

**IPICYT**

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN CIENCIAS APLICADAS**

**Efecto del uso del suelo en los procesos  
ecohidrológicos y servicios ambientales de los  
pastizales semiáridos del centro de México**

Tesis que presenta

**Lorena Elisa Sánchez Higuero**

Para obtener el grado de

**Maestra en Ciencias Aplicadas**

en la opción de

**Ciencias Ambientales**

**Codirectores de la Tesis:**

**Dra. Elisabeth Huber-Sannwald**

**Dr. Jaime Carrera Hernández**

San Luis Potosí, S.L.P., febrero de 2013



## Constancia de aprobación de la tesis

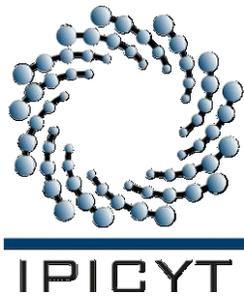
La tesis “Efecto del uso del suelo en los procesos ecohidrológicos y servicios ambientales de los pastizales semiáridos del centro de México” presentada para obtener el Grado de de Maestro en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales fue elaborada por **Lorena Elisa Sánchez Higuero** y aprobada el **30 de enero de 2013** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dra. Elisabeth Huber-Sannwald  
(Director de la tesis)

Dr. Jaime Carrera Hernández  
(Codirector de la tesis)

Dr. Tulio Arredondo Moreno  
(Miembro del Comité Tutorial)

Dr. Víctor Reyes Gómez  
(Miembro del Comité Tutorial)

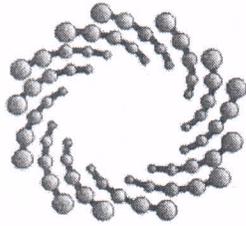


## Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Ecología y Cambio Global y Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección de los doctores Dra. Elisabeth Huber-Sannwald y Dr. Jaime Carrera Hernández.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. de registro **376192**) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

La investigación de esta tesis fue financiada como parte del proyecto SEP-CONACYT “Evaluación de los Servicios Ecosistémicos de los pastizales semiáridos en México” (No. Ref. **132649**)



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 066 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 7 días del mes de febrero del año 2013, se reunió a las 10:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. Jaime Jesús Carrera Hernández</b>	<b>Presidente</b>	<b>UNAM</b>
<b>Dr. José Tulio Arredondo Moreno</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dra. Elisabeth Huber- Sannwald</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS APLICADAS  
EN LA OPCION DE CIENCIAS AMBIENTALES**

sustentó la C.

**Lorena Elisa Sánchez Higuero**

sobre la Tesis intitulada:

*Efecto del uso de suelo en los procesos ecohidrológicos y servicios ambientales de los pastizales del centro de México*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dra. Elisabeth Huber- Sannwald**  
**Dr. Jaime Jesús Carrera Hernández (UNAM)**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLA**

Dándose por terminado el acto a las 12:35 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 7 días del mes de febrero de 2013.

**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico

**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado



*En memoria de Ma. Concepción*  
*04 Marzo 1957 - 23 Diciembre 2012*

## **Dedicatoria**

A mi familia sanguínea y elegida, por ser el faro que orienta en toda ocasión.

Martita, como el sol siempre brillante y que sin falta, aunque no te vea, sé que  
estas.

Chacho, por estar conmigo ante todo aún cuando no sea tu batalla.

A mi querido Chovías, por su fidelidad durante estos dos años de ausencia.

G.R.G. Adelantado a tu tiempo, visionario como sólo los más grandes y pilar  
fundamental de mi vida. Te extraña tu xalapeña...

## **Agradecimientos**

Se agradece al CONACYT por la beca no.376192 otorgada a quien suscribe.

De la misma forma se agradece al proyecto de investigación SEP-CONACYT 132649 por el financiamiento para la realización del presente trabajo.

Al IPICyT por todas las facilidades otorgadas y especialmente a todo aquel recurso humano que son la base del mismo aunque no siempre aparezcan a cuadro, a todas las asistentes, administrativos, técnicos y demás que faltan por mencionar, gracias por la labor que desempeñan y de la cual me he servido.

A mi comité tutorial por todas sus enseñanzas y aportaciones académicas y en especial las personales.

A mi directora, Elisabeth, por su compromiso y empeño para la realización de éste trabajo.

A los técnicos M. en C. Juan Pablo Rodas Ortíz, M. en C. Guillermo Vidriales Escobar, M. en C. Dulce Isela de Fátima Partida Gutiérrez e I.Q. Ma. del Carmen Rocha Medina, por todo su apoyo técnico brindado para la realización de este trabajo.

A la División de Geociencias Aplicadas por acogerme y apoyarme como un estudiante más de su división y en especial al Dr. José Alfredo Ramos por toda su experiencia compartida y Gabriela Pérez por todo su apoyo.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en su Campo Experimental “Vaquerías” y en especial a los doctores Miguel Luna y Rodolfo Barretero por todo el apoyo y facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

A toda la comunidad del Ejido Vaquerías, Mpio. de Ojuelos de Jalisco, por su apoyo para la implementación de este trabajo.

Al C. Jorge Hernández que aunque sin nombramiento oficial, ha sido el mago y el pilar sin el cual este trabajo no podría haber sido realizado. Gracias por todo su apoyo mi estimado.

Mi estimado Johannes Paulus, gracias por ponerte de esa forma la camiseta.

A las fundaciones Higueredo-García y Sánchez y Ramírez por sus valiosas aportaciones para lograr la ejecución de este trabajo.

A mis queridos compañeros y ya no sólo de generación, ustedes fueron una razón importante y me alegra haberles conocido en las malas y después en las buenas. P.D. Nombrarlos a todos llevaría mucho espacio pero ese, ya nadie se los quita.

A mis estimados Malú (espanto), Omar (wifo), Ariz (vznaga), Tete (la mala), Evelyn (Joselyn-Pinky-Tribilín...etc), Angie, Adriana y Sonia, qué les puedo decir, compartimos todo lo bueno y malo que siempre se vive pero lo mejor es tenerlos a ustedes.

Mi querido hermanastro Ulises...gracias, hasta siempre el café y recuerda en todo momento lo dicho.

A todos aquellos que de momento no me vienen a la memoria pero que fueron parte de esto, gracias.

A mi segundo hogar que siempre me recibió como si nunca me hubiese ido.

A mi querida amiga Aidan, aquí no hubo conciertos pero aún a tanta distancia siempre estuviste cerca, palabras faltan para agradecerte todo lo que has hecho por mí.

A mis amigos y colegas Adi, Karla, Blanca, Judy, Toña y Marco, maravilloso equipo y amigos excepcionales.

A Paty que aún desde quien sabe dónde, siempre ha estado ahí como el hogar al que se vuelve a reconfortarse y deleitarse.

## Contenido

<b>Constancia de aprobación de la tesis .....</b>	<b>ii</b>
<b>Créditos Institucionales.....</b>	<b>iii</b>
<b>Acta de examen .....</b>	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>vi</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>vii</b>
<b>Contenido.....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de cuadros.....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>xix</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xx</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Materiales y métodos .....</b>	<b>7</b>
2.1 Descripción del área de estudio .....	7
2.2 Tratamientos .....	7
2.3 Métodos.....	9
2.4 Análisis estadístico .....	13
<b>3. Resultados .....</b>	<b>16</b>
3.1 Distribución espacio-temporal de la precipitación .....	16
3.2 Efecto del sistema de pastoreo sobre variables ecohidrológicas, suelo y vegetación .....	21
3.3 Influencia de especies exóticas o nativas en variables ecohidrológicas, suelo y vegetación .....	25
3.4 Influencia del sistema de pastoreo, fuego prescrito y especies de gramíneas sobre variables ecohidrológicas, suelo y vegetación .....	28
<b>4. Discusión .....</b>	<b>32</b>
4.1 Precipitación.....	32
4.2 Efecto del sistema de pastoreo sobre variables ecohidrológicas, suelo y vegetación .....	32
4.3 Influencia de gramíneas exóticas y nativas en variables ecohidrológicas, suelo y vegetación .....	34

4.4 Influencia del sistema de pastoreo, manejo de fuego y presencia de dos gramíneas nativas sobre variables ecohidrológicas, suelo y vegetación .....	35
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>37</b>
<b>6 Referencias .....</b>	<b>38</b>
<b>Anexo 1. ....</b>	<b>44</b>
<b>Anexo 2. ....</b>	<b>45</b>
<b>Anexo 3. ....</b>	<b>50</b>
<b>Anexo 4. ....</b>	<b>54</b>

## Lista de cuadros

<b>Cuadro 1. Ubicación de sitios de estudio, régimen de propiedad, pastoreo y tipo de pastoreo que presentan. ....</b>	<b>9</b>
<b>Cuadro 2. Diseño experimental del muestro de suelo .....</b>	<b>12</b>
<b>Cuadro 3. Diseño experimental de las camas de escorrentía por tratamiento. ....</b>	<b>13</b>
<b>Cuadro 4. Pluviómetros monitoreados (junio 2011 a junio 2012) .....</b>	<b>16</b>
<b>Cuadro 5. Precipitación acumulada (mm) por temporada de lluvias (junio a octubre) y secas (noviembre a mayo) en los seis sitios de estudio. Entre paréntesis se encuentra el número de eventos pluviales registrados. ....</b>	<b>16</b>
<b>Cuadro 7. Coeficiente de variación (C.V., %) de la precipitación mensual considerando el año y la época de lluvias y secas en los seis sitios. ....</b>	<b>17</b>
<b>Cuadro 8. Número de eventos pluviales que se registró por número de sitios. ....</b>	<b>18</b>
<b>Cuadro 9. Intervalos de la magnitud de todos los eventos de precipitación registrados en los seis sitios entre junio de 2011 y mayo de 2012 y el porcentaje de frecuencia. ....</b>	<b>18</b>
<b>Cuadro 6. Precipitación acumulada por temporada y por mes en cada sitio. ....</b>	<b>44</b>
<b>Cuadro 10. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Volumen de escorrentía superficial total anual, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años. ....</b>	<b>45</b>
<b>Cuadro 11. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Contenido volumétrico de agua a 15 cm de profundidad, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años. ....</b>	<b>45</b>
<b>Cuadro 12. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años. ....</b>	<b>45</b>
<b>Cuadro 13. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con sitio (pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años) y especie para el Contenido de materia orgánica. ....</b>	<b>45</b>

**Cuadro 14. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con sitio (pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años) y especie para la Biomasa de raíces bajo cobertura vegetal a 15 y 30 cm de profundidad. ....45**

**Cuadro 15. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con sitio (pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años) y especie para la densidad aparente a 15 y 30 cm de profundidad. ....46**

**Cuadro 16. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Cobertura total de la gramínea dominante, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años. ....46**

**Cuadro 17. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Área de Parches (PA) Volumen, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años. 46**

**Cuadro 18. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Número de parches (NP), considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años. 46**

**Cuadro 19. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Índice de Áreas de Parches (PAI), considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años. 46**

**Cuadro 20. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para la Longitud Media Inter parche (AIL), considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años. 47**

**Cuadro 21. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Índice de Organización del Paisaje (LOI), considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años. ....47**

**Cuadro 22. Coeficiente de correlación y residuales de mínimos cuadrados ( $R^2$ ) entre el Volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL. ....48**

**Cuadro 23. Coeficientes y residuales cuadrados mínimos ( $R^2$ ) de la relación lineal ó múltiple entre el volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica**

*a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL contemplando los diferentes pastoreos a) Exclusión 30 años, b) Exclusión 10 años, c) Estacional abierto, d) Estacional con bordo y e) Continuo.....49*

*.....49*

*Cuadro 23. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Volumen de escorrentía superficial total anual, considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, L. phleoides o E. curvula.....50*

*Cuadro 24. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el contenido volumétrico de agua a 15 cm de profundidad, considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, L. phleoides o E. curvula.....50*

*Cuadro 25. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad, considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, L. phleoides o E. curvula.....50*

*Cuadro 26. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (L. phleoides o E. curvula) para el Contenido de materia orgánica. ....50*

*Cuadro 27. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (L. phleoides o E. curvula) para la Biomasa de raíces bajo vegetación dominante a 15 y 30 cm de profundidad.....50*

*Cuadro 28. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (L. phleoides o E. curvula) para la Biomasa de raíces en interespacio a 15 cm de profundidad .....50*

*Cuadro 29. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (L. phleoides o E. curvula) para la Biomasa de raíces en interespacio a 30 cm de profundidad. ....51*

*Cuadro 30. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (L. phleoides o E. curvula) para la densidad aparente a 15 y 30 cm de profundidad. ....51*

*Cuadro 31. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el porcentaje de cobertura total de la gramínea dominante, considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, L. phleoides o E. curvula.....51*

*Cuadro 32. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Área de Parches (PA), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, L. phleoides o E. curvula. ....51*

<b>Cuadro 33. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Número de Parches (NP), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, <i>L. phleoides</i> o <i>E. curvula</i>.</b>	<b>51</b>
<b>Cuadro 34. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Índice de Áreas de Parches (PAI), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, <i>L. phleoides</i> o <i>E. curvula</i>.</b>	<b>51</b>
<b>Cuadro 35. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para la Longitud Media Interparche (AIL), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, <i>L. phleoides</i> o <i>E. curvula</i>.</b>	<b>52</b>
<b>Cuadro 36. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Índice de Organización del Paisaje (LOI), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, <i>L. phleoides</i> o <i>E. curvula</i>.</b>	<b>52</b>
<b>Cuadro 37. Coeficiente de correlación y residuales de mínimos cuadrados (<math>R^2</math>) entre el Volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL.</b>	<b>52</b>
<b>Cuadro 38. Coeficientes y residuales cuadrados mínimos (<math>R^2</math>) de la relación lineal ó múltiple entre el volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL contemplando a) especie nativa (<i>L. phleoides</i>) y b) especie exótica (<i>E. curvula</i>).</b>	<b>53</b>
<b>Cuadro 39. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (<i>B. gracilis</i> o <i>M. rigida</i>) sobre el Volumen de escorrentía superficial anual.</b>	<b>54</b>
<b>Cuadro 40. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (<i>B. gracilis</i> o <i>M. rigida</i>) sobre el c</b>	<b>54</b>
<b>Contenido volumétrico de agua a 15 cm de profundidad.</b>	<b>54</b>
<b>Cuadro 41. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (<i>B. gracilis</i> o <i>M. rigida</i>) sobre el contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad.</b>	<b>54</b>

<b>Cuadro 42. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre el Contenido de materia orgánica. ....</b>	<b>54</b>
<b>Cuadro 43. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre la biomasa de raíces bajo vegetación dominante a 15 y 30 cm de profundidad. ....</b>	<b>55</b>
<b>Cuadro 44. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre la Biomasa de raíces en interespacio a 15 cm de profundidad. ....</b>	<b>55</b>
<b>Cuadro 45. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre la Biomasa de raíces en interespacio a 30 cm de profundidad. ....</b>	<b>55</b>
<b>Cuadro 46. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre la densidad aparente a 15 y 30 cm de profundidad. ..</b>	<b>55</b>
<b>Cuadro 47. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (B. gracilis o M. rigida) sobre el porcentaje de Cobertura total de la gramínea dominante. ....</b>	<b>55</b>
<b>Cuadro 48. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (B. gracilis o M. rigida) sobre el Área de Parches (PA). ....</b>	<b>56</b>
<b>Cuadro 49. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (B. gracilis o M. rigida) sobre el Número de parches (NP). ....</b>	<b>56</b>
<b>Cuadro 50. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (B. gracilis o M. rigida) sobre el Índice de Áreas de Parches (PAI). ....</b>	<b>56</b>
<b>Cuadro 51. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (B. gracilis o M. rigida) sobre la Longitud Media Interparche (AIL). ....</b>	<b>56</b>
<b>Cuadro 52. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (B. gracilis o M. rigida) sobre el Índice de Organización del Paisaje (LOI). ....</b>	<b>56</b>
<b>Cuadro 53. Coeficiente de correlación y residuales de mínimos cuadrados (<math>R^2</math>) entre el Volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo</b>	

*planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL.....57*

*Cuadro 54. Coeficientes y residuales cuadrados mínimos ( $R^2$ ) de la relación lineal ó múltiple entre el volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL contemplando los diferentes tratamientos de la interacción pastoreo-quema-especie a) Pastoreo continuo sin fuego con *B. gracilis*, b) Pastoreo continuo sin fuego con *M. rigida*, c) Pastoreo continuo con fuego con *B. gracilis*, d) Pastoreo continuo con fuego con *M. rigida*, e) Pastoreo rotacional sin fuego con *B. gracilis*, f) Pastoreo rotacional sin fuego con *M. rigida*, g) Pastoreo rotacional con fuego con *B. gracilis* y h) Pastoreo rotacional con fuego con *M. rigida*. .....60*

## Lista de figuras

- Figura 2. Sistema de camas de escorrentía con los garrafones colectores de escorrentía.....10**
- Figura 3. Juego de varillas de 30 cm para el monitoreo del contenido volumétrico de agua en suelo.....11**
- Figura 4. Histograma de la frecuencia de los diferentes tamaños de eventos de precipitación en los seis sitios de estudio entre junio 2011 y mayo 2012 en Vaquerías y Santo Domingo, Jalisco, México.....19**
- Figura 5. Precipitación mensual (mm) y por temporada (lluvias/secas), en los sitios monitoreados durante el periodo junio de 2011 a mayo de 2012. ....20**
- Figura 7. Medias por mínimos cuadrados  $\pm 1$  E.E. de a) Área de los Parches ( $m^2$ ), b) Índice del Área de los Parches, c) Índice de Organización del Paisaje, d) Número de Parches ( $NP \cdot m^{-2}$ ) y e) Longitud Media Interparche (cm) en exclusiones de 30 y 10 años, pastoreo estacional abierto, estacional bordos y continuo.....24**
- Figura 8. Medias y E.E. S.S. de a) Volumen de escorrentía superficial anual, b) Contenido de materia orgánica en suelo a 15 y 30 cm de profundidad, c) Contenido volumétrico de agua en suelo a 15 y 30 cm de profundidad (humedad 15 y 30 cm), d) Biomasa de raíces a 15 y 30 cm de profundidad, e) Cobertura total vegetal y f) Densidad aparente en suelo a 15 y 30 cm de profundidad en presencia de la especie nativa (*L. phleoides*) y la exótica (*E. curvula*). ....26**
- Figura 9. Medias por mínimos cuadrados  $\pm 1$  E.E. de a) Área de los Parches ( $m^2$ ), b) Índice del Área de los Parches, c) Índice de Organización del Paisaje, d) Número de Parches ( $NP \cdot m^{-2}$ ) y e) Longitud Media Interparche (cm) en presencia de la especie nativa (*L. phleoides*) y la exótica (*E. curvula*). ....27**
- Figura 10. Medias y E.E. S.S. de a) Volumen de escorrentía superficial anual, b) Biomasa de raíces a 15 y 30 cm de profundidad, c) Contenido volumétrico de agua en suelo a 15 y 30 cm de profundidad (humedad 15 y 30 cm), d) Contenido de materia orgánica en suelo a 15 y 30 cm de profundidad, e) Cobertura total vegetal y f) Densidad aparente en suelo a 15 y 30 cm de profundidad, contemplando los diferentes tratamientos de la interacción pastoreo-quema-especie a) Pastoreo continuo sin fuego con *B. gracilis*, b) Pastoreo continuo sin fuego con *M. rigida*, c) Pastoreo continuo con fuego con *B. gracilis*, d) Pastoreo continuo con fuego con *M. rigida*, e) Pastoreo rotacional sin fuego con *B. gracilis*, f) Pastoreo rotacional sin fuego con *M. rigida*, g) Pastoreo rotacional con fuego con *B. gracilis* y h) Pastoreo rotacional con fuego con *M. rigida*. ....30**

**Figura 11. Medias por mínimos cuadrados  $\pm 1$  E.E. de a) Área de los Parches ( $m^2$ ), b) Índice del Área de los Parches, c) Índice de Organización del Paisaje, d) Número de Parches ( $NP \cdot m^{-2}$ ) y e) Longitud Media Interparche (cm), contemplando los diferentes tratamientos de la interacción pastoreo-quema-especie a) Pastoreo continuo sin fuego con *B. gracilis*, b) Pastoreo continuo sin fuego con *M. rigida*, c) Pastoreo continuo con fuego con *B. gracilis*, d) Pastoreo continuo con fuego con *M. rigida*, e) Pastoreo rotacional sin fuego con *B. gracilis*, f) Pastoreo rotacional sin fuego con *M. rigida*, g) Pastoreo rotacional con fuego con *B. gracilis* y h) Pastoreo rotacional con fuego con *M. rigida*.....31**

## Resumen

### Efecto del uso del suelo en los procesos ecohidrológicos y servicios ambientales de los pastizales semiáridos del centro de México

PALABRAS CLAVE: pastizal semiárido, uso de suelo, pastoreo, *Bouteloua gracilis*, ecohidrología, escorrentía superficial

Las regiones áridas y semiáridas comprenden en derredor del 40% de la superficie del planeta. El pastizal semiárido se caracteriza por un régimen pluvial altamente variable y escaso. En México por uso de suelo, en especial ganadería, se ha reducido más del 35% su superficie en el país. Existe una fina relación entre el agua, la vegetación (*Bouteloua gracilis*) y el suelo, que genera una red de interacción de procesos ecológicos e hidrológicos y con los servicios ambientales, especialmente los de soporte (formación de suelo, ciclos biogeoquímicos y producción primaria), que deben estudiarse con un enfoque de ecohidrología. El presente trabajo se realizó de junio de 2011 a mayo de 2012 evaluando parámetros ecohidrológicos: precipitación pluvial, volumen de escorrentía superficial, contenido volumétrico de agua, densidad aparente, contenido de materia orgánica en suelo, cobertura vegetal, Número de Parches de vegetación (NP), Área de los Parches (AP), Índice de Área de los Parches (PAI), Longitud Interparche (AIL) e Índice de Organización del Paisaje (LOI) en pastizales sometidos a: a) diferentes pastoreo (continuo, rotacional, estacional, exclusiones de 30 y 10 años), b) introducción de especies exóticas y c) pastizales con presencia/ausencia de manejo de fuego en la región de Los Llanos de Ojuelos, Jal. Para evaluar los efectos del tipo de pastoreo así como la presencia de especie exótica/nativa, se emplearon ANOVAS de una vía y multifactorial en el caso pastoreo-quema-especie. Para evaluar la interacción pastoreo-especie-profundidad del suelo se realizó un ANOVA anidado con la profundidad y en el caso de pastoreo-quema-especie, un ANOVA anidado con profundidad, anidado en especie y fuego. Se realizaron correlaciones de Pearson y regresiones lineales y múltiples entre todas las variables de respuesta de los tres grupos de tratamientos. Los eventos de precipitación fueron en su mayoría pequeños ( $\leq 5.0$  mm); siendo septiembre el más lluvioso para todos los sitio. El primer grupo de pastoreo, las exclusiones (30 y 10 años) presentan la mitad del volumen de escorrentía superficial (VES) contra el pastoreo continuo ( $60 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) y 10% mayor humedad. En el grupo de especie exótica y nativa, no hubo diferencias en VES ni en la humedad pero sí en el NP donde la nativa presentó un 1/3 más de NP que la exótica. Finalmente, el grupo pastoreo-quema-especie, muestra mayor VES en los sitios quemados ( $32 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) que en ausencia de fuego ( $19 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) sin importar el tipo de pastoreo aunque el contenido de materia orgánica fue mayor en pastoreo rotacional (6%) que en continuo (5.1%). Los pastizales con pastoreo presentan mayor escorrentía superficial, más aún con quemas. Los procesos ecohidrológicos funcionan como una red que se debilita con malas prácticas de manejo y dejan más susceptibles los primeros 15 cm del suelo que son los que reciben el mayor impacto de esta actividad.

## Abstract

### Land use effect on ecohydrological processes and environmental services of semiarid grassland, Center of Mexico

KEY WORDS: semiarid grassland, land use, grazing, *Bouteloua gracilis*, Ecohydrology, runoff

Arid and semiarid regions comprise about 40% of Earth's area. Semiarid grasslands are characterized by a highly variable and sparse rainfall patterns. Land use, especially livestock, decrease more than 35% Mexico's semiarid grassland area. There is a relationship between water, vegetation (*Bouteloua gracilis*) and soil which create an interactive network between both ecological and hydrological processes and with environmental services (support: soil sormation, biogeochemical cycles and primary production), and thus need to be studied with an ecohydrological focus This study was conducted from June 2011 to May 2013, with an assessment of ecohydrological parameters: rainfall, run off volume, volumetric water content, soil bulk density, organic matter content, vegetation cover, vegetation patch number (NP), vegetation patch area (PA), patch area index (PAI), average interpatch length (AIL) and landscape organization index (LOI), in a semiarid grassland under: a) different grazing (continuous, rotational, seasonal, 30-year grazing exclosure and 10-year grazing exclosure) conditions, b) the influence of exotic grass species and c) the effect of prescribed fire in the subprovince Los Llanos de Ojuelos, Jal., Mexico. To evaluate the effects of different grazing regimes, the presence of exotic species and prescribed fire one-way and multifactorial ANOVAs were applied To evaluate interaction grazing-species-soil depth, a nested ANOVA was applied. Pearson correlations, linear multiple regressions were performed between all response variables considering each three treatment group and factor. Most rainfall events were small ( $\leq 5.0$  mm) and September was the month with highest rainfalls in all sites. Considering different grazing treatments, both 30 and 10 year exclosures showed half the runoff volume compared to sites with continuous grazing (60 mm $\cdot$ year $^{-1}$ ) and 10% greater soil moisture content. In exotic/native species group treatment, no differences in runoff volume and soil moisture were found. However, a greater NP was observed in native species than in exotic species. Finally, grazing-fire-species group treatment showed greater runoff volume in burned sites regardless of grazing treatments. Organic matter content was higher in rotational grazing (6%) than in continuous grazing (5.1%). Semiarid grasslands with high grazing intensity exhibit an increase in runoff and even more though under prescribed burning. Ecohydrological processes function as a network that are weakened under inadequate management practices and it is the top 15 cm of soil that are more vulnerable to this activity

## 1. Introducción

Las regiones áridas y semiáridas cubren aproximadamente el 40% de la superficie del planeta (D'Odorico y Porporato, 2006; Newman *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2008; Herrick *et al.*, 2010), donde los pastizales representan uno de los biomas más importantes ya que han sido sustento de actividades humanas relacionadas a la producción de alimentos. Los sistemas semiáridos se caracterizan por potenciales de evapotranspiración que suelen exceder en términos anuales, la precipitación existente. Ello, en conjunto con regímenes de lluvias escasos (250 a 600 mm) y altamente variables, son las dos características que rigen y definen las regiones semiáridas (D' O dórico y Porporato, 2006, Lauenroth *et al.*, 2008; Lauenroth y Bradford, 2009).

La principal característica de la precipitación en los ecosistemas semiáridos consiste en la alta variabilidad en el tamaño de los eventos de lluvia. De acuerdo a Lauenroth y Bradford (2009), el 70% de los eventos registrados en la temporada de lluvia corresponden a eventos menores o iguales a 5 mm y contribuyen con el 25% de la precipitación total de la temporada. Ello ha generado interés para comprender las características de éstos pulsos de humedad, pues si bien pueden no ser importante o significativos para plantas superiores, existen evidencias de que si lo son para los microorganismos del suelo, pudiendo ésta responder a través de mecanismos biogeoquímicos (Austin *et al.*, 2004; Belnap *et al.*, 2005).

En México los pastizales semiáridos se encuentran ubicados en las ecorregiones de las Grandes Planicies, Desiertos Mesoamericanos y Elevaciones Semiáridas del Sur (CONABIO, 2012). Se estima que su cobertura original era de alrededor del 12% de la superficie nacional (Velázquez, 2002; Rzedowski, 2006), formando un paisaje heterogéneo junto a la vegetación de matorral y no como una extensión exclusiva de gramíneas (Rzedowski, 2006). La gramínea *Bouteloua gracilis* (navajita), es la especie más representativa de la estepa de pastizal semiárido norteamericano incluyendo México (Medina-Roldán *et al.*, 2007, Lauenroth, 2008). Se trata de una gramínea C<sub>4</sub>, perenne corta de 60 cm, con macollos compactos que dependiendo de la edad, pueden encontrarse fragmentados aunque altamente adaptados morfológica y fisiológicamente a la sequía, pastoreo y fuego (Lauenroth, 2008).

La ganadería extensiva en los pastizales semiáridos inició en la época colonial, cuando el ganado vacuno fue introducido por primera vez en México en el año 1520, presentando una rápida adaptación, especialmente en el altiplano árido y semiárido, con lo que se llegó a duplicar el hato cada 15 años, siendo esta tasa mucho más alta que la alcanzada en Europa (Guevara, 2001). El desarrollo de

esta ganadería con el incremento indiscriminado del número de cabezas de ganado, de la producción agrícola y el crecimiento de zonas urbanas, constituyen los factores que ha determinado el cambio de uso de suelo en las zonas áridas y semiáridas de México siendo éste, una de las mayores presiones sobre los pastizales semiáridos (Clutier, 2007). De acuerdo con Velázquez *et al.* (2002), para el año 2000, este bioma sufrió una reducción cercana al 18% de su cobertura original aunque CONABIO (2012) reporta que la reducción ha sido del 36.63% de la vegetación potencial original de pastizal semiárido. De acuerdo con Arredondo *et al.* (1986), el 73% de los agostaderos son caracterizados por una condición deteriorada y con problemas severos de erosión hídrica y eólica y que sólo el 5% cuenta con condiciones excelentes.

De acuerdo con Milchunas *et al.* (2008), el pastoreo por grandes ungulados nativos, la alta incidencia de sequías y los frecuentes incendios naturales, conforman los principales factores bajo los cuales evolucionaron las adaptaciones de las gramíneas, incluyendo; la estructura y el funcionamiento de los pastizales semiáridos. Diversos estudios (Brussard *et al.*, 1994; Fleischner, 1994; Noss, 1994) se han realizado a fin de determinar si el pastoreo ejerce una acción negativa sobre éste ecosistema de pastizal semiárido. Sobre ello, Hart y Derner (2008) han indicado que el pastoreo que se ha desarrollado de forma natural, como tal no ejerce ningún efecto negativo y que el pastoreo moderado puede favorecer el mantenimiento del pastizal e incrementar la diversidad biológica. Guevara (2001) y Gao *et al.* (2009) por su parte destacan que los efectos negativos observados relacionados al pastoreo, obedecen más a las prácticas de manejo que pueden llegar a generar una degradación acelerada del ecosistema. De igual manera, Kölbl *et al.* (2011) han mencionado que debido a la acción directa del pisoteo, herbivoría y obstrucción por la materia fecal (Milchunas *et al.*, 2008), altas intensidades de pastoreo conllevan a una reducción en la biomasa aérea, favoreciendo también decrementos del 56 % de la biodiversidad y del 90% de la densidad de individuos (Huang *et al.*, 2007), así como también, una menor altura de las plantas y cambios en la composición florística de las comunidades en las que se favorece la promoción de especies no palatables (Gao *et al.*, 2009), así como la invasión de arbustos (Archer *et al.*, 1995). Ello en conjunto representa el síndrome de la degradación y desertificación de los pastizales semiáridos (Schlesinger *et al.* 1990, Huang *et al.*, 2007)

En una serie de estudios (Jones 2000, Lauenroth 2008, Fanselow *et al.* 2011 y Schwanghart y Jamer 2011), se argumenta que el principal impacto del pastoreo radica en la alteración de la estructura del suelo, los procesos ecohidrológicos (i.e. escorrentía superficial y erosión hídrica) y los ciclos biogeoquímicos (Wilcox y Thurow, 2006, Ravi *et al.*, 2009). La alteración de la estructura de suelo se refiere a una modificación en la microtopografía del suelo (Ravi *et al.*, 2009; Kölbl *et al.*,

2011) causada por la compactación a causa del pisoteo, la destrucción de los agregados y la erosión hídrica y/o eólica del material más fino, repercutiendo en la capacidad de retención del agua y el contenido de materia orgánica y nutrientes en el suelo (Ludwig *et al.*, 2005; Milchunas *et al.*, 2008; Dunne *et al.*, 2011, Ravi *et al.*, 2009).

El pastoreo intensivo también afecta significativamente la cobertura vegetal, causando una reducción de los tamaños (área basal) de los parches de vegetación, los cuales potencialmente amortiguan la escorrentía superficial y la erosión (Ludwig *et al.*, 2005; Dunne *et al.*, 2011). Así, la estructura y distribución espacial de la cobertura vegetal influye directamente en el volumen de escorrentía superficial que se favorece en ecosistemas que exhiben una baja cobertura vegetal a causa del pastoreo (Wilcox *et al.*, 2003, Lohse *et al.*, 2009 y Urgeghe *et al.*, 2010). Conforme la zona de suelo desnudo entre los macollos de gramíneas aumenta (ej. interespacios), también lo hace la interconexión de éstos, lo que conlleva a un incremento proporcional de la velocidad del flujo de escorrentía especialmente bajo condiciones de pendiente (Huang *et al.*, 2007; Dunne *et al.*, 2011; Vega y Montaña, 2011).

Los efectos del ganado sobre los ciclos biogeoquímicos del ecosistema de pastizal semiárido ocurren por medio de varios mecanismos incluyendo, la redistribución de los nutrientes, las pérdidas por volatilización de compuestos nitrogenados y la fertilización del suelo por la orina y las heces (Schimel *et al.*, 1985). Los nutrientes disueltos se transportan pendiente abajo por lo que las zonas bajas contienen mayor concentración de nutrientes del suelo (Schimel *et al.*, 1986). Por otro lado, el sobrepastoreo puede provocar altas pérdidas de nutrientes (nitrógeno y fósforo) lo cual, acoplado a la baja disponibilidad de agua, limitan en conjunto la productividad primaria neta de los pastizales (Fernald y Schlesinger, 2001; Gong *et al.*, 2011).

Otro disturbio natural de los pastizales es el fuego, aunque las prácticas de manejo han alterado los regímenes naturales del mismo (Luna, 2009). El fuego prescrito ha sido empleado como herramienta para el control de especies no deseadas, especialmente de las arbustivas (Luna, 2009; Ravi *et al.*, 2009). Un evento de quema produce efectos en varios procesos del ecosistema de pastizal, mientras que la recuperación del mismo dependerá de la integridad de la comunidad biótica previo y posterior al fuego (Pellant *et al.*, 2005; Herrick *et al.*, 2005). La alteración de la estructura física del suelo (rugosidad y estabilidad) y de la capacidad de retención hídrica (alterada por la liberación y condensación de sustancias vegetales como aceites y resinas que forman una capa hidrofóbica) incrementan en conjunto, la escorrentía superficial y la erosión (Ravi *et al.*, 2009; Madsen *et al.*, 2012).

De acuerdo con Allen *et al.* (2011) y dependiendo de la temperatura que alcanza un evento de fuego, existen otros efectos sobre compuestos químicos y propiedades físicas del suelo. Por ejemplo, las temperaturas cercanas a los 100°C sólo afectan ligeramente a la materia orgánica y puede ser totalmente consumida si el suelo alcanza los 450°C. Por su parte, el carbono empieza a volatilizarse a los 180°C, el nitrógeno a 200°C y el fósforo requiere temperaturas mayores a 700°C.

En las últimas décadas, las especies exóticas, principalmente especies de origen africano han sido introducidas y establecidas en pastizales semiáridos del Altiplano mexicano, argumentándose que poseen mayor tolerancia al pastoreo o una recuperación más rápida posterior a ser defoliadas (D'Antonio y Vitousek, 1992). Sin embargo, está bien documentado que la introducción de especies exóticas altera los procesos ecosistémicos en las áreas invadidas al modificar la disponibilidad de agua y nutrientes. Uno de los mecanismos con el que puede lograrlo es por el incremento de biomasa (combustible) y la frecuencia de eventos de fuego al que algunas especies nativas de gramíneas son menos tolerantes, como en el S y NW de los Estados Unidos (Briske *et al.*, 2005).

Las especies nativas como *B. gracilis* se encuentran adaptadas a los eventos de precipitación pequeños ( $\leq 5$  mm, Coffin y Lauenroth, 1991; Singh *et al.*, 1998), lo que le permite un aprovechamiento eficiente del recurso especialmente dentro de los primeros 10 cm fuera del dosel de la planta (Schwinning y Sala, 2004). No obstante, la mayoría de las raíces de ésta especie se encuentran dentro de los primeros 15 cm de profundidad, mismos que son los más susceptibles por el pastoreo (Svejcar y Christiansen, 1987). La ausencia o sustitución de las gramíneas nativas puede acarrear alteraciones en la capacidad de retención hídrica, en la composición de la materia orgánica del sitio, en las tasas de mineralización y, finalmente, en el régimen del fuego y en el microclima (D'Antonio y Vitousek, 1992; Giese *et al.*, 2009; Ravi *et al.*, 2009; Madsen *et al.*, 2012).

*Eragrostis curvula* es una gramínea africana que tiene una amplia distribución en América y que se registra en la región de Los Llanos de Ojuelos, Jal. Su introducción ocurrió en los 80's con el fin de mejorar la disponibilidad de forraje para el ganado. No obstante, su valor nutrimental es bajo en algunas ocasiones donde las plantas viejas han resultado poco palatables para el ganado que opta por las especies nativas como *Bouteloua gracilis* (Com. Pers. Luna, 2011)<sup>1</sup>. Como muchas de las especies introducidas, ésta es una especie que desarrolla una mayor biomasa aérea, la cual, aunada a una mayor talla del macollo, modifica la microtopografía, la rugosidad y por tanto, altera la escorrentía superficial generada en eventos pluviales (Hamerlynck *et al.*, 2010). D'Antonio y Vitousek (1992) han

---

<sup>1</sup> Comunicación personal con el Dr. Miguel Luna, Estación Vaquerías, INIFAP, mayo de 2010.

indicado que existe una reducción de la biodiversidad de especies de flora y fauna nativas en pastizales con especies exóticas. Hamerlynck *et al.* (2010) mencionan que otra especie del mismo género (*E. lehmanniana*), causa el mismo decremento así como un incremento en la frecuencia de incendios. Por otra parte, ésta última especie presenta una mayor productividad primaria neta anual (ANPP) con respecto a *Muhlenbergia porteri* y, contrario a su alta productividad, la especie exótica tiene un deficiente aprovechamiento de los pulsos de agua, lo que la refleja como una especie pobre para la captura de carbono (Hamerlynck *et al.*, 2011). Finalmente, las diferencias en la estructura del dosel y de su capacidad de intercepción de agua, repercuten en la infiltración del agua en el suelo, incrementando la evapotranspiración y generando suelos más secos donde se encuentran especies del género *Eragrostis* (Hamerlynck *et al.*, 2011).

Con base en estos antecedentes se propone evaluar las siguientes hipótesis:

### **Hipótesis 1**

Una reducción en la cobertura vegetal y el aumento de la interconexión de zonas de suelo desnudo, causará incrementos del volumen de escorrentía superficial en los pastizales sometidos a pastoreo con respecto a aquellos con menor área de interespacios.

### **Hipótesis 2**

La mayor cobertura vegetal de las especies exóticas debería inducir una reducción en el volumen de escorrentía superficial en comparación a pastizales con gramíneas nativas, sin embargo los suelos en estas últimas deberán exhibir mayores contenidos volumétricos de agua en suelo, por una alta concentración de materia orgánica en el mismo.

### **Hipótesis 3**

En pastizales que han sido sujetos a quema preescrita, los periodos posteriores a esta, la diferencia en el volumen de escorrentía superficial así como el aprovechamiento de los pulsos de agua indicados por la mayor retención de humedad, no dependerán del sistema de pastoreo (rotacional o continuo) sino de la cobertura de la especie presente (*B. gracilis* o *M. rigida*)

Con respecto a pastizales sin quema, la incorporación de fuego generará diferencias en la densidad aparente y biomasa de raíces y por tanto producirá mayor volumen de escorrentía superficial y menor contenido de agua en suelo.

## **Objetivo general**

A fin de comprobar las hipótesis, se examinó el efecto de dos sistemas de pastoreo, así como la introducción de especies exóticas y el manejo de fuego prescrito sobre variables ecohidrológicas que incluyeron el volumen de escorrentía superficial.

## **Objetivo particulares**

1. Identificar la frecuencia y tamaño de los eventos de precipitación a lo largo de un año en la región de pastizal semiárido de los Llanos de Ojuelos.
2. Evaluar diferencias de cobertura y estructura vegetal así como las características fisicoquímicas del suelo en áreas de pastizal sometidas a diferentes condiciones de manejo, incluyendo; sistemas de pastoreo, introducción de especies exóticas (*E. curvula*), pastizales naturales con *Lycurus phleoides* y manejo de fuego prescrito.
3. Evaluar procesos ecohidrológicos bajo las condiciones de pastizal semiárido antes mencionadas.
4. Establecer el efecto sobre la hidrología (escorrentía superficial y contenido volumétrico de agua) de ecosistemas de pastizal semiárido alterados por la presencia de una especie exótica.
5. Examinar los procesos ecohidrológicos de escorrentía superficial y contenido volumétrico de agua en pastizales manejados con esquemas de pastoreo rotacional vs. continuo.
6. Determinar el efecto de pastoreo rotacional y continuo, fuego prescrito y sin fuego así como de especies exóticas en la pérdida de nutrientes por escorrentía superficial.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Descripción del área de estudio

La región de estudio pertenece a la provincia fisiográfica de La Mesa Central, subprovincia de Los Llanos de Ojuelos, Jalisco, México. En el Municipio de Ojuelos de Jalisco, se identificaron cinco sitios para el establecimiento de parcelas de escorrentía. Los mismos se ubican aproximadamente a 7 km al suroeste de la cabecera municipal de Ojuelos, Jalisco. El clima predominante es semiárido con una temperatura media anual de 17 °C y un régimen de lluvias de verano (junio a septiembre), con una precipitación media en los últimos 30 años de 420 mm (COTECOCA, 1979; Delgado-Balbuena, 2010), siendo julio el mes más lluvioso (García, 2003).

La topografía del área se caracteriza por la predominancia de valles y colinas poco pronunciadas, cuyos suelos son clasificados como Xerosoles háplicos asociados con litosoles y planosoles éutrico y phaeozems háplicos con litosoles. Los suelos son de poca profundidad con dos horizontes (0 a 25 cm y de 25 a 40 cm) (Aguado, 1993) y cuyas texturas varían de arcilla limosa a francoarenosa, mostrando una capa cementada a 50 cm de profundidad (COTECOCA, 1979).

La vegetación predominante son pastizales semiáridos con *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths como la especie dominante en los sitios más conservados mientras que en áreas con disturbio, *B. gracilis* puede ser reemplazada por *B. scorpioides* Lag., *B. hirsuta* Lag., *Aristida divaricata* Humb. & Bonpl. ex Willd, *Lycurus phleoides* Kunth y *Muhlenbergia rigida* (Kunth) Kunth (Medina *et al.*, 2007).

### 2.2 Tratamientos

La selección de los sitios se realizó considerando aspectos de manejo del pastizal que pudieran influenciar los procesos ecohidrológicos de interés. Estos factores de manejo incluyeron: sistemas de pastoreo, dominancia de gramíneas introducidas vs. nativas y el manejo de fuego prescrito o sin quema.

Los sistemas de pastoreo examinados corresponden a los siguientes: pastoreo pesado continuo (en adelante pastoreo continuo), pastoreo pesado estacional (estacional abierto y estacional bordo) y sin pastoreo (exclusión 10 años y exclusión 30 años).

La evaluación de la presencia de la especie exótica se realizó sobre pastizal con pastoreo rotacional moderado donde se cuenta con *E. curvula* como la exótica

introducida y con la nativa *L. phleoides* como la nativa que ha ido recuperándose tras 30 años.

Finalmente, para evaluar la interacción pastoreo-quema-especie, se emplearon dos sitios con pastoreo continuo moderado y rotacional moderado divididos en áreas sin quema y áreas cuya quema fue prescrita seis años previos. Cada área cuenta en igualdad con dos especies nativas: *B. gracilis* y *M. rigida*. En la figura 1a se observa la ubicación de los sitios.

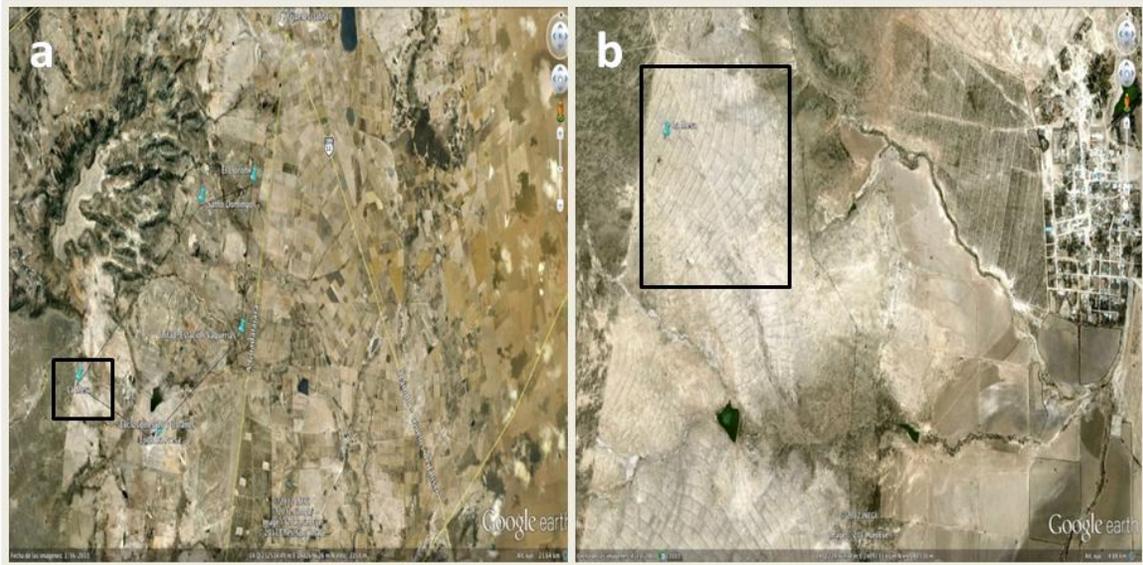


Figura 1: a) Imagen con la ubicación de los sitios de estudio en el Ejido Vaquerías (La Mesa, Ejido Vaquerías, Exclusión de 10 y 30 años), Estación Vaquerías-INIFAP y Llorón-INIFAP en el Municipio Ojuelos, Jalisco. b) se observa un acercamiento sobre los bordos a nivel que se realizaron en el sitio denominado La Mesa perteneciente al Ejido Vaquerías, Mpio. Ojuelos de Jalisco.

Con el fin de responder a las hipótesis y cubrir los objetivos, el presente estudio consistió en la instalación de 64 parcelas de escorrentía (en adelante camas de escorrentía), ubicadas en cinco sitios de estudio que se diferencian por su cubierta vegetal que ha resultado de diferentes tipos de manejo. En el cuadro 1 se encuentra la descripción de los sitios de monitoreo, su régimen de propiedad, el tipo de pastoreo que presentan y sus respectivas coordenadas. Los sitios de las exclusiones de 10 y 30 años así como los de pastoreo continuo se localizan en terrenos pertenecientes al ejido Vaquerías, Mpio. de Ojuelos de Jalisco mientras que el sitio del pastoreo estacional se ubica en terrenos del mismo ejido aunque en un área elevada denominada La Mesa. En esta zona se establecieron por parte de SEMARNAT en los años 70's, bordos a nivel para la redistribución de agua (denominado Estacional bordo) y se comparó la influencia de estas intervenciones

con áreas sin intervención (denominado Estacional abierto (figura 1b). Por su parte, los sitios con pastoreo rotacional y continuo que presentan o no el manejo de fuego (denominado sitios INIFAP) así como aquellos con pastoreo rotacional y con la especie exótica introducida para forrajeo *Eragrostis curvula* y la nativa *Lycurus phleoides* (denominando el sitio como el Llorón) se localizan en terrenos llanos pertenecientes al Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en su Estación Vaquerías.

Cuadro 1. Ubicación de sitios de estudio, régimen de propiedad, pastoreo y tipo de pastoreo que presentan.

Sitio	Propiedad	Pastoreo	Ubicación
Estación INIFAP	Concesionada a INIFAP	Continuo y rotacional	Latitud 21°48'49.18"N Longitud 101°37'38.23"O
La Mesa	Ejidal	Estacional	Latitud 21°46'6.12"N Longitud 101°40'30.07"O
Ejido Vaquerías	Ejidal	Continuo	Latitud 21°45'30.30"N Longitud 101°38'40.92"O
El Llorón	Concesionada a INIFAP	Rotacional	Latitud 21°49'11.83"N Longitud 101°36'21.03"O
Exclusiones 10 y 30 años	Ejidal	Sin pastoreo	Latitud 21°45'35.13"N Longitud 101°38'26.68"O

## 2.3 Métodos

En las camas de escorrentía de cada uno de los sitios se realizó el seguimiento y evaluación de variables hidrológicas que incluyeron; precipitación pluvial por evento/estación, volumen de escorrentía superficial, contenido volumétrico de agua en suelo a 15 y 30 cm de profundidad (humedad de suelo). Otras variables evaluadas en las camas de escorrentía incluyeron; densidad aparente del suelo a 15 y 30 cm de profundidad, textura del suelo a 15 y 30 cm de profundidad, así como la cobertura vegetal, biomasa de raíces a 15 y 30 cm de profundidad y el contenido de materia orgánica a 15 y 30 cm de profundidad. Para la fracción líquida que se colectó de los eventos de escorrentía superficial, se realizaron análisis cuantitativos de carbono, nitrógeno y ortofosfato.

Para la evaluación de la precipitación pluvial, se colocaron seis pluviómetros en cada uno de los cinco sitios de estudio. Cada evento de precipitación fue registrado de junio de 2011 a mayo de 2012.

El volumen de escorrentía superficial se cuantificó en las camas de escorrentía, las cuales cubrían un área de 6.0 m<sup>2</sup> cada una (2 m de ancho x 3 m de largo). Para delimitar el contorno e impedir flujos laterales, se empleó un marco de lámina de acero inoxidable de 20 cm de altura, enterrada 10 cm en el suelo

aproximadamente y otros 10 cm sobresaliendo en la superficie. Las camas estaban orientadas en dirección de la pendiente donde se montaron. En el extremo de la parcela a favor de la pendiente (boca de la cama), se realizó una excavación de 0.60 m de ancho, 0.80 m de largo y 0.80 m de alto. Dentro de éste se colocaron dos garrafones con una capacidad de 23 L c/u, interconectados mediante un tubo de PVC desde la boca de la cama hacia el primer garrafón y con una manguera plástica entre ellos. El segundo garrafón se encontraba aproximadamente 0.20 m más bajo para garantizar que el agua llegara a este por el desnivel (figura 2). Después de cada evento de precipitación se cuantificó con recipientes graduados, el volumen de escorrentía colectado en los garrafones. Se instalaron un total de 65 camas (cuadro 2).



Figura 2. Sistema de camas de escorrentía con los garrafones colectores de escorrentía.

El monitoreo del contenido volumétrico de agua en suelo se realizó mediante reflectometría con un equipo MiniTRase (MiniTrase 6050X3K1B; Soilmoisture Equipment Corp, Santa Barbara, CA). En cada cama de escurrimiento se insertaron dos juegos de varillas de monitoreo a 15 y 30 cm de profundidad. La medición se realizó semanalmente y cuando fue posible, posterior a cada evento de lluvia (figura 3).

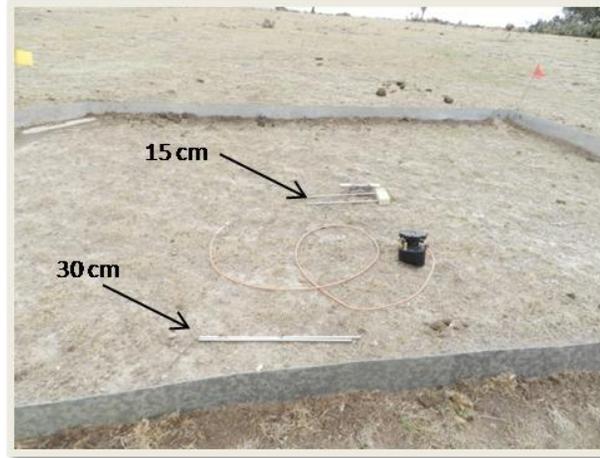


Figura 3. Juego de varillas de 30 cm para el monitoreo del contenido volumétrico de agua en suelo.

Las determinaciones de cobertura vegetal se realizaron al final de la temporada de lluvias de 2011, mediante el método de interceptación en línea (Tongway y Hindley, 2005). Para esto, dentro de la cama de escorrentía se marcaron dos transectos de 2.5 m de largo, los cuales fueron posicionados de forma paralela y equidistantes. Al mismo tiempo y con ayuda de una cinta métrica que marcaba la línea del transecto, se colocó consecutivamente un cuadrante de PVC de 50 x 50 cm a lo largo de los dos transectos (cada uno de 2.5 m), a fin de obtener un total de diez cuadrantes en cada cama. A lo largo de los transectos se registró la longitud y la anchura de parches de vegetación compuestos por especie perennes. Con esta información se calculó posteriormente el porcentaje de cobertura vegetal, el número de parches de vegetación (NP), el Área de los Parches (AP), el índice de la organización del paisaje (LOI, por sus siglas en inglés) y la longitud media de los inter parches/interespacios (AIL, por sus siglas en inglés) (Tongway y Hindley, 2005).

Con relación al suelo, se colectaron núcleos de suelo (diámetro 5.0 cm) al finalizar la temporada de lluvias de 2011. Mediante un nucleador con volumen de 238.57 cm<sup>3</sup>, se tomaron dos muestras de suelo, la primera con una profundidad de 0 a 15 cm y la segunda de 15 a 30 cm. Una muestra se obtuvo a un lado de la especie(s) representativa(s) de cada sitio y una segunda en un área de suelo desnudo (cuadro 3). Todas las muestras fueron secadas hasta alcanzar peso constante a 60 °C y posteriormente tamizadas a través de una criba de 2 mm para la separación de raíces y rocas. Finalmente se determinó la densidad aparente y textura del suelo y se cuantificó el contenido de materia orgánica así como la biomasa de raíces de los sitios de estudio. Se extrajeron un total de 614 núcleos en los cinco sitios (cuadro 2).

Cuadro 2. Diseño experimental del muestro de suelo

Sitio	Pastoreo	Manejo de fuego	Micrositio	Profundidad (cm)	Repeticiones	
INIFAP	Rotacional	Sin quema	<i>B. gracilis</i>	15	12	
				30	12	
			<i>M. rigida</i>	15	12	
			30	12		
		Suelo desnudo	15	12		
		30	12			
	Continuo	Con quema	<i>B. gracilis</i>	15	12	
				30	12	
			<i>M. rigida</i>	15	12	
			30	12		
		Suelo desnudo	15	12		
		30	12			
	Continuo	Sin quema	<i>B. gracilis</i>	15	12	
				30	12	
			<i>M. rigida</i>	15	12	
			30	12		
		Suelo desnudo	15	12		
		30	12			
Continuo	Con quema	<i>B. gracilis</i>	15	12		
			30	12		
		<i>M. rigida</i>	15	12		
		30	12			
	Suelo desnudo	15	12			
	30	12				
La Mesa	Estacional abierto	N. A.	<i>B. gracilis</i>	15	4	
				30	4	
			Suelo desnudo	15	4	
		30	4			
	Estacional bordo	N. A.	<i>B. gracilis</i>	15	4	
				30	4	
Suelo desnudo			15	4		
	30	4				
Ejido Vaquerías	Continuo	N. A.	<i>B. gracilis</i>	15	8	
				30	8	
			Suelo desnudo	15	8	
		30	8			
	Exclusión 10 años	Sin pastoreo	N. A.	<i>B. gracilis</i>	15	8
					30	8
Suelo desnudo				15	8	
		30	8			
Exclusión 30 años		Sin pastoreo	N. A.	<i>B. gracilis</i>	15	8
					30	8
	Suelo desnudo			15	8	
		30	8			
	El Llorón	Rotacional	N. A.	<i>L. phleoides</i>	15	15
					30	15
Suelo desnudo				15	15	
		30	15			
Suelo desnudo		N. A.	<i>E. curvula</i>	15	15	
				30	15	
	Suelo desnudo		15	15		
	30	15				
Total de muestras de suelo					616	

La densidad aparente ( $\rho$ ) se determinó mediante el método de núcleo (Elliot *et al.*, 2009) y se realizaron las estimaciones de densidad aparente con la siguiente ecuación:

$$\rho \text{ aparente} = \frac{\text{Peso seco (g)} - \text{Peso piedras (g)}}{\text{Volumen núcleo (cm}^3\text{)} - \text{Volumen piedras (cm}^3\text{)}}$$

Las muestras de suelo fueron tamizadas (con malla de 2 mm), y las raíces colectadas manualmente, lavadas y colocadas en un horno hasta alcanzar un peso constante (60 °C) (Bledsoe *et al.*, 2009) para determinar la biomasa de raíces secas.

Finalmente, se tomaron 5.0 g de suelo de cada una de las muestras y mediante la técnica de calcinación se obtuvo el porcentaje de materia orgánica (Harmon y Lajtha, 2009).

El contenido de carbono total, orgánico, inorgánico, nitrógeno total y ortofosfatos se cuantificaron en el agua de escorrentía superficial. Para esto, se seleccionaron tres eventos de precipitación (septiembre 2011, octubre 2011 y enero de 2012), los cuales compartían en común que se trató del primer evento de lluvia después de un periodo de al menos tres semanas sin precipitación. Las muestras fueron debidamente etiquetadas y preservadas para su análisis en el laboratorio. El carbono total, orgánico e inorgánico así como el nitrógeno total se cuantificaron utilizando el analizador de Carbono Orgánico Total (TOC-V CSN Shimadzu). El contenido de ortofosfatos se analizó mediante electroforesis capilar (Agilent CE modelo G1600A).

## 2.4 Análisis estadístico

Considerando las hipótesis, los análisis estadísticos se agruparon por a) diferentes sistemas de pastoreo, b) especie exótica vs. nativa y c) interacción pastoreo-quema-especie. En el cuadro 3 se detalla cada grupo de tratamiento con sus características así como el número de repeticiones con las que se cuenta.

Cuadro 3. Diseño experimental de las camas de escorrentía por tratamiento.

Tratamientos	Tipos de pastoreo	Manejo de fuego	Especie	Ubicación	No. repeticiones
Diferentes sistemas de	Exclusión 30 años sin	N. A.	<i>B. gracilis</i>	Ejido Vaquerías	5

<b>pastoreo</b>	pastoreo				
	Exclusión 10 años sin pastoreo	N. A.	<i>B. gracilis</i>	Ejido Vaquerías	4
	Estacional abierto	N. A.	<i>B. gracilis</i>	La Mesa (ejido)	5
	Estacional bordo	N. A.	<i>B. gracilis</i>	La Mesa (ejido)	5
	Continuo pesado	N. A.	<i>B. gracilis</i>	Ejido Vaquerías	5
<b>Especie nativa vs. especie exótica</b>	Rotacional moderado	N. A.	<i>L. phleoides</i>	El Llorón (INIFAP)	5
			<i>E. curvula</i>	El Llorón (INIFAP)	5
<b>Pastoreo-quema-especie</b>	Rotacional moderado	Con quema	<i>B. gracilis</i>		4
			<i>M. rigida</i>		4
	Sin quema	Con quema	<i>B. gracilis</i>	Estación INIFAP	4
			<i>M. rigida</i>		4
	Continuo moderado	Sin quema	<i>B. gracilis</i>		4
			<i>M. rigida</i>		4
			<i>B. gracilis</i>		4
<b>No. Total de camas de escorrentía</b>					<b>65</b>

N. A. No aplica

Con el propósito de comparar las diferentes variables de respuesta entre los diferentes tipos de manejo, se emplearon tres grupos de análisis.

1. Para evaluar el efecto de los sistemas de pastoreo pesado sobre las siguientes variables de respuesta: volumen de escorrentía total anual, contenido volumétrico de agua a 15 y 30 cm de profundidad, biomasa de raíces en interespacios a profundidades de 0-15 cm y 15-30 cm (RaízInt 15 y 30), número de parches (NP), área de parches (AP), índice del Área de los Parches (PAI por sus siglas en inglés) e índice de organización de paisaje (LOI), se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para cada variable, considerando el tipo de pastoreo (continuo, estacional bordo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años) como factor de clasificación.
2. Para evaluar los efecto de especies nativa o exótica en el volumen de escorrentía total anual, humedad media anual a 15 cm, humedad media anual 30 cm, biomasa de raíces en interespacios a profundidades de 0-15cm y 15-30 cm, NP, AP, PAI y LOI, también se aplicó un análisis de varianza de una vía para cada variable considerando la especies de gramínea (*L. phleoides* / *E. curvula*) como factores de clasificación.
3. Para evaluar los efectos del sistema de pastoreo, aplicación de fuego y especie, sobre el volumen de escorrentía superficial total anual, humedad

media anual a 15 cm de profundidad, humedad media anual a 30 cm de profundidad, biomasa de raíces en interespacios (suelo desnudo) a profundidades de 0-15 cm y 15-30 cm, NP, AP, PAI y LOI, se aplicó un análisis de varianza a un diseño factorial con tres factores, considerando pastoreo (continuo, rotacional), fuego (presencia/ausencia) y especie de gramínea (*B. gracilis* / *M. rigida*).

4. Para evaluar la interacción de sistema de pastoreo, especies y profundidad de suelo en variables como; la materia orgánica del suelo y la biomasa de raíces bajo planta (bajo cobertura vegetal, RaízSpp) y bajo suelo desnudo (RaízInt), se aplicó un análisis de varianza anidado con profundidad (15 y 30 cm) anidado en pastoreo y especies. En el caso de la interacción entre sistemas de pastoreo, fuego prescrito y tipo de especie, se utilizó un ANOVA anidado con profundidad anidado en especie y fuego.

En el caso de detectar diferencias significativa entre tratamientos, se aplicó la prueba *post hoc* de Tukey, como método de comparación de medias, usando un valor del 5% como probabilidad máxima. Se realizó también análisis de correlación de Pearson así como regresiones lineales y múltiples entre todas las variables de respuesta para los tres grupos de tratamiento para examinar la existencia de asociaciones entre variables de clasificación y de respuesta. Previo a los análisis, se examinó la normalidad de todas las variables de respuesta con la prueba de Shapiro-Wilks. En caso de no cumplir con los supuestos de normalidad, se aplicaron transformaciones logarítmicas. En los casos del contenido volumétrico de agua (%) así como de materia orgánica de suelo (%), se realizó una transformación del arcoseno de la raíz cuadrada. Las gráficas presentan siempre las medias por mínimos cuadrados (LSmeans por sus siglas en ingles)  $\pm$  un error estándar. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software SAS 8.2 y los gráficos con el software SigmaPlot 11.0.0.7.

### 3. Resultados

#### 3.1 Distribución espacio-temporal de la precipitación

Entre junio 2011 y mayo 2012 en seis sitios en el área de estudio se registraron cada evento de precipitación (Pp) 012 (cuadro 4).

Cuadro 4. Pluviómetros monitoreados (junio 2011 a junio 2012)

Sitio	No. de eventos de Pp por sitio	Mín. Pp (mm)	Máx. Pp (mm)	Precipitación acumulada anual (mm)
Estación INIFAP	25	0.4	59.2	254.7
Ejido La Mesa	25	0.8	59.0	299.6
Exclusión 30 años	26	0.1	66.0	315.7
Santo Domingo Arriba	24	0.6	59.2	259.2
Santo Domingo Abajo	26	1.2	57.0	284
Llorón Santo Domingo	23	0.2	61.0	221.3

En los diferentes sitios se registraron entre 23 y 26 eventos de lluvia durante el año de observación. Los eventos mínimos y máximos registrados oscilaron entre 0.1 mm y 66.0 mm, respectivamente.

Del total de las 32 fechas en las que se registraron eventos de lluvias, la precipitación media anual acumulada de todos los sitios de estudio fue de 171.58 mm en la época de lluvias y de 100.83 mm para la temporada de secas. En tan solo diez eventos ocurridos durante la temporada de secas, cerca de la mitad de la precipitación anual había sido registrada (cuadro 5 y figura 4).

Cuadro 5. Precipitación acumulada (mm) por temporada de lluvias (junio a octubre) y secas (noviembre a mayo) en los seis sitios de estudio. Entre paréntesis se encuentra el número de eventos pluviales registrados.

Sitio/Mes	INIFAP	La Mesa	Exclusión 30	SD Superior	SD Inferior	Llorón
<b>Temporada de lluvias</b>						
Junio 2011	34.6 (2)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	27 (2)	0.0 (0)
Julio 2011	24.7 (5)	19.2 (5)	17.8 (5)	18.8 (5)	19.0 (5)	20.8 (5)
Agosto 2011	33.4 (6)	36.6 (4)	36.2 (4)	33.0 (3)	27.8 (3)	11.4 (3)
Septiembre 2011	40.4 (2)	74.0 (3)	97.8 (3)	54.0 (3)	57.4 (3)	62.6 (3)
Octubre 2011	7.2 (3)	72.8 (4)	56.6 (4)	52.4 (4)	51.6 (4)	42.4 (4)
<b>Precipitación acumulada (lluvias)</b>	140.3	202.6	208.4	158.2	182.8	137.2
<b>Temporada de secas</b>						

<b>Noviembre 2011</b>	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)
<b>Diciembre 2011</b>	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)
<b>Enero 2012</b>	6.6 (1)	0.0 (0)	5.8 (1)	6.4 (1)	6.4 (1)	6.6 (1)
<b>Febrero 2012</b>	102.6 (5)	89.0 (7)	99.5 (7)	92.8 (7)	93.0 (7)	75.9 (6)
<b>Marzo 2012</b>	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)
<b>Abril 2012</b>	5.2 (1)	5.8 (1)	0.4 (1)	1.8 (1)	1.8 (1)	1.6 (1)
<b>Mayo 2012</b>	0.0 (0)	2.2 (1)	1.6 (1)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)
<b>Precipitación acumulada (secas)</b>	114.4	97.0	107.3	101.0	101.2	84.1
<b>Precipitación acumulada anual</b>	254.7	299.6	315.7	259.2	284.0	221.3

El mes más lluvioso para el periodo monitoreado en temporada de lluvias fue septiembre, donde se registró entre el 28 y el 46 % de la precipitación anual por sitio. En el caso de la temporada de secas, en el mes de febrero de 2012 llovió alrededor de 90% de las lluvias de esa temporada (Anexo1, cuadro 6).

La variabilidad temporal con respecto a la precipitación dentro de cada sitio es muy elevada. Considerando las lluvias mensuales de todo el año, los coeficientes de variación (C.V.; %) superan el 150%. Al separar por temporada de lluvias y secas, los CV's tienen valores entre de 129 y 180%, respectivamente (cuadro 7).

Cuadro 7. Coeficiente de variación (C.V., %) de la precipitación mensual considerando el año y la época de lluvias y secas en los seis sitios.

	INIFAP	La Mesa	Exclusión 30	SD superior	SD inferior	Llorón
<b>Anual</b>						
<b>Media</b>	8.22	9.36	9.57	7.85	8.11	7.14
<b>Desviación estándar</b>	13.41	16.19	16.32	13.31	12.60	12.78
<b>C.V.<sub>anual</sub> (%)</b>	163.27	172.91	170.58	169.50	155.25	179.02
<b>Temporada de lluvias</b>						
<b>Media</b>	7.02	10.13	10.42	7.91	8.31	7.22
<b>Desviación estándar</b>	9.62	17.41	17.34	11.44	10.76	9.61
<b>C.V.<sub>lluvias</sub> (%)</b>	137.09	171.88	166.38	144.61	129.44	133.09
<b>Temporada de secas</b>						
<b>Media</b>	10.40	8.08	8.25	7.77	7.78	7.01
<b>Desviación estándar</b>	18.87	14.56	15.20	16.29	15.72	17.15
<b>C.V.<sub>secas</sub> (%)</b>	181.41	180.16	184.21	209.72	201.90	244.78

También se observó una alta variabilidad espacial tanto en número como en tamaño de los eventos de lluvia entre los seis sitios. En total se realizaron 149 registros (fecha, lugar y precipitación), durante las 32 fechas en las que se monitoreo la lluvia. En el cuadro 8 se presentan el número de eventos de lluvia registrados por número de sitios así como el porcentaje que representa.

Considerando la magnitud de los eventos de lluvia, se observó que más del 55% de los eventos de precipitación registrados son eventos pequeños (0.1 a 5.0 mm), el 22% de los eventos son de una magnitud de 5.1 a 10 mm y los eventos mayores a 30 mm constituyen el 12.1% (cuadro 9, figura 4).

Cuadro 8. Número de eventos pluviales que se registró por número de sitios.

No. sitios con lluvia registrada	Frecuencia	% que representa del total de eventos
6 sitios	16	50.00
5 sitios	6	18.75
4 sitios	1	3.13
3 sitios	3	9.38
2 sitios	4	12.5
1 sitios	2	6.25
Total de eventos	32	

Cuadro 9. Intervalos de la magnitud de todos los eventos de precipitación registrados en los seis sitios entre junio de 2011 y mayo de 2012 y el porcentaje de frecuencia.

Magnitud de la precipitación (mm)	No. Eventos	Frecuencia %
<b>Eventos ≤ 5.0 mm de precipitación (78)</b>		
0.1 a 1.0	10	12.5
1.1 a 2.0	21	23.6
2.1 a 3.0	23	30.6
3.1 a 4.0	15	20.8
4.1 a 5.0	9	12.5
<b>Total de los eventos registrados (149)</b>		
0.1 a 5.0	78	55.3
5.1 a 10	31	22.0
10.1 a 15	10	7.1
15.1 a 20	5	3.5
20.1 a 25	5	3.5
25.1 a 30	3	2.1
> 30.0	17	12.1

Considerando la distribución temporal de lluvia (mensual), se observa en especial dos eventos extraordinarios, uno en septiembre de 2011 y otro en febrero de 2012 en todos los sitios de estudio (figura 5).

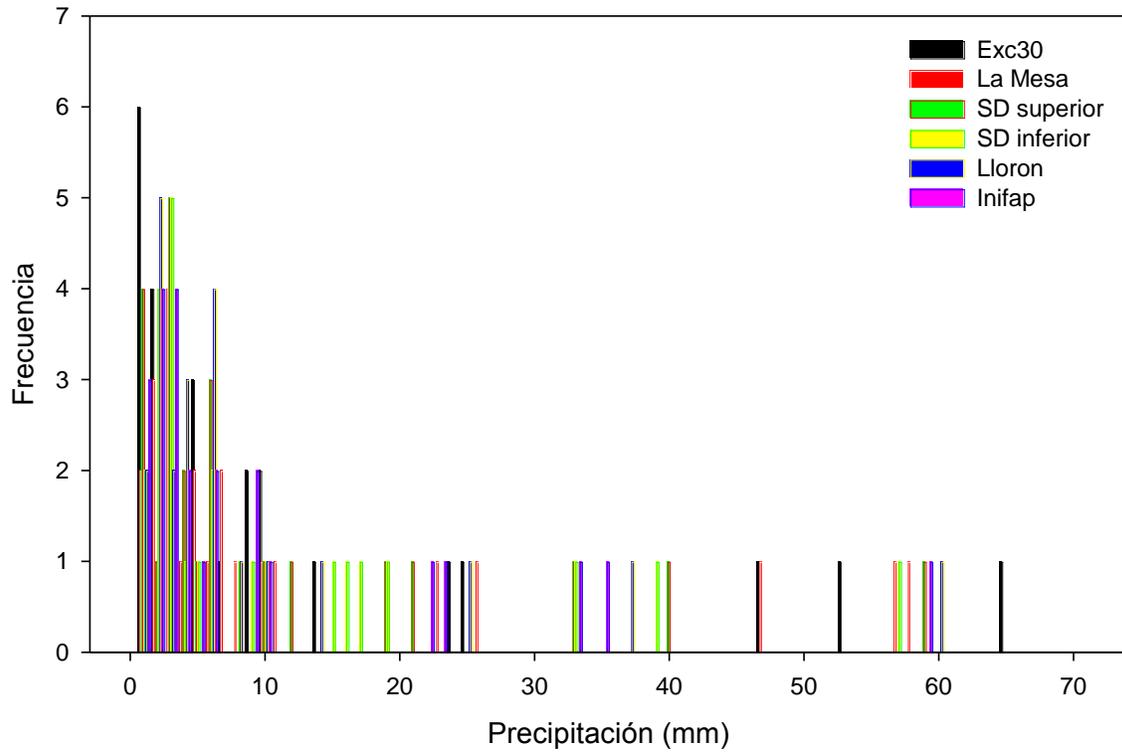


Figura 4. Histograma de la frecuencia de los diferentes tamaños de eventos de precipitación en los seis sitios de estudio entre junio 2011 y mayo 2012 en Vaquerías y Santo Domingo, Jalisco, México

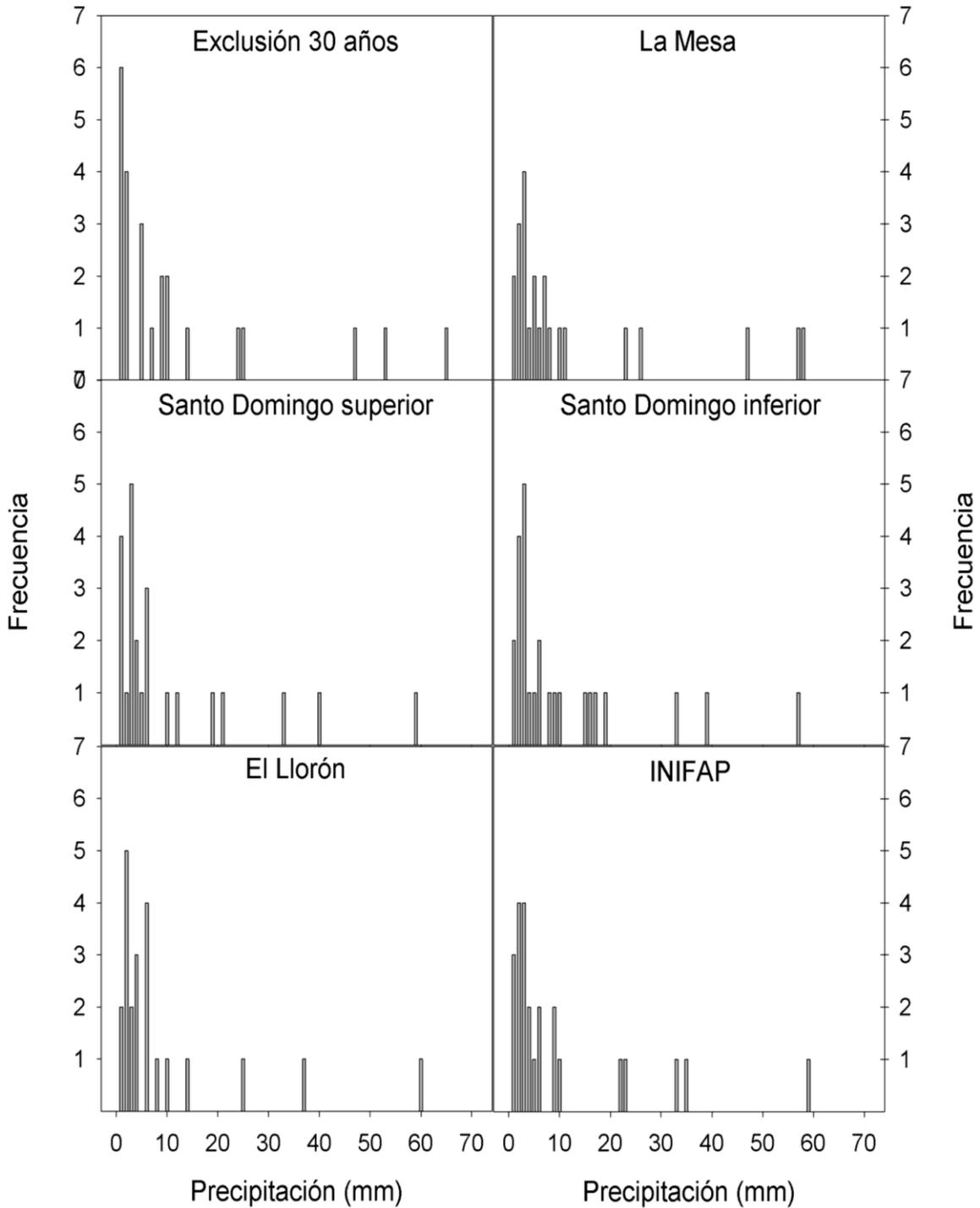


Figura 5. Precipitación mensual (mm) y por temporada (lluvias/secas), en los sitios monitoreados durante el periodo junio de 2011 a mayo de 2012.

### 3.2 Efecto del sistema de pastoreo sobre variables ecohidrológicas, suelo y vegetación

El volumen de escorrentía total anual presenta diferencias significativas entre los tipos de pastoreo ( $P=0.0001$ ) (anexo 2, cuadro 10), donde el pastoreo continuo presenta el mayor volumen y las exclusiones así como el pastoreo estacional con bordo exhiben los volúmenes más bajos, aunque sin detectarse diferencias significativas entre ellos (figura 6a). El contenido volumétrico medio anual de agua en suelo, presentó diferencias significativas entre tipos de pastoreo ( $P= 0.0191$ ; Anexo 2, cuadro 11 y 12; Figura 6b). A 15 cm de profundidad, la exclusión de 30 años mostró el mayor contenido de humedad, mientras el pastoreo continuo la más baja. En contraste, a 30 cm de profundidad la exclusión de 10 y 30 años y el pastoreo estacional con bordo tuvieron los niveles más elevados ( $>10\%$ ), mientras el pastoreo continuo y estacional sin bordo presentaron menor contenido de humedad (8.23%) (figura 6c).

El contenido de materia orgánica (Anexo 2, cuadro 13) no mostró diferencias considerando profundidad de suelo y micrositios (bajo cobertura vegetal e interespacios o suelo desnudo) ( $P>0.1133$ ; figura 6b). Por su parte, la biomasa de raíces difirió considerando los diferentes tratamientos de pastoreo y micrositios (interacción sitio x micrositio;  $P=0.0265$ ) (Anexo 2, cuadro 14). En todos los casos de sistemas de pastoreo, la biomasa de raíces es más alta en los micrositios bajo la cobertura vegetal que en los interespacios. En las exclusiones de 30 y 10 años, la biomasa bajo planta y en sus interespacios fue más alta que en los otros sitios con pastoreo continuo.

Por su parte, en los interespacios de los bordos, la biomasa resultó más alta comparada con el sitio abierto y con el sitio con pastoreo continuo. En general, la biomasa de raíces resultó mayor en el substrato de 0-15 cm de profundidad que en el de 15-30 cm, aunque únicamente bajo planta (profundidad anidado en micrositio,  $P<0.0001$ ), (figura 6d). La densidad aparente por su parte, difirió con respecto a la profundidad y micrositio ( $P<0.0001$ ) y entre los diferentes sitios ( $P<0.0001$ ). Así, comparando los dos micrositios la densidad aparente resultó más alta en la profundidad de 0-15 cm que en la profundidad de 15-30 cm (profundidad anidado en micrositio;  $P<0.0001$ ) mientras que, en los sitios con pastoreo continuo y estacional, la densidad aparente resulto ser más baja cuando se comparó a las exclusiones ( $P<0.0001$ ) (Anexo 2, cuadro 15) (figura 6f).

Con respecto a la vegetación, la cobertura vegetal, el Área de los Parches, el número de parches, el índice de Área de los Parches, la longitud media inter parche y el índice de organización del paisaje, se observaron diferencias

significativas inducidas por el sistema de pastoreo ( $P < 0.0003$ ) (Anexo 2, cuadro 16, 17, 18, 19, 20 y 21). Comparando la cobertura, las exclusiones de 30 y 10 años y el sitio con pastoreo continuo, presentaron los valores más altos y más bajos respectivamente (figura 6e). El Área de los Parches fue hasta 14 veces más grande en las exclusiones que en los sitios con pastoreo, en donde no difirió entre los diferentes sitios ( $P = 0.0003$ , figura 7a). El Índice de Área de los Parches es significativamente ( $P = 0.0005$ ) más alto en las exclusiones ( $0.017 \pm 0.002$ , figura 7b) que en los sitios de pastoreo ( $< 0.002 \pm 0.0024$ ), por otro lado, el índice de organización del paisaje varió entre sitios ( $P < 0.0005$ , figura 7c). En la exclusión de 30 años el índice fue más alto ( $0.302 \pm 0.031$ ) comparado al sitio con pastoreo continuo donde fue muy bajo ( $0.068 \pm 0.031$ ). También el número de parches osciló entre sitios ( $P < 0.0001$ , figura 7d); en el sitio con pastoreo estacional con bordo se encuentra el mayor número de parches ( $33.20 \pm 2.167 \cdot 10 \text{ m}^{-1}$ ) mientras que, en el sitio con pastoreo continuo el número es el más bajo ( $10.80 \pm 2.167 \cdot 10 \text{ m}^{-1}$ ). Por último, la Longitud Media entre Parches fue afectada por el pastoreo ( $P < 0.0001$ , figura 7e); de esta forma se detectaron mayores distancias en el sitio de pastoreo continuo en comparación a los que en todos los otros sitios donde fue similar.

Se pudieron observar relaciones entre las variables, así, para el pastoreo estacional abierto se observó una correlación positiva entre el volumen de escorrentía superficial total anual y la cobertura total ( $R^2 = 0.91$ ,  $P = 0.0309$ , Anexo 2, Cuadro 22) y el índice de organización del paisaje ( $R^2 = 0.91$ ;  $P = 0.0309$ ). Otro caso ocurrió en el pastoreo continuo, con las variables de volumen de escorrentía anual la cual se correlacionó positivamente con la biomasa de raíces a 15 cm de profundidad en los interespacios ( $R^2 = 0.91$ ,  $P = 0.0307$ , anexo 2, cuadro 22). En el caso de la exclusión de 30 años, el volumen de escorrentía total anual se relacionó negativamente con la materia orgánica en la profundidad de 15-30 cm ( $R^2 = -0.89$ ,  $P = 0.0415$ , Anexo 2, cuadro 22).

Por otro lado, el volumen de escorrentía total anual presentó una relación lineal con la humedad media anual a 15 cm de profundidad en los sitios con pastoreo estacional abierto ( $R^2 = 0.20$ ,  $P = 0.0201$ , Anexo 2, cuadro 23c.) y estacional con bordo ( $R^2 = 0.16$ ,  $P = 0.0326$ , Anexo 2, cuadro 23d.). Sin embargo, con el pastoreo continuo la relación resultó con la humedad media anual a 30 cm ( $R^2 = 0.21$ ,  $P = 0.0054$ , Anexo 2, cuadro 23e.). En la exclusión de 30 años, el modelo que mejor explicó el volumen de escorrentía superficial total anual ( $R^2 = 0.53$ ,  $P = 0.0001$ , Anexo 2, cuadro 23a.) incorpora a la humedad media anual a 15 y 30 cm, el contenido de materia orgánica a 30 cm y el índice de organización del paisaje. Finalmente, el volumen de escorrentía superficial total anual dentro de la exclusión de 10 años, fue mejor explicada ( $R^2 = 0.39$ ,  $P = 0.0021$ , Anexo 2, cuadro 23b.) por la humedad media anual a 15 cm y el número de parches.

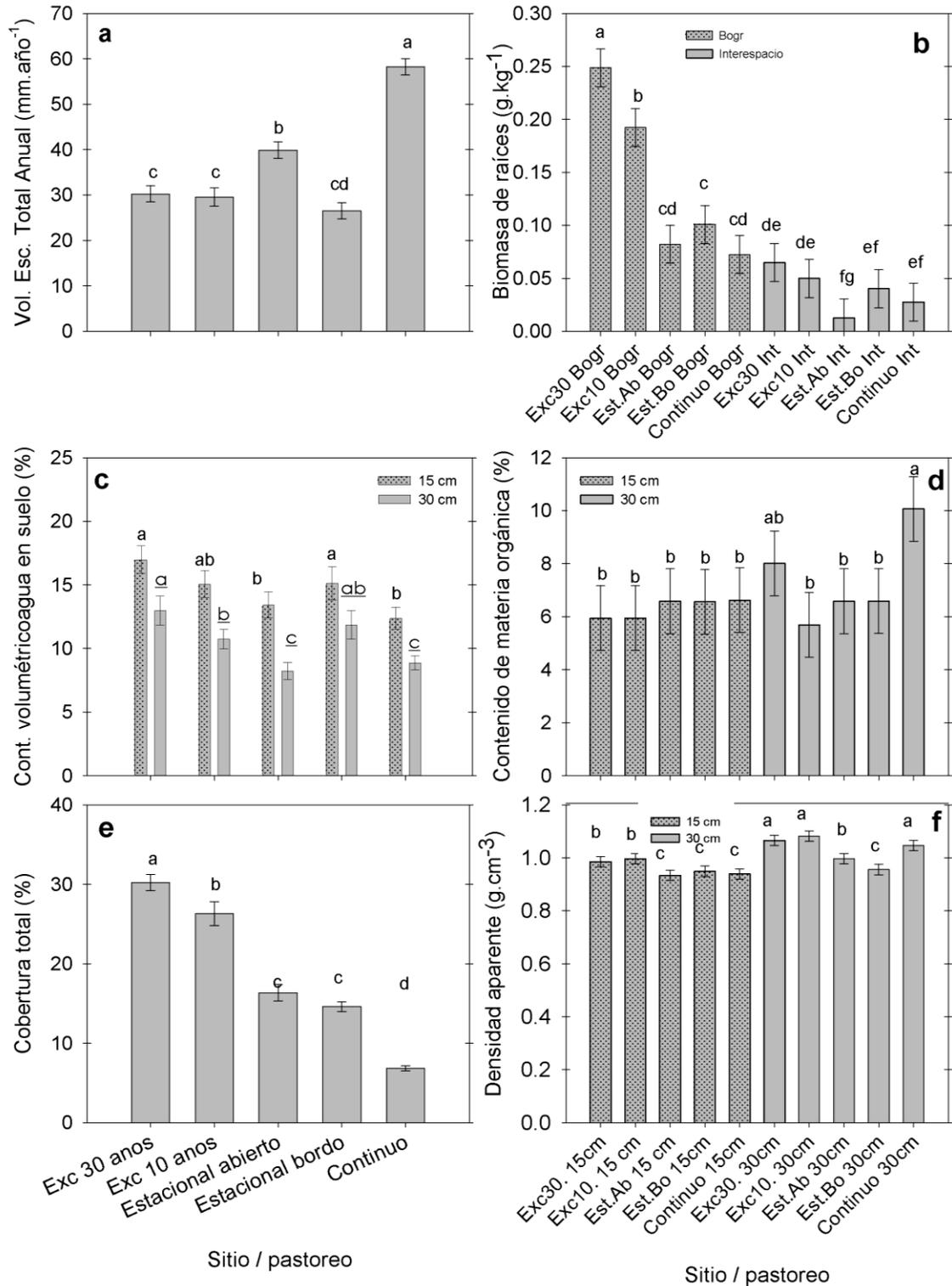


Figura 6. Medias por mínimos cuadrados  $\pm 1$  E.E. de a) volumen de escorrentía superficial total anual (mm.año<sup>-1</sup>), b) biomasa de raíces (g.kg<sup>-1</sup>) bajo planta *B. gracilis* (Bogr) o en interespacios (Int), c) contenido volumétrico medio anual de agua en suelo (%) a 15 y 30 cm de profundidad (cada profundidad fue analizada por separado), d) % de materia orgánica, e) cobertura total (%) y f) densidad aparente del suelo a profundidades de 0-15 cm y de 15- 30 cm en exclusiones de 30 y 10 años, pastoreo estacional abierto, estacional bordos y continuo.

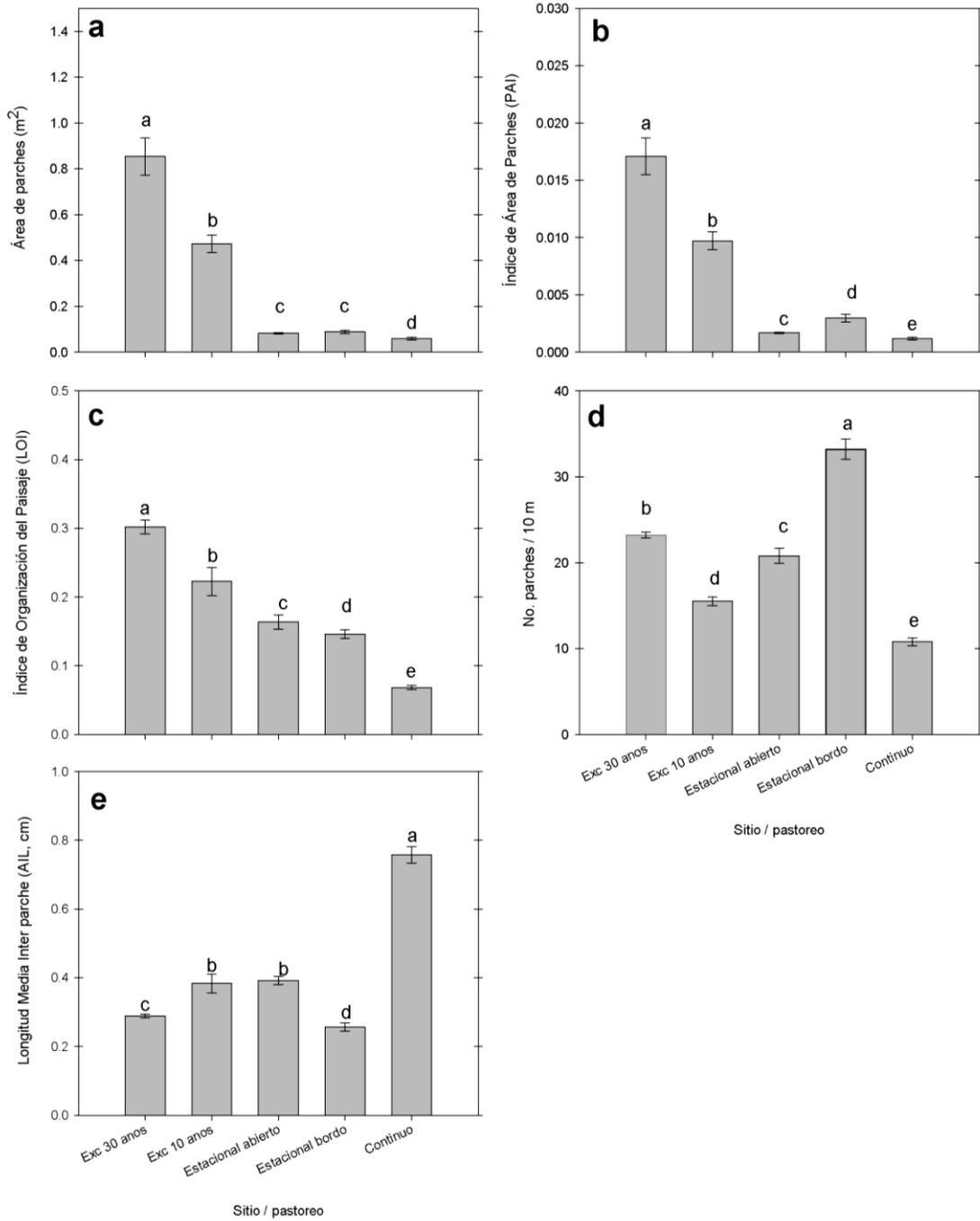


Figura 7. Medias por mínimos cuadrados  $\pm 1$  E.E. de a) Área de los Parches (m<sup>2</sup>), b) Índice del Área de los Parches, c) Índice de Organización del Paisaje, d) Número de Parches (NP·m<sup>-2</sup>) y e) Longitud Media Interparche (cm) en exclusiones de 30 y 10 años, pastoreo estacional abierto, estacional bordos y continuo.

### 3.3 Influencia de especies exóticas o nativas en variables ecohidrológicas, suelo y vegetación

El volumen de escorrentía superficial total anual no varió entre la especie exótica y la nativa ( $P=0.3317$ ) (Anexo 3, cuadro 23) (figura 8a). En el caso del contenido volumétrico medio anual de agua en suelo (Anexo 3, cuadro 24 y 25), tampoco se observaron diferencias entre las dos especies aun considerando diferentes profundidades del suelo ( $P>0.8196$ ) (figura 8c).

Por otro lado, el contenido de materia orgánica (figura 8b) tampoco mostró valores distintos entre las dos especies y las diferentes profundidades ( $P=0.9174$ , Anexo 3, cuadro 26). Sin embargo, la biomasa de raíces si resultó ser más alta bajo en *E. curvula* que bajo *L. phleoides* aunque únicamente en la profundidad de 0-15 cm. En los interespacios, la biomasa de raíces resultó menor que bajo la planta aunque no cambió cuando se compararon las dos profundidades y las especies (profundidad anidado en micrositios;  $P<0.0001$ ) (Anexo 3, cuadro 27, 28, 29) (figura 8d).

Con la variable de densidad aparente se observó que ambos: diferentes profundidades y los micrositios influyeron en el valor de ésta (profundidad anidado en micrositios ( $P<0.0001$ , Anexo 3, cuadro 30). Así, bajo planta y en los interespacios la densidad aparente resultó ser más baja de 15-30 cm de profundidad que de 0-15 cm (figura 8f).

Con respecto a las variables relacionadas con la vegetación, cobertura total (figura 8e), Área de los Parches, índice del Área de los Parches, longitud media inter parche e índice de organización del paisaje, no mostraron efectos significativos debido a las especies ( $P>0.12$ , Anexo 3, cuadros 32, 35, y 36). Mientras que el número de parches si varió entre especies. ( $P=0.0294$ ) (Anexo 3, cuadro 33).

La cobertura total fue prácticamente la misma entre las dos especies (12%) aunque el Área de los Parches, PAI, y AIL fue mayor con la especie exótica (figura 9 a, b y e). El número de los parches fue mucho mayor en la especie nativa ( $18.8\pm 1.5$ , figura 9d) que con la especie exótica al igual que el Área de los Parches. (Anexo 3, cuadro 34)

El volumen de escorrentía superficial total anual no presentó correlación con ninguna de las dos especies (exótica o nativa) (Anexo 3, cuadro 37).

El mejor modelo de regresión para el volumen de escorrentía superficial total anual en la especie nativa incluyó el contenido volumétrico medio anual de agua en el suelo a 15 cm de profundidad y la biomasa de raíces en interespacios a 30 cm de profundidad ( $R^2=0.21$ ,  $P=0.0253$ , Anexo 3, cuadro 38a.). Para el caso de la especie exótica, el modelo de escorrentía ( $R^2=0.45$ ,  $P=0.0001$ , Anexo 3, cuadro

38b.), se explicó mejor con el contenido volumétrico medio anual de agua en suelo a 30 cm de profundidad y con la biomasa de raíces en interespacios a 15 cm de profundidad.

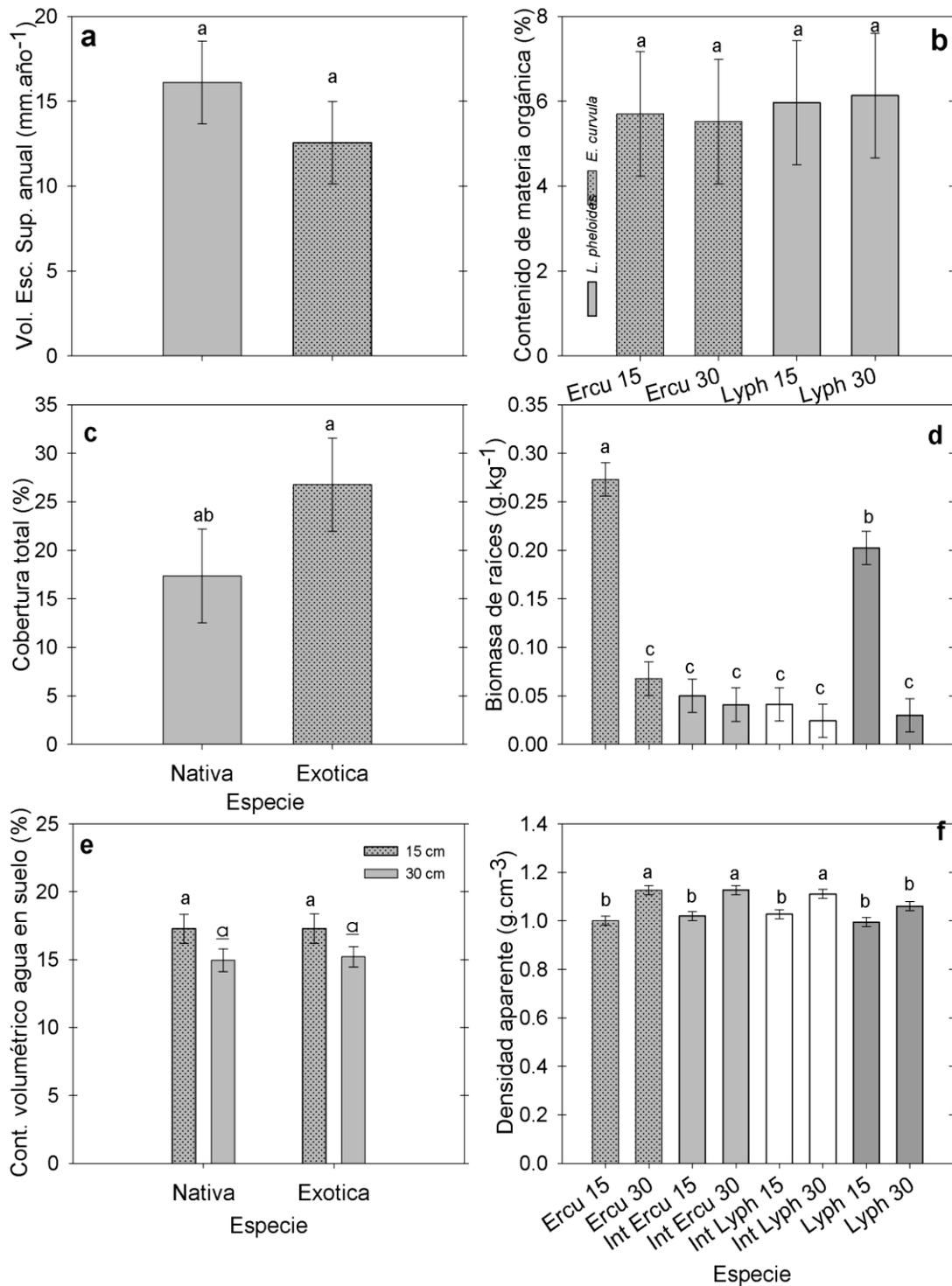


Figura 8. Medias y E.E. S.S. de a) Volumen de escorrentía superficial anual, b) Contenido de materia orgánica en suelo a 15 y 30 cm de profundidad, c) Contenido volumétrico de agua en suelo

a 15 y 30 cm de profundidad (humedad 15 y 30 cm), d) Biomasa de raíces a 15 y 30 cm de profundidad, e) Cobertura total vegetal y f) Densidad aparente en suelo a 15 y 30 cm de profundidad en presencia de la especie nativa (*L. phleoides*) y la exótica (*E. curvula*).

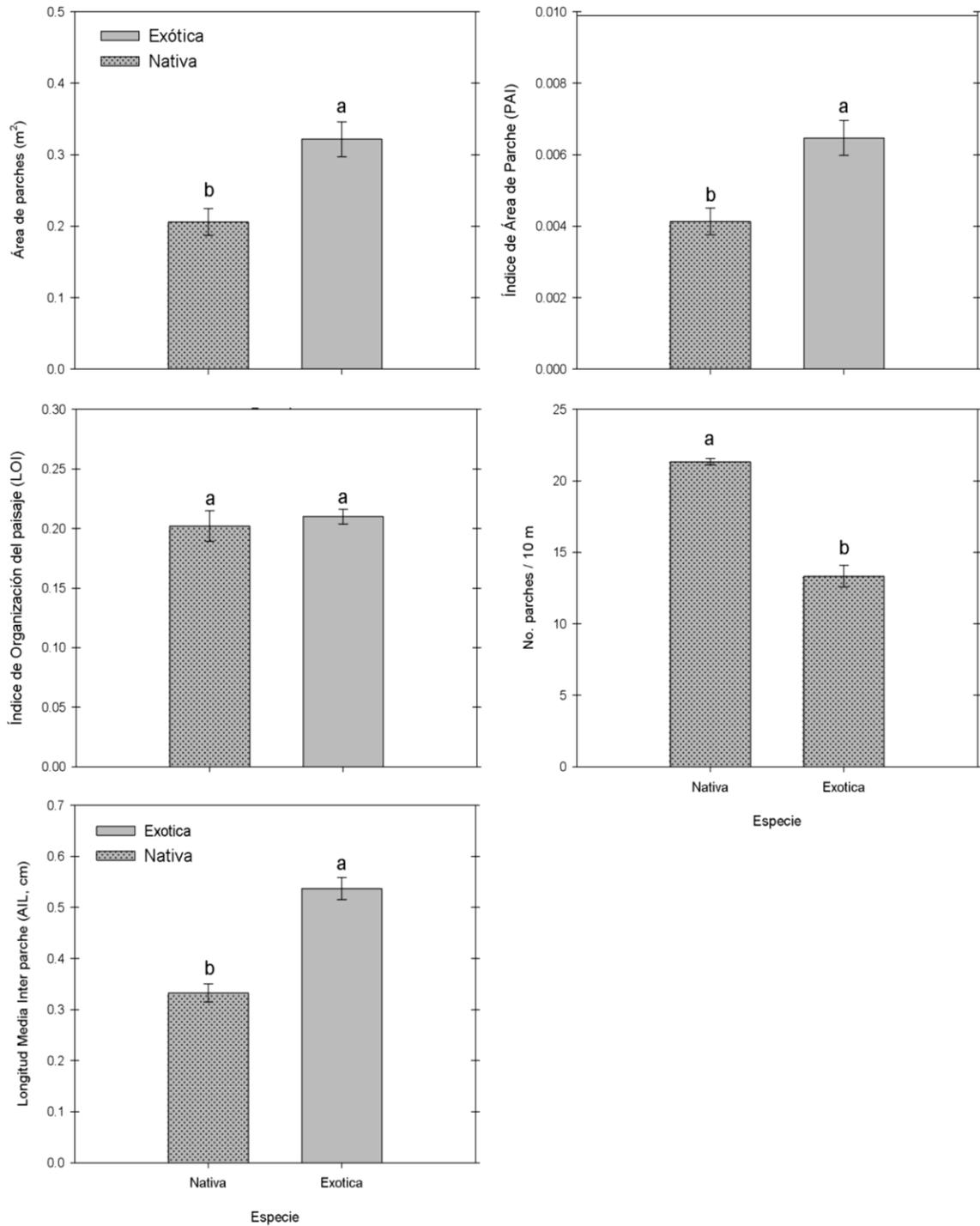


Figura 9. Medias por mínimos cuadrados  $\pm 1$  E.E. de a) Área de los Parches (m<sup>2</sup>), b) Índice del Área de los Parches, c) Índice de Organización del Paisaje, d) Número de Parches (NP·m<sup>-2</sup>) y e) Longitud Media Interparche (cm) en presencia de la especie nativa (*L. phleoides*) y la exótica (*E. curvula*).

### 3.4 Influencia del sistema de pastoreo, fuego prescrito y especies de gramíneas sobre variables ecohidrológicas, suelo y vegetación

El volumen de escorrentía superficial total anual aparentemente difirió a causa de los tratamientos de fuego ( $P=0.0009$ ) (Anexo 4, cuadro 39). En general, la presencia de *B. gracilis* independientemente del sistema de pastoreo y fuego mostró los mayores volúmenes de escorrentía superficial (figura 10a). El contenido volumétrico medio anual de agua en suelo varió significativamente en ambas profundidades (0-15 cm y 15-30 cm), y con el manejo de fuego ( $P\leq 0.0353$ , Anexo 4, cuadro 40 y 41). Tanto el pastoreo continuo como el rotacional en ausencia de fuego y con *B. gracilis*, poseen los mayores contenidos de humedad ( $\geq 13\%$ ). En contraste, en la presencia de *M. rigida* se registró la humedad más baja ( $\leq 15\%$ ) (figura 10c).

Por su parte, el contenido de materia orgánica (Anexo 4, cuadro 42), sólo difiere por el tipo de pastoreo ( $P=0.0488$ ), donde el pastoreo rotacional cuenta con un mayor porcentaje (5.12%). Respecto a la biomasa de raíces, se observaron diferencias significativas entre las especies y las profundidades ( $P=0.0001$ ) (Anexo 4, cuadro 43, 44 y 45). La biomasa de raíces de *M. rigida* fue mayor en la profundidad de 0-15 cm independiente del fuego. La densidad aparente también varía entre las especies y la profundidad ( $P= 0.0007$ ) (Anexo 4, cuadro 46), en donde la mayor densidad se observó en interespacio a 30 cm de profundidad y la menor a 15 cm bajo *M. rigida* (figura 10f)

La cobertura vegetal, el índice de Área de los Parches (PAI) y el Índice de Organización del Paisaje (LOI) mostraron diferencias significativas debido a los tratamientos ( $P\geq 0.0025$ , Anexo 4, cuadros 47, 50, 52). Así, la cobertura mostró su mayor proporción en la ausencia de fuego del pastoreo continuo y *M. rigida*, mientras que la cobertura pequeña se detectó bajo fuego prescrito, en pastoreo rotacional y *M. rigida* (figura 10e). Ambos PAI y LOI resultaron mayores en la ausencia de fuego independientemente del pastoreo o especie (Figura 11 b y c)

También el Área de Parches (PA) mostró cambios entre tratamientos ( $P=0.0033$ , Anexo 4, cuadro 48), siendo dentro del pastoreo rotacional en donde se observaron los parches de mayor tamaño (figura 11 a). Finalmente, la Longitud Media Inter parches (AIL) resultó significativamente diferente comparando las especies ( $P=0.0011$ , Anexo 4, cuadro 51), donde *M. rigida* posee las mayores distancias inter parche independiente de los tratamientos de fuego prescrito (figura 11e).

Dos de los rasgos relacionados con *M. rigida* (PcSf Muri y PrCf Muri), fueron los únicos que mostraron una correlación con el volumen de escorrentía superficial anual (Anexo 4, cuadro 53b, h). Así, la variabilidad en el volumen de escorrentía

superficial total anual fue explicado por el contenido volumétrico medio anual de agua en el suelo a 15 cm de profundidad bajo condición de pastoreo continuo con fuego y *B. gracilis* (PcCf Bogr), ( $R^2=0.22$ ,  $P= 0.0130$ , Anexo 4, cuadro 53c, d) y para *M. rigida* (PcCf Muri) ( $R^2=0.22$ ,  $P=0.0112$  Anexo 4, cuadro 53b, h). En el pastoreo continuo sin fuego y con *B. gracilis* (PcSf Bogr), el modelo de escorrentía superficial es mayormente explicado por el contenido volumétrico anual de agua en el suelo a 30 cm y con la biomasa de raíces en interespacio a 30 cm de profundidad ( $R^2= 0.35$ ,  $P=0.0175$ , Anexo 4, cuadro 53a). Cuando se trata de *M. rigida* (PcSf Muri), el modelo se explica mayoritariamente ( $R^2=0.49$ ,  $P=0.0003$  Anexo 4, cuadro 53b) con el contenido volumétrico medio anual de agua en suelo y el de materia orgánica a 30 cm de profundidad.

En el pastoreo rotacional, el modelo que mejor explicó el volumen de escorrentía incluyó el contenido volumétrico medio anual de agua en suelo a 30 cm de profundidad, la biomasa de raíces y número de parches. En el caso de pastoreo rotacional sin fuego y presencia de *B. gracilis* ( $R^2= 0.38$ ,  $P=0.0088$ , Anexo 4, cuadro 53e), el modelo que mejor explicó la variabilidad incorpora al contenido volumétrico medio anual de agua en suelo a 15 cm y la biomasa de raíces en interespacio a 30 cm de profundidad. En el caso de pastoreo rotacional, sin fuego y la presencia de *M. rigida* (PrSf Muri,  $R^2=0.42$ ,  $P=0.0010$ , Anexo 4, cuadro 53f) el mejor modelo incluyó contenido volumétrico medio anual de agua en suelo a 30 cm y el Área de los Parches para el PrCf Muri ( $R^2= 0.34$ ,  $P=0.0075$ , Anexo 4, cuadro 53h). Únicamente el pastoreo rotacional con fuego y presencia de *M. rigida* (PrCf Muri) se ajustó a un modelo lineal en donde el volumen de escorrentía se relacionó con el contenido volumétrico medio anual de agua en suelo a 30 cm de profundidad ( $R^2=0.031$ ,  $P=0.0020$ , Anexo 4, Anexo 4, cuadro 53h).

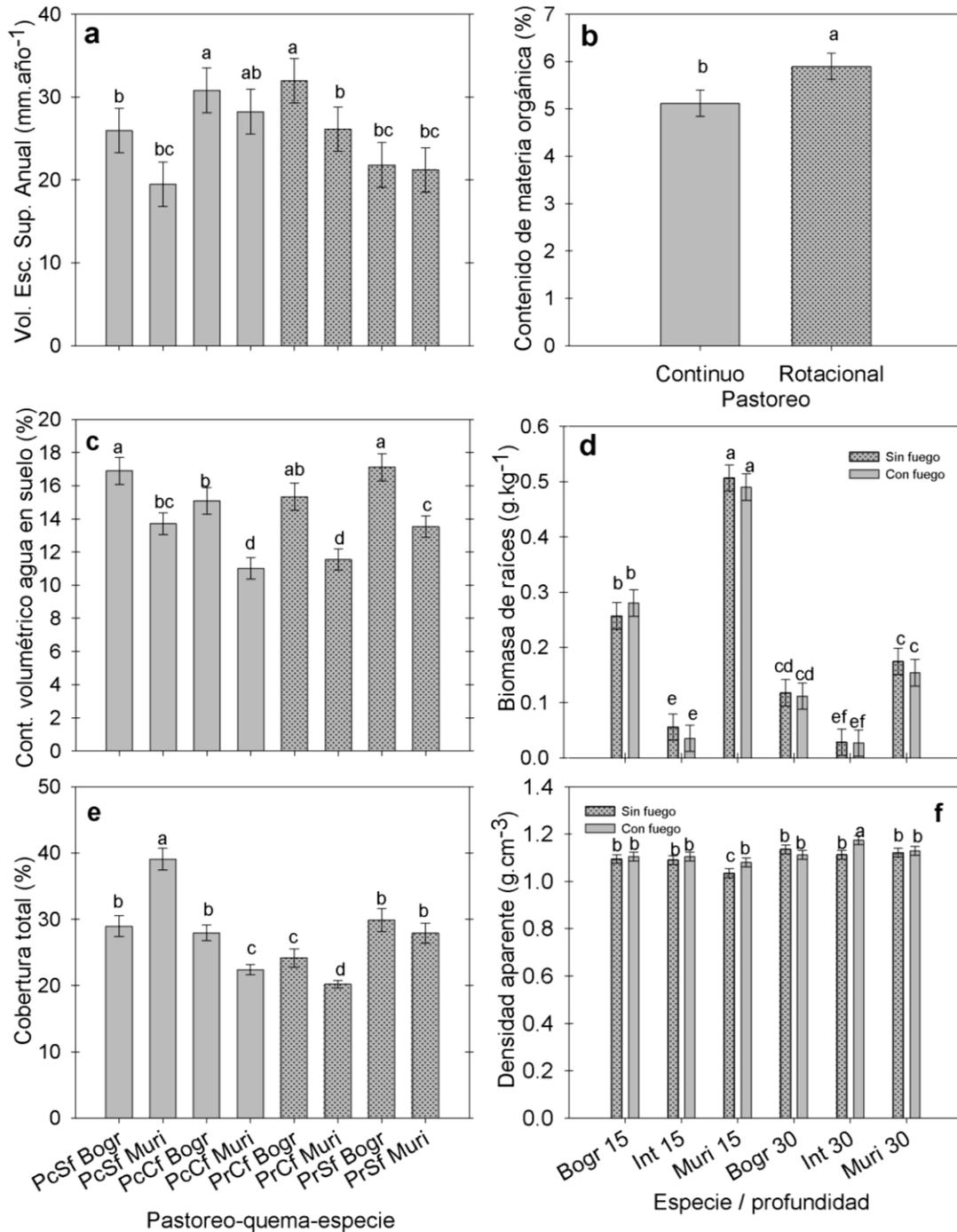


Figura 10. Medias y E.E. S.S. de a) Volumen de escorrentía superficial anual, b) Biomasa de raíces a 15 y 30 cm de profundidad, c) Contenido volumétrico de agua en suelo a 15 y 30 cm de profundidad (humedad 15 y 30 cm), d) Contenido de materia orgánica en suelo a 15 y 30 cm de profundidad, e) Cobertura total vegetal y f) Densidad aparente en suelo a 15 y 30 cm de profundidad, contemplando los diferentes tratamientos de la interacción pastoreo-quema-especie a) Pastoreo continuo sin fuego con *B. gracilis*, b) Pastoreo continuo sin fuego con *M. rigida*, c) Pastoreo continuo con fuego con *B. gracilis*, d) Pastoreo continuo con fuego con *M. rigida*, e) Pastoreo rotacional sin fuego con *B. gracilis*, f) Pastoreo rotacional sin fuego con *M. rigida*, g) Pastoreo rotacional con fuego con *B. gracilis* y h) Pastoreo rotacional con fuego con *M. rigida*.

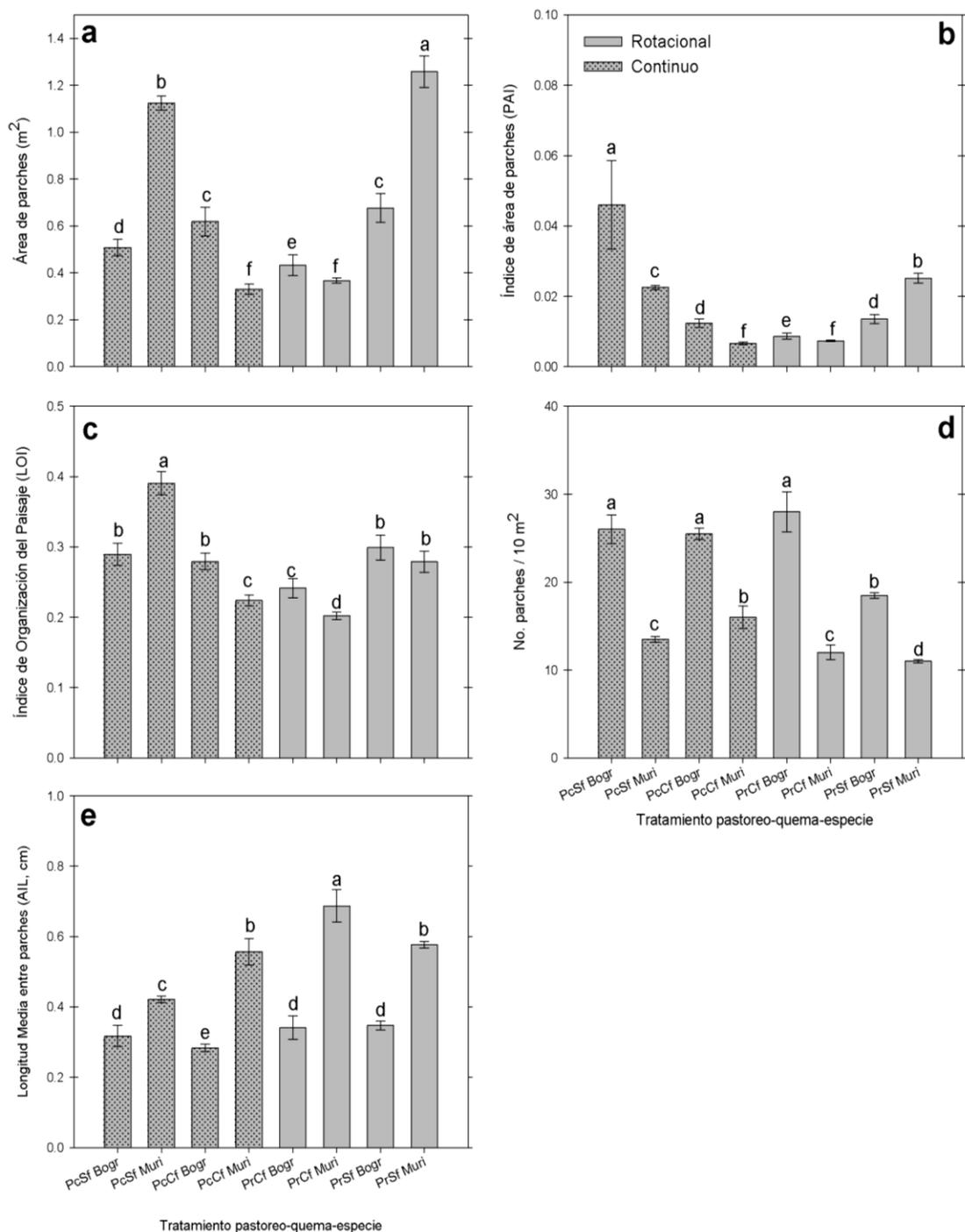


Figura 11. Medias por mínimos cuadrados  $\pm 1$  E.E. de a) Área de los Parches (m<sup>2</sup>), b) Índice del Área de los Parches, c) Índice de Organización del Paisaje, d) Número de Parches (NP·m<sup>-2</sup>) y e) Longitud Media Interparche (cm), contemplando los diferentes tratamientos de la interacción pastoreo-quema-especie a) Pastoreo continuo sin fuego con *B. gracilis*, b) Pastoreo continuo sin fuego con *M. rigida*, c) Pastoreo continuo con fuego con *B. gracilis*, d) Pastoreo continuo con fuego con *M. rigida*, e) Pastoreo rotacional sin fuego con *B. gracilis*, f) Pastoreo rotacional sin fuego con *M. rigida*, g) Pastoreo rotacional con fuego con *B. gracilis* y h) Pastoreo rotacional con fuego con *M. rigida*.

## 4. Discusión

### 4.1 Precipitación

Se ha reportado que en las regiones semiáridas, los eventos de precipitación pequeños ( $\leq 5.0$  mm), constituyen la mayor parte de la precipitación total (Sala *et al.*, 1992; Schwinning y Sala, 2004). En el área de estudio, los eventos mayores a 10 mm de precipitación se registraron hasta el mes de septiembre de 2011 y para el mes de octubre se observó un incremento de cobertura vegetal así como la presencia de especies anuales en todos los sitios. Ello coincide con lo reportado por Schwinning y Sala (2004), que describen un requerimiento de pulsos de lluvia de entre 10 y 25 mm para detonar los procesos de crecimiento y germinación en pastizales, por lo que no es coincidencia que la temporada de crecimiento coincida con la disponibilidad de agua (Sala *et al.*, 1992). No obstante, el mismo detonante de eventos de crecimiento se observó nuevamente en el mes de febrero de 2012 con el consecuente inicio de crecimiento de la vegetación, aún y cuando la temperatura de la época invernal es menor a la de la temporada de lluvias, lo cual sugiere un papel más predominante de la disponibilidad de agua.

### 4.2 Efecto del sistema de pastoreo sobre variables ecohidrológicas, suelo y vegetación

Tal y como se mencionó en los resultados, el pastoreo y particularmente el pastoreo pesado induce efectos en la ecohidrología del pastizal semiárido. Por ejemplo, el pastoreo continuo que se realiza en el ejido Vaquerías, ha causado un decremento de la cobertura vegetal en el sitio y que a su vez, se traduce en la reducción del Área de los Parches de vegetación (PA), el número de parches que se encuentran presentes, el índice de organización del paisaje (LOI) y con ello, un incremento de la distancia entre parches (AIL). De tal manera que el mayor volumen de escorrentía superficial total anual se observó en sitios con pastoreo mientras que en las exclusiones, especialmente la de 30 años, presentaron una cantidad de escorrentía superficial aprox. Menor en un 50% (figura 6a). Lo anterior concuerda con los trabajos de Wilcox *et al.* (2003); Schwinning y Sala (2004); Ludwing *et al.* (2005); Ravi *et al.* (2009); Dunne *et al.* (2011); Vega y Montaña (2011); donde demuestran que una menor cobertura vegetal, como consecuencia de pastoreo intenso favorece incrementos del flujo superficial de agua. Este último puede incrementarse en la medida que el área de suelo desnudo aumente y se mejore la interconexión de zonas desnudas (Urgeghe *et al.*, 2010; Dunne *et al.*, 2011).

Además, el pastoreo continuo intenso puede generar otros efectos sobre la ecohidrología. Por ejemplo, el contenido de agua en suelo es fuertemente alterado por sobrepastoreo (Naeth *et al.*, 1991; Wilcox *et al.*, 2003; Giese *et al.*, 2009), provocando menor capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en suelo tal que en los primeros 5 cm del suelo se han observado hasta 10% menos en el contenido volumétrico de agua, en comparación con sitios sin pastoreo (Giese *et al.*, 2009). Esto concuerda con los resultados obtenidos, en los que las exclusiones mantuvieron contenidos volumétricos de agua 10% mayores a sitios pastoreados, aun en temporada de secas. Tal disminución es explicada en parte por la reducción de la biomasa de raíces reportada, particularmente en los interespacios (Hook *et al.*, 1994, figura 6a).

Por otra parte, aunque algunos reportes indican que al modificarse la vegetación por acción del pastoreo, también se puede alterar no sólo la cobertura vegetal y/o cantidad de raíces (Svejcar y Christiansen, 1987) lo cual puede por ejemplo al reducirse, incrementa la evaporación (Naeth *et al.*, 1971) y a su vez modifica las características de la materia orgánica, la cual es controlada por la presencia de nuevas especies y/o por cambios a nivel de microclima (ej. radiación, temperatura, humedad) en el suelo (Giese *et al.*, 2009). Sin embargo, para efectos de este trabajo, no se observaron diferencias significativas en el contenido de materia orgánica entre los tratamientos de pastoreo. Un estudio previo por Medina *et al.*, (2008) mostró que en estos pastizales la materia orgánica es muy recalcitrante y sus valores varían muy lentamente, tal que el decaimiento o recuperación puede tardar varias décadas para ser observable.

En otro estudio, Naeth *et al.* (1991) estableció que la mayor densidad aparente observada en la parte más superficial (0-15 cm) del suelo en un área de pastoreo, fue consecuencia del pisoteo sin importar la presencia o no de cobertura vegetal. No obstante, en el presente estudio se observaron los valores más altos de densidad aparente en los sitios de exclusión que en los sitios con pastoreo, incluyendo el sitio de pastoreo continuo. Esta característica puede ser a causa de que en las exclusiones se contó con una mayor cantidad de biomasa radical, lo cual parece coincidir con observaciones por Coffin y Lauenroth (1991) y Hook *et al.* (1994), los cuales indicaron que en los primeros 15 cm de profundidad y bajo la planta, es donde se encuentra más del 50% de las raíces, lo cual pudiera permitir mayor estabilidad del sedimento al detenerse dentro de la red de raíces.

Por otra parte, las obras de bordos de contención que se encuentran en el tratamiento con pastoreo estacional en el sitio La Mesa, si influyeron en la modificación de las condiciones, tras 40 años de haberse realizado. De esta manera, las áreas abiertas (estacional abierto), presentaron el segundo mayor

volumen de escorrentía superficial entre todos los sitios con pastoreo. La erosión, principalmente hídrica, ha transportado paulatinamente el sedimento del área de captación hacia el bordo pendiente abajo, depositando el sedimento sobre el bordo y generando mejores condiciones en éstas “tierras bajas” (Singh *et al.*, 1998). Por esta razón, estos micrositios presentaron mayor biomasa de raíces, mayor cantidad de sedimento y menor volumen de escorrentía. No obstante, no se registraron diferencias entre la cobertura vegetal tanto en áreas abiertas como en bordos, lo que podría explicarse por una aparente preferencia del ganado por las áreas con bordos (tierras bajas) en donde existe vegetación más palatable (Singh *et al.*, 1998; Milchunas *et al.*, 2008).

Finalmente, el área de la exclusión de 30 años es la que presenta el mayor número de interacciones con los otros parámetros monitoreados. Ello puede deberse a que en ausencia de pastoreo se hayan obtenido mejores resultados dentro de los parámetros monitoreados logrando entre ellos una interconexión entre las variables ecológicas e hidrológicas, lo que permite un mejor soporte en conjunto para responder a la lámina de agua formada durante eventos de lluvia (Wilcox *et al.*, 2003; Ludwig *et al.*, 2005; Urgeghe *et al.*, 2010)

#### **4.3 Influencia de gramíneas exóticas y nativas en variables ecohidrológicas, suelo y vegetación**

Las variables examinadas contrastando las diferencias surgidas por la presencia de gramíneas exótica o nativa, en lo general no mostraron las diferencias esperadas. El hecho de que no haya variado el volumen de escorrentía superficial y el contenido volumétrico de agua, puede ser función de la conjunción de varias características de cada una de estas especies. Así, aunque el número de parches de vegetación fue substancialmente diferente entre los dos tipos de gramíneas (Fig. 2), la gramínea exótica con menor número de parches sin embargo presentando mayor cantidad de follaje, mientras que en la gramínea nativa el número de parches fue mayor pero combinado con una baja acumulación de follaje. De esta manera, estas características parecen balancear el funcionamiento hidrológico de los dos tipos de gramíneas, así el mayor número de parches en la especie nativa, parece favorecer la existencia de una menor conexión entre los interespacios, logrando mayor cobertura, mejorando la rugosidad en el terreno y por lo tanto, permitiendo reducir/eliminar las diferencias en el volumen de escorrentía con respecto a la gramínea exótica (Wilcox *et al.*, 2003; Ludwig *et al.*, 2005; Urgeghe *et al.*, 2010).

Por otra parte, *E. curvula* presenta la mayor biomasa radical en los primeros 0-15 cm de profundidad, lo cual sugiere que podría tener un mejor aprovechamiento del

agua superficial y sub-superficial así como mejor adaptación a periodos de sequía en comparación a *L. phleoides* a (Coffin y Lauenroth, 1991). Lo anterior es respaldado por el análisis de regresión múltiple en donde se muestra que en el caso de *E. curvula* la variación en el volumen de escorrentía superficial es explicado tanto por el contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad y la biomasa de raíces presente en los primeros 15 cm.

#### **4.4 Influencia del sistema de pastoreo, manejo de fuego y presencia de dos gramíneas nativas sobre variables ecohidrológicas, suelo y vegetación**

En general, se observó mejor retención de humedad en suelo en la presencia de la especie clave del pastizal (*B. gracilis*). Si bien, *B. gracilis* exhibe menor biomasa aérea y de raíces en comparación con *M. rigida*, es posible que el mejor aprovechamiento de los pulsos de agua recaiga en el hecho de que *B. gracilis* (de acuerdo a Coffin y Lauenroth, 1991) está altamente adaptada para lograr responder a pequeños pulsos de agua ( $\leq 5.0$  mm), los cuales conforman la mayor proporción de los eventos pluviales registrados en estos sistemas semiáridos (Sala *et al.*, 1992; Singh *et al.*, 1998; Austin *et al.*, 2004; Schwinning y Sala, 2004; Belnap *et al.*, 2005) y ratificado en este estudio.

Por otra parte, en todos los tratamientos se encontró relación entre la escorrentía superficial y la humedad del suelo, ya fuera a 0-15 cm ó 15 a 30 cm de profundidad, lo cual sugiere que el contenido volumétrico de agua en el suelo puede determinar tasas de escurrimiento superficial (Allen *et al.*, 2011), esto posiblemente dado por la proporción de ecuación del poro de la matriz del suelo y mecanismos asociados a infiltración del agua.

Los presentes resultados, también permitieron observar que existe al menos otro factor de control de los procesos hidrológicos y que tienen que ver con el efecto del fuego y sus consecuencias en la biomasa en pie, la materia orgánica y otros efectos sobre la superficie del suelo. De esta manera, el escurrimiento superficial aumentó cuando se incorporó fuego prescrito, sin importar el sistema de pastoreo (rotacional o continuo). Esto posiblemente se puede explicar por el incremento de la conectividad de los interespacios, una vez que el fuego remueve la biomasa aérea, el mantillo y materia orgánica superficial. En el caso del contenido volumétrico de agua, tampoco afectó la dominancia de alguna de las especies de gramínea especie de gramínea presente. Esto sugiere que el efecto del fuego, aun se mantiene después de seis años en que este se impuso, observándose ello sobre la estructura del suelo, disposición de partículas, presencia de compuestos recalcitrantes liberados durante la combustión (Ravi *et al.*, 2009), así como la alteración de: textura del suelo, capacidad de infiltración, conductividad hidráulica

(Schwinning *et al.*, 2004), capacidad de retención de agua (Lane *et al.*, 1998) densidad aparente (Allen *et al.*, 2011), la microtopografía del suelo (Ravi *et al.*, 2009; Kölbl *et al.*, 2011), penetración de luz en suelo y composición de la materia orgánica (Giese *et al.*, 2009), todos los cuales finalmente repercuten finalmente en el establecimiento de la vegetación del sitio.

## 5. Conclusiones

La escorrentía superficial estuvo correlacionada con un mayor número de parámetros en los sitios de las exclusiones, lo que permite sugerir que la conservación de una buena cubierta vegetal, junto con atributos asociados como son; cantidad de mantillo, biomasa radical etc., permite un mejor aprovechamiento a la precipitación. En caso contrario, cuando los sitios de pastizal son sujetos a pastoreo, sobre todo bajo presiones intensas de pastoreo, algunos de estos parámetros (empezando por la cobertura vegetal) tienden a reducirse. Dependiendo de la frecuencia e intensidad del pastoreo, los efectos sobre la cubierta vegetal pueden revertirse o continuar, de tal que de continuar la pérdida de cubierta vegetal, el volumen de escorrentía superficial se incrementaría.

La presencia de gramíneas exóticas puede alterar las condiciones del sitio y desplazar a especies nativas y otros organismos relacionados. Sin embargo en el caso particular del sitio de estudio, el *E. curvula*, permitió, una vez que fue establecida, la gradual recuperación de la gramínea nativa *L. phleoides*, lo que requirió de un periodo aproximado de 30 años. La mejor adaptación a las condiciones del sitio por parte de la gramínea nativa, tanto a los periodos de lluvia como de estiaje, son parte fundamental para la recuperación de esta especie.

El manejo de fuego se vislumbra como una técnica de manejo que permite la recuperación de las especies nativas y de su vigor, así como también, se empleada en zonas de pastizal, para el control del incremento de arbustos. No obstante hidrológicamente hablando, los efectos de la quema prescrita siguen generando efectos sobre las variables ecohidrológicas, y material orgánico, aún después de seis años de haberse prescrito. Todo lo anterior, permite vislumbrar la necesidad de investigaciones futuras para entender como afectar en la menor medida posible el funcionamiento ecohidrológicos en periodos post-quema.

Es importante señalar que en vista de que los primeros 15 cm del suelo son los más afectados por efecto del pastoreo (especialmente pastoreo pesado), esto podría eventualmente generar que se volviese ecohidrológicamente más susceptible debido a que el pastoreo ejerce mayor impacto sobre el suelo superficial.

## 6 Referencias

- Aguado, A. 1993. Efecto de factores ambientales sobre la dinámica vegetal en pastizales de los Llanos de Ojuelos, Jalisco: un enfoque multivariable. Tesis para obtener el grado de maestría. Colegio de Posgraduados. México. 155 p.
- Allen, E., R. Steers, y S. Dickens. 2011. Impacts of fire and invasive species on desert soil ecology. *Rangeland, Ecology and Management* 64: 450-462. DOI: 10.2011/REM-D-09-00159.1
- Archer, S. D. Schimel y E. Holland. 1995. Mechanisms of shrubland expansion: land use, climate or CO<sub>2</sub>? *Climate change* 29: 91-99.
- Arredondo, J., M. Giner, M. Alcocer y M. García. 1986. El manejo de pastizales en la ganadería extensiva de zonas áridas. *In: Ganadería extensiva de zonas áridas y semiáridas del Altiplano central*. CIPEJ-CE, Vaquerías, Jalisco.
- Austin, A., M. Yahdjian, J. Stark, J. Belnap, A. Porporato, U. Norton, D. Ravetta, S. Schaeffer. 2004. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia* 141: 221-235. DOI 10.1007/s00442-004-1519-1
- Belnap, J., J. Welter, N. Grimm, N. Barger y J. Ludwig. 2005. Linkages between microbiologic and hydrologic processes in arid and semiarid watersheds. *Ecology* 86(2): 298-307.
- Bledsoe, C., T. Fahey, F. Day y R. Ruess. Measurement of static root parameters: biomass, length and distribution in the soil profile *In: Standard soil methods for Long-Term Ecological Research*. Eds. Robertson, P., D. Coleman, C. Bledsoe y P. Sollins. Pp 413-436.
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal* 54 (5): 464-465.
- Briske, D., S. Fuhlendorf y F. Smeins. 2005. State and transition models, thresholds, and rangeland health: A synthesis of ecological concepts and perspectives. *Rangeland Ecology and Management* 58:1-10.
- Brussard, P., D. Murphy y C. Tracy. 1994. Cattle and conseration biology: another view. *Conservation Biology* 8:919-921.
- Coffin, D. y W. Lauenroth. 1991. Effects of competition on spatial distribution of rots of blue grama. *Journal of Rangeland Management* 44(1): 68-71
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/mapas/mapa.html>
- Comisión Técnico Consultiva para la Determinación de Coeficientes de Agostadero (COTECOCA). (1979). Coeficientes de Agostadero de la República Mexicana. Estado de Jalisco. Tomo I. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D. F. 159 p.
- Cotler, H., E. Sotelo, J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina y L. Quiñones. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica* 83:5-71.

- D'Antonio, C. y P. Vitousek. 1992. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. *Annual Review of Ecology and Systematics* 23:63-87.
- Delgado-Balbuena, J. 2008. Net Ecosystem Exchange of carbon and water vapor among contrasting land-uses types in the semiarid short-grass steppe in Central Mexico. Presentada en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica para la obtención del grado de maestría, enero de 2010.
- D'Odorico, P. y A. Porporato. 2006. Ecohydrology of arid and semiarid ecosystem: an introduction. *In: Dryland ecology*, Eds. D'Odorico y Porporato. Springer, Holanda, 341 pp.
- Dunne, T., D. Western y W. Dietrich. 2011. Effects of cattle trampling on vegetation, infiltration, and erosion in a tropical rangeland. *Journal of Arid Environments* 75: 58-69.
- ECOPAD. 2007. Estrategia para la conservación de pastizales del Desierto Chihuahuense. Eds. Aguirre, C. y Lafón, A. México, 23 pp.
- Elliot, E., J. Heil, E. Kelly y H. Monger. 1999. Soil structural and other physical properties *In: Standard soil methods for Long-Term Ecological Research*. Eds. Robertson, P., D. Coleman, C. Bledsoe y P. Sollins. Pp 74-89.
- Fanselow, N., P.Schönbach, X.Gong, S. Lin, F. Taube, R. Loges, Q. Pan, K. Dittert. 2011. Short-term regrowth responses of four steppe grassland species to grazing intensity, water and nitrogen in Inner Mongolia. *Plant Soil* 340: 279-289. DOI 10.1007/s11104-010-0694-6
- Fernald, A., y W. Schlesinger. 2001. Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils. *Biogeochemistry* 52: 155-172.
- Field, J., D. Breshears, J. Whicker y C. Zou. 2011. Interactive effects of grazing and burning on wind- and water-driven sediment fluxes: rangeland management implications. *Ecological Applications* 21: 22–32. <http://dx.doi.org/10.1890/09-2369.1>
- Gao, Y., M. Giese, X. Han, D. Wang, Z. Zhou, H. Brueck, S. Lin y F. Taube. 2009. Land use and drought interactively affect interspecific competition and species diversity at the local scale in a semiarid steppe ecosystem. *Ecol Res* 24: 627-635. DOI 10.1007/s11284-008-0532-y
- García, E. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. 2003. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 50: 67-76.
- Giese, M., Y. Gao, Y. Zhao, Q. Pan, S. Lin, S. Peth y H. Brueck. 2009. Effects of grazing and rainfall variability on root and shoot decomposition in a semi-arid grassland. *Applied Soil Ecology* 41: 8-18.
- Gong, X., Q. Chen, K. Dittert, F. Taube y S. Lin. 2011. Nitrogen, phosphorus and potassium nutritional status of semiarid steppe grassland in Inner Mongolia. *Plant Soil* 340:265-278.

- Guevara, S. 2001. Presentación *In: Historia de la ganadería en México*. Ed.: Lucina Hernández. Institut de recherche pour le développement e Instituto de Ecología, A. C., México, 276 pp.
- Hamerlynck, E., R. Scott, M. Moran, T. Keefer y T. Huxman. 2010. Growing season ecosystem and leaf-level gas exchange of an exotic and native semiarid bunchgrass. *Oecologia* 163: 561-570. DOI 10.1007/s00442-009-1560-1
- Hamerlynck, E., R. Scott, S. Moran, A. Schwander, E. Connor y T. Huxman. 2011. Inter and under canopy soil water, leaf-level and whole-plant gas exchange dynamics of a semi-arid perennial C4 grass. *Oecologia* 165: 17-29.
- Harmon, M. y K. Lajtha. Analysis of detritus and organic horizons for mineral and organic constituents *In: Standard soil methods for Long-Term Ecological Research*. Eds. Robertson, P., D. Coleman, C. Bledsoe y P. Sollins. Pp 143-165.
- Hart, R., y J. Derner. 2008. Cattle grazing on the shortgrass steppe *In: Ecology of the shortgrass steppe*. Eds: Lauenroth y Burke. Oxford, Estados Unidos de Norteamérica, 522 pp.
- Herrick, J., J. Van Zee, K. Havstad, L. Burkett y W. Whitford. 2005. Monitoring manual for grassland, shrubland and savanna ecosystems. Vol. 1: Quick start. USDA-ARS Jornada Experimental Range, Las Cruces, NM: Distributed by University of Arizona Press. [http://jornada.nmsu.edu/sites/jornada.nmsu.edu/files/Quick\\_Start.pdf](http://jornada.nmsu.edu/sites/jornada.nmsu.edu/files/Quick_Start.pdf)
- Herrick, J., V. Lessard, K. Spaeth, P. Shaver, R. Dayton, D. Pyke, L. Jolley y J. Goebel. 2010. National ecosystem assessments supported by scientific and local knowledge. *Frontiers in Ecology and Environment* 8 (8): 403-408.
- Hook, P., W. Lauenroth e I. Burke. 1994. Spatial patterns of roots in a semiarid grassland: abundance of canopy openings and regeneration gaps. *Journal of Ecology* 82: 485-494.
- Huang, D., K. Wang y W. Wu. 2007. Dynamics of soil physical and Chemicals properties and vegetation succession characteristics Turing grassland desertification under sheep grazing in an agro-pastoral transition zone in Northern China. *Journal of Arid Environments* 70: 120-136.
- Jones, A. 2000. Effects of cattle grazing on North American arid ecosystems: a quantitative review. *Western North American Naturalist* 60(2): 155-164.
- Kölbl, A., M. Steffens, M. Wiesmeier, C. Hoffmann, R. Funk, J. Krümmelbein A. Reszkowska, Y. Zhao, S. Peth, R. Horn, M. Giese e I. Kögel-Knabner. 2011. Grazing changes topography-controlled topsoil properties and their interaction on different spatial scales in a semi-arid grassland of Inner Mongolia, P.R. China. *Plant Soil* 340: 35–58 DOI 10.1007/s11104-010-0473-4
- Kulpa, S., E. Leger, E. Espeland y E. Goergen. 2012. Postfire Seeding and Plant Community Recovery in the Great Basin. *Rangeland Ecology and Management* 65(2): 171-181. DOI: 10.2111/REM-D-11-00046.1

- Lane, D., D. Coffin y W. Lauenroth. 1998. Effects of soil texture and precipitation on above-ground net primary productivity and vegetation structure across the Central Grassland region of the United States. *Journal of Vegetation Science* 9: 239-250.
- Lauenroth, W. 2008. Vegetation of the shortgrass steppe. *In: Ecology of the shortgrass steppe*. Eds.: Lauenroth y Burke. Oxford, Estados Unidos de Norteamérica, 522 pp.
- Lauenroth, W., I. Burke y A. Morgan, 2008. The shortgrass steppe. The region and research sites *In: Ecology of the shortgrass steppe. A long term perspective*. Eds: Lauenroth y Burke. Oxford, Estados Unidos de Norteamérica, 522 pp.
- Lauenroth, W. y J. Bradford. 2009. Ecohydrology of dry regions of the United States: Precipitation pulses and intraseasonal drought. *Ecohydrology* 2: 173-181.
- Lauenroth, W y J. Bradford. 2011. Ecohydrology of dry regions of the United States: Water balance consequences of small precipitation events. *Ecohydrology* 5(1): 46-53. DOI: 10.1002/eco.195
- Liu, Y., Q. Pan, H. Liu, Y. Bai, M. Simmons, K. Dittert, X. Han. 2011. Plant responses following grazing removal at different stocking rates in an Inner Mongolia grassland ecosystem. *Plant Soil* 340:199-213. DOI 10.1007/s11104-010-0458-3
- Lohse, K., P. Brooks, J. McIntosh, T. Meixner y T. Huxman. 2009. Interactions between biogeochemistry and hydrologic systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34: 65-96.
- Ludwig, J., B. Wilcox, D. Breshears, D. Tongw y A. Imeson. 2005. Vegetations patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. *Ecology* 86(2): 288–297.
- Luna, M. 2009. Burning season effect on four southern Chihuahua Desert plants. *Disertación para obtención del grado de doctor*. Texas Tech University, Mayo de 2009.
- Madsen, M., S. Petersen, B. Roundy, B. Hopkins, y A. Taylor. 2012. Comparison of Postfire Soil Water Repellency Amelioration Strategies on Bluebunch Wheatgrass and Cheatgrass Survival. *Rangeland Ecology and Management* 65: 182-188. 2012. DOI: 10.2111/REM-D-10-00152.1
- Medina-Roldán, E., T. Arredondo-Moreno, E. García-Moya y M. Huerta-Martínez. 2007. Soil water content dynamics along a range condition gradient in a shortgrass steppe. *Rangeland Ecology and Management* 60:79-87
- Milchunas, D., W. Lauenroth, I. Burke, J. Detling. 2008. Effects of grazing on vegetation. *In: Ecology of the shortgrass steppe*. Eds: Lauenroth y Burke. Oxford, Estados Unidos de Norteamérica, p. 389-446.

- Naeth, M., D. Chanasyk, R. Rothwell y A. Bailey. 1991. Grazing impacts on soil water in mixed prairie and fescue grassland ecosystems of Alberta. *Canadian Journal of Soil Science* 71: 313-325.
- Newman, B., B. Wilcox, S. Archer, D. Breshears, C. Dahm, C. Duffy, N. MacDowell, F. Phillips, B. Scanlon y E. Vivoni. 2006. Ecohydrology of water limited environments: A scientific vision. *Water Resources Research*, 42, W06302, doi:10.1029/2005WR004141
- Pellant, M. P. Shaver, D. Pyke y J. Herrick. 2005. Interpreting indicators of rangeland health, version 4. Technical Reference 1734-6. U. S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Science and Technology Center, CO. BLM/WO/ST-00/001+1734/ReV05.122 pp.
- Ravi, S., P. D'Odorico, T. Zobeck y T. Over. 2009. The effect of re-induced soil hydrophobicity on wind erosion in a semiarid grassland: Experimental observations and theoretical Framework. *Geomorphology* 105: 80-86.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1era. Edición digital, Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad, 504 pp.
- Sala, O., W. Lauenroth y W. Parton. 1992. Long-term soil water dynamics in the shortgrass steppe. *Ecology* 73(4): 1175-1181.
- Schimel, S., A. Stillwell y R. Woodmansee. 1985. Biogeochemistry of C, N and P in a soil catena of the shortgrass steppe. *Ecology* 66(1): 276-282.
- Schimel, S., W. Parton, F. Adamsen, R. Woodmansee, R. Senft y M. Stillwell. 1986. The role of cattle in the volatile loss of nitrogen from shortgrass steppe. *Biogeochemistry* 2: 39-52
- Schlesinger, W.H., J. Reynolds, G. Cunningham, L. Huenneke, W. Jarrell, R. Virginia, W. Whitford. 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science* 247, 1043–1048.
- Schwanghart, W., T. Jarmer. 2011. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography - a case study from south-eastern Spain. *Geomorphology*, 126: 252-263. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.11.008
- Schwinning, S., y O. Sala. 2004. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia* 141: 211-220. DOI 10.1007/s00442-004-1520-8
- Schwinning, S., O. Sala, M. Loik y J. Ehleringer. 2004. Thresholds, memory, and seasonality: understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems. *Oecologia* 141: 191-193. DOI 10.1007/s00442-004-1683-3
- Singh, J., D. Milchunas y W. Lauenroth. 1998. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland. *Plant Ecology* 134: 77-89.
- Svejcar, T. y S. Christiansen. 1987. The influence of grazing pressure on rooting dynamics of caucian bluestem. *Journal of Rangeland Management* 40(3): 224-227.

- Tongway, D. y N. Hindley. 2005. Landscape function analysis: procedures for monitoring and assessing landscapes with special reference to minesites and rangelands. CSIRO, Australia, 80 pp.
- Urgeghe, A., D. Breshears, S. Martens y P. Beeson. 2010. Redistribution of runoff among vegetation patches types: On ecohydrological optimality of herbaceous capture on run-on. *Rangeland Ecology and Management* 63: 497-504.
- Vega, E. y C. Montaña. 2011. Effects of overgrazing and rainfall variability on the dynamics of semiarid banded vegetation patterns: A simulation study with cellular automata. *Journal of Arid Environments* 75: 70-77.
- Velásquez, A., J.F. Mas, J.R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P.C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J.L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*. INE, SEMARNAT. México. 62: 21-37.
- Wilcox, B. y Thurow, T. 2006 Emerging issues in rangeland ecohydrology: vegetation change and the water cycle. *Rangeland Ecology and Management* 59:220-224.
- Wilcox, B., D. Breshears y C. Allen. 2003. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: effects of scale and disturbance. *Ecological monographs* 73(2): 223-239.
- Yu, M., G. Quiong, H. Epstein, X. Zhang. (2008). An ecohydrological analysis for optimal use of redistributed water among vegetation patches. *Ecological Applications* 18(7): 1679-1688.

## Anexo 1.

Cuadro 6. Precipitación acumulada por temporada y por mes en cada sitio.

Sitio	INIFAP		La Mesa		Excl 30		SD superior		SD inferior		Llorón		Tulio 1		Tulio 2	
Mes	Pp. (mm)	% temporada	Pp. (mm)	% temporada	Pp. (mm)	% temporada	Pp. (mm)	% temporada	Pp. (mm)	% temporada	Pp. (mm)	% temporada	Pp. (mm)	% temporada	Pp. (mm)	% temporada
<b>Temporada de lluvias</b>																
Junio 2011	34.60	24.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.00	14.77	0.00	0.00	47.20	18.04	50.10	18.97
Julio 2011	24.70	17.61	19.20	9.48	17.80	8.54	18.80	11.88	19.00	10.39	20.80	15.16	31.70	12.11	34.20	12.95
Agosto 2011	33.40	23.81	36.60	18.07	36.20	17.37	33.00	20.86	27.80	15.21	11.40	8.31	21.60	8.25	17.00	6.44
Septiembre 2011	40.40	28.80	74.00	36.53	97.80	46.93	54.00	34.13	57.40	31.40	62.60	45.63	101.00	38.59	103.00	39.00
Octubre 2011	7.20	5.13	72.80	35.93	56.60	27.16	52.40	33.12	51.60	28.23	42.40	30.90	60.20	23.00	59.80	22.64
Pp. acumulada en lluvias	140.30	100.00	202.60		208.40	100.00	158.20	100.00	182.80	100.00	137.20	100.00	261.70	100.00	264.10	100.00
<b>Temporada de secas</b>																
Noviembre 2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Diciembre 2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Enero 2012	6.60	5.92	0.00	0.00	5.80	5.53	6.40	6.49	6.40	6.50	6.60	8.12	6.20	5.34	6.20	5.33
Febrero 2012	99.60	89.41	85.20	91.42	97.10	92.56	90.40	91.68	90.20	91.67	73.10	89.91	106.40	91.57	106.60	91.58
Marzo 2012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abril 2012	5.20	4.67	5.80	6.22	0.40	0.38	1.80	1.83	1.80	1.83	1.60	1.97	3.60	3.10	3.60	3.09
Mayo 2012	0.00	0.00	2.20	2.36	1.60	1.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pp. acumulada en secas	111.40	100.00	93.20	100.00	104.90	100.00	98.60	100.00	98.40	100.00	81.30	100.00	116.20	100.00	116.40	100.00

## Anexo 2.

Cuadro 10. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Volumen de escorrentía superficial total anual, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	4	51.19	0.0001
Error	19		
Total	23		

Cuadro 11. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Contenido volumétrico de agua a 15 cm de profundidad, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	4	3.04	0.0191
Error	153		
Total	157		

Cuadro 12. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	4	5.17	0.0006
Error	153		
Total	157		

Cuadro 13. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con sitio (pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años) y especie para el Contenido de materia orgánica.

Efecto	GL	F	Pr > F
Sitio	4	1.49	0.2078
Spp.	1	1.94	0.1656
Profundidad (Spp)	2	2.17	0.1184
Sitio*Spp	4	1.90	0.1133
Sitio*Profundidad(SPP)	8	0.89	0.5287

Cuadro 14. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con sitio (pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años) y especie para la Biomasa de raíces bajo cobertura vegetal a 15 y 30 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Sitio	4	23.46	0.00010
Spp.	1	116.22	0.00010
Profundidad (Spp)	2	25.82	0.00010
Sitio*Spp	4	2.84	0.02650
Sitio*Profundidad(SPP)	8	0.62	0.75620

Cuadro 15. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con sitio (pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años) y especie para la densidad aparente a 15 y 30 cm de profundidad.

<b>Efecto</b>	<b>GL</b>	<b>F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Sitio	4	7.77	0.0001
Spp.	1	1.75	0.1884
Profundidad (Spp)	2	16.31	0.0001
Sitio*Spp	4	1.85	0.1235
Sitio*Profundidad(SPP)	8	1.23	0.2861

Cuadro 16. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Cobertura total de la gramínea dominante, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años.

<b>Efecto</b>	<b>GL</b>	<b>F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Pastoreo	4	11.89	<.0001
Error	19		
Total	23		

Cuadro 17. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Área de Parches (PA) Volumen, considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años.

<b>Efecto</b>	<b>GL</b>	<b>F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Pastoreo	4	8.98	0.0003
Error	19		
Total	23		

Cuadro 18. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Número de parches (NP), considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años.

<b>Efecto</b>	<b>GL</b>	<b>F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Pastoreo	4	15.01	<.0001
Error	19		
Total	23		

Cuadro 19. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Índice de Áreas de Parches (PAI), considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años.

<b>Efecto</b>	<b>GL</b>	<b>F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Pastoreo	4	164.67	0.0001
Error	163		
Total	167		

Cuadro 20. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para la Longitud Media Inter parche (AIL), considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años.

<b>Efecto</b>	<b>GL</b>	<b>F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Pastoreo	4	16.07	0.0001
Error	19		
Total	23		

Cuadro 21. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Índice de Organización del Paisaje (LOI), considerando como factor de clasificación el pastoreo continuo, estacional abierto, exclusión de 30 años y exclusión de 10 años.

<b>Efecto</b>	<b>GL</b>	<b>F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Pastoreo	4	101.26	0.0001
Error	163		
Total	167		

Cuadro 22. Coeficiente de correlación y residuales de mínimos cuadrados ( $R^2$ ) entre el Volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL.

Tratamiento	Variable	Variable correlacionada	R	P	
Estacional abierto	EscTotal anual	Cobertura total	0.9121	0.0309	
		LOI	0.9121	0.0309	
	Materia orgánica 15	RaízInt 15	0.94606	0.0149	
		RaízInt 30	0.94268	0.0162	
	Cobertura total	LOI	1	0.0001	
	PA	PAI	0.99919	0.0001	
	NP	AIL	-0.92166	0.026	
Estacional bordo	Materia orgánica 15	PAI	-0.91621	0.0287	
	RaízSpp 15	RaízInt 15	-0.94835	0.014	
	RaízSpp 30	Densidad 15	0.93354	0.0204	
	Cobertura total	LOI	1	0.0001	
	NP	AIL	-0.99456	0.0005	
Continuo	EscTotal anual	RaízInt 15	0.91251	0.0307	
	Cobertura total	LOI	1	0.0001	
	PA	PAI	0.99839	0.0001	
	NP	AIL	-0.97906	0.0036	
Exclusión 30 años	EscTotal anual	Materia orgánica 30	-0.89276	0.0415	
	Materia orgánica 15	Densidad 30	0.93184	0.0211	
		AIL	-0.90279	0.0187	
		Cobertura total	-0.97349	0.0052	
	RaízSpp 30	PA	-0.93716	0.0187	
		PAI	-0.93741	0.0186	
		LOI	-0.97349	0.0052	
		Densidad 15	0.93184	0.0211	
	Cobertura total	PA	0.90423	0.0351	
		PAI	0.90394	0.0352	
		LOI	1	0.0001	
		PA	LOI	0.90423	0.0351
		AIL	-0.92255	0.0256	
		PAI	1	0.0001	
	PAI	LOI	0.90394	0.0352	
AIL		-0.92311	0.0253		
Exclusión 10 años	Materia orgánica 15	AIL	0.95657	0.0434	
	Materia orgánica 30	RaízInt 15	0.98848	0.0115	
	RaízSpp 30	Cobertura total	-0.97147	0.0285	

RaízInt 30	Densidad 15	-0.96666	0.0333
PA	PAI	0.99997	0.0001

Cuadro 23. Coeficientes y residuales cuadrados mínimos ( $R^2$ ) de la relación lineal ó múltiple entre el volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL contemplando los diferentes pastoreos a) Exclusión 30 años, b) Exclusión 10 años, c) Estacional abierto, d) Estacional con bordo y e) Continuo.

Pastoreo	Variable	Parámetro estimado	Error estándar	Suma de cuadrados	F	P
a. Exclusión 30 años	Intercepto	2.57	2.11	5.21	1.48	0.2329
	Humedad 15 cm	-0.67	0.16	63.98	18.21	0.0002
	Humedad 30 cm	0.39	0.15	25.96	7.39	0.0108
	M.O. 30	0.10	0.05	15.47	4.4	0.0445
	LOI	12.89	6.58	13.47	3.83	0.0596
b. Exclusión 10 años	Intercepto	8.02	2.65	36.87	9.18	0.0056
	Humedad 15 cm	-0.28	0.07	62.46	15.55	0.0006
	NP	-0.16	-0.15	4.61	1.15	0.2941
c. Estacional abierto	Intercepto	5.98	1.61	139.05	13.74	0.0010
	Humedad 15 cm	-0.28	0.11	62.43	6.17	0.0201
d. Estacional bordo	Intercepto	4.01	1.23	86.05	10.63	0.0030
	Humedad 15 cm	-0.17	0.07	41.08	5.08	0.0326
e. Pastoreo continuo	Intercepto	9.34	2.36	355.91	15.66	0.0004
	Humedad 30 cm	-0.75	0.25	201.68	8.88	0.0054

### Anexo 3.

Cuadro 23. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Volumen de escorrentía superficial total anual, considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, *L. phleoides* o *E. curvula*.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	1.07	0.3317
Error	8		
Total	9		

Cuadro 24. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el contenido volumétrico de agua a 15 cm de profundidad, considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, *L. phleoides* o *E. curvula*.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.00	0.9867
Error	68		
Total	69		

Cuadro 25. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad, considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, *L. phleoides* o *E. curvula*.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.05	0.8196
Error	68		
Total	69		

Cuadro 26. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (*L. phleoides* o *E. curvula*) para el Contenido de materia orgánica.

Efecto	GL	F	Pr > F
Spp.	3	1.79	0.1543
Profundidad (Spp)	4	0.24	0.9174

Cuadro 27. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (*L. phleoides* o *E. curvula*) para la Biomasa de raíces bajo vegetación dominante a 15 y 30 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Spp.	3	27.61	0.0001
Profundidad (Spp)	4	32.90	0.0001

Cuadro 28. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (*L. phleoides* o *E. curvula*) para la Biomasa de raíces en interespacio a 15 cm de profundidad

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	1.33	0.2817
Error	8		
Total	9		

Cuadro 29. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (*L. phleoides* o *E. curvula*) para la Biomasa de raíces en interespacio a 30 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	2.74	0.1364
Error	8		
Total	9		

Cuadro 30. Análisis de Varianza (ANOVA) anidado a las profundidades de 15 y 30 cm anidado con la especie (*L. phleoides* o *E. curvula*) para la densidad aparente a 15 y 30 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Spp.	3	2.49	0.0637
Profundidad (Spp)	4	13.41	0.0001

Cuadro 31. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el porcentaje de cobertura total de la gramínea dominante, considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, *L. phleoides* o *E. curvula*.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	1.90	0.2051
Error	8		
Total	9		

Cuadro 32. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Área de Parches (PA), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, *L. phleoides* o *E. curvula*.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.85	0.3828
Error	8		
Total	9		

Cuadro 33. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Número de Parches (NP), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, *L. phleoides* o *E. curvula*.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	7.00	0.0294
Error	8		
Total	9		

Cuadro 34. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para el Índice de Áreas de Parches (PAI), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, *L. phleoides* o *E. curvula*.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.01	0.9262
Error	8		
Total	9		

Cuadro 35. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para la Longitud Media Interparche (AIL), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, *L. phleoides* o *E. curvula*.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	2.90	0.1269
Error	8		
Total	9		

Cuadro 36. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para Índice de Organización del Paisaje (LOI), considerando como factor de clasificación la especie de gramínea presente, *L. phleoides* o *E. curvula*.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.61	0.4573
Error	8		
Total	9		

Cuadro 37. Coeficiente de correlación y residuales de mínimos cuadrados ( $R^2$ ) entre el Volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL.

Tratamiento	Variable	Variable correlacionada	R	P	
Nativa	Materia orgánica 15	AIL	-0.96147	0.009	
	Materia orgánica 30	Densidad 30	-0.96121	0.0091	
	RaízInt 30	Densidad 15	0.92674	0.0235	
Exótica	Materia orgánica 30	NP	-0.98876	0.0014	
		RaízSpp 15	RaízSpp 30	0.94519	0.0153
			Cobertura total	0.89896	0.038
	PA		0.93908	0.0179	
	RaízSpp 30	PAI	0.93888	0.018	
		LOI	0.89688	0.0391	
		Cobertura total	Cobertura total	0.97144	0.0058
			PA	0.99102	0.001
	PAI		0.99105	0.001	
	PA	LOI	0.97139	0.0058	
		PAI	PA	0.98655	0.0019
			PAI	0.98655	0.0019
			LOI	0.99998	0.0001
	NP	PAI	1	0.0001	
	PAI	LOI	0.98631	0.0019	
PAI	LOI	0.98633	0.0019		

Cuadro 38. Coeficientes y residuales cuadrados mínimos ( $R^2$ ) de la relación lineal ó múltiple entre el volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL contemplando a) especie nativa (*L. phleoides*) y b) especie exótica (*E. curvula*).

Pastoreo	Variable	Parámetro estimado	Error estándar	Suma de cuadrados	F	P
Especie nativa	Intercepto	1.37	0.86	3.85	2.57	0.1187
	Humedad 15 cm	-0.07	0.03	7.25	4.84	0.0352
	RaizInt30	27.38	20.21	2.75	1.84	0.1850
Especie exótica	Intercepto	1.19	0.51	1.95	5.57	0.0245
	Humedad 15 cm	-0.12	0.02	8.87	25.32	0.0001
	RaizInt15	22.89	9.71	1.95	5.56	0.0247

#### Anexo 4.

Cuadro 39. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (*B. gracilis* o *M. rigida*) sobre el Volumen de escorrentía superficial anual.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.020	0.6611
SubTto	1	14.29	0.0009
Pastorep*SubTto	1	0.04	0.8502
Spp. (SubTto)	2	2.11	0.1434
Pastoreo*Spp(SubTto)	2	0.79	0.4664

Cuadro 40. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (*B. gracilis* o *M. rigida*) sobre el c Contenido volumétrico de agua a 15 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.09	0.7670
SubTto	1	4.48	0.0353
Pastoreo*SubTto	1	0.00	0.9636

Cuadro 41. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (*B. gracilis* o *M. rigida*) sobre el contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.06	0.8034
SubTto	1	12.87	0.0004

Cuadro 42. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre el Contenido de materia orgánica.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	3.92	0.0488
SubTto	1	1.28	0.2593
Pastorep*SubTto	1	0.30	0.5858
Spp. (SubTto)	4	1.04	0.3874
Spp.*Profundidad(SubTto)	6	0.56	0.7617
Pastoreo*Spp.(SubTto)	10	0.73	0.6967

Cuadro 43. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre la biomasa de raíces bajo vegetación dominante a 15 y 30 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.09	0.7592
SubTto	1	0.25	0.6199
Pastorep*SubTtto	1	1.08	0.3000
Spp(SubTto)	4	76.79	0.0001
Spp*Profundidad(SubTto)	6	39.89	0.0001
Pastoreo*Spp(SubTto)	10	0.66	0.7621

Cuadro 44. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre la Biomasa de raíces en interespacio a 15 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.32	0.5744
SubTto	1	2.42	0.1307
Pastoreo*SubTto	1	0.73	0.3986

Cuadro 45. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre la Biomasa de raíces en interespacio a 30 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.57	0.4553
SubTto	1	0.02	0.8789
Pastoreo*SubTto	1	0.72	0.4035

Cuadro 46. ANOVA anidado con las profundidades de 15 y 30 cm, anidado en especie y fuego sobre la densidad aparente a 15 y 30 cm de profundidad.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.85	0.3562
SubTto	1	3.33	0.0693
Pastorep*SubTtto	1	12.32	0.0005
Spp(SubTto)	4	2.01	0.0931
Spp*Profundidad(SubTto)	6	4.02	0.0007
Pastoreo*Spp(SubTto)	10	1.63	0.0973

Cuadro 47. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (*B. gracilis* o *M. rigida*) sobre el porcentaje de Cobertura total de la gramínea dominante.

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	1.94	0.1746
SubTto	1	7.15	0.0124
Pastoreo*SubTto	1	0.13	0.7208

Cuadro 48. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (*B. gracilis* o *M. rigida*) sobre el Área de Parches (PA).

Efecto	GL	F	Pr > F
Modelo	7	4.30	0.0033
Tratamiento	7	4.30	0.0033
Error	24		
Total	31		

Cuadro 49. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (*B. gracilis* o *M. rigida*) sobre el Número de parches (NP)

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.81	0.3755
SubTto	1	0.96	0.3360
Pastoreo*SubTto	1	0.44	0.5111

Cuadro 50. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (*B. gracilis* o *M. rigida*) sobre el Índice de Áreas de Parches (PAI).

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	0.28	0.6002
SubTto	1	11.44	0.0025
Pastorep*SubTtto	1	0.03	0.8677
Spp(SubTto)	2	1.36	0.2766
Pasto*Spp(Subtto)	2	0.46	0.6383

Cuadro 51. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (*B. gracilis* o *M. rigida*) sobre la Longitud Media Interparche (AIL).

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	2.55	0.1230
SubTto	1	0.78	0.3866
Pastorep*SubTtto	1	0.00	0.9888
Spp(SubTto)	2	9.14	0.0011
Pasto*Spp(Subtto)	2	0.39	0.6827

Cuadro 52. ANOVA diseño factorial de tres factores: pastoreo (rotacional o continuo), manejo de fuego (presencia o ausencia de quemas) y especie de gramínea (*B. gracilis* o *M. rigida*) sobre el Índice de Organización del Paisaje (LOI).

Efecto	GL	F	Pr > F
Pastoreo	1	1.98	0.1720
SubTto	1	7.31	0.0124
Pastorep*SubTtto	1	0.13	0.7186
Spp(SubTto)	2	1.18	0.3250
Pasto*Spp(Subtto)	2	1.13	0.3407

Cuadro 53. Coeficiente de correlación y residuales de mínimos cuadrados ( $R^2$ ) entre el Volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL.

Tratamiento	Variable	Variable correlacionada	$R^2$	P	
PcSf Bogr	Densidad 30	NP	0.95611	0.0439	
	Cobertura total	LOI	1	0.0001	
		AIL	-0.99032	0.0097	
		LOI	-0.99033	0.0097	
PcSf Muri	EscTotal anual	PA	0.95218	0.0478	
		PAI	0.95361	0.0464	
	Materia orgánica 15	Densidad 15	-0.99294	0.0071	
		Densidad 30	-0.99156	0.0084	
	RaízSpp 30	Cobertura total	-0.97403	0.026	
		LOI	-0.97403	0.026	
	Densidad 15	Densidad 30	0.99864	0.0014	
		AIL	-0.9637	0.0363	
	Densidad 30	AIL	-0.97007	0.0299	
	Cobertura total	LOI	1	0.0001	
	PA	PAI	0.99996	0.0001	
	Materia orgánica 15	Densidad 30	-0.9992	0.0008	
	Materia orgánica 30	Densidad 15	RaízSpp 30	0.95211	0.0479
			Cobertura total	-0.96501	0.0349
RaízSpp 15		NP	-0.99243	0.0076	
		LOI	-0.96507	0.0349	
		AIL	0.9768	0.0232	
RaízSpp 30		NP	-0.97827	0.0217	
	AIL	0.99316	0.00068		
PcCf Bogr	Cobertura total	LOI	1	0.0001	
	PA	PAI	1	0.0001	
	NP	AIL	-0.99514	0.0049	
	PcCf Muri	Materia orgánica 15	Materia orgánica 30	0.96523	0.0348

		Densidad 30	-0.95802	0.042	
		Cobertura total	0.95334	0.0467	
		LOI	0.95334	0.0467	
		Densidad 30	-0.9589	0.0411	
	Materia orgánica 30	Cobertura total	0.98876	0.0112	
		LOI	0.98876	0.0112	
	RaízSpp 30	PA	0.96226	0.0377	
		PAI	0.96046	0.0395	
	Cobertura total	LOI	1	0.0001	
	PA	PAI	0.99994	0.0001	
	Materia orgánica 15	RaízSpp 15	0.96989	0.0301	
	Materia orgánica 30	RaízSpp 15	0.99656	0.0034	
		Densidad 15	-0.99224	0.0078	
	RaízSpp 15	Densidad 15	-0.97932	0.0207	
		PA	0.98629	0.0137	
	Cobertura total	PAI	0.98638	0.0136	
		LOI	1	0.0001	
	PA	PAI	1	0.0001	
		LOI	0.98629	0.0137	
	PAI	LOI	0.98638	0.0136	
	Materia orgánica 30	Densidad 15	-0.9935	0.0065	
		RaízInt 30	0.95964	0.0404	
	Cobertura total	LOI	1	0.0001	
	PA	PAI	0.99999	0.0001	
		Materia orgánica 30	0.99665	0.0055	
	Materia orgánica 15	RaízSpp 15	0.99449	0.0292	
		Densidad 15	-0.97081	0.0034	
	Materia orgánica 30	RaízSpp 15	0.99958	0.0004	
		Densidad 15	-0.95115	0.0488	
	Cobertura total	LOI	1	0.0001	
	PA	PAI	0.99999	0.0001	
	PrCf Muri	EscTotal anual	Materia orgánica 15	0.96434	0.0357

	Materia orgánica 30	-0.969	0.031
	Densidad 15	-0.99453	0.0055
Materia orgánica 30	Densidad 15	-0.96548	0.0345
RaízSpp 30	Densidad 15	-0.98109	0.018
RaízInt 15	AIL	-0.9816	0.0184
	PA	-0.96747	0.0325
RaízInt 30	NP	0.99484	0.0052
	PAI	-0.96168	0.0383
Cobertura total	LOI	1	0.0001
PA	NP	-0.97038	0.0296
	PAI	0.99974	0.0003
NP	PAI	-0.9658	0.0342

Cuadro 54. Coeficientes y residuales cuadrados mínimos ( $R^2$ ) de la relación lineal ó múltiple entre el volumen de escorrentía superficial y Biomasa de raíces bajo planta a 15 cm, Biomasa de raíces bajo planta a 30 cm, Densidad aparente a 15 cm, Densidad aparente a 30 cm, Contenido de materia orgánica a 15 cm, Contenido de materia orgánica a 30 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 15 cm, Biomasa de raíces en interespacios a 30 cm, Cobertura total, NO, AP, PAI, LOI y AIL contemplando los diferentes tratamientos de la interacción pastoreo-quema-especie a) Pastoreo continuo sin fuego con *B. gracilis*, b) Pastoreo continuo sin fuego con *M. rigida*, c) Pastoreo continuo con fuego con *B. gracilis*, d) Pastoreo continuo con fuego con *M. rigida*, e) Pastoreo rotacional sin fuego con *B. gracilis*, f) Pastoreo rotacional sin fuego con *M. rigida*, g) Pastoreo rotacional con fuego con *B. gracilis* y h) Pastoreo rotacional con fuego con *M. rigida*.

Pastoreo	Variable	Parámetro estimado	Error estándar	Suma de cuadrados	F	P
a. PcSf Bogr	Intercepto	4.04	1.10	26.30	13.47	0.0016
	Humedad 30 cm	-0.20	0.07	17.29	8.86	0.0078
	RaizSpp30	-6.87	5.56	2.98	1.52	0.2321
b. PcSf Muri	Intercepto	0.32	1.64	0.04	0.04	0.8487
	Humedad 30 cm	-0.18	0.04	20.49	21.17	0.0001
	M.O. 30 cm	0.61	0.33	3.28	3.39	0.0780
c. PcCf Bogr	Intercepto	3.96	1.15	52.48	11.9	0.0019
	Humedad 15 cm	-0.20	0.07	31.38	7.11	0.0130
d. PcCf Muri	Intercepto	4.64	1.35	76.56	11.87	0.0020
	Humedad 15 cm	-0.22	0.08	48.09	7.45	0.0112
e. PrSf Bogr	Intercepto	-1.70	2.20	0.48	0.6	0.0088
	Humedad 30 cm	-0.13	0.04	10.80	13.48	0.4480
	RaizInt30	-12.35	10.31	1.15	1.44	0.0012
f. PrSf Muri	NP	0.23	12.93	2.52	3.15	0.2426
	Intercepto	2.36	0.52	16.41	20.28	0.0001
	Humedad 15 cm	-0.11	0.03	14.68	18.14	0.0003
g. PrCf Bogr	RaizInt30	9.93	8.28	1.16	1.44	0.2419
	Intercepto	3.29	0.75	38.38	19.2	0.0002
	Humedad 30 cm	-0.21	0.06	23.62	11.81	0.0020
h. PrCf Muri	Intercepto	6.48	1.96	24.27	10.88	0.003
	Humedad 30 cm	-0.16	0.06	16.16	7.24	0.0128
	AP	-10.21	5.01	9.28	4.16	0.0526