



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

Título de la tesis

**Evaluación de Sistema Hidrológico Keyline, en paisaje ganadero, de zona árida
municipio, Nombre de Dios del Estado de Durango, México.**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de
Posgrado como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

en

Agroforestería y Agricultura Sostenible

Manuel de Jesus Velasquez Melgar

Turrialba – Costa Rica

Septiembre, 2020

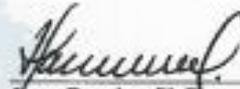
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA Y
AGRICULTURA SOSTENIBLE**

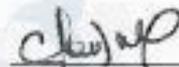
FIRMANTES:



Muhammad Ibrahim, Ph.D.
Director de tesis



Jorge Faustino, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Clara Sepúlveda, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Ma. del Carmen Ponce, Dra.
Miembro Comité Consejero



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Decano, Escuela de Posgrado



Manuel de Jesús Vejasquez Melgar
Candidato

DEDICATORIA

A mi padre, Manuel Velásquez, por ser esa persona a la cual tengo mucho respeto, admiración, aprecio, quien me mostró el camino del bien, y me enseñó que en la vida a pesar de las adversidades se debe continuar buscando una y otra vez el camino al éxito.

A mi madre Edith Esmeralda Melgar quien me mostro el amor a Dios por sobre todas las cosas, también me enseñó que en la vida se debe ser humilde, agradecido, responsable, es y será esa fuente de inspiración y fortaleza en mi vida.

Dedico este logro a ustedes que son los maravillosos padres que Dios me regaló.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, salud, sabiduría necesaria para lograr mi estudio de posgrado.

A mi familia, a mis padres, Manuel Velásquez y Edith Esmeralda Melgar por ese apoyo incondicional y por mostrarme el camino correcto hacia el éxito.

A mis Consejeros de Tesis Ph.D Muhammad Ibrahim, Dr. Jorge Faustino y M.Sc. Claudia Sepúlveda por su valioso tiempo, dedicación, paciencia y por su apoyo para el desarrollo de esta investigación, ya que sin ustedes no hubiera sido posible.

A la Dra. Carmen Ponce, asesora externa, por sus valiosos consejos, paciencia, dedicación y apoyo incondicional durante la investigación.

A los profesores de estadística Eduardo Corrales y Fernando Cassanoves por compartir ese conocimiento y experiencia.

A los investigadores de la Universidad Juárez del Estado de Durango, a la Dra. Maribel Martínez rectora de la facultad de Veterinaria, Dr. Oscar Carrete, Dr. Fernando Sánchez, Dra. Fanny Reveles por su apoyo recibido durante la fase de campo.

Al programa de financiamiento de Honduras becas 20/20 y al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, gracias por su invaluable aporte.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza por brindarme la oportunidad de cursar la maestría, a sus profesores por todo el conocimiento adquirido y a todo el personal de la institución con quien tengo recuerdos gratos.

BIOGRAFÍA

El autor nació en Honduras el 17 de octubre de 1990. Se graduó en la Universidad Nacional de Agricultura y Ganadería en Catacamas, Olancho, Honduras, de Ingeniero Agrónomo, con énfasis en agricultura sostenible. Cuenta con conocimientos en temas relacionados a microbiología de suelos, materia orgánica del suelo, mineralización de los suelos, diseño y planificación de fincas y ganadería sostenible. Trabajó como técnico extensionista para la producción agrícola sostenible en la empresa privada COMSA. Después de adquirir experiencia profesional, decidió ingresar al programa de Maestría en Agroforestería y Agricultura Sostenible en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE en el 2019, obteniendo su título en el 2020.

ÍNDICE

4.ARTÍCULO 1. Evaluación de sistema hidrológico Keyline, en paisaje ganadero, de zona árida identificando los tipos de coberturas y sus beneficios.	X
4.2 INTRODUCCIÓN.....	1
4.3 METODOLOGÍA.....	3
4.3.1 Área de estudio.....	3
4.3.2 Datos agroclimáticos del área de estudio.....	4
4.3.4 Identificación de especies de cobertura en la finca.	7
4.3.5 Medición de la cobertura aérea biomasa y carbono por hectárea	8
4.3.6 Medición de cobertura (forraje kg/ha)	9
4.3.7 Evapotranspiración de las plantas.	9
4.4 Diseño experimental para la toma de datos en campo.	10
5. RESULTADOS	11
5.1 Captación de agua de lluvia y escorrentías:	11
5.2 Identificación y medición de especies de coberturas en el área de estudio.	11
5.2.1 Asociación de coberturas del suelo, en los tratamientos Keyline, Arado Yeomans y Testigo.....	13
5.3 Medición de la cobertura aérea biomasa y carbono por hectárea.	16
5.4 Variable producción de forrajes.....	18
5.5 Evapotranspiración potencial de plantas.....	19
6. DISCUSIÓN.....	20
7. CONCLUSIONES.....	23
8. BIBLIOGRAFÍA.....	24
ANEXOS.....	29

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio Ejido La Parrilla, Municipio, Nombre de Dios del Estado de Durango, México.	3
Figura 2. Datos mensuales históricos de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, de estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio.....	4
Figura 3. Datos comparativos de precipitación mm & evapotranspiración potencial mm mostrando un déficit hídrico en el área de estudio.	5
Figura 4. Croquis del área de estudio, área de captación de agua lluvia y diseño hidrológico Keyline con sus componentes.	7

Figura 5. Línea de Canfield, método de muestreo para identificación de coberturas herbáceas del suelo.	8
Figura 6. Biplot construido usando los componentes principales, representando la asociación de las coberturas del suelo según las especies y los puntos representando las repeticiones de cada tratamiento.....	12
Figura 7. Biplots construidos usando los componentes principales, representando la asociación de las coberturas del suelo según las especies, representando las repeticiones de cada tratamiento.	13
Figura 8. Biplot construido usando los componentes principales, representando la asociación de la composición de especies de cobertura herbáceas del suelo por tratamiento.	14
Figura 9. Grafica de índice de diversidad de especies herbáceas de coberturas del suelo representando los cálculos de riqueza, Shannon, Simpson por tratamiento evaluado. ..	14
Figura 10. Medición de la cobertura arbustiva aérea de biomasa y carbono ton/ha por tratamiento en el área de estudio.	17
Figura 11. Gráfica de medias de producción de forraje (kilogramos de materia seca /hectárea).	18
Figura 12. Grafica cálculo de evapotranspiración potencial mm/día en el área de estudio.	19
Figura 13. Diagrama de las interacciones y servicios ecosistémicos, vinculados al sistema hidrológico Keyline.	22

Índice de cuadros

Cuadro 1. Datos de escurrimiento como % de precipitación anual (Y), para el cálculo de captación de agua lluvia.	6
Cuadro 2. Cálculo de índice de diversidad de especies, riqueza, Shannon y Simpson en los tratamientos evaluados.....	15

Índice de Anexos

Anexo 1. Resumen de investigación.

Anexo 2. Datos medición de cobertura aérea biomasa total y carbono kg/ha.

Anexo 3. Composición florística de coberturas del área de estudio.

Anexo 4. Diseño hidrológico para la cosecha de agua superficial y suelo (Keyline).

Anexo 5. Punto de inflexión, canales de desviación infiltración.

LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

EC- Ecurrimiento de Captación

ECC-Ecurrimiento de Captación Camino

BT-Biomasa Total Aérea

CC- Concentracion de Carbono

KgMS/Ha-Kilogramos de Materia Seca por Hectárea

ETO- Evapotranspiración Potencial

CONAGUA-Comisión Nacional del Agua

UJED- Universidad Juárez del Estado de Durango

CATIE- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

4. ARTÍCULO 1. Evaluación de sistema hidrológico Keyline, en paisaje ganadero, de zona árida identificando los tipos de coberturas y sus beneficios.

Velasquez-Manuel¹; Ibrahim-Muhammad²; Faustino-Jorge³; Ponce-Carmen⁴; Sepúlveda-Claudia⁴

RESUMEN

Se evaluó un sistema hidrológico Keyline para la cosecha de agua y suelo en una región árida con precipitación limitada, en la cual se analizó la diversidad de especies mediante la utilización de análisis de varianza aplicando modelos lineales generales, utilizando cálculos de índice de Shannon e índice de Simpson, calculadas a partir de la frecuencia de cobertura de las especies encontradas. La especie *Hilaria cenchroides* presentó un porcentaje de cobertura del 36.33% de acuerdo con la metodología líneas de Canfield, la segunda especie con mayor porcentaje de cobertura fue la *Bourtelova gracilis* con un 30.81%, ambas especies de excelente preferencia forrajera para el ganado bovino. Se realizó la medición de la biomasa aérea del sistema de matorral primario en la cual la especie *Juniperus Angosturana* presentó una biomasa de 8.56 ton/ha, la especie *Rhus virens* 7.46 ton/ha y la especie *Forestiera duranguensis* presentó 2.18 ton/ha. En cuanto a la producción de los forrajes el tratamiento de arado yeomans, se determinó una media de 376,67 kg materia seca/ ha⁻¹ y keyline 343,33 kg materia seca /ha⁻¹, mostrando medias diferentes al testigo con 168 kg materia seca ha⁻¹. Los valores en cuanto a la evapotranspiración potencial para los meses de mayo a junio presentan una ETo de 7.9 y 7.7 mm/día, al ser la época de primavera en la que se observa mayor pérdida de agua a través de los estomas de las plantas.

La riqueza de especies y producción de forraje están vinculados al manejo del suelo con arado yeomans. El sistema hidrológico Keyline muestra beneficios para el mejoramiento de las zonas áridas, las cuales son regiones con problemas de escasez de agua, por consiguiente este sistema es una alternativa viable para la adaptación al cambio climático y mejoramiento de paisajes ganaderos.

Palabras clave: sistema hidrológico Keyline, arado Yeomans, biomasa, carbono evapotranspiración, servicios ecosistémicos.

4.2 INTRODUCCIÓN

El agua y suelo son recursos naturales importantes, los cuales deben aprovecharse de manera racional, ya que son fundamentales para la sobrevivencia de los seres humanos. De igual forma, son claves para la agroforestería, actividad necesaria en el desarrollo ambiental económico y social de la población. Actualmente, más de un tercio de la población global habita en regiones áridas, aproximadamente el 35% de la superficie terrestre, por lo tanto desarrollar una gestión adecuada de los suelos, como la reforestación y la restauración hidrológica puede generar cambios en los medios de vida, así como en la seguridad hídrica y alimentaria (Tobella, 2014) (Ilstedt *et al.* 2016).

En México, de las 198 millones hectáreas (ha) que conforman la superficie territorial, 22 millones se dedican a la agricultura. De esta superficie, 6.3 millones cuentan con infraestructura de riego y los otros 16 millones corresponden a agricultura de temporal, dicha producción es influenciada directamente por la presencia o ausencia de las lluvias. Más de la mitad del territorio nacional presenta condiciones áridas y semiáridas, y en gran parte de estas áreas se practica la agricultura de temporal. (Cortes y Ramirez 2013).

Las zonas áridas se caracterizan por ser ambientes en donde la pérdida de agua por evaporación es mucho mayor a la entrada por la precipitación, las temperaturas son extremas y la disponibilidad de nutrientes es baja (Montaño *et al.* 2016). En el estado de Durango, por ejemplo, la problemática de sequía afecta considerablemente a la población, limitando la producción agropecuaria y ganadera. Las oportunidades de mejoras en el sector ganadero y agrícola son más evidentes, las precipitaciones son bajas, acompañadas de la migración del campo a la ciudad, esto trae como consecuencia precariedad para el productor, la cual se ve reflejada en los ingresos económicos de las familias.

Las condiciones agroclimáticas indican lo vulnerable que son los productores ganaderos, agricultores y actores relacionados con el desarrollo regional/rural, cuando no se tiene acceso a herramientas básicas que permiten diversificar las formas de producción (Van der Zee *et al.* 2012). Debido al entorno social, económico y productivo se considera el agua como un bien natural imprescindible para el desarrollo de cualquier actividad agrícola, forestal o ganadera, como también para cualquier comunidad. Su almacenamiento es determinante y su control importante para mantener los medios de vida (ecosistemas naturales) de un terreno, región o país (Gras 2009).

Las geformas naturales, la topografía y su influencia sobre el movimiento del agua también son comprendidos fácilmente por agricultores y campesinos, quienes ancestralmente han aprovechado los múltiples beneficios del manejo del agua y suelo. (Collins y Doherty 2009). Los sistemas ganaderos, por ejemplo, presentan desafíos y oportunidades que requieren de habilidades con respecto a la toma de decisiones, acompañado de estrategias para su adaptación (Marshall 2010, Nardone y Col 2010), ya

que es uno de los rubros agrícolas afectado por el cambio climático debido a la baja producción de pastos y forrajes en épocas críticas de sequías.

De acuerdo con el IPCC¹ (2014), las proyecciones climáticas indican aumentos en la temperatura en toda América Latina para el 2100 (nivel de confianza medio) en una serie de escenarios de emisiones medias y altas (RCP 4,5 y 8,5). El cambio climático global es responsable por el aumento del nivel del mar, el retroceso de glaciares, sequías y degradación de la tierra (Hernández, 2010), incrementando la frecuencia de las inundaciones costeras. Asimismo, impactará de manera definitiva la disponibilidad en los recursos hídricos (Austria y Patiño 2012). Las afectaciones del calentamiento global en los recursos hídricos ocurren también por el impacto en la tecnología hidráulica, por lo tanto posibilita actualmente que se lleven a cabo los distintos procesos hidroenergéticos necesarios para el desarrollo del ciclo metabólico, la gestión, administración y manejo del agua de uso agrícola y otras actividades (Luna 2015).

La implementación de manejo de cosecha de agua y suelo con sistema hidrológico Keyline en fincas ganaderas, complementado con sistemas silvopastoriles supone un modelo muy eficiente. Estos sistemas promueven un mejor aprovechamiento de áreas de cultivo, aumentando la biodiversidad, evitando la erosión de los suelos y recuperando su fertilidad. Además, mejoran la producción de pastos en épocas críticas de sequías e implican un incremento de captura de carbono, y producción de biomasa área (Ibrahim *et al.* 2007). Por lo tanto, alternativas como el manejo de agua en fincas ganaderas con el propósito de restaurar y habilitar ecosistemas degradados puede ser una estrategia sostenible y exitosa (Temmerman *et al.* 2013) (Laughlin 2014) (Nel *et al.* 2014) al brindar sistemas de producción más justos sostenibles, amigables y socialmente responsables.

¹ Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Cambio Climático 2014

Impactos, adaptación y vulnerabilidad.

Contribución del grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

4.3 METODOLOGÍA

4.3.1 Área de estudio.

El área de estudio de esta investigación está ubicada Finca la Agüita en San José de la Parrilla, comunidad perteneciente al ejido del Municipio Nombre de Dios. Se ubica en la latitud 23.738068 N y longitud 104.124939 O, al suroeste del Estado de Durango² y se encuentra a 2,129 m.s.n.m. La vegetación dominante es bosque bajo abierto y vegetación secundaria arbustiva con presencia de pastizales naturales. Su temperatura media anual es de 17 °C, con una precipitación pluvial media anual que alcanza los 511 mm (datos CONAGUA). Posee un clima semiseco templado con lluvias en verano y se encuentran las cuatro estaciones del año bien definidas.

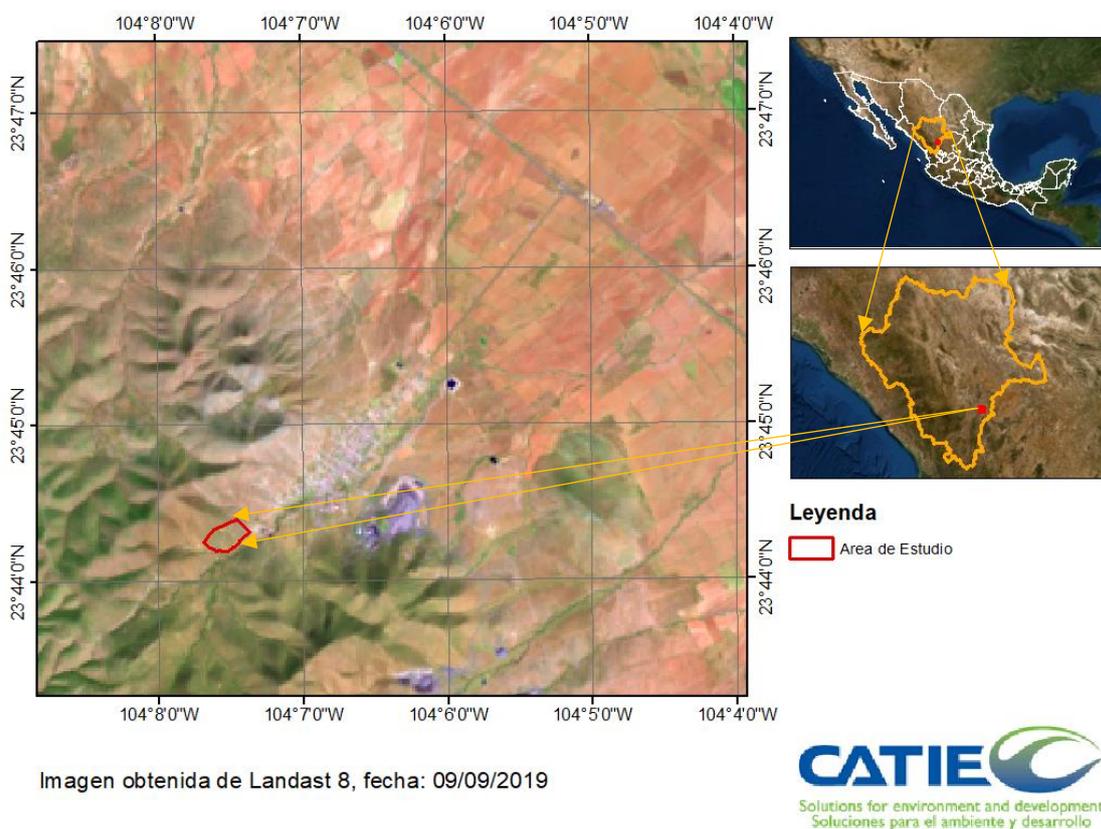


Figura 1. Ubicación del área de estudio Ejido La Parrilla, Municipio Nombre de Dios del Estado de Durango, México.

² Está ubicado en la región noroeste del país, limitando al norte con Chihuahua, al noreste con Coahuila, al sureste con Zacatecas, al sur con Nayarit y al oeste con Sinaloa. Con 123,451 km² es el cuarto estado más extenso de México.

4.3.2 Datos agroclimáticos del área de estudio.

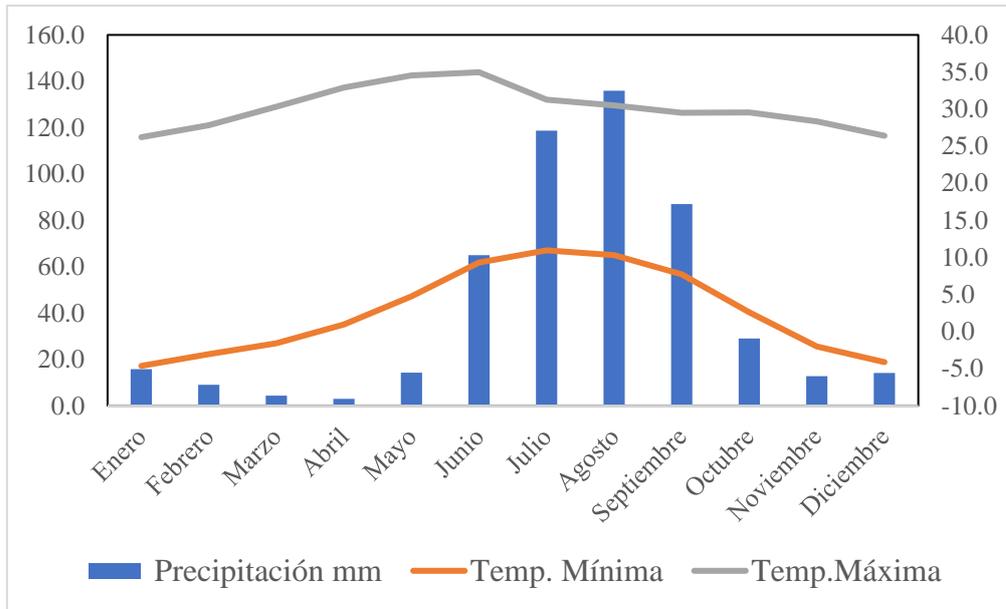


Figura 2. Datos mensuales históricos de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y de estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio.

Es importante mencionar, con referencia a los datos meteorológicos históricos de la zona, (ver figura 2) que en los meses de noviembre a abril las lluvias son mínimas, debido a la presencia de estaciones de otoño del 21 de septiembre al 21 de diciembre, y el invierno del 21 de diciembre al 21 de marzo. En dichos meses, con temperaturas bajas (frío), la precipitación llega a su pico más alto en los meses de junio a septiembre, en la estación de verano respectivamente. Cabe destacar que esta es una región semiárida, perteneciente al desierto de Chihuahua, el cual se extiende del Sur de Estados Unidos y el Norte de México.

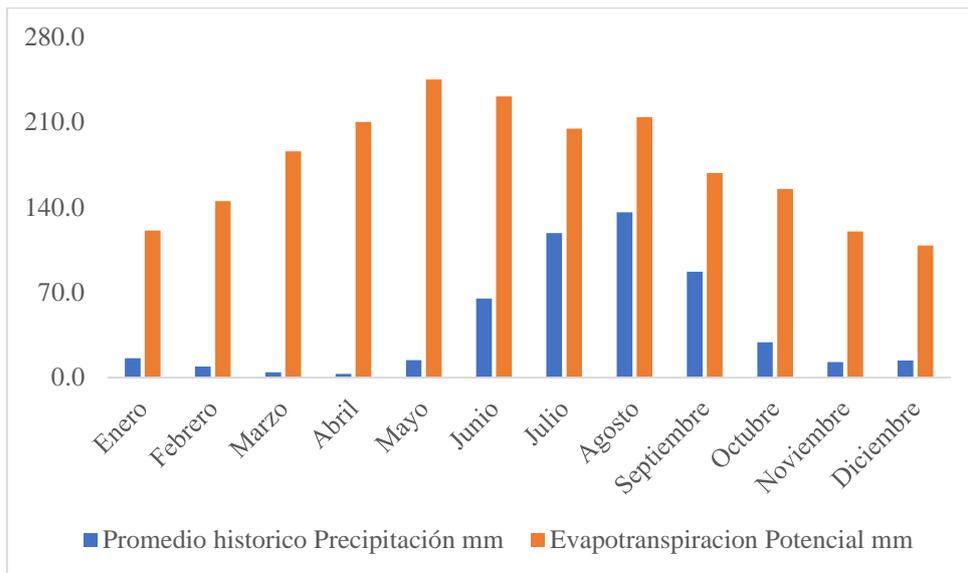


Figura 3. Datos comparativos de precipitación mm & evapotranspiración potencial mm mostrando un déficit hídrico en el área de estudio.

4.3.3 Estimación de agua de lluvia disponible.

Se encuentra instalado un sistema hidrológico Keyline para la cosecha de agua y suelo en una finca ganadera. Se realiza el análisis de aprovechamiento de escorrentías, tomando en cuenta los parteaguas, canales caminos de conducción de agua en Keyline, y el reservorio. Para calcular su volumen se utilizan la fórmula de Esgurrimento de Captación (EC) (Grass 2009):

Esgurrimento de Captación= EC

$$EC = 100 \times A \times P \times Y$$

A = Área de captación en hectáreas,

P = Precipitación Pluvial anual en mms,

Y = Esgurrimento expresado en %

(Porcentaje) de precipitación anual (ver cuadro 1)

Cuadro 1.

Datos de Escurrimiento como % de precipitación anual (Y), para el cálculo de captación de agua lluvia.

Precipitación Anual (P)(mm)>1100	Evaporación Anual Total	Confiabilidad **	Escurrimiento como % de precipitación anual (Y)			
			(%) Suelos arenosos superficial es o limo arcillosos	(%) Suelos arenos arcillosos	(%) Suelos Arcillosos o elásticos	(%) Suelo arcilloso inelásticos polvosos
1,100 901 a 1100		8	10--15	10--15	15--20	15--25
		9	6.5-10	6.5-10	10--13	10-16.5
		8	10-12.5	10--15	12.5-20	15-20
		9	6.5-8	6.5-10	8--13	10--13
501 a 900	Menos de 1,300	8	7.5-10	7.5-15	7.5-15	10--15
		9	5-8.5	5--10	5--10	6.5-10
	1,300 a 1,500	8	5-7.5	6-12.5	6--10	10--15
		9	3--5	3--8	3-8.5	6.5--10
401 a 500	1,500 a 1,800	8	2.5-5	6--10	2.5-5.7	7.5-12.5
		9	1.5-3	3-8.5	1.5-3	5--8
250 a 400	Menos de 1,800	8	0-2.5	0-5	0-2.5	2.5-7.5
		9	0-1.5	0-3	0-1.5	1.5-5
	Más de 1,800	8	0	0-2.5	0	2.5-5
		9	0	1-1.5	0	1.5-3

Fuente: www.mashumus.com. (Gras, 2009)

**La confiabilidad está expresada en años. Cuando los suelos arcilloso-elásticos están secos, se resquebrajan en la superficie, reduciendo el escurrimiento. Cuando los suelos arcilloso-inelásticos están secos, se transforman en suelos de polvo muy fino que cubre toda la superficie, este polvo previene la infiltración, lo cual incrementa el escurrimiento.

Para esquemas de irrigación, una confiabilidad de ocho a diez años es aceptable. Para esquemas de uso doméstico y abrevaderos, la confiabilidad debe ser mayor de 10 años.

Los canales caminos son de doble propósito, además de conducir vehículos actúan como áreas de captación y conducción de agua de lluvia.

Para calcular se utiliza la siguiente fórmula:

Escurrimiento de Captación Camino = ECC = L x A x P x 0.9 L = largo

A = Ancho

P = Precipitación Pluvial anual en mm 0.9 equivale al 90% de escorrentías, las cuales fluyen en caminos de tierra compactada.

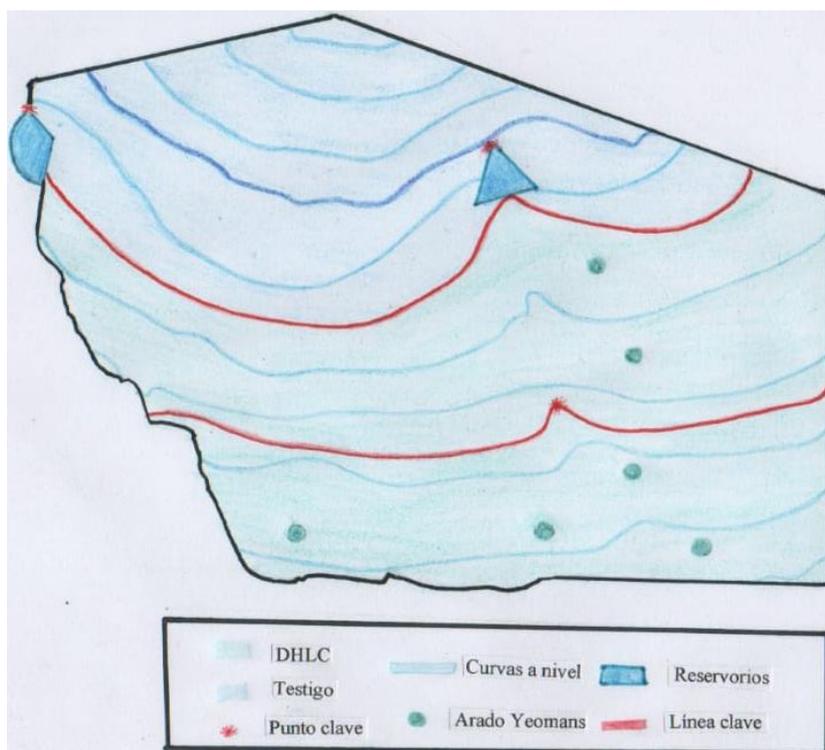


Figura 4 Croquis del área de estudio, área de captación de agua lluvia y diseño hidrológico Keyline con sus componentes.

4.3.4 Cobertura vegetal.

4.3.4.1 Identificación de especies de cobertura herbácea.

Con el fin de conocer las especies presentes y la cobertura de ellas sobre el suelo, se evaluaron los tratamientos Arado Yeomans, Keyline y Testigo. Para ello, se utilizó el procedimiento de líneas Canfield, considerando 6 líneas de 3 m de longitud por tratamiento, obteniendo 18 líneas en total, distribuidas por estratos, tratando de cubrir todas las condiciones del sitio con relación a la altitud, exposición y pendiente.

Este procedimiento consistió en instalar una cinta en el suelo y medir la porción de cada planta interceptada con una regla milimétrica, para determinar la superficie cubierta por la planta de ambos lados de la línea (ver figura 4). Para hierbas de un solo tallo en contacto con la línea, se medirá el diámetro de este a nivel del suelo y para gramíneas amacolladas o hierbas con hojas, se medirá la longitud de la capa o de las hojas basales interceptadas por la línea a nivel del suelo.

La longitud mínima considerada será de 0.5 cm, de manera tal que a cualquier longitud menor se le asignará este valor. Las especies se denominarán por su nombre común y se identificarán por su nombre científico, al igual que la vegetación (Contreras *et al.* 2003).

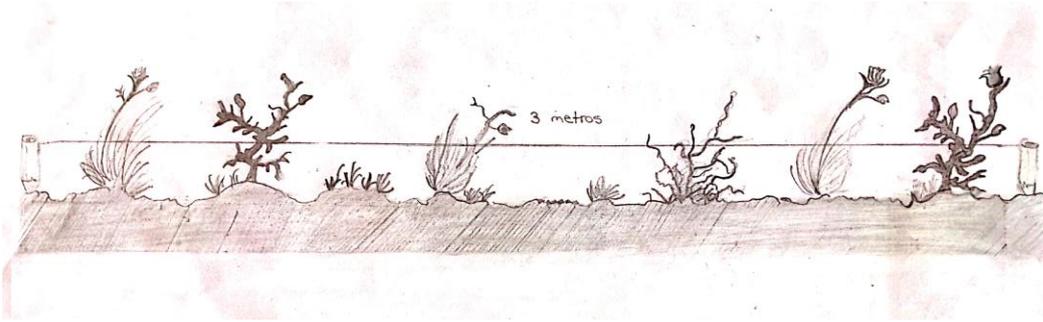


Figura 5. Línea de Canfield, método de muestreo para identificación de coberturas herbáceas del suelo.

4.3.4. Medición de la cobertura arbustiva aérea biomasa y carbono total por hectárea.

El área de estudio para este análisis es un matorral primario, en el cual no se realiza aprovechamiento de las especies, ya que cuenta con una variedad limitada en la cual se observan especies muertas y caídas de forma natural.

Para la estimación del contenido de carbono se utilizó un diseño de muestro sistemático. En el área de estudio, se utilizaron tres sitios de muestreo rectangulares de 1000 m² (50m×20m). En cada sitio de muestreo se midieron todos los arbustos mayores a 10 cm de diámetro. Las mediciones dasométricas realizadas son altura total y diámetro basal.

Por su parte, el contenido de carbono se obtuvo de la relación de la biomasa aérea por la concentración de carbono de las especies arbustivas:

$$\text{Contenido de Carbono} = \text{BT} * \text{CC}$$

Donde:

BT = biomasa total aérea kg/planta (diámetro basal cm × altura total cm)

CC = Concentración de carbono (%)

Para la determinación de la biomasa aérea de las especies arbustivas se utilizó una ecuación alométrica local tomada citado por Yerena, 2014 de Nívar et al 2004

$$\text{BT} = (0.026884 + 0.001191\text{D}^2\text{H} + 0.044529\text{D} - 0.01516\text{H}) + (1.025041 + 0.023663\text{D}^2\text{H} - 0.17071\text{H} - 0.09615 \ln \text{H}) + (- 0.43154 + 0.011037\text{D}^2\text{H} + 0.113602\text{D} + 0.307809 \ln \text{D})$$

Donde:

BT= biomasa total aérea (kg/planta)

D= diámetro basal (cm)

H= altura total (cm)

La concentración de carbono fue tomada de Yerena *et al.* (2011), quienes recomiendan 45.4 % para la biomasa aérea de las especies arbóreas y arbustivas del matorral espinoso tamaulipeco.

4.3.5 Medición de cobertura (Forraje KgMS/Ha).

Para la medición del forraje se utilizó un marco metálico de 50 cm largo × 100 cm ancho. La cobertura vegetal se cortó a una altura de 1 cm del suelo. Después de la recolección de la biomasa, se pesó en campo y se llevó a la estufa para obtener el peso seco constante y, posteriormente, se determinó los kilogramos por hectárea de forraje.

4.3.6 Evapotranspiración de las plantas.

Para esta sección, se realizó el cálculo de la evapotranspiración potencial mediante la fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani 1985). Para evaluar la evapotranspiración potencial, se necesitan datos de temperaturas y de radiación solar:

$$ET0 = 0,0135 (t_{med} + 17,78) R_s$$

$ET0$ = evapotranspiración potencial diaria, mm/día

t_{med} = temperatura media, C

R_s = radiación solar incidente, convertida en mm/día

La radiación solar incidente (R_s) se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la cual llega a la parte exterior de la atmósfera, es decir, sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera)³

Para la obtención de la radiación solar incidente (R_s), Samani (2000) propone la siguiente fórmula:

$$R_s = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0,5}$$

R_s = Radiación solar incidente

R_0 = Radiación solar extraterrestre

KT = coeficiente

t_{max} = temperatura diaria máxima

t_{min} = temperatura diaria mínima

³ Para efectuar esta conversión: 1 mm/día= MJulio/m²/día

Se utiliza la tabla de $R0$ (Radiación solar extraterrestre) de Allen *et al.* (1998) para la obtención de la Radiación solar incidente.

4.4 Diseño experimental para la toma de datos en campo.

Para el diseño experimental, se utilizó un muestreo estratificado con un arreglo factorial de 3×6 (tres tratamientos con seis repeticiones) proporcional al tamaño del estrato. Los estratos (subconjuntos de unidades muestrales) deben tomarse de manera tal que los valores de la variable sean más homogéneos dentro de los mismos que entre ellos. Al existir un patrón de estratificación de las unidades respecto a la variable en estudio, se obtiene una caracterización más precisa. Con base en el modelo descrito, se realizó la toma de datos sistematizada tomando en cuenta las covariables de porcentaje de cobertura y pendiente para cada una de las variables, así como el número de muestras proporcional al estrato.

El modelo estadístico es:

$$Y_{ijk} = \mu + K_i + A_j + T_k + A_i \times K_j + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} es la respuesta del i -ésimo tratamiento en el j -ésimo bloque

μ = es la media general de la variable de respuesta

A_i = es el efecto del i -ésimo tratamiento $i = 1, \dots, a$

K_j = es el efecto del j -ésimo tratamiento $j = 1, \dots, b$

T_k = es el efecto del k -ésimo tratamiento $k = 1, \dots, c$

$A_i \times K_j$ = Interacción $A_i \times K_j$

ϵ_{ijk} = Error aleatorio

Tratamientos Keyline (T1), Tratamientos Keyline + Arado Yeomans (T2), Testigo (T3).

Se realizaron análisis de varianza usando modelos lineales generales, con el fin de evaluar la variable índice de Shannon e índice de Simpson calculadas a partir de la frecuencia de cobertura de las especies encontradas. De igual forma, se realizaron análisis de varianza usando modelos lineales generales para evaluar la producción de forraje.

En los casos en donde las varianzas de tratamientos resultaron heterogéneas, la estructura de varianzas y covarianzas fue modelada hasta alcanzar la homocedasticidad. Cuando se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias de tratamientos se usó la prueba de comparaciones múltiples DGC ($p < 0.05$).

5. RESULTADOS

5.1 Captación de agua lluvia y esorrentía

EC= Escurrimiento de captación

La topografía influye en el movimiento de flujo de agua según sea su pendiente, por lo tanto se identificó el parteaguas dentro y fuera de la finca, el cual definió el área de captación de agua lluvia y esorrentía 6.55 ha. Se utilizó el dato de precipitación anual 382.5mm, con un factor escurrimiento expresado en porcentaje de 2.5 multiplicado por 100. La capacidad de almacenamiento es 626.34 m³ de agua.

ECC= Escurrimiento de captación camino

El área de captación del canal camino consta de 523 metros de largo, 4 metros de ancho, precipitación anual de 382.5mm, con un equivalente del 0.9%, equivalente al 90 % de esorrentía que fluye en caminos de tierra compactada. La capacidad de almacenamiento es 509.49 m³ de agua.

5.2 Identificación y medición de especies de coberturas en el área de estudio.

A continuación, se describe la identificación de cobertura herbácea aérea del suelo, así como de los diferentes tratamientos en el sistema hidrológico en línea clave para la cosecha de agua y suelo. Entre las especies identificadas en su mayoría son especies de gramíneas con un uso principal de alimento para el ganado. Además, presentan múltiples beneficios en el paisaje ganadero (ver figura 5 y 6).

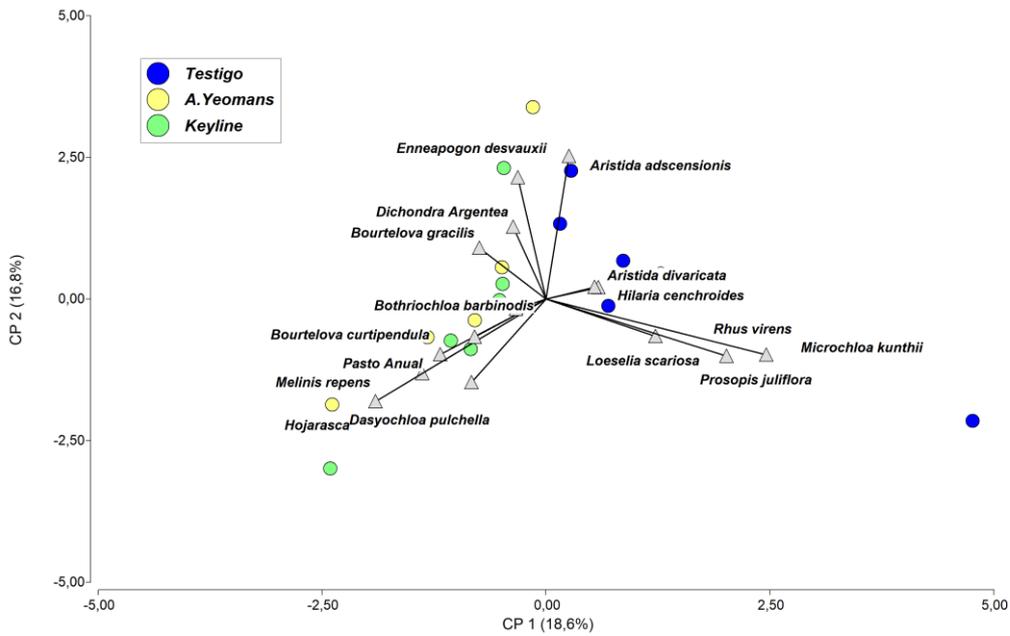


Figura 6. Biplot construido usando los componentes principales, mostrando la asociación de las coberturas del suelo según las especies y los puntos representando las repeticiones de cada tratamiento.

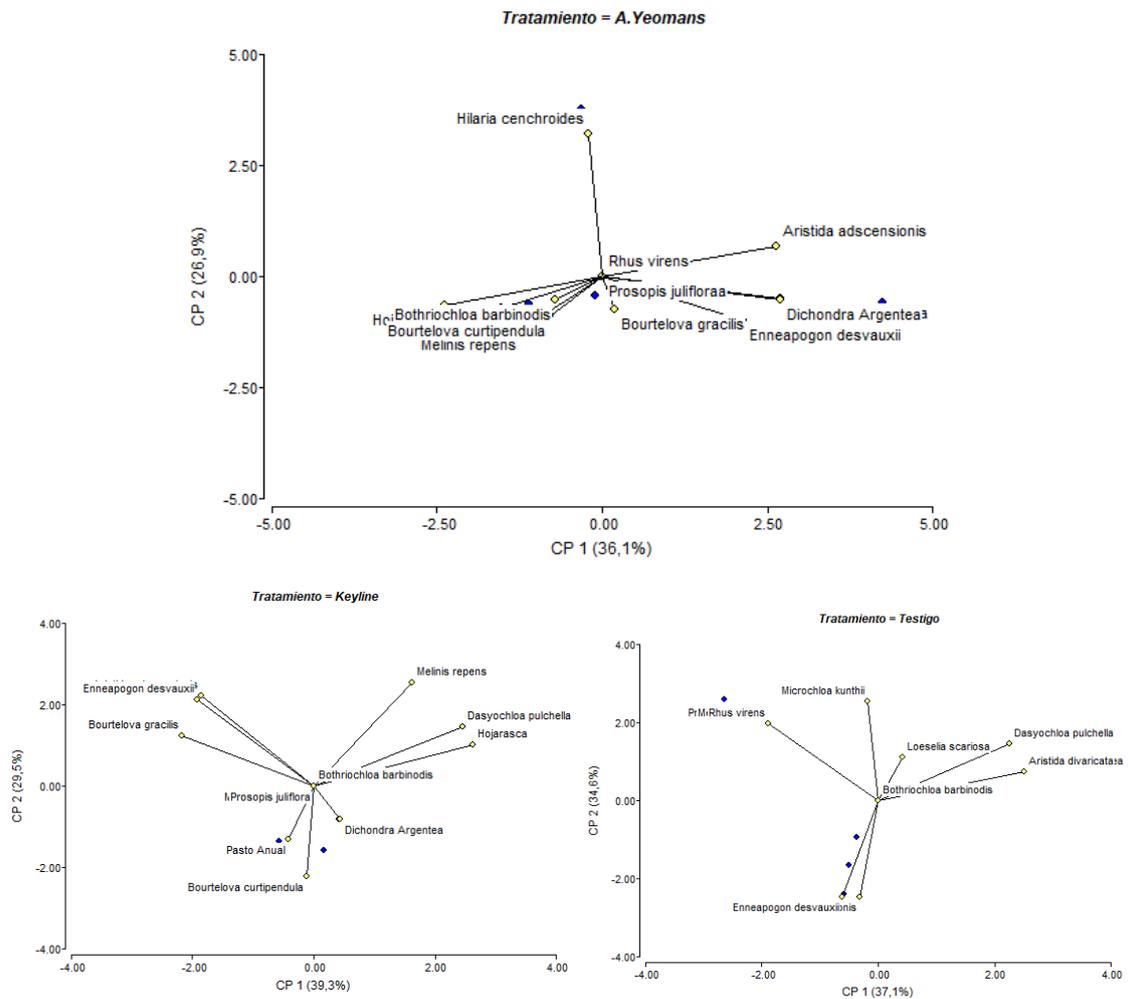


Figura 7. Biplots contruidos usando los componentes principales, mostrando la asociación de las coberturas del suelo según las especies, representando las repeticiones de cada tratamiento.

La vegetación de coberturas del suelo en el sistema hidrológico Keyline demuestra el efecto del agua para el crecimiento de diferentes tipos de forrajes naturales. Con base en lo anterior, se encontró una asociación importante, la especie *Hilaria cenchroides* presentó el mayor porcentaje, la segunda especie con mayor porcentaje de cobertura fue *Bourtelova gracilis*. Ambas especies se caracterizan por su excelente preferencia forrajera para el ganado bovino, fundamentales en los suelos áridos para su aprovechamiento. Las especies *Prosopis juliflora*, *Dasyochloa pulchella*, *Melinis repens*, *Enneapogon desvauxii* *Aristida divaricata*, *Bothriochloa barbinoides*, *Bourtelova curtipendula* obtuvieron similares porcentajes de cobertura, diferentes al *Dichondra argétea*, *Mocrochloa kuntii*, *Rhus virens*, *Aristida adscensionis*, *Loeselia scariosa*, con porcentajes similares entre si pero diferentes al pasto anual, el cual obtuvo los porcentajes más bajos de todas las especies en el área de estudio.

5.2.1 Asociación de coberturas del suelo, en los tratamientos Keyline, arado Yeomans y Testigo.

En este apartado, se describe la asociación existente entre la vegetación de coberturas o forrajes y el manejo del suelo con arado Yeomans, ya que se identifica una importante tendencia del crecimiento de especie, identificando así la importancia de realizar este tipo de trabajo en campo, volviendo los suelos más productivos y regenerándolos en menor tiempo.

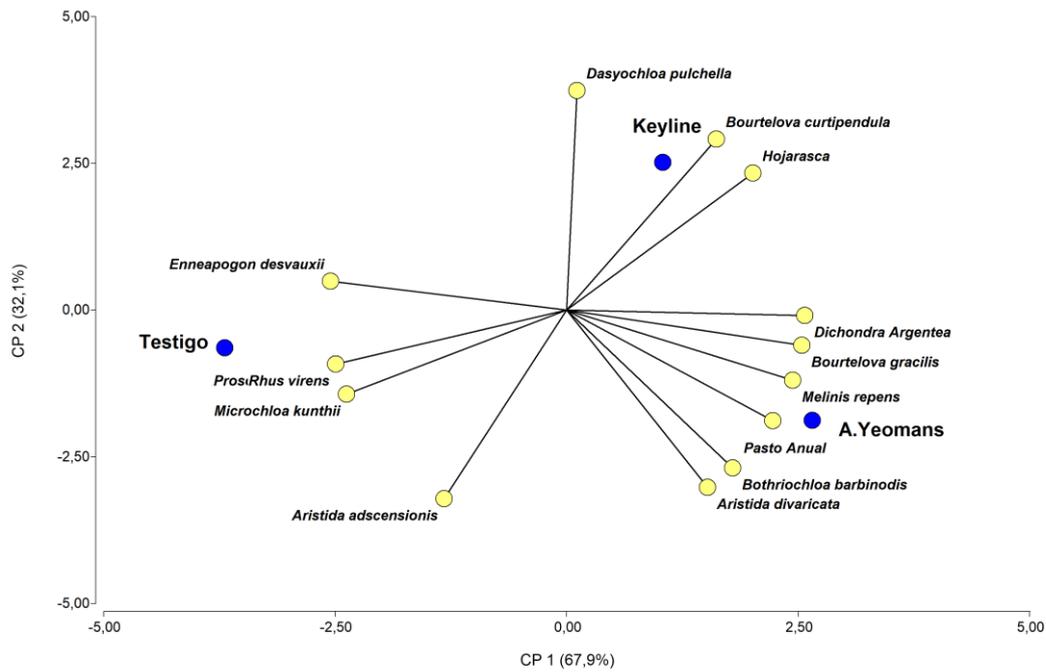


Figura 8. Biplot construido usando los componentes principales representando la asociación de la composición de especies de cobertura herbáceas del suelo por tratamiento.

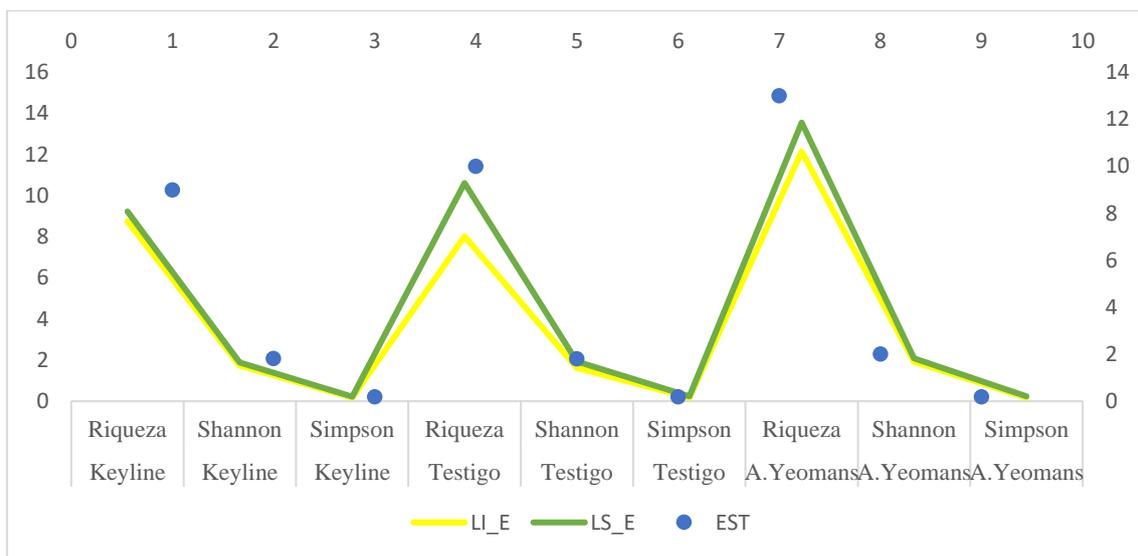


Figura 9. Grafica de índice de diversidad de especies herbáceas de coberturas del suelo representando los cálculos de riqueza, Shannon y Simpson por tratamiento evaluado.

Cuadro 2.

Calculo de índice de diversidad de especies, riqueza, Shannon y Simpson en los tratamientos evaluados.

Grupo	Índice	EST	LI_E	LS_E
Keyline	Riqueza	9	8.74	9.23
Keyline	Shannon	1.82	1.73	1.89
Keyline	Simpson	0.2	0.18	0.22
Testigo	Riqueza	10	8.01	10.61
Testigo	Shannon	1.81	1.62	1.93
Testigo	Simpson	0.2	0.17	0.24
A.Yeomans	Riqueza	13	12.14	13.55
A.Yeomans	Shannon	2.02	1.91	2.09
A.Yeomans	Simpson	0.2	0.18	0.23
Total	Riqueza	16	11.07	17.96
Total	Shannon	2.23	1.87	2.46
Total	Simpson	0.15	0.11	0.21

La productividad de las coberturas en el sistema agua-suelo-planta es muy importante para reducir la erosión; sin embargo, depende de las especies con mejor adaptación al uso eficiente de agua en climas áridos. Los sitios asociados a la presencia de cobertura están relacionados al manejo del suelo con arado Yeomans y al incremento en la diversidad de especies (ver figura 8 y 9) que a su vez estuvieron asociados a la producción de forrajes de gramíneas. Las coberturas vegetales son fundamentales para evitar la erosión de los suelos, favorecen la retención de agua, la producción de biomasa y la captura de carbono, mejorando el suelo.

El arado Yeomans consiste en realizar un corte de la capa superior del suelo con mínima perturbación. Además, ofrece múltiples beneficios entre ellos incluida la apertura de los suelos compactados (sin labranza destructiva o volteo de los suelos) obteniendo como resultado más entrada de oxígeno y humedad, la cual se expresa en los tipos de coberturas identificadas en las parcelas, restaurando su fertilidad.

La vegetación actúa como cubierta protectora entre el suelo y la atmósfera (Morgan 2005) de manera que la efectividad de la vegetación para disminuir la erosión depende directamente de la altura, continuidad y densidad de las especies vegetales (árboles, hierbas, arbustos, entre otros). Si bien las copas de los árboles interceptan la lluvia, la energía cinética de las gotas de agua aumenta y provoca tasas de erosión mayores que en suelos desnudos con precipitación directa (García 2008). Se ha demostrado que a mayor altura de copa, mayor erosión se produce, debido a un aumento en la velocidad de las gotas, lo cual equivalente al 90% de su velocidad máxima.

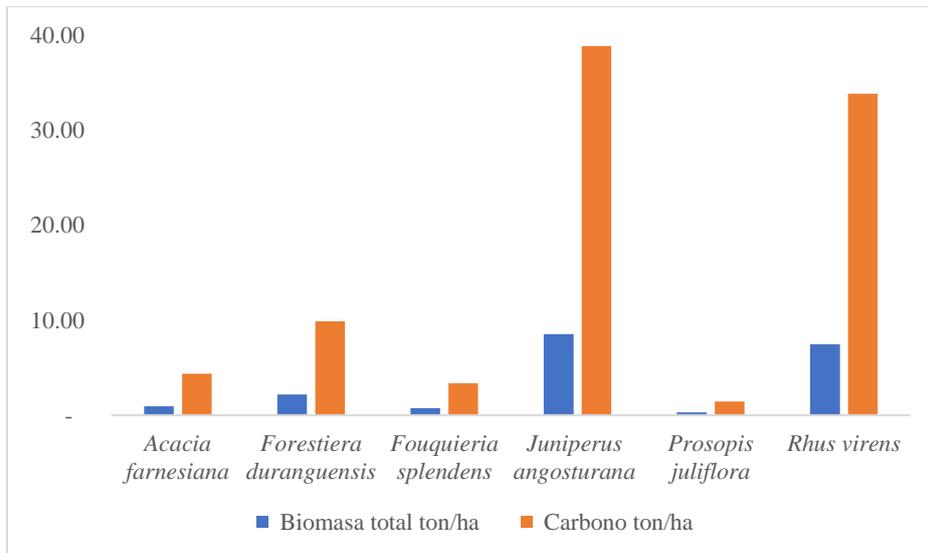
Por esta razón, es fundamental la existencia de una cobertura multiestrato y sobre todo vegetación rastrera. Los componentes radiculares contribuyen a aumentar la

resistencia mecánica del suelo, mientras que la presencia de materia orgánica ofrece estabilidad, rugosidad, porosidad, lo cual supone un aumento de la infiltración.

En un estudio realizado por Alvarado (2016) se definen las principales funciones de la vegetación entre ellas aumento de la intercepción pluvial, aumento de la infiltración del agua al suelo, reducción del agua de escorrentía, reducción del desprendimiento del suelo, protección contra el viento y protección contra el impacto de las gotas de lluvias. Así como el embellecimiento del aspecto del sitio, mejoramiento de la cohesión del suelo, gracias a las raíces, y el enriquecimiento del suelo y el ecosistema.

5.3 Medición de la cobertura aérea biomasa y carbono por hectárea por tratamiento.

Se realizó la medición de la cobertura aérea biomasa y carbono por hectárea, con el propósito de generar información de importancia ambiental, para la conservación y regeneración de especies nativas en los paisajes ganaderos de zonas áridas, los cuales cada día se ven más amenazados por la degradación de los ecosistemas debido al poco manejo en la regeneración natural. A continuación, se realiza una descripción detallada de los resultados.



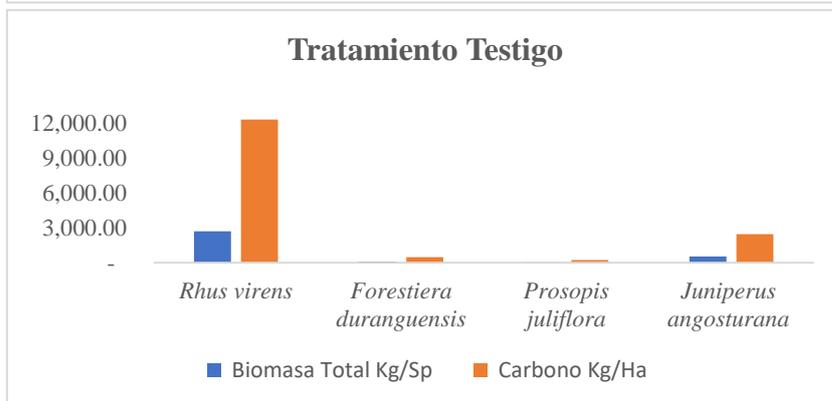
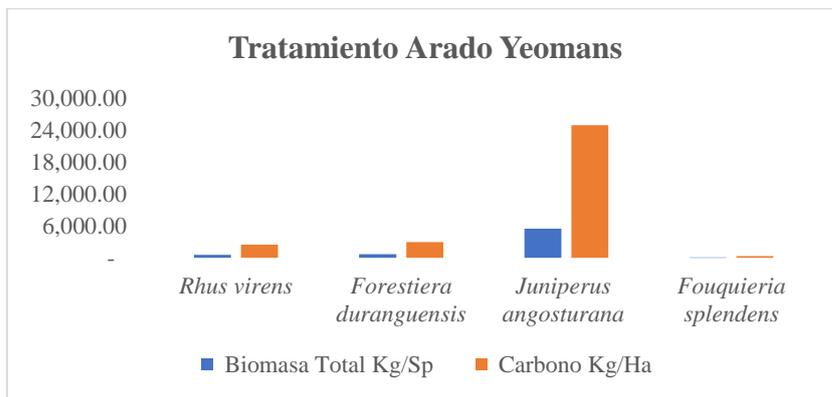
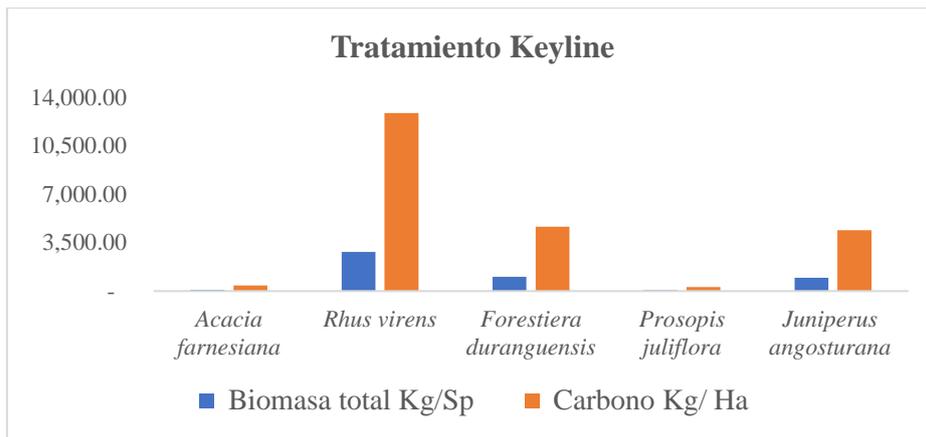


Figura 10. Medición de la cobertura arbustiva aérea de biomasa y carbono ton/ha por tratamiento en el área de estudio.

Con base en el análisis, se encontraron seis especies de matorral secundario, ya que al ser una zona árida la diversidad de plantas es limitada. Sus características están bien marcadas, plantas de porte bajo tipo arbusto, en asocio con las pasturas naturales en el sistema hidrológico Keyline, (ver grafica 1, figura 10), siendo *Rhus virens* quien presentó una densidad de 183 ind/ha, comportándose como una especie dominante, *Forestiera duranguensis* con 150 ind/ha, *Juniperus angosturana* 136 ind/ha, *Fouquieria splendens* 30 ind/ha, *Prosopis juliflora* 15 ind/ha, *Acacia farnesiana* 10 ind/ha.

De igual forma, se realizó la medición de la cobertura aérea del área de estudio, el cual es un bosque de porte bajo de zonas áridas con árboles dispersos. En el sistema de

matorral primario la mayor reserva de biomasa aérea y contenido de carbono se encuentra en la especie de *Juniperus Angosturana*, la cual presenta una biomasa total de 8.56 Ton/ha⁴ y la especie *Rhus virens* 7.46 Ton/ha. La especie *Forestiera duranguensis*, por su parte, presentó 2.18 Ton/ha de biomasa, diferente a las otras especies con presencia de una biomasa menor y similar entre ellas.

5.4 Variable producción de forrajes.

La producción de forrajes es una actividad importante para la alimentación del ganado bovino, por lo tanto se consideró evaluar parcelas con diferentes tratamientos como se muestra en la (figura 11). Cabe mencionar que el crecimiento y producción de forrajes en zonas áridas es menor que en regiones tropicales, lo cual requiere de alternativas para un mejoramiento de la producción en épocas críticas.

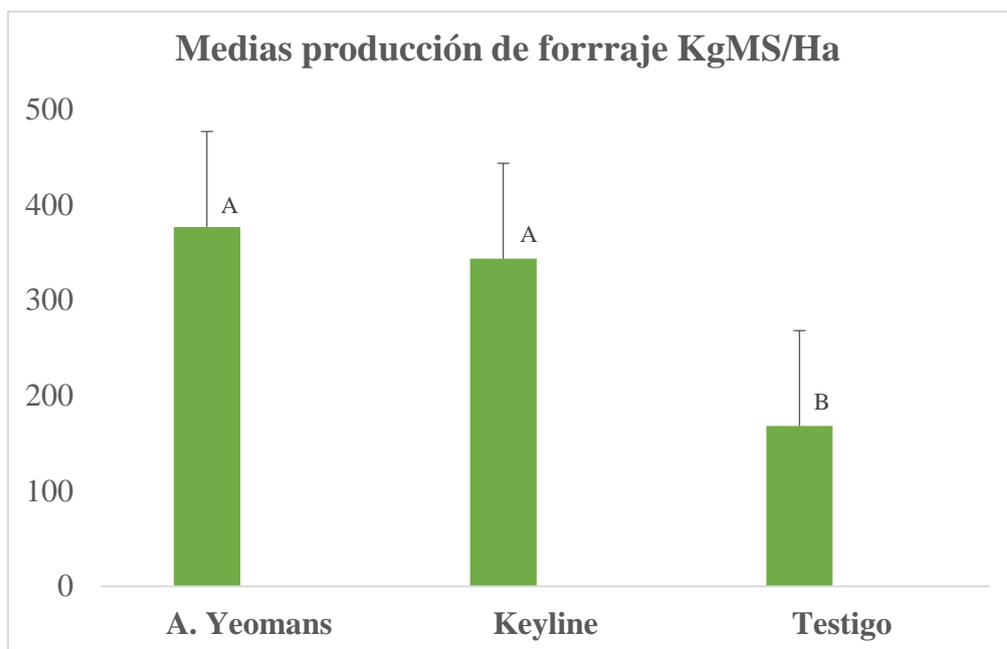


Figura 11. Gráfica de medias de producción de forraje (kilogramos de materia seca /hectárea).

La producción de forrajes, según el análisis de los datos, no encontró diferencias estadísticas significativas entre ellos. Por su parte, el arado Yeomans 376,67 KgMS/ha y Keyline 343,33 KgMS/ha mostró medias diferentes al testigo con 168 KgMS/ha. Lo anterior demuestra que existe un efecto en la implementación del sistema hidrológico y manejo del agua para la producción de forrajes, diferenciando una leve tendencia, la cual es a la vez importante en la producción de forrajes debido a la aridez de la zona. Sin

⁴ Ton/ha es equivalente a Mg ha⁻¹

embargo, cabe destacar que el arado Yeomans junto con el sistema hidrológico Keyline es una técnica que permite el mejoramiento de los suelos, haciéndolos más productivos en menor tiempo y optimizando el crecimiento de las pasturas.

5.5 Evapotranspiración potencial de plantas.

El proceso de evapotranspiración potencial demuestra la existencia de una pérdida de agua notoria, la cual se debe medir y tener en cuenta en este tipo de ecosistema, ya que está presente una limitación del recurso hídrico. Asimismo, se debe tener en cuenta en actividades agrosilvopastoriles y en el manejo de sistemas hidrológicos.

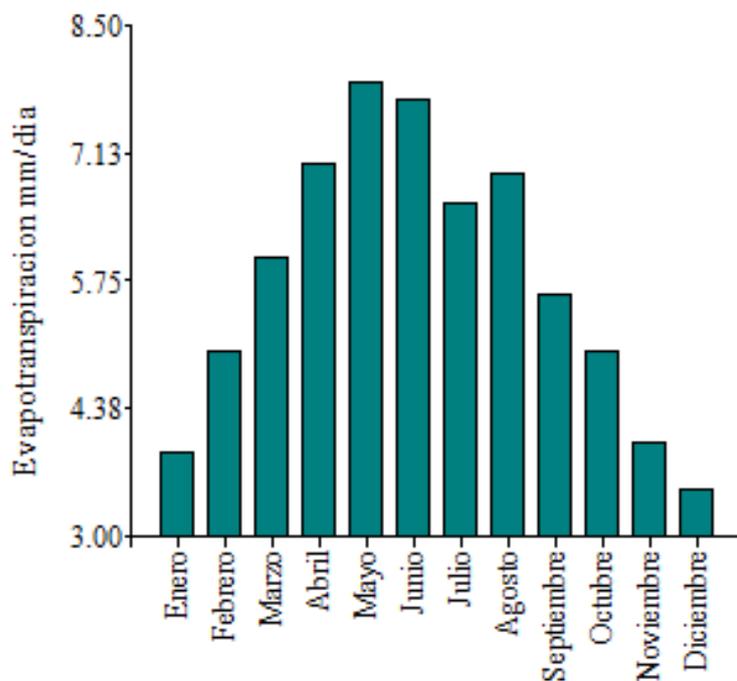


Figura 12. Gráfica cálculo de evapotranspiración potencial mm/día en el área de estudio.

Se realizó el cálculo de evapotranspiración de las plantas del área de estudio y se determinó que en los meses cuando la temperatura es baja (época de invierno) existe una disminución de la evapotranspiración potencial. Durante el mes de marzo la ETO muestra un aumento con 6.0 mm/día, similares al mes de abril con 7.0 mm/día. Los meses que presentaron mayor evapotranspiración van de mayo a junio con ETO de 7.9 y 7.7 ver (figura 12). Por su parte, en la época de otoño existe una disminución de 5.6 a 3.5, se demuestra un descenso en la pérdida de agua por los estomas.

6. DISCUSIÓN

6.1 Aprovechamiento de agua lluvia.

En un estudio de Nuñez *et al.* (2017) se modelaron escenarios de gestión del uso del suelo, con el fin de analizar los flujos de agua. Dicho enfoque demostró ser útil para evaluar la efectividad de la medición del paisaje basado en procesos naturales.

Es importante conocer los parámetros geomorfológicos, las laderas, escorrentías, los reservorios de agua y canales de conducción para así conducir el potencial de transporte de agua, los procesos del suelo y paisaje, ya que juntos forman la conectividad (Bracken *et al.* 2015., Parsons *et al.* 2015., Masselink *et al.* 2017). El sistema para el mejoramiento de paisajes debe vincularse con los procesos que ocurren cuando se trabaja junto a la naturaleza. Cuando se almacena agua y se retiene suelo, este tipo de estrategias de manejo puede mitigar sequías, eventos extremos de erosión (Rickson 2014) (Panteli y Mancarella 2015) así como mejorar la biodiversidad (Huang *et al.* 2017).

Los proyectos de restauración vinculados con el manejo del agua utilizan sistemas basados en la naturaleza para restaurar el comportamiento natural y servicios ecosistémicos de los sistemas fluviales (Surian *et al.* 2015), los cuales están relacionados a la captación almacenamiento y distribución de agua en los terrenos. La incorporación del manejo de agua en los ecosistemas conlleva a una serie de beneficios como lo es la restauración de terrenos, seguridad alimentaria y seguridad hídrica, estos están vinculados a los objetivos de desarrollo sostenible Keesstra y Col (2016), ya que mostraron claramente el vínculo entre la función del suelo, servicios ecosistémicos y los ODS.

Holísticamente los procesos del suelo y el paisaje juntos brindan una serie de beneficios, si se trabaja con los patrones de la naturaleza se tendrán sistemas más resistentes a problemas de escasez de agua. Al final, con el manejo hidrológico en paisajes ganaderos puede afirmarse que los servicios de importancia como lo son el suministro de agua y coberturas vegetales mejoran significativamente. Por su parte, el uso de técnicas basadas en las geoformas del suelo para la captación de agua en zonas áridas mejora el aprovechamiento y distribución del agua en el terreno, optimizando la infiltración y crecimiento de coberturas y forrajes.

La regulación de la calidad del agua es notable cuando se cuenta con un almacenamiento de agua con menos partículas de materia orgánica en suspensión. Además, este enfoque está orientado a disminuir el arrastre de sedimentos y materia orgánica del suelo dando lugar a las áreas ganaderas más fértiles y productivas en menor tiempo.

6.2. Cobertura herbácea del suelo.

Los sistemas en los cuales se aplican técnicas de agricultura ecológica se centran principalmente en enfoque de estrategias de protección de la superficie del suelo como forrajes, los cuales sirven de cobertura del suelo (Sharma *et al.* 2017). La solución del paisaje en la agricultura es la conservación del suelo y agua. Estas estrategias con diseños para el aprovechamiento y conducción de agua, en armonía con la vegetación, árboles dispersos (Villanueva *et al.* 2007) y uso de barreras de piedra (Ponce *et al.* 2019) presentan beneficios tales como frenar la escorrentía superficial, evitar la erosión y mejorar la infiltración.

La interacción de suelo-vegetación-agua puede caracterizarse por medidas que mejora las funciones del suelo (Abbott y Manning 2015), de la misma forma que se pueden agrupar por medidas de cambio de suelo y superficie, y estabilidad del suelo, lo cual reduce el transporte de sedimentos (Rodrigo *et al.* 2016).

Además de los parámetros relacionados con el suelo, también emergen los parámetros influyentes en el potencial de la lluvia. La cubierta vegetal, el mantillo y las características de la superficie provocan un impacto en la escorrentía, por lo cual la erosión impacta el agua y los flujos de sedimentos a pequeña escala (Singh y Khera 2009). Finalmente, los parámetros del suelo relacionados con la textura, estructura del suelo (arena, limo, arcilla, porosidad, contenido de materia orgánica, capacidad de retención de agua) todos crean un ecosistema de suelo más resistente. Según García (2016) citado en Rondón y Vidal (2005) los suelos arenoso-arcilloso desarrollan especies herbáceas y rizomas. (Asmamaw 2017, Hueso *et al.* 2014, Muñoz *et al.* 2016). Los ecosistemas más resilientes poseen un amortiguador contra impactos extremos y crean mejores condiciones. Además, un suelo sano tendrá una mayor biodiversidad y podrá almacenar más carbono (Blouin *et al.* 2013), (Ibrahim *et al.* 2007).

Las diferentes capas y tipos de vegetación crean una superficie que intercepta más lluvia de manera eficiente (Berendse *et al.* 2015, Ostermkamp *et al.* 2012). Al conocer las dimensiones y espacios temporales de las funciones del suelo, este se puede mejorar mediante la creación de paisajes gestionados por biodiversidad, ya sea en praderas o bosques. La autoorganización natural del crecimiento de la vegetación supone, en términos de amortiguación de la hidrología, un sistema resiliente ante sequías (Shen *et al.* 2017) evitando que la superficie del suelo se vea descubierta y vulnerable a la erosión.

Las coberturas vegetales del suelo presentan servicios como ser alimento para el ganado, evita la erosión del suelo (Zabala *et al.* 2010, Prosdócimi y Col 2016b., Abbas *et al.* 2017). De igual forma, la captura de carbono, adaptación al cambio climático, producción de biomasa, regulación de nutrientes, reducción de riesgo a incendios y la

producción agrícola ganadera se benefician de este sistema (Novara *et al.* 2015., Galati *et al.* 2016., Novara 2016). La agricultura regenerativa promueve la construcción del suelo de manera permanente, por su parte la utilización de arado Yeomans se recomienda en este trabajo debido al crecimiento de las especies de gramíneas forrajeras identificadas en el estudio con un excelente valor para el consumo del ganado bovino.

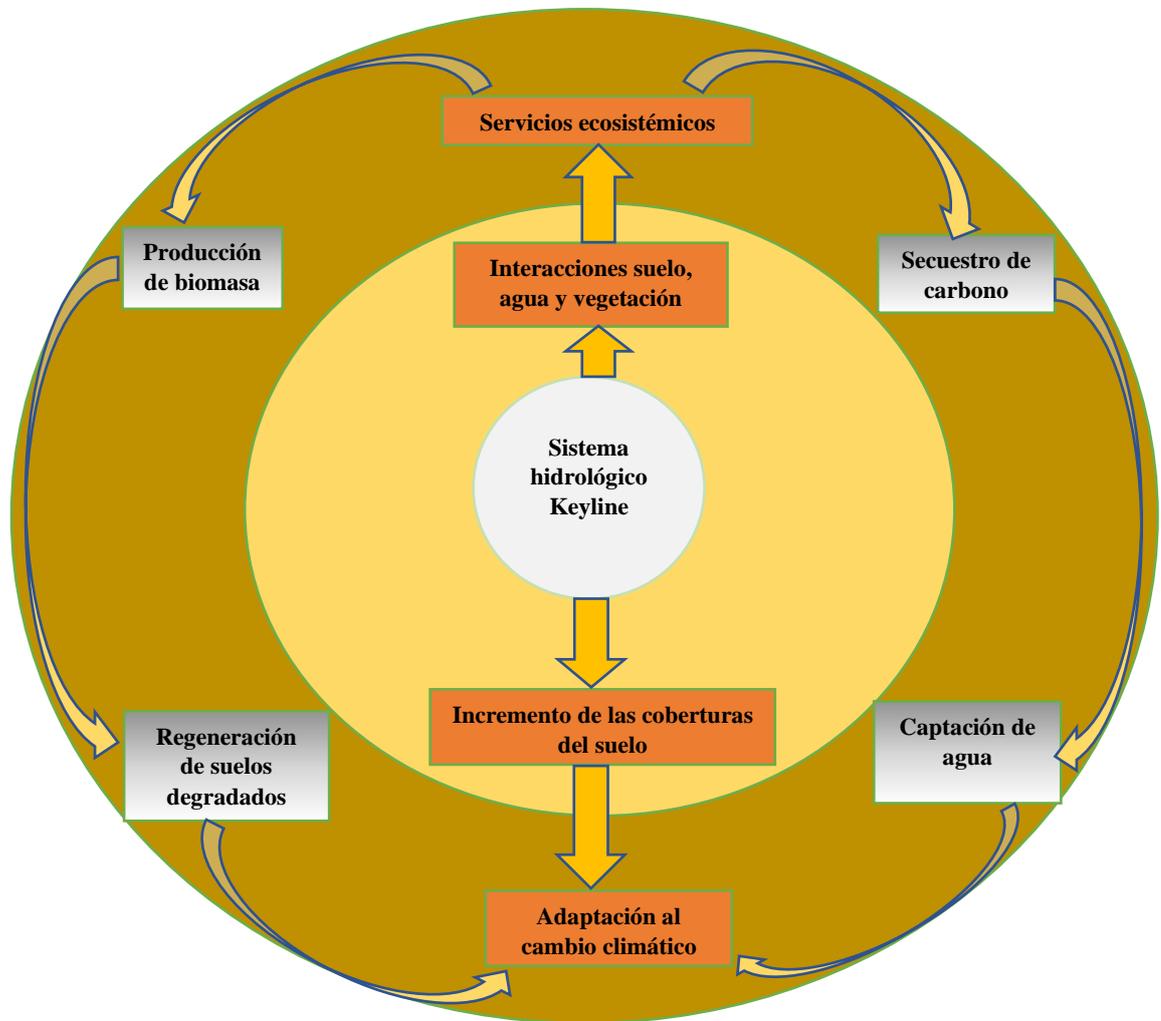


Figura 13. Diagrama de las interacciones y servicios ecosistémicos, vinculados al Sistema hidrológico Keyline.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis realizado, el sistema hidrológico Keyline representa una alternativa para la regeneración de ecosistemas de zonas áridas, ya que se identificaron diferentes coberturas herbáceas naturales del suelo y se calculó la importancia de la captación de agua lluvia para su aprovechamiento.

Existe una asociación importante del 73% de coberturas herbáceas naturales en el manejo del suelo con arado Yeomans, la cual permite evidenciar una tendencia favorable en el crecimiento y producción de especies forrajeras.

La evapotranspiración cuantifica el consumo y pérdida de agua por medio de las plantas, demuestra el déficit de agua que se debe considerar en el sistema hidrológico Keyline, identificando los meses de mayo y junio con mayor ETO de 7.9 y 7.7mm/día.

Conocer datos de biomasa y captura de carbono en especies de plantas arbustivas o matorral de zonas áridas es importante para la mitigación (fijación de carbono), adaptación (microclima) y resiliencia (mayor alimento en época seca y bienestar animal por sombra), ya que genera conciencia respecto a su conservación, al mismo tiempo que incentiva la creación de políticas de estado de pago por servicios ambientales.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, F; Hammad, H; Fahad, S; Cerdà, A; Rizwan, M; Farhad, W; Bakhat, H. 2017. Agroforestry: a sustainable environmental practice for carbon sequestration under the climate change scenarios—a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1–15.
- Abbott, L; Manning, D.A. 2015. Soil health and related ecosystem services in organic agriculture. *Sustainable Agriculture Research* 4 (3), 116.
- Allen, R; Pereira, L; D. Raes y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56
- Altieri; Nicholls. 2013. Agroecología y Cambio Climático, Metodologías para evaluar la resiliencia socio-ecológica en comunidades rurales:99 pág.
- Alvarado,V. 2016. La vegetación como factor de control de la erosión. *Repositorio Científico*,19(1),1317<https://revistas.uned.ac.cr/index.php/repertorio/article/view/2529>
- Austria, P; Patiño, C. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, III, (1), 5-20.
- Asmamaw, D. 2017. A critical review of the water balance and agronomic effects of conservation tillage under rain-fed agriculture in Ethiopia. *Land Degrad. Dev.* 28(3), 843–855.
- Berendse, F; van Ruijven, J; Jongejans, E; Keesstra, S. 2015. Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance of embankments that are crucial for the safety of human societies in low-lying areas. *Ecosystems* 18. 881–888.
- Blouin, M; Hodson, M; Delgado, E; Baker, G; Brussaard, L; Butt, K; Cluzeau, D. 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *Eur.J. Soil Sci.* 64 (2), 161–182.
- Bracken, L; Turnbull, L; Wainwright, J; Bogaart, P. 2015. Sediment connectivity: a catchment. *Land Degrad. Dev.* <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2776>.
- Ponce, C; Prieto, J; Carrete, F; Perez, M; Muñoz, J; Reyes, O; Ramírez, H. 2019. Influence of stone bunds on vegetation and soil in an area reforested with *Pinus engelmannii* Carr. in the forests of Durango, Mexico *Sustainability* 11(18):5033. <http://doi.org/10.3390/su11185033>
- Collins; Doherty. 2009. Keyline design Mark IV ‘Soil, Water & Carbon for Every Farm’ Building Soils, Harvesting Rainwater, Storing Carbon:14. Disponible en <https://knowledgebase.permaculture.org.uk/resources/books/keyline-design->

mark-iv-%E2%80%98soil-water-carbon-every-farm%E2%80%99-building-soils-harvesting conservation tillage under rain-fed agriculture in Ethiopia. *Land Degrad. Dev.* 28

- Contreras, J; Volke, V; Oropeza, J; Rodríguez, C; Martínez, T; Martínez, A. 2003. Estado actual y causas de la degradación de los agostaderos en el municipio de Yanhuatlán, Oaxaca *Terra Latinoamericana*, vol. 21, núm. 3, julio-septiembre, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México, pp. 427-435
- Galati, A; Crescimanno, M; Gristina, L; Keesstra, S; Novara, A. 2016. Actual provision as an alternative criterion to improve the efficiency of payments for ecosystem services for C sequestration in semiarid vineyards. *Agric. Syst.* 144:58–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.004>.
- García, P. 2008. *Procesos y control de la erosión*. Denver, CO. Outskirts Press. 276p.
- Gras, E. 2009. *Cosecha de agua y tierra, y diseño con permacultura*. Primera edición. Brasil; Colombia y México. COAS. 243p.
- Hargreaves, G; Samani, Z. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99 <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents>
- Hernández, C. (2010). *Calentamiento Global: ¿Rumbo a un futuro catastrófico?* Ciudad de México, Ciudad de México, México: Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, UNAM.
- Huang, Y; Higgs, S; Vanlandingham, D. 2017. Biological control strategies for mosquito vector s of arboviruses. *Insects* 8 (1), 21.
- Hueso P; Martínez, J; Ruiz, J. 2014. The impact of organic amendments on forest soil properties under Mediterranean climatic conditions. Increasing farmer's income and reducing soil erosion using intercropping *in.earscirev.*2016.08.006.
- Ibrahim, M; Chacón, M; Cuartas, C; Naranjo, J; Ponce, G; Vega, P; Casasola, F; Rojas, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa aérea en sistemas de uso de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 45:27 – 36.
- IPCC, 2014: *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.). Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs.

- Keesstra, S; Bouma, J; Wallinga, J; Tittonell, P; Smith, P; Cerdà, A; Montanarella, L; Quinton, J; Pachepsky, Y; van der Putten, W; Bardgett, R; Moolenaar, S; Mol, G; Jansen, B. 2016a. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil* 2:111–128.<http://dx.doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>.*Land Degrad. Dev.* 25, 604–612.*Landf.* 40 (2), 177–188.
- Köppen. 1931. *Grundrisse der Klimakunde*. Berlin, Walter de Gruyter, Universidad de California, Edición 2, 388 pag.
- Luna, J; 2016, La Insustentabilidad Socioambiental de la Producción del Espacio Urbano en el Capitalismo Específicamente Neoliberal, en *Revista de Geografía ESPACIOS* 11 (16), Santiago: Programa de investigaciones e intervenciones territoriales, Universidad Academia de Humanismo Cristiano, pp.89-109.
- Masselink, R; Heckmann, T; Temme, A; Anders, N; Gooren, H; Keesstra, S.D. 2017a. A network theory approach for a better understanding of overland flow connectivity. *Hydrol. Process.* 31, 207–220.
- Morgan, R. 2005. *Soil erosion and conservation*. National Soil Resources Institute. Cranfield University. Oxford, UK. Blackwell Science Ltd. 304p.
- Montaño, N; Ayala, F, Bullock, S,H; Briones, O; Garcia, F; Garcia R; Maya, Y;Peroni, Y; Siebe, C; Tapia, Y;Troyo, E; Yopez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas.*Terra Latinoamericana*,34, 39-59
- Muñoz, M; Erickson, T.; Dixon, K; Merritt, D. 2016. Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. *Restor. Ecol.* 24:S43–S52. <http://dx.doi.org/10.1111/rec.12368>.
- Návar, J; Mendez, E; Graciano, J; Dale, V; Parresol, B. 2004. Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments*.59:657-674.
- Novara, A; Cerdà, A; Carmelo, D; Giuseppe, L; Antonino, S; Luciano, G. 2015. Effectiveness of carbon isotopic signature for estimating soil erosion and deposition rates in Sicilian vineyards. *Soil Tillage Res.* 152, 1–7.
- Novara, A; Keesstra, S; Cerdà, A; Pereira, P; Gristina, L. 2016. Understanding the role of soil erosion on CO₂-C loss using ¹³C isotopic signatures in abandoned Mediterranean agricultural land. *Sci. Total Environ.* 550, 330–336.
- Núñez, J; Naranjo, P; Santos, J; Serpa, D; Carvalho, C; Rocha, J; Keizer, J; Keesstra, S 2017a. Afforestation, subsequent forest fire and provision of hydrological services: a model-based analysis for a Mediterranean mountainous

- Osterkamp, W; Hupp, C; Stoffel, M. 2012. The interactions between vegetation and erosion: new directions for research at the interface of ecology and geomorphology.
- Panteli, M; Mancarella, P. 2015. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: impacts and possible mitigation strategies. *Electr. Power Syst. Res.* 127, 259–270.
- Panteli, M; Mancarella, P. 2015. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: impacts and possible mitigation strategies. *Electr. Power Syst. Res.* 127, 259–270.
- Parsons, AJ; Bracken, L; Peoppl, R; Wainwright, J; Keesstra, S. 2015. Editorial: introduction to special issue on connectivity in water and sediment dynamics. *Earth Landf.* 37 (1), 23–36.
- Prosdocimi, M; Tarolli, P; Cerdà, A. 2016b. Mulching practices for reducing soil water erosion: a review. *Earth Sci. Rev.* 161:191–203. [http://dx.doi.org/10.1016/rainfed](http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.001) maize-wheat rotation of Himalaya, India. *Agric. Ecosyst. Environ.* 247,
- Rickson, R. 2014. Can control of soil erosion mitigate water pollution by sediments? *Sci. Total Environ.* 468, 1187–1197.
- Rodrigo, J; Quiquerez, A; Follain, S; Raclot, D; Le Bissonnais, Y; Casali, J; Pereira, P. 2016b. Soil erosion in sloping vineyards assessed by using botanical indicators and sediment collectors in the Ruwer-Mosel valley. *Agric. Ecosyst. Environ.*
- Rondon, J; Vidal. 2005. Establecimiento de la cubierta vegetal en áreas degradadas (Principios y métodos). *Rev. For. Lat.* (38): 63-82.
- Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data . *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 265-267
- Sharma, N; Singh, R; Mandal, D; Kumar, A; Alam, N; Keesstra, S; 2017. Framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surf. Process.*
- Shen, P; Zhang, L; Chen, H; Gao, L. 2017. Role of vegetation restoration in mitigating hillslope erosion and debris flows. *Eng. Geol.* 216, 122–133.
- Singh, M; Khera, L. 2009. Physical indicators of soil quality in relation to soil erodibility under different land uses. *Arid Land Res. Manage.* 23: 152-167 *Surf. Process. Landf.* 40 (9):1275–1277. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3714>.
- Surian, N; Barban, M; Ziliani, L; Monegato, G; Bertoldi, W; Comiti, F. 2015. Vegetation turnover in a braided river: frequency and effectiveness of floods of different magnitude. *Earth Surf. Process. Landf.* 40 (4), 542–558.

- Villanueva, C; Tobar, D; Ibrahim, M; Casasola, F; Barrantes, Arguedas, R. 2007. Árboles dispersos en potreros de fincas ganaderas del pacifico central de Costa Rica. *Agroforestería en las américas* (45):12-20.
- Yerena, J; Jimenez, J; Alanis, E; Aguirre, C; González, M; Treviño, E. 2014. Dinámica de la captura de carbono en pastizales abandonados del noreste de México, *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 17, núm. 1, pp. 113-121
- Yerena, J; Jiménez, J; Aguirre, O; Treviño, E. 2011. Concentración de carbono en la biomasa aérea del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17:283-291.
- Zavala, L; Jordán, A; Bellinfante, N; Gil, J; 2010. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment. *Soil Sci. Plant Nutr.* 56 (1), 95–104.

ANEXOS

A continuación, se describen los anexos que se consideran de importancia en el trabajo de tesis:

Resumen de investigación.

Análisis estadístico de los resultados.

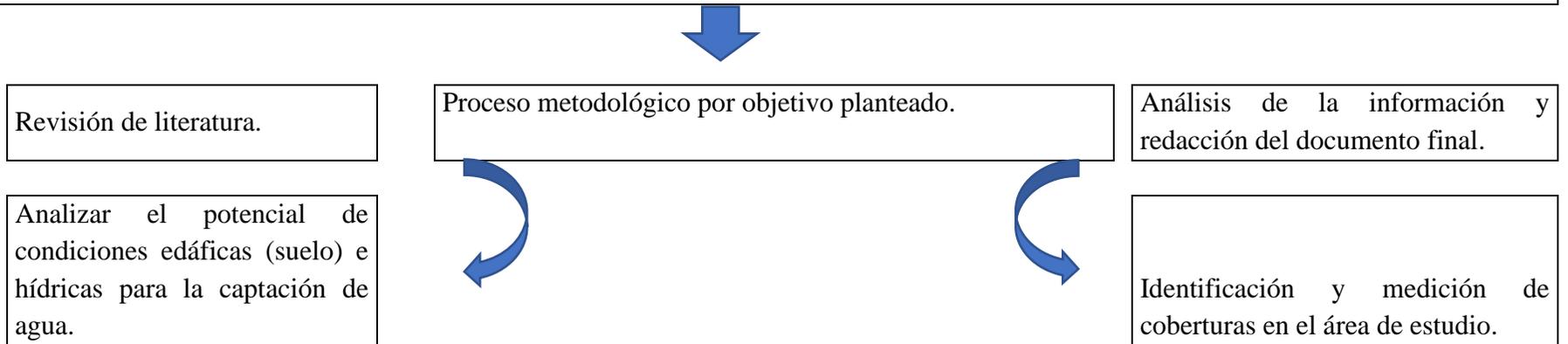
Datos de Biomasa y Carbono kg/ha.

Composición Florística del área de estudio.

Imagen de sistema hidrológico para la cosecha de agua superficial y suelo (Keyline).

Punto de inflexión, canales de desviación para la infiltración.

Evaluación de Sistema hidrológico Keyline, en un paisaje ganadero, de zona árida municipio Nombre de Dios del Estado de Durango, México.



Fase 1	Localización del área de estudio:	Ejido de la Parrilla, Nombre de Dios, Durango, México.
Fase 2	Consulta con actores claves:	Investigadores UJED, Estado de Durango.
Fase 3	Trayecto a pie, vuelo de dron para reconocimiento del área de estudio.	Identificar la ubicación y distribución de los canales de conducción el reservorio de almacenamiento, la característica del paisaje, coberturas y suelo del área de estudio.
Fase 4	Aplicación de muestreo estratificado en los tratamientos del área de estudio.	
Fase 5	Validación de los datos:	Revisión de literatura, muestreo estratificado.
Fase 6	Análisis estadístico:	Infostat Software estadístico 2018, ANOVA, Análisis multivariado, índice de Shannon e índice de Simpson y prueba DGC.

Anexo 1. Resumen de investigación.

Análisis estadístico de los resultados para la variable de cobertura del suelo.

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.046_ShaW_REML<-gls(ShaW~1+Tratamiento  
,method="REML",na.action=na.omit,data=mlm.modeloR.data46)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.046_ShaW_REML
Variable dependiente: ShaW

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
18	26,95	29,78	-9,47	0,38	0,14	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	149,54	<0,0001
Tratamiento	2	1,18	0,3356

ShaW - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento
DGC (Alfa=0.10)

Procedimiento de corrección de p-valores:

Tratamiento	Medias	E.E.	
A Yeomans	1,27	0,16	A
Keyline	1,09	0,16	A
Testigo	0,93	0,16	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,10$)

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.047_Simp_REML<-gls(Simp~1+Tratamiento  
,method="REML",na.action=na.omit,data=mlm.modeloR.data46)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.047_Simp_REML

Variable dependiente: Simp

Medidas de ajuste del modelo

<u>N</u>	<u>AIC</u>	<u>BIC</u>	<u>logLik</u>	<u>Sigma</u>	<u>R2_0</u>
18	4,95	7,79	1,52	0,18	0,03

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	<u>numDF</u>	<u>F-value</u>	<u>p-value</u>
(Intercept)	1	85,10	<0,0001
Tratamiento	2	0,24	0,7898

Simp - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento
DGC (Alfa=0.10)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

<u>Tratamiento</u>	<u>MediasE.E.</u>		
Testigo	0,43	0,07	A
Keyline	0,40	0,07	A
A Yeomans	0,36	0,07	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,10$)

Se realizaron análisis de varianza usando modelos lineales generalizados usando la distribución *Poisson* y función de enlace *Link* para evaluar la riqueza de especies.

Modelos lineales generalizados mixtos

Especificación del modelo en R

Variable dependiente: r

General

<u>Familia</u>	<u>Enlace</u>	<u>Convergencia</u>	<u>Escala</u>
poisson	log	Alcanzada	1,00

Medidas de ajuste del modelo

<u>N</u>	<u>AIC</u>	<u>BIC</u>	<u>logLik</u>	<u>Deviance</u>
18	72,68	75,35	33,34	7,18

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (Wald) para los efectos fijos

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	2	15	1,38	0,2818

Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento

Inversa de la función de enlace con efecto aleatorio=0

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tratamiento	PredLin	E.E.	Media	E.E.
A.Yeomans	1,67	0,18	5,33	0,94
Keyline	1,54	0,19	4,67	0,88
Testigo	1,20	0,22	3,33	0,75

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Se realizaron análisis de varianza usando modelos lineales generales para evaluar la producción de forraje. Se probaron las covariables pendiente (%) y cobertura (%) pero no resultaron significativas para ninguna de las tres variables de respuesta. En los casos en donde las varianzas de tratamientos resultaron heterogéneas, la estructura de varianzas y covarianzas fue modelada hasta alcanzar la homocedasticidad.

Cuando se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias de tratamientos se usó la prueba de comparaciones múltiples DGC ($p < 0.05$ o $p < 0.10$).

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.045_Forraje.Kg.Ha_REML <- gls(Forraje.Kg.Ha ~ 1 + Tratamiento, weights =
varComb(varIdent(form = ~1/VAR)), method = "REML", na.action = na.omit, data = mlm.mo
deloR.data45)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.045_Forraje.Kg.Ha_REML

Variable dependiente: forraje.kg.ha

Medidas de ajuste del modelo

<u>N</u>	<u>AIC</u>	<u>BIC</u>	<u>logLik</u>	<u>Sigma</u>	<u>R2</u>	<u>0</u>
18	207,01	210,55	-	98,50	68,16	0,25

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

<u>numDF</u>	<u>F-value</u>	<u>p-value</u>
(Intercept)	1	51,43 <0,0001
<u>Tratamiento</u>	<u>2</u>	<u>4,21</u>

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Formula: ~ 1 | VAR

Parámetros de la función de varianza

<u>Parámetro</u>	<u>Estim</u>
Testigo	1,00
<u>A.Yeomans</u>	<u>3,07</u>

Forraje.Kg.Ha - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

<u>Tratamiento</u>	<u>Medias</u>	<u>E.E.</u>	
A.Yeomans	376,67	85,32	A
Keyline	343,33	85,32	A
<u>Testigo</u>	<u>168,00</u>	<u>27,83</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Datos de biomasa y carbono kg/ha.

Especie	Biomasa total kg/ha	Carbono kg/ha
<i>Acacia farnesiana</i>	87.48	397.17
<i>Forestiera duranguensis</i>	595.25	2,702.4
<i>Fouquieria splendens</i>	67.35	305.79
<i>Juniperus angosturana</i>	2,335.37	10,602.58
<i>Prosopis juliflora</i>	58.83	267.08
<i>Rhus virens</i>	2,032.92	9,229.48
Total Parcela	5,177.21	23,504.53
Total ton/ha	5.69	25.85

Anexo 2. Datos medición de cobertura aérea biomasa total y carbono kg/ha.

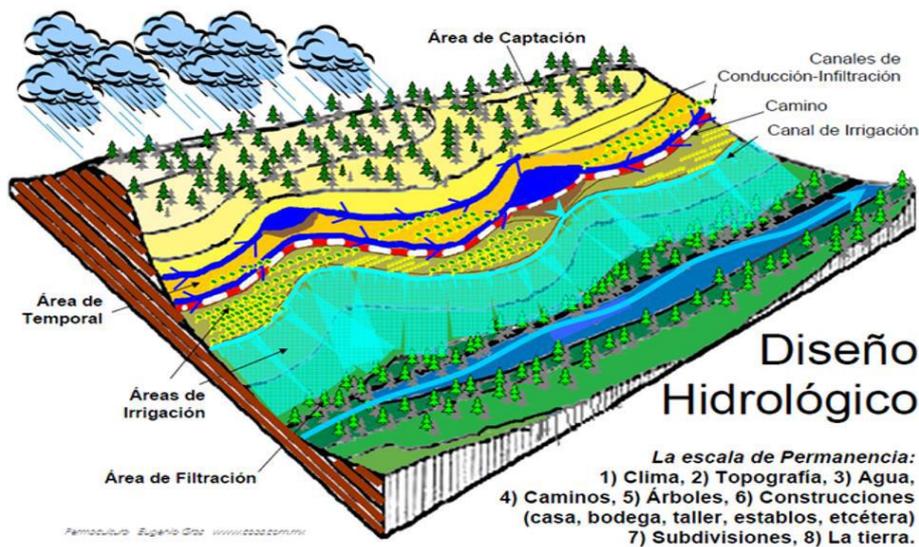
Composición florística de coberturas del área de estudio.

La composición botánica del área de estudio, está representada principalmente por: Poaceae (gramíneas) Asteraceae (compuestas); aunque también están presentes Cupressaceae, Fagaceae, Convolvulaceae, Polemoniaceae, Oleaceae y Anacardiaceae. Predominando las especies herbáceas perennes como se muestra en el siguiente cuadro.

Nombre Científico	Familia	Longevidad	Preferencia forrajera			Tratamiento
			Test.	DHK	Yeomans	
<i>Acacia farnesiana</i>	Fabaceae	Perenne	Regular	x	x	x
<i>Achnatherum eminens</i>	Poacea	Perenne	Buena			
<i>Aristida pansa</i>	Poacea	Perenne	Regular			
<i>Aristida adscensionis</i>	Poacea	Annual	Regular	x	x	x
<i>Aristida divaricata</i>	Poacea	Perenne	Regular			x
<i>Aristida ternipes</i>	Poacea	Perenne	Regular			
<i>Bothriochloa barbinodis</i>	Poacea	Perenne	Regular			x
<i>Bouteloua curtipendula</i>	Poacea	Perenne	Excelente		x	x
<i>Bouteloua gracilis</i>	Poacea	Perenne	Excelente		x	x
<i>Bouteloua radicata</i>	Poacea	Perenne	Buena			
<i>Calliandra eriophylla</i>	Fabaceae					
<i>Cenchrus echinatus</i>	Poacea	Annual	Buena			
<i>Chenchrus ciliaris</i>	Poacea	Perenne	Buena			
<i>Chloris virgata</i>	Poacea	Annual	Regular			
<i>Cynodon dactylon</i>	Poacea	Perenne	Regular			
<i>Dasyochloa pulchella</i>	Poacea	Perenne	Mala	x	x	x
<i>Dichondra Argentea</i>	Convolvulaceae	Perenne	Ninguna	x	x	x
<i>Disaclisperma dubium</i>	Poacea					
<i>Enneapogon desvauxii</i>	Poacea	Perenne	Regular	x	x	x
<i>Eragrostis barrelieri</i>	Poacea	Annual				
<i>Eragrostis cilianensis</i>	Poacea	Annual	Malo			
<i>Eragrostis intermedia</i>	Poacea	Perenne	Buena			

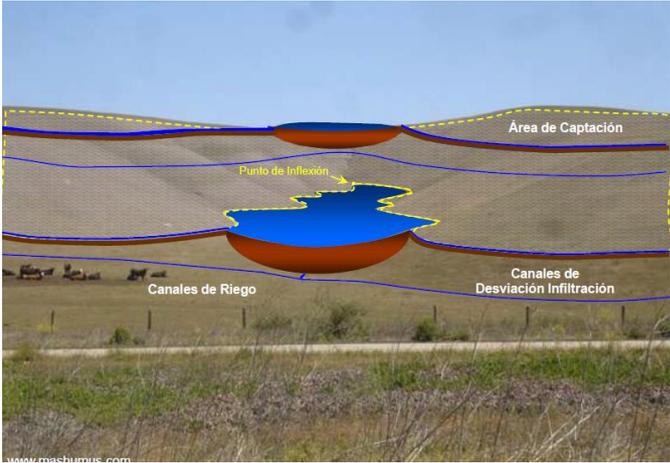
<i>Erioneuron avenaceum</i>	Poacea	Perenne	Buena			
<i>Forestiera duranguensis</i>	Oleaceae	Perenne	Ninguna	x	x	x
<i>Heteropogon contortus</i>	Poacea	Perenne	Regular			
<i>Hilaria cenchroides</i>	Poacea	Perenne	Buena			x
<i>Juniperus angosturana</i>	Crupressaceae	Perenne	Ninguna	x	x	x
<i>Loeselia scariosa</i>	Polemoniaceae			x		
			Regular			
<i>Melinis repens</i>	Poacea	Perenne	(tierna)	x	x	x
<i>Microchloa kunthii</i>	Poacea	Perenne	Buena		x	x
<i>Muhlenbergie rígida</i>	Poacea	Perenne	Regular			
<i>Muhlenbergie tenuifolia</i>	Poacea	Annual	Regular			
<i>Pasto chiquito</i>					x	x
<i>Prosopis juliflora</i>	Fabaceae		Buena	x	x	x
<i>Rhus virens</i>	Anacardiaceae		Ninguna	x	x	x
<i>Setaria grisebachii</i>	Poacea	Annual	Regular			
<i>Setaria macrostachya</i>	Poacea	Perenne	Buena			
<i>Stipa eminens</i>	Poacea	Perenne				

Anexo 3. Composición florística de coberturas del área de estudio.



Anexo 4. Diseño hidrológico para la cosecha de agua superficial y suelo (Keyline)

Fuente: www.mashumus.com Eugenio Gras 2009



Anexo 5. Punto de inflexión, canales de desviación Infiltración

Fuente: www.mashumus.com Eugenio Gras 2009