



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y
TECNOLÓGICAS

POSGRADO EN BIOCENCIAS

**PERCEPCIÓN REMOTA Y COVARIANZA DE
FLUJOS PARA EVALUAR LA PRODUCTIVIDAD
EN PRADERAS DE ZACATE BUFFEL
(*C. ciliaris*) Y MATORRAL SUBTROPICAL EN
ZONAS ÁRIDAS DEL NOROESTE DE MÉXICO.**

TESIS

que para obtener el grado de:

MAESTRA EN BIOCENCIAS

presenta:

SOFÍA CHOZA FARÍAS

Hermosillo, Sonora, México

11 de octubre de 2019

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DERECHOS DE AUTOR

El presente trabajo de tesis se presenta como uno de los requisitos parciales para la obtención del grado de **Maestro en Biociencias** de la Universidad de Sonora.

Se deposita en la biblioteca de Ciencias Biológicas y de la Salud para ponerla a disposición de los interesados. Se permiten citas breves del material contenido en la tesis sin permiso del autor, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente. Para reproducir, o en su caso referirse a este documento en forma parcial o total, se deberá solicitar la autorización al Coordinador del Programa del Posgrado.

Bajo cualquier otra circunstancia se debe solicitar permiso directamente al autor.

Atentamente

Sofía Choza Farías

Autor

Dra. Nohemí Gámez Meza

Coordinadora del Programa de Maestría en Biociencias

PERCEPCIÓN REMOTA Y COVARIANZA DE FLUJOS PARA EVALUAR LA
PRODUCTIVIDAD EN PRADERAS DE ZACATE BUFFEL (*C. ciliaris*) Y MATORRAL
SUBTROPICAL EN ZONAS ÁRIDAS DEL NOROESTE DE MÉXICO.

T E S I S

que para obtener el grado de:

MAESTRA EN BIOCIENCIAS

presenta:

SOFÍA CHOZA FARÍAS

Hermosillo, Sonora, México.

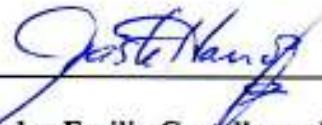
Octubre del 2019

APROBACIÓN

Los miembros del Comité designado para revisar la tesis titulada “Percepción remota y covarianza de flujos para evaluar la productividad en praderas de zacate buffel (*C. ciliaris*) y matorral subtropical en zonas áridas del Noroeste de México” presentada por la Ing. Sofia Choza Fariás, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestra en Biociencias con Especialidad en Ecología y Sustentabilidad de Zonas Áridas.



Dr. José Raúl Romo León
Director y Presidente



Dr. Alejandro Emilio Castellanos Villegas
Sinodal interno y Secretario



**Dra. María Cristina Peñalba
Garmendia**
Sinodal interno



Dr. Francisco Elizandro Molina Freaner
Sinodal externo

AGRADECIMIENTOS

Principalmente, agradezco a Dios por haberme permitido culminar mis estudios de maestría, por darme la fuerza día con día para salir adelante.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por financiar mis estudios de maestría.

A la Universidad de Sonora, al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas y al Posgrado en Biociencias por darme la oportunidad de realizar la maestría y apoyarme durante el proceso.

Al Dr. Raúl Romo, por haberme recibido como su estudiante, por darme su paciencia y apoyo en la realización del proyecto, por lo aprendido en clases y en el laboratorio, por su confianza y su amistad durante estos dos años.

Al comité de tesis, al Dr. Alejandro Castellanos, por siempre estar dispuesto a explicar una y otra vez las dudas que se presentaron durante la realización de la tesis, por brindarme su amistad y mostrarme su apoyo. A la Dra. Cristina Peñalba, por su tiempo, su apoyo y su amabilidad en cada momento que necesité su ayuda. Al Dr. Francisco Molina, por su disponibilidad para resolver dudas, su dedicación y su tiempo. A todos les agradezco por sus observaciones y comentarios que ayudaron a enriquecer mucho más este trabajo y además agradezco sus palabras de ánimo.

A mis compañeras de los laboratorios de Ecosistemas y Percepción Remota (Búnker) y de Ecofisiología Vegetal: Lari, Masu, Sara, Mily, Marina, Kathya y Fer. Agradezco principalmente por su amistad, porque más que compañeras yo siento que son mis hermanas, gracias por los momentos buenos y malos que compartimos, por todos los cafés que nos tomamos y por su ayuda y disponibilidad para ayudarme en cualquier duda o situación que se presentó. Sin ustedes este trabajo y esta maestría no hubieran sido lo mismo, gracias por hacer mis días más bonitos y menos pesados. Cuentan conmigo siempre, amigas. También agradezco al Dr. José por su apoyo y al Dr. César por su paciencia para explicarme y despejar mis dudas, incluso estando lejos.

A Carolina De La Ree, la mejor amiga que pude encontrar en este Posgrado para compartir lágrimas, estrés pero sobretodo muchos momentos felices, estaré siempre agradecida de haberte conocido y de todo lo bueno que has traído a mi vida.

A mis compañeros de generación de maestría, gracias por los momentos divertidos que compartimos. Especialmente a Julio Gastelum, quien fue un gran apoyo y un buen amigo a lo largo de este proceso.

A toda mi familia, por estar presentes aún estando lejos, gracias por ser mi soporte, especialmente, agradezco a mis padres, Francisco y Lorena, por confiar en mí y darme su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, sin ustedes no hubiera alcanzado este logro más. A mis hermanos, Andrea y Franky, les agradezco por su comprensión, su amor y por siempre estar para mí. A mis perritas, Lizzie y Mía, por ser unas grandes compañeras y ser fuente de felicidad.

Al profesor David Encinas, por ser un gran amigo, por estar pendiente de mí, darme consejos y palabras de ánimo.

A Héctor, sin ti, sin tus consejos y palabras de aliento, hubiera sido mucho más difícil este proceso, gracias por ayudarme a no rendirme, por la comprensión y el amor que me has brindado este tiempo.

RESUMEN

Las zonas áridas representan un porcentaje de poco más del 40% de la superficie continental del planeta, sosteniendo a más del 35% de la población humana. A menudo usadas para desarrollar actividades primarias tales como la agricultura y la ganadería, la cobertura de estas zonas usualmente se modifica, lo que frecuentemente desemboca en la alteración de la función de sus ecosistemas. La pérdida de función en estos ecosistemas, resulta en la alteración de ciclos biogeoquímicos locales y regionales asociados a la función de la estructura vegetal. Tal es el caso de los ciclos asociados a la captura de carbono y la respiración de la vegetación. En el caso de México, las zonas áridas representan más de la mitad de la superficie total del país y al ser la ganadería la actividad predominante en ellas, la modificación de la cubierta vegetal se ha orientado a tratar de mejorar la capacidad de producción de forraje de los agostaderos. A menudo estas mejoras desembocan en el uso de especies no nativas, con gran capacidad fotosintética y por ende gran capacidad de producción de forraje. Para el noroeste de México, el zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*) ha sido utilizado para aumentar la capacidad de producción forrajera. La introducción de zacate buffel ha provocado modificaciones en grandes extensiones de terreno en la región; sin embargo, su efecto en los ecosistemas del Desierto Sonorense, así como en los ciclos biogeoquímicos locales ha sido poco estudiado. En este contexto, el presente trabajo, se enfocó a comparar la dinámica de flujos de carbono, en sitios con matorral subtropical y con buffel, en diferentes escalas espacio-temporales, con el fin de analizar las modificaciones causadas por la introducción de especies exóticas en zonas desérticas. Se establecieron seis sitios de estudio en comunidades de Matorral Subtropical y Praderas de Buffel, donde se adquirieron imágenes satelitales y mediciones de flujos de carbono. Específicamente, se obtuvieron imágenes del “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)” del cual se derivó el “Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI)” en compuestos de 16 días para los sitios de estudio, para compararlos con sitios en donde se cuenta con datos de torres de covarianza de flujos. Los resultados muestran que el comportamiento de ambos tipos de vegetación, en cuanto a los flujos de carbono y agua en la vegetación (Evapotranspiración, Productividad Primaria Neta, Respiración del Ecosistema e Intercambio Neto del Ecosistema) y el NDVI, presenta comportamientos similares en magnitud y en tiempo ($R^2 > 0.79$, para todos los casos), entre el matorral subtropical y la

pradera de buffel. A su vez, se generaron modelos para espacializar la información de los flujos de carbono a nivel de paisaje por medio del NDVI, en donde, en la mayoría de los casos, los modelos tuvieron ajustes significativos ($R^2 > 0.5$, en la mayoría de los casos, excepto para Intercambio Neto del Ecosistema). Finalmente, el estudio registró que, en relación con patrones climáticos, como lo es el Fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur, algunos de los flujos de carbono tienden a disminuir en ambos tipos de vegetación (ej. producción primaria bruta), tanto en el verano como en el invierno, cuando se presenta la fase de El Niño. Durante el presente trabajo se demuestra que existen similitudes significativas, en cuanto a cómo los dos tipos de vegetación analizados reaccionan ante los pulsos climáticos.

ABSTRACT

Drylands represent just over 40% of the continental surface, supporting more than 35% of the human population. Often used to develop primary activities such as agriculture and livestock, these ecosystems usually modified, which often leads to the significant shifts in ecological function. These changes, results in the alteration of local and regional biogeochemical cycles associated to plant structure and processes. Due to its relationship to global climatic processes, one of the major concerns regarding extensive changes, is the effect of land cover change, on carbon sequestration and vegetation respiration. In Mexico, the arid environments represent more than 50% of the country (continental surface), and since livestock is the predominant activity there, vegetation cover has been often changed to improve forage production in rangeland pastures. Often these improvements result in the use of non-native species, with great photosynthetic capacity and therefore large forage production potential. For northwestern Mexico, buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) has been used to increase forage production capacity. The introduction of buffel grass has caused modifications in large areas of land in the region; however, its effect on the Sonoran Desert ecosystems, as well as on local biogeochemical cycles has been scarcely studied. In this context, the present work focused on comparing the carbon flux dynamics, in sites with native vegetation stands from the southern section of the Sonoran Desert (subtropical scrublands) and sites with buffel grasslands have been established. Six study sites were established in communities of Subtropical Scrubland and Buffel grass savannas, where satellite images and carbon fluxes measurements were acquired. Specifically, images of the “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)” were obtained from which the “Normalized Vegetation Difference Index (NDVI)” was derived in 16-day compounds for the study sites, to compare them with sites where there is data from Eddy Covariance towers. Results show that both vegetation types analyzed, show similar behavior (in magnitude and in time) in terms of how they fix and release Carbon (Evapotranspiration, Gross Primary Productivity, Ecosystem Respiration and Net Ecosystem Exchange) and also on how they photosynthesize (MODIS-NDVI) through time ($R^2 > 0.79$, for all cases). Using regression analysis, we also were capable of developing models to spatialize carbon fluxes, since we observed a significant fit between NDVI and all measurements from the flux towers ($P < 0.01$ for all models, and $R^2 > 0.5$, in

most of the cases, except for Net Ecosystem Exchange). Finally, we analyzed, the relationship between carbon fluxes and photosynthetic activity to weather patterns (specifically El Niño Southern Oscillation), some of the carbon fluxes tend to decrease in both types of vegetation (eg. Gross Primary Production), both in summer as in winter, when the El Niño phase is presented. In these work we shown that there are significant similarities, in the way the two types of vegetation analyzed react to climatic pulses.

INDICE GENERAL

	Página
APROBACIÓN	<i>i</i>
AGRADECIMIENTOS	<i>ii</i>
RESUMEN	<i>iii</i>
ABSTRACT	<i>iv</i>
INDICE DE FIGURAS	<i>x</i>
INDICE DE TABLAS	<i>xii</i>
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	5
I.1. Determinantes de flujos de carbono y agua en zonas áridas	6
I.2. Introducción de especies de plantas exóticas	7
I.3. Ganadería en el Norte de México	9
I.4. Mediciones in situ de flujos de carbono y agua	11
I.5. Percepción remota y medición de flujos de carbono	13
I.6. Efectos de patrones climáticos en los flujos y su interacción con el cambio de uso de suelo	15
II. HIPÓTESIS	17
III. OBJETIVOS	18
III.1. Objetivo general	18
III.2. Objetivos específicos	18
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	19
IV.1. Área de estudio	19
IV.2. Bases de datos	20
IV.2.1. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)	20
IV.2.2. Misión de Medición de Lluvia Tropical (TRMM)	21
IV.2.3. Medición de covarianza de flujos de carbono (Torres de Eddy Covariance)	22
IV.3. Análisis comparativo de los flujos de carbono y el NDVI entre los dos tipos de vegetación	23
IV.4. Modelación de las respuestas del NDVI en función de los flujos de carbono	23
IV.5. Modelación espacial de los flujos de carbono	24
IV.6. Análisis de la variación por los patrones climáticos	24
V. RESULTADOS	27
V.1. Bases de datos de MODIS	27
V.2. Datos de torres de covarianza de flujos de carbono	28
V.3. Datos de precipitación obtenidos por el satélite TRMM	30
V.4. Análisis comparativo de los flujos de carbono y el NDVI entre los dos tipos de vegetación	32
V.5. Modelación de las respuestas del NDVI en función de los flujos de Eddy Covariance	37
V.6. Modelación espacial de los flujos de carbono	43

V.6.1. Pradera de buffel	44
V.6.2. Matorral subtropical	44
V.7. Análisis de la variación asociado a los patrones climáticos	45
VI. DISCUSIÓN	53
VI.1. Diferencias y similitudes entre los dos tipos de vegetación	53
VI.2. Generación y aplicación de los modelos	55
VI.3. Variación asociada a patrones climáticos	56
VII. CONCLUSIONES	58
VIII. LITERATURA CITADA	59

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Área de estudio	20
2	Producto de MODIS – compuesto de NDVI correspondiente a la serie de tiempo desde el año 2000 hasta el 2017.	27
3	Dinámica de los valores de NDVI para el sitio 1 de pradera de buffel donde se ubica la torre de EC (serie de tiempo de 2000 a 2017).	28
4	Dinámica temporal de los flujos de carbono (NEE, GPP, Reco y ET) de pradera de buffel. Los datos están ajustados a cada 16 días de la serie de tiempo 2013 - 2015.	28
5	Dinámica temporal de los flujos de carbono (NEE, GPP, Reco y ET) de matorral subtropical. Los datos están ajustados a cada 16 días de la serie de tiempo 2013- 2015.	30
6	Producto obtenido de TRMM con los datos de precipitación.	31
7	Datos de precipitación para la zona de estudio en intervalos mensuales desde enero de 2000 a diciembre de 2017.	37
8	Relación entre los valores de NDVI del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F=837.63$, $p < 2.2e^{-16}$ y r^2 ajustada = 0.9248.	32
9	Relación entre los valores de NEE del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F= 261.75$, $p < 2.2e^{-16}$ y una r^2 ajustada = 0.7932.	33
10	Relación entre los valores de Reco del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F=929.73$, $p < 2.2e^{-16}$ y una r^2 ajustada = 0.9318, el modelo se ajusta en un 93%.	34
11	Relación entre los valores de GPP del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F= 753.06$, $p < 2.2e^{-16}$ y una r^2 ajustada = 0.9171.	35
12	Relación entre los valores de ET del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F= 1311.7$, $p < 2.2e^{-16}$ y una r^2 ajustada = 0.9507.	36

13	Regresión lineal del Intercambio Neto del Ecosistema en ambos tipos de vegetación y las respectivas ecuaciones para modelar este flujo a nivel paisaje por medio del NDVI.	38
14	Regresión lineal de la Respiración del ecosistema en ambos tipos de vegetación y las respectivas ecuaciones para modelar este flujo a nivel paisaje por medio del NDVI.	39
15	Regresión lineal de la Producción primaria bruta en ambos tipos de vegetación y las respectivas ecuaciones para modelar este flujo a nivel paisaje por medio del NDVI.	41
16	Ajuste de la media de Evapotranspiración en función de la media de NDVI en cada tipo de vegetación y las respectivas ecuaciones para modelar este flujo a nivel paisaje por medio del NDVI.	42
17	Flujos modelados (NEE, Reco, GPP, ET) de pradera de buffel a una resolución temporal de 16 días desde el año 2000 al 2018.	44
18	Flujos modelados (NEE, Reco, GPP, ET) de matorral subtropical a una resolución temporal de 16 días desde el año 2000 al 2018.	45
19	Variación de la precipitación para los meses de verano (ANOVA de una vía, $F_{2,357}= 9.102$, $P < 0.001$) e invierno (ANOVA de una vía, $F_{2,357}= 11.59$, $P < 0.001$) considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur. Las letras diferentes indican diferencias significativas entre patrones climáticos.	46
20	Variación del intercambio neto del ecosistema para los meses de verano e invierno considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).	47
21	Variación de la producción primaria bruta en ambos tipos de vegetación para los meses de verano e invierno considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).	48
22	Variación de la respiración del ecosistema para los meses de verano e invierno considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).	49
23	Variación de la evapotranspiración para los meses de verano e invierno considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).	50
24	Variación del NDVI para los meses de verano e invierno en ambos tipos de vegetación considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).	51

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Tabla obtenida de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica que muestra los valores del índice oceánico de El Niño.	25
2	Resultados de la clasificación de los años de acuerdo a la asignación de los fenómenos para cada año y en las diferentes temporadas (verano, invierno).	26

INTRODUCCIÓN

Las dinámicas de los ecosistemas a nivel global, son constantemente modificadas debido a las actividades humanas (Vitousek *et al.*, 1997). Hoy en día estas modificaciones suceden a gran velocidad (temporal y espacial), ocasionando cambios sustanciales en las dinámicas de los ecosistemas. Como consecuencia de estos cambios, la provisión de servicios por parte de estos ecosistemas también se ve afectada, poniendo en riesgo el capital natural de grandes extensiones de terreno, las actividades económicas dependientes de los servicios ecosistémicos afectados y la integridad de los ecosistemas en términos de función y estructura (Hassan *et al.*, 2005; Vitousek *et al.*, 1997).

Los ecosistemas presentes en zonas áridas, han sido a menudo catalogados como vulnerables o poco resilientes al cambio de patrones ambientales o humanos (Hottenstein, 2015). Lo anterior debido a que estas zonas son ampliamente utilizadas para actividades primarias, por ejemplo, actividades como la agricultura y la ganadería que han ocasionado que estos ecosistemas sufran cambios de uso del suelo, y esto, ha llevado a la desertificación (Lal, 2001), volviendo vulnerables a las zonas áridas. En México, más de la mitad del territorio está conformado por zonas áridas y semiáridas (Flores-Olvera, 2011). Para nuestro país, la agricultura y la ganadería son los usos de suelo más ampliamente extendidos, siendo la ganadería la actividad predominante, en términos de extensión de terreno utilizado.

La actividad ganadera ha traído como resultado la introducción de especies exóticas con el fin de aumentar la producción de forraje (Ibarra-Flores *et al.*, 2005). En el caso de las zonas áridas del Noroeste de México, la introducción de especies no nativas provoca a menudo impactos importantes en el ecosistema en términos de función ecológica y productividad del sistema, causando también modificaciones en el uso del agua y ciclo de nutrientes (Marshall *et al.*, 2011). Un ejemplo de lo anterior ha sido la introducción del zacate buffel como pasto para forraje en gran parte de las zonas áridas de México y el mundo (Marshall *et al.*, 2011).

El zacate buffel es originario del este de África y sur de Asia, fue introducido primeramente en el estado de Texas (EUA), con el fin de incrementar la producción de forraje para la ganadería. Posteriormente, este pasto se introduce en Sonora, donde se adoptó como una solución para incrementar la baja productividad de los agostaderos de la región (Ibarra-

Flores *et al.*, 2005), y como estrategia para controlar la erosión (Cox, 1988). Sin embargo, en el Norte de México, este zacate ha ocasionado impactos negativos, tanto directos como indirectos, en las comunidades bióticas (Burquez-Montijo *et al.*, 2002; Johnson y Navarro, 1992). Algunos de los efectos negativos que han sido documentados sobre el buffel hablan de su peculiaridad de ser invasivo, debido a que desplaza especies nativas de la zona, incluso en lugares donde no se introduce el buffel por actividad humana. Tiene la capacidad de desarrollarse en hábitats desérticos donde los eventos de precipitación son imprevisibles, ya que, esta especie responde a pulsos de precipitación originando un crecimiento vigoroso (Ramírez, 1999; Ramírez *et al.*, 2001; Sanderson *et al.*, 1999). Es por ello que este zacate es considerado como una de las malezas ambientales más problemáticas en las zonas áridas y semiáridas donde se ha introducido (Low, 1997). Para el estado de Sonora, una gran parte de la superficie de agostadero ha sido modificada a praderas de buffel (entre el 5 y el 10%) (Castellanos *et al.*, 2002). Esto se debe al apoyo por parte de políticas públicas para la implementación de praderas para mejorar la actividad ganadera del estado (Bravo *et al.*, 2010; Romo, *et al.*, 2011).

La Región Centro del estado de Sonora, ha sido aprovechada y modificada (o transformada) por un largo periodo de tiempo por actividades de ganadería extensiva (desde el siglo XVIII). Sin embargo, es hasta mediados de los años 50's del siglo XX cuando se introduce el zacate buffel, como opción viable para incrementar la capacidad de producción en Sonora (Castellanos *et al.*, 2010). La introducción de esta especie ha modificado considerablemente la composición y estructura de grandes extensiones de terreno en el Desierto Sonorense (Castellanos *et al.*, 2004; Celaya-Michel, 2015; Franklin y Molina-Freaner, 2010) y con ello es probable que también su funcionamiento (Franklin *et al.*, 2006; Bravo-Peña, 2009; Celaya-Michel, 2011; Castellanos *et al.*, 2010). Sin embargo, muy poco se conoce del funcionamiento de las especies o ecosistemas de esta región (Castellanos *et al.*, 2010).

Varios estudios previos han documentado que el cambio en la cubierta vegetal, conlleva un cambio en las dinámicas de flujo de nutrientes (Celaya-Michel, *et al.* 2015), cambios en la productividad en los ecosistemas (Fan *et al.*, 1998; Randerson *et al.*, 1999; Stott, *et al.*, 2000; Scott, *et al.*, 2015), y en general el cambio en los flujos de energía presentes en el sitio modificado. Uno de los flujos más importantes, debido a su injerencia en el cambio

global (y climático), es el del Carbono, el cual ha ido en aumento y se espera que la tasa de crecimiento en la concentración de CO₂ en la atmósfera sea relativamente alta a futuro, si se mantiene el contexto actual, ya que, los sumideros de carbono son más pequeños en respuesta a las condiciones ambientales generadas por el fenómeno de El Niño (como es el caso de cuando se presentó en los años 2015 y 2016) (Le Quéré *et al.*, 2016).

Con el fin de comprender mejor las dinámicas del ciclo mundial del carbono, es necesario tener evaluaciones de las emisiones antropogénicas de CO₂ y su redistribución entre la atmósfera, el océano y la biosfera terrestre, y esto es de gran importancia para apoyar el desarrollo de políticas climáticas pertinentes y proyectar el cambio climático futuro (Le Quéré *et al.*, 2016). Es por ello que el presente trabajo busca evaluar las fluctuaciones en los flujos de carbono y agua en un sitio con matorral subtropical, en donde ha sido introducido el zacate buffel.

En la actualidad, existen muy pocos estudios regionales que planteen la evaluación y las posibles consecuencias del cambio de ecosistemas nativos, a praderas de zacate buffel. A pesar de los estudios realizados acerca de esta planta, existen vacíos de información en lo referente a cuál es el repositorio y cómo ocurre la captura de carbono en grandes extensiones de terreno. Adicional a lo anterior, la literatura referente en cuanto a la relación de la productividad del buffel/matorral desértico con los sistemas globales controladores del clima, también es escasa.

La técnica de covarianza de vórtices, o covarianza de flujos turbulentos, es cada vez más utilizada debido a que provee mediciones continuas entre la superficie del suelo y la atmósfera. Dichas mediciones nos permiten conocer cómo es la productividad del ecosistema, arrojando estimaciones de mediciones de intercambio de CO₂, agua (H₂O) y flujos de energía (Baldocchi, 2003). Con estos flujos se puede conocer cómo está respondiendo el ecosistema a los diferentes patrones ambientales, (por tanto, se puede evaluar cómo se está viendo afectado el ecosistema debido a los efectos de cambio global); las mediciones de los flujos por medio de las torres de covarianza nos permiten hacer inferencias sobre cómo los servicios de soporte y regulación del ecosistema se están alterando al cambiar la cubierta vegetal nativa por especies invasoras (Hinojo, *et al.*, 2013).

El presente trabajo busca analizar cómo es la captura de carbono en praderas de buffel y matorral subtropical, a dos escalas en el paisaje: a) utilizando lecturas de torres de covarianza de flujos y b) usando imágenes satelitales obtenidas del sensor MODIS (por sus siglas en inglés: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de donde se obtendrá el NDVI que es un índice de la vegetación que nos brinda una idea de la actividad fotosintética a nivel paisaje. Lo anterior con el fin de entender mejor, cómo se comportan las praderas de buffel cuando son comparadas con sitios de matorral subtropical en la misma zona.

I. ANTECEDENTES

La región biogeográfica del Desierto Sonorense comprende un gradiente de zonas áridas y semiáridas, tiene una extensión de 300,000 km² (Castellanos *et al.*, 2013) que abarca los estados de Arizona y California en Estados Unidos y en México abarca los estados de Baja California, Baja California Sur y Sonora (Turner *et al.*, 1995). Sin embargo, es posible decir que la diversidad biológica específica que se encuentra en la parte correspondiente al estado de Sonora es alta en comparación con otros desiertos del mundo (Burquez *et al.*, 1999). Uno de los biomas presentes en el límite sur del Desierto Sonorense es el Matorral (subtropical y desértico), los cuales se encuentran ampliamente distribuidos dentro de esta misma área. Sin embargo, más allá de su extensión, la importancia de estos tipos de cobertura radica en que prestan diversos servicios ecosistémicos, tales como la captura de carbono. Desafortunadamente, las actividades ganaderas en la región central de Sonora han traído consigo la introducción de especies invasivas, como el zacate buffel, el cual se ha documentado que modifica la dinámica de captura de carbono al reemplazar a la vegetación nativa, alterando el correcto funcionamiento del ecosistema (Castellanos *et al.*, 2013). Es por ello que es importante realizar estudios para conocer cómo son las modificaciones que sufren las especies nativas y el ecosistema en general cuando las praderas de buffel se establecen, para ello el uso de información obtenida por percepción remota en conjunto con datos colectados mediante torres de covarianza de flujos, nos ayudan a tener una idea más precisa de cómo son los flujos de carbono a nivel paisaje. Mediante las torres de covarianza se pueden obtener los datos *in situ* de intercambio neto del ecosistema (NEE) y de ahí es posible derivar 1) la respiración del ecosistema (Reco), que es el carbono utilizado en la respiración de las plantas y los heterótrofos, y 2) la producción primaria bruta (GPP), que es el carbono total fijado. El intercambio neto del ecosistema es la resta de GPP menos Reco, lo que finalmente nos dice cuánto es el carbono que se quedó en las plantas. Por último, también de las torres se obtiene el flujo de la evapotranspiración (ET), que es el agua que se evaporó y transpiró de las plantas y el suelo.

I.1. Determinantes de flujos de carbono y agua en zonas áridas

Los ecosistemas de zonas áridas y semiáridas constituyen aproximadamente un tercio de la superficie terrestre y en México, el 60% del territorio está conformado por estos ecosistemas. A pesar de ello, el estudio del intercambio de gases en el paisaje en regiones áridas y semiáridas es menos común que en los entornos más húmedos (Derek Eamus *et al.*, 2013). Es poco lo que se sabe sobre la importancia de estas zonas en el ciclo del carbono (Montaño *et al.*, 2016), por ello, es importante realizar más estudios en zonas áridas debido a que estas zonas contienen el 36% del carbono almacenado en los ecosistemas terrestres (Campbell *et al.*, 2008). Los estudios sobre dinámicas del carbono en México han estado centrados en su mayoría en los ecosistemas tropicales húmedos (Segura-Castruita *et al.*, 2005). Se han documentado investigaciones en los ecosistemas de zonas áridas y semiáridas mexicanas que incluyen evaluaciones sobre el intercambio neto de carbono con la atmósfera, la productividad primaria, la evapotranspiración y el flujo de carbono en la producción y descomposición de materia orgánica (Hinojo-Hinojo *et al.*, 2016, 2019). Incluso, se han realizado estudios sobre el almacenamiento de carbono en la fitomasa aérea y en el suelo, así como estudios sobre el efecto de diferentes especies de plantas, biocostras y microorganismos involucrados en la transformación del carbono en el suelo. Todo ello con el fin de entender los mecanismos multiescalares que finalmente determinan la productividad neta del ecosistema que, junto con la respiración del suelo y la descomposición de la hojarasca, son procesos influenciados principalmente por la variabilidad de la precipitación, debido a que la vegetación responde a los pulsos de agua que se presentan en la zona. Aunque las tasas de descomposición también dependen de la radiación solar y la temperatura (Montaño *et al.*, 2016), los microorganismos necesitan de humedad disponible para reintegrar la materia orgánica al suelo, es por ello que la descomposición de la misma resulta un proceso lento en zonas áridas.

Las zonas áridas y semiáridas, como muchos otros ecosistemas, están expuestas a diferentes amenazas que generan impactos negativos en los ecosistemas. Ejemplo de ello es el cambio de uso de suelo, el cual se ha reportado que disminuye hasta en 50% el carbono orgánico del suelo, a su vez, las especies vegetales formadoras de islas de fertilidad amortiguan el impacto de la perturbación en el almacenamiento del carbono, ya que actúan como “hotspots” de conservación y transformación del carbono orgánico del suelo (Montaño

et al., 2016). Por la misma razón, estos ecosistemas pueden resultar sumideros y fuentes de carbono a la atmósfera, por lo cual deben ser considerados en los análisis de cambio global, ya que podrían impactar los actuales escenarios y las estrategias de mitigación del cambio climático global (Lal *et al.*, 1999; Lal, 2004; Montaña *et al.*, 2016).

I.2. Introducción de especies de plantas exóticas

Actualmente la biodiversidad se ve afectada por múltiples factores; las invasiones biológicas están entre las principales amenazas, sus efectos más notorios son la modificación de la estructura y del funcionamiento de las comunidades invadidas (Arroyo, 2000). La introducción de especies exóticas a los ecosistemas tiene efectos negativos, tal es el caso de la pérdida de diversidad biótica nativa, lo que conduce a la interrupción de procesos ecosistémicos prescindibles y con ello se ven comprometidos valiosos servicios ecosistémicos (MEA, 2005).

La sociedad humana moderna es la principal responsable de la extensión espacial de la invasión de plantas exóticas (Turner 1990; Vitousek 1997, Ellis y Ramankutty, 2008); es por ello que, en los últimos años, el tema de la invasión de plantas no nativas se ha estado abordando desde perspectivas sociales y ecológicas (Robbins, 2004; McNeely, 2005) debido a las diferentes investigaciones de múltiples disciplinas que hoy en día reconocen la influencia que las actividades antropogénicas tienen sobre la ecología de las invasiones (D'Antonio *et al.*, 1999; Mack y Lonsdale, 2001; Perrings *et al.*, 2002; Von Der Lippe y Kowarik, 2007). Dentro de las diversas actividades humanas que inducen la propagación de especies alóctonas, el comercio internacional y el transporte son consideradas como causas directas de la traslocación de plantas, es por ello que las invasiones pueden ser vistas como un producto de la globalización (Warren, 2007; Perrings, *et al.*, 2010).

A su vez, el concepto de uso de la tierra y la realización de actividades humanas productivas en un paisaje, tales como la agricultura y la ganadería, resultan útiles para examinar el papel que desempeñan los individuos en la introducción e invasión de plantas exóticas (GLP, 2005; Turner *et al.*, 2007; Reenberg 2009).

Ejemplo de las consecuencias de implementar plantas exóticas con el fin de incrementar el ingreso monetario, es lo que actualmente sucede y ha sucedido desde la década

de 1950 con la plantación de praderas de zacate buffel en el Desierto Sonorense, como una estrategia para incrementar la producción de forraje para el ganado (Franklin, *et al.*, 2010).

Durante el último siglo, el zacate buffel ha sido uno de los varios tipos de pastos africanos responsables de los cambios extensos de la vegetación nativa en América (Parsons, 1972; Williams y Baruch, 2000). Tan solo para Estados Unidos, las invasiones de aproximadamente 5,000 especies de plantas exóticas, incluido el buffel, han afectado millones de hectáreas de hábitat; para la agricultura, alrededor del 12% de las cosechas se ha reducido por causa de estas malezas, y se estima que los costos por dichas pérdidas se traducen en al menos \$33 billones de dólares por año (Pimentel, *et al.*, 2005).

El zacate buffel está implicado en la transformación y deforestación de cientos de miles de hectáreas (Franklin, *et al.*, 2006), ocasionando impactos severos resultantes de la conversión de matorrales a praderas de buffel, lo que lleva a cambios ecológicos más extensos en la medida que el buffel invade el paisaje circundante (Yetman y Búrquez, 1994; Búrquez-Montijo, 2002). Existen algunas estimaciones que sugieren que grandes extensiones de matorral del desierto y matorral espinoso se han convertido a praderas de buffel en Sonora, a través de la siembra y el establecimiento de este pasto exótico (Castellanos, *et al.*, 2002). En la región central de Sonora se encontró que al transformar la vegetación nativa a pastizales de buffel, disminuye la representación del número de especies de entre el 37-100% de 4 de los 6 tipos funcionales, y 5.6-100% de la cobertura en todos ellos, con posibles consecuencias en cambios en el balance y secuestro de carbono, productividad primaria y uso de agua de estos ecosistemas (Hinojo, 2013).

El Desierto Sonorense cuenta con un clima cálido y seco (Cox, 1988, Ibarra-F, *et al.*, 1995), lo cual le permite al buffel establecerse, a través de la tolerancia a la sequía, la reproducción sexual o asexual ocurre mediante producción de semillas (Burgess, *et al.*, 1991; Van Devender y Dimmitt, 2000; Mack, 2002), y esto le permite a este zacate superar la competencia por los recursos con las plantas nativas (Lyons, *et al.*, 2009; Van Devender, *et al.*, 2009). Burquez-Montijo en 2002, sugiere que el ciclo que lleva el buffel pone en riesgo al Desierto Sonorense de convertirse permanentemente en una sabana exótica relativamente homogénea, esto porque a medida que el buffel se expande, muere y eventualmente se quema, introduce un ciclo de fuego de auto-perpetuación que mata a las perennes nativas y favorece

aún más el establecimiento de este pasto (Brooks, 2004). Morales-Romero *et al.* (2019) documentaron que cerca del 65% de la red de carreteras del estado de Sonora ha sido colonizado por este pasto y que las carreteras se han vuelto un vector de invasión hacia matorrales adyacentes.

Brenner, en el 2010, menciona que probablemente los incentivos para el desarrollo económico de la cría tradicional junto con otros medios de vida ecológicamente sostenibles, por ejemplo, la caza deportiva en pastizales nativos, podrían reducir la tasa de conversión de pastos nativos y el grado de invasión de buffel en la región.

Sin embargo, debido a la popularidad del buffel aunado al patrocinio gubernamental para implementarlo, desde hace muchos años, esto supone una gran barrera para que se realice un cambio (Yetman, 1996), siendo este pasto, actualmente conocido como una de las especies introducidas en el noroeste de México que han ocasionado un mayor impacto en los ecosistemas del desierto (Morales-Romero, *et al.*, 2019).

I.3. Ganadería en el Norte de México

La ganadería tiene una importante función económica y social en comunidades indígenas y campesinas de México; actualmente es el tipo de uso de suelo de mayor extensión en el mundo, ocupando aproximadamente un 26% de la superficie terrestre (Steinfeld *et al.*, 2006). Desde la década de los años cuarenta hasta finales de los años setenta el comercio en Sonora estuvo ligado a las actividades productivas más importantes: la agricultura, la ganadería y la industria vinculada a ellas. Sin embargo, hablando propiamente de la ganadería, su aparición en el Estado de Sonora se remonta a los tiempos de la colonia en el año 1591 con la llegada de los misioneros jesuitas que colonizaron al noroeste de México y suroeste de los Estados Unidos. A ellos se les atribuye la introducción de la ganadería como una de las nuevas actividades productivas del estado, estableciendo crías de ganado vacuno, ovino y caballar que pronto prosperaron, formando tres tipos principales de productores ganaderos: criadores, preengordadores y engordadores, como actores interrelacionados en el proceso de la producción pecuaria. Debido al alto impacto productivo de la ganadería, con el paso de las décadas y los siglos se convirtió en una de las principales actividades en la región, incluso se convirtió, desde entonces y hasta el presente, en el sello y orgullo de los habitantes del Estado

de Sonora, principalmente por la calidad reconocida mundialmente de su ganado y con ello, para los sonorenses es su patrimonio de donde surge su tradición, cultura y costumbres (Unión Ganadera Regional de Sonora, 2004).

En la actualidad la ganadería atraviesa momentos difíciles propiciados por el sobrepastoreo, sequías, tala inmoderada, fuegos accidentales y desmontes intensivos para siembras de especies de temporal, es por ello que lo anterior representa una de las principales causas del deterioro de los agostaderos (O'Hara, 1993); aunado a esto, también la ganadería se ha visto afectada desde hace tiempo por la globalización, debido a la competencia que ha ocasionado el Tratado de Libre Comercio (Melton *et al.*, 1994).

Por lo anterior, los ganaderos han buscado estrategias para volver más rentable su actividad y productividad en los agostaderos, ejemplo de ello, es la introducción del zacate buffel (Castellanos, *et al.*, 2002; Bravo *et al.*, 2010), con el objetivo de incrementar la capacidad de producción de forraje para el ganado y con ello incrementar la producción de la carne (Ibarra-Flores *et al.*, 2005).

En el caso de Texas, el zacate buffel ha demostrado buenos resultados en la rehabilitación de agostaderos (Hussey *et al.*, 1996). Para el noroeste de México, desde los años cincuenta, el buffel ha presentado una buena adaptabilidad y, por lo tanto, una producción forrajera mayor, que según Lavander (2003) resulta 2 o 3 veces superior en comparación a la de los zacates nativos (0.3 t de MS/ha). Además, una pradera de buffel puede llegar a persistir en condiciones óptimas entre 15 y 20 años, siempre y cuando, el manejo sea el adecuado (Ibarra *et al.*, 2003).

Por otro lado, otros estudios realizados en la zona, demuestran que, en condiciones de sequía, el ganado ha logrado desempeñarse mejor en las tierras desérticas de vegetación natural que en los pastizales convertidos a pradera de buffel, esto debido a que los matorrales del desierto proporcionaron una reserva de agua, mientras que el buffel se mantuvo inactivo bajo condiciones de sequía (Chavez, 1999; Vásquez-León *et al.*, 2003). Esto puede deberse a la capacidad de la vegetación nativa de almacenar y transportar el agua por medio de sus raíces un poco más profundas que las del buffel, que en condiciones de sequía no tienen la capacidad de desarrollarlas un poco más.

I.4. Mediciones *in situ* de flujos de carbono y agua

Los flujos de carbono y agua representan gran relevancia, entre otras cosas, para evaluar el estado de un ecosistema, ya que la suma de los flujos de energía son el resultado del funcionamiento del ecosistema. El dióxido de carbono fijado en la fotosíntesis se define como la producción primaria bruta (GPP por sus siglas en inglés) y la producción primaria neta (NPP por sus siglas en inglés) es igual a la cantidad de GPP menos la respiración de las plantas. Estos conceptos nos brindan una idea de cómo es la productividad en un ecosistema (Hinojo *et al.*, 2019).

Para entender los procesos de los ecosistemas desde un punto de vista funcional es fundamental entender las relaciones entre la variabilidad climática, los ciclos biogeoquímicos y las interacciones superficie-atmósfera. En las últimas décadas, el método de covarianza de flujos turbulentos (EC por sus siglas en inglés) ha sido aplicado de manera creciente en ecosistemas terrestres, marinos y urbanos para medir flujos de carbono y vapor de agua, así como también mediciones de energía, tanto calor latente como calor sensible. Dichas mediciones han sido utilizadas en diversas regiones con el fin de generar información científica para el diseño de políticas ambientales y estrategias de adaptación (Vargas *et al.*, 2013).

Es importante conocer los procesos que gobiernan las dinámicas del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres, marinos y escalas continentales más grandes para poder informar a los tomadores de decisiones, así como para avanzar en la investigación referente a los flujos de carbono (Anderson y Bows, 2008). Lamentablemente, es bastante notorio que la mayoría de las investigaciones que promueven la ciencia del ciclo del carbono se producen de manera abrumadora en los países desarrollados, lo cual deja a los países en desarrollo subrepresentados, esto limita los avances en el conocimiento y existe un intercambio de información muy bajo entre los países (Rübelke, 2011) lo que resulta ser crítico porque los problemas ambientales no están determinados por límites sociopolíticos o económicos específicos. Por lo tanto, las soluciones deben buscarse y fomentarse a través de colaboraciones internacionales científicas.

En Estados Unidos y Canadá existe el Programa Norteamericano del carbono (NACP, por sus siglas en inglés), cuya meta es establecer una cohesión a lo largo de Norteamérica en

los campos de la dinámica de los almacenes de carbono y flujos de gases de efecto invernadero, y las estrategias de mitigación relacionadas con el carbono. Estos programas de investigación multidisciplinarios mejoran sustancialmente nuestra comprensión científica de la dinámica del ciclo del carbono en América del Norte (Vargas *et al.*, 2012). En el caso de México, la ciencia del ciclo del carbono es un campo de investigación muy reciente, que ha sido principalmente desarrollado por ecólogos y biólogos interesados en conocer la producción primaria en biomas terrestres (Martinez-Yrizar *et al.*, 1992) y marinos (Lara Lara *et al.*, 2003).

En México, existe MexFlux que es un consorcio de científicos que utilizan el método de covarianza de flujos turbulentos (EC) para medir el intercambio de masa y energía entre la vegetación y la atmósfera (Loescher *et al.*, 2006) en los ecosistemas mexicanos (Vargas y Yopez, 2011; Hinojo *et al.*, 2016, Hinojo *et al.*, 2019). MexFlux representa una red regional dentro de la red global de sitios que cuentan con torres de covarianza de flujos (es decir, FLUXNET), que está representada por más de 500 sitios de estudio en todo el mundo (Baldocchi, 2008). Mexflux cuenta con once sitios con torres de covarianza de flujos que representan diversos tipos de ecosistemas, incluidos matorrales, bosques y pastizales de zonas áridas y zonas tropicales (Vargas *et al.*, 2012).

Un ejemplo de estudio de mediciones *in situ* que se pueden hacer por medio de torres de covarianza de flujos, es uno realizado sobre el Monzón Norteamericano (NAMS, por sus siglas en inglés) el cual es un importante fenómeno regional que propicia la mayoría de las lluvias a lo largo del oeste de México y el suroeste de Estados Unidos. Los bosques secos tropicales en el noroeste de México influenciados por NAMS mostraron que el intercambio neto de carbono del ecosistema (NEE) fue significativamente diferente entre las estaciones húmedas y secas, con una captación total de carbono de $374 \text{ gCO}_2 \text{ m}^2$ durante la temporada del monzón (Perez-Ruiz *et al.*, 2010).

En el Noroeste de México, Hinojo-Hinojo y colaboradores (2016), realizaron mediciones de intercambio neto de CO_2 del ecosistema, producción primaria bruta, respiración y evapotranspiración en praderas de zacate buffel, desde agosto de 2011 hasta finales del año 2013. Una de las recomendaciones que plantean los autores, con base a los resultados obtenidos, sugieren que, para favorecer la absorción de carbono durante las

temporadas de otoño, invierno y primavera, es necesario promover el establecimiento de especies nativas que cuenten con estrategias fenológicas y de uso de agua contrastantes con las del zacate buffel.

Posteriormente, Hinojo-Hinojo y colaboradores en 2019, por medio de dos torres de covarianza de flujos (una ubicada en pradera de buffel y la otra en un sitio con matorral subtropical), evaluaron los flujos de carbono, agua y energía para tratar de comprender cómo se ve impactada la producción neta del ecosistema por el cambio de uso de suelo y el cambio de la cobertura de suelo por la introducción del zacate buffel en la parte sudeste del Desierto Sonorense.

I.5. Percepción remota y medición de flujos de carbono

La ciencia de la percepción remota nos sirve para obtener información, respecto de un objeto o proceso, por el análisis de los datos obtenidos mediante un sensor o instrumento que no está en contacto físico con el objeto o el proceso observado. Son técnicas útiles para cuantificar los cambios ocurridos a nivel del paisaje, estimar pérdidas e intercambios entre los tipos de vegetación de interés que se encuentran presentes en la región donde se quiere realizar el estudio (Xie *et al.*, 2008).

El mapeo de la vegetación a través de imágenes de sensores remotos implica varias consideraciones, procesos y técnicas. El aumento de la disponibilidad de imágenes de sensores remotos debido al rápido avance de la tecnología de sensores remotos amplía el horizonte de nuestras opciones de fuentes de imágenes (Xie *et al.*, 2008).

Gran parte de la elaboración de este trabajo requiere del uso de herramientas de percepción remota con el objetivo de obtener imágenes satelitales del área de estudio y poder tener una idea precisa de la actividad fotosintética de la vegetación presente en el sitio; aunque existen diversos índices de la vegetación, para este estudio utilizamos el NDVI, que más adelante será descrito más ampliamente.

Como lo mencionan Hill *et al.* en el 2004 y Franklin *et al.* en el 2006, los métodos de percepción remota ofrecen un medio no intrusivo para rastrear la propagación del pasto

buffel, y para determinar su impacto en las funciones del ecosistema, como la tasa de crecimiento de los pastos y la evapotranspiración.

Nagler, *et al.* en 2009, evaluaron la productividad de praderas de buffel por medio del NDVI y encontraron que las praderas de zacate buffel creadas con el proceso de desmonte en agostaderos con pastoreo tienen una productividad primaria neta menor a los de desierto sin convertir, laderas y corredores ribereños. Bajo presiones de alto pastoreo como es típico en Sonora, el zacate buffel tiende a ser improductivo y la remoción de arbustos y árboles nativos reduce la reserva de ramoneo disponible para pastorear. Estos resultados cuestionan la efectividad de convertir el desierto nativo a praderas de zacate buffel como medio para mejorar el agostadero para ganado en las Planicies de Sonora.

Intentando entender la dinámica de cobertura y productividad del buffel en zonas áridas, Franklin y colaboradores (2006), por medio de fotografías aéreas y las imágenes satelitales de TM sobre las planicies de Sonora, demostraron que los parches de buffel generalmente aparecen con menos cobertura vegetativa que en las comunidades nativas circundante. La sugerencia principal que plantean los autores es que la práctica de desmonte debe suspenderse en Sonora hasta que se demuestre que realmente se incrementa la productividad y que se pueden controlar los efectos negativos en los ecosistemas adyacentes.

También, Franklin y Molina-Freaner en 2010, realizaron un estudio de las consecuencias que la conversión de matorrales a praderas de zacate buffel ocasionan en términos de productividad y modificaciones a la estructura vegetal en la región Centro de Sonora. Ellos encontraron que en los sitios donde se había convertido a pradera de buffel los valores de NDVI fueron significativamente más bajos que los sitios de vegetación nativa, lo que sugiere que la biomasa total sobre el suelo es menor en las praderas de buffel que en la vegetación nativa.

A su vez, Bravo-Peña y Castellanos en 2010, mencionan que las estimaciones realizadas con percepción remota sugieren que los ecosistemas dominados por praderas de buffel tienen menor producción de biomasa sobre el suelo que otros matorrales del Desierto Sonorense.

Hinojo-Hinojo y colaboradores en 2019, mediante tres años de mediciones de producción neta del ecosistema, producción primaria bruta, respiración del ecosistema y

evapotranspiración, obtenidas de torres de covarianza de flujos, reportaron que matorrales adyacentes y sitios con pradera de buffel mostraron diferencias estacionales en los flujos de CO₂ y la evapotranspiración en el Desierto de Sonora. Además, estos autores mencionan que son necesarios más estudios referentes a flujos de carbono y agua, con el fin de comprender mejor el comportamiento de estos flujos al tomar en cuenta el cambio de cobertura y el cambio de uso de suelo, en las zonas áridas y semiáridas.

I.6. Efectos de patrones climáticos en los flujos y su interacción con el cambio de uso de suelo

Actualmente un tercio de la superficie terrestre está cubierto por pastos o cultivos donde los procesos de mayor transformación han ocurrido en los últimos trescientos años (Houghton, 1994; Brovkin *et al.*, 2006). El cambio en el uso del suelo, especialmente la expansión de las tierras agrícolas y de pastos, ha contribuido entre el 15 - 20% a las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial (IPCC, 2000) y a la pérdida de la diversidad biológica y fragmentación de hábitats (Chazal y Rounsevell 2009; Fahrig, 2003).

Rodríguez-Eraso, en 2010 se interesó en estudiar cómo los cambios de uso del suelo en regiones específicas del territorio pueden estar influenciando la climatología local. Para ello, analizó la dinámica de cambio de uso y cobertura del suelo mediante matrices de cambio entre 1975 y 2005 e información del NDVI para el periodo 1985-2005. En el ámbito regional se efectuaron experimentos climáticos y de sensibilidad climática para el período 1960-2000 usando un modelo climático regional (Precis®), y a nivel de las estaciones meteorológicas, se simuló la precipitación y temperatura a través de evidencias empíricas de cambio de cobertura y uso del suelo y clima mediante análisis de series de tiempo de precipitación, temperatura y NDVI. Los resultados indican que las anomalías, tanto en promedio como en varianza de la precipitación, coinciden con las fases extremas del fenómeno de El Niño y La Niña, y también por los cambios de cobertura y uso del suelo. La presencia de dichos fenómenos ocasiona fluctuaciones en las dinámicas de los ecosistemas al alterar principalmente los patrones de la precipitación (Zolotokrylin *et al.*, 2016) y, por consiguiente, las dinámicas de flujo de carbono que a menudo son controladas por el clima.

Derivado de lo anterior, podemos inferir que el estudio del ciclo global del carbono es prioritario para entender las consecuencias del incremento acelerado de la concentración de CO₂ en la atmósfera, para diseñar estrategias a fin de reducir sus emisiones, así como también, entender su efecto en el funcionamiento de los ecosistemas y de esta manera mitigar el cambio climático global (Prentice *et al.*, 2001; Sitch *et al.*, 2008).

II. HIPÓTESIS

El uso de percepción remota en combinación con el uso de torres de covarianza, nos permiten estimar la captura de carbono a nivel paisaje en praderas de buffel y sitios con vegetación nativa que se encuentran en la región central del estado de Sonora. A su vez, es posible diferenciar el comportamiento en cuanto a captura de carbono, cuando se toman en cuenta los patrones meteorológicos de la oscilación del Pacífico Sur.

III. OBJETIVOS

III.1. Objetivo general

Describir los patrones de productividad de los ecosistemas (captura de carbono) de praderas de zacate buffel y matorral subtropical, utilizando imágenes satelitales de mediana resolución espacial y mediciones de covarianza de flujos. A su vez, describir los procesos de captura de carbono de las comunidades antes mencionadas, en función de los patrones climáticos de la Oscilación del Pacífico Sur.

III.2. Objetivos específicos

- Analizar flujos de carbono y NDVI en praderas de buffel y matorral subtropical.
- Modelar las estimaciones de flujos de carbono a nivel paisaje.
- Analizar la relación entre la oscilación del Pacífico Sur y los flujos de carbono.

IV. METODOLOGÍA

IV.1. Área de estudio

El sitio de estudio se encuentra dentro del municipio de La Colorada (Figura 1), específicamente en el rancho experimental “El Churi” (28° 42’ 40.32" N y 110° 32’ 58.14" O), donde la precipitación media anual es de 476 mm y la temperatura media anual es de 22.8 °C (Hinojo-Hinojo *et al.*, 2019); se encuentra a 400 m sobre el nivel del mar. Las condiciones de este sitio han resultado favorables para actividades como la ganadería y la caza, siendo dichas actividades las más representativas en “El Churi”.

La ganadería en este sitio, ha promovido la introducción de especies exóticas de plantas para incrementar el alimento del ganado, tal es el caso de la introducción del zacate buffel, que desde los años 50’s ha sido una alternativa para incrementar la producción de forraje en la región y en la mayor parte del estado de Sonora. Sin embargo, y a pesar de que ha tenido buenos resultados para los ganaderos, *C. ciliaris* es una especie de zacate que ocasiona modificaciones en la estructura y composición de este ecosistema. Ha demostrado un desplazamiento de las especies nativas resultando ser una especie invasora y su dispersión resulta difícil de controlar; además, provoca cambios en la productividad, la entrada de materia orgánica, o cambios en los reservorios de recursos como agua y nutrientes (Ehrenfeld *et al.*, 2003).

Dentro de este rancho se seleccionaron seis sitios para esta investigación, tres sitios son de Matorral Subtropical y otros tres sitios son de Pradera de Buffel, en donde se cuenta con una torre de covarianza de flujos para cada tipo de vegetación. Los sitios que cuentan con las torres son los sitios que fueron numerados con el número uno, por ejemplo, el sitio que cuenta con la torre en el matorral subtropical se denominó como “Matorral Subtropical-1 (MS-1)”, lo mismo para el sitio de buffel que cuenta con la torre, “Pradera Buffel-1 (PB-1)” y así sucesivamente con los seis sitios de estudio (Figura 1). Cada sitio tiene un área mínima aproximada de 1 km².

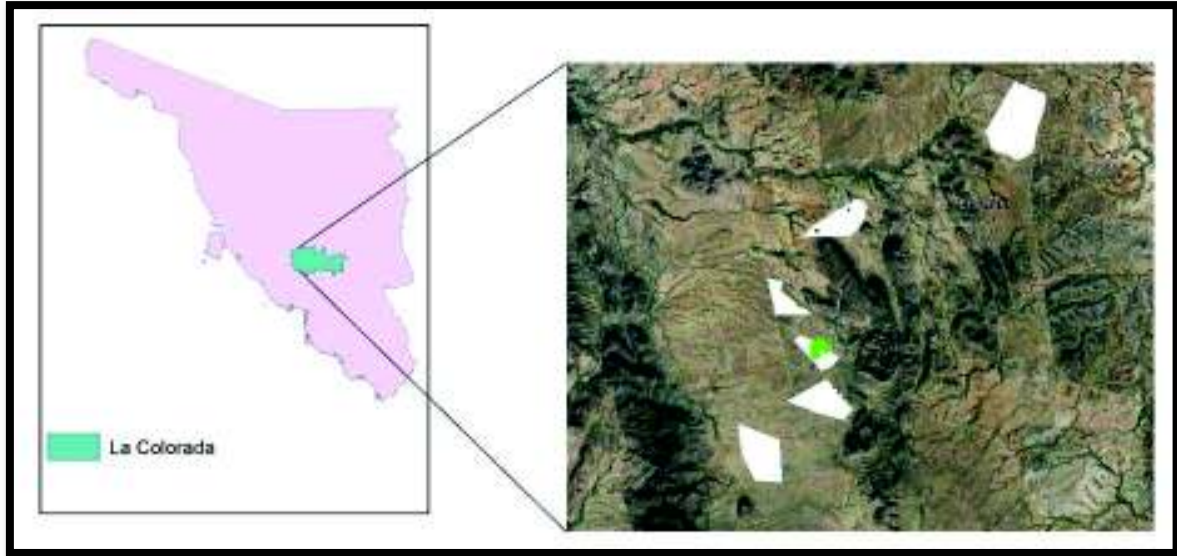


Figura 1. Área de estudio. Se muestran los seis sitios de estudio, que son los polígonos de la figura del lado derecho. Los que se encuentran más hacia el norte corresponden a los sitios de buffel y los polígonos que se encuentran más hacia el sur son de matorral subtropical. De dichos polígonos se extrajeron los proxis de flujos de carbono del año 2000 al año 2017.

IV.2. Bases de datos

IV.2.1. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

El sensor MODIS se encuentra montado en el satélite Terra y Aqua, es un instrumento que orbita la Tierra. Terra es un satélite de órbita polar y está sincronizado para que pase de norte a sur a través del ecuador en la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador en la tarde (NASA MODIS). Tiene una resolución espacial máxima de 250 metros, resolución temporal es de un día, y cuenta con 36 bandas espectrales discretas.

En el caso del satélite Terra, es utilizado a menudo para derivar índices de la vegetación (tales como el NDVI) y con ello obtener aproximaciones del comportamiento de la fotosíntesis realizada por las comunidades vegetales, a nivel paisaje (Fensholt, 2004). Con estos datos es posible comprender más a fondo las dinámicas y los procesos que ocurren en la Tierra a nivel mundial, debido a que MODIS desempeña un papel muy importante en el desarrollo de modelos del sistema terrestre que son capaces de predecir el cambio global, lo cual resulta de ayuda para los responsables de las políticas ambientales para una correcta toma de decisiones y protección del medio ambiente (Romo *et al.*, 2013). De MODIS se

generan una serie de subproductos derivados de la combinación de bandas, algunos de estos productos son los que se encuentran dentro del paquete de datos de índices de vegetación MOD13Q1.

Como parte de este estudio, se obtuvieron series de tiempo anuales, de imágenes derivadas de los sensores MODIS, específicamente del producto MOD13Q1 el cual comprende los índices de la vegetación (NASA, 2018). Una vez obtenidos estos productos (para los años 2000 a 2017), se procedió a aislar y compilar el NDVI (compuesto de 16 días), en una secuencia temporal organizada (23 compuestos, por año, a través de 18 años), utilizando software fotogramétrico especializado. Finalmente, se analizó la serie de tiempo para observar cómo es la dinámica de la función en sitios con matorral subtropical y sitios que han sido convertidos a praderas de buffel.

IV.2.2. Misión de Medición de Lluvia Tropical (TRMM)

La Misión de Medición de Lluvia Tropical (TRMM por sus siglas en inglés) es una misión conjunta entre la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos y la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial (JAXA) de Japón. El satélite TRMM fue lanzado el 27 de noviembre de 1997 desde el Centro Espacial Tanegashima en Tanegashima, Japón.

Este satélite/sensor tiene como objetivo medir el intercambio de lluvia y energía de las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Tiene aproximadamente 25 kilómetros de resolución espacial, una resolución temporal diaria, y mide la precipitación en milímetros por día.

Los instrumentos de lluvia utilizados en TRMM son el generador de imágenes de microondas TRMM (TMI), el radar de precipitación (PR) y el sistema de radiómetro visible e infrarrojo (VIRS) (Kummerow, C. *et al.*, 1998).

En este estudio el sensor se ha utilizado para conocer la dinámica de la precipitación en el sitio de estudio con el fin de evaluar si existe una estrecha correlación entre la captura de carbono y la precipitación y a su vez observar si existe variabilidad en estos parámetros al compararlos con los fenómenos relacionados a la Oscilación del Pacífico Sur.

Por medio del producto 3B43 de TRMM se derivó la precipitación y se obtuvo la sumatoria de cada mes para el área de estudio desde el año 1998 hasta el año 2017. Sin embargo, para realizar nuestros análisis sólo consideramos la serie de tiempo desde el año 2001 hasta el 2017, tomando pixeles centrados en el área de estudio. Específicamente, se seleccionaron los datos correspondientes a 16 pixeles del total del producto, ya que son los que abarcan la zona de estudio, los cuales se promedian y se analizan como parte de los objetivos. Son 228 compuestos, denotando sumatoria de precipitación mensual.

IV.2.3. Medición de covarianza de flujos de carbono (Torres de Eddy Covariance)

El método de Eddy Covariance es uno de los métodos más directos y con mayor precisión para determinar las tasas de emisión y consumo de varios gases (incluido el CO₂ y vapor de agua) en áreas con tamaños que varían desde unos pocos cientos hasta millones de metros cuadrados (Burba, 2013). Para realizar las mediciones de flujos de carbono, las torres cuentan con diversos sensores, para medir la velocidad del viento en los tres componentes espaciales u, v, w. Para medir la temperatura del aire se usa un anemómetro sónico, sincronizado con un Analizador de Gas Infrarrojo (IRGA, por sus siglas en inglés) para medir la magnitud escalar de las densidades de CO₂ y H₂O (Ruiz Reverter *et al.*, 2013), un piranómetro para medir la radiación solar y un pluviómetro para medir la precipitación. Es imprescindible el uso de un datalogger capaz de recoger y almacenar toda la información recolectada de los sensores (Ruiz Reverter *et al.*, 2013).

Dentro del sitio de estudio se encuentran instaladas dos torres de covarianza de flujos con datos históricos, la torre que se encuentra en el sitio con matorral subtropical cuenta con datos desde marzo del 2013 y la torre del sitio con pradera de buffel cuenta con datos desde agosto de 2011.

Las torres de covarianza de flujos de carbono nos brindaron las mediciones de 1) Respiración neta del ecosistema (Reco), 2) Evapotranspiración (ET), 3) Intercambio neto del Ecosistema (NEE) y finalmente 4) Productividad Primaria Neta (GPP), en los ecosistemas de interés. Cabe mencionar que para NEE, las unidades están dadas en gramos de carbono (gC), y está inversamente relacionado con la Productividad Neta del Ecosistema (NEP).

Específicamente, se utilizaron tres años de mediciones para dos sitios de estudio dentro del Rancho experimental “El Churi”. La torre ubicada en la pradera de buffel (28° 42’ 40.32" N y 110° 32’ 58.14" O) cuenta con datos desde agosto de 2011 y la torre que se encuentra en el matorral subtropical (28° 41’ 53.60" N y 110° 32’ 20.59" O) tiene datos desde marzo de 2013.

Con el fin de analizar estos datos junto con los datos de NDVI de MODIS, se realizó la integración temporal de los flujos, a la resolución temporal de los compuestos derivados de los sensores satelitales (resolución de 16 días).

IV.3. Análisis comparativo de los flujos de carbono y el NDVI entre los dos tipos de vegetación.

Con el fin de analizar la relación entre los flujos de carbono y el NDVI en cada tipo de vegetación, se realizaron análisis de regresión lineal simple, en donde se comparan los datos de los flujos de carbono (NEE, ET, Reco y GPP) para cada tipo de vegetación. De la misma forma, este análisis también se realizó para comparar los datos de NDVI entre el matorral subtropical y la pradera de buffel, con el objetivo de estimar la diferencia en cuanto a cómo se están comportando ambos tipos de vegetación.

El análisis se realizó en el programa estadístico R (RStudio Team, 2016), donde se procesaron cada uno de los flujos por tipo de vegetación, con el objetivo de evaluar si existía una correlación significativa entre 1) los flujos de C, y 2) El NDVI para los dos tipos de vegetación analizados.

IV.4. Modelación de las respuestas del NDVI en función de los flujos de carbono

Por medio de regresiones lineales, se evaluó la relación existente entre cada uno de los flujos de gases derivados del análisis de covarianza de flujos y los valores de NDVI. El análisis fue realizado para cada tipo de vegetación, con el fin de 1) Evaluar la certidumbre con la que NDVI explica los flujos de gases y 2) Obtener los modelos para estimar la relación de dichos parámetros para los sitios y los años que no cuentan con datos de torres de Eddy Covariance.

Este análisis también se realizó en R; con las ecuaciones obtenidas se busca poder aplicarlas para modelar las respuestas de los flujos de carbono con base al NDVI en los sitios de estudio que no cuentan con torres de covarianza con el fin de tener una serie de tiempo completa de los datos de los flujos de carbono.

IV.5. Modelación espacial de los flujos de carbono

Posteriormente a la obtención de los modelos, éstos fueron utilizados para la espacialización de la información en función del NDVI, para con ello poder conocer cómo es la productividad a nivel paisaje y en cada tipo de vegetación. Para ello se utilizó toda la serie de tiempo de NDVI para aplicarla a los modelos obtenidos y con ello poder establecer aproximados de cómo fue el comportamiento de los flujos a nivel paisaje, así como también obtener datos de captura de carbono en los años anteriores cuando no se contaba con mediciones por medio de torres de covarianza de flujos. Esto se realizó por medio del programa ERDAS Imagine (Earth Resources Data Analysis System), en donde se utilizaron las herramientas pertinentes para hacer los cálculos para cada uno de los polígonos de las áreas de estudio, a las cuales se les aplicó el modelo específico de cada uno de los flujos y dentro de esos modelos se requirieron los valores de NDVI para lograr espacializar el comportamiento referente a la productividad de ambos tipos de vegetación.

IV.6. Análisis de la variación por los patrones climáticos

A través de los reportes del NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos) (Tabla 1) de donde obtuvimos información sobre los fenómenos climatológicos que se presentaron durante la serie de tiempo (2000-2017) con el fin de evaluar la respuesta en términos de precipitación, flujos de carbono y actividad fotosintética de los dos tipos de vegetación cuando se presentaron eventos de El Niño, La Niña y los años neutros. Dicho análisis se realizó por medio del software R, se hicieron pruebas de ANOVA para evaluar si hubo diferencias significativas y una prueba de Tukey para determinar en cuál se presentaron dichas diferencias.

Para ello, los datos de todos los flujos, de NDVI, y de precipitación se separaron en dos temporadas: la temporada de verano, la cual consta de seis meses los cuales son mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre; y la temporada de invierno compuesta por los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril. Una vez determinada la separación de las temporadas, se procedió a hacer las sumatorias de los datos para agruparlos según la temporada de verano o invierno correspondiente para cada flujo de carbono, NDVI y precipitación, para posteriormente realizar los análisis de ANOVA y las pruebas de Tukey en el software R.

Tabla. 1. Tabla obtenida de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica que muestra los valores del índice oceánico de El Niño (ONI: media de los valores trimestrales de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en la región Niño 3.4), desde el año 2000 al 2017. En rojo y azul se representan episodios cálidos y fríos respectivamente, basados en los límites de +/- 0.5°C del ONI. Las abreviaturas son las iniciales de los tres meses que agrupan cada uno de los valores, comenzando en el mes de diciembre y terminando en el mes de enero.

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1.0

(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

En el presente estudio para determinar las categorías de Niño, Niña y años neutros, se tomaron los años de Niña moderada y Niña fuerte como años propiamente de la Niña y en el caso de los años de El Niño se consideraron los Niño moderado, Niño fuerte y Niño muy fuerte dentro de esta categoría. Siendo los años reportados como Niño/Niña débiles considerados como años neutros (Tabla 2).

Tabla. 2. Resultados de la clasificación de los años de acuerdo a la asignación de los fenómenos para cada año y en las diferentes temporadas (verano, invierno).

Año	Verano (Mayo – Octubre)	Invierno (Noviembre – Abril)
2001	Neutro	Neutro
2002	Niño	Neutro
2003	Neutro	Niño
2004	Niño	Neutro
2005	Neutro	Niño
2006	Neutro	Niña
2007	Niña	Niño
2008	Neutro	Niña
2009	Niño	Niña
2010	Niña	Niño
2011	Niña	Niña
2012	Neutro	Niña
2013	Neutro	Neutro
2014	Neutro	Neutro
2015	Niño	Niño
2016	Niña	Niño
2017	Neutro	Neutro

V. RESULTADOS

V.1. Bases de datos de MODIS

Las imágenes son de la serie de tiempo que va del 02 de febrero del año 2000 hasta el 19 de diciembre de 2017. Dentro del área que comprenden estas imágenes (Figura 2), se encuentran los 3 sitios con pradera de buffel, incluido el sitio con torre de covarianza de flujos y los 3 sitios con matorral subtropical, incluido el sitio con torre de covarianza de flujos.

Los datos de NDVI resultaron en 415 compuestos de 16 días, que es la resolución temporal de los compuestos de MOD13Q1 de MODIS. Esto quiere decir que cada uno de los 6 polígonos cuenta con 415 datos que van desde el 02 de febrero de 2000 hasta el 19 de diciembre de 2017. Dichos datos fueron graficados para conocer las fluctuaciones a lo largo de toda la serie de tiempo en cada tipo de vegetación (Figura 3).



Figura 2. Producto de MODIS – compuesto de NDVI correspondiente a la serie de tiempo desde el año 2000 hasta el 2017.

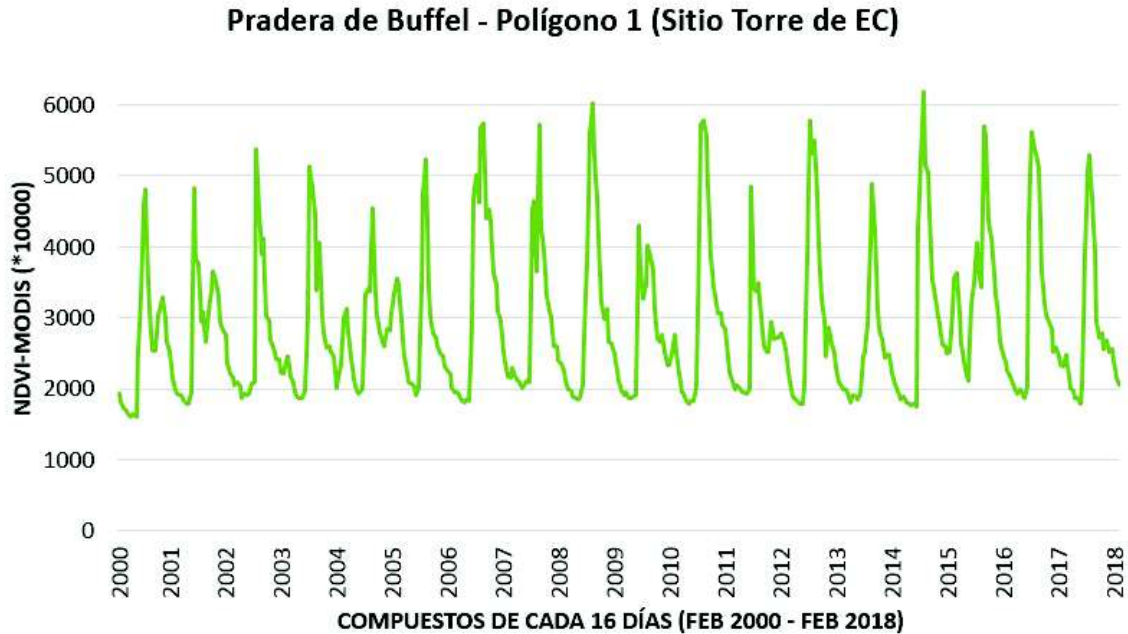


Figura 3. Dinámica de los valores de NDVI para el sitio 1 de pradera de buffel donde se ubica la torre de EC (serie de tiempo de 2000 a 2017).

V.2. Datos de torres de covarianza de flujos de carbono

Para este estudio, se obtuvieron los datos de los flujos de las torres de EC desde enero de 2013 a diciembre de 2015. Los datos fueron ajustados a promedios de cada 16 días para lograr empatarlos con la resolución temporal de los compuestos generados por el producto MOD13Q1 de MODIS y así poder realizar los análisis correspondientes. A continuación, se presentan las gráficas de los flujos para cada tipo de vegetación.

Por medio de la torre de covarianza de flujo ubicada en el sitio con pradera de buffel (Figura 4), se obtuvieron estas mediciones con las cuales podemos observar las fluctuaciones en cuanto a productividad del sistema desde el año 2013 al año 2015. Los datos fueron ajustados a cada 16 días para lograr empatarlos con la resolución del producto de MODIS-MOD13Q1. Los flujos de NEE, GPP y Reco están dados en unidades de gramos de carbono sobre metro cuadrado (gC m^{-2}) y la evapotranspiración es medida en unidades de milímetros. La frecuencia de los flujos representa el integrado de la toma de datos original, las mediciones del anemómetro y el analizador de gases se realizaron a una frecuencia de 10 Hz.

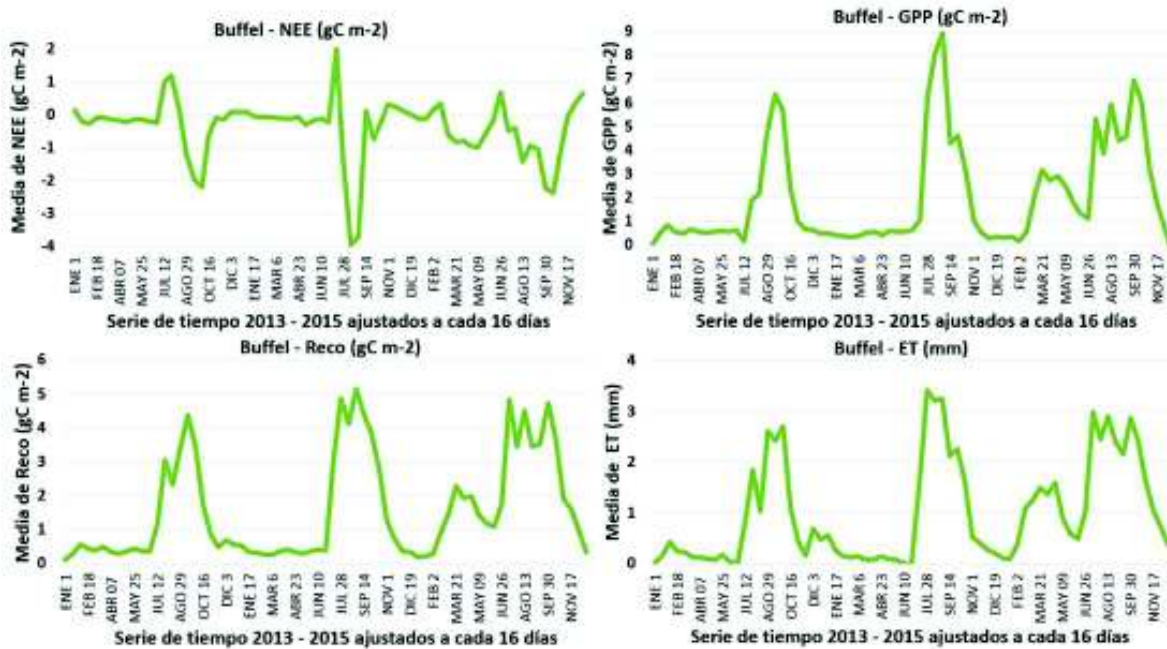


Figura 4. Dinámica temporal de los flujos de carbono (NEE, GPP, Reco y ET) de pradera de buffel. Los datos están ajustados a cada 16 días de la serie de tiempo 2013 - 2015.

Por medio de la torre de covarianza de flujo ubicada en el matorral subtropical (Figura 5), se obtuvieron estas mediciones que nos indican las fluctuaciones en cuanto a productividad del sistema desde el año 2013 al año 2015. Los datos fueron ajustados a cada 16 días para lograr empatarlos con la resolución del producto de MODIS-MOD13Q1. Lo que son los flujos de NEE, GPP y Reco están dados en unidades de gramos de carbono sobre metro cuadrado (gC m^{-2}) y la evapotranspiración es medida en unidades de milímetros. La frecuencia de los flujos representa el integrado de la toma de datos original, las mediciones del anemómetro y el analizador de gases se realizaron a una frecuencia de 10 Hz.

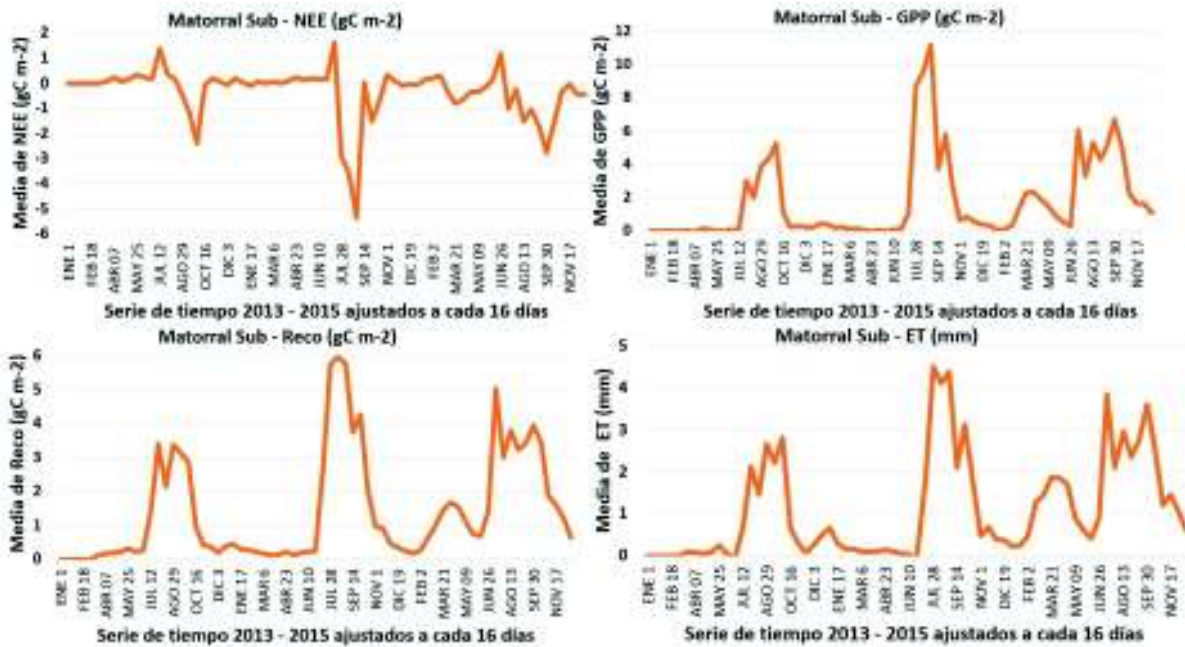


Figura 5. Dinámica temporal de los flujos de carbono (NEE, GPP, Reco y ET) de matorral subtropical. Los datos están ajustados a cada 16 días de la serie de tiempo 2013- 2015.

V.3. Datos de precipitación obtenidos por el satélite TRMM

El producto 3B43 (Figura 6) obtenido del satélite TRMM nos brinda la precipitación promedio por hora de cada mes, donde cada pixel mide 25 x 25 km. De este producto solo requerimos hacer uso de 16 pixeles los cuales abarcan la zona de estudio y nos da las mediciones de precipitación que requerimos para realizar el análisis de los patrones climáticos. Son 228 compuestos, denotando sumatoria de precipitación mensual.

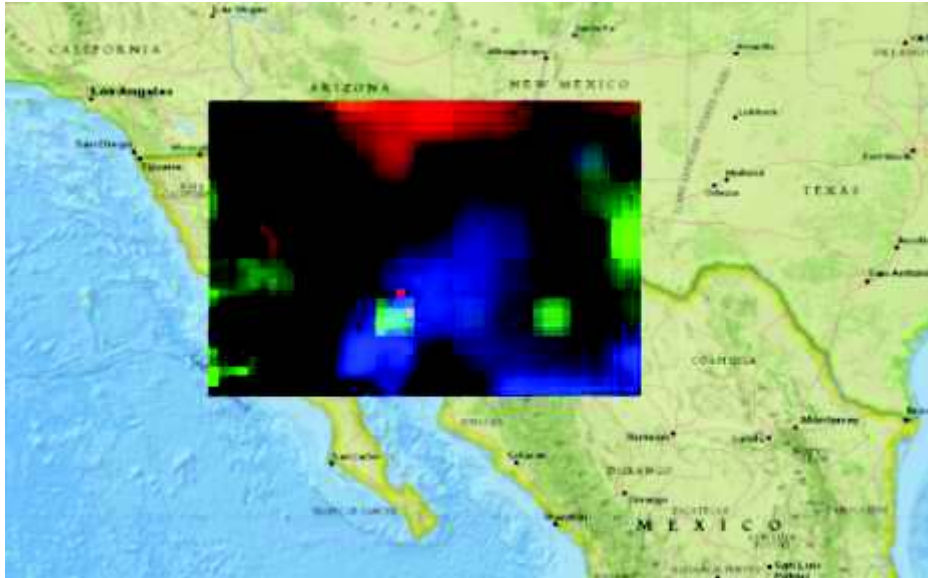


Figura 6. Producto obtenido de TRMM con los datos de precipitación.

Con los datos de precipitación obtenidos por medio de TRMM (Figura 7) podemos apreciar cómo fluctuó la precipitación mensualmente durante los años 2000 al 2017; en donde observamos que los picos más altos resultaron durante el número de compuesto 125 que corresponde al año 2008, esta información abarca a todas las praderas de buffel y sitios con matorral subtropical de nuestra área de interés.

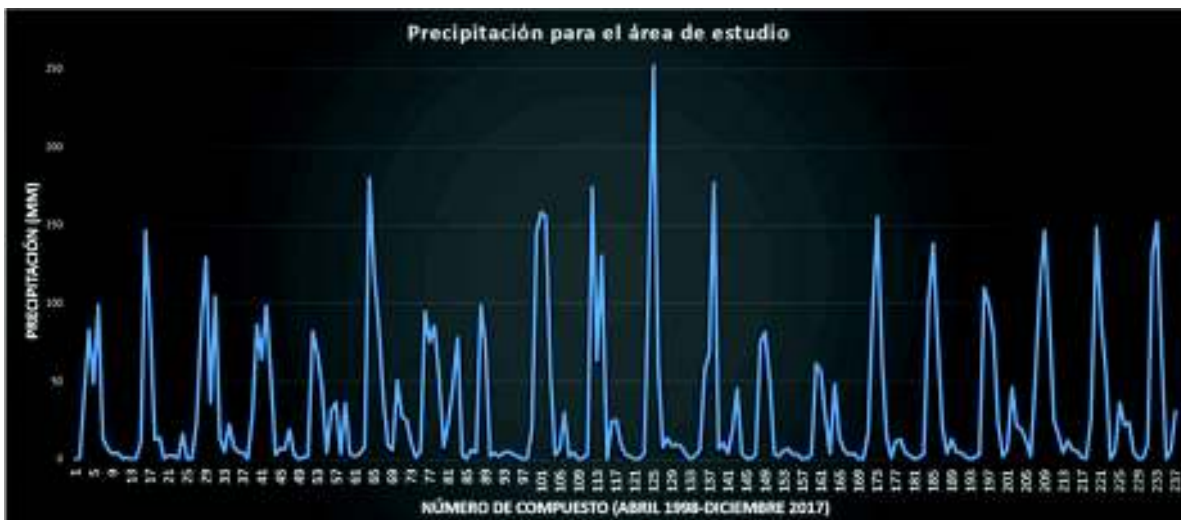


Figura 7. Datos de precipitación para la zona de estudio en intervalos mensuales desde enero de 2000 a diciembre de 2017.

V.4. Análisis comparativo de los flujos de carbono y el NDVI entre los dos tipos de vegetación

El análisis de regresión simple, realizado en el software R, entre los flujos y el NDVI nos da una idea de que los dos tipos de vegetación están teniendo un comportamiento muy parecido, lo que nos indica que están respondiendo de manera similar a las condiciones ambientales presentes en el área de estudio. Lo anterior sugiere que la variabilidad de los factores climáticos (precipitación y temperatura) están teniendo una influencia significativa en estos ecosistemas, como se demuestra en las Figuras 8 - 12.

Con los análisis previos encontramos que existe una relación positiva y significativa ($F_{1,67} = 837.63$, $P < 0.001$, r^2 aj. = 0.9248) entre los datos obtenidos por NDVI para los tipos de vegetación analizados (Figura 8). Particularmente para NDVI observamos que ambos tipos de vegetación tienen una actividad fotosintética muy similar, tanto en magnitud como en tiempo.

Ajuste de NDVI Matorral Subtropical en función de NDVI Pradera de Buffel

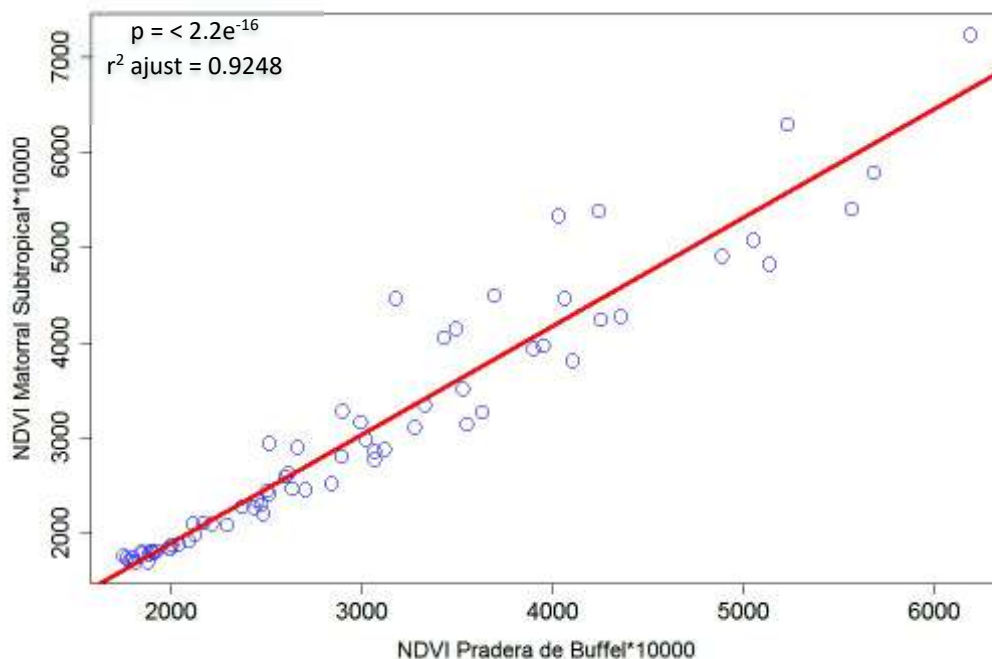


Figura 8. Relación entre los valores de NDVI del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F=837.63$, $p < 2.2e^{-16}$ y r^2 ajustada = 0.9248.

Para el caso del Intercambio Neto del Ecosistema, encontramos que existe una relación positiva y significativa para este flujo ($F_{1,67} = 261.75$, $P < 0.001$, r^2 aj. = 0.7932) al compararlo entre ambos tipos de vegetación (Figura 9). Con ello observamos que ambos tipos de vegetación tienen un intercambio neto muy parecido, sin embargo, es el flujo que tuvo un ajuste menor en comparación con los demás flujos y el NDVI.

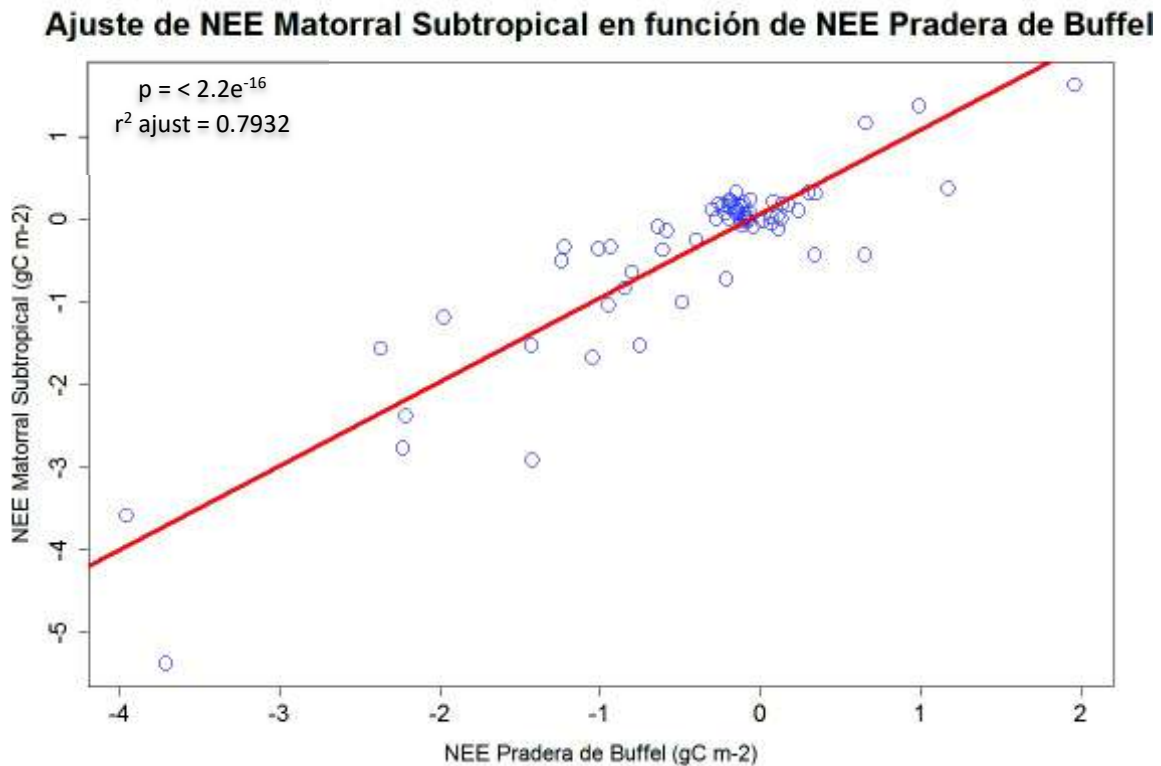


Figura 9. Relación entre los valores de NEE del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F = 261.75$, $p < 2.2e^{-16}$ y una r^2 ajustada = 0.7932.

En la Respiración del Ecosistema, encontramos que existe una relación positiva y significativa ($F_{1,67} = 929.73$, $P < 0.001$, r^2 aj. = 0.9318) para este flujo al compararlo entre ambos tipos de vegetación (Figura 10). Con ello observamos que ambos tipos de vegetación están respirando de forma similar, lo que indica que utilizan proporciones similares de energía.

Ajuste de Reco Matorral Subtropical en función de Reco Pradera de Buffel

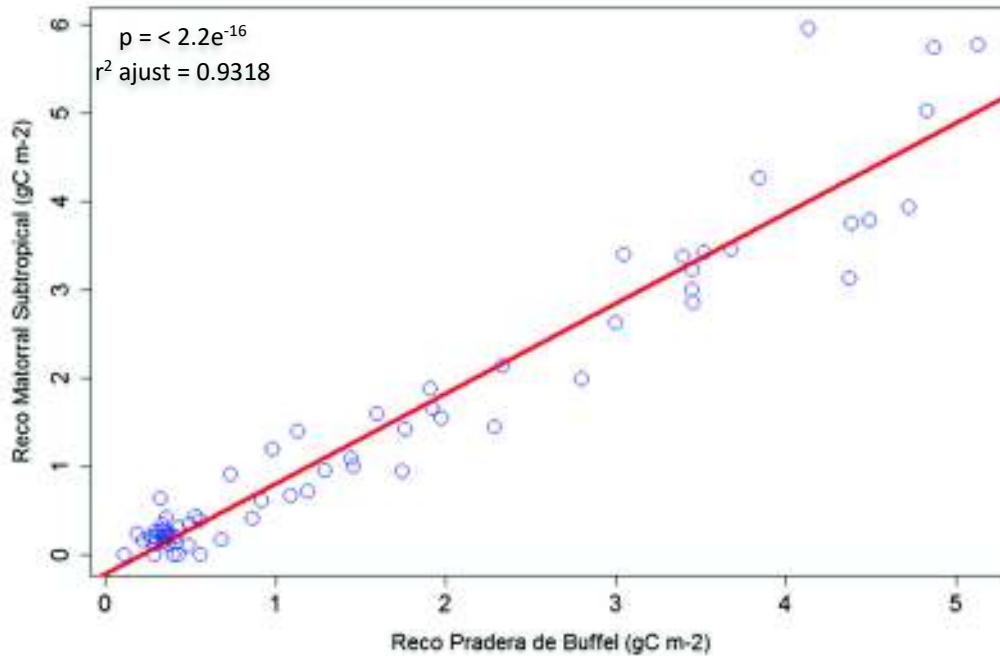


Figura 10. Relación entre los valores de Reco del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F=929.73$, $p < 2.2e^{-16}$ y una r^2 ajustada = 0.9318, el modelo se ajusta en un 93%.

Con un ajuste del 91%, la Producción Primaria Bruta, muestra que existe una relación positiva y significativa ($F_{1,67} = 753.06$, $P < 0.001$, $r^2 \text{ aj.} = 0.9171$) entre ambos tipos de vegetación (Figura 11). Con ello observamos que tanto el matorral subtropical como la pradera de buffel se comportan casi de la misma forma en cuanto a su productividad, la cual denota cuánto carbono fijó de manera total cada ecosistema, mostrando ser muy parecidos en magnitud y tiempo.

Ajuste de GPP Matorral Subtropical en función de GPP Pradera de Buffel

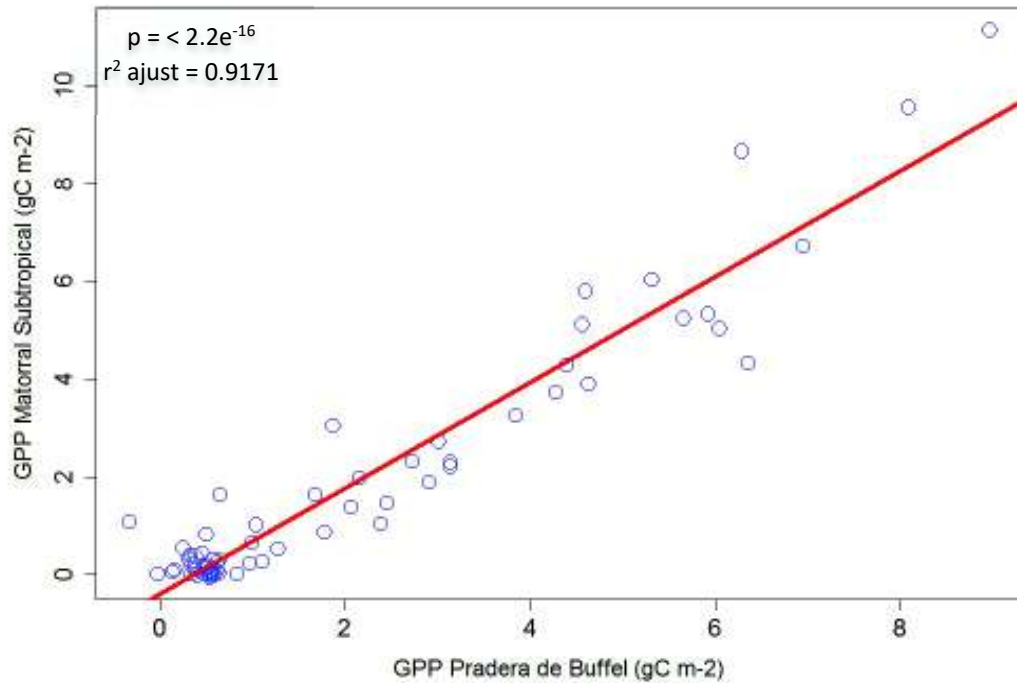


Figura 11. Relación entre los valores de GPP del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F = 753.06$, $p < 2.2e^{-16}$ y una r^2 ajustada = 0.9171.

En el caso de la Evapotranspiración, encontramos una alta correlación ($F_{1,67} = 1311.7$, $P < 0.001$, $r^2 \text{ aj.} = 0.9507$) entre los tipos de vegetación analizados (Figura 12). Lo anterior denota que la ET es el flujo que mejor se ajusta al comparar ambos tipos de vegetación; con ello observamos que ambos tipos de vegetación están evapotranspirando de la misma forma en cuanto a magnitud y fecha, siendo el flujo mejor representado en comparación con NEE, Reco, GPP y también con el NDVI.

Se encontró en todos los flujos una correlación significativa entre ambos tipos de vegetación; los ajustes son superiores al 79% lo que puede significar que tanto el matorral subtropical como las praderas de buffel están respondiendo de manera muy similar a los pulsos de precipitación y a otros factores ambientales y climáticos.

Ajuste de ET Matorral Subtropical en función de ET Pradera de Buffel

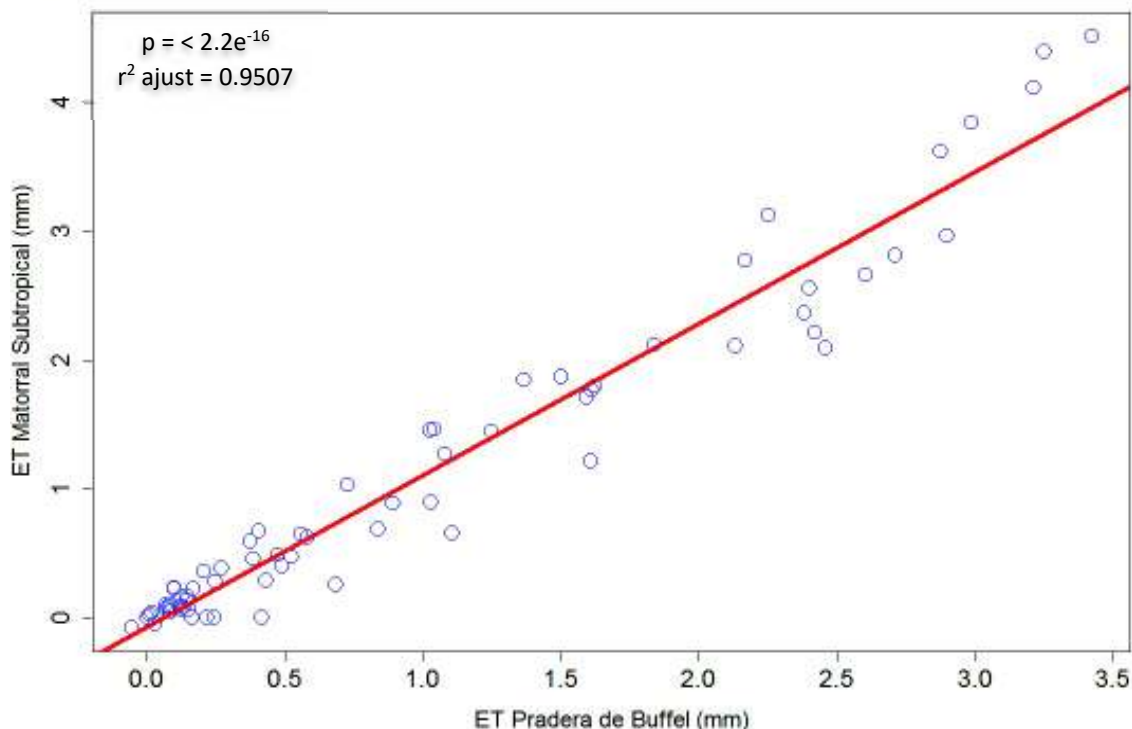


Figura 12. Relación entre los valores de ET del matorral con respecto a los valores de la pradera de buffel, con una $F = 1311.7$, $p < 2.2e^{-16}$ y una r^2 ajustada = 0.9507.

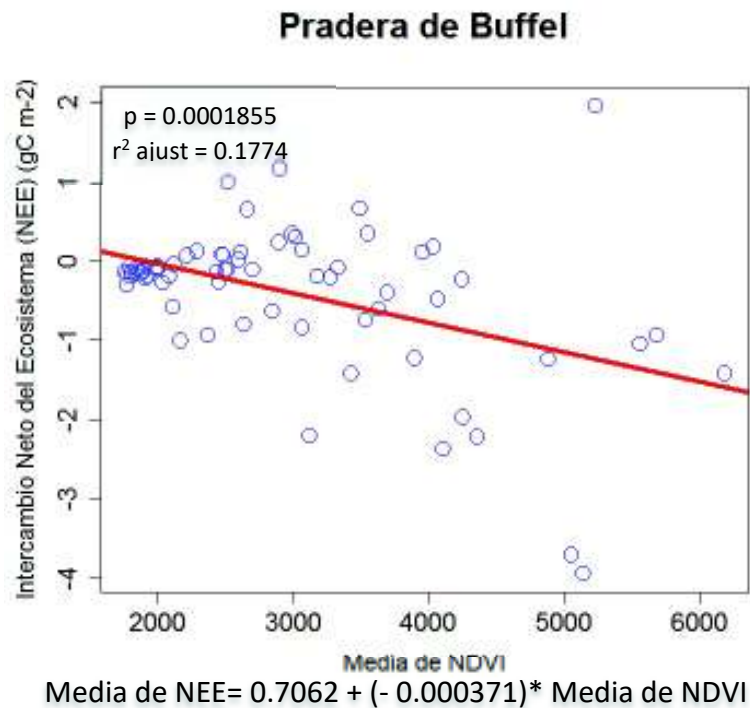
V.5. Modelación de las respuestas del NDVI en función de los flujos de Eddy Covariance.

Los datos de los flujos GPP, NEE, Reco y ET mostraron estar comportándose de una manera muy similar en los dos tipos de vegetación.

Nuestros modelos sugieren que dada la correlación entre los flujos de carbono y NDVI (Figuras 13 – 16) es posible predecir, hasta cierto punto, los flujos de carbono en función del NDVI para las áreas de estudio de Matorral Subtropical y Pradera de Buffel de la región central de Sonora. Se lograron generar los modelos para cada uno de los flujos, los cuales fueron utilizados más adelante para generar representaciones espaciales de la fijación de carbono.

En las siguientes gráficas (Figura 13) tenemos el Intercambio Neto del Ecosistema en función de NDVI para los sitios donde se encuentran las praderas de buffel ($F_{1,67} = 15.66$, $P <$

0.001, r^2 aj. = 0.1774) y para los sitios con matorral subtropical ($F_{1,67} = 16.04$, $P < 0.001$, r^2 aj. = 0.1811). Podemos observar que la pendiente es negativa porque el intercambio neto del ecosistema denota ganancias para el ecosistema y pérdidas para la atmósfera. Se pudieron generar los modelos, ya que, a pesar de que los valores de r^2 ajustada no fueron muy altos (0.17-0.18), los valores de p fueron significativos y con ello se encontró que podemos explicar parte del NEE en función del NDVI.



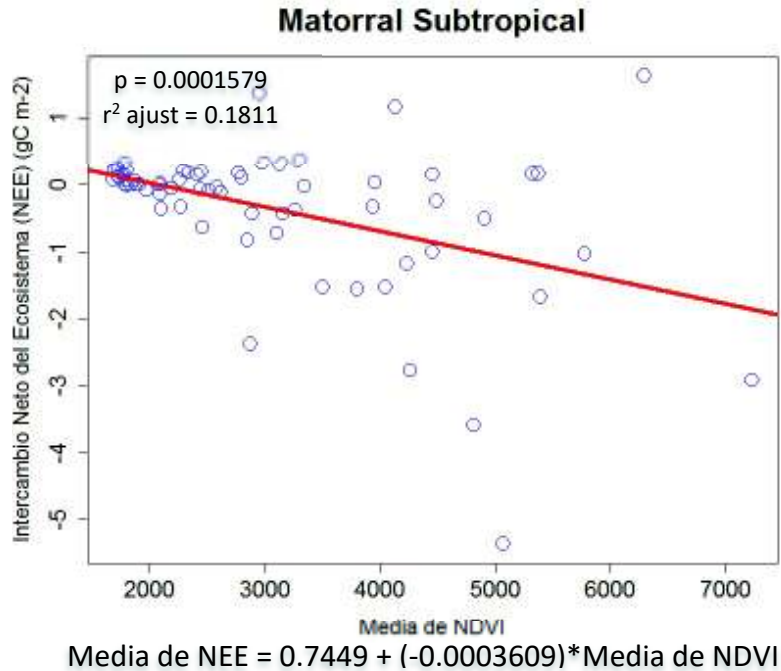
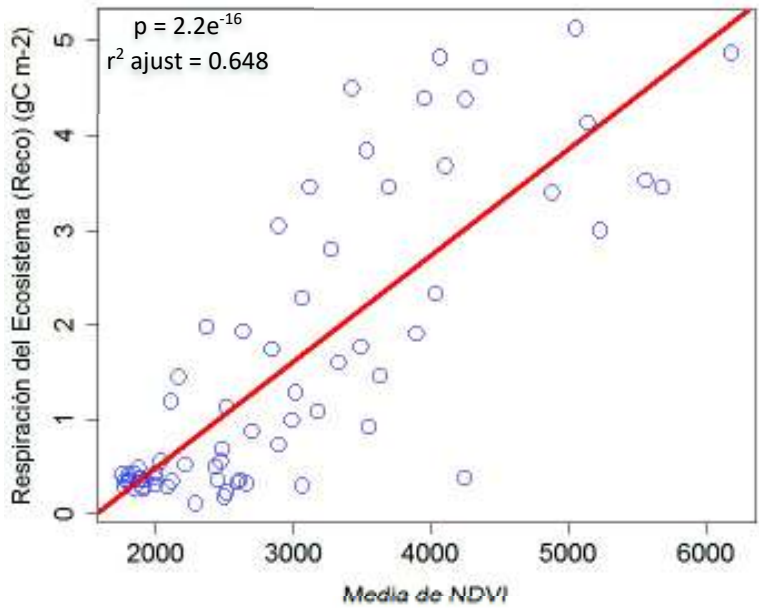


Figura 13. Regresión lineal del Intercambio Neto del Ecosistema en ambos tipos de vegetación y las respectivas ecuaciones para modelar este flujo a nivel paisaje por medio del NDVI.

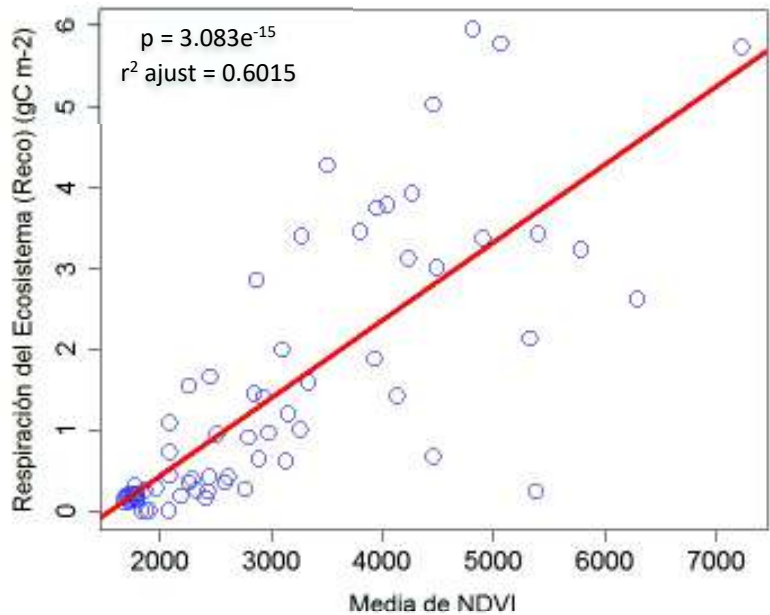
En estas dos gráficas (Figura 14) se muestra la Respiración del Ecosistema en función de NDVI para cada tipo de vegetación (matorral subtropical ($F_{1,67} = 103.7$, $P < 0.001$, r^2 aj. = 0.6015) y praderas de buffel ($F_{1,67} = 126.2$, $P < 0.001$, r^2 aj. = 0.648)). Se pudieron generar los modelos, ya que con los valores de r^2 ajustada mayores al 60% y valores de p significativos se encontró que podemos explicar en parte la Reco en función del NDVI.

Pradera de Buffel



$$\text{Media de Reco} = -1.759 + 0.001122 * \text{Media de NDVI}$$

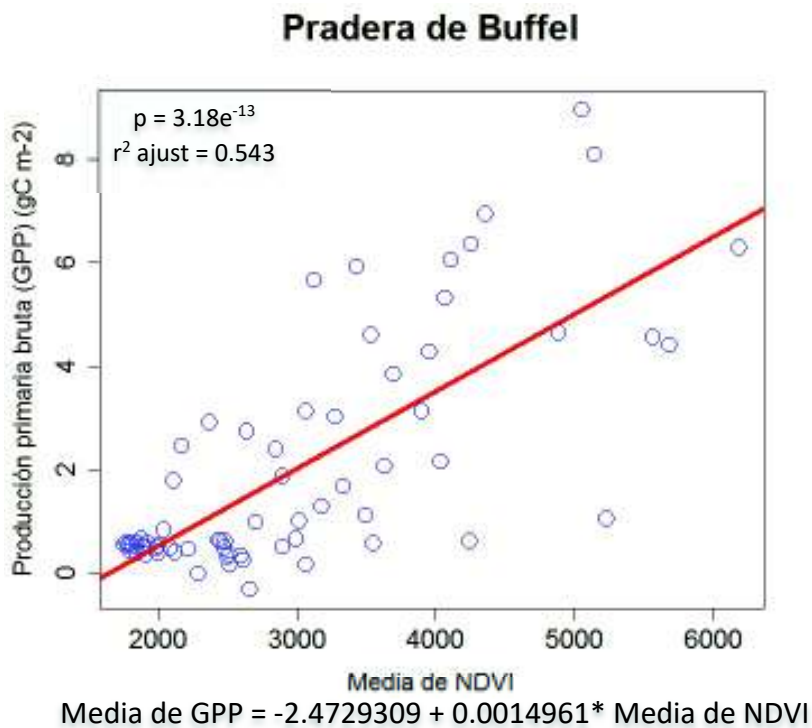
Matorral Subtropical



$$\text{Media de Reco} = -1.495 + 0.0009637 * \text{Media de NDVI}$$

Figura 14. Regresión lineal de la Respiración del ecosistema en ambos tipos de vegetación y las respectivas ecuaciones para modelar este flujo a nivel paisaje por medio del NDVI.

En las siguientes dos gráficas (Figura 15) se muestra la Producción Primaria Bruta en función de NDVI en las praderas de buffel ($F_{1,67} = 81.81$, $P < 0.001$, r^2 aj. = 0.543) así como también en el matorral subtropical ($F_{1,67} = 60.45$, $P < 0.001$, r^2 aj. = 0.4665). Se pudieron generar los modelos, ya que con los valores de r^2 ajustada de 54% y 46% respectivamente y con valores de p significativos se encontró que podemos explicar hasta cierto punto la GPP en función del NDVI.



Matorral Subtropical

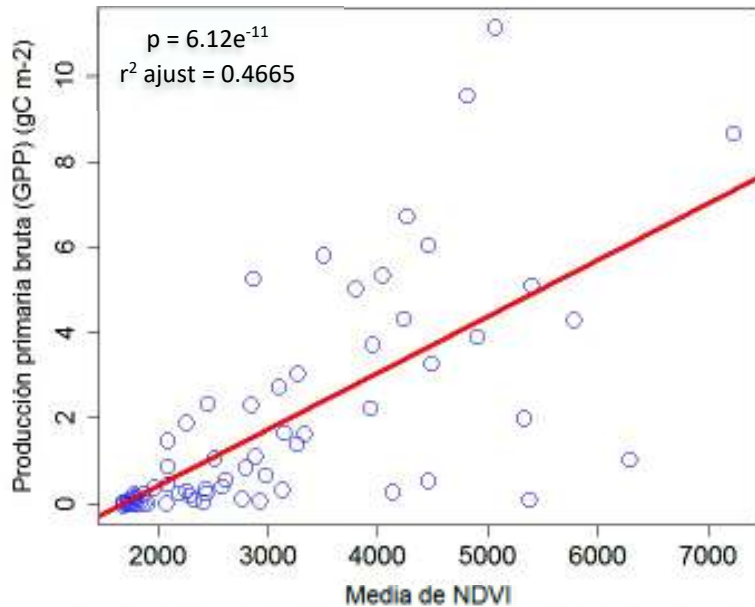
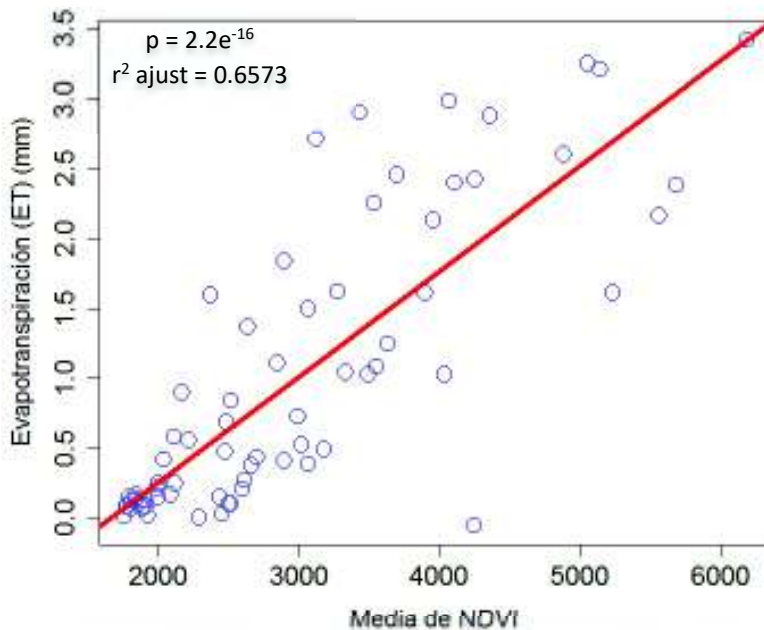


Figura 15. Regresión lineal de la Producción primaria bruta en ambos tipos de vegetación y las respectivas ecuaciones para modelar este flujo a nivel paisaje por medio del NDVI.

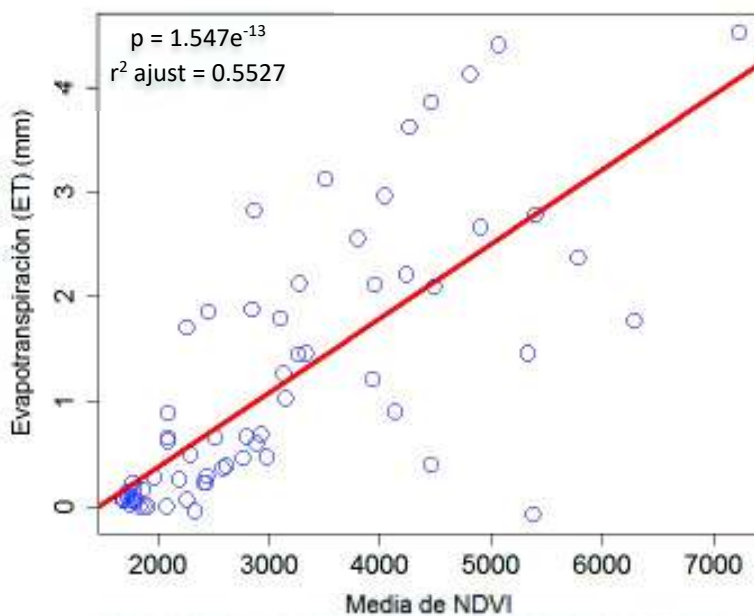
En estas dos gráficas (Figura 16) se muestra la Evapotranspiración en función de NDVI, para las praderas de buffel ($F_{1,67} = 131.4$, $P < 0.001$, $r^2 \text{ aj.} = 0.6573$) y en los sitios con matorral subtropical ($F_{1,67} = 85.01$, $P < 0.001$, $r^2 \text{ aj.} = 0.5527$). Se pudieron generar los modelos, ya que con los valores de r^2 ajustada de 65% y 55% respectivamente, a pesar de que observamos que está un poco mejor ajustada en el buffel, sin embargo, siguen siendo valores de p significativos y con ello se encontró que podemos explicar en cierta medida la ET en función del NDVI.

Pradera de Buffel



$$\text{Media de ET} = -1.253 + 0.0007547 * \text{Media de NDVI}$$

Matorral Subtropical



$$\text{Media de ET} = -1.030 + 0.0007073 * \text{Media de NDVI}$$

Figura 16. Ajuste de la media de Evapotranspiración en función de la media de NDVI en cada tipo de vegetación y las respectivas ecuaciones para modelar este flujo a nivel paisaje por medio del NDVI.

Los coeficientes de determinación de cada flujo muestran ajustes similares en ambos tipos de vegetación, en su mayoría coeficientes mayores de 50%. Los coeficientes más bajos se registraron para el intercambio neto del ecosistema, con valores de 18% en el matorral subtropical y un 17% en pradera de buffel.

En general, se obtuvieron valores de p significativos y con los ajustes mayores al 50% se lograron generar los modelos para su uso posterior.

V.6. Modelación espacial de los flujos de carbono

Tomando en cuenta que los datos de los flujos obtenidos por las torres son de la serie de tiempo del año 2013 a 2015, fue necesaria la generación de los modelos para conocer cómo se comportaron los flujos de carbono y agua de ambos tipos de vegetación a través de una serie de tiempo de 17 años (2000 – 2017). Los modelos se aplicaron para espacializar la información en función de la serie de tiempo de MODIS-NDVI, de la cual se utilizó toda la serie de tiempo para aplicarla en los modelos previamente generados. Con ellos pudimos establecer cómo fueron los flujos a través del tiempo en ambos tipos de vegetación para cada uno de los sitios de estudio en donde no existen mediciones con torres de flujos de carbono (Figura 1), y también se obtuvieron los proxies de productividad en los años previos a que hubiera mediciones con torres en el sitio.

A continuación, se muestran las gráficas del primer polígono de cada tipo de vegetación en donde vemos cada uno de los flujos ya modelados (NEE, Reco, GPP y ET) para cada pixel en el paisaje.

V.6.1. Pradera de buffel

Para las praderas de buffel, se obtuvieron todos los valores de los flujos para cada pixel en el paisaje (dentro de las tres praderas sujetas a estudio). Esto se logró por medio de los modelos generados, a los cuales se les aplicó el NDVI correspondiente a la pradera de buffel. En la Figura 17 se muestra un ejemplo de la media de todos los pixeles para cada uno de los flujos modelados (Intercambio Neto del Ecosistema, la Respiración del Ecosistema, la Producción Primaria Bruta y la Evapotranspiración) para la primer pradera de buffel. Los valores obtenidos para los otros dos sitios con pradera de buffel mostraron un patrón similar.

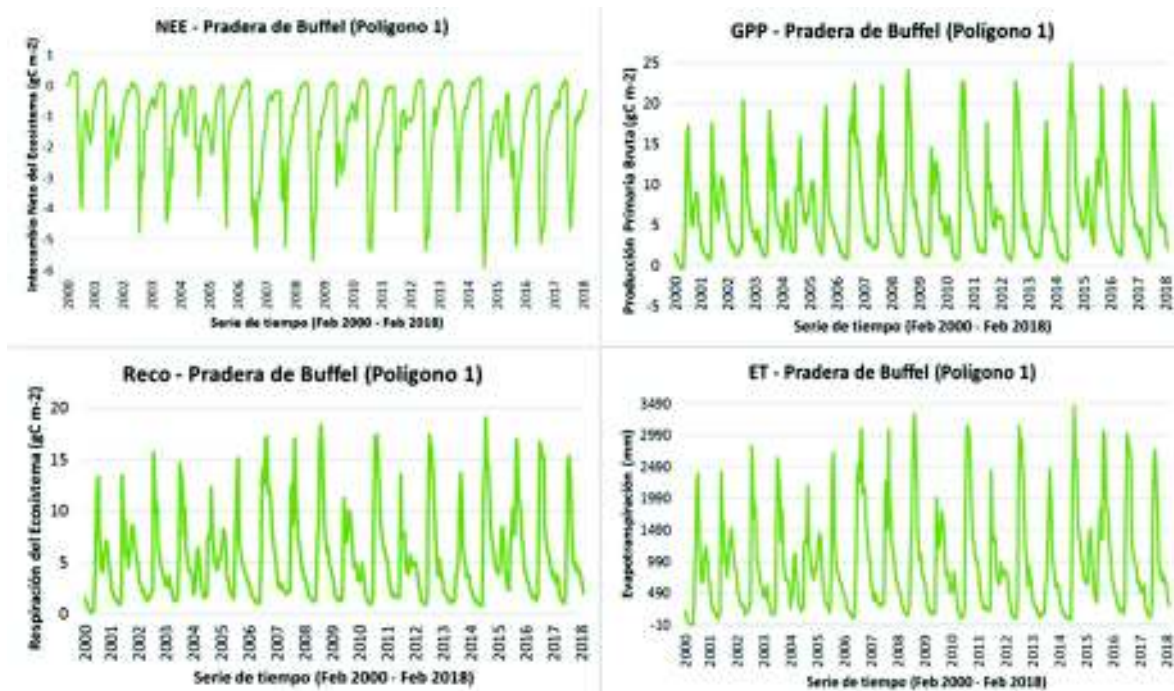


Figura 17. Flujos modelados (NEE, Reco, GPP, ET) de pradera de buffel a una resolución temporal de 16 días desde el año 2000 al 2018.

V.6.2. Matorral Subtropical

En el matorral subtropical, se obtuvieron todas las representaciones para todos los flujos para cada pixel en el paisaje. Al igual que en las praderas de buffel, esta información se obtuvo al aplicar el NDVI a los modelos generados para los tres sitios con matorral subtropical. En la Figura 18, se observa cómo fluctuaron cada uno de los flujos modelados para el primer sitio; un patrón parecido se puede observar en los otros dos sitios de matorral subtropical que también fueron evaluados.

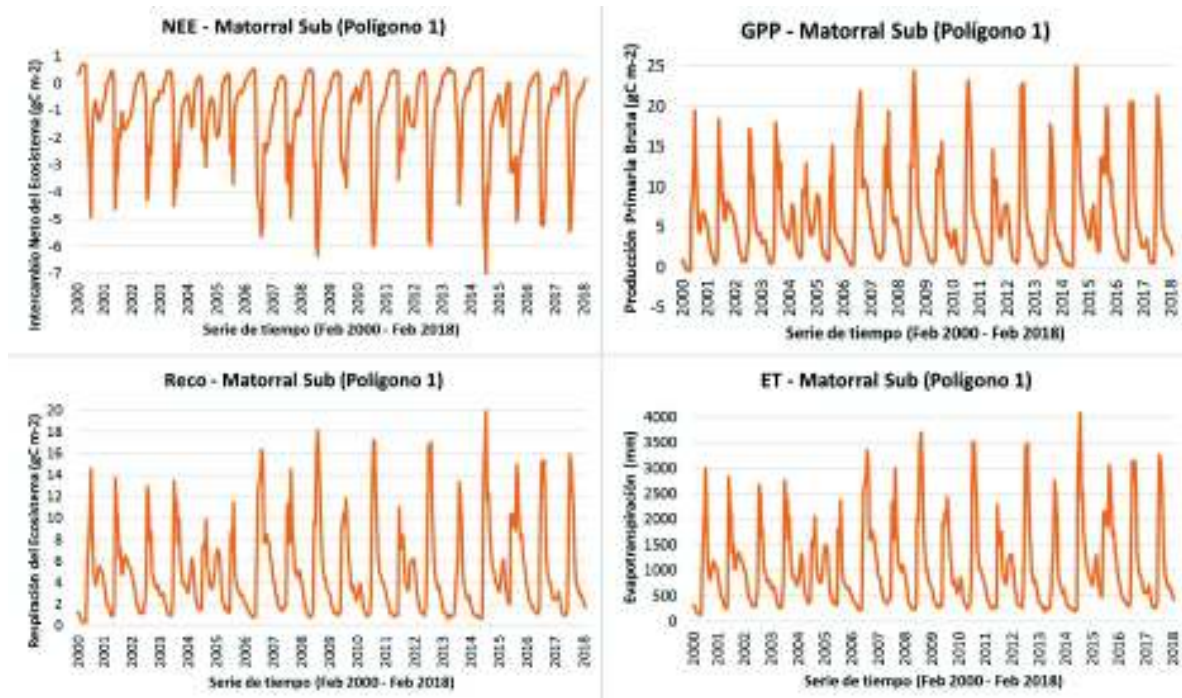


Figura 18. Flujos modelados (NEE, Reco, GPP, ET) de matorral subtropical a una resolución temporal de 16 días desde el año 2000 al 2018.

Podemos observar que los comportamientos de los flujos y su magnitud son muy similares en ambos polígonos, y algo así pudimos observar en todos los polígonos de ambos tipos de vegetación.

V.7. Análisis de la variación asociado a los patrones climáticos

Para estos análisis se realizaron pruebas de ANOVA para conocer si existen diferencias significativas en cuanto a los flujos, NDVI y precipitación cuando se toman en cuenta el fenómeno de El Niño o La Niña y en los años neutros; posteriormente se realizaron pruebas de Tukey para identificar entre cuales patrones climáticos hubo diferencias significativas.

En este análisis pretendemos conocer si la presencia de fenómenos climáticos, como lo es el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur, tiene efecto sobre las dinámicas ecosistémicas de captura de carbono en las zonas áridas. A su vez, observar de qué manera este fenómeno climatológico ocasiona que haya un aumento o disminución en la

productividad del ecosistema, así como también conocer la variación que sufre la precipitación.

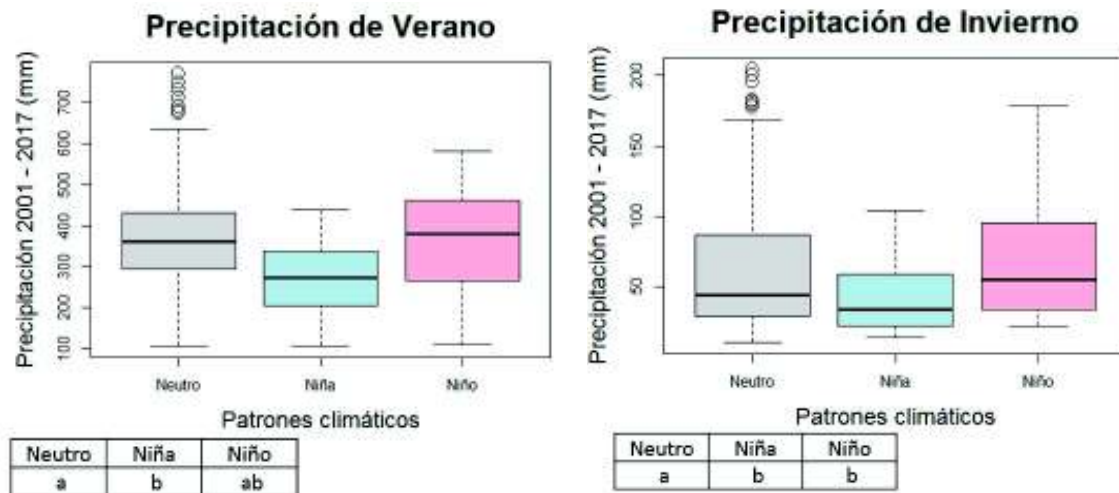


Figura 19. Variación de la precipitación para los meses de verano (ANOVA de una vía, $F_{2,357} = 9.102$, $P < 0.001$) e invierno (ANOVA de una vía, $F_{2,357} = 11.59$, $P < 0.001$) considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur. Las letras diferentes indican diferencias significativas entre patrones climáticos.

En el caso de la precipitación (Figura 19), con los análisis de varianza encontramos que no hubo gran variación en cuanto a la cantidad de lluvia que se presentó en cada uno de los fenómenos. A su vez, las pruebas de Tukey sugieren que en los años Neutros hubo una mayor precipitación que cuando se presentó Niña o Niño.

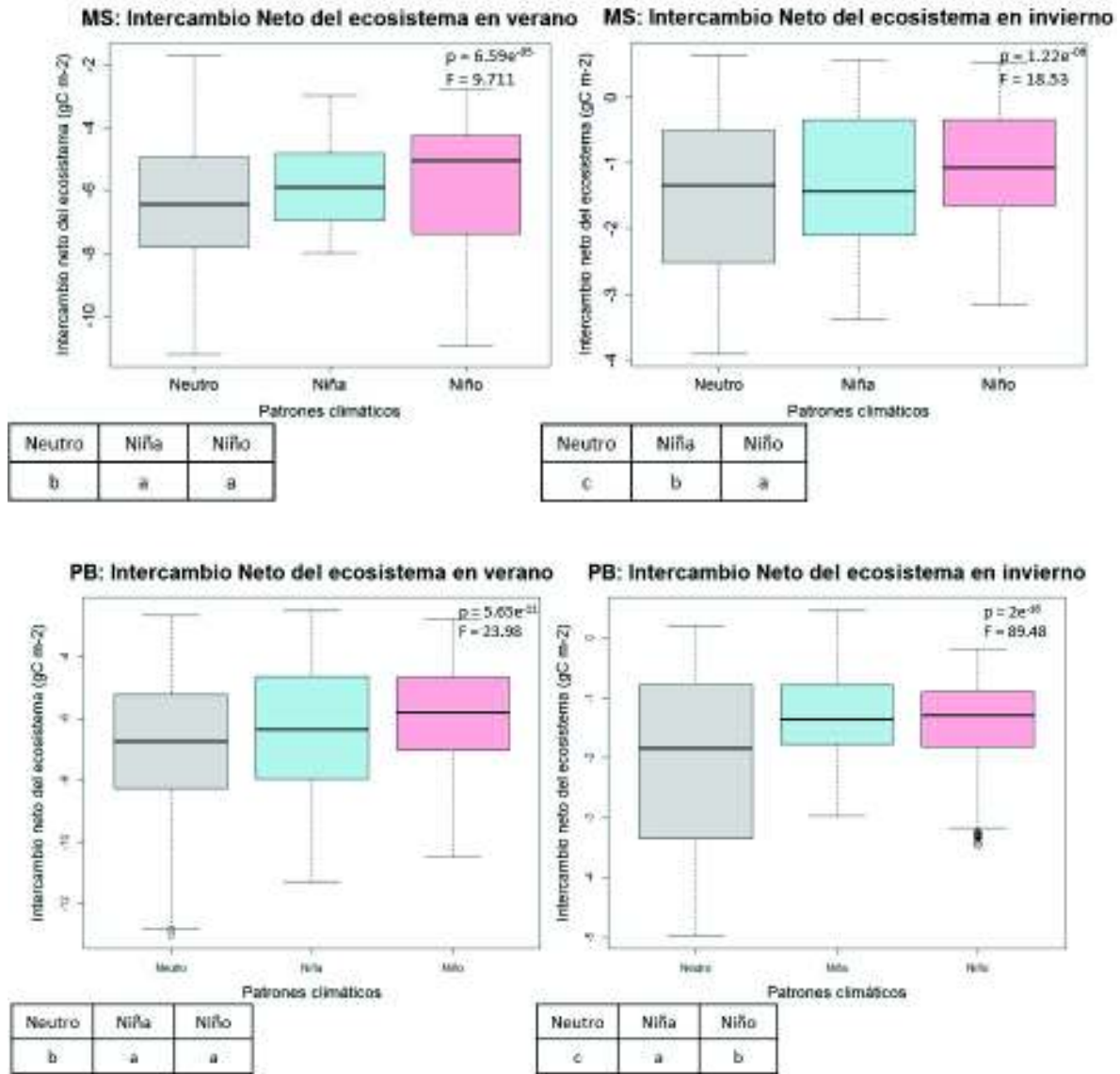


Figura 20. Variación del intercambio neto del ecosistema para los meses de verano e invierno considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).

En el intercambio neto del ecosistema (Figura 20), tanto para el Matorral Subtropical (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 9.711$, $P < 0.001$; invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 18.53$, $P < 0.001$) como para la pradera de buffel (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 23.98$, $P < 0.001$; invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 89.48$, $P < 0.001$), el ANOVA muestra diferencias significativas entre ambos y las pruebas de Tukey indican que el intercambio neto del ecosistema fue mayor durante El Niño. En algunos casos la diferencia es pequeña, pero

siguen siendo más altos los valores cuando se presenta El Niño, si se logra apreciar un aumento en el intercambio neto del ecosistema.

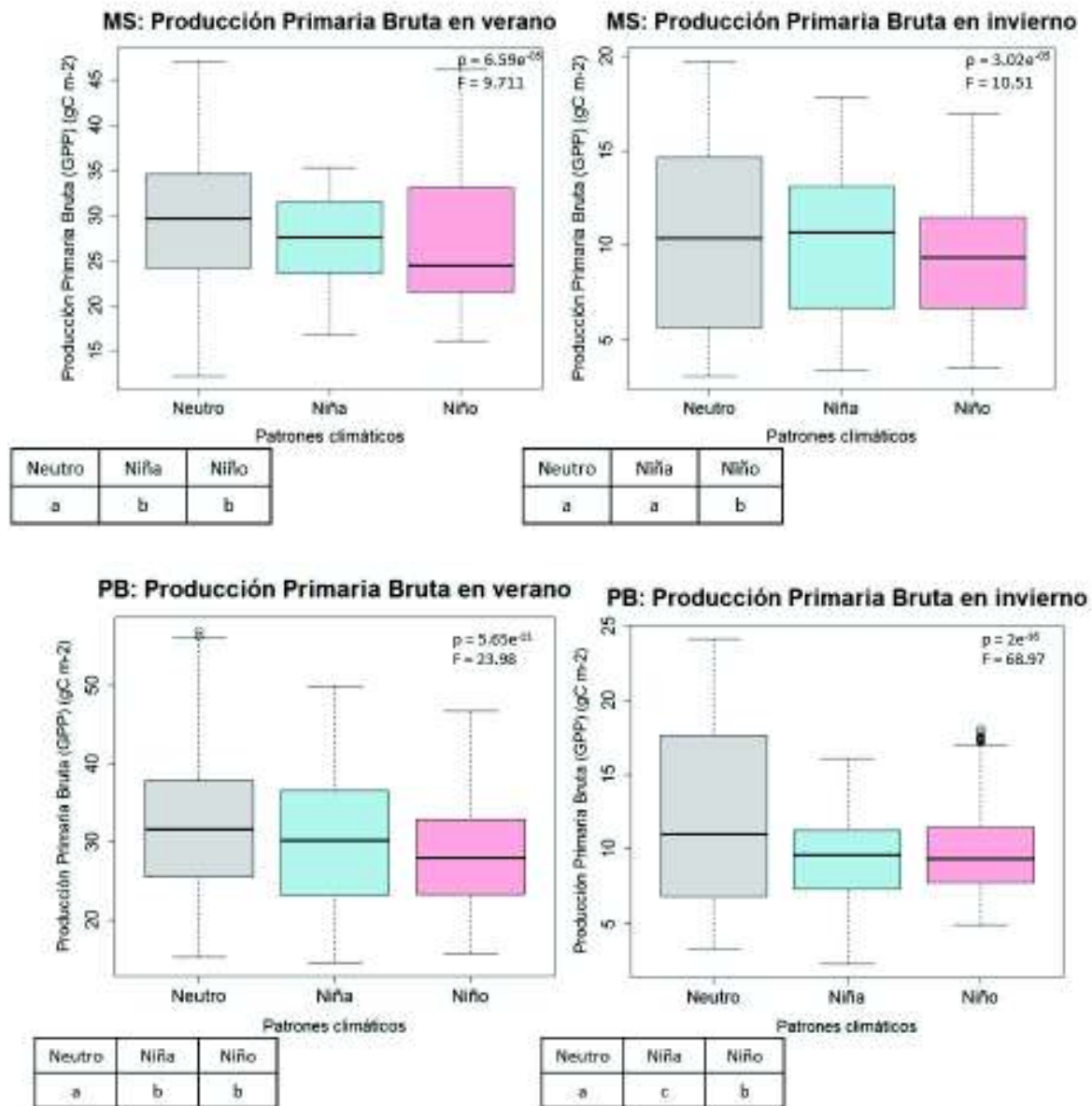


Figura 21. Variación de la producción primaria bruta en ambos tipos de vegetación para los meses de verano e invierno considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).

En el caso de la producción primaria bruta (Figura 21) de verano para Matorral Subtropical (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 9.711$, $P < 0.001$; invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 10.51$, $P < 0.001$) y Pradera de Buffel (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 23.98$, $P < 0.001$; invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 68.97$, $P < 0.001$), encontramos una mayor

GPP en años neutros, mientras que la prueba de Tukey indica que no hubo diferencias entre años Niño y Niña, pero sí tenemos valores de p significativos. Para el Matorral Subtropical en el invierno, se observa una mayor productividad en los años Niña, esto puede ser debido a que en el Matorral Subtropical hay otro tipo de vegetación, como plantas anuales de invierno, que están fotosintetizando y que, por el contrario, en las praderas de buffel no se presenta algo similar, ya que se observó un comportamiento diferente en cada uno de los fenómenos.

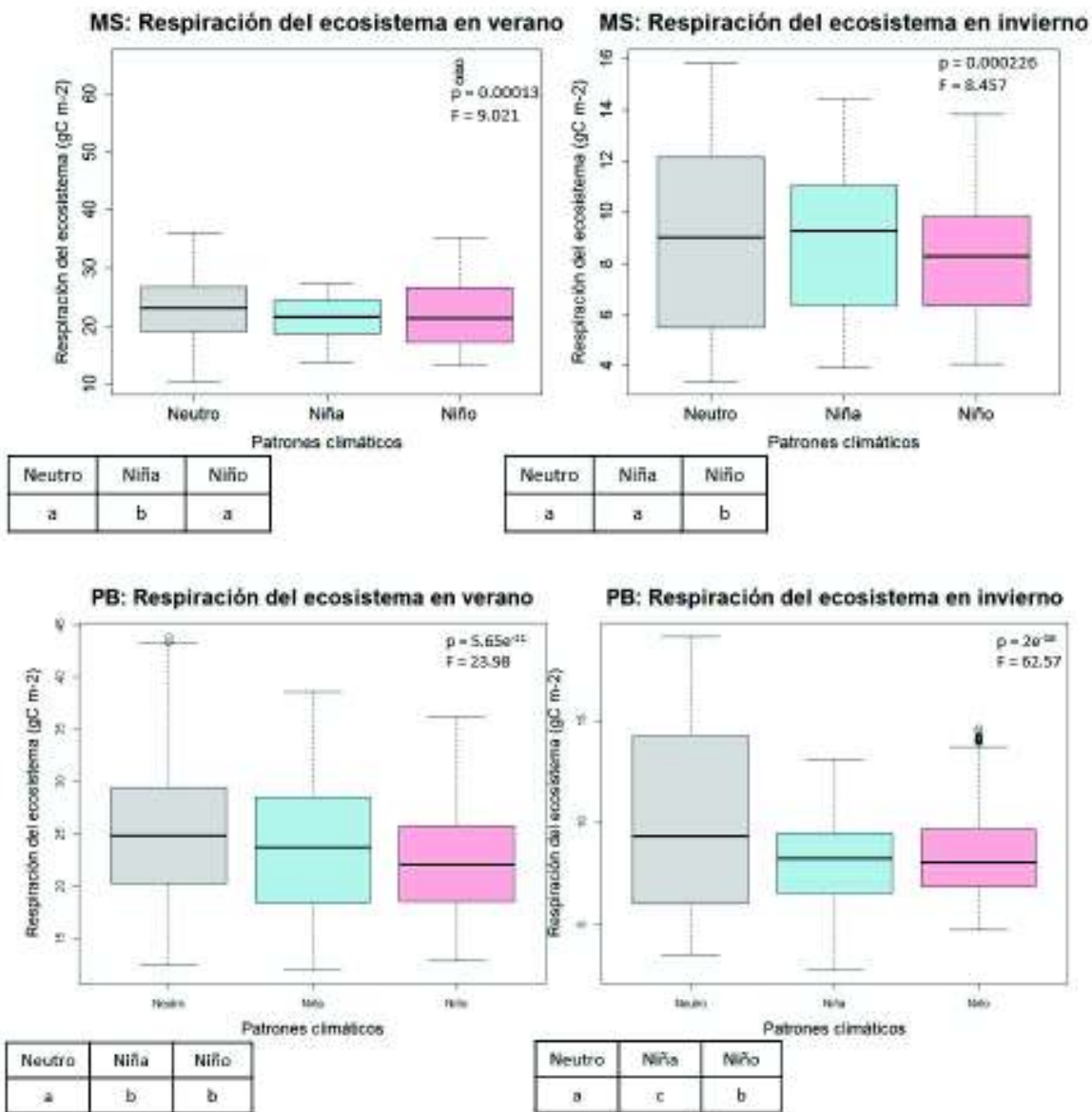


Figura 22. Variación de la respiración del ecosistema para los meses de verano e invierno considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).

En el caso de la Respiración del ecosistema (Figura 22), observamos que para el Matorral Subtropical en verano (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 9.021$, $P < 0.001$) este flujo fue menor cuando se presentó La Niña y en el invierno (invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 8.457$, $P < 0.001$) fue menor cuando se presentó El Niño. Para los sitios de pradera de buffel (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 23.98$, $P < 0.001$; invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 62.57$, $P < 0.001$) las pruebas de Tukey arrojan que los años Neutros mostraron tener una mayor respiración.

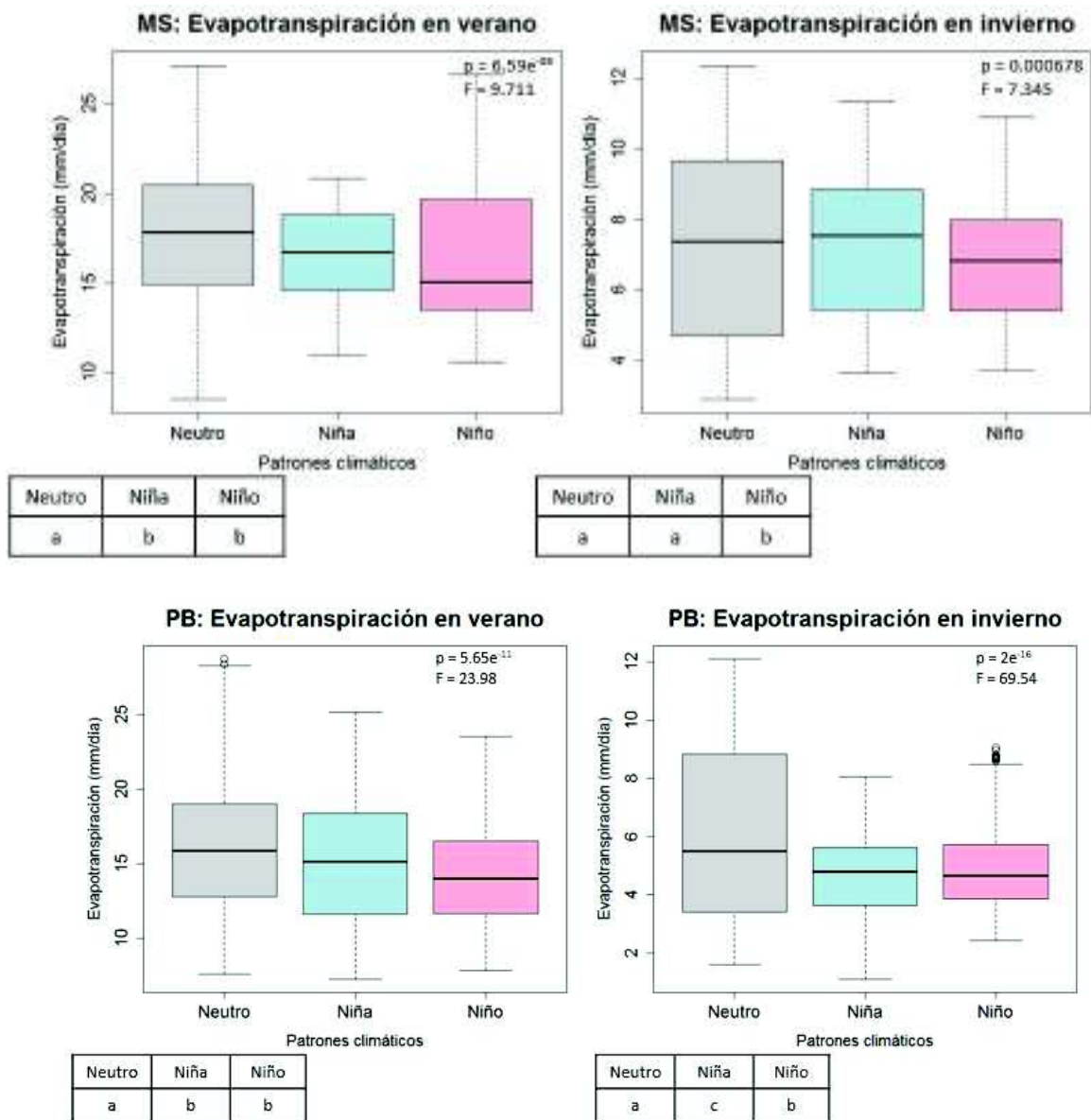


Figura 23. Variación de la evapotranspiración para los meses de verano e invierno considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).

Para el flujo de evapotranspiración (Figura 23), encontramos que, tanto en el matorral como en la pradera, fue menor durante los años El Niño y La Niña. Con excepción del Matorral Subtropical en el invierno, el cual muestra tener mayor evapotranspiración tanto en años Neutros como en años Niña (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 9.711$, $P < 0.001$; invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 7.345$, $P < 0.001$) y en el caso del Buffel, (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 23.98$, $P < 0.001$; invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 69.54$, $P < 0.001$) mediante las pruebas de Tukey, la evapotranspiración demostró ser mayor solamente en los años Neutros.

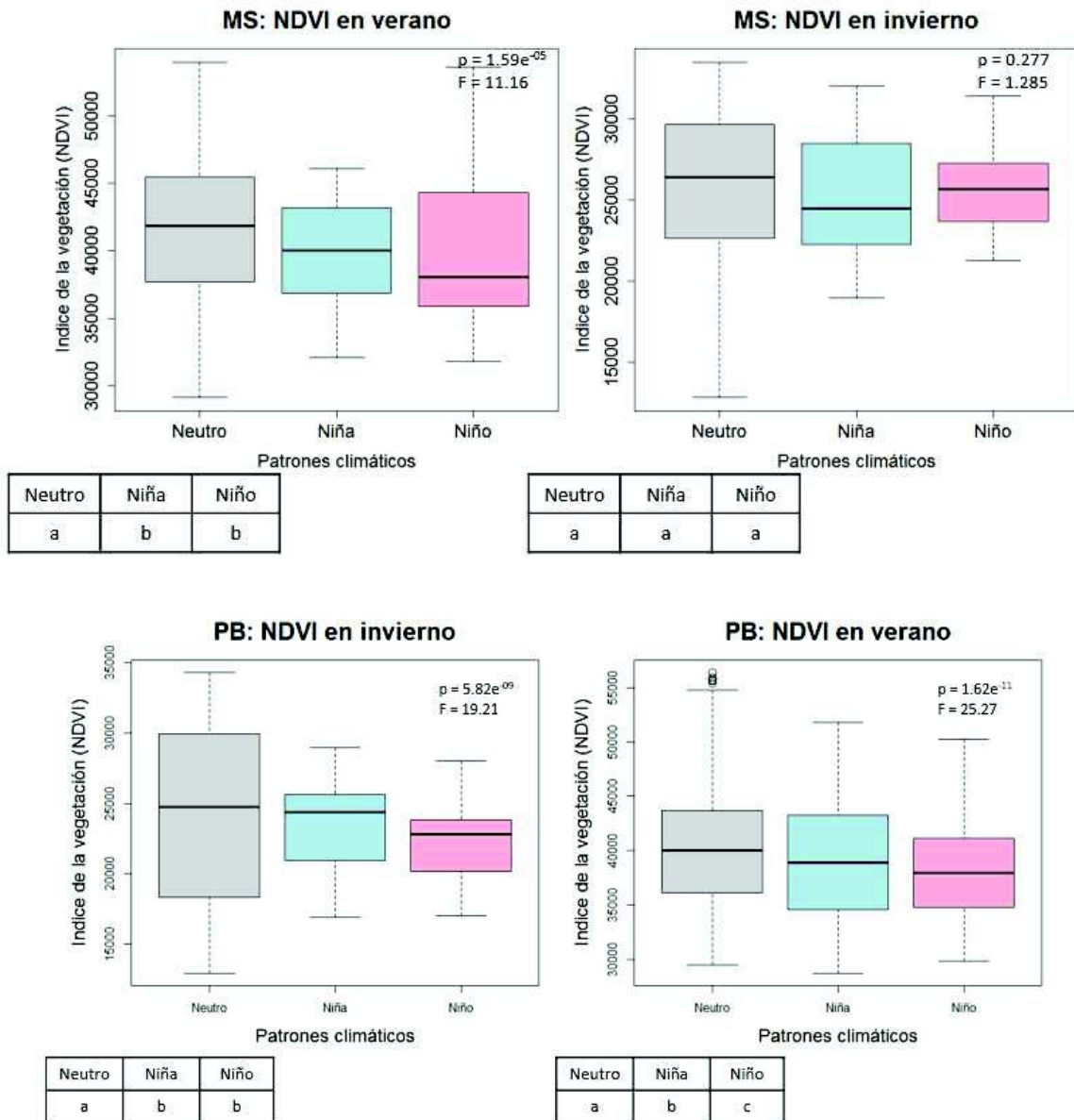


Figura 24. Variación del NDVI para los meses de verano e invierno en ambos tipos de vegetación considerando el fenómeno de la Oscilación del Pacífico Sur para el matorral subtropical (MS) y la pradera de buffel (PB).

Al analizar la variación del NDVI (Figura 24), encontramos que en el Matorral subtropical tanto en el verano (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 11.16$, $P < 0.001$) como en el invierno (invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 1.285$, $P < 0.001$), los años Neutros muestran tener una actividad fotosintética mayor y en el invierno (invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1113} = 1.285$, $P < 0.001$) las pruebas de Tukey no arrojaron ninguna diferencia entre los tres fenómenos. Para el caso del Buffel en el verano (verano ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 19.21$, $P < 0.001$) se encontró que en los años Neutros también hay mayor actividad fotosintética, al igual que en el Matorral subtropical. Y en el invierno (invierno ANOVA de una vía, $F_{2,1455} = 25.27$, $P < 0.001$) las pruebas de Tukey mostraron valores más bajos cuando se presenta el fenómeno de El Niño y valores más altos en años Neutros.

VI. DISCUSIÓN

VI.1. Diferencias y similitudes entre los dos tipos de vegetación

Por medio del análisis comparativo entre los flujos y el NDVI por tipo de vegetación, encontramos que hay una estrecha similitud en las dinámicas de captura de carbono de las praderas de buffel y el matorral subtropical. En el caso del NDVI se encontraron pulsos fotosintéticos similares entre ambos tipos de vegetación, tanto en magnitud como en fecha.

Hinojo-Hinojo y colaboradores (2019), realizaron un estudio en el mismo sitio para evaluar las fluctuaciones de los flujos de carbono y de agua en praderas de zacate buffel. Dicho zacate demostró ser un sumidero neto de carbono, con ello se refuerza lo encontrado en el presente estudio, ya que observamos que, en efecto, las praderas de zacate buffel son sumideros de carbono, pero además, los sitios con matorral subtropical también mostraron serlo, debido a que el intercambio neto del ecosistema observado en ambos tipos de vegetación es muy similar. Como hemos mencionado anteriormente, esta similitud puede deberse a que los dos tipos de vegetación responden a los mismos factores ambientales.

Otros estudios realizados en Sonora han reportado que, la remoción de la vegetación nativa y el poco éxito en la implementación de los pastizales de buffel, muestran que estas prácticas conllevan a la pérdida de cobertura vegetal, lo cual puede estar ocasionando un cambio en las dinámicas ecosistémicas que conduzcan a una reducción de la captura de carbono. Como lo muestran Nagler *et al.* en 2009, ellos observaron valores más bajos de NDVI para pastizales de buffel en comparación con el desierto no convertido. Cabe destacar que el estado de los ecosistemas de zonas áridas, al igual que el de las praderas de buffel, presentan un amplio espectro en cuanto a su estado y estructura, de tal manera que el presente trabajo sugiere que, en algunos casos, las praderas de buffel pueden presentar flujos similares en cuanto a magnitud, cuando estos se comparan con otro tipo de vegetación como el matorral subtropical de este trabajo.

Para el intercambio neto del ecosistema, que integra el flujo fotosintético dado como producción primaria bruta y para la respiración del ecosistema que es el flujo combinado de la respiración autótrofa y la respiración heterótrofa (Montaño *et al.*, 2016), encontramos la misma similitud al correlacionar ambos tipos de vegetación. La evapotranspiración, que es

el conjunto de la evaporación (que se define como la pérdida de humedad del suelo) y de la transpiración (que es definida como el proceso mediante el cual las plantas pierden agua hacia la atmosfera), vemos que es el flujo en el cual las especies del matorral subtropical y la pradera se están comportando de una manera más parecida, con una correlación del 95%.

Las similitudes mencionadas previamente pueden deberse a que responden a los mismos factores ambientales, principalmente están expuestos a los mismos pulsos de precipitación y al encontrarse dentro de un ecosistema árido podemos definirlo como ecosistemas controlados por el agua. Como lo menciona Noy-Meir (1973), los desiertos se caracterizan por entradas de agua poco frecuentes, discretas y muchas veces impredecibles. Es por ello que la vegetación presente en zonas áridas y semiáridas depende en gran medida de la forma en la que reciben y utilizan la precipitación. Tarin *et al.* en 2012 estudiaron el intercambio neto del ecosistema en un matorral subtropical en Rayón, Sonora y reportaron que la cantidad de lluvia determinó los flujos anuales y estacionales del carbono y sugieren que este tipo de ecosistemas se pueden convertir en fuentes o sumideros de carbono dependiendo de la cantidad de lluvia (Montaño *et al.*, 2016).

A pesar de las similitudes encontradas, sabemos que el zacate buffel es más propenso a ser dañado por el pastoreo, lo cual impide que desarrollen raíces más profundas capaces de utilizar la precipitación disponible. De acuerdo a Nagler y colaboradores (2009), se puede ver afectada la productividad de las praderas de buffel en tiempos de sequía, poniéndose en un estado latente, mientras que otros arbustos nativos con raíces más profundas, recolectan agua de los perfiles de suelo más profundos para tener una reserva en tiempos de sequía (Chávez, 1999).

Estudios previos realizados en Sonora muestran que la productividad de los pastos introducidos, como es el caso del buffel, puede ser alta siempre y cuando tenga las condiciones favorables (Martín, 1995; Ibarra-Flores, 2004); esto puede explicar lo que nosotros encontramos, porque no existe una diferencia muy marcada en la productividad entre tipos de vegetación en nuestro sitio de estudio.

VI.2. Generación y aplicación de los modelos

Las torres de covarianza de flujos proveen mediciones directas de los flujos de carbono y vapor de agua. Sin embargo solamente se obtienen datos del área donde éstas se encuentran ubicadas; si se quiere conocer cómo han fluctuado los flujos a escalas espaciales y temporales más amplias es posible generar modelos a partir de estas mediciones. Para ello, es necesario aplicar los valores de NDVI a los modelos.

Encontramos que NDVI se correlaciona muy bien (y con una alta significancia) con todos los flujos, y esto lo observamos en ambos tipos de vegetación. Lo anterior sugiere, que cada uno de los flujos puede ser explicado en gran parte en función del NDVI. Con este análisis fue posible generar los modelos que nos permitieron obtener los proxies de productividad a nivel paisaje. El flujo que menos se correlacionó con NDVI (aun cuando el modelo es estadísticamente significativo) fue el Intercambio Neto del Ecosistema, esto podría deberse a que la respiración y la fijación de carbono por parte de la vegetación no presenta un comportamiento lineal (ej. el incremento o decremento en la fijación no representa un incremento o decremento proporcional en la respiración), pues las dinámicas fisiológicas de la vegetación atienden a las necesidades del organismo y no a la disponibilidad de carbono. Este ajuste quizás podría incrementar si se separa la serie de tiempo por temporadas, considerando los periodos en donde se espera que haya sequía y las temporadas donde se espera tener lluvias, para conocer realmente cómo es la fijación de CO₂ y la respiración del ecosistema en cada fase y tratar de encontrar una mejor correlación entre este flujo con el NDVI y con ello obtener modelos más precisos para ambos tipos de vegetación. Sin embargo, se pudieron generar los modelos de los cuatro flujos para los sitios con Matorral Subtropical y los sitios con Pradera de Buffel.

VI.3. Variación asociada a patrones climáticos

Sabemos que los flujos de carbono pueden variar al interior de cada año, a pesar de que sean años húmedos (Montaño *et al* 2016). En la época seca pueden ocurrir ganancias o pérdidas de carbono casi nulas; sin embargo, durante los meses húmedos, además de que estos ecosistemas reverdecen rápidamente, también inicia un intercambio de gases más rápido. Según Hastings *et al.*, en 2005 y Tarin *et al.* en 2012, las evidencias indican que, al inicio de

la temporada, el flujo de la respiración es dominante (pérdida neta de CO₂ hacia la atmósfera) pero durante el punto álgido de la temporada de crecimiento el intercambio de carbono fue dominado por la producción primaria bruta y por lo tanto domina la captura de carbono.

En el contexto del cambio global, al analizar si existe una diferencia en las dinámicas del ecosistema cuando se considera el fenómeno de El Niño, encontramos que a pesar de que no existe una gran variación en cuanto a la cantidad de precipitación en años Neutros, Niño y Niña, en los años neutros sí se observa una mayor precipitación en el sitio de estudio. Tapley y colaboradores en 1990 encontraron que cuando se presentó el ENSO en el oeste de Perú se redujo el 18% de la precipitación media anual.

Hablando propiamente de si hubo una variación con respecto a los flujos y al NDVI, encontramos que en el caso de la producción primaria bruta de verano para Matorral Subtropical y Pradera de Buffel, encontramos una mayor productividad en años neutros y los años Niña y Niño no fueron significativamente diferentes pero sí tenemos valores de p significativos y pruebas de Tukey muestran igualdad en los años Niño y Niña. Esto indica que la fase del ENSO puede modificar la productividad de ambos tipos de vegetación, al ocasionar que la producción primaria bruta disminuya, lo cual tiene sentido debido a que la presencia de este fenómeno altera los regímenes de precipitación y generalmente hace que la disponibilidad de agua disminuya.

En invierno, también se encontró mayor producción primaria bruta en los años neutros. Para el matorral subtropical, se ve una diferencia en cuanto a la producción primaria bruta cuando se presentó La Niña debido que al presentarse este fenómeno se supone que hay más precipitación y puede ser que en el Matorral Subtropical haya anuales de invierno que están fotosintetizando y que por el contrario no es así para el buffel, ya que se encontró un comportamiento diferente en cada uno de los fenómenos.

Urge incrementar las investigaciones sobre la dinámica de los ecosistemas de zonas áridas, cuya resiliencia al cambio de uso de suelo y otras presiones persistentes de cambio global es aún incierta.

VII. CONCLUSIONES

Los flujos de carbono y agua y el NDVI tienen un comportamiento parecido en ambos tipos de vegetación, lo cual sugiere que la conversión de matorral subtropical a praderas de buffel no reduce los flujos de carbono y agua en el sitio de estudio. La similitud en la respuesta de los flujos y el NDVI puede indicarnos que ambos tipos de vegetación están respondiendo casi de la misma forma a los pulsos de precipitación, ya que al estar hablando de vegetación presente en una zona árida, el recurso hídrico resulta ser limitante sobretodo en ciertas épocas del año.

Encontramos que existe correlación significativa entre los flujos medidos por las torres de covarianza de vortices y el NDVI obtenido a través del sensor MODIS. Es por ello que se pudieron generar modelos a través de las correlaciones anteriormente mencionadas. Al aplicar dichos modelos encontramos que fue posible predecir (en cierta medida) los flujos de carbono en función del NDVI en todos nuestros sitios de muestreo dentro del Rancho El Churi. Esto sugiere que NDVI es un buen indicador de la productividad de un ecosistema árido, pues presenta una correlación positiva (y significativa), con las dinámicas de captura de carbono *in situ*.

También, encontramos que durante la presencia del fenómeno de El Niño tanto en las praderas de buffel como en el matorral subtropical se muestran valores más bajos de producción primaria bruta, respiración del ecosistema, evapotranspiración y NDVI en comparación a los años que fueron neutros y en los cuales se presentó La Niña.

Finalmente, el presente trabajo demuestra que mediante la covarianza de flujos de carbono y la percepción remota es posible determinar las dinámicas de los flujos de carbono a nivel paisaje. Esto resultará útil, en la evaluación/valoración de los efectos de los fenómenos ambientales sobre la fijación y liberación de carbono en zonas áridas. Así también, estas técnicas pueden utilizarse para la evaluación de captura de carbono de otro tipo de ecosistemas.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, K., A. Bows. 2008. Reframing the climate change challenge in light of post-2000 emission trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences* 366:3863–3882.
- Arroyo, MTK., C. Marticorena, O. Matthei, L. Cavieres. 2000. Plant invasions in Chile: present patterns and future predictions. 385-42 p. En: Mooney, H. A. y Hobbs, R. J.(Eds.), *Invasive species in a changing world*. Island Press, Estados Unidos de América.
- Baldocchi, D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9:479–492.
- Bravo-Peña, L. C., S. Doode-Matsumoto, A. E. Castellanos-Villegas, I. Espejel-Carbajal. 2010. Políticas rurales y pérdida de cobertura vegetal. Elementos para reformular instrumentos de fomento agropecuario relacionados con la apertura de praderas ganaderas. *Región y Sociedad* 22:3-35.
- Brenner, J. C. 2010. Pasture Conversion, Private Ranchers, and the Invasive Exotic Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) in Mexico's Sonoran Desert. *Annals of the Association of American Geographers* 101:84-106.
- Brooks, M. L., C. M. D'Antonio, D. M. Richardson, J. B. Grace, J. E. Keeley, J. M. DiTomaso, R. J. Hobbs, M. Pellant y D. Pyke. 2004. Effects of Invasive Alien Plants on Fire Regimes. *BioScience* 54:677–688.
- Brovkin, V., M. Claussen, E. Driesschaert, T. Fichefet, D. Kicklighter, M. F. Loutre, H. D. Matthews, N. Ramankutty, M. Schaeffer y A. Sokolov. 2006. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. *Climate Dynamics* 26:587–600.
- Burba, G. 2013. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates. LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, Estados Unidos de América. 331.
- Burgess, T. L., J. C. Bowers y R. M. Turner. 1991. Exotic Plants at the Desert Laboratory, Tucson, Arizona. *Madroño* 38:96–114.

- Búrquez, A., A. Martínez-Yrizar, R. S. Felger, D. Yetman. 1999. Vegetation and habitat diversity at the southern desert edge of the Sonoran Desert. 36–67 p. En: Robichaux, R. H. (Eds.), *Ecology of Sonoran Desert Plants and Plant Communities*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Burquez-Montijo, A., Miller, M., Martinez-Yrizar, A. 2002. Mexican grasslands, thornshrub, and the transformation of the Sonoran Desert by invasive exotic buffelgrass (*Pennisetum ciliare*). 126–146 p. En: Tellman, B. (Eds.), *Invasive Exotic Species in the Sonoran Region*. The University of Arizona Press y The Arizona-Sonora Desert Museum, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Campbell, A., L. Miles, I. Lysenko, A. Huges y H. Gibbs. 2008. Carbon storage in protected areas. Technical report. UNEP World Conservation Monitoring Center.
- Castellanos, A., L. Bravo, G. Koch, J. Llano, D. López, R. Méndez, J. Rodríguez, R. Romo, T. Sisk Y G. Yanes. 2010. Impactos ecológicos por el uso del terreno en el funcionamiento de ecosistemas áridos y semiáridos. 157-186 p. En: *Diversidad biológica de Sonora*. (Eds.), Molina Freaner y Van Devender. UNAM. CONABIO.
- Castellanos, A. E., M. J. Martínez, J. Llano, W. Halvorson, M. Espiricueta, I. Espejel. 2004. Successional trends in Sonoran Desert abandoned agricultural fields in Northern Mexico. *Journal of Arid Environment* 60:437–455.
- Castellanos, A. E., G. Yanes y D. Valdez-Zamudio. 2002. Drought-Tolerant Exotic Buffel-Grass and Desertification. 99-112 p. En: Tellman B. (Eds), *Weeds Across Borders*. The Arizona-Sonora Desert Museum, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Castellanos, A. E., H. Celaya, C. Hinojo, A. Ibarra, J. R. Romo. 2013. Biodiversity effects on ecosystem function due to land use: The case of buffel savannas in the Sky Islands Seas in the central region of Sonora. 191-196 p. En: Gottfried, Gerald J., Ffolliott, Peter F., Gebow, Brooke S., Eskew, Lane G., Collins, Loa C. *Merging science and management in a rapidly changing world: Biodiversity and management of the Madrean Archipelago III and 7th Conference on Research and Resource Management in the Southwestern Deserts*; 2012 May 1-5; Tucson, Arizona. Proceedings. RMRS-P-67. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Estados Unidos de América.

- Celaya-Michel, H., A. E. Castellanos-Villegas. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana* 29:343-356.
- Celaya-Michel, H., F. García Oliva, J. C. Rodríguez, A. E. Castellanos Villegas. 2015. Cambios en el almacenamiento de nitrógeno y agua en el suelo de un matorral desértico transformado a sabana de buffel (*Pennisetum ciliare*). *Terra Latinoamericana* 33:79-93.
- Chávez, O.E. 1999. The 1994–1995 drought, what did we learn from it?: The Mexican perspective. *Natural Resources Journal* 39:35–60.
- Cox J. R., M. H. Martin, F. A. Ibarra, J. H. Fourie, N. F. G. Rethman, D. G. Wilcox. 1988. The influence of climate and soils on the distribution of four African grasses. *Journal of Range Management* 41:127-139.
- D'Antonio, C. M., T. Dudley y M. Mack. 1999. Disturbance and biological invasions: Direct effects and feedbacks. 413–452 p. En: Walker, L. R. (Eds.), *Ecosystems of Disturbed Ground*. Elsevier Science, Nueva York, Estados Unidos de América.
- De Chazal, J. y M. Rounsevell. 2009. Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: A review. *Global Environmental Change* 19:306–315
- Eamus, D., N. Boulain, J. Cleverly y D. D. Breshears. 2013. Global change-type drought-induced tree mortality: Vapor pressure deficit is more important than temperature per se in causing decline in tree health. *Ecology and Evolution* 3:2711–2729.
- Ehrenfeld, J. 2003. Effects of Exotic Plant Invasions on Soil Nutrient Cycling Processes. *Ecosystems* 6:503-523.
- Ellis, E. C. y N. Ramankutty. 2008. Putting People in the Map: Anthropogenic Biomes of the World. *Frontiers in Ecology and Environment* 6:439–447.
- Fahrig, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 34:487–515.
- Fan, S., M. Gloor, J. Mahlman, S. Pacala, J. Sarmiento, T. Takahashi y P. Tans. 1998. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science* 282:42–446.
- Fensholt, R. 2004. Earth observation of vegetation status in the Sahelian and Sudanian West Africa: comparison of Terra MODIS and NOAA AVHRR satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 25:1641-1659.

- Flores-Olvera, H. 2011. Las zonas áridas y semiáridas de México, las menos exploradas. Boletín UNAM-DGCS-763.
- Franklin, K. A., K. Lyons, P. L. Nagler, D. Lampkin, E. P. Glenn, F. Molina-Freaner, T. Markow, A. R. Huete. 2006. Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) land conversion and productivity in the plains of Sonora, Mexico. *Biological Conservation* 127:62–71.
- Franklin, K., F. Molina-Freaner. 2010. Consequences of Buffelgrass Pasture Development for Primary Productivity, Perennial Plant Richness, and Vegetation Structure in the Drylands of Sonora, Mexico. *Conservation Biology* 24:1664–1673.
- Global Land Project (GLP). 2005. Science plan and implementation strategy. IGBP Report 53/IHDP Report 19. IGBP Secretariat, Estocolmo, Suecia.
- Hassan, R., R. Scholes y N. Ash. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends. 2-20 p. En: Volume 1. Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, DC, Estados Unidos de América.
- Hinojo-Hinojo, C. 2013. El papel de la diversidad funcional de plantas en el funcionamiento y provisión de servicios de ecosistemas de la región centro de Sonora. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Hermosillo, Sonora, México.
- Hinojo-Hinojo, C., A. E. Castellanos, J. C. Rodríguez, J. Delgado-Balbuena, J. R. Romo-León, H. Celaya-Michel, T.E. Huxman. 2016. Carbon and water fluxes in an exotic buffelgrass savanna. *Rangeland Ecology & Management* 69:334-341.
- Hinojo-Hinojo, C., A. E. Castellanos, T. Huxman, J. C. Rodriguez, R. Vargas, J. R. Romo-León, J. Biederman. 2019. Native shrubland and managed buffelgrass savanna in drylands: Implications for ecosystem carbon and water fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 268:269-278.
- Hottenstein, J. D., G. E. Ponce-Campos, J. Moguel-Yanes y M. S. Moran. 2015. Impact of varying storm intensity and consecutive dry days on grassland soil moisture. *Journal of Hydrometeorology* 16:106–117.
- Houghton, R. A. 1994. The worldwide extent of land-use change. *Bio-Science* 44:305–313.
- Hussey, M. A., E. C. Bashaw. 1996. Performance of buffelgrass germplasm with improved winter survival. *Agronomy Journal* 88:944-946.

- Ibarra-Flores, F., M. H. Martín y M. F. Silva. 1987. ¿Qué es un Sistema de Pastoreo? (What is a Grazing System?). *Boletín Rancho* 5(33).
- Ibarra-Flores, F., M. H. Martín, B. A. Encinas, P. Z. Pérez. 2003. Recomendaciones para el mejoramiento forrajero de los agostaderos de Sonora, mediante técnicas de rehabilitación y manejo. *Publicación Especial. F.P.S., U.G.R.S., PATROCIPES. INIFAP. Hermosillo, Sonora, México.*
- Ibarra-Flores, F., A., J. R. Cox, M. H. Martín, T. A. Crowl y C. A. Call. 1995. Predicting Buffelgrass Survival Across a Geographical and Environmental Gradient. *Journal of Range Management* 48:53–59.
- Ibarra-Flores, F., S. Moreno Medina, M. H. Martín, F. Denogean Ballesteros, L. E. Gerlach Barrera. 2005. La siembra de zacate buffel como una alternativa para incrementar la rentabilidad de los ranchos ganaderos de la sierra de Sonora. *Técnica Pecuaria en México* 43:173-183.
- IPCC. 2000. *Land Use, Land-Use Change and Forestry*. 375 p. En: Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo & David J. Dokken (Eds.). Cambridge University Press, Reino Unido.
- Kawanishi, T., H. Kuroiwa, M. Kojima. 2000. TRMM Precipitation Radar. *Advances in Space Research* 25: 969-972.
- Kummerow, C., W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue y J. Simpson. 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15:809–816.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123:1-22.
- Lal, R. y J. P. Bruce. 1999. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science and Policy* 2:177-185.
- Lal, R. 2001. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Climatic Change* 51:35–72.
- Lara Lara, J. R., E. Millán Núñez, R. Millán Núñez, C. Bazán Guzmán. 2003. Producción primaria del fitoplancton en el Pacífico Mexicano (1992–2000). 103–124 p. En: Barreiro, M.T., M.M., Signoret, M., Figueroa, M.G. (Eds.), *Planctología Mexicana*. Sociedad Mexicana de Planctología, A.C.

- Lavander, A. L. 2003. Pruebas de adaptación de zacate buffel (*Cenchrus ciliaris* (L.)) en la región de Cananea, Sonora. Tesis de licenciatura. Universidad de Sonora. Santa Ana, Sonora, México.
- Loescher, H. W., B. E. Law, L. Mahrt, D. Y. Hollinger, J. Campbell, S. C. Wofsy. 2006. Uncertainties in, and interpretation of, carbon flux estimates using the eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111:1-19.
- Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire y D. W. Rhind, D. W. 2005. *Geographical Information Systems and Science: Principles, techniques, management and applications*. Harlow, Nueva Jersey, Estados Unidos de América.
- Low, T. 1997. Tropical pasture plants as weeds. *Tropical Grasslands* 31:337-343.
- Lyons, K. G., B. G. Moldonado-Leal y G. Owen. 2009. Community and Ecosystem Impacts of the Non-Indigenous C4 Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) in the Sonoran Desert, Sonora, Mexico. 251- 264 p. En: Van Devender, T. R., Espinosa-García, F. J., Harper-Lore, B. L., y Hubbard, T. (Eds.), *Invasive Plants on the Move: Controlling them in North America*. Arizona-Sonora Desert Museum Press, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Mack, R. N. 2002. Natural barriers to plant naturalizations and invasions in the Sonoran Desert. 63–75 p. En: Tellman, B. (Eds.), *Invasive Exotic Species in the Sonoran Region*. The University of Arizona Press and The Arizona-Sonora Desert Museum, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Mack, R. N. y W. M. Lonsdale. 2001. Humans as Global Plant Dispersers: Getting More than We Bargained For. *BioScience* 51:95–102.
- Marshall, N.A. 2011. Considering the social dimension of invasive species: the case of buffel grass. *Environmental Science and Policy* 14:327-338.
- Martinez-Yrizar, A., J. Sarukhan, A. Perez-Jimenez, E. Rincon, J. M. Maass, A. Solis-Magallanes, L. Cervantes. 1992. Aboveground phytomass of a tropical deciduous forest on the Coast of Jalisco, Mexico. *Journal of Tropical Ecology* 8:87–96.
- McNeely, J. A. 2005. Human dimensions of invasive alien species. 285–309 p. En: Mooney, H. A., Mack, R. N., McNeely, J. A., Neville, L. E., Schei, P. J., and Waage, J. K. (Eds.), *Invasive Alien Species: A New Synthesis*, Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) 63. Island, Washington, DC, Estados Unidos de América.

- Melton, B., W. Huffman. 1994. Implications of the North American Free Trade Agreement for long-term adjustments to U. S. - Mexican beef production and trade. 107-130 p. En: Center for North American Studies, International Agricultural Trade Research Consortium and Texas Agricultural Market Research Center editors. San Antonio, Texas, Estados Unidos de América.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC, Estados Unidos de América.
- Molina-Freaner, F. E. y T. R. Van-Devender. 2010. Diversidad biológica de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Montaño, N. M., F. Ayala, S. H. Bullock, O. Briones, F. García, R. García, Y. Maya, Y. Perroni, C. Siebe, Y. Tapia, E. Troyo, Yépez, E. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana* 34:39-59.
- Morales-Romero, D., H. Lopez-Garcia, J. Martinez-Rodriguez, F. Molina-Freaner. 2019. Documenting a plant invasion: The influence of land use on buffelgrass invasion along roadsides in Sonora, Mexico, *Journal of Arid Environments* 164:53-59.
- Nagler, P. L., E. P. Glenn, K. A. Franklin, D. Lampkin y A. R. Huete. 2009. "Remote sensing methods to monitor buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) and native ecosystem productivity in the plains of Sonora, Mexico". 265–74 p. En *Invasive plants on the move: Controlling them in North America*, Edited by: Van Devender, T. R., Espinosa-García, F. J., Harper-Lore, B. L. and Hubbard, T. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- NASA, MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. 2018. (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2018. National Weather Service: Climate Prediction Center. College Park, Maryland, Estados Unidos de América: Cold & Warm Episodes by Season (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).
- Noy-Meir, I. 1973. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4:23-51.

- O'Hara, S. L., F. A. Street-Perrot, T. P. Burt. 1993. Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by prehispanic agriculture. *Nature* 362:48-51.
- Parsons, J. J. 1972. Spread of African Pasture Grasses to the American Tropics. *Journal of Range Management* 25:12–17.
- Perez-Ruiz, E.R., J. Garatuza-Payan, C. J. Watts, J. C. Rodriguez, E. A. Yopez, R. L. Scott. 2010. Carbon dioxide and water vapour exchange in a tropical dry forest as influenced by the North American Monsoon System (NAMS). *Journal of Arid Environments* 74:556–563.
- Perrings, C., H. Mooney y M. Williamson. 2010. *Globalization and Bioinvasions: Ecology, Economics, Management and Policy*. Oxford University Press, Oxford.
- Perrings, C., M. Williamson, E. B. Barbier, D. Delfino, S. Dalmazzone, J. Shogren, P. Simmons y A. Watkinson. 2002. Biological Invasion Risks and the Public Good: An Economic Perspective. *Conservation Ecology* 6:1.
- Pimentel, D., R. Zuniga y D. Morrison. 2005. Update on the Environmental and Economic Costs Associated with Alien-Invasive Species in the United States. *Ecological Economics* 52:273–288.
- RStudio Team. 2016. *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, Inc., Boston, Massachusetts, Estados Unidos de América. URL: <http://www.rstudio.com/>.
- Ramírez, R. 1999. Feed resources and feeding techniques of small ruminants under extensive management conditions. *Small Ruminant Research*, 34:15-230.
- Ramirez, R., R. Foroughbackhch, L. Haud, J. Alba-Avila, C. Garcia-Castillo, E. Espinosa-Vasquez. 2001. Seasonal dynamics of dry matter, crude protein and cell wall digestion in total plant, leaves and stems of common buffelgrass (*Cenchrus ciliaris*). *Journal of Applied Animal Research* 19:209-218.
- Randerson, J. T., C. B. Field, I. Y. Fung y P. P. Tans. 1999. Increases in early season ecosystem uptake explain recent changes in the seasonal cycle of atmospheric CO at high northern latitudes. *Geophysical Research Letters* 26:2765–2768.
- Reenberg, A. 2009. Land System Science: Handling Complex Series of Natural and Socio-Economic Processes. *Journal of Land Use Science* 4:1–4.
- Robbins, P. 2004. Culture and Politics of Invasive Species. *Geographical Review* 94:4-5.

- Rodríguez-Eraso, N., J. D. Pabón Caicedo, N. Bernal-Suárez y J. Martínez-Collantes. 2010. Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Universidad Nacional de Colombia. Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. Bogotá, Colombia.
- Romo, R. 2011. Examining trends in post-disturbance ecosystem dynamics in the southwestern United States and northwestern Mexico using remote sensing time-series data and land cover change detection. Tesis doctoral. The University of Arizona. Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Romo-León, J. R., W. J. D. Van Leeuwen, A. Castellanos. 2013. Percepción remota para el análisis de la distribución y cambios de uso de suelo en zonas áridas y semiáridas. 19-50 p. En: Sánchez-Flores, E. y Díaz-Caravantes, R. E. (Eds.), *Dinámicas Locales del Cambio Ambiental Global*.
- Ruiz Reverter, B. y A. S. Kowalski. 2013. Análisis preliminar micrometeorológico de un ecosistema de alta montaña de matorral mediterráneo. Tesis de maestría. Universidad de Granada, Granada, España.
- Rübelke, D.T.G. 2011. International support of climate change policies in developing countries: strategic, moral and fairness aspects. *Ecological Economics* 70:1470–1480.
- Sanderson, M., P. Voight, R. Jones. 1999. Yield and quality of warm-season grasses in central Texas. *Journal of Range Management* 52:5-150.
- Schlesinger, W. H. y E. Bernhardt. 2013. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. Elsevier, Oxford, Reino Unido.
- Scott, R. L., J. A. Biederman, E. P. Hamerlynck y G. A. Barron-Gafford. 2015. The carbon balance pivot point of southwestern U.S. semiarid ecosystems: Insights from the 21st century drought. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120:2612–2624.
- Segura-Castruita, M. A., P. Sánchez-Guzmán, C. A. Ortiz-Solorio y M. C. Gutiérrez-Castorena. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 23:21-28.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, C. de Haan. 2006. *Livestock's long shadow - Environmental issues and options*. FAO Agriculture Technical paper, Rome.

- P. A. Stott, S. F. B. Tett, G. S. Jones, M. R. Allen, J. F. B. Mitchell y G. J. Jenkins. 2000. External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science* 290:133–2137.
- Tapley, T.D., P. R. Waylen. 1990. Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru. *Hydrological Sciences Journal* 35:429–446.
- Tarin, T., E.A. Yépez, J. C. Rodríguez, J. Garatuza-Payan, Ch. J. Watts, E. Pérez-Ruiz, E. R. Vivoni y I. A. Méndez. 2012. Flujos ecosistémicos de agua y carbono durante la temporada de lluvias en un matorral subtropical de Sonora. 224-230 p. En: F. Paz y R. Cuevas (Eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono, Universidad Autónoma del Estado de México e Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Estado de México, México.
- Turner II, B. L., W. C. Clark, R. W. Kates, J. F. Richards, J. T. Mathews y W. B. Meyer. 1990. *The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in the Biosphere over the Past 300 Years*. Cambridge University Press and Clark University, Cambridge.
- Turner R.M., J. E. Bowers y T. L. Burgess. 1995. *Sonoran Desert Plants. An Ecological Atlas*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Turner II, B. L., E. F. Lambin y A. Reenberg. 2007. The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability. *Proceedings of the National Academ of Sciences of the USA* 104:20666–20671.
- Unión Ganadera Regional de Sonora. 2004. *El paso hacia la Unión Ganadera Regional de Sonora*. 2019. Unión Ganadera Regional de Sonora (<https://www.unionganadera.com/interior.php>)
- Van Devender, T. R., y M. A. Dimmitt. 2000. Desert grasses. 265–280 p. En: Phillips, S. J., and Comus, P. W. (Eds.), *A Natural History of the Sonoran Desert*. Arizona Sonora Desert Museum Press and University of California Press, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Van Devender, T. R., R. S. Felger, A. L. Reina-G. y J. J. Sánchez-Escalante. 2009. Non-Native and Invasive Plants in Sonora, Mexico. *Invasive Plants on the Move*:

- Controlling Them in North America Tucson, AZ, Arizona-Sonora Desert Museum Press, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Vargas, R., H. W. Loescher, T. Arredondo, E. Huber-Sannwald, R. Lara-Lara y E. A. Yezpez. 2012. Opportunities for advancing carbon cycle science in Mexico: towards a continental scale understanding. *Environmental Science and Policy* 12:84–93.
- Vargas, R., E. A. Yezpez. 2011. Toward a Mexican eddy covariance network for Carbon Cycle Science. *Eos Transactions AGU* 92:308.
- Vargas, R., E. A. Yépez, J. L. Andrade, G. Ángeles, T. Arredondo, A. E. Castellanos, J. Delgado-Balbuena, J. Garatuza-Payán, E. González del Castillo, W. Oechel, J. C. Rodríguez, A. Sánchez-Azofeifa, E. Velasco, E. R. Vivoni, C. Watts. 2013. Progress and opportunities for monitoring greenhouse gases fluxes in Mexican eco-systems: the MexFlux network. *Atmosfera* 26:325–336. doi: [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71079-8](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71079-8)
- Vásquez-León, M., C. T. West, T. J. Finan. 2003. A comparative assessment of climate vulnerability: agriculture and ranching on both sides of the US–Mexico border. *Global Environmental Change* 13:159–173.
- Vitousek, P.M., H. A. Mooney, J. Lubchenco, J. M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277:494–499.
- Von Der Lippe, M. y I. Kowarik. 2007. Long-Distance Dispersal of Plants by Vehicles as a Driver of Plant Invasions. *Conservation Biology* 21:986–996.
- Warren, C. R. 2007. Perspectives on the ‘alien’ versus ‘native’ species debate: a critique of concepts, language and practice. *Progress in Human Geography* 31:427–446.
- Whitehead, K., C. Hugenholtz. 2014. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. Department of Geography, University of Calgary, Calgary, Canadá.
- Williams, D. G. y Z. Baruch. 2000. African Grass Invasion in the Americas: Ecosystem Consequences and the Role of Ecophysiology. *Biological Invasions* 2:123–140.
- Xie, Y., Z. Sha, M. Yu. 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology* 1:9-23.
- Yetman, D. 1996. *Sonora: An Intimate Geography*. University of New Mexico Press, Albuquerque Nuevo México, Estados Unidos de América.

- Yetman, D. y A. Búrquez. 1994. Buffelgrass–Sonoran Desert Nightmare. *Arizona Riparian Council News* 7:8–10.
- Zolotokrylin, A., T. Titkova, L. Brito-Castillo. 2016. Wet and dry patterns associated with ENSO events in the Sonoran Desert from 2000–2015. *Journal of Arid Environments* 134:21–32.