

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



TESIS

**ASOCIACIONES ENTRE PLANTAS VASCULARES Y COSTRAS
BIOLÓGICAS DEL SUELO EN EL MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO
DEL ALTIPLANO MEXICANO**

POR

MC. MARITZA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

NOVIEMBRE, 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**ASOCIACIONES ENTRE PLANTAS VASCULARES Y COSTRAS
BIOLÓGICAS DEL SUELO EN EL MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO
DEL ALTIPLANO MEXICANO**

POR

MC. MARITZA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

NOVIEMBRE, 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

ASOCIACIONES ENTRE PLANTAS VASCULARES Y COSTRAS BIOLÓGICAS DEL
SUELO EN EL MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO DEL ALTIPLANO MEXICANO

TESIS

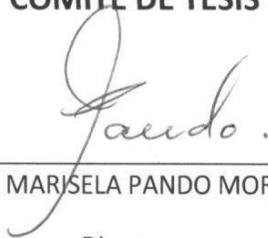
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE

**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

Presenta

MC. MARITZA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

COMITÉ DE TESIS



DRA. MARISELA PANDO MORENO

Directora



DR. ENRIQUE JURADO YBARRA

Asesor



DR. HUMBERTO GONZÁLEZ RODRIGUEZ

Asesor



DR. JOSÉ GUADALUPE MARMOLEJO MONCIVAIS

Asesor



DR. JORDI CORTINA SEGARRA

Asesor externo

Declaro que la presente investigación es original, y se desarrolló para obtener el grado de Doctor en Ciencias con Orientación en Manejo de Recursos Naturales; donde se utiliza información de otros autores, se otorgan los créditos correspondientes.



MC. MARITZA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

Noviembre de 2016

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi mentora la Dra. Marisela Pando Moreno, por la excelente asesoría brindada, por los acertados comentarios y enriquecedoras sugerencias que durante el tiempo de esta investigación tuvo a bien externar. Gracias por la paciencia y la confianza que nuevamente depositaste en mí. Pero sobre todo gracias por tu sincera, incondicional e invaluable amistad.

Gracias al Dr. Enrique Jurado Ybarra, Dr. José Marmolejo Monsiváis, Dr. Humberto González Rodríguez y al Dr. Jordi Cortina Segarra, por el tiempo dedicado a la revisión de la presente investigación desde su inicio hasta su culminación, así como por hacer las observaciones correspondientes a fin de mejorarla.

A la Dra. Dinorah O. Mendoza Aguilar por fungir como mi “asesorita” y adentrarme en el mundo de la identificación de las CBS. Tu apoyo, paciencia y disposición de ayudar siempre estuvieron presentes cuando más lo necesité. Muchas gracias por tu bella amistad.

Al Ing. Joel Bravo Garza y Alfredo Ortega Guerra por acompañarme siempre y trabajar con tanto empeño en las salidas a campo y por su trabajo en el laboratorio. Gracias muchachos por contribuir a generar un excelente ambiente de trabajo haciendo de éste una experiencia de lo más gratificante. A mis compañeros y amigos de laboratorio Jaresy, Nashielly, Armando y Edna por colaborar con su eficiente trabajo al desarrollo de la presente investigación y por los agradables momentos que pasamos en grata convivencia, gracias por su apoyo y por su amistad. A Dalia Elena y Rosy Soto por su apoyo y contribución dentro del primer capítulo. A mis compañeros de posgrado, Edmar gracias por las claves, Gerardo por coincidir ahora en el doctorado y brindarme tu apoyo y amistad.

A Doña Mica por abrir amablemente las puertas de su casa para alojarnos durante las estancias de campo. Y a los habitantes de los ejidos La Soledad y

San José del Alamito por permitirnos la entrada para levantar los datos necesarios para la presente investigación. A la técnica Cecilia Casas López encargada del laboratorio de micología de la FCF, UANL, por las facilidades otorgadas en el uso de los espacios y equipos necesarios durante esta investigación.

A los profesores de la Facultad de Ciencias Forestales por compartir sus conocimientos y ser parte de mi formación académica. A todo el personal de la Facultad de Ciencias Forestales por las atenciones brindadas. Juany y Daisy muchas gracias por las facilidades y atención en la búsqueda de literatura.

Quiero agradecer de manera especial al CONACYT, por el apoyo económico brindado durante los tres años del programa de doctorado.

DEDICATORIA

*A Dios, por hacerse presente con su infinito amor en cada momento de mi vida,
gracias por tantas bendiciones.*

Por su amor y apoyo incondicional siempre, a mis padres:

Rosa Obdulia Gutiérrez Arellano y Pedro Gutiérrez Flores.

*A mi esposo José Roberto, por demostrarme su gran amor y brindarme su
apoyo y comprensión en todo momento, Gracias mi AMOR, Te AMO!*

*A mis pedacitos de cielo mis bellos hijos Victoria Odette y Pedro Sebastián, los
amo demasiado, gracias por prestarme tiempo para alcanzar logros
profesionales que son para ustedes.*

A ustedes les dedico mi trabajo de todo corazón.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO I EFECTO DEL MICROSITIO EN LA COMPOSICIÓN DE COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN UN ÁREA DE MATORRAL MICRÓFILO DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE	6
RESUMEN	7
SUMMARY	8
RESUMO	9
INTRODUCCIÓN	10
METODOLOGÍA	12
<i>Área de estudio</i>	12
<i>Método</i>	13
RESULTADOS	15
DISCUSIÓN	18
CONCLUSIÓN	20
CAPÍTULO II ASSOCIATION OF VASCULAR PLANTS AND BIOLOGICAL SOIL CRUSTS IN THE CHIHUAHUAN DESERT	21
CAPÍTULO III INFLUENCIA DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN EL FLUJO DE CO₂ EN EL MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO DEL ALTIPLANO MEXICANO	22
INTRODUCCIÓN	23
HIPÓTESIS	25
OBJETIVOS	25
MATERIALES Y MÉTODOS	26
<i>Área de estudio</i>	26
<i>Método</i>	27

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
CONCLUSIÓN	34
CONCLUSIÓN GENERAL	35
LITERATURA CITADA	37

ÍNDICE DE TABLAS

**CAPÍTULO I EFECTO DEL MICROSITIO EN LA COMPOSICIÓN DE
COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN UN ÁREA DE MATORRAL
MICRÓFILO DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE 6**

TABLA I. Relaciones entre los micrositos y las coberturas de CBS, resultados de la prueba U de Mann-Whitney 16

TABLA II. Cobertura promedio en porcentaje ($n=20 \pm$ error estandar) de CBS por morfotipo para cada micrositio 16

TABLA III. Valores promedio ($n=20$) \pm error estándar de humedad del suelo (%) y radiación solar (lux) para cada micrositio 17

**CAPÍTULO III INFLUENCIA DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO
EN EL FLUJO DE CO₂ EN EL MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO DEL
ALTIPLANO MEXICANO 22**

TABLA 1. Respiración del suelo (promedio \pm error estándar) para cada microambientes 31

ÍNDICE DE FIGURAS

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
FIGURA 1: Ubicación del área de estudio	3
CAPÍTULO I EFECTO DEL MICROSITIO EN LA COMPOSICIÓN DE COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN UN ÁREA DE MATORRAL MICRÓFILO DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE	6
FIGURA 1: Coberturas por morfotipo de CBS para cada micrositio.....	15
CAPÍTULO III INFLUENCIA DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN EL FLUJO DE CO₂ EN EL MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO DEL ALTIPLANO MEXICANO	22
FIGURA 1. Instalación de anillos de PVC en los puntos de muestreo fijos para cada microambiente; a) bajo planta (<i>Parthenium incanum</i>), b) área abierta	27
FIGURA 2. Equipo portátil EGM-4 (Environmental® PP-Systems, Hitchin, UK)	29
FIGURA 3. Respiración del suelo (g CO ₂ m ⁻² hora ⁻¹) por microambiente	32

RESUMEN

Las asociaciones entre organismos formadores de costras biológicas del suelo (CBS) y plantas vasculares han sido investigadas considerando, entre otras cosas, los patrones espaciales de ambos tipos de organismos; mostrando resultados no siempre concordantes. Conocer la interacción entre CBS y plantas vasculares, así como el efecto que las costras tienen en el flujo de CO₂ es crucial para entender la dinámica de dichas comunidades en los ecosistemas áridos y semiáridos. En el presente estudio se investiga el efecto de la presencia de la especie vascular dominante en el área de estudio (*Larrea tridentata*), radiación solar y humedad del suelo en la composición de las CBS. Así mismo se evalúa la influencia de las CBS en la respiración del suelo. Para evaluar el primero, se ubicaron 20 puntos al azar definiendo tres micrositios: bajo arbusto exposición este (BAE), bajo arbusto exposición oeste (BAO) y área fuera de la proyección de la copa (FA). Los resultados indican que las CBS mostraron preferencias para ciertos micrositios. Líquenes y musgos mostraron mayor cobertura en sitios bajo planta. Los musgos cubrieron una superficie cuatro veces mayor bajo copas de *L. tridentata* que en áreas fuera de éstas. Las cianobacterias presentaron mayor cobertura específicamente en BAO. Para evaluar la influencia de las CBS en la respiración del suelo se consideraron cuatro microambientes: área abierta sin costra (Aa), área abierta con costra (AaC), bajo planta sin costra (Bp) y bajo planta con costra (BpC). Los resultados de esta investigación confirman, de manera general, que la tasa de respiración es mayor cuando el suelo está cubierto por costra biológica del suelo (CBS) que cuando está desprovisto de ésta. Las tasas de respiración difirieron entre los cuatro microambientes considerados. Área abierta con CBS y bajo planta con CBS fueron los microambientes que presentaron mayores tasas de respiración de suelo cuando se compararon con los microambientes carentes de CBS. Para el área de estudio se estimó una tasa de respiración promedio de 166.075g CO₂ m⁻² año⁻¹, calculada con base a la tasa de respiración promedio para los microambientes considerados (0.455g CO₂ m⁻² hora⁻¹).

ABSTRACT

The association between organisms of the biological soil crust (BSC) and vascular plants has been investigated considering, among other matters, the spatial patterns of both types of organisms and results have not always been coincident. Increasing the knowledge of the interactions between BSC and vascular plants, as well as the effect that crusts have on the flow of CO₂ are key issues to understand the dynamics of these communities in arid and semi-arid ecosystems. The present study investigates the effect of the presence of the dominant vascular species in the study area (*Larrea tridentata*), solar radiation and soil moisture in the composition of BSC. The influence of BSC on soil respiration is also evaluated. To evaluate the former, 20 random points were located at three microsites: under shrub east exposure (BAE), under shrub west exposure (BAO) and area outside the crown projection (AF). The results indicate that BSC showed preferences for certain microsites. Lichens and mosses showed greater coverage in sites under plant. Mosses covered a surface four times larger under *L. tridentata* crown than in areas outside crown projection. Cyanobacteria also showed greater coverage under shrub crown, specifically in western exposure. For the evaluation of the influence of BSC on soil respiration, four microenvironments were defined: open area without crust (Aa), open area with crust (AaC), beneath plant without crust (Bp) and beneath plant with crust (BpC). The results of this research generally confirm that the respiration rate is higher when the soil is covered by biological soil crust (BSC) than when it is depleted of it. Respiration rates differed between the four analyzed microenvironments. Open area with BSC and under plant with BSC were the microenvironments that presented higher rates of soil respiration when compared to the microenvironments lacking of BSC. For the study area, the average respiration rate was 166.075g CO₂ m⁻² year⁻¹, based on the average respiration rate for the microenvironments under study (0.455g CO₂ m⁻² hour⁻¹).

INTRODUCCIÓN GENERAL

Las costras biológicas del suelo (CBS) están constituidas por un conjunto de especies vegetales no vasculares (líquenes, musgos, hepáticas) y microorganismos unicelulares o de organización simple (cianobacterias libres, hongos y algas) que habitan en el suelo y que mantienen una estrecha relación con la capa más superficial del mismo (Eldridge 2000; Belnap *et al.*, 2003; Castillo-Monroy y Maestre 2011). Éstas se localizan en diversos hábitats alrededor del mundo desde desiertos fríos hasta en áreas edáficamente secas de zonas templadas (Langhans *et al.*, 2009), siempre que la vegetación vascular perenne no cubra completamente el suelo, permitiendo la entrada de radiación solar creando un hábitat favorable para estas complejas comunidades (Belnap *et al.*, 2003). De ahí que su mayor distribución, desarrollo y cobertura se da en ecosistemas áridos y semiáridos donde la cubierta vegetal suele ser escasa (Belnap y Lange, 2001). Al estar compuestas por organismos de vida larga, pueden proporcionar servicios ecosistémicos continuos (Castillo-Monroy y Maestre, 2011) como proveer estructura al suelo (Richer *et al.*, 2012), favorecer el balance hídrico, y al reciclaje de nutrientes (Castillo-Monroy y Maestre, 2011). Además, con contadas excepciones, la presencia de líquenes en las costras mejora la resistencia del suelo a la erosión e incrementa su capacidad de retención de agua (Abed *et al.*, 2013).

Desde hace más de un siglo, diversas investigaciones se han enfocado en la identificación de interacciones positivas entre especies a fin de entender la dinámica entre éstas (e.g. Shreve, 1910), la cual afecta su distribución, diversidad y reproducción (Badii *et al.*, 2008). No obstante, son pocos los estudios que han evaluado las interacciones que se presentan entre los distintos componentes de la costra biológica del suelo (Castillo-Monroy y Maestre 2011) o entre ésta y las plantas vasculares con las que co-existe. Existen estudios que reportan relaciones de facilitación entre plantas vasculares y CBS, específicamente para *Stipa tenacissima* y *Cladonia convoluta* (Maestre, 2003). Sin embargo, otros mencionan que la relación entre la cobertura total de

costras y plantas vasculares es inversamente proporcional debido a que los principales componentes de las CBS son organismos fotosintéticos y que, a menor cobertura de plantas, más superficie está disponible para ser colonizado por las costras biológicas (Belnap *et al.*, 2001). Específicamente en el caso de los líquenes componentes de las CBS, algunos estudios señalan que estos están en desventaja competitiva con respecto a la vegetación vascular (Ochoa-Hueso *et al.*, 2011; Concostrina-Zubiri *et al.*, 2014).

A fin de entender la dinámica que existe entre las CBS y las especies vasculares del matorral micrófilo en el área de estudio, en esta investigación se analizó si existe asociación entre la presencia de los morfotipos de CBS (definidos aquí como líquenes, musgos, cianobacterias y hepáticas) y diversas condiciones de microambiente. Asimismo, si existe una relación entre la cobertura de cada morfotipo y los microambientes, considerando la radiación solar y la humedad del suelo como variables ambientales que pueden tener un efecto en la presencia y cobertura de cada morfotipo.

Estos aspectos son analizados en los Capítulos I y II de esta tesis, el primero ha sido enviado para su publicación a la revista *Interciencia* y el segundo la *Journal of Arid Environments*.

La investigación se realizó en ecosistemas semiáridos de México en un área de matorral desértico micrófilo, en la región sur del Desierto Chihuahuense, en el noreste de México (Figura 1). El clima es BSok (x'): árido, templado, con una temperatura media entre 12°C y 18°C, una temperatura mensual máxima de 36.6°C en abril y una mínima de -4.9°C en enero (García, 1981; CONABIO, 2008; CNA, 2016). La precipitación promedio anual es de 429.1 mm, con máxima mensual en enero (318 mm) y mínima mensual en abril (72 mm) (CNA, 2016). El suelo es xerosol háplico y cálcico con fase física petrocálcica (INEGI, 1986) donde se presenta matorral desértico micrófilo (CONABIO, 2008), conformado por especies que toleran altas concentraciones de sales, destacando *Larrea tridentata* ((Moç. & Seseé ex DC.) Coville), *Rhus microphylla* (Engelm. ex A. Gray), *Condalia ericoides* ((A.Gray) M.C. Johnston), *Atriplex*

canescens ((Pursh) Nutt.), *Yucca filifera* (Chabaud), *Acacia constricta* (Benth.) *Fouquieria splendens* Engelm, *Flourensia cernua* DC., *Zinnia acerosa* DC., *Parthenium incanum* Kunth, *Jatropha dioica* Cerv. y *Koeberlinia spinosa* Zucc. (Estrada *et al.*, 2010; Granados-Sánchez *et al.*, 2011).

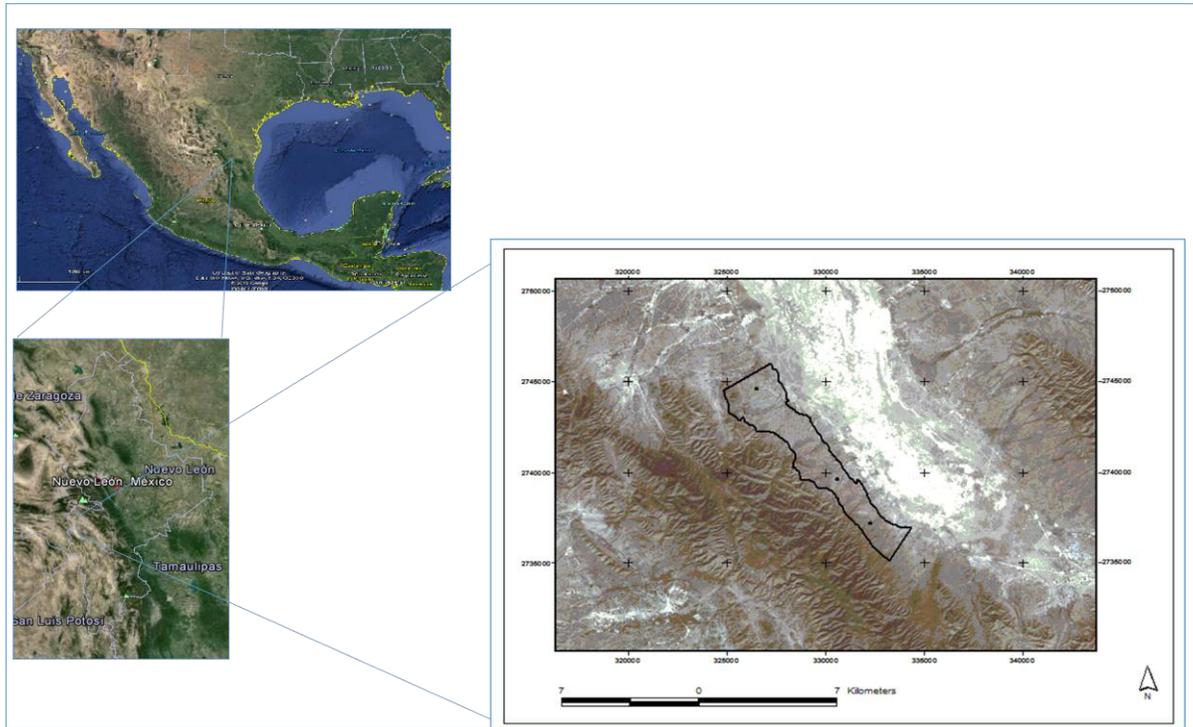


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

Otro aspecto relevante de las CBS y que no ha sido estudiado suficientemente está relacionado con el papel que éstas juegan en el ciclo de Carbono. El flujo de salida de CO₂ a la atmósfera, asociado a la respiración del suelo, es uno de los principales componentes del ciclo de Carbono de la Biosfera y constituye alrededor de las tres cuartas partes de la respiración del ecosistema (Law *et al.*, 2001). A pesar de ello, se tiene un conocimiento muy limitado aún de los factores que controlan la respiración del suelo, particularmente en los ecosistemas áridos y semiáridos, los cuales cubren alrededor del 40% de la superficie terrestre (Reynolds *et al.*, 2007) y, en ellos, la respiración del suelo es responsable de las mayores pérdidas de Carbono (Conant *et al.*, 2000).

La respiración del suelo se define como la producción de CO₂ y es el resultado de uno o varios de los siguientes procesos: la actividad metabólica para el crecimiento y mantenimiento de las raíces de las plantas vasculares y las micorrizas asociadas (Hanson *et al.*, 2000; Högberg *et al.*, 2001); la respiración heterótrofa de las comunidades microbianas del suelo que rompen u oxidan la materia orgánica rica en Carbono para utilizarlo como fuente de energía (Giardina *et al.*, 2004) o la respiración de los organismos que constituyen las costras biológicas del suelo. La tasa de producción de CO₂ es ecológicamente relevante porque nos da una indicación de la tasa de descomposición de la materia orgánica y, en general, de la cantidad de Carbono que se pierde del suelo. Las medidas de la respiración del suelo ayudan a determinar la contribución del suelo al balance del CO₂ en la atmósfera. Dado que la cantidad de Carbono almacenada en el suelo en los ecosistemas áridos es relativamente escasa (Lange, 2003), aún pequeños cambios en la respiración del suelo pueden tener un impacto considerable en el almacén de Carbono. De ahí que la contribución de las CBS en la respiración del suelo en dichos ecosistemas juega un papel clave como lo determinaron Cable y Huxman (2004) para el Desierto Sonorense en Estados Unidos.

El Capítulo III de esta tesis aborda precisamente este tema. En él se analiza el efecto que la CBS produce en el flujo de C o respiración del suelo, con base en un año de mediciones bimestrales, en 90 puntos aleatoriamente elegidos que comprendieron 4 microambientes: bajo planta con CBS, bajo planta sin CBS, área abierta con CBS y área abierta sin CBS. Además, se analizan las variaciones que presentó la respiración en función de la temperatura y humedad del suelo.

Las hipótesis probadas en esta investigación son: i) la cobertura de cada componente de la CBS difiere en función de encontrarse abajo o alejada de una especie vascular, la humedad del suelo y la cantidad de luz que recibe; ii) la CBS está asociada a las especies arbustivas, iii) la cobertura de todos los componentes o morfotipos de la CBS es mayor en los microambientes bajo

planta que en las áreas abiertas entre plantas; iv) los valores de respiración de suelo son más altos en las áreas cubiertas con CBS que sin ellas y más altos cuando la CBS se encuentra en áreas abiertas.

La exploración de estas hipótesis y los resultados encontrados aportan elementos que amplían el conocimiento sobre el papel que juegan las CBS en la estructura y función de los ecosistemas áridos y semiáridos.

CAPÍTULO I

EFFECTO DEL MICROSITIO EN LA COMPOSICIÓN DE COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN UN ÁREA DE MATORRAL MICRÓFILO DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE

Maritza Gutiérrez Gutiérrez, Marisela Pando-Moreno, Humberto González Rodríguez y Dinorah Mendoza Aguilar.

Enviado para publicación a la revista Interciencia. Recibido el 22 de abril de 2016.

EFFECTO DEL MICROSITIO EN LA COMPOSICIÓN DE COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN UN ÁREA DE MATORRAL MICRÓFILO DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE

Maritza Gutiérrez Gutiérrez, Marisela Pando-Moreno, Humberto González Rodríguez y Dinorah Mendoza Aguilar.

RESUMEN

Diversos estudios han analizado la asociación entre patrones espaciales de costras biológicas del suelo (CBS) y cobertura de plantas vasculares y las conclusiones no son siempre concordantes. Conocer la interacción entre CBS y plantas vasculares es crucial para entender la dinámica de ecosistemas áridos y semiáridos. La presente investigación se enfoca en conocer el efecto de la presencia de la especie vascular dominante (*Larrea tridentata*), radiación solar y humedad del suelo en la composición de las CBS. La hipótesis es que la composición de éstas difiere en función de estos tres factores. Se ubicaron 20 puntos al azar y, en cada uno, se definieron tres micrositos: bajo arbusto exposición este (BAE), bajo arbusto exposición oeste (BAO) y área fuera de la proyección de la copa (FA). Los morfotipos de CBS mostraron preferencias ante determinados micrositos. Líquenes y musgos mostraron mayor presencia en sitios bajo planta. La cobertura promedio de líquenes bajo *L. tridentata* fue más del doble de la cuantificada en las áreas desprovistas de cobertura vegetal. En promedio, los musgos cubrieron una superficie cuatro veces mayor bajo copas de *L. tridentata* que en áreas fuera de éstas. Las cianobacterias también mostraron mayor cobertura bajo copa, específicamente en exposición oeste (BAO). El hecho de que todos los morfotipos presenten menor cobertura en áreas abiertas (FA), a diferencia de lo reportado en otros trabajos, parece estar asociado a la menor radiación solar que reciben los micrositos bajo planta, si bien *L. tridentata* es una especie con cobertura foliar muy poco densa.

Palabras clave: líquenes; cianobacterias; musgos; asociación *L. tridentata*-CBS.

SUMMARY

Several studies have been devoted to analyze the association between spatial patterns of biological soil crusts (BSC) and coverage of higher plants and their conclusions are not always consistent. Knowing the interaction between BSC and vascular plants is crucial to understand the dynamics of the arid and semi-arid ecosystems. This research is aimed to know how the presence of the plant species *Larrea tridentata*, solar radiation and soil moisture influence the composition of the BSC. The hypothesis is that composition of BSC differs depending on these three factors. Three microsites were defined and simultaneously located at 20 random points: under shrub east exposition (BAE), under shrub west exposition, (BAO) and area out of the projection of the canopy (FA). Morphotypes of the analyzed BSC showed preferences to certain microsites. Lichens and mosses showed more presence in sites underneath the plant. Lichens cover was about twice under *L. tridentata* than in areas without plant cover. On average, mosses covered an area four times greater under the canopy of *L. tridentata* than in areas without plants. Cyanobacteria also showed greater coverage beneath the canopy, particularly in the west exposition (BAO). The fact that all analyzed morphotypes showed less coverage in open areas (FA), unlike the reported in other studies, seems to be associated to the lower solar radiation that microsites receive beneath the plants, though *L. tridentata* is a species with a very sparse leaf cover.

Keywords: lichens; cyanobacteria; mosses; *L. tridentata*-CBS partnership.

RESUMO

Diversos estudos têm analisado a associação entre os padrões especiais de crostas biológicas do solo (CBS) e a cobertura de plantas vasculares e as conclusões nem sempre são concordantes. Conhecer a interação entre CBS e plantas vasculares é crucial para entender a dinâmica de ecossistemas áridos e semiáridos. A presente investigação tem como foco conhecer os efeitos da espécie vascular dominante (*Larrea tridentata*), da radiação solar e da umidade do solo na composição das CBS. A hipótese é de que a composição destas difere em função destes três fatores. Foram definidos três microssítios: sob o arbusto exposição leste, sob o arbusto exposição oeste e na área fora da projeção da copa, em 20 pontos aleatórios. Os morfótipos de CBS mostraram preferências nas condições de microssítios analisados. Líquens e Musgos mostraram maior presença em sítios sob a planta. A cobertura média de líquens sob *L. tridentata* foi mais que o dobro da quantificada nas áreas desprovidas de cobertura vegetal. Em média, os Musgos cobriram uma superfície quatro vezes maior abaixo das copas de *L. tridentata* que em áreas fora destas. As Cianobactérias também mostraram maior cobertura abaixo da copa, especificamente na exposição oeste. O fato de que todos os morfótipos tiveram menor cobertura em áreas abertas, diferente do reportado em outros trabalhos, parece estar associado à menor radiação solar que recebem os microssítios sob a planta, mesmo sendo uma espécie com cobertura foliar pouco densa.

Palavras-chave: líquenes; cianobactérias; musgos; *L. tridentata*-CBS associação.

INTRODUCCIÓN

Las comunidades de costras biológicas del suelo (CBS) se localizan en diversos hábitats alrededor del mundo especialmente en zonas áridas y semiáridas (Belnap y Lange, 2001); aunque también es posible encontrarlas en áreas edáficamente secas de zonas templadas (Langhans *et al.*, 2009). Estas comunidades, constituidas por partículas de suelo en asociación con cianobacterias, algas verdes, líquenes, hongos y briofitas, presentan cualidades fisiológicas tales como la resistencia a la desecación y la suspensión temporal de la respiración con lo cual logran desarrollarse en ambientes con fuertes limitaciones hídricas (Belnap *et al.*, 2001).

Las costras biológicas del suelo están compuestas por organismos de vida extremadamente larga, por lo que pueden proveer servicios ecosistémicos continuos (Castillo-Monroy y Maestre, 2011). Las CBS proveen estructura al suelo (Richer *et al.*, 2012), contribuyen al balance hídrico, control de erosión y al ciclo de nutrientes (Castillo-Monroy y Maestre, 2011). Además, la presencia de líquenes en las costras mejora la resistencia del suelo a la erosión e incrementa su capacidad de retención de agua (Abed *et al.*, 2013). Las comunidades de CBS han sido consideradas como indicadores ambientales a largo plazo (Belnap *et al.*, 2001).

Los principales componentes de las CBS son organismos fotosintéticos, debido a esto algunos autores especulan que la relación entre la cobertura de costras y plantas vasculares es inversamente proporcional (Belnap *et al.*, 2001). Investigaciones llevadas a cabo en pastizales de Australia muestran que la cobertura y la riqueza de especies de costras fue mayor en los micrositios sin vegetación, ya sea por pastoreo o cultivo, que en los sitios con vegetación (Eldridge *et al.*, 2000a). Específicamente en el caso de los líquenes componentes de las CBS, algunos estudios señalan que estos están en desventaja competitiva con respecto a la vegetación vascular (Ochoa-Hueso *et al.*, 2011; Concostrina-Zubiri *et al.*, 2014).

Las CBS dominadas por musgos suelen ser abundantes en los microambientes mas húmedos de los ecosistemas áridos y semiáridos como es bajo la copa de los macollos de *Stipa tenacissima* en el centro y sureste de España (Maestre *et al.*, 2001). Asimismo, se ha reportado que áreas abiertas con dominancia de CBS presentan mayor cobertura de cianobacterias y líquenes y menor cobertura de musgos, en comparación con los micrositios de suelo desnudo con baja cobertura de costras y el micrositio bajo planta (Mendoza-Aguilar *et al.*, 2014).

En los últimos años se ha incrementado el número de estudios sobre la ecología de las comunidades de CBS en países como Estados Unidos (Belnap, 2002; Housman *et al.*, 2006; Pietrasia *et al.*, 2013), Australia (Eldridge *et al.*, 2000a; Read *et al.*, 2008), Israel (Eldridge *et al.*, 2000b; Yair, 2003), China (Xu *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2010) y España (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2010; Mendoza-Aguilar *et al.*, 2014). Sin embargo aún se requiere ampliar este tipo de investigaciones, particularmente en países donde su estudio aún es incipiente como es el caso de México, para alcanzar una comprensión más completa del papel ecológico de estos organismos (Castillo-Monroy y Maestre, 2011; Concostrina-Zubiri *et al.*, 2013).

La presente investigación se enfoca en conocer si existe una asociación entre tipos de CBS y condiciones de micrositio. Se analiza la presencia y cobertura a nivel de morfotipo de CBS, su ubicación con respecto a la especie vascular dominante, la humedad del suelo y la cantidad de luz que reciben. La *hipótesis* de este trabajo es que existe una asociación entre los micrositios de estudio y los morfotipos de costras biológicas de suelo.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El presente trabajo se llevó a cabo en una superficie de matorral desértico micrófilo (24° 47' 10.94'' N; 100° 41' 54.39'' O; a 1900 m) en los límites del Área Natural Protegida (ANP) Llano La Soledad, en la región sur del Desierto Chihuahuense, en el noreste de México. El área de estudio forma parte de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y limita al oriente con la Llanura Costera del Golfo Norte y con la Gran Llanura de Norteamérica (INEGI, 1986). Esta zona corresponde al reino florístico Neotropical de la región xerofítica mexicana dentro de la provincia de la altiplanicie (Rzedowski, 1978).

El ANP Llano La Soledad forma parte de lo que se considera un importante corredor para aves migratorias y residentes como el águila real (*Aquila chrysaetos* Linnaeus) y la lechuza llanera (*Athene cunicularia* Molina). Además, existen poblaciones de tejón (*Taxidea taxus* Baird) y zorra del desierto (*Vulpes velox* Say) como especies clave (CONABIO, 2008), destacando la presencia de colonias de perrito llanero (*Cynomys mexicanus* Merriam), especie endémica catalogada como en peligro de extinción según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF, 2010).

El clima del área corresponde al tipo BSok (x'): árido, templado, con una temperatura media entre 12°C y 18°C, una temperatura mensual máxima de 36.6°C en abril y una mínima de -4.9°C en enero (García, 1981; CONABIO, 2008; CNA, 2016). La precipitación promedio anual es de 429.1 mm, con máxima mensual en enero (318 mm) y mínima mensual en abril (72 mm) (CNA, 2016).

El suelo es de tipo xerosol háplico y cálcico con fase física petrocálcica. Estos suelos sustentan una vegetación de pastizales halófilos, resistentes a las altas concentraciones de yeso (INEGI, 1986) y matorrales desérticos micrófilos, caracterizados por vegetación arbustiva de hojas pequeñas, generalmente en zonas aluviales (CONABIO, 2008).

El matorral desértico micrófilo, ubicado en las partes planas, está conformado por especies que toleran altas concentraciones de sales, destacando *Larrea tridentata* ((Moç. & Seseé ex DC.) Coville), *Rhus microphylla* (Engelm. ex A. Gray), *Condalia ericoides* ((A.Gray) M.C. Johnston), *Atriplex canescens* ((Pursh) Nutt.), *Yucca filifera* (Chabaud) y *Acacia constricta* (Benth.) (Estrada *et al.*, 2010).

Método

La morfología de los componentes de las CBS ha sido utilizada en numerosos trabajos como criterio para clasificar a los distintos tipos de éstas (Eldridge y Rosentreter 1999). En la presente investigación se establecieron las siguientes categorías: liquen, musgo, cianobacteria y hepática, mencionadas aquí como morfotipos.

Se definieron tres micrositios para comparar la cobertura de CBS por morfotipo: bajo arbusto exposición este (BAE), bajo arbusto exposición oeste (BAO) y en el área fuera de la proyección de la copa del arbusto (FA). Se ubicaron 20 puntos al azar los cuales consisten en individuos pertenecientes a la especie arbustiva dominante del área de estudio (*Larrea tridentata*). Se colectó un total de 240 muestras durante los meses de mayo a agosto de 2014. En cada punto de muestreo se tomaron muestras al azar de CBS: 3 muestras en los micrositios bajo planta exposición E, 3 en micrositios bajo planta exposición O y 6 muestras en el micrositio FA. Estas últimas fueron colectadas a una distancia menor a 1.0 m del límite de la proyección de la copa del arbusto muestreado para evitar variabilidad en cuanto a condiciones edáficas (Bowker *et al.*, 2006).

Los muestreos se realizaron humedeciendo la costra con agua destilada para posteriormente, con ayuda de cajas Petri de 9 cm de diámetro y una espátula, extraer la costra hasta 1 cm de profundidad. La cobertura de las CBS en las muestras recolectadas se cuantificó visualmente en laboratorio utilizando una plantilla subdividida en radiales para una mejor aproximación en la estimación del área cubierta por cada tipo de CBS. Además se llevó a cabo la identificación de las mismas haciendo uso de estereoscopio, microscopio compuesto, claves

y guías de identificación correspondientes (Brodo *et al.*, 2001; Barreno y Pérez-Ortega, 2003; Rosentreter *et al.*, 2007; Richer *et al.*, 2012). También se colectaron muestras de suelo para la determinación de humedad por el método gravimétrico y se tomaron datos de intensidad de radiación solar utilizando un luxómetro (Extech Instruments) para cada micrositio (BAE, BAO y FA), en cada punto de muestreo. Los datos de humedad del suelo y radiación solar fueron tomados a diferentes horas del día, dado el tiempo que implica recorrer el área de estudio; sin embargo, se tuvo cuidado de tomarlos con la menor diferencia de tiempo posible entre los tres micrositios de cada punto de muestreo. De ahí que estos valores fueron comparados mediante pruebas de t pareada o su equivalente no paramétrica.

Los datos de cobertura para los diferentes morfotipos de CBS, así como los datos de humedad y radiación solar de los tres micrositios fueron analizados para normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y mediante el estadístico de Levene para corroborar homocedasticidad (Dytham, 2011).

La cobertura de morfotipos de CBS entre micrositios se comparó mediante la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, seguida de la prueba U de Mann-Whitney; para la variable humedad del suelo se llevó a cabo la prueba de t pareada y para radiación solar la prueba no paramétrica de Wilcoxon's (Dytham, 2011). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa SPSS® Statistics versión 19.

Se obtuvieron las frecuencias relativas para los morfotipos formadores de CBS dadas por el cociente entre la frecuencia absoluta y el número total de puntos para cada condición de micrositio.

RESULTADOS

La cobertura de CBS mostró diferencias significativas entre micrositios para los morfotipos líquen ($P=0.0001$), cianobacteria ($P=0.050$) y musgo ($P=0.0002$). Las hepáticas no fueron consideradas para el análisis debido a que su cobertura promedio fue inferior a 0.4% en los tres micrositios.

Los micrositios bajo arbusto (BAE y BAO) mostraron las mismas coberturas entre sí para los tres morfotipos de CBS: líquen, cianobacteria y musgo ($P=0.194$; 0.490 y 0.379 , respectivamente). Las diferencias se presentaron entre los micrositios BAE y FA así como BAO y FA, siendo menores en el micrositio FA para todos los morfotipos (Figura 1).

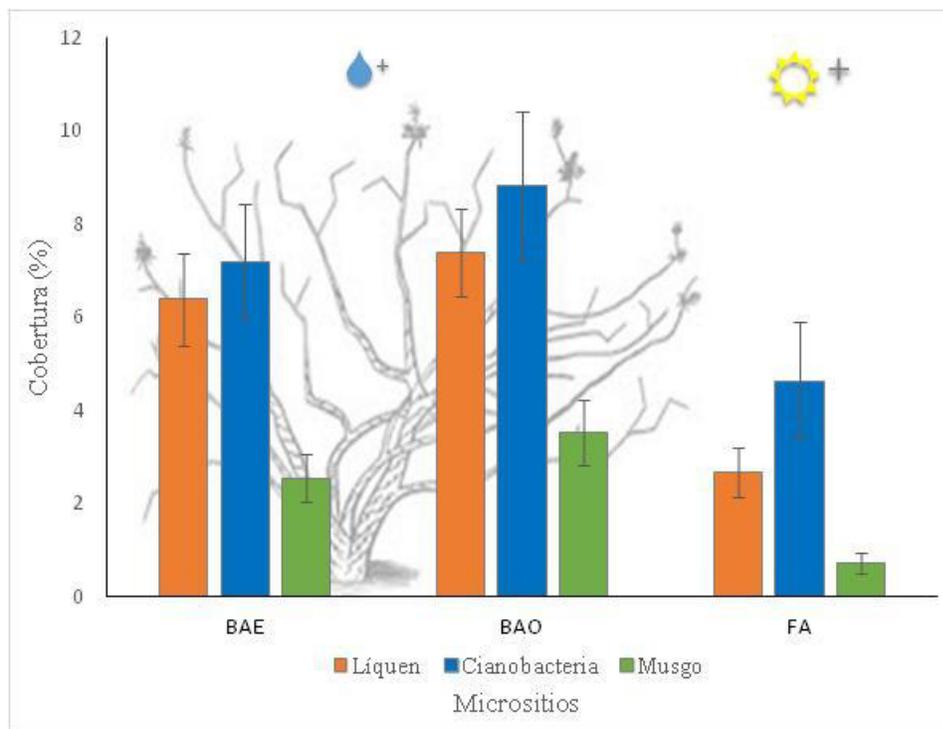


Figura 1: Coberturas por morfotipo de CBS para cada micrositio. Se indican los micrositios con mayor humedad (♂⁺), así como el micrositio con mayor radiación solar (☀⁺). Los valores graficados representan la media ($n=20$) \pm error estándar.

Los líquenes en áreas abiertas (FA) presentaron una cobertura promedio de 2.67%, siendo este micrositio el que presentó la menor cobertura. No se detectaron diferencias entre la cobertura en áreas con exposición este y oeste bajo planta (BAE=6.38% y BAO=7.38%). La cobertura promedio de cianobacterias fue mayor en el micrositio bajo planta exposición oeste (BAO) que en las áreas abiertas (FA) con 8.81% y 4.63%, respectivamente. Entre los micrositios bajo planta no se presentaron diferencias (BAE=7.19% y BAO=8.81%). Los musgos presentaron una cobertura promedio de 0.72% en áreas abiertas, siendo éste el micrositio con menor cobertura para este morfotipo. Entre las exposiciones este y oeste bajo planta (BAE=2.55% y BAO=3.53) no se observaron diferencias (Tablas I y II).

Tabla I. Relaciones entre los micrositios y las coberturas de CBS, resultados de la prueba U de Mann-Whitney.

Micrositios	Morfotipos			Humedad del suelo (%)	Radiación solar (Lux)
	Liquen	Cianobacteria	Musgo		
BAE – FA	0.001*	0.062	0.001*	0.035*	0.001*
BAE – BAO	0.194	0.49	0.379	0.806	0.502
BAO – FA	0.0002*	0.026*	0.0002*	0.084	0.002*

(*) *Diferencias significativas entre los micrositios indicados.*

Tabla II. Cobertura promedio en porcentaje ($n=20 \pm$ error estandar) de CBS por morfotipo para cada micrositio.

Micrositios	Morfotipos		
	Liquen	Cianobacteria	Musgo
BAE	6.38 \pm 0.99	7.19 \pm 1.23	2.55 \pm 0.50
BAO	7.38 \pm 0.93	8.81 \pm 1.61	3.53 \pm 0.69
FA	2.67 \pm 0.52	4.63 \pm 1.26	0.72 \pm 0.21

Los resultados de humedad del suelo y radiación solar (Tabla III) permitieron explicar parcialmente las diferencias en cobertura de las CBS entre micrositios. La humedad resultó mayor en el micrositio bajo planta exposición este que en las áreas abiertas ($P=0.035$) (Tabla I). Entre los micrositios bajo planta (BAE y BAO) no se presentan diferencias para dicho factor abiótico ($P=0.806$). Sin embargo, la humedad del suelo fue similar en el suelo de los micrositios bajo planta exposición oeste y en las áreas abiertas ($P=0.84$).

Tabla III. Valores promedio ($n=20$) \pm error estándar de humedad del suelo (%) y radiación solar (lux) para cada micrositio.

Micrositios	Humedad del suelo (%)	Radiación solar (Lux)
BAE	6.27 ± 0.45	28310 ± 4253
BAO	6.44 ± 0.59	29975 ± 4483
FA	5.29 ± 0.45	42675 ± 6168

La variable radiación solar fue mayor en las áreas abiertas ($P=0.001$) que en los micrositios bajo planta (Tabla I). No se presentaron diferencias entre los micrositios bajo planta (BAE y BAO, $P=0.502$) para dicha variable (Tabla I).

Los morfotipos liquen y cianobacteria presentan frecuencias del 100% para los tres micrositios considerados. Las hepáticas presentan una mayor frecuencia en el micrositio BAO (25%), mientras que para los micrositios BAE y FA la frecuencia es de 15%. El morfotipo musgo se presenta en un 100% de los puntos para los micrositios BAE y BAO mientras que para el micrositio FA se presenta en un 70%.

DISCUSIÓN

Los morfotipos de CBS muestran preferencias ante las condiciones de los micrositos que se analizaron (BAE, BAO y FA). La cobertura de líquenes, musgos y cianobacterias fue mayor en los micrositos bajo planta que en las áreas abiertas. La cobertura promedio de los líquenes bajo la proyección de la copa de *Larrea tridentata* resultó ser más del doble de la cuantificada en las áreas de suelo desprovisto de cobertura vegetal (2.6 veces mayor). Estos resultados concuerdan con las observaciones de Maestre y Cortina (2002) quienes encontraron una asociación positiva entre los patrones espaciales de CBS compuestas de líquenes y cianobacterias y los patrones de cobertura de *Stipa tenacissima*, especie de planta vascular dominante, en una zona semi-árida al sur este de España.

De igual manera, los resultados de la presente investigación concuerdan con otro estudio en el que se reporta menor cobertura de musgos para áreas abiertas en comparación con micrositos bajo planta (Mendoza-Aguilar *et al.*, 2014). Sin embargo, en el mismo estudio reportan mayores coberturas de cianobacterias y líquenes en áreas abiertas que bajo planta, contrario a lo encontrado en esta investigación y mencionan que esto puede deberse, al menos parcialmente, a que los líquenes encontrados dificultan el enraizamiento de las plantulas vasculares investigadas. Otros estudios señalan que los líquenes están en desventaja competitiva con respecto a la vegetación vascular (Ochoa-Hueso *et al.*, 2011; Concostrina-Zubiri *et al.*, 2014).

En promedio, los musgos cubrieron una superficie cuatro veces mayor bajo las copas de *Larrea tridentata* que en áreas fuera de éstas. Esto concuerda con lo reportado en estudios llevados a cabo en el centro y sureste de España donde las CBS dominadas por musgos resultaron ser más abundantes en microambientes húmedos como lo es bajo la copa de los macollos de *Stipa tenacissima* (Maestre *et al.*, 2001; Castillo-Monroy *et al.*, 2010).

Las cianobacterias también mostraron una mayor cobertura bajo la proyección de la copa. La cobertura promedio en el micrositio BAO fue aproximadamente el doble que la cuantificada para áreas fuera de la proyección de la copa.

El micrositio más húmedo fue bajo planta exposición este (BAE). Sin embargo, como no se detectaron diferencias en la humedad del suelo entre la exposición oeste (BAO) y fuera del arbusto (FA) no se puede inferir que las mayores coberturas encontradas en los micrositos bajo planta se deban únicamente al factor humedad.

En lo que respecta a la radiación solar, ésta fue mayor en las áreas abiertas, que en los micrositos bajo la proyección de la copa (BAE y BAO). Entre la humedad y radiación solar, probablemente sea esta última la que tiene un papel determinante en el establecimiento y proliferación de los morfotipos de costra biológica de suelo.

Es probable que las coberturas de los tres morfotipos de costras biológicas de suelo (liquen, cianobacteria y musgo) hayan respondido a un factor de radiación solar moderado, al cubrir superficies mayores en los micrositos bajo planta (BAE y BAO). Los resultados del presente estudio difieren de otras investigaciones las cuales reportan que las CBS presentan mayor cobertura en los micrositos sin vegetación que en aquellos con mayor cobertura vegetal (Eldridge *et al.*, 2000a) ya que éstas y las plantas vasculares poseen relaciones inversamente proporcionales en relación a su cobertura (Belnap *et al.*, 2001).

Las frecuencias de los morfotipos de mayores coberturas (liquen, cianobacteria y musgo) también expresan una mayor ocurrencia en los micrositos bajo planta (BAE y BAO), en comparación con áreas abiertas (FA).

CONCLUSIÓN

La especie vascular dominante en el área de estudio *Larrea tridentata* parece estar asociada positivamente a las CBS dominadas por liquen y musgo. Para el morfotipo cianobacteria esta asociación positiva se presenta específicamente con el micrositio bajo planta exposición oeste (BAO). Estos resultados refutarían la idea generalizada de que las CBS y las plantas vasculares poseen relaciones inversamente proporcionales en relación a su cobertura.

La cantidad de luz recibida es el factor que mayor influencia mostró en la presencia y cobertura de los morfotipos de CBS dominantes en el área de estudio. La cantidad de luz difirió entre los micrositios bajo arbusto y fuera del arbusto, correspondiendo con las diferencias en coberturas de CBS. Tres de los morfotipos de CBS (liquen, cianobacteria y musgo) muestran mayor presencia y cobertura si crecen bajo la proyección de la copa de *Larrea tridentata* que en áreas abiertas.

CAPÍTULO II

ASSOCIATION OF VASCULAR PLANTS AND BIOLOGICAL SOIL CRUSTS IN THE CHIHUAHUAN DESERT

Maritza Gutiérrez Gutiérrez, Marisela Pando-Moreno, Enrique Jurado, Humberto
González Rodríguez, José Guadalupe Marmolejo Moncivais, Dinorah O.
Mendoza Aguilar.

Este capítulo no se incluye en el presente documento para evitar conflictos de
derecho de autor, ya que fue enviado para su publicación al *Journal of Arid
Environments*.

CAPÍTULO III

INFLUENCIA DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN EL FLUJO DE CO₂ EN EL MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO DEL ALTIPLANO MEXICANO

Maritza Gutiérrez Gutiérrez, Marisela Pando-Moreno, Enrique Jurado, Humberto
González Rodríguez, Jordi Cortina Segarra.

INFLUENCIA DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN EL FLUJO DE CO₂ EN EL MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO DEL ALTIPLANO MEXICANO

Maritza Gutiérrez Gutiérrez, Marisela Pando-Moreno, Enrique Jurado, Humberto González Rodríguez, Jordi Cortina Segarra.

INTRODUCCIÓN

El componente orgánico del suelo está formado por mezclas heterogéneas y complejas de compuestos y sustancias orgánicas que tienen en común su dinámica y transformación constante (Chavarriga *et al.*, 2011). La materia orgánica es uno de los componentes más importantes del suelo que determina en gran medida su calidad (Nelson y Sommers, 1996; Rees *et al.*, 2001; Carter, 2002; Juárez *et al.*, 2006). El carbono orgánico del suelo (COS) proviene de la descomposición de la biomasa originada a partir del CO₂ atmosférico mediante transformación fotosintética (De la Rosa, 2008); tiene influencia en la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo vinculadas con su calidad e influye en las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento sostenido y la capacidad productiva del suelo (Carter, 2002; Sánchez *et al.*, 2004; Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011). Además, al modificar la acidez y la alcalinidad hacia valores cercanos a la neutralidad, aumenta la solubilidad de varios nutrientes (Martínez *et al.*, 2008). El flujo de CO₂ del suelo (respiración del suelo) es un componente importante en el ciclo del carbono (C) y representa alrededor de tres cuartas partes de la respiración total del ecosistema (Law *et al.*, 2001). Los flujos entre el COS y la atmósfera pueden ser positivos mientras captura CO₂ o negativos por emisión de éste (FAO, 2001). El CO₂ emitido del suelo a la atmósfera se produce por la mineralización de la materia orgánica por la fauna edáfica y microorganismos del suelo, además del metabolismo de las raíces de las plantas (Fortin *et al.*, 1996; Borie *et al.*, 1999). Las costras biológicas del suelo (CBS), constituidas por partículas de suelo en asociación con cianobacterias, algas verdes, líquenes, hongos y briofitas (Belnap *et al.*,

2001), contribuyen al flujo del CO₂. Fijan el C atmosférico mediante la fotosíntesis y lo liberan mediante la respiración (Belnap y Lange, 2001). Dichas comunidades se localizan en diversos hábitats alrededor del mundo especialmente en zonas áridas y semiáridas (Belnap y Lange, 2001) aunque también es posible encontrarlas en áreas edáficamente secas de zonas templadas (Langhans *et al.*, 2009). Proveen estructura al suelo (Richer *et al.*, 2012), contribuyen al balance hídrico, control de erosión y al ciclo de nutrientes (Castillo-Monroy y Maestre, 2011).

La participación de las CBS en el ciclo del Carbono ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones. Estudios en bosques semiáridos de New South Wales (NSW) de Australia mostraron niveles más altos de carbono orgánico bajo CBS en comparación con suelos sin CBS (Eldridge y Greene, 1994). Las CBS activan el intercambio de gases en presencia de humedad (Belnap y Lange, 2001). Un estudio llevado a cabo en el desierto del Kalahari relacionó el flujo de CO₂ con la humedad. Los resultados mostraron un aumento en la toma de CO₂, mediante la fotosíntesis de cianobacterias, al humedecer éstas durante la estación seca. La respiración, en cambio, fue positiva independientemente del tipo de cobertura o de la humedad añadida, durante la estación húmeda (Thomas *et al.*, 2008). Estudios en España mostraron una relación positiva entre la cobertura total de CBS y la respiración del suelo (Maestre *et al.*, 2005). Otra investigación en la región semiárida del mismo país reporta que las tasas de respiración entre los micrositios dominados por CBS no tuvieron diferencias, pero sí refiere que los valores fueron mayores que en áreas de suelo desnudo y menores que en los micrositios dominados por plantas sin CBS. Resaltan además, que las áreas dominadas por CBS contribuyen en mayor medida al carbono total liberado a través de la respiración (42%) tanto en la estación húmeda como en la estación seca. Mediante el uso de un modelo se estimaron tasas de respiración de 240.4–322.6 g C m⁻² y⁻¹ (Castillo-Monroy *et al.*, 2011). El mismo estudio reporta una relación exponencial positiva entre la temperatura y las tasas de respiración, cuando la humedad del suelo es mayor a 11%. En el desierto de Sonora se ha encontrado evidencia de activación en la respiración

de las CBS antes que en raíces de plantas y microorganismos del suelo al presentarse pequeños pulsos de precipitación (Cable y Huxman, 2004). El flujo de CO₂ en áreas con CBS formada por liquen depende de la especie de liquen implicada, de su estado interno y de las condiciones ambientales (NASH III, 2008). Debido al importante rol que desempeñan las CBS en los ecosistemas es preciso ampliar el conocimiento de las mismas a través de la investigación, para conseguir un mayor entendimiento del papel ecológico que estos organismos juegan en el ecosistema (Castillo-Monroy y Maestre, 2011; Concostrina-Zubiri *et al.*, 2013).

HIPÓTESIS

- La respiración del suelo en el ecosistema de estudio, es mayor en los microambientes con CBS que en los microambientes sin la presencia de éstas.
- La respiración del suelo en el área de estudio, es mayor en los microambientes bajo planta que en suelo desnudo.
- Existe una relación entre la temperatura del suelo y su tasa de respiración.

OBJETIVOS

- Comparar valores de respiración entre microambientes con CBS y sin costra.
- Evaluar la contribución anual de Carbono liberado por la respiración del suelo por las áreas dominadas por CBS a nivel ecosistema.
- Analizar la relación entre tasa de respiración y temperatura del suelo en presencia y ausencia de costra biológica de suelo.
- Analizar la relación entre tasa de respiración y temperatura del suelo para cada condición de microambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Esta investigación se llevó a cabo en una superficie de matorral desértico micrófilo (24° 47' 10.94'' N; 100° 41' 54.39'' O; a 1900 m) en los límites del Área Natural Protegida (ANP) Llano La Soledad, en la región sur del Desierto Chihuahuense, en el noreste de México. El área de estudio forma parte de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y limita al oriente con la Llanura Costera del Golfo Norte y con la Gran Llanura de Norteamérica (INEGI, 1986). Esta zona corresponde al reino florístico Neotropical de la región xerofítica mexicana dentro de la provincia de la altiplanicie (Rzedowski, 1978). El ANP Llano La Soledad forma parte de lo que se considera un importante corredor para aves migratorias y residentes como el águila real (*Aquila chrysaetos* Linnaeus) y la lechuza llanera (*Athene cunicularia* Molina). Además, existen poblaciones de tejón (*Taxidea taxus* Baird) y zorra del desierto (*Vulpes velox* Say) como especies clave (CONABIO, 2008), destacando la presencia de colonias de perrito llanero (*Cynomys mexicanus* Merriam), especie endémica catalogada en peligro de extinción según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF, 2010).

El clima corresponde al tipo BSok (x'): árido, templado, con una temperatura media de 15°C, una temperatura mensual máxima de 36.6°C en abril y una mínima de -4.9°C en enero (García, 1981; CONABIO, 2008; CNA, 2016). La precipitación promedio anual es de 429.1 mm, con máxima mensual en enero (318 mm) y mínima mensual en abril (72 mm) (CNA, 2016). El suelo es de tipo xerosol háplico y cálcico con fase física petrocálcica. Estos suelos sustentan una vegetación de pastizales halófilos, resistentes a las altas concentraciones de yeso (INEGI, 1986) y matorrales desérticos micrófilos, caracterizados por vegetación arbustiva de hojas pequeñas, generalmente en zonas aluviales (CONABIO, 2008). El matorral desértico micrófilo, ubicado en las partes planas o en áreas con pendientes suaves, está conformado por especies que toleran altas concentraciones de sales, destacando *Larrea tridentata* ((Moç. & Seseé ex

DC.) Coville), *Parthenium incanum* Kunth, *Jatropha dioica* Cerv., *Koeberlinia spinosa* Zucc. y algunos arbustos espinosos (Granados-Sánchez *et al.*, 2011).

Método

En un análisis de vegetación previo, se determinó que las especies vasculares dominantes en el área de estudio son: *Larrea tridentata* (Sessé & Moc. ex DC.) Coville y *Parthenium incanum* Kunth., con frecuencias relativas de 13% y 9% respectivamente. Para evaluar la respiración del suelo fueron seleccionadas cuatro condiciones de microambiente: área abierta sin CBS o con una cobertura menor al 5% (Aa), área abierta con un 40-50% de cobertura de CBS (AaC), bajo planta sin CBS (Bp) y bajo planta con CBS (BpC). Los microambientes bajo planta se ubicaron bajo las dos especies dominantes antes mencionadas. Se establecieron 15 puntos al azar para cada condición de microambiente área abierta (Aa y AaC) y 30 puntos para cada condición de microambiente bajo planta (Bp y BpC). Un mes previo a iniciar las mediciones se colocaron un total de 90 anillos de PVC con un diámetro de 10.5cm y una altura de 7cm, los cuales se georeferenciaron como puntos fijos (Castillo-Monroy *et al.*, 2011). El uso de anillos de PVC insertados en el suelo, de forma permanente, evita lecturas erróneas a causa de la alteración del suelo durante la instalación del equipo en cada lectura (Figura 1).

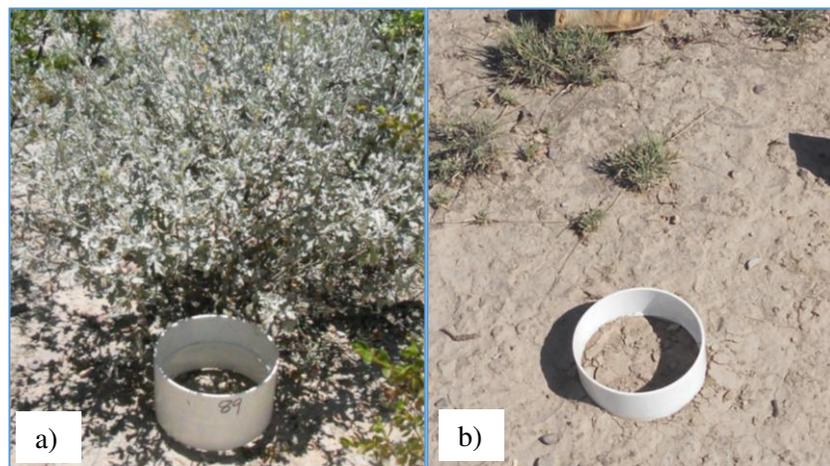


Figura 1. Instalación de anillos de PVC en los puntos de muestreo fijos para cada microambiente; a) bajo planta (Parthenium incanum), b) área abierta.

Los registros de respiración del suelo se realizaron bimestralmente, entre las 11:00 y las 13:00 horas, durante un año (2015-2016). Se considera que en este rango de horas, los valores de respiración del suelo detectados, son representativos de los valores diarios promedio en pastizales semiáridos (Mielnick y Dugas, 2000; Frank *et al.*, 2002; Maestre y Cortina, 2003) y los flujos anuales estimados proporcionan una buena aproximación sin un sesgo o sobreestimación muy alta (Castillo-Monroy *et al.*, 2011). La respiración del suelo se midió *in situ* con un equipo portátil EGM-4 (Environmental® PP-Systems, Hitchin, UK) (Figura 2) junto con una cámara de respiración de suelo SRC-1 (Environmental® PP-Systems, Hitchin, UK), la mitad de las muestras en un día y la otra mitad al día siguiente. El equipo de medición consiste en una cámara cerrada con sistema IRGA (Infra-red Gas Analyzer, por sus siglas en inglés), donde el aire circula a lo largo de un circuito entre la cámara y el IRGA externo. La cámara es cilíndrica con unas dimensiones de 15 cm de alto por 10 cm. de diámetro equipada con un ventilador para mezclar el aire. El sistema IRGA cuenta con un haz de luz infrarroja que incide sobre la muestra de aire dentro de la cámara. Debido a que el CO₂ tiene una absorción muy fuerte en el infrarrojo, los IRGA's reaccionan a esa longitud de onda o banda espectral. Dependiendo de dicha absorción, la radiación que llega al sensor decrece y se puede conocer qué cantidad de moléculas de CO₂ existe en la muestra de aire (Anónimo, 2010). Adicionalmente a las medidas de respiración, se obtuvieron medidas de temperatura del suelo a través del diodo incluido en el equipo antes mencionado y se colectaron muestras de suelo para estimar la humedad por el método gravimétrico.



Figura 2. Equipo portátil EGM-4 (Environmental® PP-Systems, Hitchin, UK).

Los datos de respiración y temperatura del suelo fueron analizados para detectar normalidad mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov y mediante el estadístico de Levene para corroborar homocedasticidad (Dytham, 2011). Para determinar si la respiración del suelo varía en función de la presencia de CBS, o bien debido a los microambientes considerados, se empleó (para ambos casos) la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, seguida de la prueba U de Mann-Whitney. La relación entre las variables temperatura y tasa de respiración de suelo se evaluó utilizando para ello un análisis de regresión lineal (Dytham, 2011). Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el programa SPSS® Statistics versión 19.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar los valores de respiración del suelo con relación a la presencia / ausencia de CBS los resultados confirman que existe una diferencia ($\chi^2=12.41$, $gl=1$, $p=0.001$) entre dichas condiciones, siendo mayor la tasa de respiración cuando el suelo está cubierto por CBS ($0.518\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hora}^{-1} \pm 0.027$) que cuando el suelo está desprovisto de ésta ($0.391\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hora}^{-1} \pm 0.020$). Lo anterior confirma la primera hipótesis planteada. Estos resultados coinciden con investigaciones llevadas a cabo en España en los que se relaciona de manera positiva la respiración del suelo con la cobertura de CBS (Maestre *et al.*, 2005; Castillo-Monroy *et al.*, 2011).

La tasa de respiración de suelo fue diferente ($\chi^2=13.82$, $gl=3$, $p=0.003$) al considerar los cuatro microambientes (Aa, AaC, Bp y BpC). Al comparar Aa y AaC la tasa de respiración de suelo fue mayor para AaC ($p=0.006$); entre los microambientes Aa y Bp no hubo diferencias ($p=0.265$); BpC fue mayor que Aa ($p=0.002$); en tanto que área abierta con CBS fue mayor que el microambiente Bp ($p=0.045$); para AaC y BpC no se muestran diferencias ($p=0.724$); y comparando el microambiente bajo planta sin CBS y bajo planta con CBS la respiración fue mayor en éste último ($p=0.020$). Considerando lo anterior se puede mencionar que los microambientes de área abierta con CBS (AaC) y bajo planta con CBS (BpC) fueron los que presentaron mayores tasas de respiración de suelo cuando se compararon con los microambientes carentes de CBS (Aa y Bp) (Tabla 1; Figura 3). Los resultados respaldan la hipótesis establecida al inicio de la investigación, en la que se enuncia que la respiración del suelo en el ecosistema de estudio, es mayor en los microambientes con CBS que en los microambientes sin la presencia de éstas. Sin embargo, no sustentan la hipótesis que plantea una mayor respiración de suelo en los microambientes bajo planta que en suelo desnudo, ya que los microambientes bajo planta resultaron con una mayor tasa de respiración que las áreas abiertas sólo en la comparación entre BpC y Aa y no en los entre Aa y Bp, AaC y Bp o AaC y BpC. Similar a lo reportado para una región semiárida de España por Castillo-Monroy

y colaboradores (2011) donde informan que no hay diferencias entre las tasas de respiración para los micrositios dominados por CBS, pero sí mencionan que los valores fueron mayores en dichos micrositios que en áreas de suelo desnudo. También reportan diferencias en respiración de suelo entre micrositios bajo planta y CBS, diferencia que en el presente estudio no se evidencia.

La tasa de respiración promedio para los microambientes considerados fue de $0.455 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$, con lo que se calcula una tasa de $166.075 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, equivalente a $44.84 \text{ g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ para el ecosistema investigado. Dicha tasa es menor a la reportada para un área semiárida al sur de Madrid, España, donde a través de un modelo estimaron tasas de respiración de $240.4\text{--}322.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ (Castillo-Monroy *et al.*, 2011). Cabe mencionar que el citado estudio, además de mencionar otras especies de organismos formadores de CBS, también reporta que las coberturas que éstas tienen en el suelo son mayores a lo presentado en el área de estudio de la presente investigación.

Tabla 1. Respiración del suelo (promedio \pm error estándar) para cada microambientes.

Microambientes	N	Respiración de suelo ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}$)
Área abierta sin CBS (Aa)	75	0.356 ± 0.03
Área abierta con CBS (AaC)	74	0.557 ± 0.05
Bajo planta sin CBS (Bp)	149	0.409 ± 0.02
Bajo planta con CBS (BpC)	144	0.498 ± 0.03

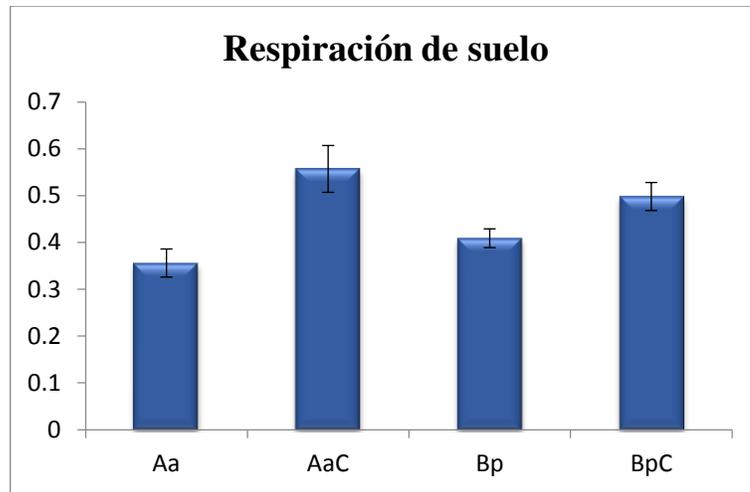


Figura 3. Respiración del suelo (g CO₂ m⁻² hora⁻¹) por microambiente. Las barras de error corresponden al error estándar.

Al analizar la relación entre la tasa de respiración del suelo y su temperatura, en presencia y ausencia de costra biológica de suelo y para cada condición de microambiente, los resultados muestran que no existe relación entre dichas variables. Lo anterior al analizar para los casos de microambientes con CBS (AaC + BpC) ($r^2=0.104$; $p=0.001$) y donde no se contaba con la presencia de CBS (Aa + Bp) ($r^2=0.036$; $p=0.004$). Así como al analizar la relación de dichas variables por microambiente: Aa ($r^2=0.083$; $p=0.012$), AaC ($r^2=0.058$; $p=0.039$), Bp ($r^2=0.026$; $p=0.049$) y BpC ($r^2=0.143$; $p=0.001$). Por lo que la hipótesis que afirma la existencia de una relación entre la temperatura del suelo y su tasa de respiración es rechazada. Resultados semejantes presentan Maestre y Cortina (2003), quienes reportan ausencia de relación lineal entre el flujo de CO₂ y la temperatura. Por otro lado, Castillo-Monroy y colaboradores (2011) encontraron una relación positiva entre las variables temperatura respiración del suelo. Tal discrepancia entre estudios pudiera deberse a la relación que se reporta con la variable humedad del suelo. La relación entre tasa de respiración y temperatura se pone de manifiesto sólo cuando la humedad del suelo es mayor a 11%, sin mostrarse dicha relación cuando la misma baja de este porcentaje (Castillo-Monroy *et al.*, 2011). Belnap y Lange (2001) indican que las CBS activan el intercambio de gases en presencia de humedad. Esta situación se puso de

manifiesto al humedecer el suelo durante la estación seca, pero no durante la estación húmeda, para un estudio conducido en el desierto del Kalahari (Thomas *et al.*, 2008). En el desierto de Sonora se ha encontrado evidencia de dicha activación en sitios con CBS antes que en sitios de raíces de plantas y microorganismos del suelo (Cable y Huxman, 2004). Para la presente investigación, en las fechas en que se tomaron las muestras para el cálculo de humedad de suelo, dicha variable en ningún caso superó el 10%. Lo anterior puede explicar el no encontrar la relación reportada en los trabajos aquí citados.

CONCLUSIÓN

En esta investigación se confirma, de manera general, que la tasa de respiración es mayor cuando el suelo está cubierto por costra biológica del suelo (CBS) que cuando está desprovisto de ésta. Corroborando así la primera hipótesis planteada. El suelo presentó tasas de respiración diferentes al analizar los cuatro microambientes considerados (Aa, AaC, Bp y BpC). Área abierta con CBS (AaC) y bajo planta con CBS (BpC) fueron los microambientes que presentaron mayores tasas de respiración de suelo cuando se compararon con los microambientes carentes de CBS (Aa y Bp), sustentando que la respiración del suelo en el ecosistema de estudio, es mayor para los microambientes con CBS que en los microambientes sin la presencia de éstas. En este estudio no se confirma la hipótesis que sugiere una mayor respiración de suelo en los microambientes bajo planta que en suelo desnudo, ya que los microambientes bajo planta mostraron mayores tasas de respiración que las áreas abiertas sólo al comparar BpC y Aa y no entre Aa y Bp, AaC y Bp o AaC y BpC.

Para el ecosistema en el que se llevó a cabo el presente estudio se estima una tasa de respiración promedio de $166.075\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, calculada con base a la tasa de respiración promedio para los microambientes considerados ($0.455\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$). La tasa de respiración de suelo no mostró relación con la variable temperatura del suelo, rechazando así la hipótesis que afirma la existencia de ésta. Lo anterior pudiera deberse a que tal relación ha sido reportada ligada a la variable humedad del suelo, misma que no superó el 10% para ningún caso registrado en las fechas de colecta.

CONCLUSIÓN GENERAL

En el área de estudio, la especie vascular dominante: *Larrea tridentata* al parecer se relaciona positivamente a las CBS dominadas por liquen y musgo. En el micrositio bajo planta exposición oeste (BAO), el morfotipo cianobacteria se presenta con mayores coberturas en comparación con los otros micrositios considerados. Los resultados obtenidos en la presente investigación rechazarían la idea generalizada de que las CBS y las plantas vasculares poseen coberturas inversamente proporcionales.

El factor que mayor influencia mostró en la presencia y cobertura de los morfotipos de CBS dominantes en el área de estudio fue la radiación solar recibida. La cantidad de luz mostró diferencias entre los micrositios bajo arbusto y fuera del arbusto, correspondiendo con las diferencias en coberturas de CBS. Tres de los morfotipos de CBS (liquen, cianobacteria y musgo) observaron mayor presencia y cobertura si crecen bajo la proyección de la copa de *Larrea tridentata* que en áreas abiertas.

La influencia de las CBS respecto al flujo del CO₂, análisis considerado dentro del tercer capítulo del presente documento, se confirma de manera general, ya que la tasa de respiración es mayor cuando el suelo está cubierto por costra biológica del suelo (CBS) que cuando está desprovisto de ésta. El suelo presentó tasas de respiración diferentes al analizar los cuatro microambientes considerados (Aa, AaC, Bp y BpC). Área abierta con CBS (AaC) y bajo planta con CBS (BpC) fueron los microambientes que presentaron mayores tasas de respiración de suelo cuando se compararon con los microambientes carentes de CBS (Aa y Bp), sustentando que la respiración del suelo en el ecosistema de estudio, es mayor para los microambientes con CBS que en los microambientes sin la presencia de estas. En este estudio no se confirma la hipótesis que sugiere una mayor respiración de suelo en los microambientes bajo planta que en suelo desnudo, ya que los microambientes bajo planta mostraron mayores tasas de respiración que las áreas abiertas sólo al comparar BpC y Aa y no entre Aa y Bp, AaC y Bp o AaC y BpC.

Para el ecosistema en el que se llevó a cabo el presente estudio se estima una tasa de respiración promedio de $166.075\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, calculada con base a la tasa de respiración promedio para los microambientes considerados ($0.455\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$). La tasa de respiración de suelo no mostró relación con la variable temperatura del suelo, rechazando así la hipótesis que afirma la existencia de ésta. Lo anterior pudiera deberse a que tal relación ha sido reportada ligada a la variable humedad del suelo, misma que no superó el 10% para ningún caso registrado en las fechas de colecta. El presente documento aporta conocimiento adicional al ya existente en cuanto al papel que las costras biológicas del suelo juegan dentro del ecosistema estudiado. Este conocimiento contribuirá a lograr una mejor comprensión de estas comunidades biológicas y su influencia en el ecosistema.

LITERATURA CITADA

- Abed RM, Al-Sadi AM, Al-Shehi M, Al-Hinai S, Robinson MD (2013) Diversity of free-living and lichenized fungal communities in biological soil crusts of the Sultanate of Oman and their role in improving soil properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 57: 695-705.
- Anonimo (2010) *EGM-4 Environmental Gas Monitor for CO2 Operator's Manual* Version 4.18, PP Systems. Amesbury, U.S.A. P 54.
- Badii MH, Landeros J, Cerna E (2008) Patrones de asociación de especies y sustentabilidad. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 3(1): 632-660.
- Barreno E, Pérez-Ortega S (2003) Líquenes de la Reserva Integral de Muniellos Asturias *Cuad. Medio Ambiente Serie Naturaleza 5*. Recuperado el 09 de Marzo de 2016, de http://www.uv.es/barreno/Liquenes_Muniellos.pdf.
- Belnap J (2002) Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils*, 35, 2: 128-135.
- Belnap J, Büdel B, Lange OL (2003) Biological Soil Crusts: Characteristics and Distribution. In *Biological soil crusts: structure, function, and management. Ecological Studies, vol 150*. 2nd edition. Edited by: Belnap J, Lange OL. Berlin, Heidelberg: Springer p. 3–30.
- Belnap J, Kaltenecker J, Rosentreter R, Williams J, Leonard S, Eldridge D (2001) *Biological Soil Crusts: Ecology and Management*. Denver, Colorado, USA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management. U.S. Geological Survey.
- Belnap J, Lange OL (2001) *Biological soil crust: structure, function and management*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Borie G, Aguilera SM, Peirano P (1999) Actividad biológica en suelos. *Frontera Agrícola*, 5: 29-32.

- Bowker M, Belnap J, Davidson D, Goldstein H (2006) Correlates of biological soil crust abundance across a continuum of spatial scales: support for a hierarchical conceptual model. *Journal of Applied Ecology*, 43, 1: 152–163.
- Brodo I, Duran S, Sharnoff S (2001) *Lichens of North America*. New Haven, Connecticut, USA.: Yale University Press.
- Cable JM, Huxman TE (2004) Precipitation pulse size effects on Sonoran Desert soil microbial crusts. *Oecologia*, 141: 317-324.
- Carter JMR (2002) Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Journal of Agronomy*, 94: 38-47.
- Castillo-Monroy A, Maestre F (2011) Biological soil crusts: Recent advances in our knowledge of their structure and ecological function. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84: 1-21.
- Castillo-Monroy A, Maestre F, Delgado-Baquerizo M, Gallardo A (2010) Biological soil crusts modulate nitrogen availability in semi-arid ecosystems: insights from a Mediterranean grassland. *Plant and Soil*, 333, 1: 21-34.
- Castillo-Monroy AP, Maestre FT (2011) La costra biológica del suelo: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84: 1-21.
- Castillo-Monroy AP, Maestre FT, Rey A, Soliveres S, García-Palacios P (2011) Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem. *Ecosystems*, 14, 5: 835-847.
- Chavarriga MW, García OA, Garcés PN (2011) Fraccionamiento y dinámica de la materia orgánica en suelos de agroecosistemas andinos en el departamento de caldas Colombia. VIII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. [online]
<http://www.secsuelo.org/VIIICongreso/Simposios/2%20Simposio%20de%20>

Materia%20Organica/5%20Fraccionamiento%20y%20dinamica%20de%20la%20MO%20(Chavarriaga%20W).pdf

CNA, SMN (3 de Marzo de 2016) *Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Normales5110/NORMAL19057.TXT>

CONABIO (2008) *Regiones Terrestres Prioritarias de México: Tokio*. Recuperado el 27 de octubre de 2013, de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_080.pdf.

Conant RT, Klopatek JM, Klopatek CC (2000) Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 383–90.

Concostrina-Zubiri L, Martínez I, Huber-Sannwald E, Escudero A (2013) Efectos y respuestas de la costra biológica del suelo en ecosistemas áridos: avances recientes a nivel de especie. *Ecosistemas*, 22, 3: 95-100.

Concostrina-Zubiri L, Martínez I, Rabasa SG, Escudero A (2014) The influence of environmental factors on biological soil crust: from a community perspective to a species level approach. *Journal of Vegetation Science*, 25(2): 503-513.

Cruz-Flores G, Etchevers-Barra JD (2011) Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia*, 45: 849-862.

De la Rosa D (2008) *Evaluación agro-ecológica de suelos, para un desarrollo rural sostenible*. Ed. Mundi-Prensa. España. 404 p.

Delgado-Baquerizo M, Castillo-Monroy A, Maestre F, Gallargo A (2010) Plants and biological soil crusts modulate the dominance of N forms in a semi-arid grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 2: 376-378.

DOF (30 de 12 de 2010) NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. En línea disponible:

http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf. México.

Dytham C (2011) *Choosing and using statistics: A biologist's guide*. Oxford, UK.: Wiley-Blackwell.

Eldridge DJ (2000) Ecology and management of biological soil crusts: recent developments and future challenges. *Bryologist* 103, 742-747.

Eldridge DJ, Green RSB (1994) Microbiotic soil crusts: a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Australia Journal of Soil Research*, 32: 389-415.

Eldridge DJ, Rosentreter R (1999) Morphological groups: A framework for monitoring microphytic crusts in arid landscapes. *Journal of Arid Environments* 41: 11-25.

Eldridge DJ, Semple WS, Koen TB (2000a) Dynamics of cryptogamic soil crusts in a derived grassland in south-eastern Australia. *Austral Ecology*, 25, 3: 232-240.

Eldridge DJ, Zaady E, Shachak M (2000b) Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel. *Catena*, 40, 3: 323-336.

Estrada E, Scott L, Villarreal J, Jurado E, Cotera M, Cantú C, García J (2010) Clasificación de los pastizales halófilos del noreste de México asociados con perrito de las praderas (*Cynomys mexicanus*): diversidad y endemismo de especies. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 18(2): 401-416.

FAO (2001) Soil carbon sequestration for improved land management. *World soil reports* 96. Rome, 58 p.

Fortin MC, Rochette P, Pattey E (1996) Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage smallgrain cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 1541-1547.

- Frank A, Liebig MA, Hanson JD. 2002. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 34: 1235–41.
- García E (1981) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koeppen* México, D. F. Instituto de Geografía.
- Giardina CP, Binkley D, Ryan MG, Fownes JH, Senock RS (2004) Belowground carbon cycling in a humid tropical forest decreases with fertilization. *Oecologia*, 139: 545–550.
- Granados-Sánchez D, Sánchez-González A, Granados RLV, Borja AR (2011) Ecología de la vegetación del Desierto Chihuahuense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, Volumen XVII, Edición Especial: 111-130.
- Hanson PJ, Edwards NT, Garten CT, Andrews JA (2000) Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48: 115–146.
- Högberg P, Nordgren A, Buchmann N, Taylor AFS, Ekblad A, Hogberg MN, Nyberg G, Ottosson-Lofvenius M, Read DJ (2001) Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 411: 789–792.
- Housman DC, Powers HH, Collins A, Belnap J (2006) Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments*, 66, 4: 620-634.
- INEGI (1986) Síntesis geográfica del estado de Nuevo León. D. F., México.
- Juárez SA, Sánchez AJ, Sánchez SA (2006) *Química del suelo y medio ambiente*. Publicaciones Universidad de Alicante, TD. España. Pp. 743.
- Lange OL (2003) Photosynthesis of soil-crust biota as dependent on environmental factors. In: Belnap J, Lange OL, Eds. *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Berlin: Springer. p 217–240.

- Langhans TM, Storm C, Schwave A (2009) Community assembly of biological soil crust of different successional stages in a temperate sand ecosystem as assessed by direct determination and enrichment techniques. *Microbial Ecology*, 58: 394-407.
- Law BE, Kelliher FM, Baldocchi DD, Anthoni PM, Irvine J, Moore D, Van Tuyl S (2001) Spatial and temporal variation in respiration in a young ponderosa pine forest during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 110: 27–43.
- Maestre F (2003) Small-scale spatial patterns of two soil lichens in semi-arid Mediterranean steppe. *Lichenologist*, 35: 71–81.
- Maestre F, Bautista S, Cortina J, Bellot J (2001) Potential of using facilitation by grasses to establish shrubs on a semiarid degraded steppe. *Ecological Applications*, 11: 1641-1655.
- Maestre F, Cortina J (2002) Spatial patterns of surface soil properties and vegetation in a Mediterranean semi-arid steppe. *Plant and Soil*, 241, 2: 279-291.
- Maestre FT, Cortina J (2003) Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 23: 199–209.
- Maestre FT, Escudero A, Martinez I, Guerrero C, Rubio A (2005) Does spatial pattern matter to ecosystem functioning? Insights from biological soil crusts. *Functional Ecology*, 19: 566-573.
- Martínez HE, Fuentes EJP, Acevedo HE (2008) Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 8(1): 68-96.
- Mendoza-Aguilar D, Cortina J, Pando-Moreno M (2014) Biological soil crust influence on germination and rooting of two key species in a *Stipa tenacissima* steppe. *Plant and Soil* 375: 267-274.

- Mielnick PC, Dugas WA (2000) Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 32: 221-8.
- Nash III TH (2008) *Lichen Biology*. Second edition. Cambridge University Press. Arizona State University, USA.
- Nelson DW, Sommers LE (1996) *Total carbon, organic carbon and organic matter. Cap. 34, in: Methods of soil analysis*. Part 3. Chemical methods-SSSA. USA. Book series no. 5. Pp. 961-1010. Download 12/13/2015: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/pdfs/sssabookseries/methodsofsoilan3/961?search-result=1>
- Ochoa-Hueso R, Pueyo JJ, Manrique E (2011) Spatial distribution and physiology of biological soil crust from semi-arid central Spain are related to soil chemistry and shrub cover. *Soil Biology and Biochemistry*, 104: 212-225.
- Pietrasia KN, Regus JU, Johansen JR, Lam D, Sachs JL, Santiago LS (2013) Biological soil crust community types differ in key ecological functions. *Soil Biology and Biochemistry*, 65: 168-171.
- Read CF, Duncan DH, Vesk PA, Elith J (2008) Biological soil crust distribution is related to patterns of fragmentation and landuse in a dryland agricultural landscape of southern Australia. *Landscape Ecology* 23, 9: 1093-1105.
- Rees RM, Ball BC, Campbell CD, Watson CA (2001) *Sustainable management of soil organic matter*. CABI publishing. UK. Pp. 440.
- Reynolds JF, Stafford SM, Lambin EF, Turner BLII, Mortimore M, Batterbury SPJ, Downing TE, Dowlatabadi H, Fernandez RJ, Herrick JE, Huber-Sannvald E, Leemans R, Lynam T, Maestre FT, Ayarza M, Walker B (2007) Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 316: 847-51.
- Richer R, Anchassi D, El-Assaad I, El-Matbouly M, Ali F, Makki I, Metcalf JS (2012) Variation in the coverage of biological soil crusts in the State of Qatar. *Journal of Arid Environments*, 78: 187-190.

Rosentreter R, Bowker M, Belnap J (2007) *A Field Guide to Biological Soil Crusts of Western U.S. Drylands: Common Lichens and Bryophytes*. Denver, Colorado. U.S. Government Printing Office.

Rzedowski J (1978) *Vegetación de México*. México, D. F.: Limusa.

Sánchez JE, Harwood RR, Willson TC, Kizilkaya K, Smeenk J, Parker E, Paul EA, Knezek BD, Robertson GP (2004) Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Journal of Agronomy*, 96: 769-775.

Shreve F (1910) The rate of establishment of the giant cactus. *Plant World*, 13: 235-241.

Thomas AD, Hoon SR, Linton PE (2008) Carbon dioxide fluxes from cyanobacteria crusted soils in the Kalahari. *Applied Soil Ecology*, 39: 254-263.

Xu S, Liu C, Jiang P, Cai W, Wang Y (2009) The effects of drying following heat shock exposure of the desert moss *Syntrichia caninervis*. *Science of the Total Environment*, 407, 7: 2411-2419.

Yair A (2003) Effects of biological soil crusts on water redistribution in the Negev Desert, Israel: a case study in longitudinal dunes. En J. Belnap, O. L. Lange, *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* (pp. 303-314). Springer Berlin Heidelberg.

Zhang Y, Wu N, Zhang B, Zhang J (2010) Species composition, distribution patterns and ecological functions of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert. *Journal of Arid Land*, 2, 3: 180-189.