (Siebe, 2000). Se considera una comunidad vegetal característica de un matorral xerófilo, tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, una temperatura media anual de 15° C y una precipitación anual de 870mm. La temperatura máxima del año ocurre en el mes de mayo y la mínima en enero; la distribución de la precipitación es desigual, con una temporada lluviosa de mayo a octubre y con secas de noviembre a abril (Rzedowski, 1954). Atendiendo a la combinación de precipitación y temperatura, pueden distinguirse tres épocas

climáticas: lluvias (mayo – octubre), sequía de invierno (noviembre – febrero) y sequía de primavera (marzo – abril).

En 1982 se determinó la creación de la REPSA (Álvarez *et al.*, 1982); en cuatro acuerdos posteriores se redefinieron los límites de la misma (Sarukhan, 1990, 1996, 1997) siendo el acuerdo de 2005 (De la Fuente, 2005) el que actualmente sigue en vigencia.

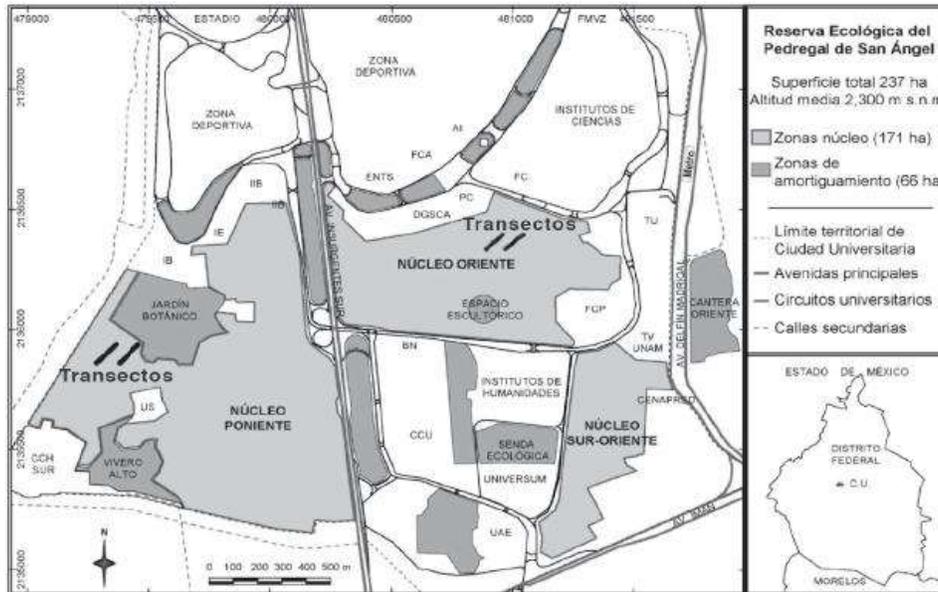


Figura 2. Localización y delimitación actual de la REPSA (De la Fuente, 2005).

1.4.1. Servicios ecosistémicos

Los servicios que proporciona la REPSA a la ciudad no han sido completamente reconocidos ni evaluados, aunque se considera que entre los servicios que aporta se encuentra la recarga de los mantos acuíferos, dado que el relieve único limita los escurrimientos superficiales y la evaporación, y favorece su transporte a capas inferiores del subsuelo a través de grietas y oquedades (Peralta-Higuera y Prado-Molina, 2009). Se considera que el Pedregal tiene efectos positivos sobre la calidad del aire, y reduce la contaminación sonora de la zona, por lo que mejora la calidad de vida de la población circundante (Nava-López *et al.*, 2009). Su importancia biológica radica en su función como reservorio de especies animales y vegetales, algunas de ellas posiblemente endémicas, desplazadas por el desarrollo urbano en el Valle de México (Peralta y Molina, 2009). Por ello, se

reconoce que los servicios ecosistémicos tienen una función primordial para sustentar la diversidad dentro de los límites de la REPSA, además de un papel relevante en la comunidad académica. Nava *et al.*, (2009) reconocen cinco servicios de provisión, tres de regulación, cuatro culturales y tres de soportes.



Figura 3. Servicios ecosistémicos de la REPSA (Nava-López *et al.*, 2009).

2. ANTECEDENTES / MARCO TEÓRICO

2.1. Historia del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS).

Las actividades humanas han tenido un gran impacto en los ecosistemas del mundo, de manera negativa han influido en la pérdida de biodiversidad, erosión de suelos, aumento de gases de efecto invernadero, entre otros. El deterioro progresivo y exponencial de los ecosistemas fue la razón por la cual se llevaron a cabo proyectos para el monitoreo de coberturas globales de la vegetación, mediante el diseño de sensores montados en satélites en la década de los 80s. El primer sensor de mapeo y monitoreo es el Radiómetro Avanzado de Alta Resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés), el cual iba a bordo de un satélite de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de Norteamérica. Al tratarse del primer sensor de este tipo tuvo varios defectos que impedían tener una lectura óptima de los datos, tales como una baja resolución espacial, problemas geométricos y radiométricos,

además de una alta predisposición a la saturación (Ichoku *et al.*, 2003). A pesar de las limitantes que presentaba el sensor AVHRR en la obtención de datos, los resultados permitieron impulsar la mejora del método y la continuación de esta línea de investigación.

En 1988, la NASA crea el proyecto de manejo de datos EOSDIS (Sistema de datos de observación de la Tierra y Sistema de Información, por sus siglas en inglés), el cual se basa en los principios de no discriminación, para permitir el acceso a todo aquél que requiera hacer uso de los datos sin un costo excesivo, y de la no exclusividad, cada investigación que haga uso de los datos de EOSDIS deberá ser de acceso público (Sadeh, 2002). Es en el marco de este proyecto que surge el primer sensor MODIS, el cual trabajó por 10 años hasta que en 1999 se lanza el satélite Terra, que alberga el sensor MODIS que recopila la información hasta hoy día.

2.1.1. Especificaciones del sensor MODIS.

Actualmente existen dos satélites, Terra y Aqua, cada uno con un sensor MODIS, ambos satélites tienen una órbita heliosincrónica y cuasi polar, con una inclinación de 98.2° y 98° y una altitud media de 708 y 705 kilómetros respectivamente (NASA MODIS WEB, 2008). La principal diferencia entre satélites, es que Terra se traslada de norte a sur cruzando el ecuador a las 10:30 de la mañana, UTC-16:30 en una órbita descendente, mientras que el satélite Aqua desplaza de sur a norte y cruza sobre el ecuador a la 13:30 de la tarde, UTC-19:30.

El sensor MODIS cuenta con una alta sensibilidad radiométrica en 36 bandas espectrales. Las primeras 19 bandas están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre 405 nm y 2,155 nm y son útiles en las observaciones terrestres, oceánicas y para mediciones atmosféricas, mientras que las bandas 20 a 36 cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro (1,360 – 14,385 nm), además, el sensor MODIS posee una alta calidad geométrica que permite monitorear con precisión las alteraciones de la superficie terrestre (Mas, 2011).

Al actuar como un explorador de barrido, el sensor posee un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria con un ángulo de $\pm 55^\circ$

que permite explorar una franja de terreno a ambos lados de la traza del satélite, cuyo ancho es de 2,330 km (figura 4).

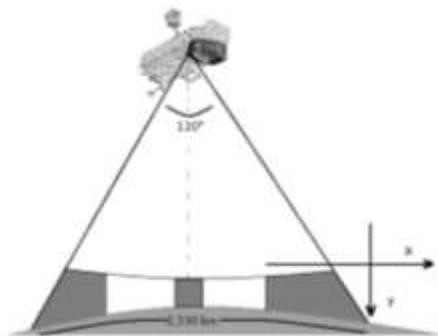


Figura 4. Ángulo de visión del sensor MODIS (Mas, 2011).

2.1.2. MODIS como herramienta de monitoreo.

El sensor MODIS ha sido una herramienta de gran ayuda y de mucho uso en proyectos de monitoreo de la superficie de los ecosistemas terrestres, esto debido al gran número disponible de productos que pueden ser utilizados. La serie de tiempo más utilizada es la basada en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) (Jiang *et al.*, 2006). La obtención del NDVI se realiza mediante la aplicación de la fórmula

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

Donde *R* y *NIR* representan las mediciones de reflectancia espectral adquiridas en las regiones roja (*R*) e infrarroja cercana (*NIR*). Estas reflectancias son proporciones del reflejo sobre la radiación entrante en cada banda espectral, por lo que toman valores entre 0 y 1.

Las series de tiempo basadas en MODIS permiten reconocer la fenología característica de cada tipo de vegetación presente en un ecosistema, con el objetivo principal de comprender el funcionamiento y la estacionalidad de la vegetación, tanto en reservas naturales como en zonas de cultivo (Townshed *et al.*, 1991; Ji y Peters, 2007; Luna Toledo y Figuerola, 2016), mientras que otros estudios buscan coleccionar datos de un periodo en particular, pudiendo ser la época

de crecimiento, o la muda de hojas del dosel (Bagan *et al.*, 2005; Sivanpillai y Latchininsky, 2007).

Sin embargo, el que la señal de NDVI se saturase en condiciones de alta biomasa (Huete, 1988) dio lugar al uso de otros índices de vegetación, siendo EVI2 el índice con una mayor optimización de la señal de la vegetación en áreas susceptibles a saturar la señal del NDVI, además de tener mayor sensibilidad a las variaciones en la cubierta vegetal (Justice *et al.*, 1998; Ferreira *et al.*, 2003). El aumento en la sensibilidad se debe a la fenología y al tipo de práctica de manejo de la tierra (Xavier *et al.*, 2006).

El EVI2 es una variable continua sin unidad de medición cuyos valores se encuentran en un rango de -1 a 1 (Mondal, 2011), se obtiene con los mismos datos de las reflectancias en las bandas y con la aplicación de la fórmula

$$EVI2 = \frac{NIR - RED}{NIR + (2.4 * RED) + 1} * 2.5$$

Dónde: RED y NIR representan la radiación reflejada. Mientras que los valores 2.5, 2.4 y 1 corresponden a coeficientes de corrección para eliminar el ruido procedente de aerosoles disueltos en la atmósfera (Liu y Huete, 1995; Jiang *et al.*, 2008).

En México, los índices NDVI y EVI2 derivados del sensor MODIS han tenido una gran variedad de aplicaciones en estudios sobre el impacto negativo de diferentes fenómenos, como la invasión de especímenes foráneos de vegetación (Franklin *et al.*, 2006), los daños ocasionados en una zona forestal por el paso de un huracán (Rogan *et al.*, 2011) y por la intervención del hombre (Hernández, 2015). También se encuentran trabajos de monitoreo en áreas de cultivo (Báez *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2006) y estudios fenológicos en regiones forestadas (Miguel, 2013; Romero, 2018).

2.2. Estudios en la REPSA.

La REPSA ha sido un sitio de investigación frecuentado por la comunidad

universitaria. Los trabajos de investigación que se han realizado son en su mayoría biológicos enfocados en temas ecológicos, como listados faunísticos y florísticos, conteos poblacionales, monitoreo de especies endémicas, efectos antropogénicos en la estabilidad del ecosistema, entre otros. Actualmente el registro de la REPSA consta de 584 publicaciones divididas entre libros, artículos, tesis y participaciones en congresos.

Existen diversos trabajos que se han enfocado en la fenología de la vegetación de la REPSA.

La tabla 1 refiere a la revisión bibliográfica de los estudios llevados a cabo en la REPSA en los que se describe la fenología de la comunidad vegetal, así como una breve descripción de las conclusiones referentes a la estacionalidad.

Tabla 1. Estudios sobre la fenología de la comunidad vegetal presente en la REPSA.

Autor y año	Título	Resumen	Zona de la REPSA	Fenología vegetal
Santibáñez-Andrade <i>et al.</i> , 2009	La heterogeneidad ambiental en un matorral xerófilo.	Se caracterizó la heterogeneidad biótica y abiótica del matorral xerófilo	Se hicieron cuatro transectos, dos en la Zona Núcleo Poniente "Jardín botánico" y dos en la Zona Núcleo Oriente "Espacio Escultórico"	Durante la temporada de lluvias (junio a octubre) aumenta el número de especies vegetales, mientras que en la temporada de secas (noviembre a mayo) la cobertura vegetal disminuye.
Damián-Domínguez y Cano-Santana, 2009	Fenología reproductiva de <i>Habranthus concolor</i> y <i>H. aff. concolor</i> (<i>Amaryllidaceae</i>) y su relación con la lluvia.	Describe las fenofases florales de dos especies del género <i>Habranthus</i>	Delimitaron cuadros de 10 x 10 m en las áreas verdes adyacentes al estacionamiento de alumnos de la Facultad de Contaduría y Administración dentro del camellón central del Circuito Exterior y en un área verde en el costado norte del edificio de Programas Universitarios.	La etapa de antesis o florecimiento ocurre durante los meses de marzo a mayo, mostrando una relación estrecha con la temporada de lluvias, así como la presencia de brotes y frutos. Estima que la temporada reproductiva puede acortarse por la baja intensidad de lluvias
Moyers-Arévalo y Cano-Santana, 2009	Fenología de la comunidad de mariposas diurnas y su relación con la fenología floral de las plantas y otros factores ambientales.	Describe la fenología de las comunidades de las mariposas y el efecto directo que tendría la fenología floral de la vegetación local.	La fenología floral se registró mediante dos parcelas de 15 x 100 m, una localizada en la zona núcleo oriente y otra en la zona núcleo poniente. El estudio se llevó a cabo de octubre del 2005 a septiembre del 2006	Los meses en que florece la mayoría de especies corresponden a la temporada lluviosa, de julio a octubre.
Domínguez-Álvarez <i>et al.</i> , 2009	Estructura y fenología de la comunidad de abejas nativas (<i>Hymenoptera</i> :	Determina la relación que tienen la fenología reproductiva de plantas y la variación anual de las condiciones	Se delimitaron dos sitios de estudio de 120 x 15 m, uno en las inmediaciones del Jardín Botánico y el segundo en inmediaciones del Espacio Escultórico. El registró floral	Existe una marcada estacionalidad en la mayoría de las especies florales, se determinó que 37 especies tienen el inicio de su floración durante la

	<i>Apoidea</i>)	ambientales con la fenología de abejas.	se registró de septiembre de 2005 a agosto del 2006.	temporada de lluvias (junio) y se extiende hasta el inicio de la temporada de secas (noviembre y diciembre), nueve especies florecen durante la temporada de secas (marzo y abril). El pico de floración ocurre en la época de lluvias.
César-García, 2002	Análisis de algunos factores que afectan la fenología reproductiva de la comunidad vegetal de la REPSA.	Analizó la fenología reproductiva de la comunidad vegetal de la REPSA y su relación con los factores bióticos y abióticos presentes.	Se ubicaron diez sitios de muestreo circulares de 10 m de diámetro, cinco en el jardín botánico y cinco en las inmediaciones de la zona núcleo oriente.	Considera que la fenología floral de la comunidad vegetal es afectada principalmente por la precipitación, ya que la mayoría de las especies florecieron durante la temporada de lluvias (junio a octubre). Durante la temporada de secas (de diciembre a mayo) se registraron el menor número de especies vegetales.

Sin embargo, entre los diversos proyectos y estudios enfocados en la REPSA, no se encontraron estudios que hagan uso del sensor MODIS ni de los índices de vegetación NDVI y EVI2, ya que la mayoría de estudios fenológicos se realizan de manera presencial.

3. JUSTIFICACIÓN

La importancia de la REPSA como refugio para especies endémicas del Valle de México y la fragilidad del ecosistema por su presencia en un área altamente urbanizada, son razones importantes para considerar el uso de diferentes técnicas que permitan un monitoreo más preciso de la dinámica de la vegetación en tiempo y espacio.

El uso de las series de datos del satélite MODIS y los índices de vegetación NDVI y EVI2 permitirán conocer la estacionalidad de la vegetación e incrementar y complementar la información ya existente sobre las condiciones de la cubierta vegetal de la reserva.

4. HIPÓTESIS

La variación fenológica de la cubierta vegetal de la REPSA responde a la variabilidad temporal de la precipitación.

5. OBJETIVOS

- Analizar la fenología vegetativa del matorral de Palo Loco en la zona Núcleo Oriente “Espacio Escultórico” de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) a través de la serie temporal de los índices de vegetación NDVI y EVI2 del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS).
- Examinar la correlación de la dinámica de los IV satelital con los valores de precipitación registrados en la REPSA durante el periodo considerado.

6. MÉTODO

6.1. Sitio de estudio.

El trabajo se llevó a cabo en la Zona Núcleo Oriente de la REPSA (Figura 5). Tiene una superficie de 52 hectáreas, limitada al poniente por la Avenida de los Insurgentes, al norte colinda con el Centro de Investigaciones y Servicios Educativos, el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico y la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación, al oriente bordea en paralelo al Circuito Mario de la Cueva hasta la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (De la Fuente, 2005).



Figura 5. Sitio de estudio, Zona Núcleo oriente de la REPSA, “Espacio Escultórico”.

6.2. Obtención y procesamiento de datos.

Los datos se obtuvieron de la página web del Centro Activo de Distribución de Archivos (DAAC, por sus siglas en inglés) de Oak Ridge, Tennessee, Estados Unidos (<https://modis.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/global/subset.pl>). Se utilizó el producto de reflectancia superficial MOD09A1V006 del sensor MODIS ubicado en el satélite TERRA, con una resolución 500m x 500m, y con una frecuencia temporal de observación de cada 8 días. La serie de tiempo analizada fue de febrero del 2000 al primer trimestre de 2019 (ORNL DAAC, 2018).

6.3. Cálculo de NDVI y EVI2.

De los productos obtenidos del sensor MODIS se extrajeron las bandas b01 y b02 del producto MOD09A1, que corresponden a las reflectancias en las bandas 620-670 nm (R) y 841-876 nm (NIR), respectivamente.

La obtención del NDVI se realizó mediante el procesamiento de los datos y la aplicación de la fórmula

$$NDVI = \frac{(b02/1000) - (b01/1000)}{(b02/1000) + (b01/1000)}$$

Donde la banda b01 representa la región roja (R) y la banda b02 representa la región infrarroja cercana (NIR), los valores que se obtienen del producto de MODIS se dividen entre mil para ajustar al rango de valores de los IV, que se encuentra entre 0 y 1.

El EVI2 se obtiene con los mismos datos de las reflectancias en las bandas y con la aplicación de la fórmula

$$EVI2 = \frac{(b02/1000) - (b01/1000)}{(b02/1000) + (2.4 * (b01/1000)) + 1} * 2.5$$

Dónde: b01 representa la banda R y b02 representa la banda NIR. Mientras que los valores 2.5, 2.4 y 1 corresponden a coeficientes de corrección para eliminar el ruido procedente de aerosoles disueltos en la atmósfera.

Los parámetros de estacionalidad de la vegetación se obtuvieron utilizando el software TIMESAT (Jönsson y Eklundh, 2004) que analiza las series temporales y ajusta los valores del NDVI y EVI2 a una curva descrita mediante un modelo matemático doble-logístico, corrigiendo de esta manera datos con ruido y/o debidos a la nubosidad. A partir de estas curvas ajustadas, es posible obtener variables fenológicas tales como fecha de inicio de la estación de crecimiento de la vegetación (SOS, por sus siglas en inglés) y finalización del periodo de crecimiento de la vegetación (EOS), amplitud, velocidad de crecimiento, etc. SOS y EOS delimitan el periodo de actividad fotosintética durante un año.

A las series de datos de ambos IV se les aplicó el filtro de adaptación Savitzky-Golay, que se basa en la convolución sucesiva de un polinomio (ajustado por el método de mínimos cuadrados) a un subconjunto de datos adyacente en la serie temporal, lo cual produce un conjunto de coeficientes de convolución que aplicados a dicho subconjunto de la serie para obtener estimaciones de la alisada de la señal. En el caso de las series satelitales, este filtro elimina el ruido producido por la nubosidad y da como resultado una serie ajustada al envolvente o “envelope” de la señal original. El filtro se puede aplicar a cualquier serie de datos que sea consecutiva y cuyos valores se encuentren en intervalos uniformes y continuos (Chen *et al.*, 2004; Bian *et al.*, 2010)



Figura 6. Área de la REPSA correspondiente a los valores del producto MODIS/MOD09A1.

6.4. Parámetros de TIMESAT.

Los parámetros de TIMESAT permiten conocer la dinámica temporal en la estacionalidad de la vegetación, mediante un ajuste en la configuración se puede obtener dichos parámetros temporales. Para este estudio, se mantuvieron los ajustes específicos de clase de acuerdo con las recomendaciones del manual de software. El primer ajuste es el de “*seasonal parameter*” o el parámetro estacional, con valor de 1 ya que se asume que sucede una sola temporada de verdor al año, después se asigna el valor para “*No. of envelope iterations*” o el número de iteraciones del envolvente, se ajustó a 2 para tener una adaptación de los valores comunes sin el riesgo de eliminar datos que una adaptación máxima podría

ocasionar, el siguiente parámetro “*adaptation strenght*” o fuerza de adaptación se ajustó a 2 para coincidir con el ajuste de iteraciones. Finalmente, los valores de “*season start*” / inicio de temporada y “*season end*” / final de temporada, se les asignó el valor 0.2 para definir la amplitud de la temporada de verdor. Es importante mencionar que el protocolo que utiliza el software TIMESAT, explica que los ajustes previos se deben considerar como “arte” y que cada valor asignado depende de la naturaleza del área que es objeto de estudio y del tipo de información que se está usando en el momento (Eklundh y Jönsson, 2017), por lo cual estos valores asignados se adaptaron mejor a la estacionalidad observada en la REPSA.

Después de haber realizado los ajustes necesarios se obtuvieron los parámetros de estacionalidad de la serie de datos de MODIS, los cuales son una estimación del momento del año en que ocurren los eventos como SOS, EOS, ocurrencia del valor máximo de la temporada (POS, por sus siglas en inglés), así como el tiempo de duración de la temporada de verdor (*length*) y los valores de intensidad de verdor como el valor base (*base value*), el valor máximo estacional, valor inicial y valor final. y que definen la estacionalidad del área de estudio.

Para evaluar la relación entre los valores de los IV y los parámetros meteorológicos en la REPSA, se analizaron los registros en periodos de ocho días, para coincidir con los periodos de lectura de MODIS, del Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía y de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) se determinaron los valores de precipitación acumulada (mililitros/mL), la radiación solar (vatios sobre metro cuadrado, w/m^2), velocidad de viento (metros sobre segundo, m/s) y temperatura promedio (grados centígrados, °C).

Las variaciones entre el EVI2 y los parámetros meteorológicos como la precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y presión atmosférica se analizaron utilizando un análisis de componentes principales (ACP), para identificar la relación entre el EVI2 y los parámetros meteorológicos se aplicó un análisis de correlación de Pearson.

Para todos los análisis comparativos, se determinaron diferencias significativas a un $p < 0.05$. Todas las pruebas estadísticas se realizaron utilizando Statgraphics Centurion 18.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 7 muestra los valores de NDVI y EVI2 calculados directamente a partir de las reflectancias obtenidas del producto MODIS09A1V006 en el periodo comprendido entre 2000 y 2019. Como es habitual en los datos satelitales, existen descensos abruptos en ambos IV que corresponden a días o periodos nublados, lo cual impide obtener valores de estacionalidad representativos del tipo de vegetación de la REPSA, razón por la cual se aplicó el procedimiento de ajuste y filtrado con programa TIMESAT.

En los datos sin tratamiento, es posible observar un patrón interanual similar en la posición y tendencia de los valores para ambos IV. En cada año se presenta una distribución estilo campana en donde los valores mínimos se ubican en los primeros y últimos meses de cada año, con una marcada elevación en los meses de verano. El rango de los valores obtenidos para NDVI (~ 0.25 a ~ 0.8) es mayor que para EVI2 (~ 0.1 a ~ 0.45). A pesar de la similitud en la tendencia y comportamiento de los valores de los IV, existen diferencias puntuales en su distribución, como se muestra en los años 2002, 2006 y 2014, donde en los meses intermedios, el valor de EVI2 presenta depresiones más marcadas que NDVI.

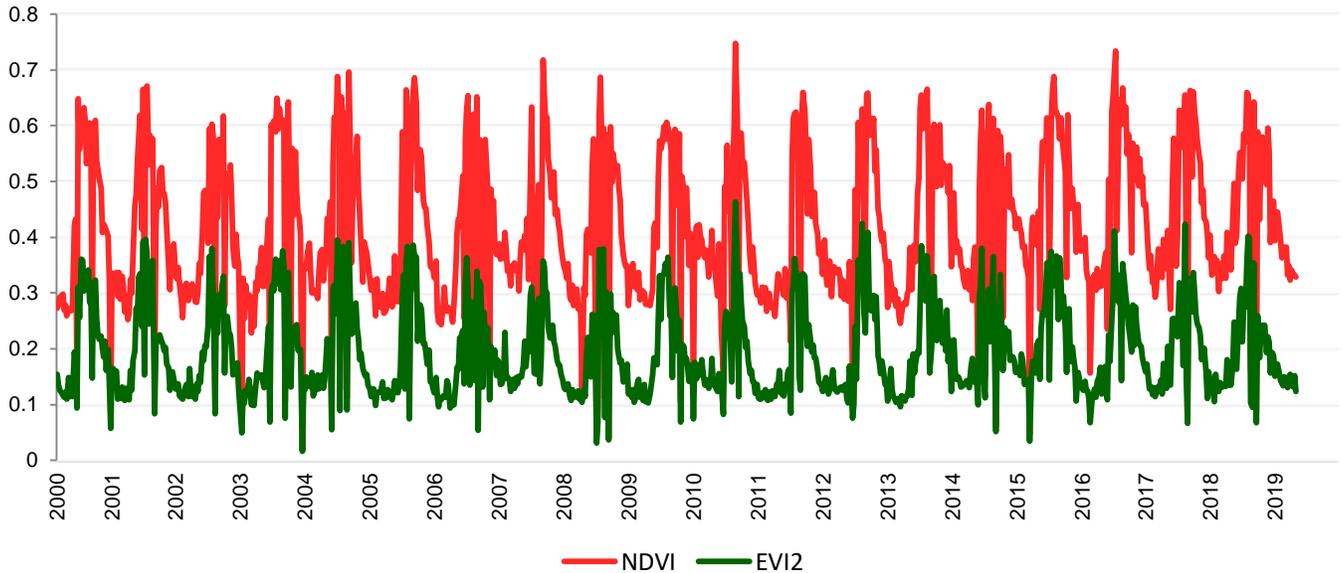


Figura 7. Comparación de EVI2 (verde) y NDVI (rojo) creado a partir de los valores “crudos dados por el producto MOD09A1V006 del satélite MODIS

La figura 8 muestra la aplicación del programa TIMESAT y el uso del filtro Savitzky-Golay para suavizar la representación de los IV. La representación de los índices con este método refleja un patrón interanual similar en la posición y tendencia de los valores para ambos IV, sin embargo, NDVI presenta valores por encima de EVI2 posiblemente a que el NDVI se satura en áreas con una alta densidad vegetal y no responde a la variación en la reflectancia del NIR cuando R se encuentra bajo, incluso por la presencia de nubes o residuos de aerosoles en la atmósfera, los cuales son considerados por el NDVI (Jiang *et al.*, 2008).

Lo anterior ha sido discutido por Pettorelli *et al.*, (2005) quienes mencionan que el NDVI puede incluir valores falsos causados por saturación, presencia de errores de lectura en locaciones espaciales específicas como valores por arriba del promedio.

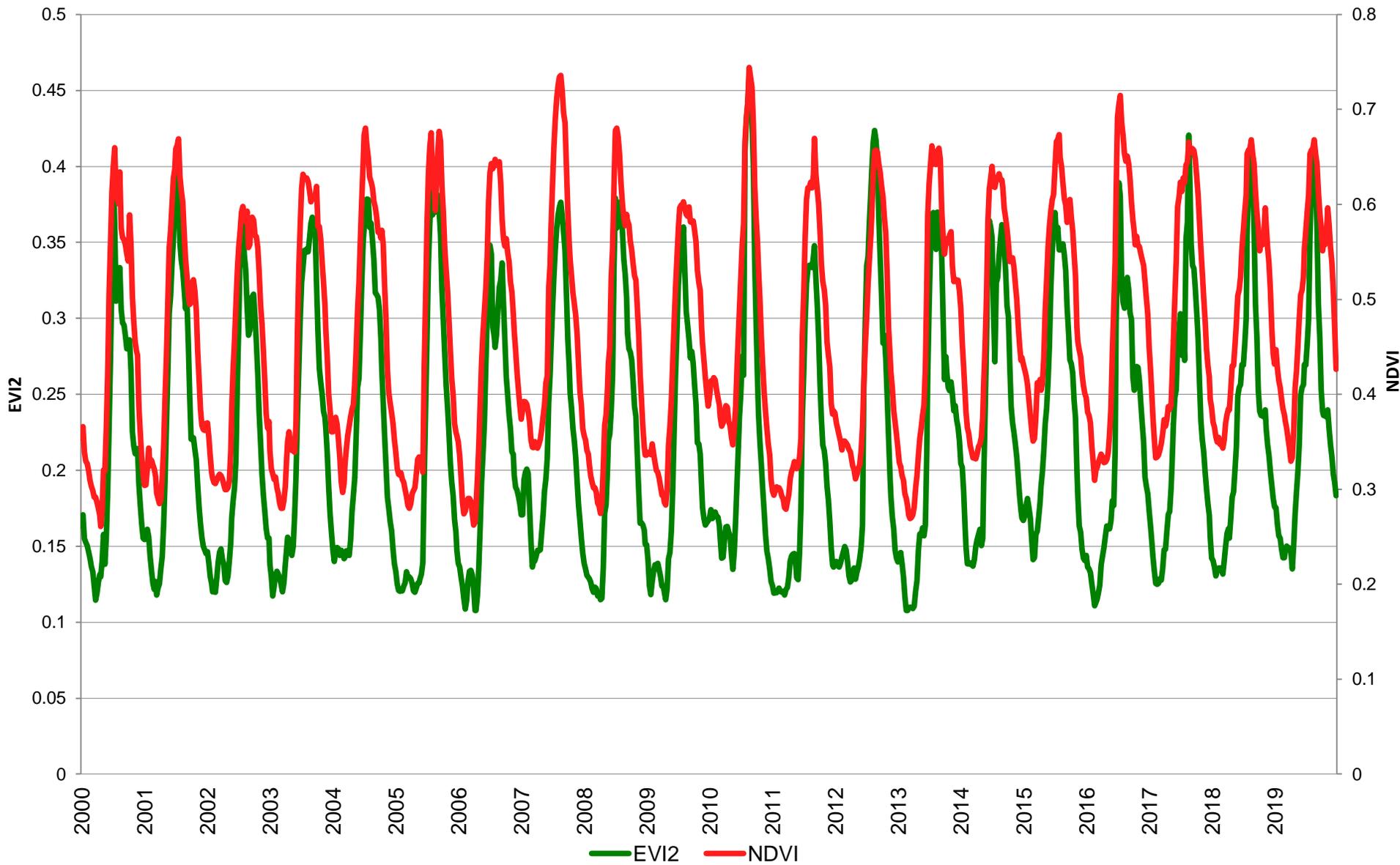


Figura 8. Serie interanual de EVI2 y NDVI, suavizada por el programa TIMESAT y el filtro Savitzky-Golay.

De acuerdo con la distribución de valores obtenidos mediante el programa TIMESAT y el comportamiento observado del NDVI, se considera que los valores obtenidos en el EVI2 refleja de mejor manera el ciclo estacional de la vegetación en el sitio de estudio.

Lo anteriormente expuesto se confirma con los resultados descritos en la tabla 2 donde se presentan las fechas en periodos de ocho días en que inició y terminó cada temporada de verdor para ambos índices durante todo el periodo de estudio. El NDVI muestra que el final de temporada (EOS) se extiende al siguiente año, (resaltado en color rojo), en un mayor número de años comparado con EVI2.

Tabla 2. Comparación del inicio y final de temporada entre EVI2 y NDVI obtenidos a partir del programa TIMESAT. Se señala en rojo lo años en que el final de temporada se prolongó hasta el siguiente año.

Año	Inicio de temporada		Final de temporada	
	EVI2	NDVI	EVI2	NDVI
2000 - 2001	24 - 31 mayo	16 - 23 mayo	10 - 17 diciembre	2 - 9 diciembre
2001 - 2002	23 - 30 abril	23 - 30 abril	17 - 24 noviembre	25 noviembre - 2 diciembre
2002 - 2003	25 mayo - 1 junio	17 - 24 mayo	3 - 10 diciembre	27 - 31 diciembre
2003 - 2004	17 - 24 mayo	15 - 22 abril	11 - 18 diciembre	25 enero - 1 febrero
2004 - 2005	30 abril - 7 mayo	6 - 13 abril	24 noviembre - 1 diciembre	18 - 25 diciembre
2005 - 2006	10 - 17 junio	10 - 17 junio	11 - 18 diciembre	1 - 8 enero
2006 - 2007	1- 8 mayo	23 - 30 abril	10 - 17 febrero	19 - 26 diciembre
2007 - 2008	17 - 24 mayo	2- 9 junio	11 - 18 diciembre	19 - 26 diciembre
2008 - 2009	22 - 29 abril	22- 29 abril	16 – 23 noviembre	10 - 17 diciembre
2009 - 2010	25 mayo - 1 junio	9 - 16 mayo	17 - 24 noviembre	10 - 17 febrero
2010 - 2011	10 - 17 junio	2- 9 junio	9 - 16 noviembre	25 noviembre - 2 diciembre
2011 - 2012	10 - 17 junio	18 - 25 junio	25 noviembre - 2 diciembre	27 - 31 diciembre
2012 - 2013	9 - 16 junio	9 - 16 junio	24 noviembre - 1 diciembre	26 - 31 diciembre
2013 - 2014	17 - 24 mayo	1- 8 mayo	17 - 24 enero	25 enero - 1 febrero
2014 - 2015	9 - 16 mayo	9 - 16 mayo	3 - 10 diciembre	25 enero - 1 febrero
2015 - 2016	7 - 14 abril	7 - 14 abril	25 noviembre - 2 diciembre	1 - 8 enero
2016- 2017	16 - 23 mayo	24 - 31 mayo	26 - 31 diciembre	9 - 16 enero
2017 - 2018	1 - 8 mayo	9 - 16 mayo	25 noviembre - 2 diciembre	19 - 26 diciembre
2018 - 2019	9 - 16 mayo	23 - 30 abril	11- 18 diciembre	2 - 9 febrero

De manera general el SOS (inicio de temporada de verdor) ocurrió en los meses de abril, mayo y junio, y el EOS se presentó entre los meses de noviembre, diciembre y enero del año siguiente, con algunas excepciones en que el EOS se extiende hasta el mes febrero. A pesar de que la estacionalidad coincide en los mismos meses, la ocurrencia del SOS y EOS varía por año y por índice.

El SOS en EVI2 presentó mayor frecuencia de ocurrencia en el mes de mayo, en 12 de los 18 años analizados, mientras que en abril y junio, la temporada da inicio en solo 3 y 4 años respectivamente. Para NDVI, el SOS se presentó en abril y en mayo en 7 años cada uno, y solo en 5 diferentes años inicia en junio.

El EOS en EVI2 ocurrió con mayor frecuencia en el mes de noviembre en 9 de los 18 años, en diciembre en 8 años. EVI2 presenta dos años atípicos en que la estacionalidad tiene su fin al año siguiente, en el año 2013 la temporada de verdor concluyó hasta el periodo del 17 al 24 de enero del 2014, mientras que el 2006 presentó el periodo más largo de todos los años analizados (2000 al 2018), concluyendo hasta el 17 de febrero de 2007. En ambos años se registró una mayor cantidad de lluvia hacia el final del verano y el otoño en comparación con otros años, lo que favoreció un alargamiento de la temporada de crecimiento vegetal. El NDVI muestra en varios años un EOS que se alarga hasta enero del año siguiente, mayormente el EOS ocurre en los meses de noviembre y diciembre.

Tomando como referencia los EOS de EVI2, podemos considerar que los años 2001 y 2010 son normales para NDVI por tener su final de temporada en el mes de noviembre, ya que la mayoría de los años presentan el EOS en ese mes, mientras que los años 2009 y 2018 son años atípicos puesto que el fin de la temporada de verdor ocurre hasta el mes de febrero de los años 2010 y 2019 respectivamente.

Es común que el NDVI exhiba los valores más altos, esto ocurre generalmente porque el NDVI no responde a las variaciones en la reflectancia de NIR cuando la reflectancia de R es más baja (Carlson y Ripley, 1997; Gitelson, 2004, Huete *et al.*, 1997; Wardlow *et al.*, 2007), mientras que EVI2 es sensible a estas variaciones en la reflectancia de NIR cuando R está bajo (Jiang *et al.*, 2008). Además, EVI2 se desarrolló con la intención de optimizar la lectura de la vegetación al agregar

coeficientes que nulifiquen factores ajenos como la influencia atmosférica, aerosoles, y el suelo del dosel éste último tendría un efecto más grande en la REPSA ya que su vegetación es de estilo dispersa. De esta manera, EVI2 conserva una sensibilidad mejorada a los cambios de reflectancia y mantiene un ajuste de función al “ruido” por la reflectancia producida por el suelo, de manera similar a su predecesor EVI, pero que, a diferencia de este, el EVI2 no hace uso de la banda azul, la cual no provee información adicional o pertinente sobre las propiedades biofísicas de la vegetación, sino que reducía el “ruido” por parte de aerosoles atmosféricos. La banda azul se ha vuelto menos significativa gracias a los avances en correcciones atmosféricas por parte del satélite de lectura. Además, se ha demostrado que EVI2 tiene una relación linear y altamente sincronizada con las mediciones estacionales de fotosíntesis en cuanto a fases y amplitud, sin una saturación observada en diversos tipos de vegetación como bosques templados de hojas de aguja perennes (Xiao *et al.*, 2004), bosques tropicales de hoja ancha perennes (Rahman *et al.*, 2005; Sims *et al.*, 2006). Deng *et al.* (2007) menciona que EVI2 resulta bastante efectivo en el monitoreo, detección de cambios y variaciones estacionales en áreas que presentan vegetación perenne.

Aunque se podría considerar que en los años 2009 y 2018 ocurren eventos o fenómenos meteorológicos anormales que puedan afectar el ciclo de vida de las especies vegetales, como sequías o lluvias extensas, es importante considerar que NDVI podría extender los valores de estacionalidad como una manera de compensar la saturación del rango de valores, la saturación de valores es un defecto común en el índice según Pettorelli *et al.* (2005). Sumado a esta desventaja del NDVI, se reconoce que el índice presenta un retraso temporal de dos meses aproximadamente en la lectura de aumento del verdor causado por precipitaciones (Zoungrana *et al.*, 2014)

Al obtener el promedio interanual, de EVI2 y NDVI para los años 2000 al 2019, y graficarlo acomodando las fechas por ciclo hídrico de acuerdo a la temporada de lluvias de la REPSA que tiene lugar en verano y otoño, y la temporada de secas que ocurre en invierno hasta mediados de la primavera es posible ver que en el

punto máximo de la temporada, el NDVI presenta una saturación de valores por lo que las variaciones finas en el comportamiento de la vegetación no se detectan.

La figura 9 muestra el punto en que el NDVI se satura aproximadamente en la semana 30 a finales del mes de julio y a partir del cual los valores se mantienen relativamente constantes hasta el inicio del mes de septiembre. Se muestra claramente la saturación por parte de NDVI al compararlo con EVI2, ya que éste último mantiene la tendencia ascendente esperada durante la temporada de lluvias, teniendo su punto máximo aproximadamente en el periodo del 21 al 28 de agosto. Mientras que el NDVI se mantiene constante por bastante más tiempo.

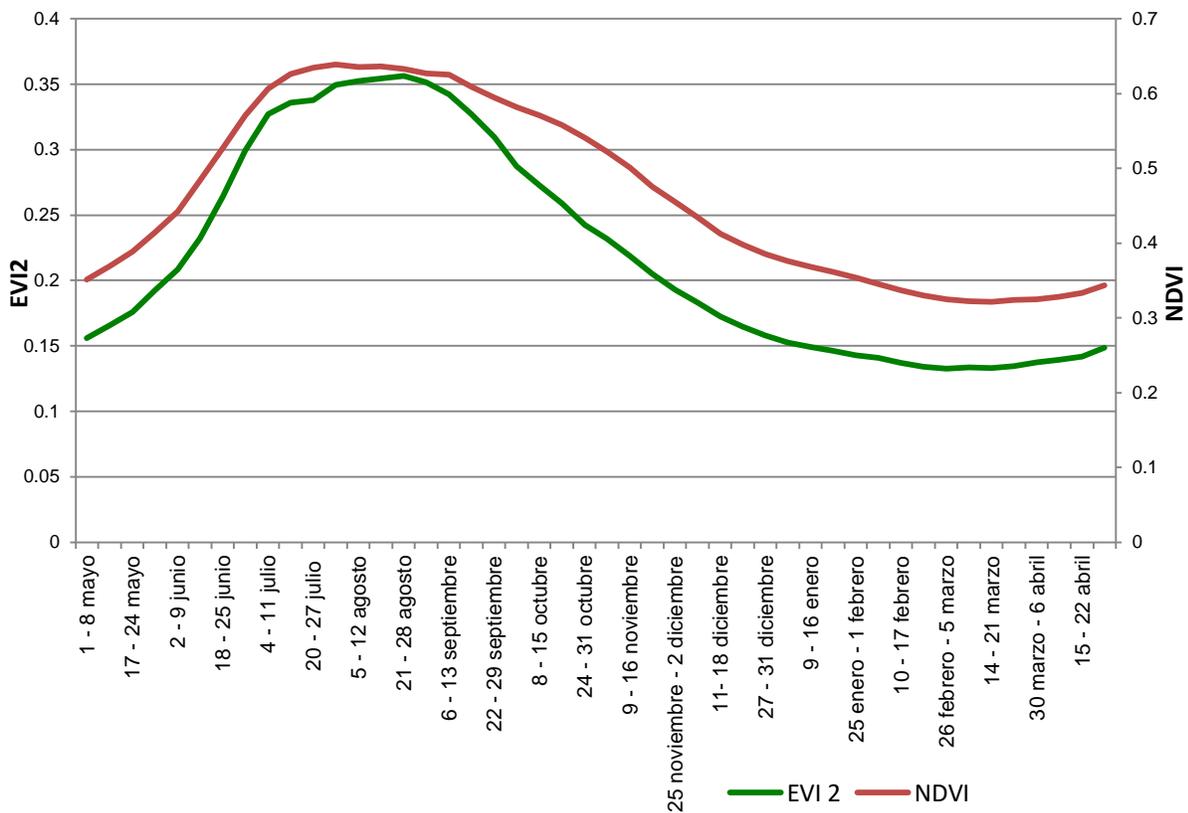


Figura 9. Curva típica calculada con los índices de verdor durante el ciclo hídrico. La temporada de lluvias ocurre en verano al inicio de junio, y concluye en otoño a mediados de noviembre. Mientras que la temporada de secas principia en invierno en el mes de diciembre y concluye en primavera a finales de mayo.

Un análisis más detallado de los valores de EVI2 tanto en su estacionalidad como en su tendencia se apoya las características del tipo de vegetación que existe en la REPSA y las especies que predominan en la misma, específicamente en la zona del Espacio Escultórico donde se llevó a cabo este estudio.

Actualmente, la vegetación en la REPSA está conformada por 377 especies, siendo la familia Asteraceae la mejor representada con 105 especies, seguida por la familia Poaceae con 26 especies, Fabaceae (20), Euphorbiaceae (14), Pteridaceae y Solanaceae (con 13 cada una), Convolvulaceae (12) y finalmente, Orchidaceae (11). Las malezas conforman el tipo de vegetación más representativa con 176 especies (47% del total), siendo Asteraceae la familia más diversa (58 especies) (Castillo-Agüero *et al.*, 2009).

El matorral xerófilo es un tipo de vegetación común de ambientes áridos y semiáridos, abarca un 40% del territorio en México por lo que se considera como el tipo de vegetación más extendido (Rzendowski, 1978). En la REPSA abundan las especies perennes (aquellas plantas que mantienen sus hojas durante todo el año) teniendo como las más representativas a las dalias (*Dahlia coccinea*, *D. pinnata*), la oreja de burro (*Echeveria gibbiflora*, *E. coccinea*), el tepozán (*Buddleja cordata*, *B. parviflora*, *B. sessiliflora*) y el palo loco (*Pittocaulon praecox*) como la especie característica de la REPSA (Castillo-Argüero *et al.*, 2016).

Sin embargo, al tratarse de un relicto con una constante interacción urbana, la REPSA ha sufrido cambios en la composición de su comunidad por la aparición y presencia de especies introducidas, entre estas especies predomina el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), el eucalipto (*Eucalyptus resinífera*), el diente de león (*Taraxacum officinale*), la lechuguilla común (*Sonchus oleraceus*) y zacate escobillas (*Muhlenbergia robusta*). Actualmente, muchas de estas especies se encuentran en casi toda la reserva debido que representan una dispersión de semillas y una tasa de crecimiento superior a las especies endémicas. La maleza, es el tipo de planta invasora más común en la vegetación introducida con 25 especies, ocupando un 6% del total de la reserva. Es importante resaltar que las plantas como el zacate escobillas y el tepozán podrían estar sustituyendo al palo loco, el cual caracteriza fisionómicamente la comunidad del matorral y que

actualmente se está restringiendo a los sitios más conservados y con menor acceso antropogénico de la REPSA (Castillo-Argüero *et al.*, 2016).

En cuanto a la estacionalidad de la vegetación en la REPSA, según la información del Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía, se tiene registro que el 80% de la precipitación anual comienza en el mes de junio y continúa hasta octubre, durante la temporada de lluvias la cubierta vegetal se describe como muy cerrada y abundante, sobre todo en los microambientes más céntricos de la reserva debido a tener estratos con formas de vida herbácea y arbustiva como dominantes (Castillo-Argüero *et al.* 2004, 2009). Es en estos meses en que el índice de verdor muestra un aumento considerable, el cual se puede corroborar en la figura 9 de comparación entre EVI2 y NDVI.

La época de secas tiene su principio en el mes de noviembre hasta mayo, en este periodo las especies reducen al máximo el consumo y gasto de nutrientes, además de sobrevivir con el almacenaje de agua de la temporada de lluvias. Durante la época seca, se considera que sólo el 16% de las plantas nativas no entran en un estado de latencia manteniendo hojas y en algunos casos, sus flores visibles, el resto de las especies se encuentran en estado de latencia (SEREPSA, 2014).

Es importante comentar que la presencia del matorral xerófilo a la gran altitud en que se encuentra la REPSA (2200 – 2500 m.s.n.m. aproximadamente) es poco común, más aún el sustrato volcánico originado en la explosión del volcán Xitle no alberga típicamente vegetación de matorral en otras partes del país. La zona en donde se ubica la REPSA cuenta con lluvias continuas todo el año y las temporadas de secas no son tan extensas, al ser clasificado con un clima templado subhúmedo (González-Medrano, 2003), se considera que este matorral recibe una mayor precipitación (850 mm) que la que reciben en la mayoría de los matorrales de su tipo (100 – 400 mm al año). A la altitud en que se encuentra, y con la combinación de temperatura y precipitación que se da en la zona, la vegetación predominante que se desarrolla sería un bosque templado, sin embargo, lo que propicia el desarrollo del material xerófilo, es el suelo volcánico, el cual es somero y con mucha roca descubierta. Este tipo de suelo pone a las plantas en una condición de sequía y pobreza de nutrientes, a pesar de las lluvias

constantes, el agua no puede ser retenida al filtrarse rápidamente, lo cual ocasiona que las raíces no puedan crecer a mucha profundidad por el sustrato rocoso, por lo que las plantas enfrentan una sequía similar a la que experimentarían en zonas semidesérticas. Por esta razón, la vegetación que logra prosperar serán suculentas, con una gran capacidad de retención de agua, y arbustivas y herbáceas, con raíces poco profundas y perennes que toleran la pérdida de agua.

A pesar, de estas diferencias ambientales, el matorral de la REPSA conserva afinidades con otros matorrales con respecto a los patrones de formas de crecimiento y en el ciclo de vida, ya que la escasez de suelo promueve la resistencia al estrés hídrico.

Por estas razones, se decidió continuar el estudio fenológico con la serie de datos de EVI2, ya que posee una estimación más cercana a la estacionalidad registrada para el clima y vegetación de la REPSA, además de una mejor coincidencia con la temporada de lluvias y secas.

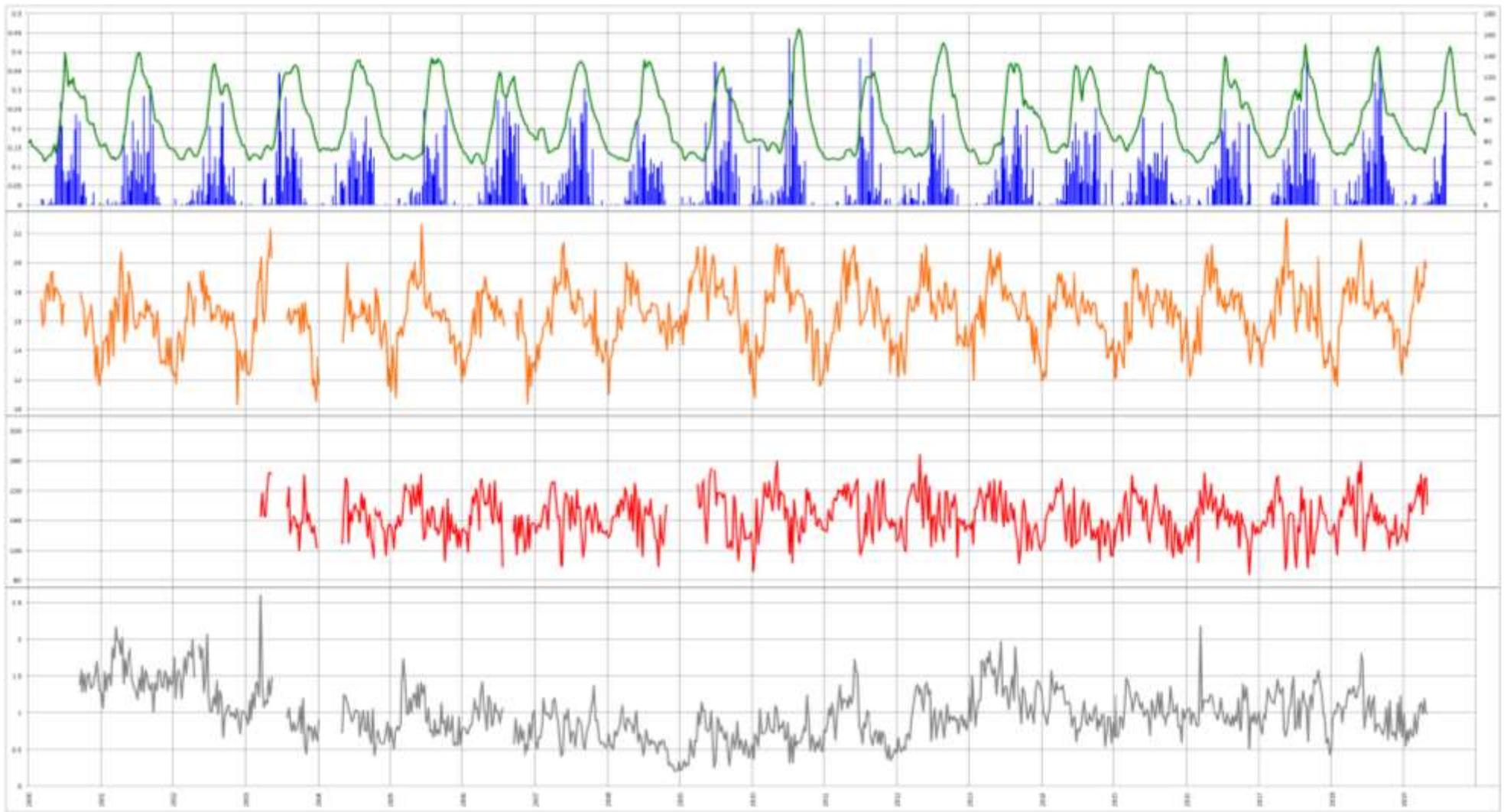
Es importante reconocer los patrones meteorológicos de la zona para entender el comportamiento cíclico y estacional de la vegetación de la región (Fu *et al.*, 2018), Éstos eventos estacionales marcan el aumento y la disminución del índice de verdor de la vegetación. En los ecosistemas se reconoce que las variaciones en los factores climáticos influyen en el ciclo estacional de las plantas como una respuesta para mantener y estabilizar su ciclo de vida en temporadas estables y continuas a través de los años, como resultado, se reconoce que la vegetación tiene un SOS al comienzo de la primavera debido a la abundancia de luz solar y un probable aumento de lluvias, mientras que habrá un EOS a inicios del otoño, en que el metabolismo de las plantas se reduce debido a un decremento en ciertos factores climáticos por lo cual el índice de verdor también se ve reducido e incluso habrá ciertos periodos de latencia (Rohde *et al.*, 2011).

La temperatura y la precipitación son los parámetros primarios que afectan la fenología del ecosistema, se ha encontrado que un aumento en la temperatura durante el verano puede retrasar el EOS (Marchin *et al.*, 2015). Sin embargo, la precipitación resulta ser el factor que tiene una influencia directa en la

estacionalidad de las plantas y en el tiempo en que ocurren el SOS y EOS (Liu *et al.*, 2016).

La figura 10 muestra el efecto que ejerce la temperatura y la precipitación en la estacionalidad de la vegetación de la REPSA. La gráfica de temperatura muestra que los valores máximos de cada año comienzan en los meses de marzo hasta finales de septiembre cuando desciende la temperatura. Se ha demostrado que la temperatura tiene un papel importante en la duración de la temporada de verdor, un aumento considerable a mitad de la temporada ocasionará un retraso en el EOS, este suceso es más común entre la vegetación caducifolia (Liu *et al.*, 2016; Estiarte y Peñuelas, 2015). Sin embargo, el efecto que tiene la temperatura en la vegetación y su estacionalidad, se da de manera retardada y el nivel de respuesta que tenga el SOS y EOS dependerá de que tanto varíe en niveles con respecto al promedio de temperatura de la zona en que se encuentra la vegetación (Cong *et al.*, 2017). Esta respuesta tardía por parte de la vegetación se puede observar en la figura 10, donde los valores más altos de la temperatura se dan unos meses antes de que el EVI2 alcance su valor máximo, incluso en ese momento la temperatura comienza a decaer.

Por este desfase entre la temperatura y el EVI2, es factible considerar que la precipitación resulte ser el parámetro fenológico que tenga un efecto temporal más directo en cuanto al SOS y el EOS, esto puede deberse al hecho de que la vegetación predominante son las malezas y plantas carnosas, las cuales tienen ciclos de vida que dependen más de la cantidad de agua que puedan recolectar que por la temperatura o la luz solar que sean capaces de captar. Considerando las latitudes de la REPSA, y por presentar un clima donde la estacionalidad está dada en gran parte por la lluvia que, por la temperatura o la luz, se observa que los patrones fenológicos se relacionan más con la disponibilidad de agua que con cualquier otro factor.



 EVI2

 Precipitación
(mm)

 Temperatura
(°C)

 Radiación Solar
(W/m²)

 Velocidad de viento
(m/s)

Figura 10. Serie interanual de las variables meteorológicas de la REPSA.

La radiación solar no se considera como un factor directo en la fenología de la REPSA, la figura 10 muestra que las fluctuaciones de radiación son paralelas a la temperatura, es importante resaltar que, al encontrarse en una zona templada, un clima considerado poco común o anormal para la presencia de un matorral xerófilo como es la vegetación de la REPSA, el efecto directo de la radiación es mínima en la estacionalidad de la vegetación. El mismo hecho ocurre con la velocidad del viento, el cual no presenta una correlación con los niveles de EVI2.

El Análisis de Componente Principales entre el EVI2 y los distintos parámetros climáticos muestra que 3 componentes tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1.0. En conjunto ellos explican 78.462% de la variabilidad en los datos originales (Tabla 3, Figura 11).

Tabla 3. Análisis de componentes principales entre el EVI2 y los parámetros climáticos.

Componente	Eigenvalor	Porcentaje de varianza	Porcentaje acumulado
1	2.09	34.81	34.81
2	1.60	26.67	61.48
3	1.02	16.98	78.46
4	0.58	9.73	88.19
5	0.41	6.80	94.99
6	0.30	5.01	100.00

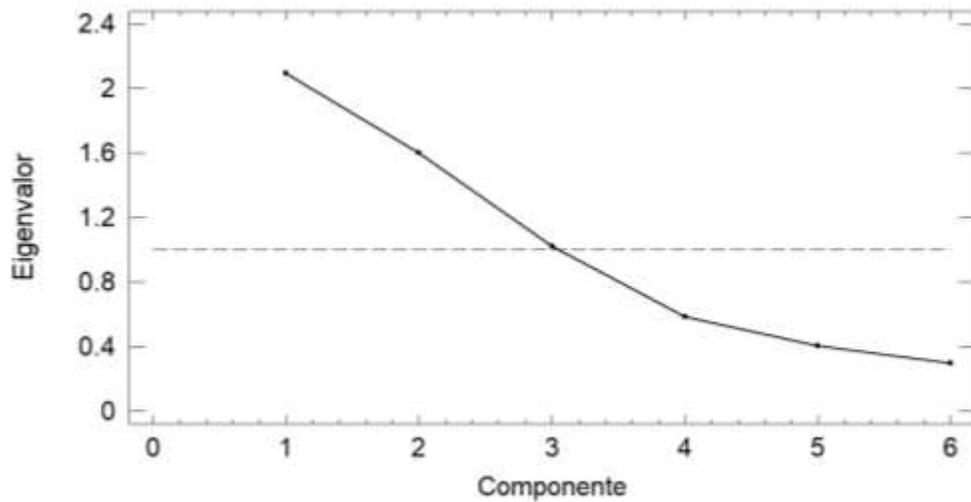


Figura 11. Gráfica de sedimentación entre los eigenvalores y los componentes.

Los resultados del ACP indican que el EVI2 presenta una relación positiva con la precipitación esto es, valores altos de EVI se relacionan con valores altos de precipitación. En cuanto a la temperatura, radiación solar y velocidad del viento se correlacionaron positivamente entre ellas (Figura 12).

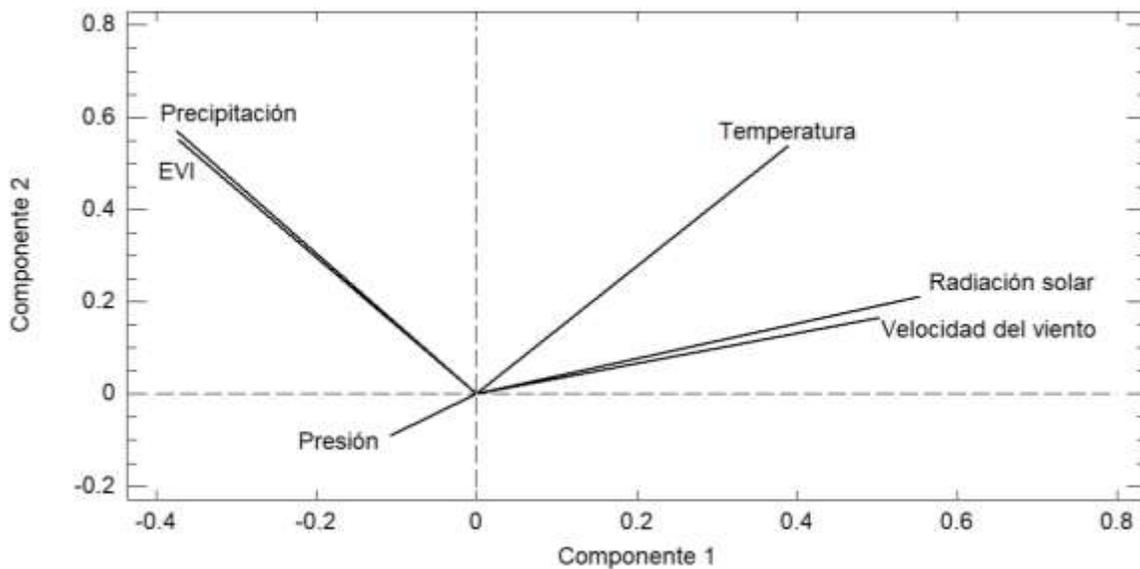


Figura 12. Representación del ACP entre el EVI2 y los parámetros climatológicos.

Los resultados de la correlación de Pearson indicaron una correlación positiva significativa entre el EVI2 y la precipitación (0.62, $p < 0.05$) y temperatura (0.09, $p < 0.05$) y una correlación negativa significativa con la velocidad del viento (-0.19, $p < 0.05$) y la radiación solar (-0.18, $p < 0.05$). La presión no presentó una correlación con los valores de EVI (0.0589, $p > 0.05$).

Por tanto, se puede considerar que el matorral xerófilo de la REPSA tiene una respuesta directa a la temporalidad de la precipitación.

La figura 13 muestra la relación directa entre la precipitación y los niveles de EVI2 desde el año 2000 hasta mediados del 2019. Se observa que el aumento o descenso de la precipitación precede las variaciones de EVI2, en el registro temporal de datos se corroboró que el EVI2 evidencia una respuesta a los cambios de precipitación de siete a quince días posteriores aproximadamente.

Además de mostrar una respuesta casi inmediata a la presencia de lluvias, el EVI2 muestra una respuesta tanto a la cantidad de lluvia como al tiempo de duración de las mismas, esta aseveración se puede presenciar en el año 2006 (figura 11), el cual fue el segundo año con mayor cantidad de lluvias mensuales promedio (25.38 mm) y la duración de verdor más larga en comparación con los demás años, con 288 días (figura 13-d), la tabla 1 muestra que el año 2006 tuvo el final de temporada más largo, concluyendo hasta el periodo de 10 – 17 de febrero del 2007. Las lluvias atípicas a finales de enero del 2007 explicarían el pequeño incremento de EVI2 y el alargamiento de la temporada de crecimiento (figura 13)

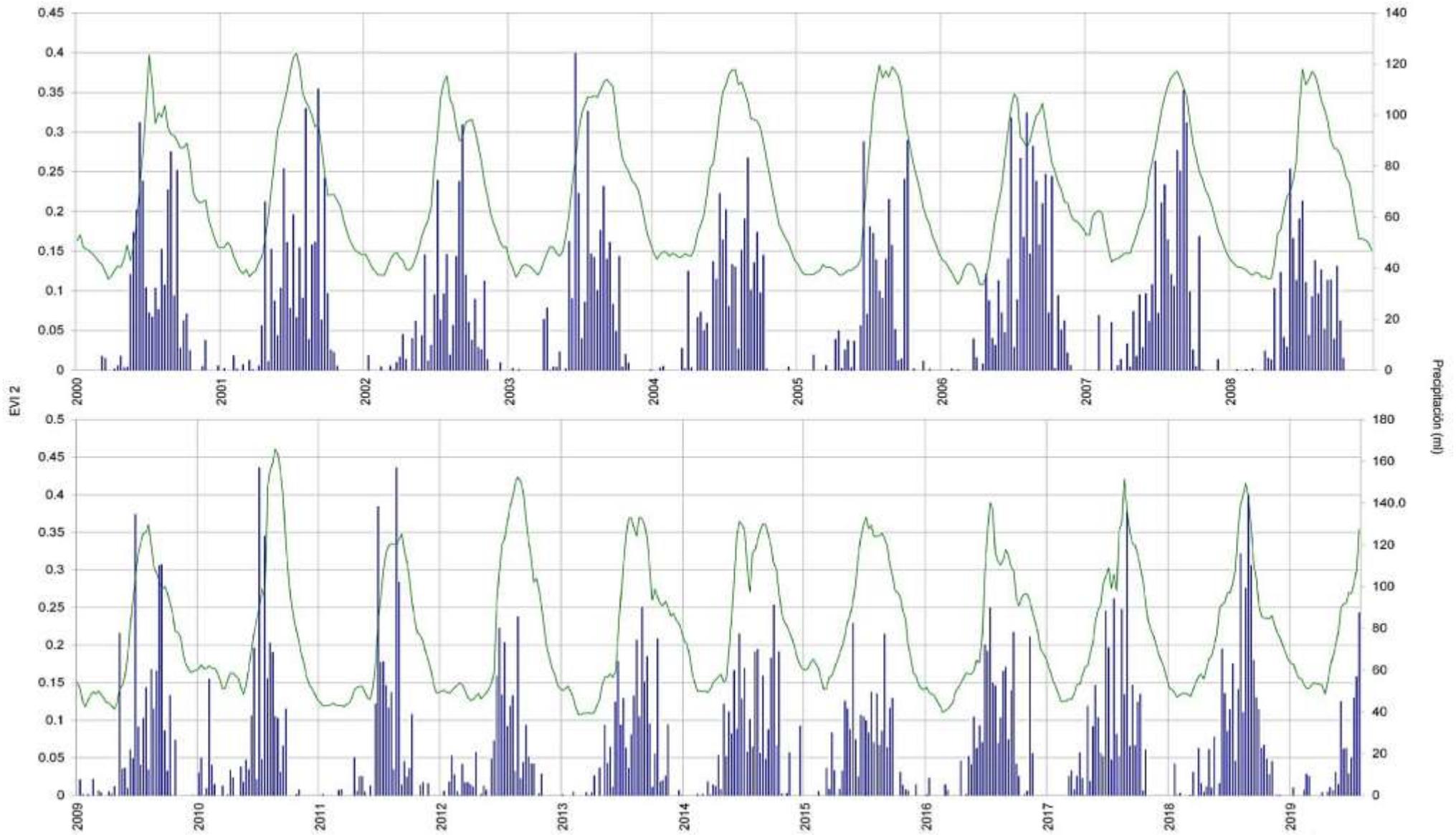


Figura 13. Serie interanual de EVI2 con el filtro Savitzky-Golay y precipitación (mm).

Opuesto al 2006 como el año con una temporada de verdor de mayor duración, el año 2010 presenta la menor duración de verdor con solo 150 días, a pesar de que este año tuvo el valor de lluvia máximo en el periodo del 3 – 10 de julio con 157 mm y el valor máximo de EVI2 de 0.46 en el periodo 20 – 27 de agosto. El hecho de que el EVI2 máximo ocurra un mes después de la precipitación demuestra la respuesta directa de la vegetación con este parámetro, ya que el EVI2 presentó un aumento inmediato a finales de julio pasando de 0.26 a 0.4.

Salvo las excepciones descritas, los demás años presentan una estacionalidad promedio acorde a las temporadas de lluvias y secas para el ecosistema de la REPSA, existe registro de algunos descensos o aumentos en EVI2 puntuales, como el caso del 2014 cuyo EVI2 presenta un descenso abrupto y una recuperación de similar intensidad a mitad de la temporada de verdor, en otros años este suceso se repite aunque no con la misma intensidad como en los años 2000, 2016 o 2017, en que a mitad de la temporada de lluvias ocurre una pequeña sequía, este fenómeno se conoce como sequía intraestival, la cual ocurre durante los meses con más lluvia, de manera incierta en cuanto a duración y el momento de inicio y de final. En México la sequía intraestival es recurrente en todo el país y sucede durante los meses de mayo a octubre (Reyna-Trujillo *et al.*, 2007). La figura 13 muestra estos momentos en que la precipitación disminuye considerablemente, además de ser consistente con la información obtenida del monitor de sequía en México de CONAGUA, catalogadas como D0, sequía anormal hasta D4, sequía excepcional, y cuyo registro data del año 2003 a la fecha, para la delegación de Coyoacán la temporada de sequía se da mayormente entre los meses de mayo a octubre con una intensidad “D0”, sequía anormal, en todos los años, mientras que los años 2007, 2009 y 2011 fueron los únicos que presentaron las sequías más graves durante los mismos meses de mayo junio con una sequía de intensidad severa o “D2” (CONAGUA, 2019), el EVI2 sigue bastante bien estos descensos, relativos, en la precipitación, es decir, hay una respuesta estacional pero también intra-estacional a la disponibilidad de agua.

La figura 14 muestra los promedios interanuales de precipitación y EVI2 considerando el ciclo hídrico registrado para la Ciudad de México, el cual tiene el

inicio de temporada de lluvias el primero de mayo hasta mediados de octubre y la temporada de secas se da de finales de octubre hasta el final de abril. El ciclo hídrico en la REPSA está documentado por Gómez-Mendoza y Sánchez tomado de Castillo-Argüero et al, (2007), quienes mencionan que el 80% de la precipitación total se da en los meses de junio a octubre.

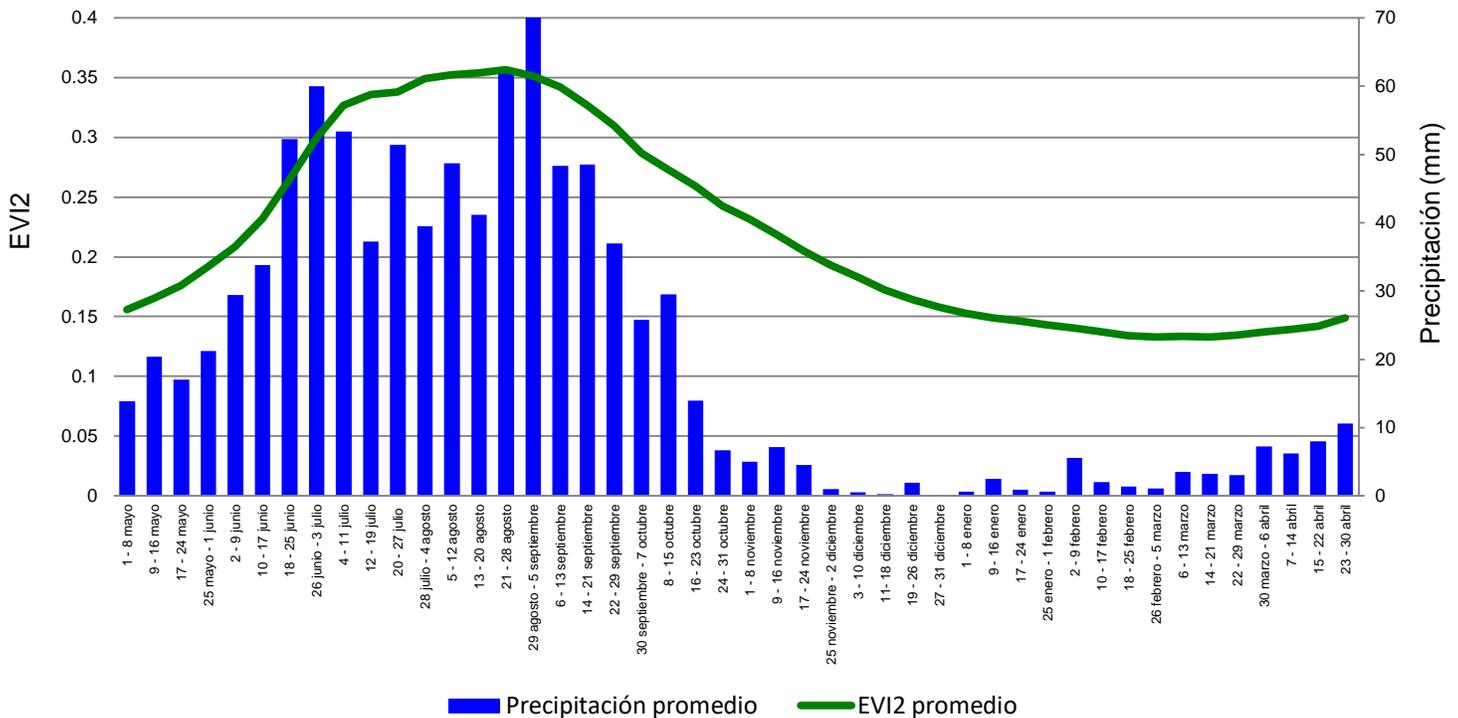


Figura 14. Promedio interanual de EVI2 y precipitación (mm).

Los resultados observados en la figura 14 indican que el EVI2 responde directamente a la cantidad de lluvia que capta la vegetación de la zona del núcleo oriente, el espacio escultórico. Se observa el aumento gradual de EVI2 conforme avanza la temporada de lluvias, incluso en el periodo del 12 al 19 de julio cuando ocurre una disminución en la precipitación, hay un descenso relativo en el EVI2. En el periodo del 5 al 12 de agosto hasta el periodo del 14 al 21 de septiembre, se concentró la mayor cantidad de lluvia y los valores más altos de EVI2. Durante la temporada de secas, el valor de EVI2 disminuye por la poca actividad fotosintética de la vegetación, en el caso de la zona núcleo oriente se estima que el valor de EVI2 no llegará a cero dado que un registro de EVI2 menor a cero refiere a una zona árida con un porcentaje muy bajo en biomasa vegetal como el caso de

desiertos cálidos o helados (Jiang *et al.*, 2008). El hecho de que el EVI2 se mantenga estable la mayor parte del tiempo que dura la temporada de secas, puede deberse a la presencia mayoritaria de plantas perennes dentro de la vegetación de la REPSA, las cuales se conservan verdes durante todas las estaciones o por la mayor parte del año.

A fin de reconocer el principal factor fenológico que regula la temporada de verdor de la vegetación de la REPSA, se utilizó la serie de datos de EVI2 previamente analizada con TIMESAT para obtener la estacionalidad general de la vegetación de la zona del núcleo oriente, la figura 15 muestra el promedio final del estudio y manejo de los datos dados por el satélite MODIS de acuerdo con lo propuesto por Eklundh y Jönsson, (2017).

La gráfica de estacionalidad anual (figura 15), muestra una estimación de los valores máximos y mínimos de EVI2, así como las fechas en que ocurre el inicio y el final de la temporada de verdor de la vegetación. La zona núcleo oriente del Espacio Escultórico, muestra que el SOS ocurre en el periodo del 17 al 24 de mayo, el valor máximo de EVI2 aparece del 21 al 28 de agosto y el EOS tiene lugar en la semana del 3 al 10 de diciembre. La temporada de verdor del matorral xerófilo de la REPSA tiene una duración 223.32 ± 15.17 días aproximadamente, de finales de mayo a principios de diciembre (figura 12c). El SOS y EOS, presentan valores similares de EVI2 de 0.18, el valor máximo sucede antes de mitad de temporada en el día 223.32 ± 15.17 donde el EVI2 alcanza un valor de 0.358 ± 0.03 , el doble de intensidad que en SOS y EOS. Finalmente, el valor mínimo de estacionalidad tiene lugar en el periodo del 26 de febrero al 5 de marzo con un EVI2 de 0.13, tres meses antes del inicio de la temporada de verdor, y que coincide con los meses de temporada de secas en la distribución de precipitación reportada en la REPSA (Gómez-Mendoza y Sánchez, 2004 tomado de Castillo-Argüero *et al.*, 2007). Es durante este momento con los valores más bajos de EVI2 que una porción considerable de la vegetación ha perdido y podría encontrarse en un estado de latencia para minimizar los efectos de la falta de agua y recursos.

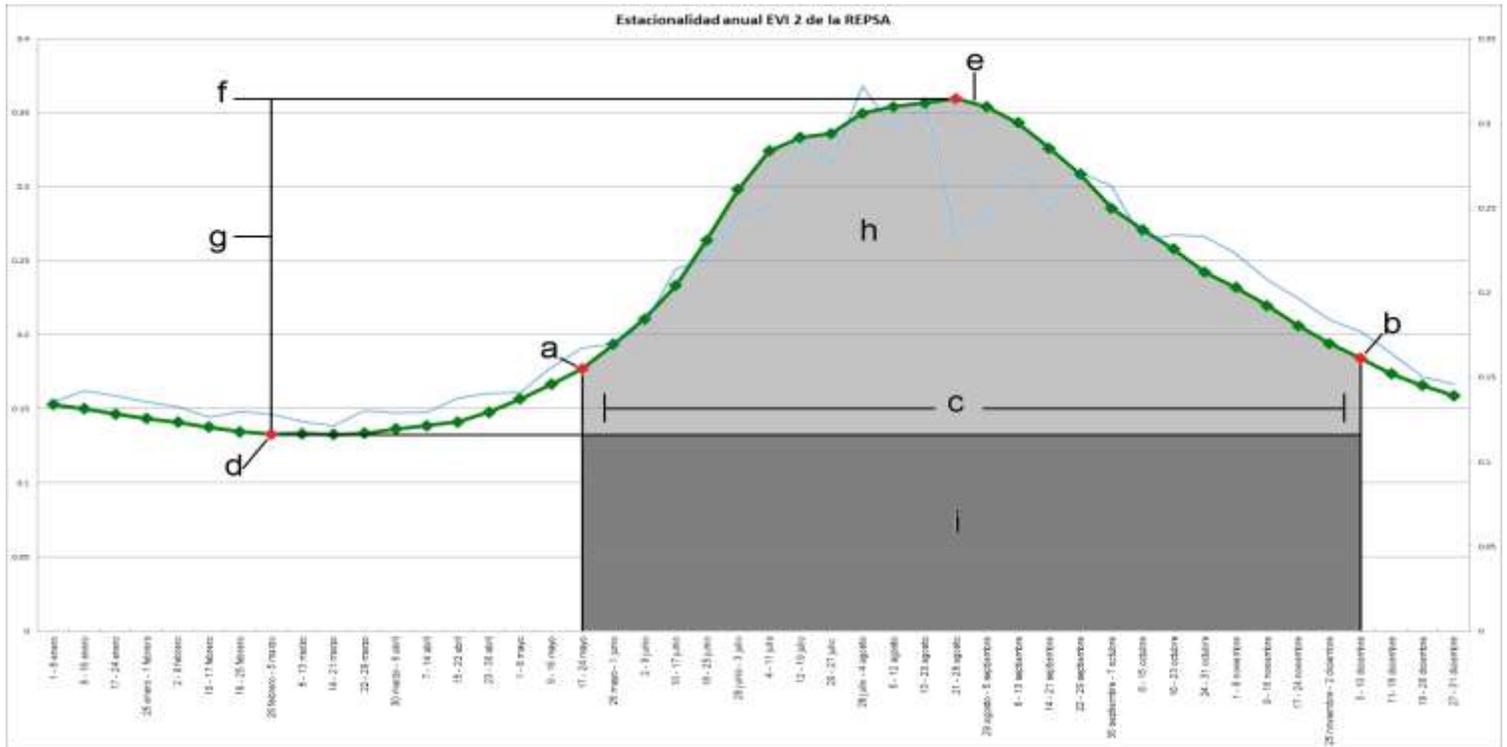


Figura 15. Parámetros de estacionalidad generados en TIMESAT a partir de los valores de EVI” del satélite MODIS en la REPSA. (a) inicio de temporada, (b) final de temporada, (c) duración de temporada, (d) valor base, (e) momento de la mitad de la temporada, (f) valor máximo, (g) amplitud, (h) valor integrado mínimo, (h+i) valor integrado máximo. En azul se muestra el EVI2 promedio de la serie interanual del 2000 al 2019, mientras que en verde se encuentra el EVI2 con el filtro Savitzky-Golay.

Las gráficas de estacionalidad permiten tener un entendimiento más exacto de la dinámica temporal del ecosistema, los resultados obtenidos en este trabajo muestran coincidencia con otros estudios realizados en ambientes semejantes a la REPSA, como Tan *et al.* (2008), quienes obtuvieron la estacionalidad de un sitio con vegetación decidua y con presencia de matorrales, en el bosque de Harvard en el estado de Massachusetts, E.U., cuyos parámetros de estacionalidad mostraron que el SOS ocurre a mediados de mayo y el EOS ocurre a principios de octubre, además de la similitud en fechas de ocurrencia, la temporada de verdor presentó una gráfica de estilo campana con cambios graduales en los niveles de EVI2.

Estudios más recientes como el de Fu *et al.* (2018) en la región noreste de China en un ambiente templado con una vegetación decidua se observó que la temporada de verdor es similar a la registrada en la REPSA, al tener un SOS en el día juliano 136 (16 de mayo) y el EOS en el día juliano 289 (16 de octubre). De la misma manera Cong *et al.* (2016) llevó a cabo un estudio a gran escala, abarcando todos los ecosistemas presentes en el territorio de China, donde los días en que los SOS y EOS ocurren con mayor frecuencia, se ubican a mediados de mayo y principios de octubre, respectivamente. La revisión bibliográfica permite demostrar que el ecosistema de la REPSA tiene una temporada de verdor y parámetros de estacionalidad comparables a los climas similares en otras regiones ya estudiadas. Sin embargo, es importante resaltar que la temporada de verdor es más amplia en la REPSA ya que se extiende hasta diciembre teniendo una duración promedio de casi ocho meses.

En contraste, la estacionalidad de la vegetación presente en ambientes templados o semi-templados tiene una duración promedio de seis meses (de mayo a octubre). La extensión en la duración de la temporada de verdor en la REPSA, probablemente se deba a que la vegetación está conformada en su mayoría por plantas comunes de ambientes áridos o semiáridos, como carnosas o matorrales previamente descritos, el ciclo de vida de éstas plantas y su capacidad de almacenar mayores cantidades de agua se distingue de las especies caducifolias que dominan otros sitios semiáridos, siendo ésta la razón por la cual la succulencia predominante puede ser la responsable de que la REPSA tenga una temporada de verdor más extensa que otros matorrales de ambientes templados.

Los parámetros de estacionalidad están regulados tanto por los factores fenológicos propios de la cobertura vegetal de una zona, como por los factores ambientales únicos de la región en que se encuentre el ecosistema. El promedio interanual nos proporciona el patrón fenológico esperado año con año, mientras que la variabilidad interanual permite mostrar los factores que influyen en la estacionalidad dependiendo de la cantidad de recursos de cada año

Además de mostrar los parámetros estacionales basados en los tiempos en que tienen lugar los eventos de la temporada de verdor como el SOS, el EOS o la

duración de temporada, la gráfica de estacionalidad anual muestra los parámetros de amplitud estacional, los cuales indican los valores promedio de la intensidad de verdor en que se esperaría encontrar la vegetación dependiendo del momento en el año en que se observe, como es el caso del valor base o mínimo (figura 15d), el cual tiene lugar en la temporada de secas en la REPSA, con un EVI2 de 0.13 en promedio y que tiene lugar en el periodo del 26 de febrero al 5 de marzo, el hecho de que el valor base ocurra en este momento del año podría deberse a que las plantas tienen una menor actividad fotosintética por la falta de agua. Opuesto a las características del valor base esperado en la REPSA, el valor máximo (figura 15f) se presenta en la mitad de la temporada de lluvias, presentándose con mayor frecuencia en el periodo del 21 al 28 de agosto, con un EVI 2 que puede triplicar la intensidad observada en la temporada de secas, alcanzando un valor de 0.36. De esta manera, con los valores base y máximo de EVI2 se obtiene la amplitud (figura 15g), es decir, los valores y el rango de intensidad de verdor y de actividad fotosintética en que fluctúa la vegetación, por lo que para la Zona del Núcleo Oriente o Espacio Escultórico de la REPSA, el EVI2 se espera registrar entre el rango de 0.13 a 0.36 de intensidad de verdor cada año, cualquier valor que se encuentre fuera de éste rango podría indicar la respuesta de la vegetación a un fenómeno meteorológico anormal o extraordinario, ya sea una sequía extendida o un exceso de precipitación, de cualquier manera la intensidad de cada evento tendría que ser considerable para que pudiera modificar la estacionalidad anual. Finalmente, se incluye el valor integral mínimo (figura 15h), que describe de manera gráfica la diferencia en el valor de la intensidad del verdor entre el valor base y el SOS, y el valor integral máximo (figura 15h+i), el cual describe el valor del verdor y su intensidad entre el inicio, SOS, y el final, EOS, de la temporada.

La figura 16 muestra la tendencia en la estacionalidad para diferentes parámetros, con el objetivo de visualizar la dinámica de cada temporada de verdor de una manera más clara. Los parámetros a considerar son los inicios y finales de cada ciclo anual, así como la duración de cada temporada y los valores de EVI2 que se obtuvieron para cada año.

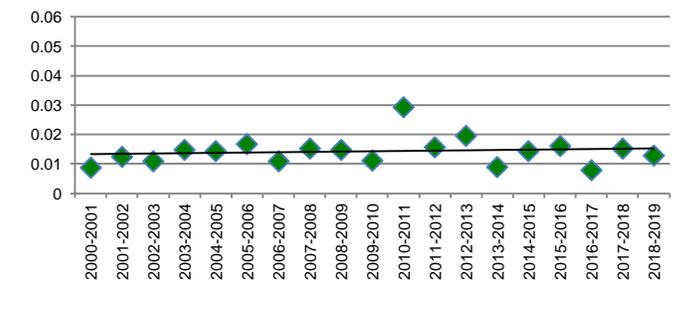
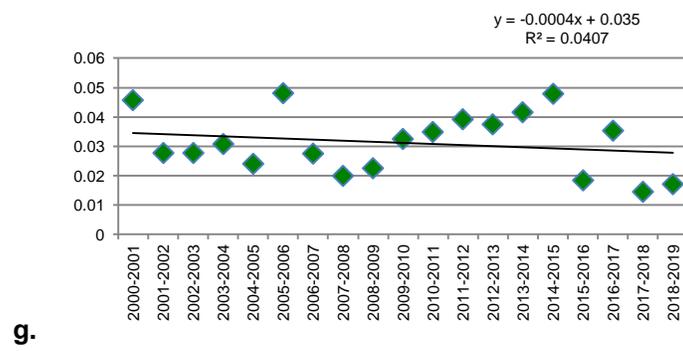
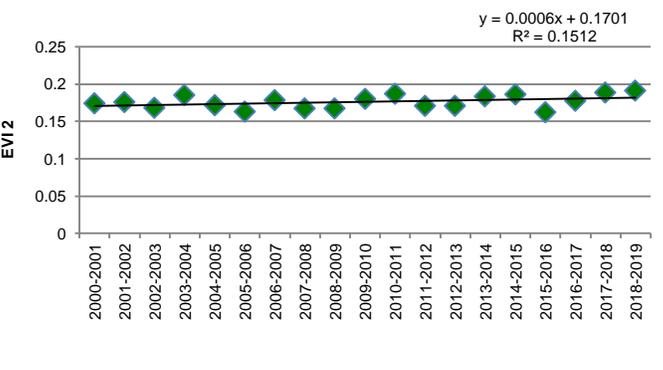
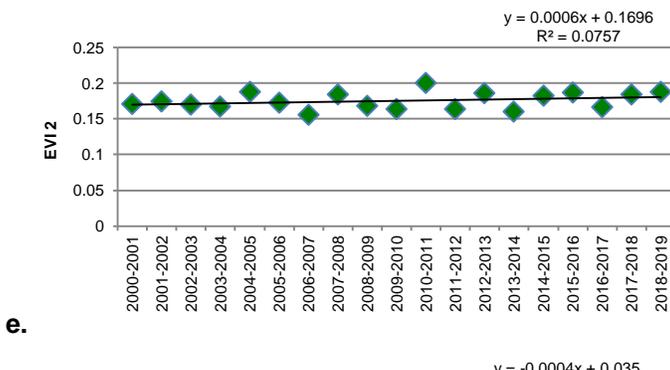
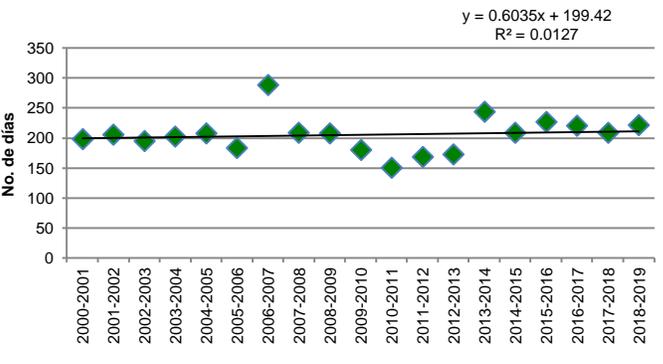
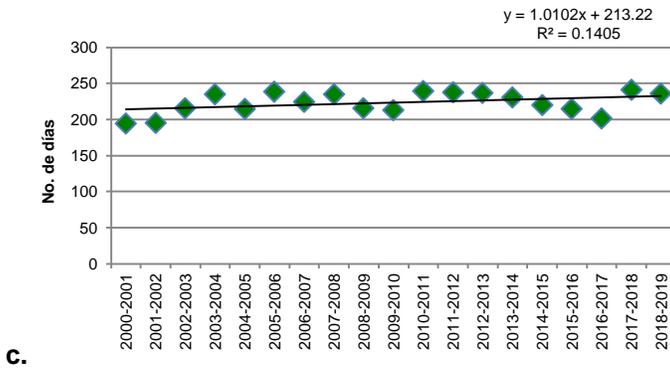
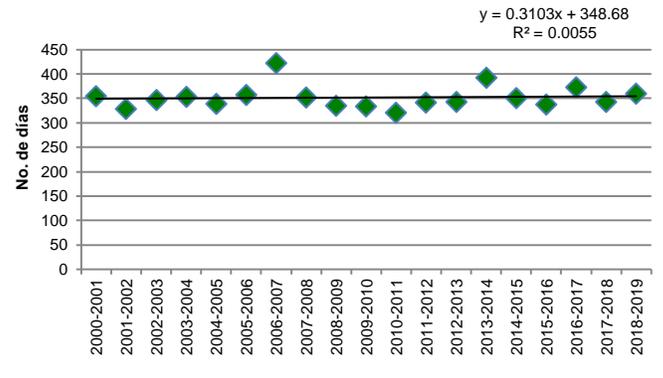
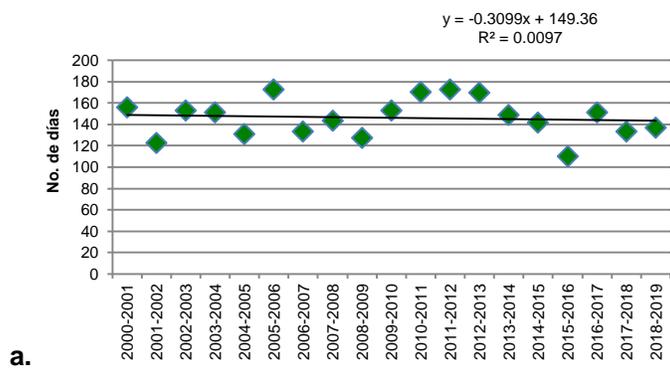


Figura 16. Tendencia de los parámetros de estacionalidad de EVI2 obtenidos con el filtro Savitzky-Golay. (a) inicio de temporada (SOS), (b) final de temporada (EOS), (c) ocurrencia del pico de temporada (POS), (d) duración de temporada, (e) valor inicial de la temporada, (f) valor final de la temporada, (g) derivada izquierda, (h) derivada derecha.

Tabla 4. Análisis de regresión para los parámetros de estacionalidad.

Parámetros	Regresión de pendiente	$F_{1,17}$	P
Inicio de estación (SOS)	0.01 ± 0.02	0.14	0.71
Final de estación (EOS)	0.31 ± 1.01	0.09	0.76
Ocurrencia de valor máximo (POS)	1.01 ± 0.61	2.78	0.11
Duración de temporada	0.603 ± 1.3	0.22	0.64
Amplitud	0.00 ± 0.00	0.22	0.65
Valor máximo estacional	0.001 ± 0.001	0.78	0.4
Pendiente izquierda	0.0003 ± 0.0004	0.72	0.41
Pendiente derecha	0.0001 ± 0.0002	0.25	0.62
Integral grande	0.02 ± 0.03	0.45	0.65

La serie de tiempo de SOS (figura 16a) muestra que la temporada de verdor ocurre entre 110 y 180 días después del inicio del año, el patrón de inicio es irregular entre los diferentes años dado que en algunos ocurre más temprano como son el 2001, 2004, 2008 donde empieza alrededor del día 150 del año, siendo el año 2015 el que tiene el inicio más temprano en el periodo del 7 al 14 de abril lo que puede deberse a que el 2014 tuvo lluvias constantes en los meses de noviembre y diciembre, y el 2015 presentó lluvias en temporada de sequía, por lo que un aumento inesperado de agua podría ocasionar que las plantas dejen el estado de latencia, apurando la temporada de verdor.

Mientras que el año 2005 presentó el SOS más tardío, teniendo lugar en el periodo del 18 al 25 de junio, hecho que coincide con el registro de precipitación de la figura 10, donde se muestra que ese mismo año tuvo una sequía prolongada

a inicios del mismo. Un fenómeno similar ocurre en los años 2010 al 2012, a pesar de que el 2010 y 2011 presentaron la mayor precipitación registrada en el periodo de ocho días con 157 ml cada uno, el máximo de lluvias ocurre en un periodo de tiempo muy breve lo cual causó una sequía prolongada que afectó el SOS del año 2011, iniciando en el periodo del 18 al 25 de junio. El 2012, también fue de los años con un SOS tardío, debido a que éste año presentó la menor cantidad de precipitación, a pesar de tener lluvias anormales en los meses de enero a abril, la cantidad que llovió no fue suficiente para que la temporada de verdor pudiera comenzar.

El EOS (figura 16b) ocurre entre los 320 y 420 días después del primer día del año, mantiene una tendencia interanual más estable sin diferencias de ocurrencia entre cada año como ocurre con el SOS, los únicos años que presentan un EOS tardío son los años 2006, el cual fue el segundo año con más cantidad de precipitación pero siendo el que tuvo una distribución de lluvias más constante en el tiempo por lo que la temporada de crecimiento se alargó considerablemente, con un EOS que se retrasó hasta el 10 al 17 de febrero del siguiente año. El 2013 presentó lluvias atípicas en los meses de noviembre y diciembre lo que ocasionó un retraso en el EOS hasta enero del 2014 en contraste, el año que presentó el EOS más prematuro fue el 2010, el cual ocurre en el periodo del 25 de noviembre al 2 de diciembre, este hecho coincide con los bajos niveles de precipitación que hubo a lo largo del año, siendo que fue poca la captación de lluvia por parte de su vegetación, ésta entraría en estado de latencia más pronto por la falta de recurso.

El POS u ocurrencia del punto máximo de EVI2 (figura 16c), tiene lugar en promedio entre el día 200 y el 250 del año, presenta una tendencia a retrasarse cada año, esto debido a que el POS responde a la lluvia inmediata y no a las reservas de nutrientes como sucede con SOS y EOS. La duración de cada temporada (figura 14d) presenta un rango entre 150 a 230 días, el 2006 fue el año más extenso al durar 288 días, seguido por el 2013 con 244 días. Los años más cortos fueron el 2012 con 173 días, el 2011 con 168 días y el año 2010 tuvo la duración más corta con solo 150 días. Los días de duración de la temporada de

verdor registrados para cada año coinciden y son congruentes con los valores de SOS y EOS, y con los registros de precipitación.

Las gráficas de las derivadas indican la velocidad en que ocurre el aumento de verdor o derivada izquierda (figura 16g) y la disminución del EVI2, indicado por la derivada derecha (figura 16h). A mayor valor de la derivada izquierda mayor rapidez de reverdecimiento de la vegetación tras las primeras lluvias. Análogamente, a mayor valor de la derivada derecha, más rápidamente habrá ocurrido la senescencia durante el otoño e invierno. La velocidad del reverdecimiento es variable, teniendo años en que el incremento del EVI2 se da de manera inmediata como ocurre en los años 2000, 2005 y un incremento gradual a partir del año 2011 hasta el año 2014, mientras que los años 2015, 2017 y 2018 presentan un inicio en el reverdecimiento más lento. La velocidad en que ocurre puede deberse a que la tasa de reverdecimiento depende de la cantidad de lluvia inicial tras la sequía, por lo que un inicio inmediato y acelerado podría deberse al aprovechamiento de la vegetación a una lluvia atípica, mientras que un aumento paulatino y lento podría indicar que la vegetación está obteniendo recursos de una manera lenta pero constante por lo cual no requiere apurar su ciclo estacional. En contraste con la derivada izquierda y el inicio de la temporada de verdor, la derivada derecha indica la velocidad a la que ocurre la senescencia y defoliación y consecuente pérdida de actividad fotosintética, los valores de éste parámetro son más constantes que la tasa de reverdecimiento, aunque destaca el año 2010, cuya senescencia es la más rápida de la serie interanual. Tal ocurrencia acelerada puede deberse a un fin prematuro de la temporada de lluvias, lo cual obligaría a la vegetación a entrar a su estado de latencia de manera temprana. El hecho de que los valores de la derivada derecha sean menos variables se debe a que en este momento de la temporada de verdor la vegetación puede hacer uso de los recursos previamente almacenados desde el inicio de la temporada, mientras que la variación en los valores registrados en la derivada izquierda se debe en gran medida a que la vegetación está dependiendo de los recursos que ofrece el medio ambiente y no de sus reservas.

El adelanto o retraso de la temporada de verdor ha sido documentado por Cong *et al.* (2016) y Shen *et al.* (2014), como consecuencia al desfase del valor máximo del EVI2 al estar relacionado con las variaciones de los parámetros climáticos como aumento de temperatura y/o el retraso de la época de lluvias. En una escala temporal menor, como es el caso de este estudio, la tendencia anual del SOS y EOS y sus variaciones temporales no tienen una función de predicción respecto a la dinámica de la vegetación en años futuros, dado que el ecosistema se encuentra en evolución constante.

Esta diferencia de días en que unos años sean más tardíos o más tempranos, es consecuencia de la disponibilidad de recursos, a pesar de que se reconoce a la temperatura como el factor principal en cuanto al SOS en ecosistemas como bosques templados del norte de Estados Unidos y regiones de Europa (Zhang *et al.*, 2004), es importante mencionar que en la literatura científica el factor de la temperatura y su efecto en el comienzo del SOS depende del clima del ecosistema que se estudia (Yu *et al.*, 2003), la temperatura es el factor principal para el SOS en ecosistemas que se encuentren a una mayor altitud y que presenten un clima frío (Piao *et al.*, 2011), tal es el caso de la cordillera de los Pirineos en Francia con una temperatura invernal promedio de -2° C (Guyon *et al.*, 2011), la meseta tibetana con una altitud media de 5,000 metros y temperaturas anuales promedio de -4° C (Zhang *et al.*, 2013) o como ocurre en la temporada de florecimiento en el clima subalpino de Colorado, EE.UU., dadas las bajas temperaturas con una media mensual de 10° C y heladas constantes (Caradonna *et al.*, 2014), en sitios con un clima extremo la vegetación requerirá de un aumento de temperatura antes de la primavera para poder iniciar la temporada de verdor.

Mientras que los ecosistemas que presentan climas cálidos, templados o con temperaturas anuales constantes, el factor que influirá en el SOS será la precipitación y las especies vegetales que conformen al ecosistema (Peñuelas *et al.*, 2004; Cleland *et al.*, 2006; Sherry *et al.*, 2011; Shen *et al.*, 2011). Las plantas suculentas que habitan en zonas áridas o semiáridas dependerán de la precipitación para dar lugar al SOS, como ocurre en el desierto de Sonora, específicamente en zonas con suelos pocos profundos las suculentas presentan

su máximo de índice de verdor entre los meses de julio a octubre (Crimmins *et al.*, 2008).

La altitud y la latitud tienen un impacto en la caracterización del clima de los ecosistemas, el cual afectará los parámetros de estacionalidad de la vegetación presente. Se reconoce que entre mayor sea la altitud y la latitud, la temperatura será el factor principal y directo en el SOS, mientras que en ecosistemas de menor altitud y latitud, la precipitación tendrá un efecto directo en la vegetación (Crimmins *et al.*, 2010).

El EOS, también se verá afectado por estos parámetros fenológicos, aunque en menor medida que el SOS. Tanto la cantidad de lluvia que capten como un posible aumento de temperatura podrán afectar el tiempo en que ocurra el EOS, sin embargo, éste estará más condicionado al tiempo en que el SOS tenga lugar, puesto que al momento del POS la vegetación entrará en un estado de latencia y hará uso de las reservas que acumuló durante la temporada de verdor (Keenan y Richardson, 2015; Wang *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2016). La dependencia de EOS respecto a SOS se puede observar en las gráficas de valor inicial (*e*) y de valor final (*f*) de la figura 16, el valor de EVI2 en que se identifica el SOS y el EOS se encuentra entre 0.15 y 0.2, estos valores fueron previamente definidos al ajustar los parámetros de TIMESAT, la distribución de valores finales es más constante que los valores iniciales, debido a que el SOS depende de la cantidad de recursos y el tiempo en que el clima permita a la vegetación comenzar a recolectar y generar energía sin hacer uso de sus reservas como en EOS.

Los parámetros de estacionalidad presentan un espectro amplio de variabilidad entre cada año, en los parámetros de temporalidad los tiempos en que ocurre cada evento puede diferir hasta por meses de un año al siguiente, estas variaciones considerablemente azarosas y amplias en la estacionalidad de años continuos podrían indicar la presencia de una alteración constante en la dinámica de la temporada de verdor de la vegetación, por lo cual, se optó por realizar un análisis de regresión en los parámetros estacionales que presentaron mayor variación en sus valores.

El análisis de regresión que se observa en la tabla 3, se llevó a cabo con la finalidad de reconocer si las variaciones anuales en los parámetros estacionales mostraban una tendencia ascendente o descendente con el paso de los años, como consecuencia de las condiciones climáticas de la REPSA, una tendencia significativa sería detectar que el SOS o EOS sucede más temprano o más tarde de manera consistente año con año. Sin embargo, la regresión de pendiente demostró que no existen alteraciones significativas en la tendencia de los parámetros, la mayoría de las pendientes de regresión no son significativamente diferentes de cero. Dado que para todos los parámetros considerados en el análisis de regresión lineal se obtuvo que $P > 0.05$ entonces se rechaza que exista una tendencia en que los parámetros de temporalidad aumenten o disminuyan consistentemente respecto a años anteriores por cambios en la dinámica de la vegetación, por lo cual la variabilidad en el momento en que ocurren y los valores que perciben los años se debe a la variabilidad climática interanual, la cual redundaba en incertidumbre en la disponibilidad de los recursos necesarios para el ciclo de vida de la vegetación en la REPSA.

De manera similar, los parámetros cuantitativos, como los valores máximos y mínimos de EVI2 y la derivada izquierda y la derivada derecha demostraron que existe un amplio rango de valores en que pueden suceder, teniendo años en que el valor máximo es mayor que en otros pero sin mostrar que la tendencia sea significativa o que se mantenga constante para los próximos años. Este suceso podría deberse a que la serie de datos estudiada es de relativamente pocos años, en una zona muy acotada. Por lo cual los cambios en la dinámica de la vegetación son mínimos y sin una afectación permanente en las relaciones interespecíficas de plantas ni en sus ciclos de vida.

Además, el análisis de regresión lineal demuestra que existe un rango muy amplio en que sucede cada evento de la estacionalidad sin tener una afectación significativa en los tiempos en que, en promedio, deberían ocurrir así como en la duración. Finalmente, la REPSA presenta una vegetación dependiente de la cantidad de recursos que pueda obtener y cuya disponibilidad tendrá una repercusión en los tiempos estacionales de la temporada de verdor así como en la

intensidad en que suceda sin embargo, éstos tiempos se encuentran dentro de un rango tolerable para la dinámica de la vegetación y por tanto no muestra alteraciones permanentes o cambios drásticos en su comportamiento en años futuros. Asimismo, el espectro en que suceden los parámetros se podría considerar a la estacionalidad de la vegetación de la REPSA como un tanto azarosa en cuanto a tiempo y el valor que EVI2 pueda presentar y adaptable a las perturbaciones y alteraciones que pudiera presentar las condiciones climáticas del lugar.

8. CONCLUSIONES

El espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada, MODIS, es una herramienta de análisis efectiva para evaluar la dinámica estacional de la vegetación sin comprometer la estructura del ecosistema

En la REPSA, la precipitación es el principal responsable de la variación de EVI2 ya que la vegetación al ser en su mayoría especies carnosas y matorrales tiene una respuesta inmediata a las variaciones de lluvia que perciban.

Los parámetros meteorológicos como la temperatura y la velocidad del viento no tienen un efecto significativo en la estacionalidad anual de la vegetación de la REPSA.

Las lluvias atípicas afectan los parámetros de estacionalidad. La presencia de lluvias en el mes de enero ocasionó un SOS más temprano, como en los años 2001 y 2015. La ausencia de lluvias y una temporada de secas más extensa propició un SOS más tardío, como en los años 2005 y 2011. Las lluvias constantes y atípicas en los meses de noviembre y diciembre atrasaron el EOS hasta el próximo año, como en los años 2006 y 2013.

La dinámica de la vegetación presente en la zona de estudio no tuvo cambios significativos que mostraran un cambio permanente en la estacionalidad. La variabilidad fenológica responde a la adaptación de la comunidad vegetal según la disponibilidad de recursos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., y Garbulsky, M. F. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Revista Ecosistemas*, 17(3).
- Álvarez, S.F.J., Carabia-Lillo, J., Meave del Castillo, J., Moreno-Casasola, P., Nava-Fernández, D., Rodríguez-Zahar, F., Tovar-González, C., y Valiente-Banueta, A. 1982 Proyecto para la creación de una Reserva en el Pedregal de San Ángel. Serie Cuadernos de Ecología, No. 1. México, D.F. UNAM.
- Báez González, A. D., Chen, P. Y., Tiscareño-López, M. y Srinivasan, R. 2002. Using satellite and field data with crop growth modeling to monitor and estimate corn yield in Mexico. *Crop Science*, 42(6), 1943-1949.
- Bagan, H., Wang, Q., Watanabe, M., Yang, Y., y J, Ma. 2005. Land cover classification from MODIS EVI times-series data using SOM neural network. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4999-5012.
- Bian, J. H., Li, A., Song, M., Ma, L. y Jiang, J. 2010. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter. *Journal of Remote Sensing*, 14(4), 725-741.
- CaraDonna, P. J., Iler, A. M., y Inouye, D. W. 2014. Shifts in flowering phenology reshape a subalpine plant community. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(13), 4916-4921.
- Carlson, T. N. y Ripley, D. A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, 241-252.
- Castillo-Argüero, S., G. Montes-Cartas, M. A. Romero-Romero, *et al.* 2004 Dinámica y conservación del matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del

- Pedregal de San Ángel (México). Boletín de la Sociedad Botánica de México 74:51-75.
- Castillo-Argüero, S., Martínez-Orea, Y., Romero-Romero, M. A., Guadarrama-Chávez, P., Núñez-Castillo, O., Sánchez-Gallén, I. y Meave, J. A. 2007. La reserva ecológica del Pedregal de San Ángel: Aspectos florísticos y ecológicos. Coordinación de la Investigación Científica. Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.
- Castillo-Argüero, S., Martínez-Orea, Y., Meave, J. A., Hernández-Apolinar, M., Nuñez-Castillo, O., Santibañez-Andrade, G. y Guadarrama-Chávez, P. 2009. Flora: susceptibilidad de la comunidad a la invasión de malezas nativas y exóticas. Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel, 107-117.
- Castillo-Argüero, S., Y. Martínez-Orea, M. Nava-López y L. Almeida-Leñero. 2016 El matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y sus servicios ecosistémicos. En: *La biodiversidad en la Ciudad de México*, vol. III. CONABIO/SEDEMA, México, pp. 50-69.
- Cano Santana, Z. 1994. La Reserva del Pedregal como ecosistema: estructura trófica. Reserva Ecológica El Pedregal de San Ángel: Ecología, Historia Natural y Manejo, Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF, 149-158.
- César García, Sara Fabiola. 2002. Análisis de algunos factores que afectan la fenología reproductiva de la comunidad vegetal de la Reserva del Pedregal de San Ángel, D. F. (México). Universidad Nacional Autónoma de México. México
- Chen, D. y Brutsaert, W. 1998. Satellite-sensed distribution and spatial patterns of vegetation parameters over a tallgrass prairie, *J. Atmos. Sci.*, 55(7), 1225–1238.
- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B. y Eklundh, L. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set

- based on the Savitzky–Golay filter. *Remote sensing of Environment*, 91(3-4), 332-344.
- Chen, P. Y., Fedosejevs, G., Tiscareno-Lopez, M. y Arnold, J. G. 2006. Assessment of MODIS-EVI, MODIS-NDVI and VEGETATION-NDVI composite data using agricultural measurements: An example at corn fields in western Mexico. *Environmental monitoring and assessment*, 119(1-3), 69-82.
- Cleland, E. E., Chiariello, N. R., Loarie, S. R., Mooney, H. A., & Field, C. B. 2006. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(37), 13740-13744.
- CONAGUA. 2019. Monitor de sequías en México, archive de municipios. Obtenido de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Cong, N., Shen, M., y Piao, S. 2016. Spatial variations in responses of vegetation autumn phenology to climate change on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology*, 10(5), 744-752.
- Crimmins, T. M., Crimmins, M. A., Bertelsen, D. y Balmat, J. 2008. Relationships between alpha diversity of plant species in bloom and climatic variables across an elevation gradient. *International Journal of Biometeorology*, 52(5), 353-366.
- Crimmins, T. M., Crimmins, M. A. y Bertelsen, C. D. 2010. Complex responses to climate drivers in onset of spring flowering across a semi-arid elevation gradient. *Journal of Ecology*, 98(5), 1042-1051.
- Damián-Domínguez, M. D. J. X., Cano-Santana, Z. y Castellanos-Vargas, I. 2009. Fenología reproductiva de *Habranthus concolor* y *H. aff. concolor* (Amaryllidaceae) y su relación con la lluvia. *Biodiversidad Del Pedregal de San Ángel*. UNAM, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y Coordinación de la Investigación Científica, México, 319-328.

- De la Fuente, J. R. 2005. Acuerdo por el que se rezonifica, delimita e incrementa la REPSA de Ciudad Universitaria. Publicado en Gaceta UNAM el 2 de Junio de 2005. 3813: 14-15 y 19-21.
- Deng, F., Su, G. y Liu, C. 2007. Seasonal variation of MODIS vegetation indices and their statistical relationship with climate over the subtropic evergreen forest in Zhejiang, China. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(2), 236–240.
- Eklundh, L. y Jönsson, P. 2017. *TIMESAT 3.3 with Seasonal Trend Decomposition and Parallel Processing Software Manual*. Lund and Malmo University, Sweden, 192.
- Domínguez-Álvarez, A., Cano-Santana, Z. y Ayala-Barajas, R. 2009. Estructura y fenología de la comunidad de abejas nativas (Hymenoptera: Apoidea). *Div. de hábitats y Ecol. de comunidades*, 421-432.
- Eklundh, L. y Jönsson, P. 2017. *TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing. Software Manual*.
- Estiarte, M., y Peñuelas, J. 2015. Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency. *Global change biology*, 21(3), 1005-1017.
- Ferreira, L. G., Yoshioka, H., Huete, A. y Sano, E. E., 2003. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian cerrado: an analysis within the large-scale biosphere-atmosphere experiment in Amazonia (LBA). *Remote Sensing of Environment*, 87, 534-550.
- Fensholt, R., Sandholt, I., y Stisen, S. 2006. Evaluating MODIS, MERIS, and VEGETATION vegetation indices using in situ measurements in a semiarid environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7), 1774-1786.
- Franklin, K. A., Lyons, K., Nagler, P. L., Lampkin, D., Glenn, E. P., Molina-Freaner, F., ... y Huete, A. R. 2006. Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) land conversion

- and productivity in the plains of Sonora, Mexico. *Biological Conservation*, 127(1), 62-71.
- Fu, Y., He, H., Zhao, J., Larsen, D., Zhang, H., Sunde, M. y Duan, S. 2018. Climate and Spring Phenology Effects on Autumn Phenology in the Greater Khingan Mountains, Northeastern China. *Remote Sensing*, 10(3), 449.
- Gao, X., Huete, A. R., Ni, W. y Miura, T. 2000. Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of environment*, 74(3), 609-620.
- Gitelson, A. A. 2004. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161, 165–173.
- González-Medrano, F. 2003. Las comunidades vegetales de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México, D.F.
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P. y Wardlow, B. 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6).
- Guyon, D., Guillot, M., Vitasse, Y., Cardot, H., Hagolle, O., Delzon, S., y Wigneron, J. P. 2011. Monitoring elevation variations in leaf phenology of deciduous broadleaf forests from SPOT/VEGETATION time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 615-627.
- Helman, D. 2018. Land surface phenology: What do we really ‘see’ from space?. *Science of The Total Environment*, 618, 665-673.
- Hernández Hernández, Eduardo. 2015. Uso del NDVI para determinar impactos ambientales en la vegetación ocasionados por la intervención del hombre mediante técnicas de percepción remota. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Huete, A. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K. y Leeuwen van, W. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, 440-451.
- Huete, A. R., Didan, K., Shimabukuro, Y. E., Ratana, P., Saleska, S. R., Hutyrá, L. R. y Myneni, R. 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical research letters*, 33(6).
- Ichoku, C., Kaufman, Y. J., Giglio, L., Li, Z., Fraser, R. H., Jin, J. Z. y Park, W. M. 2003. Comparative analysis of daytime fire detection algorithms using AVHRR data for the 1995 fire season in Canada: Perspective for MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 24(8), 1669-1690.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G. y Zhang, X. 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote sensing of environment*, 101(3), 366-378.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., y Miura, T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845.
- Ji, L. y Peters, A. J., 2007. Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function. *Remote Sensing of Environment*, 106 (1), 59-65
- Jönsson, P. y Eklundh, L. 2004. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833-845.
- Justice, C.O., E. Vermote, J. Townshend, R. Defries, J. A. Royle, D. Hall, V. Salomonson, J. L. Privette, G. A. Riggs, A.H. Strahler, W. Lucht, R.B. Myneni, Y. Knyazikhin, S. W. Running, R. R. Nemani, Z.M. Wan, A.R. Huete, W.J.D. van Leeuwen, R.E. Wolfe, L. Giglio, J-P Muller, P. Lewis y M.J. Barnsley, 1998, *The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

- (MODIS). Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36 (4), 1228-1249.
- Keenan, T. F. y Richardson, A. D. 2015. The timing of autumn senescence is affected by the timing of spring phenology: implications for predictive models. *Global change biology*, 21(7), 2634-2641.
- Liu, H. Q. y Huete, A. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 33(2), 457-465.
- Liu, Q., Fu, Y. H., Zhu, Z., Liu, Y., Liu, Z., Huang, M., ... y Piao, S. 2016. Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology. *Global change biology*, 22(11), 3702-3711.
- Liu, Q., Fu, Y. H., Zeng, Z., Huang, M., Li, X., y Piao, S. 2016. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global change biology*, 22(2), 644-655.
- Lohbeck, M., Lebrija-Trejos, E., Martínez-Ramos, M., Meave, J. A., Poorter, L. y Bongers, F. 2015. Functional trait strategies of trees in dry and wet tropical forests are similar but differ in their consequences for succession. *PloS one*, 10(4).
- Lot, A. y Cano-Santana, Z. 2009. Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.
- Luna Toledo, E. S. y Figuerola, P. I. 2016. Monitoreo de la fenología y fenometría del olivar a través de la dinámica del ndvi-modis, en Vichigasta, La Rioja. *RADA*, volumen VII: 73-81.
- Marchin, R. M., Salk, C. F., Hoffmann, W. A., y Dunn, R. R. 2015. Temperature alone does not explain phenological variation of diverse temperate plants under experimental warming. *Global Change Biology*, 21(8), 3138-3151.
- Martínez-Mateos, E. 2001. Regeneración natural después de un disturbio por fuego en dos microambientes contrastantes de la Reserva Ecológica del

Pedregal de San Ángel. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 62pp.

Mas, J. F. 2011. Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Primera edición, ISBN: 978-607-7908-55-5.

Miguel Jiménez, José Donaciano. 2013. Cobertura vegetal, materia orgánica y pH en el suelo y su relación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Mondal, P. 2011. Quantifying surface gradients with a 2-band Enhanced Vegetation Index (EVI2). *Ecological Indicators*, 11(3), 918-924.

Morisette, J. T., Richardson, A. D., Knapp, A. K., Fisher, J. I., Graham, E. A., Abatzoglou, J., ..., y Liang, L. 2009. Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: phenological research in the 21st century. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(5), 253-260.

Moyers-Arévalo, L. y Cano-Santana, Z. 2009. Fenología de la comunidad de mariposas diurnas y su relación con la fenología floral de las plantas y otros factores ambientales. *Biodiversidad del Pedregal de San Angel*, 411-419.

NASA MODIS WEB. 2008. MODIS Design. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/design>

National Aeronautics and Space Administration, 2008. MODIS WEB, URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/>

Nava-López, M., Jujnovsky, J., Salinas-Galicia, R., Alvarez-Sánchez, J. y Almeida-Leñero, L. 2009. Servicios ecosistémicos de la REPSA. *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias. UNAM Pp51-60.

- ORNL DAAC. 2018. MODIS and VIIRS Land Products Global Subsetting and Visualization Tool. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Accessed August 31, 2018. Subset obtained for MOD09A1 product at 19.3203N, 99.1825W, time period: 2000-02-18 to 2018-08-21, and subset size: 0.5 x 0.5 km. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1379>
- Paruelo, J. M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*, 17(3).
- Peralta-Higuera, A. y Prado- Molina, J. 2009. Los límites y la Cartografía de la REPSA. Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Instituto de Geografía. UNAM. Pp27-42.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J. y Stenseth, N. C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 20(9), 503-510.
- Peñuelas, J., Filella, I., Zhang, X., Llorens, L., Ogaya, R., Lloret, F., ... y Terradas, J. 2004. Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New Phytologist*, 161(3), 837-846.
- Piao, S., Cui, M., Chen, A., Wang, X., Ciais, P., Liu, J., y Tang, Y. 2011. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1599-1608.
- Rahman, A. F., Sims, D. A., Cordova, V. D. y El-Masri, B. Z. 2005. Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes. *Geophysical Research Letters*, 32, L19404. doi:10.1029/2005GL024127.
- REPSA. 2017. Listado de proyectos de investigación. Secretaría Ejecutiva de la REPSA, Coordinación de la Investigación Científica. UNAM. Recuperado de: <http://www.repsa.unam.mx>

- Reyna Trujillo, T., G. Gómez Rodríguez y R. Granados Ramírez. 2007a, "Intensidad de la sequía intraestival, sequía relativa o canícula", NA XIII, esc. 1:6 000 000, Nue-vo Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, UNAM.
- Rogan, J., Schneider, L., Christman, Z., Millones, M., Lawrence, D. y Schmook, B. 2011. Hurricane disturbance mapping using MODIS EVI data in the southeastern Yucatán, Mexico. *Remote Sensing Letters*, 2(3), 259-267.
- Rohde, A., Bastien, C. y Boerjan, W. 2011. Temperature signals contribute to the timing of photoperiodic growth cessation and bud set in poplar. *Tree physiology*, 31(5), 472-482.
- Romero Martínez, Juan José. 2018. Estudios de los cambios en la fenología de la superficie de cubiertas forestales en Michoacán, México durante 2001 – 2017, mediante el análisis de series temporales de EVI MODIS. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Rzedowski, J. 1954 Vegetación del Pedregal de San Ángel (Distrito Federal, México). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas* 8(1-2): 59-129.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa, México D.F.
- Sadeh, E. 2002. A failure of international space cooperation: the International Earth Observing System, *Space Policy*, 18(2):135-150p.
- Santibáñez-Andrade, G., Castillo-Argüero, S., Zavala-Hurtado, J. A., Martínez Orea, Y. y Hernández Apolinar, M. 2009. La Heterogeneidad Ambiental en un Matorral Xerófilo. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (85), 71-79.
- Sarukhán, J. 1990. Acuerdo por el que se redefine la Reserva Ecológica de Ciudad Universitaria. Publicado en Gaceta UNAM (No. 2494), el 20 de Agosto de 1990. Pp1-2.

- Sarukhán. J. 1996. Acuerdo por el que se reordena e incrementa la zona de la Reserva Ecológica de la Ciudad Universitaria. Publicado en la Gaceta UNAM el 14 de Marzo de 1996. Pp9-11.
- Sarukhán, J. 1997 Acuerdo por el que se reestructura e incrementa la zona de la Reserva Ecológica y se declaran las Áreas Verdes de Manejo Especial de la Ciudad Universitaria. Publicado en Gaceta UNAM el 13 de Enero de 1997. Pp15-17.
- Schwartz, M. D. 2003. Phenology: an integrative environmental science (p. 564). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- SEREPSA. 2014. Conoce los paisajes de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Secretaría Ejecutiva de la REPSA, CIC, UNAM. Recuperado de <http://www.repsa.unam.mx/index.php/objetivos/caracteristicas/matorral-de-palo-loco/estacionalidad>
- Shen, M., Tang, Y., Chen, J., Zhu, X. y Zheng, Y. 2011. Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1711-1722.
- Shen, M., Tang, Y., Chen, J., Yang, X., Wang, C., Cui, X., ... y Zhang, G. 2014. Earlier-season vegetation has greater temperature sensitivity of spring phenology in Northern Hemisphere. *PloS one*, 9(2), e88178.
- Sherry, R. A., Zhou, X., Gu, S., Arnone III, J. A., Johnson, D. W., Schimel, D. S., ... y Luo, Y. 2011. Changes in duration of reproductive phases and lagged phenological response to experimental climate warming. *Plant Ecology & Diversity*, 4(1), 23-35.
- Siebe, C. 2000. Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 104(1-4): 45-64.

- Sims, D. A., Rahman, A. F., Cordova, V. D., El-Masri, B. Z., Baldocchi, D. D., Flanagan, L. B., *et al.* 2006. On the use of MODIS EVI to assess, gross primary productivity of North American ecosystems. *Journal of Geophysical Research*, 111, G04015. Doi: 10.1029/2006JG000162.
- Sivanpillai, R. y Latchininsky, A. V. 2007. Mapping locust habitats in the Amudarya River Delta, Uzbekistan with multi-temporal MODIS imagery. *Environmental Management*, 39 (6), 876-886.
- Tan, B., Morisette, J. T., Wolfe, R. E., Gao, F., Ederer, G. A., Nightingale, J. y Pedelty, J. A. 2008. July. Vegetation phenology metrics derived from temporally smoothed and gap-filled MODIS data. In *IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Vol. 3, pp. III-593)*. IEEE.
- Townshend, J., Justice, C., Li, W., Gurney, C., y McManus, J. 1991. Global land cover classification by remote sensing: Present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of the Environment*, 35, 243-255.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- ORNL DAAC. 2018. MODIS and VIIRS Land Products Global Subsetting and Visualization Tool. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Accessed March 03, 2020. Subset obtained for MOD09A1 product at 19.3203N,99.1825W, time period: 2000-05-08 to 2020-02-18, and subset size: 0.5 x 0.5 km. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1379>
- Wang, C., Cao, R., Chen, J., Rao, Y. y Tang, Y. 2015. Temperature sensitivity of spring vegetation phenology correlates to within-spring warming speed over the Northern Hemisphere. *Ecological Indicators*, 50, 62-68.
- Wardlow, B. D., Egbert, S. L. y Kastens, J. H. 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 108, 290–310.

- Wu, C., Hou, X., Peng, D., Gonsamo, A. y Xu, S. 2016. Land surface phenology of China's temperate ecosystems over 1999–2013: Spatial–temporal patterns, interaction effects, covariation with climate and implications for productivity. *Agricultural and forest meteorology*, 216, 177-187.
- Xavier, A. C., Rudorff, B. F., Shimabukuro, Y. E., Berka, L. M. y Moreira, M. A. 2006. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (4), 755-768.
- Xiao, X., Hollinger, D., Aber, J., Goltz, M., Davidson, E. A., Zhang, Q., *et al.* 2004. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 89, 519–534.
- Yu, F., Price, K. P., Ellis, J., y Shi, P. 2003. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 42-54.
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., y Strahler, A. H. 2004. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data. *Global change biology*, 10(7), 1133-1145.
- Zhang, G., Zhang, Y., Dong, J., y Xiao, X. 2013. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(11), 4309-4314.
- Zougrana, B., Conrad, C., Amekudzi, L., Thiel, M., y Da, E. 2014. Land use/cover response to rainfall variability: A comparing analysis between NDVI and EVI in the Southwest of Burkina Faso. *Climate*, 3(1), 63-77.