



**Universidad Nacional Autónoma de México**

---

---

**Facultad de Estudios Superiores  
Zaragoza**

FAUNA DE COSTRAS BIOLÓGICAS Y SUELO DE  
ISLAS DE RECURSOS FORMADAS POR *Mimosa  
luisana*, EN EL VALLE DE ZAPOTITLÁN SALINAS,  
PUEBLA, MÉXICO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**B I Ó L O G A**

PRESENTA:

***Jessica Miguel De la Cruz***

**Director de Tesis:** Dr. Noé Manuel Montaña Arias, UAM-Iztapalapa  
**Asesora Interna:** Dra. Rosalva García Sánchez, FES-Zaragoza-UNAM



México, D.F

Abril, 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**Esta tesis** se realizó en el **Laboratorio de Biosistemática de Leguminosas y Ecología** del Departamento de Biología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa (UAM-I) y en el **Laboratorio de Zonas Áridas** de la Unidad en Ecología Vegetal de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (FES-Zaragoza), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), bajo la tutoría de:

Dr. Noé Manuel Montaña Arias (Director, Departamento de Biología, UAM-I)  
Dra. Rosalva García Sánchez (Asesora Interna, FES Zaragoza, UNAM)

*Este proyecto tuvo financiamiento del Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP), de la Secretaría de Educación Pública (PROMEP-SEP 2011-2012), de un Proyecto Divisional de la UAM-Iztapalapa (2010-2014) y del Laboratorio de Zonas Áridas, FES-Zaragoza-UNAM. La autora, el director y la asesora de la tesis agradecen a estas instituciones el financiamiento.*

**Forma sugerida para citar esta tesis:**

**Miguel J. 2013.** Fauna de costras biológicas y suelo de islas de recursos formadas por *Mimosa luisana*, en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. **Tesis de Licenciatura en Biología**, FES-Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal (74 pp).

## **Agradecimientos**

A la **UNAM** y a la **Facultad de Estudios Superiores Zaragoza Campo II** por todos los conocimientos recibidos a favor de mi formación académica.

Agradezco a cada uno de los miembros del jurado, por el tiempo brindado en la revisión de esta tesis, por sus observaciones y sugerencias que enriquecieron este trabajo.

**M en C. Ramiro Rio Gómez**

**DR. Noé Manuel Montaña Arias**

**Dr. Gerardo Cruz Flores**

**Dra. Rosalva García**

**Dr. Carlos Castillejos Cruz**

Al **Dr. Noé Manuel Montaña Arias** por todo el tiempo y paciencia para trabajar conmigo, en la redacción y diseño de este trabajo, gracias por todas sus enseñanzas.

A **Dra. Rosalva García**, por todos sus consejos que me ayudaron y me llevaron hasta el final de este trabajo.

A la **UAM-Iztapalapa** especialmente a la **Dra. Sara Lucía Camargo Ricalde** por su apoyo durante la realización de este proyecto y por su ayuda durante la colecta de muestras en campo, así como a: **Dr. Noé Montaña**, **Dra. Rosalva García**, **Mtra. Claudia De La Rosa**, **Mtra. Susana A. Montaña Arias**, a los **Biólogos Eduardo Chimal Sánchez**, **Andrea Ponce** y **Alejandra R**, gracias por su amistad y por su gran ayuda durante las salidas al campo.

Al jardín Botánico "**Helia Bravo Hollis**" y al comité ejidal por de Zapotitlán Salinas por su apoyo logístico durante el trabajo de campo.

Al **Dr. Gerardo Cruz Flores** por todos sus consejos y ayuda en la realización de los análisis de suelo, así como al Biól. **Francisco Cohetero**, gracias por tu tiempo y paciencia, **Daphne Gonzales Macilla, Karina Escalante Vélez y Ernesto Mascot Gómez**, por su ayuda y atenciones en la realización de todas las técnicas.

A la **bióloga María del Carmen Herrera** y su equipo de trabajo **M en B. Jesús Campos Serano** y **Biol. Jorge Orendain Méndez**, por su valiosa ayuda en la determinación taxonómica, gracias por su tiempo y atenciones.

## RESUMEN

Las costras biológicas (CB) se localizan dentro y fuera de islas de recursos (IR) formadas bajo la copa de *Mimosa luisana* (Leguminosae). En esta tesis, se comparó la densidad de fauna edáfica en CB dentro de IR (CB-IR), suelo bajo CB-IR (SCB-IR), CB fuera de IR (CB-FIR) y suelo bajo CB-FIR (SCB-FIR), así como en suelo de área abierta (SAA). Asimismo, se exploró la relación entre la fauna y las propiedades físico-químicas de CB y suelo. Las CB y el suelo fueron colectados de cinco microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR y SAA), en siete parcelas en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México, en dos estaciones: lluvias y secas. La fauna se extrajo con embudos tipo Berlese con luz constante, se fijó en alcohol (70%), y se calcularon la densidad total y por taxa, la riqueza de taxa y los índices de diversidad Shannon-Wiener ( $H'$ ) y Simpson ( $\lambda$ ). Se determinó: humedad, materia orgánica,  $C_{org}$ ,  $PO_4^{=}$ ,  $N_{total}$ ,  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ . Los resultados muestran que CB-IR y CB-FIR tienen mayor densidad de fauna que el suelo bajo la CB; sin embargo, esto sólo se registró durante lluvias, pero en ambas estaciones, el SAA presentó la menor densidad. Ácari, Insecta y Collembola tuvieron mayor densidad que Pseudoescorpionida, Chilopoda, Diplura, Araneae y Nematoda. Acarí estuvo representado por Oribatida, Prostigmata y Mesostigmata, mientras que Insecta registró ocho órdenes, todos en baja densidad. La riqueza y diversidad de taxa fueron mayores en CB-IR y CB-FIR, intermedias en SCB-IR y SCB-FIR y menores en SAA. La comparación entre  $H'$  y  $\lambda$  mostró que en lluvias la diversidad es menos equitativa, en particular en las CB. Las CB-IR y CB-FIR tuvieron mayor concentración de  $C_{org}$  y  $N_{total}$  que el suelo; asimismo, CB-IR y SCB-IR tuvieron mayor concentración de  $NO_3^-$  y  $PO_4^{=}$  que el suelo. Las formas totales y disponibles de todos los nutrimentos fueron menores en SAA, el cual registró también menor calidad de materia orgánica. La densidad total de fauna y, en general de cada taxa, respondió positivamente a la humedad estacional y a la concentración de nutrimentos, aunque la presencia de Chilopoda, Araneae y Pseudoescorpionida puede deberse a que son depredadores de otros taxa. En conjunto, los resultados indican que las CB son un microhábitat rico en recursos y una fuente de alimento para la fauna edáfica, lo cual está potencializado por la IR formada por *M. luisana*. Así, CB y *M. luisana* son, en conjunto, un refugio de fauna edáfica ya que favorecen su establecimiento y permanencia en el suelo del Valle semiárido de Zapotitlán Salinas.

**Palabras clave:** Ecología del suelo, Fauna edáfica, Fertilidad del suelo, Interacciones bióticas, Matorrales semiáridos, Tehuacán-Cuicatlán.

## ABSTRACT

Biological crusts (BC) are within and outside of resource islands (RI) formed under the canopy of *Mimosa luisana* (Leguminosae). The objective of this thesis was to compare the fauna density-richness and its relationships with soil properties in the following microhabitat: *i*) Biological crusts (BC) and soil beneath BC (SBC) within *M. luisana*-RI (BC-RI, SBC-RI), *ii*) BC and SBC outside *M. luisana*-RI (ORI; BC-ORI, SBC-ORI), and *iii*) Open areas soil (OA), without plants and BC, during dry and rainy seasons, at Zapotitlan-Salinas Valley, Puebla, Mexico. The fauna was extracted from BC and soil samples using a Berlese system and fixed in alcohol (70%). Taxa density-richness, diversity Shannon-Wiener ( $H'$ ) and Simpson ( $\lambda$ ) indexes, as well as soil moisture, organic matter (OM), organic C,  $PO_4^-$ , total N,  $NH_4^-$  and  $NO_3^-$  were estimated for each microhabitat. BC-RI and BC-ORI have higher fauna density than SBC, which was seen during rainy season; but in both seasons OA had the lowest density. Acari, Collembola and Insecta had higher density than Chilopoda, Diplura, Araneae, Nematoda, and Pseudoscorpionida. Three orders of Acari (Oribatida, Prostigmata and Mesostigmata) and eight of Insecta at low density were reported. The richness and diversity of taxa were higher in BC-RI and BC-ORI, intermediate in SBC-RI and SBC-ORI, and lower in OA. The comparison between  $H'$  and  $\lambda$  showed that rainy season had less taxa evenness, especially in BC. BC-RI and BC-ORI had higher organic C and total N concentration than the SBC; likewise, BC-RI and SBC-RI had higher  $NO_3^-$  and  $PO_4^-$  concentrations. Total and available forms of nutrients and OM quality were lower in OA. Total density and taxa richness of fauna responded positively to seasonal moisture and nutrients concentration, although the presence of Chilopoda, Araneae and Pseudoscorpionida may also be because of that are predators. Overall results suggest that BC and *M. luisana*-IR together provide a rich microhabitat in resources (food) for soil fauna favoring its establishment in semiarid soils from Zapotitlan-Salinas Valley.

**Keywords:** Biotic interactions, Edaphic fauna, Microbiotic crusts, Soil ecology, Soil fertility, Thorny scrub, Tehuacán-Cuicatlán-Mexico.

**CONTENIDO**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>RESUMEN</b> .....  | <i>i</i>    |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <i>ii</i>   |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....  | 1           |
| <b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....   | 4           |
| 2.1 Los ecosistemas áridos y semiáridos de México.....                                  | 4           |
| 2.2 Plantas que forman Islas de recursos.....   | 4           |
| 2.3 Costras biológicas del suelo.....   | 6           |
| 2.4 Fauna del suelo .....   | 8           |
| 2.5 Fauna edáfica en suelos de ecosistemas áridos y semiáridos.....                     | 10          |
| <b>3. HIPÓTESIS</b> .....   | 12          |
| <b>4. OBJETIVOS</b> .....   | 12          |
| <b>5. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....  | 13          |
| 5.1 Área de estudio.....  | 13          |
| 5.2 Diseño del estudio.....   | 14          |
| 5.3 Colecta de las costras biológicas y del suelo.....                                  | 15          |
| 5.4 Extracción de la fauna de la costra biológica y del suelo.....                      | 16          |
| 5.5 Densidad, riqueza y diversidad de taxa de fauna en costra biológica y<br>suelo..... | 18          |
| 5.6 Análisis físico y químico de la costra biológica y del suelo.....                   | 19          |
| 5.7 Análisis estadístico de los datos.....  | 21          |
| <b>6. RESULTADOS</b> .....  | 23          |
| 6.1 Fauna en el suelo y en las costras biológicas.....                                  | 23          |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 6.2 Variables físicas y químicas del suelo y de la costra biológica.....                 | 32        |
| 6.3 Relación fauna vs variables físicas-químicas del suelo y de la costra biológica..... | 37        |
| <b>7. DISCUSIÓN.....</b>   | <b>39</b> |
| 7.1 La fauna de este estudio en relación a otros ecosistemas.....                        | 39        |
| 7.2 La costra biológica como microhábitat rico en recursos para la fauna edáfica.....    | 42        |
| 7.3 La costra biológica es un microhábitat estable para la fauna edáfica.....            | 43        |
| 7.4 Las costras biológicas son un microhábitat del que se alimenta la fauna.....         | 43        |
| 7.5 Las costras biológicas y la fauna que las habita llaman a otros taxa.....            | 46        |
| 7.6 La lluvia modifica la diversidad-composición de fauna de las costras biológicas..... | 47        |
| <b>8. CONCLUSIONES.....</b>  | <b>50</b> |
| <b>9. LITERATURA CITADA.....</b>   | <b>52</b> |

## 1. INTRODUCCIÓN

En México, los ecosistemas áridos o semiáridos son heterogéneos y tienen una alta diversidad de especies de plantas (6000 spp), el 50% endémicas (3500 spp), dadas por su variación en precipitación, temperatura y suelos (Rzedowski, 1976; Toledo y Ordoñez, 1998; Tongway *et al.*, 2004; Hernández, 2006). La vegetación se presenta en mosaicos formados por grupos de especies de plantas o por plantas aisladas (Aguiar y Salas, 1999), que forman bajo su copa islas de recursos o de fertilidad (García-Moya y McKell, 1970; Reynolds *et al.*, 1999). Animales y plantas se asocian a éstas islas (Herman *et al.*, 1995; Perroni-Ventura *et al.*, 2006, 2010; Arizmendi *et al.*, 2008), pero también otros organismos están asociados como las costras biológicas (CB) del suelo, la fauna, las bacterias y los hongos (Yépez-Hernández, 2011; Sandoval-Pérez, 2011).

Las CB son un componente esencial de los ecosistemas semiáridos. Estas son un consorcio de cianobacterias, líquenes, musgos y hepáticas (Belnap, 2003; Rivera Aguilar *et al.*, 2006; 2009) que establecen una alfombra biótica sobre el suelo y que lo enriquece con carbono, fósforo y nitrógeno (Belnap, 2003). Las CB también retienen agua, reducen la incidencia solar y disminuyen la erosión (Belnap, 2003; Darby *et al.*, 2009). Las condiciones y recursos que ofrecen las CB en los ecosistemas semiáridos, sugiere que estas alfombras microbióticas podrían ser un refugio para la fauna edáfica, pero los estudios son aún escasos (Maestre *et al.*, 2011) y sólo hay unos pocos registros para el desierto Chihuahuense (Darby *et al.*, 2007; Neher *et al.*, 2009), de Namibia, África (Lalley *et al.*, 2006), y el desierto de Utah, E.U. (Darby *et al.*, 2009).

La fauna del suelo descompone la materia orgánica (Lavelle *et al.*, 1992; Chapin *et al.*, 2002) y transporta los nutrientes (Zak y Whitford, 1988; Barajas-Guzmán y Álvarez-

Sánchez, 2003; Huerta *et al.*, 2007; Osler y Sommerkork, 2007; Ramírez, 2008). Esta se clasifica como: 1) Microfauna (<200  $\mu\text{m}$ ) como los protozoarios, nemátodos y rotíferos (Estrada-Venegas, 2008); 2) Mesofauna (>200  $\mu\text{m}$  a 1 cm) que incluye a colémbolos, ácaros y termitas (Ramírez 2008); y 3) Macrofauna (>1 cm) donde están las lombrices, insectos, moluscos, etc. Los ácaros, colémbolos y proturos son los taxa más abundantes en la mayoría de los ecosistemas, con densidades de hasta 50,000 org.m<sup>-2</sup> en los ecosistemas desérticos (Bardgett y Griffiths, 1997).

Los estudios de fauna edáfica en ecosistemas áridos y semiáridos a nivel mundial y en México son pocos en comparación con los realizados en ecosistemas tropicales húmedos (Barajas-Guzmán y Álvarez -Sánchez, 2003); estos documentan, la densidad y los taxa de fauna del suelo así como su importancia en la descomposición de la materia orgánica en varios desiertos del mundo (Chernov *et al.*, 1977; Santos y Whitford, 1981; Whitford, 1996; Zak y Whitford, 1988; Doblas, 2007). Aunque, la mayor parte son estudios taxonómicos, otros ponen énfasis en los organismos de importancia económica (Rodríguez y Morón, 2010); no obstante, el papel de la fauna en la fertilidad de los ecosistemas desérticos no ha sido estudiada a profundidad (Brown *et al.*, 2001; Fragoso *et al.*, 2001).

Los estudios sobre CB en México son también escasos, éstos documentan la composición taxonómica de las CB y exploran sus efectos sobre la germinación y la dinámica de nutrientes del suelo (Maya y López-Cortés, 2002; Rivera-Aguilar *et al.*, 2005; 2006; 2009; Morín, 2008; Quiñones-Vera *et al.*, 2009; Jiménez *et al.*, 2009, López-Cortés *et al.*, 2010, Sandoval-Pérez, 2011; Yépez-Hernández, 2011; Godinez-Alvarez *et al.*, 2012), pero ninguno ha estudiado la fauna edáfica. En particular, en el Valle de Zapotitlán Salinas, se ha relacionado a las CB con la leguminosa *M. luisana*, una planta que forma islas de recursos ricas en nutrientes y propágulos micorrícicos (Camargo-Ricalde *et al.*, 2002; 2003;

2010), indicando que ambas favorecen la disponibilidad de C y N, así como la abundancia de grupos microbianos. Sin embargo, se desconoce el papel de *M. luisana* y de las CB como microhábitats para la conservación de la fauna del suelo de este ecosistema semiárido.

Por lo anterior, el objetivo de esta tesis fue evaluar la influencia de *M. luisana*, de las costras biológicas (CB) y de la relación *M. luisana*-CB sobre la densidad y composición de taxa de fauna en relación con la disponibilidad de nutrimentos en el ecosistema semiárido del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Los ecosistemas áridos y semiáridos de México**

Los ambientes áridos y semiáridos en México cubren 60% de la superficie total del país, de los 32 estados, 25 presentan en mayor o menor proporción zonas áridas o semiáridas (Valiente-Banuet, 1996; Cervantes-Ramírez, 2002; INEGI 2005). Cubren la mayor parte del Altiplano mexicano, en especial los estados de Tamaulipas, Sonora, Durango, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Baja California, Baja California Sur, San Luis Potosí, Zacatecas, Hidalgo y una parte importante del Valle de Tehuacán-Cuicatlán en Puebla y Oaxaca (Valiente-Banuet, 1996; Challenger y Soberón, 2008), del cual forma parte el valle de Zapotitlán Salinas. Estas áreas se caracterizan por tener escasa precipitación así como fuertes oscilaciones de temperatura, se clasifican en: zonas hiperáridas con lluvias menores a 25 mm anuales, zonas áridas, donde la precipitación va de 25 a 250 mm y zonas semiáridas con una precipitación que varía entre 250 y 600 mm anuales. En general, las plantas de las zonas áridas y semiáridas presentan adaptaciones para sobrevivir en condiciones de baja precipitación y elevada temperatura (Cervantes-Ramírez, 2002; Velasco-Molina, 1991), tal como estructuras de almacenamiento de agua (suculencia), cutícula gruesa y cerosa que evita la pérdida de agua, desarrollo de raíces profundas (Cloudsley-Thompson, 1979) y hojas modificadas (espinas), o bien tienen fuertes interacciones de facilitación como el nodrizaje y la formación de islas de recursos bajo su copa, siendo así el refugio y un microambiente que facilita el establecimiento y sobrevivencia de muchas otras especies.

### **2.2 Plantas que forman Islas de recursos**

La cubierta vegetal de las zonas áridas y semiáridas está constituida principalmente por matorrales alternados con pastizales, en general predominan especies arbustivas; sin

embargo, la composición florística de cada zona depende del clima, topografía y condiciones edáficas particulares a cada localidad (Rzedowski, 1978; Cervantes-Ramírez, 2002). La vegetación se distribuye en parches o mosaicos denominados “islas de recursos” (IR), éstas se forman bajo la copa de una planta en donde se generan mejores condiciones ambientales y se acumulan recursos que pueden ser aprovechados por organismos vegetales, animales y microorganismos. En el suelo de la IR se concentran restos vegetales y partículas de suelo (García-Espino, 1989), que lo enriquecen con materia orgánica y nutrimentos como carbono, nitrógeno y fósforo (García-Moya y McKell, 1970; Perroni-Ventura *et al.*, 2006; 2010; Reyes-Reyes *et al.*, 2002), de igual manera, la IR proporciona sombra y humedad a los organismos. La información de la interacción de la fauna de suelo con las IR es escasa, y en muchos casos se enfoca sólo a algunos grupos de microflora (Camargo-Ricalde y Dhillion, 2003; Félix-Herrán *et al.*, 2007; Herman *et al.*, 1995). No obstante, Doblas (2007) sugiere que la densidad y distribución de la fauna también está influenciada de manera positiva por los efectos de la IR, a las cuales denominó islas microhábitat.

Existen en México varias especies vegetales que se han identificado como formadoras de islas de recursos (Montaño *et al.*, 2006), una de ellas es *Mimosa luisana*, la cual es endémica de México (Camargo-Ricalde *et al.*, 2002; 2003; 2010) y se distribuye en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca. *M. luisana* es un arbusto que representa una fuente importante de materia orgánica y nutrimentos como N, P y cationes (Camargo-Ricalde *et al.*, 2010b) y, presenta bajo su copa propágulos de hongos micorrícicos arbusculares (Camargo-Ricalde *et al.*, 2003), así como especies de cactáceas, agaves y otras plantas (Arias-Toledo *et al.*, 2001; Pavón *et al.*, 2005), de las cuales es nodriza, entre ellas *Neobuxbaumia tetetzo* (Bravo-Mendoza *et al.*, 2007; Valiente-Banuet *et al.*, 1996), la cual bajo la copa de *M. luisana*, aumenta sus posibilidades de sobrevivir. Recientemente se ha estudiado en el Valle de Zapotitlán Salinas la presencia de CB bajo la copa de *M. luisana*, y

su interacción con la dinámica del C y N, lo que sugiere que esta especie podría generar también un microhábitat favorable para el desarrollo de la microbiota del suelo en las zonas semiáridas (Rivera-Aguilar *et al.*, 2005; Yépez-Hernández, 2011; Sandoval-Pérez, 2011).

### 2.3 Costras biológicas del suelo

Las costras biológicas (CB) son una asociación de varios tipos de organismos principalmente cianobacterias, algas, hongos, líquenes, musgos y hepáticas interactuando con las partículas minerales y la materia orgánica del suelo (Belnap y Lange, 2001; Belnap *et al.*, 2001; Belnap, 2003; Hernández, 2006). La morfología y la edad de las CB son determinadas por el clima y por las especies que las constituyen (Belnap, 2003; Rosentreter *et al.*, 2008). Las CB se establecen en varios suelos, los primeros en aparecer son las cianobacterias formando una costra de color oscuro, los siguientes son los líquenes y finalmente los musgos, ambos dan diferentes formas y colores a las CB como: verde, dorado, marrón, y/o negro (Belnap, 2006).

Las CB están presentes en la mayoría de las comunidades vegetales (Belnap, 2006) y son un componente esencial en los ecosistemas áridos y semiáridos, en donde cubren hasta un 70% de los espacios de suelo sin vegetación (Belnap y Lange 2001; Belna 2006; Rivera-Aguilar *et al.*, 2006; Rosentreter *et al.*, 2008). Se ha demostrado que las CB mejoran las condiciones del suelo y son una fuente de C y N en el suelo de ambientes áridos y semiáridos. Las CB fijan C atmosférico que es incorporado al suelo por la fotosíntesis de los musgos que las conforman; asimismo, el N es fijado por cianobacterias y cianolíquenes, los cuales lo reducen a  $\text{NH}_4^+$ , forma química disponible para otros organismos (Belnap, 2002). La cantidad de C y N fijados depende de la temperatura, humedad y luz, así como de la composición específica de la CB y de microorganismos asociados (Belnap y Lange, 2001).

Las CB favorecen la estabilidad del suelo protegiéndolo de la erosión hídrica y eólica, debido a que incrementan la agregación de partículas minerales (Belnap y Gillette, 1998; Belnap y Lange, 2001). Estas aumentan la infiltración del agua beneficiando la humedad del suelo, aunque los beneficios de las CB puede variar conforme la composición de la costra (Belnap, 2006; Quiñonez-Vera *et al.*, 2009; Eldridge *et al.*, 2000); sin embargo, los estudios se han realizado en diferentes tipos de costra y con diferentes metodologías, lo que dificulta su comparación (Maestre *et al.*, 2011).

Las CB mantienen una relación con las plantas vasculares (Harper y Belnap, 2001; Belnap, 2003), se ha observado que algunas plantas aprovechan para su crecimiento el N fijado en las CB, aunque esta relación aún no es descrita completamente; por ejemplo Rivera-Aguilar *et al.* (2005) señalan que, en condiciones controladas, dos especies de leguminosas presentan una respuesta positiva en su germinación. Morín (2008) y Godínez-Álvarez *et al.* (2012) sugieren que la germinación no es igualmente afectada por las CB en todas las especies, pero que sí favorecen el crecimiento y la biomasa de las plántulas; en contraste, también se han encontrado efectos negativos o neutros (Godínez-Álvarez *et al.*, 2012). Hawkes (2004) y Escudero *et al.* (2007) reportan efectos negativos en cuanto a la emergencia de algunas plántulas en CB.

Los estudios sobre CB en México son recientes. Maya y López-Cortez (2002) hacen una revisión taxonómica de las cianobacterias que componen las CB del sur de la península de Baja California; en este mismo estado, López-Cortez *et al.* (2010) identificaron, por medio de ADN-PCR, las comunidades de cianobacterias en las CB. Quiñones-Vera *et al.* (2009) evaluaron la infiltración del agua en un pastizal de Durango, pero no observaron un resultado significativo que indicará mayor infiltración por acción de las CB. En San Luís Potosí Jiménez-Aguilar (2005) caracterizó las CB de un pastizal semiárido y posteriormente

Jiménez-Aguilar *et al.* (2009) determinaron los componentes de las CB y su influencia en la estabilidad del suelo, sugiriendo que esto depende de la distribución espacial de la costra. Otro sitio donde se han estudiado las CB es el Valle de Zapotitlán Salinas, ubicado en la reserva de la biosfera del Valle de Tehuacán Cuicatlán; en este lugar se ha identificado la distribución y composición taxonómica de las CB (Rivera Aguilar *et al.*, 2006), así como su efecto positivo, en condiciones de laboratorio, sobre la germinación de *Mimosa luisana* y *Myrtillocactus geometrizans*. En contraste, Godínez-Álvarez *et al.* (2012) sugieren que las CB no tiene un efecto significativo en la germinación de *Neobuxbaumia tetetzo* y *Prosopis laevigata*, pero si en *Agave marmorata*, aunque en todos los casos favorecen el crecimiento. Recientemente, Yépez-Hernández (2011) cuantificó las comunidades microbianas (bacterias totales, hongos totales, actinomicetos, bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre, microorganismos celulolíticos y solubilizadores de fósforo), asociadas a las CB y a IR formadas por *M. luisana*. Asimismo, Sandoval-Pérez (2011) determinó la disponibilidad de C y N así como la cobertura de las CB bajo la copa de *M. luisana* y fuera de esta. Sin duda, los estudios son aún escasos si se toma en cuenta que la mayoría del territorio mexicano es árido o semiárido, pero las evidencias indican que las IR soportan comunidades vegetales y microbianas, así como CB y, aunque esta interacción no se conoce claramente, en el Valle de Zapotitlán Salinas se observa la presencia de CB bajo la copa de *M. luisana* (Yépez-Hernández, 2011; Sandoval-Pérez, 2011).

## 2.4 Fauna del suelo

El suelo está habitado por una gran variedad de fauna, la cual se clasifica en tres principales grupos que han sido establecidos con base en su talla, los efectos que tienen en el suelo y su función dentro de la cadena trófica. Estos grupos son microfauna, mesofauna y macrofauna (Estrada-Venegas 2008; Lavelle, 1992; Wallwork, 1970). Dichos organismos influyen en el funcionamiento y desarrollo de los procesos de transformación de la materia

orgánica (Wolters, 2000), así como para el ciclo de los nutrientes y la estructura física del suelo (Neher, 1999). Organismos pequeños y grandes producen exudados y residuos que ayudan a unir las partículas minerales y orgánicas favoreciendo la estructura edáfica (Barajas-Guzmán y Álvarez-Sánchez, 2003; Bardgett y Griffiths, 1997), por lo que se ha considerado que la fauna es un indicador de la fertilidad del suelo (Huerta *et al.*, 2007).

La microfauna incluye todos los organismos con un tamaño menor a 200  $\mu\text{m}$ , dentro de este grupo están los protozoarios, nemátodos, tardígrados, rotíferos, colémbolos y ácaros de tamaño pequeño, su biomasa varía de 1.5 a 6  $\text{g m}^{-2}$  (Barajas-Guzmán y Álvarez-Sánchez, 2003; Estrada-Venegas, 2008), su hábitat es la película de agua entre los poros del suelo (Lavelle *et al.*, 1992). Algunos pueden sobrevivir a temperaturas extremas; por ejemplo, los nemátodos cuando las temperaturas son elevadas reducen su metabolismo permaneciendo en el lugar hasta que las condiciones son favorables (Manzanilla-López, 2008). Asimismo, la microfauna tiene un efecto sobre las poblaciones de la microflora (bacterias, actinomicetos, hongos y algas), ya que funciona como un regulador de estas poblaciones que le sirven de alimento (Linden *et al.*, 1994; Barajas-Guzmán y Álvarez-Sánchez, 2003; Estrada-Venegas, 2008). El efecto de sus desechos es directo, ya que se integran rápidamente al suelo (Estrada-Venegas, 2008).

La mesofauna está representada por colémbolos, ácaros, larvas de insectos, proturos y termitas (de tamaño pequeño), su biomasa es de aproximadamente 0.1 y 10  $\text{g m}^{-2}$  y tienen un tamaño que va de las 200  $\mu\text{m}$  a 1 cm (Barajas-Guzmán y Álvarez-Sánchez, 2003), se mueven en el espacio poroso del suelo, pero también pueden encontrarse en hábitats como epifitas, musgos y cortezas. Se conocen como “transformadores de la hojarasca”, debido a que se alimentan de restos vegetales, de igual manera, regulan las poblaciones de la microfauna ya que algunos son depredadores de nemátodos y protozoarios (Lavelle *et al.*,

1992). Este grupo puede contribuir a la creación de un microrelieve sobre la superficie del suelo (Langmaacka *et al.*, 2001; Andrés y Mateos, 2006).

La macrofauna es mayor a 1cm de longitud, está integrada por diplópodos, miriópodos, isópodos, lombrices, insectos y moluscos, su biomasa varía entre 0.1 y 2.5 g m<sup>-2</sup> (Barajas-Guzmán y Álvarez-Sánchez 2003); se les conoce como “los ingenieros del ecosistema” por el efecto físico que provocan en el suelo (Lavelle *et al.*, 1992; Brown *et al.*, 2001). Ingieren una mezcla de partículas orgánicas y minerales, desmenuzan la materia orgánica y la redistribuyen dentro del suelo (Estrada-Venegas, 2008), sus heces sirven de alimento para la microfauna, de la cual también son depredadores. Estos organismos tienen poca capacidad para soportar condiciones ambientales adversas, suelen moverse por el suelo y debido a su tamaño, colaboran directamente en la estabilización de la estructura edáfica (Vittorio, 1979), mejorando la aireación e infiltración del agua en el suelo.

## **2.5 Fauna edáfica en suelos de ecosistemas áridos y semiáridos**

En las zonas áridas y semiáridas se han estudiado dos principales grupos de fauna: los vertebrados (pequeños mamíferos, roedores y reptiles) y los invertebrados que incluyen varios insectos (hormigas, termitas, escarabajos), pequeños artrópodos (colémbolos y ácaros) (Steinberger, 1991; Santos y Whintford, 1981) y microorganismos como bacterias, actinomicetos, protozoarios, hongos, algas y cianobacterias (Skujins, 1991). Al igual que en otros ecosistemas, en las zonas áridas y semiáridas la actividad de la fauna es crítica en el ciclaje del N y C (Olser y Sommerkorn, 2007; Santos y Whintford, 1996; Zak y Whitford, 1998), son los principales descomponedores de la materia orgánica y activan las redes alimenticias en el suelo (Belnap, 2003; Olser y Sommerkork, 2007). Obtienen alimento de los tallos, ramas, hojas, inflorescencias, esqueletos de cactáceas y excremento de herbívoros (Steinberger, 1991; MacKay, 1991; Arriaga y Maya, 2006).

Las CB son una alfombra horizontal que protege y enriquece al suelo (Belnap y Lange, 2001), lo que las hace un microhábitat ideal para la fauna edáfica; sin embargo, esta función es prácticamente desconocida, sólo hay unos cuantos estudios que demuestran la presencia y preferencia de la fauna del suelo por los ambientes costrosos. Belnap (2001) estudió a los organismos del suelo y los constituyentes de las CB, reportando que las bacterias y los hongos son fuente de alimento para algunos artrópodos (Steinberger, 1991; Belnap, 2003; Hawkes, 2003); los microorganismos más estudiados son las bacterias y los hongos; en contraste, la microfauna y mesofauna son los menos estudiados (Castillo-Monroy y Maestre, 2011); tan sólo se ha documentado la densidad de nemátodos (Neher *et al.*, 2003; Darby *et al.*, 2007; 2009) y protozoarios (Bamforth, 2004; 2008) asociados a las CB. Larrey *et al.*, (2006) en el desierto de Namibia, examinaron la distribución de artrópodos en las CB dominadas por líquenes; finalmente Neher *et al.* (2009) reportaron las comunidades de microartrópodos asociadas con CB en la meseta de Colorado y en el desierto de Chihuahua.

Para México, no existen publicaciones sobre la fauna asociada a las CB, Fragoso *et al.* (2001), Brown *et al.* (2001) y Negrete-Yankelevich y Barois (2012) reportan que los estudios de fauna edáfica se concentran a los sistemas tropicales húmedos, la mayor parte son taxonómicos y la función ecológica de la fauna en los ecosistemas áridos y semiáridos no ha sido estudiada (Brown *et al.*, 2001). Los pocos trabajos realizados en zonas áridas son sobre: taxonomía de ácaros (Estrada *et al.*, 1988), riqueza de hormigas (Ríos-Casanova *et al.*, 2004) y la función de las termitas en la descomposición (Arriaga y Maya, 2006). Los estudios sobre la fauna edáfica y su relación con la fertilidad del suelo en estas zonas son escasos, sobre todo si se considera que casi el 60% del territorio mexicano es árido o semiárido y que presenta una cobertura vegetal dispersa con inter-espacios entre las plantas, los cuales están dominados por CB.

### 3. HIPÓTESIS

En el Valle semiárido de Zapotitlán Salinas, las CB cubren el suelo, lo enriquecen en recursos y mejoran las condiciones microambientales tanto en zonas sin vegetación como en islas de recursos de *M. luisana*, por lo que se espera que las CB incrementen la densidad y riqueza de taxa de fauna, en donde las CB asociadas a las islas de recursos y fuera de la islas tendrán una mayor riqueza y densidad de organismos que el suelo de áreas sin vegetación.

### 4. OBJETIVOS

#### General

Evaluar la influencia de *M. luisana*, de las costras biológicas (CB) y de la relación *M. luisana*-CB sobre la densidad y composición de taxa de fauna en relación con la disponibilidad de nutrimentos en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

#### Particulares

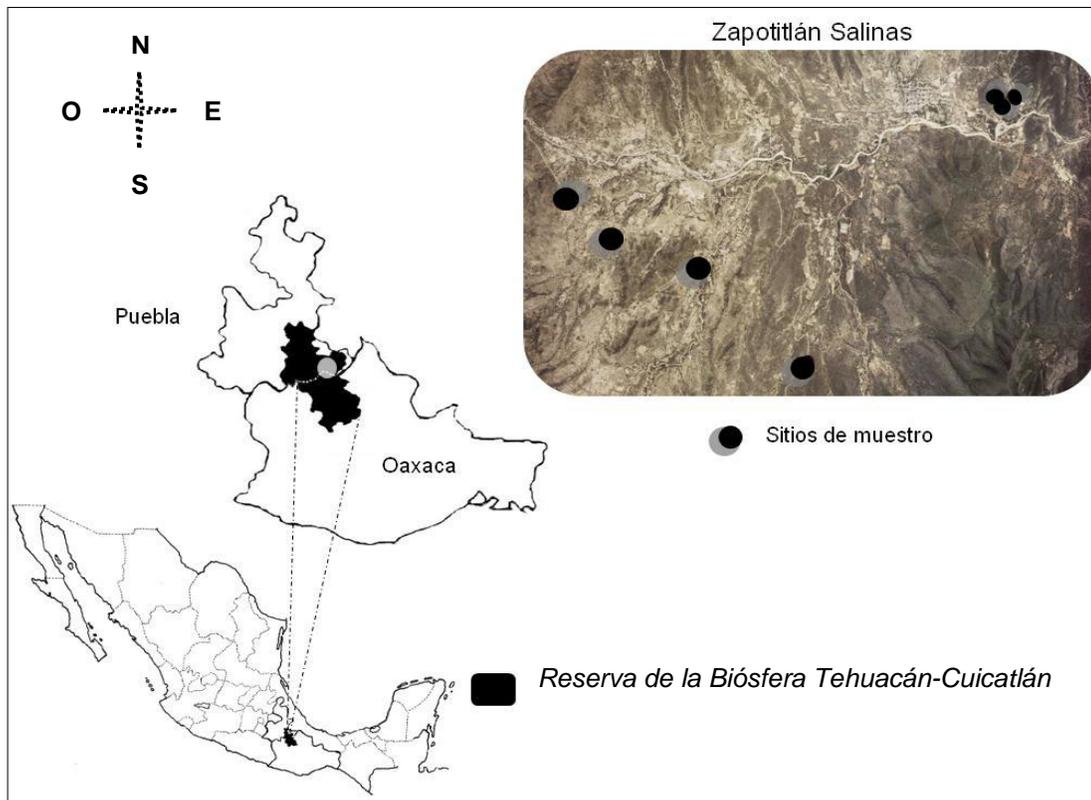
1. Cuantificar la densidad y riqueza de taxa de fauna en CB y en suelo dentro y fuera de las islas de recursos formadas por *M. luisana*.
2. Cuantificar las propiedades físicas y químicas en CB y en suelo dentro y fuera de las islas de recursos formadas por *M. luisana*.
3. Evaluar la variación estacional (seca vs. lluvias) del efecto de las CB sobre la densidad y riqueza de la fauna edáfica y propiedades físicas y químicas del suelo.
4. Determinar las variables edáficas que explican la densidad y riqueza de especies de la fauna en CB y en suelo dentro y fuera de las islas de recursos formadas por *M. luisana*

## 5. MATERIAL Y MÉTODOS

### 5.1 Área de estudio

El Valle de Zapotitlán Salinas se encuentra en la porción suroccidental del Valle de Tehuacán, y forma parte de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán (CONANP 2010) ubicada la región sureste del estado de Puebla y al noroeste del estado de Oaxaca. El Valle de Zapotitlán Salinas comprende una superficie aproximada de 86.76 km<sup>2</sup>; se ubica en los 18° 20' de latitud N y 97° 28' de longitud W. Su clima es seco semiárido (BSw) con una marcada época de lluvias en el verano. La precipitación media anual es 480 mm y su promedio de temperatura a lo largo de todo el año es de 21°C (Arias-Toledo *et al.*, 2000).

Este valle pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur y a la provincia florística del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Espinosa *et al.*, 2008). Sus suelos son someros y pedregosos, con diferentes niveles de alcalinidad y salinidad, producto de la influencia de los diferentes sustratos geológicos presentes en el valle. Las principales unidades de suelos reportadas en el valle son: Litosol, Cambisol cálcico, Regosol, Fluvisol calcárico y Xerosol cálcicos, derivados de evaporitas del Cretácico Inferior y Medio (García-Oliva, 1992). Estudios previos clasifican al suelo como Rendzinas, los cuales son suelos poco profundos, de 0-20 cm, de textura media: 41% arena, 37% limo y 22% arcillas, pH alcalino y con un 31% de materia orgánica (García-Oliva 1991; Perroni-Ventura *et al.* 2006). La vegetación dominante es el matorral xerófilo (Dávila *et al.*, 2002; Valiente-Banuet *et al.*, 1991); con dominancia de cactáceas columnares y leguminosas (Rzedowski, 1978) y donde predominan las familias: Cactaceae, Mimosaceae, Fabaceae, Simaroubaceae, entre otras (Dávila *et al.*, 2002).



**Figura 1.** Ubicación de los siete sitios en donde se realizó el muestreo de material biológico dentro del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

## 5.2 Diseño del estudio

Con base en estudios previos (García-Oliva 1992; Camargo-Ricalde 2002; Sandoval-Pérez 2011), se seleccionaron siete sitios de muestreo dentro del Valle de Zapotitlán Salinas, los cuales cumplen con las siguientes características: tienen un mismo tipo de suelo, Rendzinas, son poco profundos, de 0-20 cm, de textura media: 41% arena, 37% limo y 22% arcillas, pH alcalino y con un 31% de materia orgánica (García-Oliva 1992; Perroni-Ventura *et al.* 2006). Otra característica importante fue la presencia de la leguminosa *Mimosa luisana* así como de las CB bajo su copa y en áreas abiertas, lo que permitió tomar a cada uno de los sitios como réplicas.

En cada sitio se estableció una parcela de 20 x 50 m (1000 m<sup>2</sup>) y con una pendiente no mayor a 10° de inclinación, la cual fue considerada como la unidad de muestreo, en total se tuvieron 7 parcelas réplica. Cada parcela estuvo separada de las otras por al menos 2 km de distancia y se distribuyeron en el Valle de Zapotitlán Salinas. Cada parcela se dividió a lo largo en tres secciones iguales (16.66 m). En cada sección se seleccionaron dos individuos adultos de *M. luisana* con características estructurales similares en altura (2 a 3 m) y diámetro de copa (2 a 3 m), dos áreas con CB, pero sin el resguardo de la copa de *M. luisana* y dos áreas de suelo desnudo, es decir sin presencia de CB ni cubierta vegetal (área abierta). Esta área abierta se consideró como el sitio control. Se colectaron, tanto dentro como fuera de la copa de *M. luisana*, las CB y el suelo que se encuentra por bajo de las CB, así como suelo del área abierta, ambos suelos a una profundidad de 3 cm. Al final se obtuvieron muestras provenientes de cinco microhábitats: *i*) CB dentro de la isla de recursos (IR) formada bajo la copa de *M. luisana* (CB-IR), *ii*) el suelo bajo la CB dentro de IR- *M. luisana* (SCB-IR), *iii*) CB fuera de IR-*M. luisana* (CB-FIR), *iv*) suelo debajo de la CB fuera de IR (SCB-FIR) y *v*) suelo del área abierta (SAA).

### 5.3 Colecta de las costras biológicas y del suelo

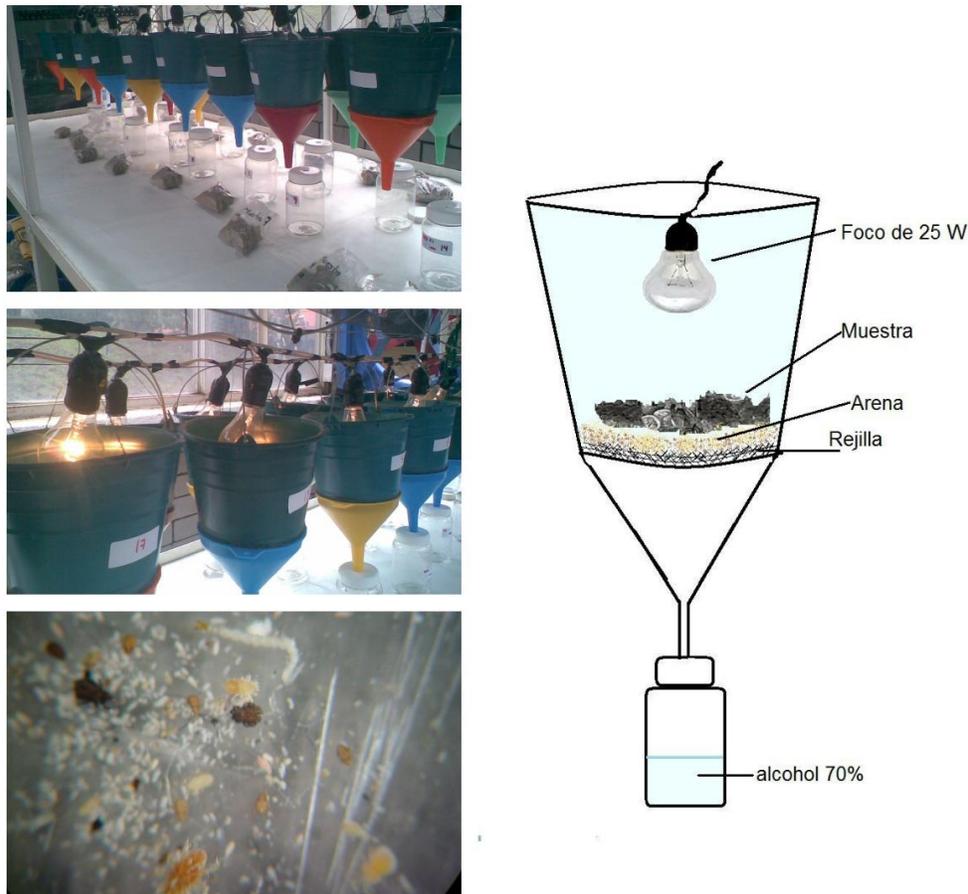
Las CB y el suelo se colectaron de cada uno de los microhábitats en cada sección de una parcela, para dar como resultado 6 submuestras por cada microhábitat en cada parcela. Se obtuvieron finalmente 5 muestras compuestas por parcela, una por cada microhábitat (2kg de muestra). Estas se obtuvieron mezclando las 6 submuestras de cada microhábitat, para obtener como resultado 3 muestras compuestas de suelo y 2 muestras compuestas de CB para cada parcela de muestreo. El muestreo se realizó en la estación lluviosa (septiembre de 2011) y en la estación seca (febrero de 2012), empleando el mismo diseño y métodos. Las CB se colectaron con ayuda de una espátula, el suelo bajo la CB y en el SAA se colectó de los primeros 3 cm de profundidad con ayuda de una pala y una cinta métrica. Es importante

señalar que el suelo asociado a la CB se recolectó de la parte central y directamente por debajo de las CB. Las muestras de suelo y CB fueron almacenadas en bolsas negras etiquetadas y se refrigeraron a 4 °C hasta ser procesadas en el laboratorio. Antes de la colecta, la temperatura de la CB y el suelo se registró *in situ* con un termómetro de electrodo (OBH Nórdica 4770), en cada uno de los microhábitats de las parcelas (al menos tres puntos por sección de cada parcela). Los registros de temperatura para cada uno de los microhábitats en las siete parcelas se obtuvieron sobre la marcha de las horas del día, obteniendo registros a partir de las 10: 00 h hasta las 19: 00 h del día. Asimismo, previo a la colecta, se obtuvo un monolito de suelo de cada microhábitat para determinar la densidad aparente del suelo. El monolito de suelo se obtuvo usando un tubo de un diámetro de 5.5 cm y una profundidad de 3 cm, el cual se enterró de forma uniforme en el suelo. El suelo del monolito fue secado en un horno a 75 °C por 72 h y, una vez seco y a peso constante, se calculó la densidad del suelo (Ortíz-Villanueva y Ortiz-Solorio, 1990).

#### **5.4 Extracción de la fauna de la costra biológica y del suelo**

Para la cuantificación de la fauna se utilizó el sistema de embudos tipo Berlese (Figura 2), el cual está diseñado para la extracción de mesofauna, pero también permiten el paso de la microfauna (Vittorio, 1979; Wallwork, 1970; Moreira *et al.*, 2012). Este sistema se elaboró con un recipiente circular unido a un dispositivo cónico, ambos de plástico, con un fondo de rejilla de mosquitero de 1.5 mm de abertura. Se utilizó un sistema por cada muestra colectada tanto para CB como para el suelo, cada sistema fue limpiado y todos se colocaron dentro del invernadero de la FES-Zaragoza. Para evitar que el suelo se escurriera se colocó sobre la rejilla del embudo una capa de arena lavada con agua corriente y esterilizada en un autoclave a una temperatura de 120°C y una presión 15 lb plg<sup>-2</sup> durante 2 horas. Sobre la capa de arena se colocaron 300g de cada una de las muestras de CB o de suelo. Como fuente de luz y calor se utilizó un foco de 25 watts, el cual permaneció encendido las 24

horas durante todos los días que duró el proceso de extracción, con la finalidad de inducir a los organismos a ir hacia el fondo del embudo, donde fueron recuperados en frascos con alcohol etílico al 70% para su preservación. Las muestras permanecieron 17 días dentro de los embudos, tiempo que duró el proceso de extracción de la fauna.



**Figura 2.** Sistema de extracción de fauna de costras biológicas y del suelo mediante embudos tipo Berlese modificados, cuyo principio es que los organismos se mueven hacia abajo (donde son colectados en alcohol) cuando se incrementa la temperatura y la muestra pierde humedad.

La recolección de los organismos fijados en el alcohol se realizó diario y a los que fueron extraídos se les colocó en frascos de plástico etiquetados con una clave, número de muestra y día de recolección. Al final, todas las muestras de suelo y costra de cada embudo fueron observadas al estereoscopio (4X) para recuperar los organismos de mayor tamaño

(macrofauna) que no fueron extraídos mediante el embudo o que pudieron quedar atrapados por el secado de las muestras.

### **5.5 Densidad, riqueza y diversidad de taxa de fauna en costra biológica y suelo**

Se contaron todos los individuos recuperados (densidad total) y los individuos de cada grupo o taxa faunístico (densidad por taxa). La densidad fue expresada en individuos por m<sup>2</sup> al multiplicar los conteos por la densidad real de la CB o del suelo. Se trabajó la fauna como taxa debido a que los organismos fueron únicamente identificados a nivel de clase, orden o familia y el nivel de identificación fue diferente entre cada grupo de fauna registrado. La determinación taxonómica de los organismos recolectados se hizo con la ayuda de claves, literatura especializada y descripciones científicas como las de: Mille (1993, invertebrados), Chu (1942, invertebrados), Burruss (1979, ácaros) y Vázquez y Palacios-Vargas (2004, colémbolos); no obstante, todo el material fue posteriormente verificado por medio de asesoría de especialistas (M. en C. María del Carmen Herrera Fuentes y M. en B. Jesús Campos-Serrano, ambos del Laboratorio de Zoología, Departamento de Biología de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa).

Se obtuvo la riqueza de taxa (S) observada por cada microhábitat y la diversidad de taxa mediante dos índices: 1) Shannon-Wiener (H') y 2) Simpson ( $\lambda$ ), debido a que uno da mayor peso a los taxa raros y el otro a los taxa dominantes (Moreno, 2001; Magurran, 2004). Asimismo, se estimó la equidad de los taxa en cada microhábitat con el índice de equidad de Pielou (Magurran, 2004). El índice H' fue calculado mediante la fórmula  $\sum p_i \ln(p_i)$ , donde  $p_i$  es la proporción (densidad relativa) de cada taxa  $i$  ( $n_i/N$ ; N= densidad total) (Magurran, 2004); el índice de  $\lambda$  con la fórmula  $\sum p_i^2$ , donde las  $p_i$  también fueron la proporción de cada taxa (Moreno 2001). La equidad de Pielou mide la proporción de la diversidad de taxa observada con relación a la máxima diversidad esperada, sus valores van de 0 a 1, donde

un valor mayor a 0 correspondió a microhábitats donde todos los taxa son igualmente abundantes y por lo tanto hay mayor equidad; esta fue calculada como  $J' = H/H_{max}$ , donde  $H_{max} = \ln(S)$  (Moreno 2001).

Los cambios en la composición de taxa de fauna entre microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR y SAA) y entre estaciones (seca y lluviosa), se analizaron mediante el Índice de Disimilitud (Magurran, 2004), por el método de Ward con distancias euclidianas basado en una matriz de datos de presencia-ausencia de taxa, el cual se realizó en el software Statistica 6.0. El índice es igual a 0 en los casos de similitud completa; es decir, cuando la composición de taxa de dos microhábitats son idénticas, y es del 100% si los microhábitats no tienen taxa en común (Magurran, 2004). Este índice permitió estimar la proporción de taxa de fauna que se comparten entre los microhábitats y estaciones de muestreo.

## **5.6 Análisis físico y químico de la costra biológica y del suelo**

Las muestras de CB y suelo fueron secadas al aire, cada muestra se tamizó en una malla del número 10 (2 mm de abertura), en el caso de las CB, estas fueron previamente trituradas en un mortero de agata con pistilo, todas las muestras se colocaron en bolsas limpias y fueron etiquetadas.

El pH activo de la CB y del suelo se determinó en una suspensión de 1:2 p/v en agua desionizada con un potenciómetro (Corning). La humedad se calculó por el método gravimétrico, a partir del secado de 5g de una submuestra de CB o suelo durante 72 hrs, hasta peso constante. La densidad aparente de la CB y del suelo se obtuvo por el método del cilindro (Ortiz-Villanueva y Ortiz-Solorio, 1990).

La materia orgánica de la CB y del suelo (MOS) se cuantificó utilizando el método de Walkley-Black propuesto por Jackson (1964). Para ello, se pesaron 5g de muestra y se agregaron 10mL de  $K_2Cr_2O_7$  y 10mL de  $H_2SO_4$  concentrado y se agitó. Al final se agregaron 10mL de  $H_3PO_4$ , 0.1g de NaF y 20 gotas de difenilamina. La cuantificación se realizó mediante una titulación con  $FeSO_4$ . El carbono orgánico se estimó a partir de los valores de MOS. El nitrógeno total (Nt) del suelo se determinó por el método semimicro-Kjeldahl modificado para incluir nitratos, propuesto por Bremner (1965). Primero fue necesario realizar una pre digestión, para lo cual se tomó 0.1g de la muestra, se le adicionaron 4mL de una mezcla de ácido sulfúrico-salicílico y se dejó en reposo por 24h. Posteriormente, se añadieron 0.5g de  $Na_2S_2O_3$  y 1.1g de mezcla catalizadora ( $K_2SO_4$ , 10g;  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , 1g; Selenio metálico, 0.1g) y se puso a digerir a una temperatura de  $350^\circ C$  hasta que la muestra se tornó clara. La muestra se mezcló con 3mL de agua destilada y se destiló. Para esto la muestra fue transferida a un bulbo de destilación y se le añadieron 10mL de NaOH 10N. El amonio liberado se colectó en un matraz con 10mL de  $H_3BO_3$ . La cuantificación se realizó mediante una titulación con  $H_2SO_4$  0.05N.

Las formas inorgánicas disponibles de nitrógeno (amonio,  $NH_4^+$  y nitrato,  $NO_3^-$ ) fueron extraídas con KCl 2N, los extractos se filtraron a través de papel Whatman No. 1 y fueron determinados por colorimetría por el método de fenol-hipoclorito y leídos en un auto-analizador Bran+Luebbe Auto Analyzer III (Robertson *et al.*, 1999). El fósforo inorgánico disponible ( $PO_4^{3-}$ ) se determinó por el método de Olsen (1965). Para esto se pesaron 2.5g de cada muestra y se colocaron en tubos de plástico, los cuales fueron tapados con una película plástica para evitar su posible contaminación. Se adicionaron 50mL de solución extractora ( $NaHCO_3$ , 42g; pH ajustado a 8.5, con NaOH 10N; aforar a 1L) y se agitaron durante 30 min a 180 oscilaciones por minuto. Posteriormente, se filtraron los extractos con algodón. Se tomó una alícuota de 5mL del filtrado y se colocó en un matraz aforado de

50mL, se adicionó agua, 5mL de solución reductora ( $C_6H_8O_6$ , 0.5g; solución de molibdato de amonio, 100mL), se aforó y se agitó. La cuantificación se realizó en un espectrofotómetro para leer la absorbancia después de 30 min a 882nm. Paralelamente se preparó una curva de calibración de P que sirvió para calcular la concentración de P por interpolación.

Con los valores de C y N, en las mismas unidades, se calculó el cociente C:N al dividir la concentración de C entre la del N, y con los valores de amonio y nitrato el cociente  $NO_3:NH_4$  al dividir la concentración de nitrato entre la del amonio. El primer cociente fue usado como un índice de calidad de la MOS, en donde un valor mayor implicó una menor calidad y un valor más pequeño una mayor calidad. Por su parte, el segundo cociente fue utilizado como un indicador de la nitrificación del amonio, en donde un valor alto del cociente indicó una mayor intensidad de nitrificación comparado con un valor bajo del cociente.

### 5.7 Análisis estadístico de los datos

En todos los casos los datos fueron expresados en gramos de peso seco. La densidad de los organismos se expresó en individuos por  $m^2$  y los valores de los nutrientes en concentraciones. Los datos se sometieron a un análisis de varianza de medidas repetidas (RMANOVA) con un factor entre grupos (microhábitats: CB-IR, SCB-IR, CB-FIR, SCB-FIR y SAA) y otro dentro de grupos (fechas de muestreo: seca y lluvias). Los promedios se compararon usando una prueba de Tukey's HSD (von Ende, 1993; Sokal y Rohlf, 1995). Una  $p \leq 0.05$  se consideró como significativa en todos los casos. En algunos casos necesarios, como el de la densidad total y densidad por taxa de fauna, los datos fueron transformados a logaritmo base 10, para satisfacer los supuestos de la distribución normal para el RMANOVA; sin embargo, los datos se expresan en sus unidades originales de medición.

Un análisis de correspondencia canónica (ACC) fue realizado para identificar patrones de asociación entre la composición-densidad de taxa de fauna y las propiedades edáficas de los microhábitats. En este análisis únicamente se usaron datos de grandes taxa. Una permutación de Monte Carlo fue utilizada para probar la significancia ( $p \leq 0.05$ ) del primero y segundo eje en el modelo total de ACC. Los resultados del ACC fueron graficados en un plano bidimensional, donde los vectores corresponden a las variables edáficas y los grupos de taxa están representados por puntos. Los vectores con mayor longitud indican una correlación más fuerte con los ejes de ordenación que los vectores más cortos, por lo que tienen mayor poder predictivo sobre la presencia de los taxa. Asimismo, el porcentaje de varianza explicado por los ejes de ordenación fue expresado en el gráfico. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa Statistica ver. 6.1 (Statsoft 2000).

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Fauna en el suelo y en las costras biológicas

La densidad total de organismos por metro cuadrado fue afectada por la interacción entre el microhábitat y la estación (Cuadro 1). El microhábitat formado por la CB, tanto en IR como FIR, tuvo aproximadamente el doble de densidad que los microhábitats del suelo (Cuadro 2). En la temporada de lluvias, la CB-IR y la CB-FIR tuvieron mayor densidad total de organismos por m<sup>-2</sup> que el suelo bajo la CB-IR; mientras que la menor densidad se registró en SCB-FIR y SAA. En contraste, en la estación seca, la densidad de organismos fue similar entre la CB y el suelo bajo la CB tanto dentro como fuera de la isla de recursos formada por *M. luisana*, pero el microhábitat con la menor densidad fue SAA (Cuadro 2; Figura 3).

**Cuadro 1.** Valores de *F* y sus niveles de significancia con un ANOVA de medidas repetidas para fauna de la costra biológica y del suelo de cinco microhábitats y dos estaciones (lluvias y secas) en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

| Variables          | Fuente de variación |                    |                    |
|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
|                    | Entre grupos        | Dentro de grupos   |                    |
|                    | Microhábitat (M)    | Estación (E)       | M × E              |
| <b>Fauna</b>       |                     |                    |                    |
| Densidad total     | 1.60 <sup>ns</sup>  | <b>19.57***</b>    | <b>9.23**</b>      |
| Ácari              | <b>6.01*</b>        | <b>22.3***</b>     | <b>7.72**</b>      |
| Insecta            | <b>3.75*</b>        | 0.33 <sup>ns</sup> | 0.78 <sup>ns</sup> |
| Collembola         | <b>3.28*</b>        | <b>4.48*</b>       | 0.22 <sup>ns</sup> |
| Nematoda           | 0.04 <sup>ns</sup>  | <b>5.62*</b>       | 0.42 <sup>ns</sup> |
| Pseudoescorpionida | -                   | -                  | -                  |
| Diplura            | 1.60 <sup>ns</sup>  | 0.39 <sup>ns</sup> | <b>2.32*</b>       |
| Araneae            | -                   | -                  | -                  |
| Chilopoda          | -                   | -                  | -                  |

**Nota:** ns= no significativo; \*  $p \leq 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$ ; \*\*\* $p < 0.001$ . El guion significa no presencia de individuos en al menos una estación

Se observaron ocho grandes taxa (Cuadro 2). Acari fue el más abundante y su densidad varió entre microhábitats dependiendo de la estacionalidad de la lluvia (Cuadro 1).

En lluvias, la densidad de este taxa fue mayor en CB-IR y en CB-FIR, intermedia en SCB-IR y SCB-FIR, y menor el SAA. En contraste, en secas, la CB y el SCB dentro y fuera de IR tuvieron similar densidad de organismos y, únicamente el microhábitat SAA presentó una menor densidad de ácaros (Cuadro 2; Figura 4a). Se determinaron tres órdenes de ácaros: Oribatida, Prostigmata y Mesostigmata (Figura 7a). Oribatida fue el más abundante seguido por Prostigmata. Oribatida estuvo presente en todos los microhábitats y en las dos estaciones; en cambio Prostigmata se observó en todos los microhábitats, excepto en SAA durante la temporada de seca. En contraste, Mesostigmata sólo se presentó CB dentro y fuera de la isla de recursos (Cuadro 3; Figura 3).

Insecta (Figura 7b) fue el segundo taxa más abundante con ocho órdenes y cuya densidad, en un rango de 136 a 816 ind m<sup>-2</sup> (Cuadro 3) fue afectada por el microhábitat (Cuadro 1). La densidad de este taxa fue mayor en CB-IR y en SCB-IR, mientras que la CB-FIR y el SCB-FIR presentaron una densidad intermedia y el SAA tuvo la menor densidad de organismos de insecta (Cuadro 2; Figura 4b). En este gran taxa los órdenes más abundantes fueron Psocoptera y Hemiptera, mientras que el orden con menor densidad fue Neuróptera. Thysanoptera y Lepidoptera sólo se reportaron en CB-IR y en CB-FIR (Cuadro 3).

Collembola (Figura 7c) fue el tercer taxa más abundante, cuya densidad de organismos fue afectada por el microhábitat y la estación (Cuadro 1). La densidad de Collembola fue mayor en el suelo que en la CB, en particular en el SCB-IR. En el suelo, la densidad de este taxa fue también mayor en la estación lluviosa que en la seca (Cuadro 2; Figura 4e). Este grupo estuvo presente en todos los microhábitats durante la temporada de lluvias, pero en secas no se registró ningún organismo en los microhábitats SCB-FIR y SAA (Cuadros 2 y 3).

**Cuadro 2** Valores promedio ( $\pm$  error estándar) de densidad total y de cada taxa de la fauna de costra biológica y del suelo en cinco microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR y SAA) y en dos estaciones (lluvias y secas) en un ecosistema semiárido en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

| Taxa (ind m <sup>-2</sup> )         | Microhábitats            |                           |                           |                           |                           |
|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                                     | CB-IR                    | CB-FIR                    | SCB-IR                    | SCB-FIR                   | SAA                       |
| <b>Densidad total de organismos</b> |                          |                           |                           |                           |                           |
| Lluvias                             | 9921(3790) <sup>Aa</sup> | 7010 (3533) <sup>Ca</sup> | 43156 (957) <sup>Ba</sup> | 2554 (613) <sup>Da</sup>  | 2024 (1257) <sup>Da</sup> |
| Secas                               | 1599 (147) <sup>Ab</sup> | 1370 (551) <sup>Ab</sup>  | 1360 (287) <sup>Ab</sup>  | 1532 (1160) <sup>Ab</sup> | 320 (116) <sup>Bb</sup>   |
| <b>Ácari</b>                        |                          |                           |                           |                           |                           |
| Lluvias                             | 9481(3688) <sup>Aa</sup> | 6849(3528) <sup>Ba</sup>  | 3771(794) <sup>Ca</sup>   | 2469 (630) <sup>Ca</sup>  | 1950 (1268) <sup>Da</sup> |
| Secas                               | 1466 (192) <sup>Ab</sup> | 1271(555) <sup>Ab</sup>   | 1205 (308) <sup>Ab</sup>  | 1405 (353) <sup>Ab</sup>  | 247 (164) <sup>Bb</sup>   |
| <b>Insecta</b>                      |                          |                           |                           |                           |                           |
| Lluvias                             | 200 (79) <sup>Aa</sup>   | 83 (33) <sup>Ba</sup>     | 156 (117) <sup>Aa</sup>   | 21 (21) <sup>Ba</sup>     | -                         |
| Secas                               | 67 (35) <sup>Aa</sup>    | 99 (39) <sup>Aa</sup>     | 117 (46) <sup>Aa</sup>    | 85 (44) <sup>Aa</sup>     | 49 (29) <sup>Ba</sup>     |
| <b>Collembola</b>                   |                          |                           |                           |                           |                           |
| Lluvias                             | 97 (35) <sup>Aa</sup>    | 27 (17) <sup>Ba</sup>     | 350 (212) <sup>Aa</sup>   | 21(21) <sup>Ba</sup>      | 48 (29) <sup>Ba</sup>     |
| Secas                               | 53 (83) <sup>Ab</sup>    | 17 (17) <sup>Bb</sup>     | 19 (19) <sup>Bb</sup>     | -                         | -                         |
| <b>Nematoda</b>                     |                          |                           |                           |                           |                           |
| Lluvias                             | 51 (51) <sup>Aa</sup>    | 51 (51) <sup>Aa</sup>     | 19 (19) <sup>Aa</sup>     | 21 (21) <sup>Aa</sup>     | 25 (25) <sup>Aa</sup>     |
| Secas                               | -                        | -                         | -                         | -                         | 25 (25) <sup>Aa</sup>     |
| <b>Pseudoescorpio-nida</b>          |                          |                           |                           |                           |                           |
| Lluvias                             | 33 (22) <sup>Aa</sup>    | 17 (17) <sup>Aa</sup>     | 19 (19) <sup>Aa</sup>     | 21 (21) <sup>Aa</sup>     | -                         |
| Secas                               | -                        | -                         | -                         | -                         | -                         |
| <b>Diplura</b>                      |                          |                           |                           |                           |                           |
| Lluvias                             | 66 (66) <sup>Aa</sup>    | -                         | -                         | -                         | -                         |
| Secas                               | -                        | -                         | -                         | 43 (43) <sup>Aa</sup>     | -                         |
| <b>Aracnea</b>                      |                          |                           |                           |                           |                           |
| Lluvias                             | -                        | -                         | -                         | -                         | -                         |
| Secas                               | -                        | -                         | 19 (19) <sup>Aa</sup>     | -                         | -                         |
| <b>Chilopoda</b>                    |                          |                           |                           |                           |                           |
| Lluvias                             | -                        | -                         | -                         | -                         | -                         |
| Secas                               | 17 (17) <sup>Aa</sup>    | -                         | -                         | -                         | -                         |

Las letras mayúsculas (A, B, C...) indican que los promedios son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ) entre microhábitats. Las letras minúsculas (a y b) indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los promedios de las estaciones dentro de un mismo microhábitat;  $n = 7$ .

**NOTA:** CB-IR= costra biológica dentro de islas de recursos formadas por *M. luisana*; CB-FIR= costra biológica fuera de islas de recursos formadas por *M. luisana*; SCB-IR= suelo bajo la costra biológica dentro de islas de recursos formadas por *M. luisana*; SCB-FIR= suelo bajo la costra biológica fuera de islas de recursos formadas por *M. luisana*; SAA= suelo de área abierta.

La densidad de Nematoda fue afectada sólo por la estación (Cuadro 1). La densidad de organismos fue mayor en la estación lluviosa que en la estación seca. Asimismo, este

taxa se presentó en todos los microhábitats en la temporada de lluvias, pero en la época seca solamente fue registrado en el microhábitat SAA (Cuadros 2 y 3; Figura 4f).

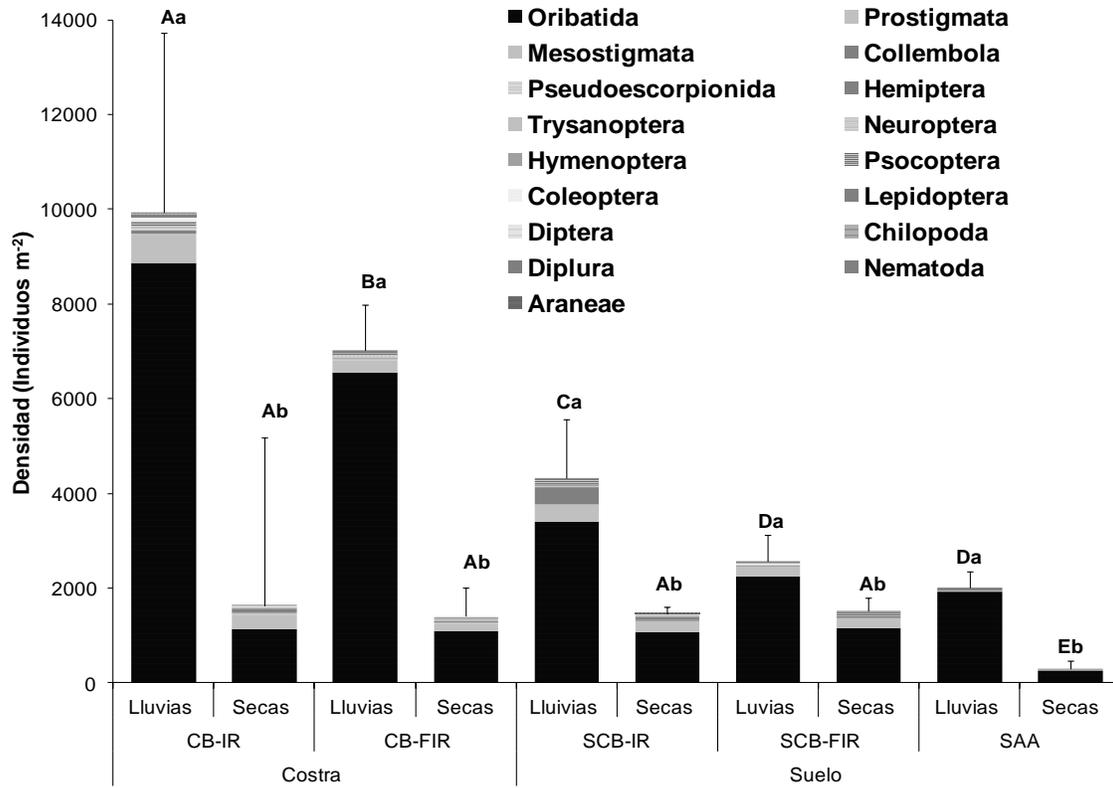
**Cuadro 3.** Densidad total de cada taxa de fauna (individuos por m<sup>2</sup>) de costra biológica y del suelo en cinco microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR y SAA) y en dos estaciones (lluvias y secas) en un ecosistema semiárido en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

| Taxa (ind m <sup>-2</sup> ) | Microhábitats |      |        |      |        |      |         |      |       |      |
|-----------------------------|---------------|------|--------|------|--------|------|---------|------|-------|------|
|                             | CB-IR         |      | CB-FIR |      | SCB-IR |      | SCB-FIR |      | SAA   |      |
|                             | LI            | S    | LI     | S    | LI     | S    | LI      | S    | LI    | S    |
| <b>Acari</b>                |               |      |        |      |        |      |         |      |       |      |
| Oribatida                   | 62049         | 7931 | 45867  | 7625 | 23814  | 7484 | 15645   | 8344 | 13478 | 1728 |
| Prostigmata                 | 4199          | 2099 | 1733   | 1040 | 2586   | 953  | 1639    | 1490 | 173   | -    |
| Mesostigmata                | 117           | 233  | 347    | 231  | -      | -    | -       | -    | -     | -    |
| <b>Insecta</b>              |               |      |        |      |        |      |         |      |       |      |
| Hemiptera                   | 117           | 223  | 116    | 116  | -      | 408  | -       | 298  | -     | -    |
| Psocoptera                  | 816           | -    | 232    | -    | 816    | 136  | -       | 298  | -     | 346  |
| Coleoptera                  | 583           | 117  | -      | 116  | -      | -    | 149     | -    | -     | -    |
| Hymenoptera                 | -             | -    | -      | 231  | 272    | 136  | -       | -    | -     | -    |
| Thysanoptera                | 234           | 117  | -      | 347  | -      | -    | -       | -    | -     | -    |
| Lepidoptera                 | 350           | -    | -      | -    | -      | -    | -       | -    | -     | -    |
| Diptera                     | 117           | -    | -      | -    | -      | 136  | -       | -    | -     | -    |
| Neuroptera                  | -             | -    | 116    | -    | -      | -    | -       | -    | -     | -    |
| <b>Collembola</b>           | 467           | 583  | 116    | 117  | 2499   | 136  | 149     | -    | 346   | -    |
| <b>Nematoda</b>             | 117           | -    | 116    | -    | 136    | -    | 149     | -    | 172   | 172  |
| <b>Diplura</b>              | -             | -    | 462    | -    | -      | -    | -       | 298  | -     | -    |
| <b>Pseudoescorpionida</b>   | 223           | -    | 116    | -    | 136    | -    | 149     | -    | -     | -    |
| <b>Aranea</b>               | -             | -    | -      | -    | -      | 136  | -       | -    | -     | -    |
| <b>Chilopoda</b>            | 117           | -    | -      | -    | -      | -    | -       | -    | -     | -    |

LI= Estación de Lluvias; S = Estación de Secas. **NOTA:** consultar las siglas de los microhábitats en la nota al final del cuadro 2.

Otros taxa fueron también registrados (Figura 7c), pero en baja densidad (de 19 a 66 org. m<sup>-2</sup>) y la mayoría sólo se observaron en las muestras colectadas en una sola temporada. Así, Pseudoescorpionida se encontró en casi todos los microhábitats, excepto en SAA, únicamente en lluvias, y presentó una mayor densidad de organismos en la CB-IR (Cuadros 2 y 3; Figura 4c). Diplura se registró en la temporada seca en CB-FIR y en SCB-FIR, y en lluvias únicamente se presentó en la CB-IR (Cuadros 2 y 3; Figura 4d). Los grupos, Araneae

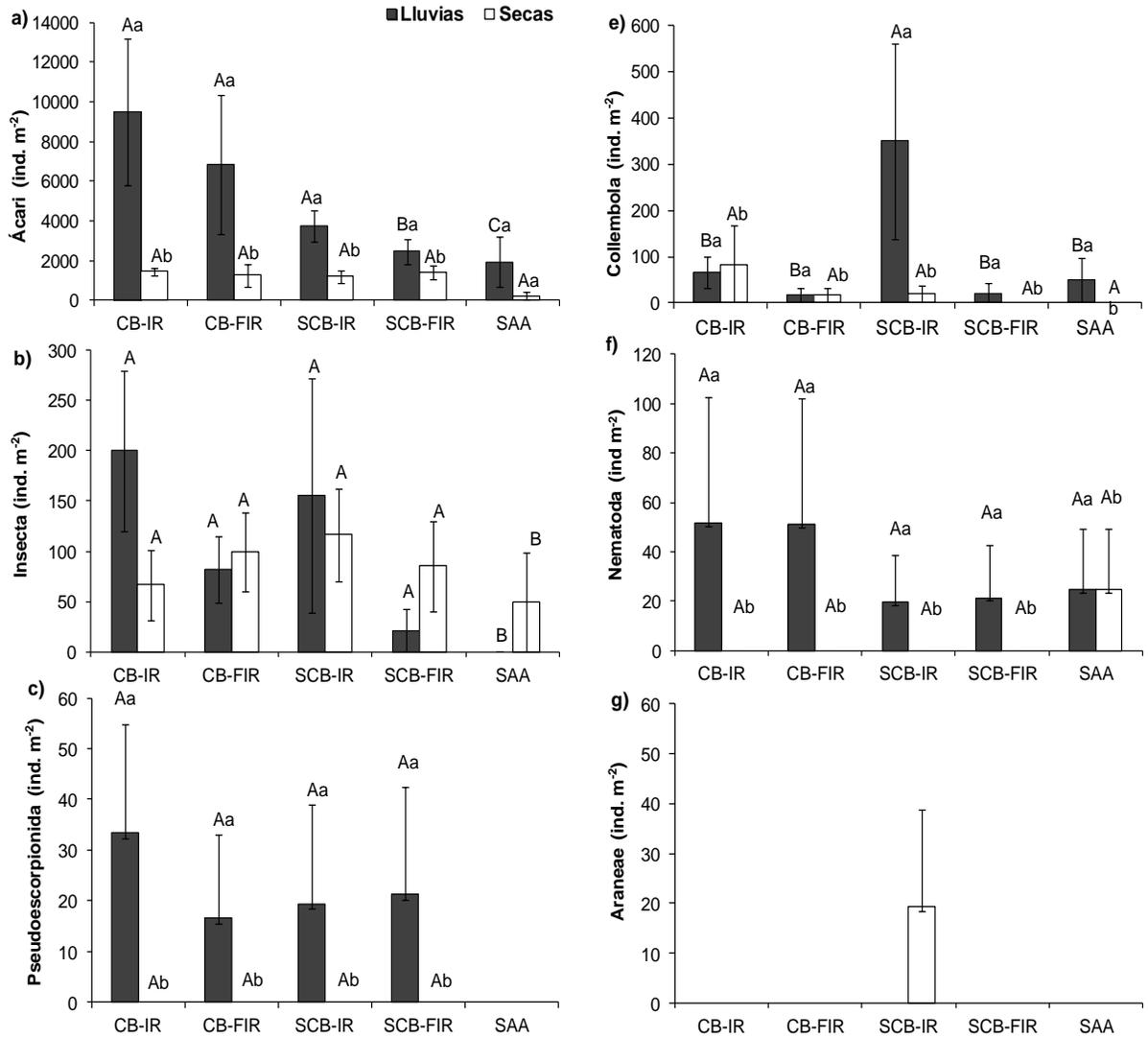
y Chilopada, se encontraron en un sólo microhábitat, en SCB-IR en lluvias y en la CB-IR en secas, respectivamente (Cuadros 2 y 3; Figuras 4g y 4h).



**Figura 2.** Densidad total y por cada taxa de fauna registrados en la costra biológica y en el suelo de cinco microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR y SAA) en dos estaciones (lluvias y secas) en un ecosistema semiárido del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

**NOTA:** CB-IR= costra biológica dentro de islas de recursos formadas por *M. luisana*; CB-FIR= costra biológica fuera de islas de recursos formadas por *M. luisana*; SCB-IR= suelo bajo la costra biológica dentro de islas de recursos formadas por *M. luisana*; SCB-FIR= suelo bajo la costra biológica fuera de islas de recursos formadas por *M. luisana*; SAA= suelo de área abierta.

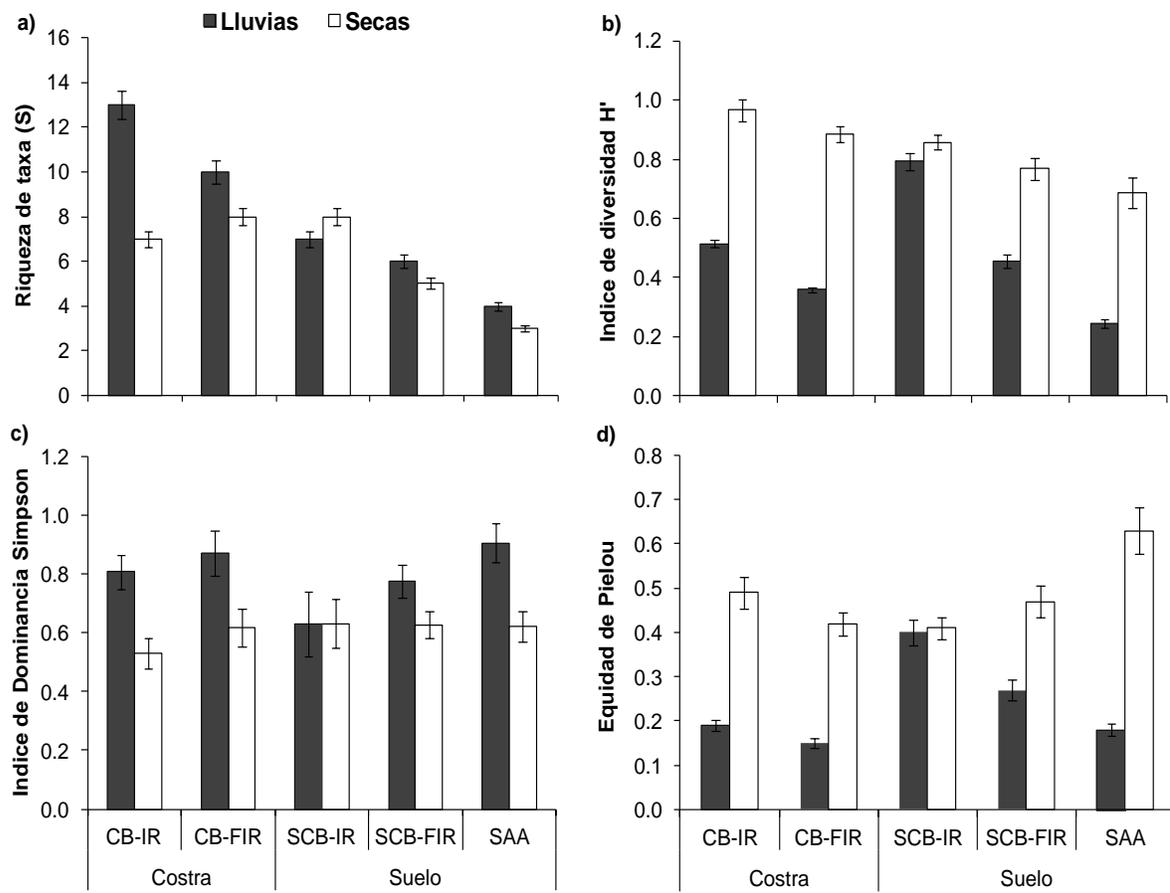
La riqueza de taxa (S) en costras de la temporada lluviosa fue mayor en CB-IR y CB-FIR con 13 y 10 órdenes respectivamente, que en la temporada seca (CB-IR y CB-FIR, con 7 y 8 órdenes respectivamente; Figura 5a). En cambio, en el suelo, la riqueza de taxa fue menor, variando entre 3 y 8 órdenes y sin diferencias estacionales. La riqueza de taxa fue mayor en SCB-IR, intermedia en SCB-FIR y menor en SAA (Figura 5a).



**Figura 4.** Variación estacional de la densidad promedio ( $\pm$  error estándar) de cuatro taxa de fauna de la costra biológica y del suelo: **(a)** Acari, **(b)** Insecta, **(c)** Pseudoescorpionida, **(d)** Diplura **(e)** Collembola, **(f)** Nematoda, **(g)** Aracneae y **(h)** Chilopoda de cinco microhábitats en un ecosistema semiárido del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. Las letras mayúsculas (A, B...) indican que los promedios son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ) entre microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR y SAA). Las letras minúsculas (a y b) indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los promedios de las estaciones (secas y lluvias) dentro de un mismo microhábitat. **NOTA:** consultar siglas del eje de las x en la figura 1.

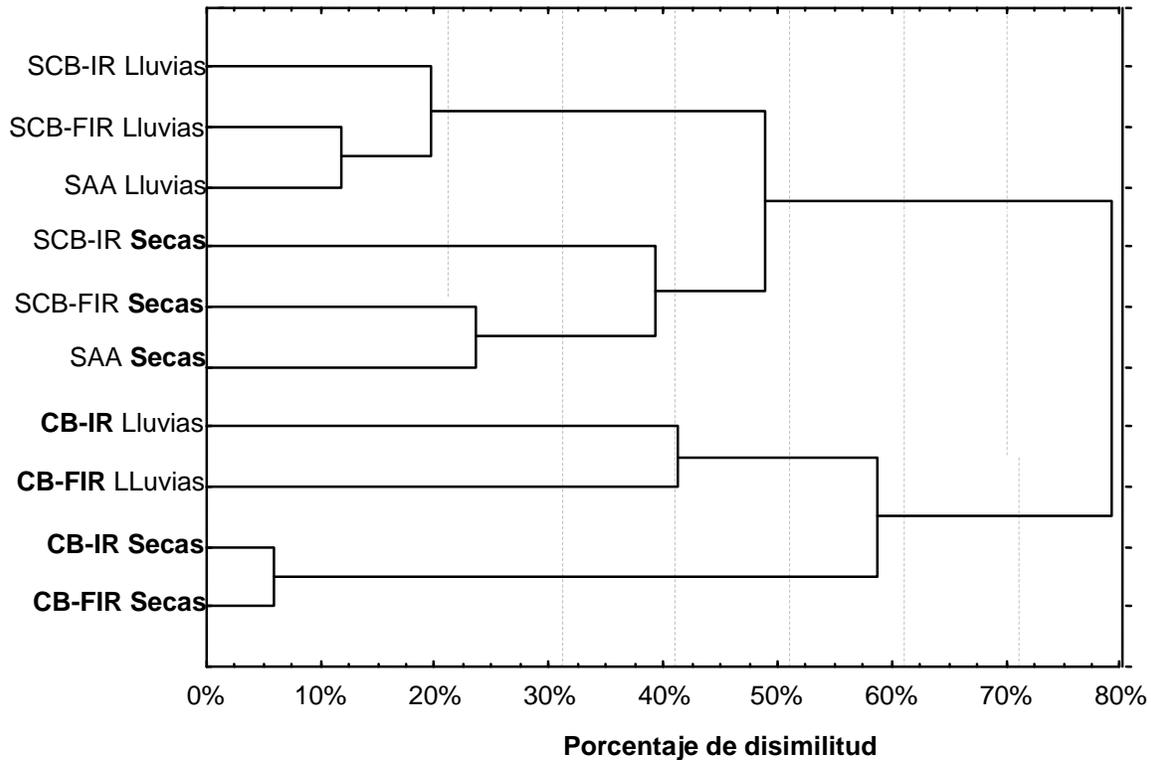
El índice de diversidad de Shannon-Wiener ( $H'$ ), que da peso a los taxa poco dominantes, indicó que la diversidad de fauna fue mayor en secas y menor en lluvias. La CB-IR tuvo mayor diversidad que la CB-FIR. Asimismo, en lluvias, en el suelo la diversidad

disminuyó del microhábitat SCB-IR al SAA; mientras que en secas, el microhábitat SCB-FIR tuvo una diversidad intermedia (Figura 5b). En contraste, el índice de dominancia de Simpson indicó que la diversidad fue mayor en lluvias y menor en secas (Figura 5c). La equidad (índice de Pielou) presentó un patrón similar al índice de diversidad H', por lo que la dominancia de algunos taxa fue mayor en lluvias en casi todos los microhábitats (Figura 3d), y la equidad en lluvias fue menor en las costras biológicas que en el suelo.



**Figura 5.** Índices de diversidad, riqueza y equidad de taxa de fauna en costra biológica y suelo de cinco microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR, SAA) y en dos estaciones (secas y lluvias) en un ecosistema semiárido en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. **NOTA:** consultar siglas del eje de las x en la figura 1.

El análisis de disimilitud mostró que la composición de taxa entre las CB y el suelo bajo las CB es un 79% diferente. A su vez la composición también cambió con la estacionalidad, en donde la composición de taxa entre CB de lluvias y de secas difirió en un 59%, y la del suelo de lluvias y secas un 47%. Asimismo, la composición de taxa en las CB-IR y CB-FIR fue sólo un 7% diferente en la estación seca y un 44% en la estación lluviosa. En el suelo, en contraste con las CB, durante lluvias hay mayor similitud entre SCB-IR, SCB-FIR y SAA (16%), pero en secas las diferencias en similitud de taxa entre estos microhábitats fue mayor (41%) y, en ambas estaciones, los microhábitats SCB-FIR y SAA fueron similares en composición de taxa (Figura 6).



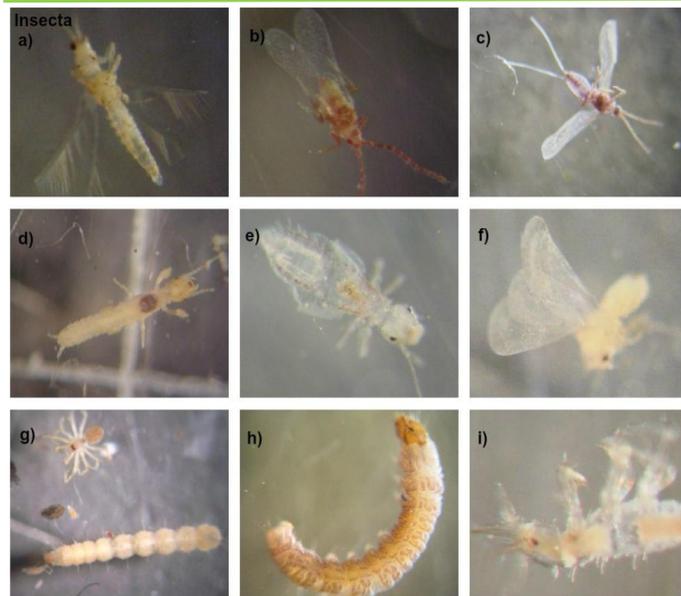
**Figura 6.** Cluster del análisis de disimilitud en composición de taxa mediante el método de Ward con base en presencia-ausencia de taxa, mostrando las diferencias en composición de de fauna entre las costras biológicas y el suelo colectados en diferentes microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR, SAA) y en dos estaciones (secas y lluvias) en un ecosistema semiárido del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. **NOTA:** consultar siglas del eje de las y en el eje de las x de la figura 1.



**Figura 7.** Fotografías de algunos taxa registrados en este estudio.

**7a.** Algunos ejemplos de los Acaros registrados en costras biológicas y suelo del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

Las fotos corresponden a los siguientes órdenes: Oribatida: a) b) c) d) f) l); Prostigmata h) e); Mesostigmata g).



**7b.** Algunos ejemplos de Insecta registrados en costras biológicas y suelo del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

Las fotos corresponden a los siguientes órdenes: Hemíptero b); c) f); Thysanoptera a) d); Psocoptera e); Coleopetra g); Lepidóptera h).



**7c.** Algunos ejemplos de registros de Colembola, Araneae y Pseudoescorpionida de costras biológicas y suelo del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

Las fotos corresponden a los siguientes taxa: Colembola: a) b) c) d); Pseudoescorpionida; Araneae.

## 6.2 Variables físicas y químicas del suelo y de la costra biológica

El pH de la CB y del suelo no mostró ninguna diferencia significativa entre los microhábitats, ni con la estacionalidad (Cuadro 4). El pH fue ligeramente alcalino y varió de 7.8 a 8.3 entre los microhábitats (Cuadro 5). El porcentaje de humedad fue afectado por la estacionalidad de la lluvia, la CB y el suelo en lluvias fueron más húmedos que en secas (Cuadros 4 y 5). La densidad aparente fue menor en la CB dentro y fuera de la IR formada por *M. luisana*, en comparación con el suelo (SCB-IR, SCB-FIR, SAA), el cual fue más denso (Cuadro 5).

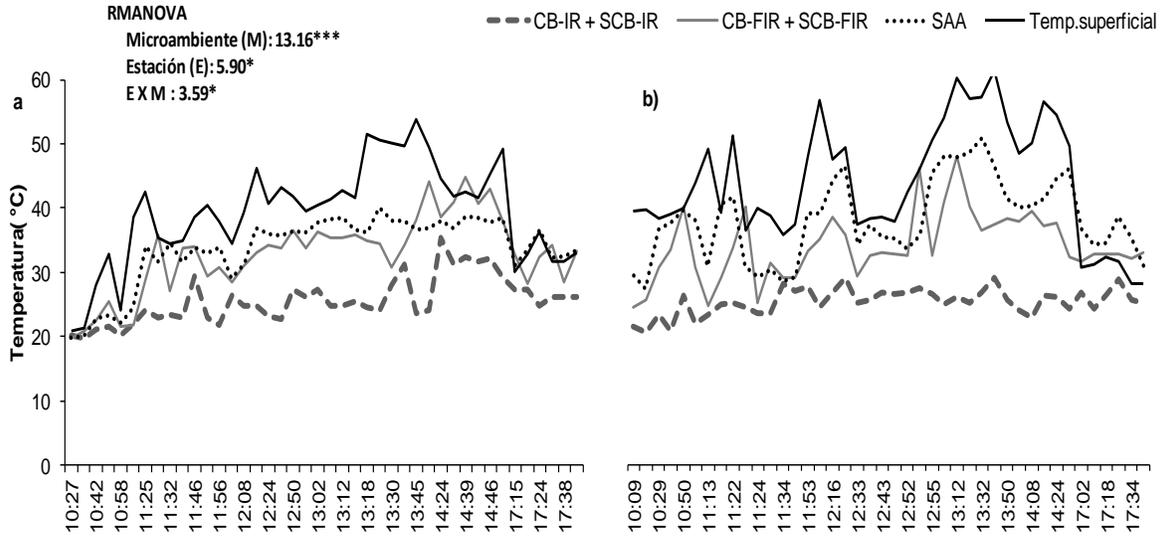
**Cuadro 4.** Valores de *F* y sus niveles de significancia con un ANOVA de medidas repetidas para las propiedades físicas y químicas de la costra biológica y del suelo de cinco microhábitats y dos estaciones (lluvias y secas), del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

| Variables                        | Fuente de variación |                    |                    |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
|                                  | Entre grupos        | Dentro de grupos   |                    |
|                                  | Microhábitat (M)    | Estación (E)       | M × E              |
| pH                               | 1.16 <sup>ns</sup>  | 2.62 <sup>ns</sup> | 0.80 <sup>ns</sup> |
| Humedad                          | 0.71 <sup>ns</sup>  | <b>25.99***</b>    | 0.18 <sup>ns</sup> |
| MOS                              | 2.42 <sup>ns</sup>  | 0.34 <sup>ns</sup> | <b>2.83*</b>       |
| C <sub>org</sub>                 | 2.47 <sup>ns</sup>  | 0.34 <sup>ns</sup> | <b>2.83*</b>       |
| N <sub>total</sub>               | <b>10.57***</b>     | 1.85 <sup>ns</sup> | <b>3.47*</b>       |
| C:N                              | 0.60 <sup>ns</sup>  | 1.44 <sup>ns</sup> | <b>4.94**</b>      |
| NH <sub>4</sub>                  | 0.45 <sup>ns</sup>  | <b>14.30**</b>     | 1.39 <sup>ns</sup> |
| NO <sub>3</sub>                  | <b>5.43***</b>      | 0.41 <sup>ns</sup> | <b>2.99*</b>       |
| NO <sub>3</sub> :NH <sub>4</sub> | <b>5.50**</b>       | <b>16.64***</b>    | <b>4.55**</b>      |
| PO <sub>4</sub> -Olsen           | 1.92 <sup>ns</sup>  | 0.38 <sup>ns</sup> | <b>3.77*</b>       |

**Nota:** ns= no significativo; \*  $p \leq 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ .

La temperatura registrada *in situ* fue afectada por el microhábitat, la estación y por la interacción entre éstos (Figura 8). En lluvias, la CB + SCB-IR abatió la temperatura promedio hasta los 25°C con respecto a la temperatura superficial (42°C) y la CB + SCB-FIR tuvieron valores intermedios (33°C). En contraste, durante la estación seca, la CB + SCB-IR abatió la temperatura hasta 20°C en promedio, pero los otros microhábitats tuvieron una amplia

variación, en donde el SAA registró valores similares a la temperatura superficial y la CB + SCB-FIR presentaron valores intermedios (Figura 8).



**Figura 8.** Variación de la temperatura de las costras biológicas + el suelo bajo las costras (microhábitats: CB+SCB-IR; CB+SCB-FIR; SAA) y de la temperatura superficial en el transcurso del día (horas), datos registrados para dos estaciones **(a)** lluvias y **(b)** secas en un ecosistema semiárido del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. En la parte superior izquierda de la figura se presentan los niveles *F* y la significancia para cada factor (microhábitat y estación) según el ANOVA de medidas repetidas (RMANOVA); con  $p \leq 0.05$ .

**NOTA:** CB-IR + SCB-IR= costra biológica y suelo debajo de la costra dentro de islas de recursos formadas por *M. luisana*; CB-FIR + SCB-FIR = costra biológica y suelo debajo de la costra fuera de islas de recursos formadas por *M. luisana*; SAA= suelo de área abierta; Temp. Superficial= corresponde la temperatura sobre la superficie del suelo.

La concentración de materia orgánica (MO; Cuadro 5) y C orgánico (Figura 9a) varió entre los microhábitats dependiendo de la estacionalidad de la lluvia (Cuadro 4). En la temporada seca, CB-IR y SCB-IR tuvieron mayor concentración de MO, mientras que los microhábitats CB-FIR y SCB-FIR tuvieron concentraciones intermedias y el SAA presentó la más baja concentración (Cuadro 5). En contraste, en lluvias, la CB tanto dentro como fuera de IR tuvieron una mayor concentración de MO, mientras que los tres microhábitats de suelo (SCB-IR, SCB-FIR y SAA) tuvieron la menor concentración (Cuadro 5). El carbono orgánico

presentó un patrón similar a la MO (Figura 9a). No obstante, se resalta que CB-IR y CB-FIR tuvieron una mayor concentración de C orgánico que el microhábitat SAA (Figura 9a).

**Cuadro 5.** Valores promedio ( $\pm$  error estándar) de las propiedades físicas y químicas de la costra biológica y del suelo de cinco microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR y SAA) en dos estaciones (secas y lluvias) en un ecosistema semiárido en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.

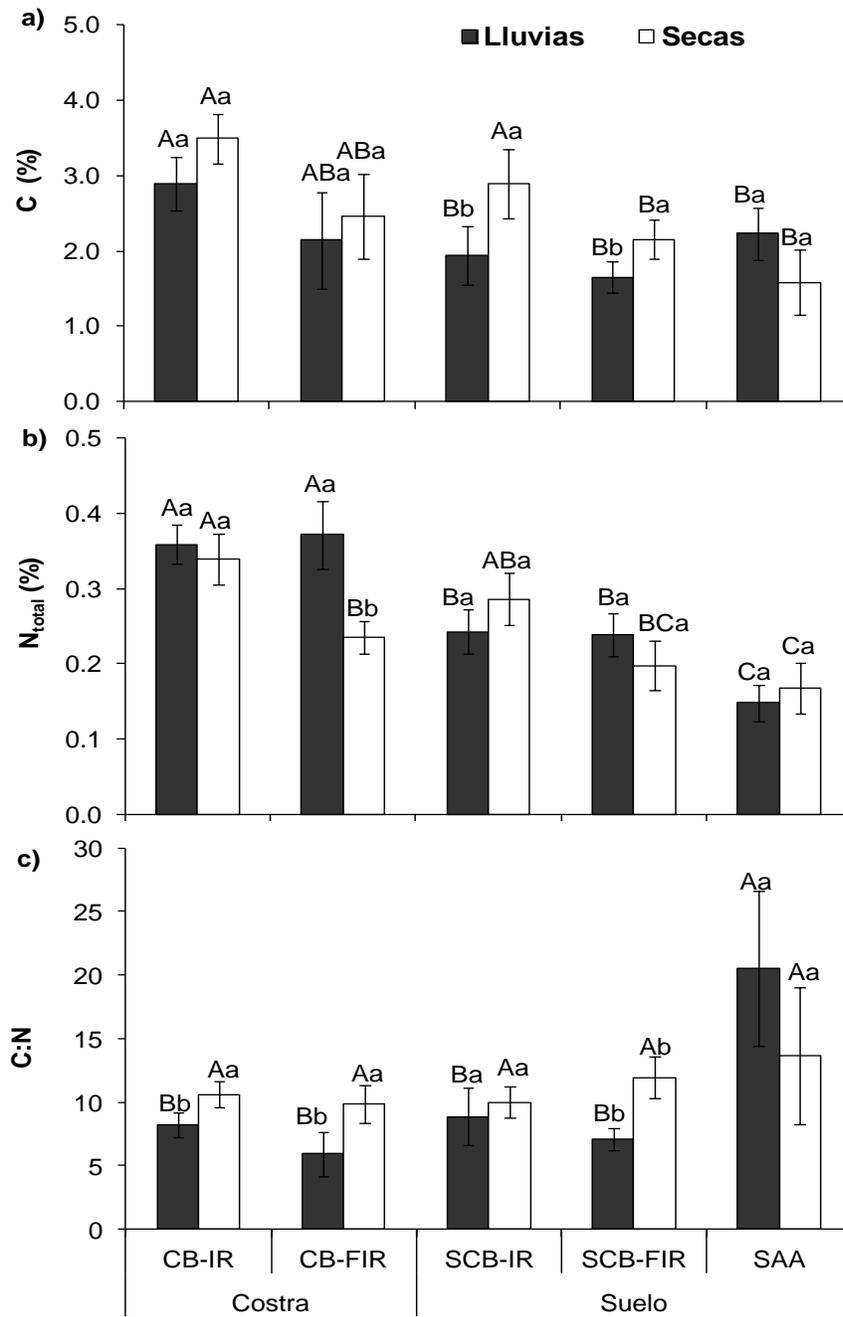
| Propiedades                     | Microhábitats            |                          |                          |                           |                          |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                                 | CB-IR                    | CB-FIR                   | SCB-IR                   | SCB-FIR                   | SAA                      |
| pH (1:2 H <sub>2</sub> O)       |                          |                          |                          |                           |                          |
| Lluvias                         | 7.8 (0.20)               | 7.9 (0.11)               | 7.8 (0.1)                | 8.2 (0.1)                 | 8.0 (0.1)                |
| Secas                           | 8.2 (0.18)               | 7.9 (0.16)               | 7.9 (0.2)                | 8.1 (0.1)                 | 8.3 (0.1)                |
| Humedad (%)                     |                          |                          |                          |                           |                          |
| Lluvias                         | 21.5 (5.5) <sup>Aa</sup> | 17.9 (4.6) <sup>Aa</sup> | 27.0 (5.6) <sup>Aa</sup> | 25.6 (7.6) <sup>Aa</sup>  | 22.5 (5.7) <sup>Aa</sup> |
| Secas                           | 7.2 (1.5) <sup>Ab</sup>  | 7.5 (1.3) <sup>Ab</sup>  | 11.0 (1.1) <sup>Ab</sup> | 10.5 (1.1) <sup>Ab</sup>  | 11.6 (1.3) <sup>Ab</sup> |
| Densidad aparente <sup>++</sup> |                          |                          |                          |                           |                          |
| Lluvias                         | nd                       | nd                       | nd                       | nd                        | nd                       |
| Secas                           | 1.08 (0.05) <sup>B</sup> | 1.07 (0.06) <sup>B</sup> | 1.2 (0.05) <sup>AB</sup> | 1.3 (0.05) <sup>A</sup>   | 1.6 (0.06) <sup>A</sup>  |
| MOS (%)                         |                          |                          |                          |                           |                          |
| Lluvias                         | 5.0 (0.62) <sup>Aa</sup> | 3.7 (1.10) <sup>Aa</sup> | 3.3 (0.66) <sup>Aa</sup> | 2.8 (0.36) <sup>Aa</sup>  | 3.8 (0.59) <sup>Aa</sup> |
| Secas                           | 6.0 (0.56) <sup>Aa</sup> | 4.2 (0.96) <sup>Ba</sup> | 5.0 (0.79) <sup>Aa</sup> | 3.7 (0.45) <sup>ABa</sup> | 2.7 (0.74) <sup>Aa</sup> |

Las letras mayúsculas (A y B) indican que los promedios son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ) entre microambientes. Las letras minúsculas (a y b) indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los promedios de las estaciones dentro de un mismo microambiente;  $n = 7$ . nd= no determinado.

**++** Sólo fue determinada en una sola estación y los datos fueron analizados con un ANOVA de una vía, el cual indicó diferencias entre microhábitats con una  $F = 12.3$  con  $p \leq 0.05$ . Estos valores de densidad fueron importantes para calcular la densidad de fauna por microhábitat.

**NOTA:** consultar las siglas de los microhábitats en la nota al final del cuadro 2.

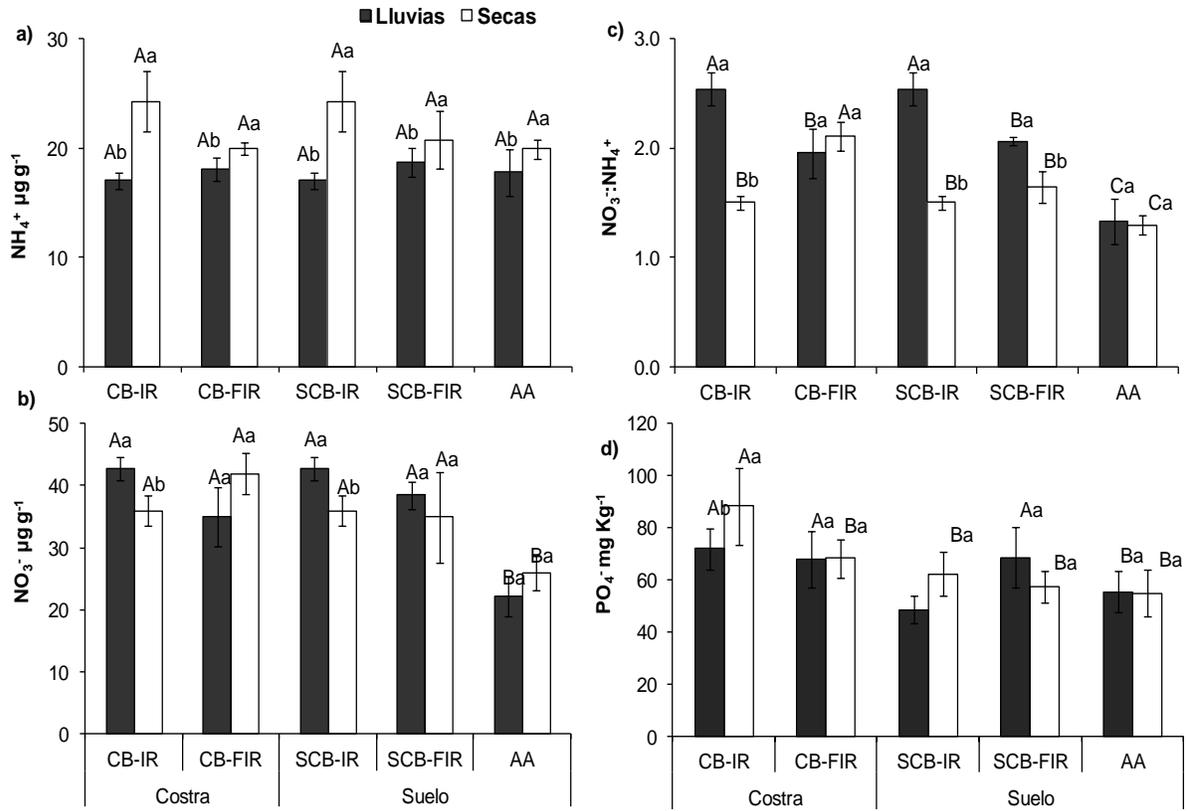
El nitrógeno total (Nt) fue afectado por la interacción microhábitat-estacionalidad (Cuadro 4). En lluvias, la concentración de Nt fue mayor en CB-IR y CB-FIR que en los microhábitats del suelo. En el suelo, el Nt fue mayor en SCB-IR y SCB-FIR, y la concentración más baja se registró en SAA. En contraste, en secas la CB-IR presentó una mayor concentración de Nt; mientras que CB-FIR y SCB-IR tuvieron una concentración intermedia y el SCB-FIR y el SAA tuvieron la más baja concentración (Figura 9b).



**Figura 9.** Variación estacional de la concentración promedio ( $\pm$  error estándar) de: **(a)** Carbono orgánico, **(b)** Nitrógeno total (N<sub>total</sub>) y **(c)** Cociente Carbono:Nitrógeno en costra biológica y suelo de cinco microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR, SAA) en un ecosistema semiárido del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. Las letras mayúsculas (A, B, C...) indican que los promedios son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ) entre microhábitats. Las letras minúsculas (a y b) indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los promedios de las estaciones (secas y lluvias) dentro de un mismo microhábitat. **NOTA:** consultar siglas del eje de las x en la nota al final de la figura 1.

El cociente C:N varió entre microhábitats con la estacionalidad (Cuadro 4). Así, el cociente fue mayor en SAA en ambas estaciones; mientras que los valores en todos los demás microhábitats fueron similares y menores que en SAA. El cociente C:N en la mayoría de los microhábitats, con excepción de SCB-IR y SAA, fue mayor durante la estación seca que en la estación lluviosa (Cuadro 4; Figura 9c).

Las formas disponibles de N y P difirieron en su respuesta al microhábitat y a la estacionalidad (Cuadro 4). La concentración de amonio fue afectada solamente por la estación (Cuadro 4). En lluvias la concentración de amonio fue mayor que en secas (Figura 10a). En contraste, el nitrato presentó una interacción entre el microhábitat y la estacionalidad (Cuadro 4). En lluvias, la concentración de  $\text{NO}_3^-$  fue mayor en CB-IR y SCB-IR, mientras que la CB-FIR y el SCB-FIR tuvieron concentraciones intermedias. En la época seca, la concentración de nitrato fue mayor en CB y suelo bajo CB dentro y fuera de IR que en el SAA, el cual tuvo la menor concentración en ambas estaciones (Figura 10b). El cociente  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  mostró diferencias entre los microhábitats en función de la estación (Cuadro 4). En lluvias, el cociente  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  fue mayor en CB-IR y menor en CB-FIR; mientras que en el suelo, este cociente disminuyó de SCB-IR a SAA, pero en la temporada de seca SCB-IR y SCB-FIR tuvieron valores parecidos, y el SAA presentó el menor cociente (Figura 10c). El fósforo disponible fue afectado por la interacción entre el microambiente y la estación (Cuadro 4). En lluvias, CB-IR y CB-FIR tuvieron la mayor concentración de fósforo, mientras que SCB-IR presentó los valores más bajos; en contraste, en secas, CB-IR tuvo la mayor concentración en comparación con los demás microhábitats (Figura 10d).

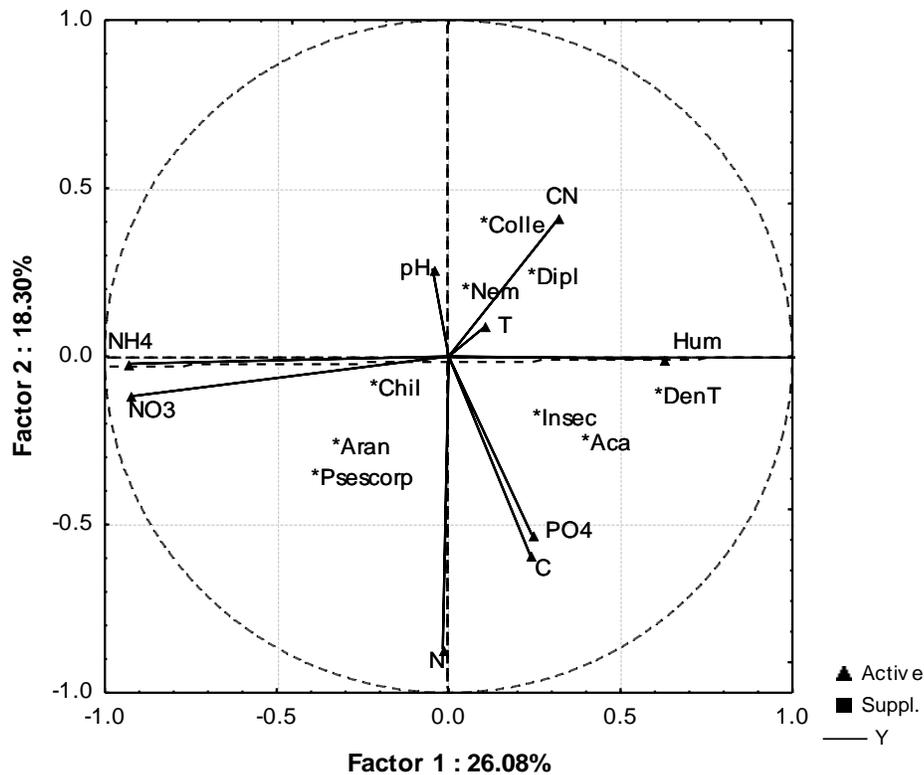


**Figura 10.** Variación estacional promedio ( $\pm$  error estándar) de la concentración de: **(a)** Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) **(b)** Nitrito ( $\text{NO}_3^-$ ), **(c)** Cociente Nitrito: Amonio y **(d)** Fósforo disponible ( $\text{PO}_4$ ) en costra biológica y suelo de cinco microhábitats (CB-IR, CB-FIR, SCB-IR, SCB-FIR y SAA) en un ecosistema semiárido del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. Las letras mayúsculas (A, B, C...) indican que los promedios son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ) entre microhábitats. Las letras minúsculas (a y b) indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los promedios de las estaciones (secas y lluvias) dentro de un mismo microhábitat. **NOTA:** consultar siglas del eje de las x en la nota al final de la figura 1.

### 6.3 Relación fauna vs variables físicas y químicas del suelo y de la costra biológica

Los ejes del análisis de correspondencia canónica (ACC) para explorar la relación entre la fauna y las propiedades del suelo explicaron el 44.4% de la varianza total en la composición de taxa. El primer eje correlacionó con la humedad del suelo, C orgánico, Nt, P disponible y el cociente C:N; el segundo eje correlacionó con las formas disponibles de N. La prueba de permutación de Monte-Carlo mostró que el primer y segundo eje fueron estadísticamente significativos ( $F= 2.34$  y  $F= 1.61$ , respetivamente;  $p \leq 0.05$ ), mientras que el tercer eje

presentó la menor correlación con pH y temperatura del suelo. La densidad total de taxa fue explicada por la humedad estacional del suelo. Además, taxa como Collembola, Nematoda y Diplura mostraron una respuesta positiva al cociente CN, mientras que Chilopoda, Araneae y Pseudoescorpionida mostraron una relación negativa. Otros taxa fueron asociados con la concentración de C, Nt y P disponible, tal fue el caso de Insecta y Acari. La mayoría de los taxa presentaron una relación negativa con las formas disponibles de N, con excepción de Chilopoda, Araneae y Pseudoescorpionida (Figura 11).



**Figura 11.** Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) que representa la relación entre los diferentes grandes grupos de taxa de fauna y las propiedades físico-químicas de la costra biológica y del suelo registrados en el ecosistema semiárido del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. DenT= Densidad total; Collem= Collembola; Pseud = Pseudoescorionida; Chilop= chilopoda; Aran= Araneae; Nema= Nematoda. En todos los taxa se utilizaron valores de densidad en  $\text{indv. m}^{-2}$  y los datos de nutrientes en concentración.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1 La fauna de este estudio en relación a otros ecosistemas

La densidad y riqueza de taxa en los microhábitats estudiados en el Valle de Zapotitlán Salinas difieren respecto a otros ecosistemas; sin embargo, es complicado comparar con ecosistemas semiáridos debido a que en México son escasos los estudios sobre la fauna edáfica, no existen datos sobre densidades totales y las cuantificaciones son a nivel de algunos grupos taxonómicos.

Negrete-Yankelevich *et al.* (2008) reportaron para un bosque mesófilo de montaña, en la Sierra Norte de Oaxaca México, hasta 91 individuos por m<sup>2</sup> y 7 taxa en el suelo asociado a especies arbóreas. Un estudio realizado en el bosque mesófilo de montaña, en Chiapas México, reportó 19 taxa y hasta 200 individuos por m<sup>2</sup> (Morón-Ríos y Huerta-Lwanga, 2006). En un bosque templado de la Sierra Nevada, México, se reportan 77, 113 individuos por m<sup>2</sup>, donde el 31% son colémbolos (García-Gómez *et al.*, 2011). Por su parte, la macrofauna en el bosque tropical húmedo y en agroecosistemas de Tabasco varía de 4 a 429 individuos por m<sup>2</sup>, con hasta 13 taxa (Huerta-Lwanga *et al.*, 2008). En contraste, en un bosque tropical caducifolio en Chamela, Jalisco; Palacios-Vargas *et al.* (2007) registraron de 2 a 8, 500 individuos por m<sup>2</sup> con un total de 28 taxa; mientras que en el bosque tropical caducifolio en Yucatán, se reportan hasta 434,125 individuos por m<sup>2</sup> (Prieto *et al.*, 1999), valores que están en los rangos de densidad que se muestran en esta tesis (116 a 62, 049 indiv.m<sup>-2</sup> y 17 taxa). Asimismo, los taxa dominantes en bosques mesófilos son Chilopoda, Coleoptera, Hemiptera, Oligocheta y Diplopoda (Morón-Ríos y Huerta-Lwanga, 2006; Negrete-Yankelevich *et al.*, 2008) y en bosques tropicales húmedos son Oligocheta, Chilopoda, Nemátoda y Coleoptera (Huerta-Lawanga *et al.*, 2008); mientras que en bosques tropicales secos los taxa más abundantes son Acarí y Colembola (Palacios-Vargas *et al.*,

2007), los cuales fueron también dominantes en este estudio. La comparación de los datos reportados con respecto a los de otros ecosistemas, sugiere que: 1) los ambientes más secos podrían favorecer la abundancia de taxa de fauna edáfica diferentes a los ambientes con menor estrés ambiental, y 2) que la amplia variabilidad de la densidad de la fauna entre los diferentes ecosistemas es resultado de su heterogeneidad ambiental.

Los taxa dominantes de fauna en este estudio fueron Acari (Oribatida, Prostigmata y Mesostigmata), Colembola e Insecta, éstos han sido también registrados en suelo y en CB de otros ecosistemas desérticos (Neher *et al.*, 2009; Shepherd *et al.*, 2002). Esto se corresponde con lo reportado por Seastedt (1984) quien menciona que Acari y Colembola representan el 95% de la densidad total de microartropodos del suelo. En el desierto de Thar en India, Acari y Colembola representan el 60% y 22%, respectivamente, de los artrópodos del suelo (Faisal y Ahmad, 2005). No obstante, en el Valle de Zapotitlán Salinas, no se encontraron otros dos órdenes de Ácari (Edostigamata y Astigmata) que forman parte de las CB y del suelo en otros ambientes áridos (Neher *et al.*, 2009; Shepherd *et al.*, 2002).

Acari está ampliamente distribuido y comprende hasta el 90% de los microartrópodos, con densidades de 1,200 a 43,000 individuos por m<sup>2</sup> en ecosistemas áridos y semiáridos. Por ejemplo, en los desiertos de Norte América, Australia y Negev su densidad varía de 2000 a 8000 individuos por m<sup>2</sup> (Steinberger y Whitford, 1985; Steinberger, 1991). Estrada *et al.* (1988) indican que los ácaros son también un taxa dominante en el suelo del Valle semiárido de Tehuacán, Puebla, debido a la ausencia de colémbolos, lombrices de tierra, miriápodos y coleópteros que podrían representar una competencia para las poblaciones de Acari. No obstante, en esta tesis se registró para el Valle de Zapotitlán Salinas, que es parte del Valle de Tehuacán, la presencia de Colémbolos e insectos, esto debido posiblemente a la

presencia de las CB, un microhábitat que no fue considerado en el estudio realizado por Estrada *et al.* (1988).

Collembola es un taxa frecuente en la mayoría de los suelos, pero su densidad varía dependiendo del ecosistema. En una zona árida de Durango en México, se registraron densidades de 25 a 1,381 individuos por m<sup>2</sup> (Rivera-García y Vigeers-Carrasco, 1991); mientras que en un bosque de *Abies religiosa* en el Estado de México, la densidad se encuentra entre 362 y 1,362 ind m<sup>2</sup>, valores semejantes a los de este trabajo. Sin embargo, estas cifras difieren considerablemente de lo señalado por Greenslade (1991), quien indica que en zonas áridas de Australia es posible encontrar hasta 3,000 colémbolos por m<sup>2</sup>. Asimismo, en el desierto del norte de la Península de Taimyr, Rusia, la densidad promedio es de 70,000 individuos por m<sup>2</sup> (Chernov *et al.*, 1977) y en un sistema agrícola en Chiapas, México, está en el rango de 10,000 a 90,000 individuos m<sup>2</sup> (Mendoza *et al.*, 1999).

Insecta fue también un taxa registrado para el Valle de Zapotitlán Salinas; sin embargo, para los ecosistemas áridos y semiáridos sólo se han identificado algunos grupos de insectos del suelo. Rivera-García y Vigeers-Carrasco (1991) registraron 12 órdenes de insectos, los cuales coinciden con 8 de los reportados en esta tesis (Diptera, Hymenoptera, Hemiptera, Thysanoptera e Isoptera). Cepeda y Whitford (1990) indican una densidad de 4,036 insectos, entre ellos Tripidae y larvas de dípteros. En suelos de Catinga, una sabana semiárida en Brasil, la densidad de insectos es de 2 a 502 individuos por m<sup>2</sup> (Araújo *et al.*, 2010), en el bosque tropical seco en Chamela, Jalisco México, la densidad varía de 3 a 290 individuos por m<sup>2</sup> (Palacios-Vargas *et al.*, 2007), y Negrete-Yankelevich *et al.* (2008) reportan de 1 a 18 individuos por m<sup>2</sup> en el suelo de la Sierra de Oaxaca, México. Las densidades registradas para el valle semiárido de Zapotitlán Salinas van de 116 a 816 individuos por m<sup>2</sup>, las cuales son relativamente altas comparado con los estudios antes citados para México.

Entre los taxa con menor densidad por m<sup>2</sup> están los nemátodos. Estudios realizados en otros ecosistemas indican que este grupo varía de 11 a 25 individuos por m<sup>2</sup> en el suelo asociado a arbustos y pastos del desierto de Plateau Colorado, Nuevo México y de Utha (Darby *et al.*, 2007; Darby *et al.*, 2009). Estos valores son bajos comparados con los de la zona de estudio (116 a 172 org. m<sup>2</sup>).

La discrepancia entre lo reportado en esta tesis y los diferentes estudios realizados en otros ecosistemas desérticos de México y del mundo en cuanto a la densidad de taxa de fauna del suelo, sugieren que los taxa edáficos son muy variables, aparentemente debido a por lo menos dos causas: 1) una amplia heterogeneidad y diferencia microambiental entre estos ecosistemas (e.g. paisaje, diversidad de plantas, tipo de vegetación y suelo, etc.), y 2) a una variedad de metodológicas empleadas (e.g. métodos de extracción por flotación, trampas de caída, conteos directos, embudos Berless, etc.) que han sido utilizadas sin estandarización para ambientes desérticos.

## **7.2 La costra biológica como microhábitat rico en recursos para la fauna edáfica**

Las CB dentro y fuera de las IR formadas por *M. luisana* son un microhábitat favorable para la fauna en comparación con el suelo de área abierta. Las CB ofrecen a estos organismos mejores condiciones ambientales y mayor disponibilidad de recursos, esto probablemente incrementa el establecimiento de la fauna que no está adaptada completamente a condiciones de mayor estrés edáfico, como ocurre en el microhábitat SAA. Así, por ejemplo, las CB, en especial las que están dentro de la IR formada por *M. luisana*, abaten la temperatura superficial en comparación con el SAA, ofreciendo a la fauna edáfica un refugio ante las condiciones ambientales extremas y un reservorio de nutrimentos.

El efecto de las CB y del suelo bajo las CB fue positivo sobre la densidad y riqueza de taxa con respecto al SAA. Sin embargo, los datos indican que a nivel de microhábitat esto puede estar más relacionado con la disponibilidad de nutrientes que con la humedad microambiental del suelo, como se observa en el análisis de disimilitud la composición de los taxa son diferentes en el suelo y en la costra. Las CB pueden incrementar la disponibilidad de N por fijación biológica y las entradas de C por productividad primaria a través de la actividad de las cianobacterias, líquenes y musgos que las constituyen (Belnap, 2003). Estos mecanismos pueden ser fuente de nutrientes para dar soporte a consumidores secundarios y terciarios que habitan en las CB. Los resultados indican que las CB enriquecen el suelo en la estación seca con materia orgánica y en ambas estaciones con nitrógeno, las CB en la zona de estudio favorecen la oxidación del amonio a nitrato enriqueciendo al suelo con esta forma disponible de N. Este enriquecimiento es más pronunciado en las CB y en el suelo dentro de la IR de *M. luisana*. Asimismo, la materia orgánica es de mejor calidad en CB y en suelo bajo la CB tanto dentro como fuera de IR con respecto al SAA, como lo indica el cociente CN.

Los componentes de la CB fijan C atmosférico a través de la fotosíntesis y posteriormente lo liberan al suelo por procesos de lixiviación, ayudando a mantener la fertilidad del suelo donde están presentes, además de proporcionar una fuente de energía orgánica a la fauna del suelo (Belnap y Lange, 2001). Se ha estimado que cerca del 50% del C fijado por las CB es secretado al suelo por sus componentes bióticos, incrementando hasta en un 300% el C orgánico del suelo respecto al suelo de áreas abiertas, lo cual ha sido reportado en zonas áridas y semiáridas de España (Castillo-Monroy *et al.*, 2010), China (Gao *et al.*, 2010) y México (Sandoval-Pérez, 2011). Asimismo, hay varios trabajos que indican que el 80% del N fijado por cianobacterias y cianolíquenes de las CB, en rangos de fijación que van 0.2 hasta 100 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, es liberado al suelo en donde se transforma en formas

disponibles para plantas y microorganismos (Belnap, 2003). Adicionalmente, la contribución de las CB cuando están dentro de las IR pudo ser potenciada por la presencia de *M. luisana*. Esta leguminosa enriquece el suelo bajo su copa con nutrientes (Camargo-Ricalde *et al.*, 2010a); asimismo, tiene el potencial de establecer simbiosis con *Rhizobium*, una bacteria fijadora de N (Camargo-Ricalde *et al.*, 2010b), y Pavón *et al.* (2005) reportaron que esta especie tiene una baja reabsorción de N, lo que sugiere que la mayoría del N es incorporado al suelo vía hojarasca. Así, la IR formada por *M. luisana*, en conjunto con las CB, puede estar favoreciendo la abundancia y diversidad de la fauna del suelo por ofrecer una mayor calidad de recursos que la CB sin la presencia de esta leguminosa y que el suelo sin ningún tipo de cobertura.

### **7.3 La costra biológica es un microhábitat estable para la fauna edáfica**

Además de que las CB ofrecen recursos a la fauna, su presencia da una mejor estructura al suelo (Belnap *et al.*, 2003; Jiménez-Aguilar *et al.*, 2009). Las cianobacterias, musgos y líquenes que constituyen las CB secretan polisacáridos que actúan como un agente cementante que agrega y adhiere las partículas minerales finas del suelo (Belnap y Lange, 2001). Asimismo, a media que las cianobacterias crecen en suelos con características calcáreas, como el de la zona de estudio, precipitan carbonatos (De los Ríos *et al.*, 2004), cuya formación proporciona dureza al suelo. Estos mecanismos explican la relación positiva encontrada entre las CB y la estabilidad del suelo (Belnap *et al.*, 2008). Esto sugiere que la fauna en el suelo bajo la CB dentro y fuera de IR pudo ser también favorecida en riqueza y densidad, dado que ofrecen a la fauna un microhábitat físico más estable en comparación con el suelo de AA (Belnap, 2001).

#### 7.4 Las costras biológicas son un microhábitat del que se alimenta la fauna

Los musgos, líquenes, cianobacterias, algas y hongos de las CB pueden ser directamente una fuente abundante y diversa de alimento para la fauna herbívora y omnívora que las habita (Gerson, 1969). Acari, el taxa más abundante en las CB y en el suelo del Valle de Zapotitlán Salinas, ha sido asociado con los musgos. En particular, los Oribatida, un orden también abundante en el Valle, es comúnmente conocido como el ácaro de los musgos (moss-mites), aunque no exclusivo, que puede estar cohabitándolos con Prostigmata, en donde encuentran las condiciones favorables para establecerse (Gerson, 1969; Hoffmann y Riverón, 1992). Asimismo, hay evidencia de que este orden de Ácari está también asociado con los líquenes en los que encuentra un hábitat y una fuente de alimento (Seyd y Seaward 1984). Asimismo, Neher *et al.* (2009) reportaron mayor abundancia de microfitófagos estrictos en los primeros centímetros de profundidad en CB del desierto de Chihuahua, en los cuales ocurre una mayor biomasa de hongos y algas. La mayoría de los Prostigmata se alimentan por medio de perforación y succión del citoplasma de células de plantas, hongos, bacterias y microfauna, mientras que los Oribatida ingieren materia orgánica y micelio como fuente de alimento (Seastedt, 1984; Neher *et al.*, 2009). De igual manera, algunos insectos que se encuentran en las CB se alimentan de los musgos, en donde, inclusive, pueden encontrar un sitio con condiciones adecuadas para ovopositar y para el desarrollo de sus larvas (Li *et al.*, 2006). Así, por ejemplo, larvas del género australiano *Choristes* se alimenta de filidios de musgos (Gerson, 1969). Asimismo, existen reportes, que explican la presencia de Collembola en las CB por sus hábitos de alimentación (Neher *et al.*, 2009; Shepherd *et al.*, 2002; Baatrup *et al.*, 2006), y se reconoce que algunos colémbolos se alimentan de hifas de hongos y de material vegetal en descomposición (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2004), los hongos son un componente abundante en CB (Bates *et al.*, 2010) y las CB actúan como trampa de materia orgánica (Sandoval-Pérez, 2011). Asimismo, se ha demostrado que microinvertebrados (*e.g.* tardigrados y nemátodos) se alimentan de cianobacterias que

constituyen las CB que se distribuyen en el Parque Nacional de Canyonlands, Utha, Estados Unidos (Darby y Neher, 2012). En conjunto, estas evidencias sugieren que los hábitos alimenticios explican la preferencia de la fauna por las CB dentro y fuera de la IR como un microhábitat, ya que sus constituyentes son también alimento para la fauna.

### **7.5 Las costras biológicas y la fauna que las habita llaman a otros taxa**

La presencia de otros taxa en menor densidad que los taxa anteriores, estuvo condicionada por las CB dentro y fuera de IR. Esto indica que las costras son también un microhábitat para pseudoescorpiones, arácnidos y chilopodos, cuyos organismos pueden incluso encontrarse en el suelo bajo protección de la CB. Estos taxa han sido reportados en CB de otros ecosistemas desérticos; por ejemplo, pseudoscorpiones juveniles en Cibola, Nuevo México (Shepherd *et al.*, 2002) y arácnidos en el desierto de Namib, África (Lalley *et al.*, 2006). Su presencia en las CB estudiadas en esta tesis puede explicarse por que éstos taxa son depredadores de colémbolos, dípteros y ácaros (Lensing *et al.*, 2005), éste último fue un grupo que predominó en las CB del Valle de Zapotitlán Salinas. Asimismo, las CB de este sitio tienen una alta diversidad de líquenes y musgos (Rivera-Aguilar *et al.*, 2006; Sandoval-Pérez, 2011), estos constituyentes propician una diversa micro-topografía que podría proveer a éstos taxa de un microhábitat para el establecimiento de redes para emboscar a sus presas, que suelen ser ácaros que están asociados a los talos de los líquenes y musgos (Lalley *et al.*, 2006). Se conoce que los arácnidos tienen cierta preferencia por el tipo de hábitat para poder construir sus redes (Robinson, 1981).

En las CB y en el suelo bajo éstas, se activan las redes alimenticias entre la fauna, de tal modo que un taxa puede ser depredado por otro. Los nemátodos (microfauna) que pueden ser herbívoros, fungívoros o bacteriófagos (Santos y Whintford, 1981) son atraídos por las CB, en donde es mayor la cantidad de esporas de hongos (Bates *et al.*, 2010) y

comunidades bacterianas (García-Pichel *et al.*, 2003). En CB dentro y fuera de IR formadas por *M. luisana*, Yépez-Hernández (2011) cuantificó una mayor densidad de colonias fúngicas y bacterianas en comparación con las áreas abiertas. Esto podría explicar la presencia de nemátodos en las CB colectadas tanto dentro como fuera de IR. Sin embargo, la alta variación en la densidad de este taxa durante lluvias, podría ser explicada por depredación por ácaros; varios estudios indican que los ácaros depredan nemátodos y huevos de nemátodos (Santos y Whintford, 1981). Asimismo, la tendencia de los datos a mostrar una mayor densidad de nemátodos en el suelo de AA podría deberse, tanto a una reducción de las poblaciones de ácaros, como al hecho de que algunos nemátodos pueden tolerar la desecación dado que entran en un periodo de dormancia llamado anhidrobiosis (Darby *et al.*, 2009).

Los ácaros depredan también colémbolos (Ferguson y Joly, 2002) y la macrofauna como pseudoescorpiones, arácnidos y chilopodos depredan colémbolos y algunos insectos maduros o en estado larvario (Lensing *et al.*, 2005; Urbaneja *et al.*, 2005) que están en las CB (Li *et al.*, 2006), y a pesar de que tienen la capacidad de desplazamiento y de seleccionar diferentes microhábitats, parecería que para establecerse y alimentarse prefieren a las CB en lugar de las áreas abiertas. Así, estos estudios, en conjunto con esta tesis, sugieren que la fauna en las CB dentro y fuera de IR formadas por *M. luisana* podría estar también en parte explicada por la presencia de una mayor cantidad y diversidad de presas para otros taxa de fauna del suelo de estos microhábitats.

## **7.6 La lluvia modifica la diversidad-composición de fauna de las costras biológicas**

En contraparte a la no variación de humedad entre microhábitats, un cambio en la humedad debido a la estacionalidad de la lluvia sí afectó la densidad y riqueza de taxa. En general, la densidad de la mayoría de los taxa incrementó al doble o más en la estación de lluvias con

relación con la estación seca. Los taxa más favorecidos por la entrada de agua fueron los tres órdenes de Acari, Pseudoescorpionida, Chilopada y algunos órdenes de Insecta. En la estación seca, hubo taxa que no se presentaron, pero que si fueron registrados en lluvias, tal como Pseudoescorpionida. Otros, como Collembola, sólo aumentaron en el suelo bajo las CB, tanto dentro como fuera de IR, y Araneae no fue registrado en la época húmeda.

La mayoría de los taxa son favorecidos por la humedad del suelo, esto es apoyado por la alta correlación en el ACC entre la humedad y la presencia de los diferentes taxa. Shepherd *et al.* (2002) indican que la composición de taxa cambia y la riqueza y abundancia de fauna edáfica incrementan con la precipitación. Asimismo, otros estudios indican que los ciempiés (Chilopoda) son muy sensibles a las condiciones de humedad y tienen selectividad por micrositios con alta humedad (Lensing *et al.*, 2005). Collembola también es un taxa sensible a la humedad, Ferguson y Joly (2002) reportaron una correlación positiva entre la densidad de colémbolos y la precipitación y, en un experimento en el que adicionaron agua a sus muestras, también registraron un incremento en el número de colémbolos y ácaros. Esto coincide con lo encontrado en el desierto Chihuahuense por Cepeda y Whitford (1990), quienes indican que la distribución temporal de Collembola está relacionada con los periodos de lluvia. Sin embargo, algunos colémbolos pueden también tolerar una baja humedad, como ocurre con Isotomidae, que puede presentar anhidrobiosis (Palacios-Vargas, 2000). De todos los taxa, los ácaros suelen ser más resistentes a la desecación, tal es el caso de Prostigmata que es tolerante a estas condiciones y que fue dominante en el Valle semiárido de Zapotitlán Salinas (Estrada *et al.*, 1988), pero también algunos colémbolos epigeos son tolerantes a condiciones xéricas (Loring *et al.*, 1988). Estos estudios, en conjunto con esta tesis, sugieren que la respuesta general de la fauna a una mayor precipitación es positiva; no obstante, cada taxa podría tener una susceptibilidad distinta a los cambios en la humedad.

La humedad, no necesariamente es la única alternativa para explicar la no presencia de algunos taxa. Los taxa que no fueron registrados en cualquiera de la estaciones puede también estar influenciada por el tiempo y profundidad del muestreo. En este estudio, se muestreo una sola vez en cada estación y a una profundidad máxima de 6 cm, así, los taxa no registrados en la estación seca pudieron estar presentes, pero a una profundidad mayor protegiéndose de la desecación. Al respecto, se ha reportado que hay movimiento vertical de los taxa en el perfil del suelo y esto puede modificar la tasa de captura de los organismos (Araújo *et al.*, 2010). Esto podría explicar también por qué los estudios en otros ecosistemas desérticos difieren de los resultados de esta tesis, al indicar que la precipitación tiene poco o ningún impacto sobre la fauna del suelo (Loring *et al.*, 1988; Shepherd *et al.*, 2002).

La humedad no sólo afectó la densidad y riqueza de taxa, sino también la diversidad. Así, cuando unos taxa fueron más favorecidos por la entrada de agua al suelo y a las CB estos incrementaron rápidamente sus poblaciones, tal fue el caso de Ácari (Oribatida y Prostigmata) y Collembola, provocando una inequidad con respecto a los otros taxa. Esto explica la reducción en el índice de diversidad H' durante la estación de lluvias, donde unos cuantos taxa son los dominantes (menor equidad, véase índice de Pielou), como lo muestra el índice de Simpson. Así, las CB como microhábitat, son menos equitativas por favorecer a taxa que son más eficientes en aprovechar los nutrimentos. Como lo indica el ACC, nutrimentos como el C, N y PO<sub>4</sub> podrían estar explicando la presencia y variación estacional de Ácari, Collembola, Nemátoda, Diplura e Insecta, los cuales juegan un papel importante como descomponedores cuando el agua es no limitante. Así, estos taxa correlacionan con los nutrimentos porque son producto de su actividad como fragmentadores, lo cual podría beneficiar a la actividad de las comunidades microbianas durante la estación lluviosa, tanto en suelo como en las CB dentro y fuera de IR formadas por *M. luisana* del Valle de Zapotitlán-Salinas (Yépez-Hernández, 2011; Sandoval-Pérez, 2011).

## 8. CONCLUSIONES

Esta tesis es el primer reporte para México sobre el papel de las CB y de las IR formadas por *M. luisana* en la densidad, riqueza y diversidad de taxa de fauna edáfica. Este trabajo es especialmente importante en términos de conservación biológica por atender a la fauna edáfica, la cual ha sido poco estudiada en México, y debido a que es el primer estudio realizado en el Valle de Zapotitlán Salinas que forma parte de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, en Puebla, México. Así, las principales conclusiones de esta tesis son:

1. La hipótesis de este trabajo se cumplió, ya que las costras biológicas favorecen la densidad y riqueza de taxa de fauna, tanto dentro como fuera de la isla de recursos (IR) formada por *Mimosa luisana*, favoreciendo principalmente a Acari, Insecta y Colembola.
2. Las CB podrían estar ofreciendo a estos taxa una mayor cantidad de recursos y mejores condiciones ambientales. Las CB y el suelo asociado a éstas, dentro y fuera de IR, incrementaron la concentración de MOS y nutrimentos y amortiguaron las condiciones microclimáticas (temperatura) con respecto al suelo de área abierta.
3. La humedad estacional y no la microambiental, así como el C orgánico y el N que incorporan las CB y la IR formada por *M. luisana*, podrían ser los recursos que mejor explican la presencia de los taxa reportados en este estudio.
4. Los efectos de la lluvia sobre la densidad y diversidad de taxa en relación con la disponibilidad de N, sugiere que éste nutrimento podría ser un factor importante para la distribución de taxa y para la función de las CB en el Valle de Zapotitlán Salinas.

5. Las CB podrían ser fuente directa de alimento para los taxa del nivel trófico secundario que tienen en su dieta musgos, líquenes, hongos y cianobacterias que son constituyentes principales de las CB; esto además de fungir como un refugio que es también físicamente estable para otros taxa del nivel trófico terciario que se alimentan de taxa secundarios.
  
6. Finalmente, esta tesis sugiere que las CB y el suelo por debajo de las CB son microhábitats favorables para la fauna edáfica en ecosistema semiáridos como el de Zapotitlán Salinas. Sin embargo, esto se ve potenciado por la presencia de la IR formada por *Mimosa luisana*, así como por la entrada de agua al ecosistema, aunque no todos los taxa parecen tener la misma respuesta a la humedad y a la disponibilidad de nutrimentos.

## 9. LITERATURA CITADA

- Aguiar RM y Salas EO (1999) Patch structure dynamics and implication for the functioning of arid ecosystems. *TREE* 14(7): 273-277.
- Andrés P y Mateos E (2006) Soil mesofaunal responses to post-mining restoration treatments. *Applied Soil Ecology* 33: 67-78.
- Araújo VPF, Bandeira AG y Vasconcellos (2010) Abundance and stratification of soil macroarthropods in a Caatinga Forest in Northeast Brazil. *Braz J. Biol.*70(3):737-746
- Arias-Toledo A, Valverde VM y Reyes SJ (2001) Las plantas de la región de Zapotitlán Salinas, Puebla. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F. 80 pp.
- Arizmendi M.C, Dávila P, Estrada A, Figueroa E, Márquez-Valdelamar L, Lira R, Oliveros-Galindo O y Valiente-Banuet A (2008) Riparian mesquite bushes are important for bird conservation in tropical arid Mexico. *Journal Arid Environment* 72: 1146-1163
- Arriaga L y Maya Y (2007) Spatial variability in decomposition rates in a desert scrub of Northwestern Mexico. *Plant Ecology* 189: 213-225.
- Baatrup E, Bayley M y Axelsen JA (2006) Predation of the mite *Hypoaspis aculeifer* on the springtail *Folsomia fimetaria* and the influence of sex, size, starvation, and poisoning. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 118: 61–70.
- Bamforth S (2008) Protozoa of biological soil crusts of a cool desert in Utah. *Journal of Arid Environments* 72: 722–729.
- Barajas-Guzmán G y Álvarez-Sánchez J (2003) La comunidad de desintegradores en una selva húmeda tropical. Págs. 162-183, en: Álvarez-Sánchez J y Naranjo García (eds) *Ecología del suelo en selva Tropical Húmeda de México*, Instituto de Ecología A.C, Instituto de Biología y Facultad de Ciencias, UNAM, México.

- Bardgett RD y Griffiths B (1997) Ecology and biology of soil protozoa, nematodes and microarthropods. Págs. 129-163, en: Van Elsas JD, Wellington E y Trevors JT (eds) *Modern Soil Microbiology* Marcell Dekker.
- Bates ST, Nash TH III, Sweat KG y Garcia-Pichel F (2010) Fungal communities of lichen-dominated biological soil crusts: diversity, relative microbial biomass, and their relationship to disturbance and crust cover. *Journal of Arid Environments* 74: 1192-1199.
- Belnap J (2001) Microbes and microfauna associated with biological soil crust. Págs. 167-174, en: Belnap J y Lange OL (eds) *Biological soil crust: structure, function, and management*. Springer, New York.
- Belnap J (2003) The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology Environment* 1(5): 181-189.
- Belnap J (2006) The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes* 20: 3159-3178.
- Belnap J y Lange OL (eds) (2001) *Biological soil crust: structure, function, and management*. Springer. New York, 503 pp.
- Belnap J, Gillette DA (1998) Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *Journal of Arid Environments* 39: 133-142.
- Belnap J, Hilty KJ, Rosentreter R, Williams J, Leonard S y Eldridge D (2001) Biological soil crusts: ecology and management. United States Department of the Interior, Bureau of Land Management, Printed Materials Distribution Center, Denver, Colorado.
- Belnap J, Phillips SL, Flints S, Money J y Caldwell M (2008) Global change and biological soil crusts: Effects of ultraviolet augmentation under altered precipitation regimes and nitrogen additions. *Global Change Biology* 14: 670-686.

- Belnap J, Prasse R, y Harper KT (2001) Influence of biological soil crust on soil environments and vascular plants. Págs. 281-300, en: Belnap J y Lange OL (eds) *Biological soil crust: structure, function, and management*. Springer, New York.
- Belnap J (2002) Nitrogen fixation in biological soil crust from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils* 35: 128-135.
- Brantley SL y Shepherd UL (2004) Effect of cryptobiotic crust type on microarthropod assemblages in piñon-juniper woodland in central New México. *Western North American Naturalist* 64(2): 155–165.
- Bravo-Mendoza M, Espinoza C.A, Castellanos VI y Cano Z. (2007) Tamaño de *Neobuxbaumia tetetzo* y longitud de sus espinas apicales en un gradiente de luz bajo *Mimosa luisana*, arbusto nodriza. *Acta Botánica* 79: 69-80.
- Bremner JM (1965) Total Nitrogen. Págs 1149-1178, en: Black CA (eds), *Methods of soil analysis*. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Brown GG, Fragoso C, Barois I, Rojas P, Patrón J, Bueno J, Moreno A, Lavelle P, Ordaz V y Rodríguez C (2001) Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. *Acta Zoológica Mexicana (n.s)* 1: 79-100.
- Burruss M (1979) How to know the mites and ticks, Edit. Brown company publisher. E.U.A. 335 pp.
- Camargo-Ricalde SL y Dhillion SS (2003) Endemic *Mimosa* species can serve as mycorrhizal “resource islands” within semiarid communities of the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Mycorrhiza* 13: 129-136
- Camargo-Ricalde SL, Dhillion SS y Grether R (2002) Community structure of endemic *Mimosa* species and environmental heterogeneity in a semi-arid Mexican valley. *Journal of Vegetation Science* 13: 697-704

- Camargo-Ricalde SL, Reyes-Jaramillo I y Montaña NM (2010) Forestry Insularity effect of four *Mimosa L.* species (Leguminosae-Mimosoideae) on soil nutrients of a Mexican semiarid ecosystem. *Agroforest Systems* 80: 385-397
- Camargo-Ricalde SL, Noé Manuel Montaña, Reyes-Jaramillo I, Jiménez-González C y Dhillion SS (2010b) Effect of mycorrhizae on seedlings of six endemic *Mimosa L.* species (Leguminosae–Mimosoideae) from the semi-arid Tehuacán–Cuicatlán Valley, Mexico. *Trees* 24: 67-78
- Castillo-Monroy AP, Maestre FT, Delgado-Baquerizo M y Gallardo A (2010) Biological soil crusts modulate nitrogen availability in semi-arid ecosystems: Insights from a Mediterranean grassland. *Plant and Soil* 333: 21-34.
- Castillo-Monroy y 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.
- Cepeda P J y Whitford W (1990) Microartrópodos edáficos del desierto Chihuahuense, al norte de México. *Folia Entomológica Mexicana* 78: 257-272.
- Cervantes-Ramírez C (2002) Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México. Instituto de Geografía , UNAM, México, 185 pp.
- Challenger A y Soberón J (2008) Los ecosistemas terrestres. Págs 87-108 en: *Capital Natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México.
- Chapin SF, Matson AP y Monney HA (2002) *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer-Verlag New York, 416 pp.
- Chernov IJ, Striganova BR y Ananjeva SI (1977) Soil fauna of polar desert at Cape Cheluskin, Taimyr Peninsula, USSR. *Oikos* 29: 175-179.
- Chu HF (1942) *The immature insects*, Brown Company Publishers, E.U.A. 464 pp.
- Cloudsley-Thompson JL (1979) El hombre y la biología de zonas áridas: animales en las zonas áridas. Blume, España 225 pp.

- Darby BJ, Neher D y Belnap J (2007) Soil nematode communities are ecologically more mature beneath late- than early-successional stage biological soil crusts. *Applied Soil Ecology* 35: 203-212
- Darby BJ, Neher D y Belnap J (2009) Impact of biological soil crusts and desert plants on soil microfaunal community composition. *Plant and Soil* 328: 421-431.
- Darby BJ y Neher D (2012). Stable isotope composition of microfauna supports the occurrence of biologically fixed nitrogen from cyanobacteria in desert soil food webs. *Journal of Arid Environment* 85: 76-78.
- Dávila P, Arizmendi MC, Valiente-Banuet A, Villaseñor JL, Casas A y Lira R (2002) Biological diversity in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, México. *Biodiversity and Conservation* 11: 421-442.
- De los Ríos A, Cascaso C, Wierzchos J, Fernández y Quesada A (2004) Microstructural characterization of cyanobacterial mats from the McMurdo Ice Shelf, Antarctica. *Applied and Environmental Microbiology* 70: 569-580.
- Doblas ME (2007) Ecología de los invertebrados edáficos en un ecosistema árido mediterráneo, *Tesis Doctoral*, Universidad de Granada, España. 181 pp.
- Edney EB (1967) Water balance in desert arthropods. *Science* 156:1059-1066.
- Eldridge DJ, Zaady E y Schachak M (2000) Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel. *Catena* 40: 323-336.
- Escudero A, Martínez I, De la cruz A, Otálora MG y Maestre FT (2007) Soil lichens have species-specific effects on the seedling emergence of three gypsophile plant species. *Journal of Arid Environments* 70: 18-28.
- Espinosa OD, Ocegueda CS, Aguilar ZC, Flores VO y Llorente-Bousquets J (2008) El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural. Págs. 33-65. en *Capital Natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México.

- Estrada VEG, Sánchez I y Bassols I (1988) Ácaros del suelo de dos zonas del Valle de Tehuacán Puebla, México. *Folia Entomológica Mexicana* 76: 225-236
- Estrada-Venegas EG (ed) (2008) Fauna del suelo I: micro, meso y macrofauna. Colegio de Postgraduados, México, 164 pp.
- Faisal M y Ahmad M (2005) Collembola diversity in changing agricultural landscapes of the Thar Desert: A case study in Sriganganagar district of Rajasthan, India. *Journal of Arid Environments* 63: 717–724.
- Felix-Herrán AJ, Angoa-Perez VM, Serrato-Flores R, Frías-Hernández JT y Olalde-Portugal V (2007) Impacto de la densidad de Gatuño (*Mimosa monancistra*) en la microflora de los suelos del semiárido del estado de Aguascalientes. *Ra Ximhai* 3(2): 461-480.
- Ferguson S y Joly D (2002) Dynamics of springtail and mites populations: the role density dependence, predation, and weather. *Ecological Entomology* 27:565-573.
- Fragoso C, Reyes-Castillo O y Rojas P (2001) Importancia de la biota edáfica en México, *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.) 1: 1-10
- Gao S, Ye X, Chu Y y Dong M (2010) Effect of biological soil crusts on profile distribution of soil water, organic carbon and total nitrogen in Mu Us Sandland, China. *Journal of Plant Ecology* 3: 279-284
- García-Espino GJR, Reynaga, JG, Medina y Jasso R (1989) Características físicas y químicas de suelos de islas de fertilidad y áreas adyacentes de mezquite (*Prosopis glandulosa* Torr.) en un matorral mediano espinoso en el norte de Coahuila. *Agraria Rev. Científica UAAAN* 5: 38-47
- García-Gómez A, Castaño-Meneses G, Palacios-Vargas JG (2011) Distribución y diversidad de colémbolos (Hexapoda: Collembola) en el gradiente altitudinal de un bosque templado en México. *Revista Biológica Tropical* 59 (1): 315-327
- García-Moya E y McKell C (1970) Contribution of shrubs to the nitrogen economy of a desert-wash plant community. *Ecology* 51: 81-88

- García-Oliva F (1991) Influencia de la dinámica del paisaje en la distribución de las comunidades vegetales en la Cuenca del Río Zapotitlán, Puebla. *Investigaciones Geográficas* 23: 53-70.
- García-Pichel F, Johnson SL, Youngkin D y Belnap J (2003) Small-scale vertical distribution of bacterial biomass and diversity in biological soil crust from arid land in the Colorado Plateau. *Microbial Ecology* 46: 312-321
- Gerson U (1969) Moss-Arthropod Associations *The Bryologist* 72(4): 495-500
- Godínez-Alvarez H, Morín C, Rivera-Aguilar V (2012) Germination, survival and growth of three vascular plant on biological soil crust from a Mexican tropical desert. *Plant Biology* 14: 157-162.
- Greenslade D (1991) Collembola (Springtails). Págs 252-264, en: *The Insects of Australia*. 2ª ed. Vol. I, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Division of Entomology), Melbourne University Press.
- Harper K y Belnap J (2001) The influence of soil crust on mineral uptake by associated vascular plants. *Journal of Arid Environments* 47: 347-357.
- Hawkes CV (2003) Microorganismos del suelo, plantas en peligro de extinción y la conservación del Matorral de Florida. *Ecosistemas* 2003/2 URL: <http://www.aeet.org/ecosistemas/032/investigacion3.htm> (Fecha de consulta: marzo 2011).
- Hawkes CV (2004) Effects of biological soil crusts on seed germination of four endangered herbs in a xeric Florida shrubland during drought. *Plant Ecology* 170: 121-134.
- Herman RP, Provencio K, Herrera-Matos J y Torrez R (1995) Resource islands predicts the distribution of heterotrophic bacteria in Chihuahuan desert soils. *Applied and Environmental Microbiology*. 61: 816-821.
- Hernández M (2006) La vida en los desiertos mexicanos. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 188 pp.

- Hoffmann H y Riverón R (1992) Biorrelaciones entre los musgos y su acarofauna en México. *Tropical Bryology* 6: 105-110.
- Huerta Lwanga E, Rodríguez-Olán J, Evia-Castillo I, Montejo-Meneses E, De la Cruz-Mondragón M y García-Hernández R (2007) Relación entre la fertilidad del suelo y su población de macroinvertebrados. *Terra Latinoamericana* 26: 171-181.
- Jackson ML (1964) Análisis químico de suelos. Omega, Barcelona, España. 662 pp.
- Jiménez-Aguilar A (2005) Caracterización funcional de las costras biológicas de suelo en un pastizal de San Luis Potosí. Tesis de Maestría en Ciencias Aplicadas. Instituto Potosino de investigación científica y tecnológica A.C. San Luis Potosí, 60 pp.
- Jiménez-Aguilar, Huber-Sannwald E, Belnap J, Smart DR y Arredondo JT (2009) Biological soil crusts exhibit a dynamic response to seasonal rain and release from grazing with implications for soil stability. *Journal of Arid Environments* 73: 1158–1169.
- Lalley JS, Viles HA, Henschel JR y Lalley V (2006) Lichen-dominated soil crusts as arthropod habitat in warm deserts. *Journal of Arid Environments* 67: 579–593.
- Langmaack M, Schrader S y Helming K (2001) Effect of mesofaunal activity on the rehabilitation of sealed soil surfaces. *Applied Soil Ecology* 16: 121–130.
- Lavelle LP, Blanchart E, Spain AV y Martin S (1992) Impact of Soil Fauna on the Properties of Soils in the Humid Tropics. *Myths and Science of Soils of the Tropics*. SSSA Special Publication 29.
- Lensing JT, Tood y Wise H (2005) the impact of altered precipitation on spatial stratification and activity-densities of springtails(Collembola) and spider (Araneae). *Ecological Entomology* 30:194-200.
- Li XR, Chen YW, Su YG, Tan HJ (2006) Effects of biological soil crust on desert insect diversity: evidence from the Tengger Desert of Northern China. *Arid Land Res. Manage.* 20: 263–280.

- Linden DR, Hendrix PF, Coleman DC y van Vilet PCJ (1994) Faunal indicators of soil quality. Págs 91-106, en: Doran JW and Jones AJ (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA Special Publication No. 35, Madison.
- López-Cortez A, Maya Y y García-Maldonado JQ (2010) Diversidad filogenética de especies de *Microcoleus* de costras biológicas de suelo de la península de Baja California, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 1- 7.
- Loring S, Weems D y Whitford W (1988) Dame Abundance and Diversity of Surface-active Collembola along a Watershed in the Northern Chihuahuan Desert. *American Midland Naturalist* 119(1): 21-30.
- MacKay W (1991) The role of ants and termites in desert communities, Págs 113-150, en: Polis G (ed) *The ecology of desert communities*. The university of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- Mackay W, Silva S, Lightfoot D, Pagani M y Whitford W (1986) Effect of Increased Soil Moisture and Reduced Soil Temperature on a Desert Soil Arthropod Community. *American Midland Naturalist* 116(1): 45-56.
- Maestre FT, Bowker MA, Cantón Y, Castillo-Monroy AP, Cortina J, Escolar C, Escudero A, Lázaro R y Martínez (2011) Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *Journal of Arid Environments* 75:1282-1291.
- Magurran AE (2004) Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press, Princeton, 256 pp.
- Manzanilla-López RH (2008) Los nematodos, su papel biológico y ecológico en el ambiente edáfico. Págs 23-32, en: Estrada-Venegas EG (ed). Fauna del suelo I: micro, meso y macrofauna. Colegio de Postgraduados, México.
- Maya Y y López-Cortés A (2002) Cyanobacterial microbiotic crusts in eroded soils of a tropical dry forest in the Baja California Peninsula, Mexico. *Geomicrobiology Journal* 19: 505-518.

- Mendoza A, Villalobos FJ, Ruíz M L y Castro R (1999) Patrones ecológicos de los colémbolos en un cultivo de maíz en Balum canal, Chiapas, México. *Acta Zoológica Mexicana* (n.s) 78: 83-101.
- Mille PSR, Parra AM y Perez C.A (1993). Guía para la identificación de invertebrados. Ed. Trillas, México, 464 pp.
- Montaño NM, García-Sánchez R, Ochoa-de la Rosa G y Monroy-Ata A (2006) Relación entre la vegetación arbustiva, el mezquite y el suelo de un ecosistema semiárido en México. *TERRA Latinoamericana* 24(2): 193-205.
- Moreira MS, Huisig EJ y Bignell (2012) *Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo*. Instituto Nacional de Ecología. México 337 pp.
- Moreno C (2001) Métodos para medir la biodiversidad. M&T–Manuales y Tesis SEA, vol.1. Zaragoza, España, 84 pp.
- Morín A (2008) Efecto de las costras biológicas sobre la germinación y crecimiento temprano de tres especies vegetales de la región del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. Tesis de Maestría en Ciencias, FES-Iztacala. UNAM, 63 pp.
- Morón-Ríos A y Huerta-Lwanga E (2006) Soil macrofauna of two successional evergreen cloud forest stages from the Cerro Huitepec nature reserve, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. *Interciencia* 31:611-615.
- Murphy J y Riley JP (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analyses Chemical Acta* 27: 31-36.
- Negrete-Yankelevich S, Fragoso C, Newton A.C, Russell G y Heal OW (2008) Decomposition and macroinvertebrates in experimental litter along a secondary chronosequence of tropical montane forest. *Biology and Fertility of Soils* 44: 853-861.
- Negrete-Yankelevich S y Barois-Boullard I (2012) Bajo tus pies. La vida en el suelo. *Biodiversitas* 105: 6-9

- Neher DA (1999) Soil community composition and ecosystem processes Comparing agricultural ecosystems with natural ecosystems. *Agroforestry Systems* 45: 159-185.
- Neher DA, Lewins SA, Weicht TR y Darby BJ (2009) Microarthropod communities associated with biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan deserts. *Journal of Arid Environments* 73: 672–677.
- Olsen SR y Dean LA (1965) Phosphorus. Pags. 1035-1049, en: Black CA (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin
- Ortiz-Villanueva B y Ortiz-Solorio CA (1990) Edafología. Propiedades físicas del suelo. Séptima edición. Editorial: Universidad Autónoma Chapingo, 393 pp.
- Osler GRH y Sommerkork M (2007) Toward a complete soil C and N cycle: incorporating the soil fauna. *Ecology* 88(7): 1611-1621.
- Palacios Vargas JG, (2000) Los colémbolos en los ecosistemas mexicanos. CONABIO *Biodiversitas* 29:12-15.
- Palacios-Vargas JG y Mejía-Recamier BE (2004) Diversidad, abundancia y variación estacional de los colémbolos de necrotrampas. Págs 94-106, en: Estrada-Venegas EG. Fauna del suelo I: micro, meso y macrofauna. Colegio de Postgraduados, México.
- Palacios-Vargas JG, Castaño-Meneses G, Gómez-Anaya JA, Martínez-Yrizar A, Mejía - Recamier BE y Martínez-Sánchez J (2007) Litter and soil arthropods diversity and density in a tropical dry forest ecosystem in Western Mexico. *Biodivers Conserv* 16: 3703–3717.
- Pavón NP, Briones O y Flores-Rivas J (2005) Litterfall production and nitrogen content in an intertropical semi-arid Mexican scrub. *Journal of Arid Environments* 60: 1-13.
- Perroni-Ventura Y (2007) Islas de fertilidad de un sistema semiárido: Nutrientes en el suelo y su relación con la diversidad vegetal. *Tesis de Doctorado*. Instituto de Ecología, Veracruz, México, 100 pp.

- Perroni-Ventura Y, Montaña C y García-Oliva F (2006) Relationship between soil nutrient availability and plant species richness in a tropical semi-arid environment. *Journal of Vegetation Science* 17: 719-728.
- Perroni-Ventura Y, Montaña C, García-Oliva F (2010) Carbon-nitrogen interactions in fertility island soil from a tropical semi-arid ecosystem. *Functional Ecology* 24: 233-242.
- Peterson H y Luxton M A (1982) comparative analysis of soil fauna populations and their role in decomposition processes *Oikos* 39:3.
- Prieto TD, Vázquez GM y Rodríguez AC (1999) Comunidades de la mesofauna edáfica en una selva baja inundable de la Reserva de la Biósfera de Sian Kaan', Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical* 47(3): 489-492
- Quiñonez-Vera JJ, Castellanos-Pérez E, Valencia-Castro CM, Martínez-Ríos JJ, Sánchez-Olvera T y Montes-González CA (2009) Efecto de la costra biológica sobre la infiltración de agua en un pastizal. *Terra Latinoamericana* 27: 287-293.
- Ramírez GA (2008) Densidad de la fauna edáfica como indicador de la calidad del suelo en bosques templados y zonas adyacentes en México, Tesis de Licenciatura, FES Zaragoza, UNAM. 89 pp.
- Reyes-Reyes GL, Baron-Ocampo I, Cuali-Alvarez, Frías-Hernández JT, Olalde-Portugal V, Varela-Fregoso L y Dendooven L (2002) C and N dynamics in soil from the central highlands of Mexico as affected by mesquite (*Prosopis* spp.) and huizache (*Acacia tortuosa*): a laboratory investigation. *Applied Soil Ecology* 19: 27-34.
- Reynolds JF, Virginia RA, Kemp PR, De Soyza AG y Tremmel DC (1999) Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of resource island development. *Ecological Monographs* 69(1): 69-106.
- Ríos-Casanova L, Valiente-Banuet A y Rigo-Garay V (2004) Las hormigas del Valle de Tehuacán (hymenoptera: formicidae): una comparación con otras zonas áridas de México. *Acta Zoológica Mexicana* 20(1): 37-54.

- Rivera-Aguilar V, Godínez-Alvarez H, Manuell-Cacheux I y Rodríguez-Zaragoza S (2005) Physical effects of biological soil crusts on seed germination of two desert plants under laboratory conditions. *Journal of Arid Environments* 63: 344-352.
- Rivera-Aguilar V, Montejano S, Rodríguez-Zaragoza A, Durán-Díaz (2006) Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the biological soil crusts of the Tehuacán Valley, Puebla, Mexico. *Journal of Arid Environments* 67: 208-225.
- Rivera-Aguilar V, Godínez-Álvarez H, Moreno-Torres R, Rodríguez-Zaragoza S (2009) Soil physico-chemical properties affecting the distribution of biological soil crusts along an environmental transect al Zapotitlán Drylands, México. *Journal of Arid Environments* 73: 1023-1028.
- Rivera-García E y Viggers-Carrasco (1991) Estructura trófica de una comunidad de artrópodos epígeos, en un Magueyal, Bolso de Mapimí, Durango. *Acta Zoológica Mexicana* 48: 1-29.
- Robertson P.G, Coleman D.C, Bledsoe C.S y Sollins P (1999) *Standard soil methods for long-term ecological research (LTER)*. Oxford University Press, 457 pp.
- Robinson JV (1981) The effects of architectural variation in habitat on a spider community: an experimental field study. *Ecology* 62: 73–80.
- Rodríguez BLA y Morón MA (2010) *Plagas del suelo*. Mundi-Prensa, México, 417 pp.
- Rosentreter R, Bowker M y Belnap JA (2008) *Field Guide to Biological Soil Crusts of Western U.S. Drylands*. Government Printing Office, Denver, Colorado, 104 pp.
- Rzedowsky J (1978) *Vegetación de México*. Limusa, México, 432 pp.
- Sandoval-Pérez AL (2011) Efecto de *Mimosa luisana* (Leguminosae) y de las costras biológicas sobre la dinámica del carbono y del nitrógeno en el suelo de un ecosistema semiárido en México. *Tesis de Maestría en Biología*, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, D.F., 92 pp.

- Santos FP y Whintford GW (1981) The effects of microarthropods on litter decomposition in a Chihuahuan Desert ecosystem. *Ecology* 62(3): 654-663.
- Seastedt TR (1984) The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. *Annual Review of Entomology* 29: 25-46.
- Seyd EL y Seaward (1984) The association of oribatid mites with lichens. *Zoological Journal of the Linnean Society* 80: 369-420.
- Shepherd UL, Brantley SL y Tarleton CA (2002) Species richness and abundance patterns of microarthropods on cryptobiotic crusts in a pinon-juniper habitat: a call for greater knowledge. *Journal of Arid Environments* 52: 349–360.
- Skujins J (1991) Semiarid land and desert: soil resource and reclamation. Marcel Dekker Inc. USA, 668 pp.
- Sokal RR y Rohlf FJ (1995) *Biometry. The principles and practice of statistics in biological research*. W.H. Freeman and Co., New York, 362 pp.
- Steinberger y Whitford 1985 Composition and vertical distribution patterns of the microarthropod fauna in a Negev desert soil. *Journal of Zoology* 206: 329–339.
- Steinberger Y (1991) Biology of arid region soil: faunal components. Págs 173-192, en: Skujins (ed) Semiarid land and desert: soil resource and reclamation. Marcel Dekker Inc. USA.
- Toledo, M. V. & Ordóñez, M. J. 1998. El panorama de la biodiversidad de México: una revisión de los hábitats terrestres. Págs. 739-757, en: Ramamoorthy TP, Bye R, Lot A y Fa J (eds). *La diversidad biológica de México. Orígenes y distribución*. Instituto de Biología. UNAM. México.
- Tongway DJ, Cortina J y Maestre F (2004) Heterogeneidad espacial y gestión de medios semiáridos. *Ecosistemas* 13(1): 2-15.

- Urbaneja AJ, Ripollés L, Abad R, Calvo J, Vanaclocha P, Tortosa D, Jacas JA, Castañera P (2005) Importancia de los artrópodos depredadores de insectos y ácaros en España. *Boletín de Sanidad Vegetal de Plagas* 31: 209-223.
- Valiente-Banuet A (1996) La conservación de los desiertos un desafío. *Revista Ocelot* 4: 34-37.
- Vázquez G y Palacios-Vargas JG (2004) Catálogo de colémbolos (Hexápoda Collembola) de Sian Ka'an, Quintana Roo, México. Universidad de Quintana Roo. 123 pp.
- Velasco-Molina HA (1991) Zonas áridas y semiáridas: sus características y manejo. Limusa, México, 725 pp.
- Vittorio P (1979). Biología y ecología del suelo. Blume, México, 169 pp.
- von Ende CN (1993) Repeated-measures analysis: growth and other time-dependant measures. Págs. 113-137, en: Scheiner SM y Gurevitch J (ed), Design and analysis of ecological experiments. Chapman y Hall; New York.
- Wallwork A (1970) Ecology of soil animals. McGraw Hill, London. 283 pp.
- Whitford WG (1996) The importance of the biodiversity of soil biota in arid ecosystems. *Biodiversity and Conservation* 5: 185-195.
- Wolters V (2000) Invertebrate control of soil organic matter stability. *Biology Fertility Soils* 31: 1-19.
- Yépez-Hernández FJ (2011) Efecto de *Mimosa luisana* y de las costras biológicas sobre las comunidades microbianas del suelo de un ecosistema semiárido: diversidad y capacidad antibiótica hacia hongos fitopatógenos. *Tesis de Licenciatura*, FES Zaragoza, UNAM. 82 pp.
- Zak J y Whitford W (1998) Interactions among soil biota in desert ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 24: 87-100.