

# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

**IMPACTO DEL SISTEMA ZANJA BORDO SOBRE LA COBERTURA VEGETAL EN  
PASTIZALES DE LA REGIÓN MIXTECA, ESTADO DE OAXACA**

**ALEJANDRA REYES CARRILLO**

**T E S I S**  
**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

**2017**


**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Alejandra Reyes Carrillo, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Adolfo A. Exebio García, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis IMPACTO DEL SISTEMA ZANJA BORDO SOBRE LA COBERTURA VEGETAL EN PASTIZALES DE LA REGIÓN MIXTECA, ESTADO DE OAXACA y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 14 de JULIO de 2017



Firma del  
Alumno (a)



Adolfo A. Exebio García

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

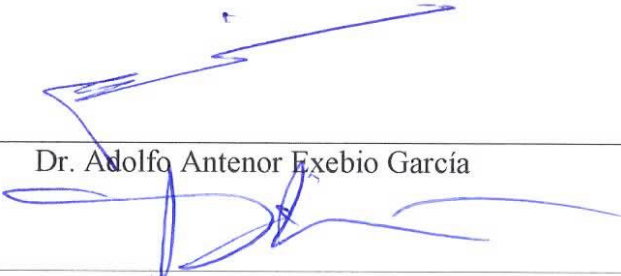
La presente tesis titulada: **IMPACTO DEL SISTEMA ZANJA BORDO SOBRE LA COBERTURA VEGETAL EN PASTIZALES DE LA MIXTECA, ESTADO DE OAXACA** realizada por la alumna: **Alejandra Reyes Carrillo** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**HIDROCIENCIAS**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO (A)

  
Dr. Adolfo Antenor Exebio García

ASESOR (A)

MC. Erasmo Rubio Granados

ASESOR (A)

  
MC. María Eugenia Delgadillo Piñón

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2017.

# IMPACTO DEL SISTEMA ZANJA BORDO SOBRE LA COBERTURA VEGETAL EN PASTIZALES DE LA MIXTECA, ESTADO DE OAXACA

Alejandra Reyes Carrillo, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2017.

## RESUMEN

La ganadería intensiva ha provocado pérdidas de la cobertura vegetal que están asociados con procesos erosivos y para atenuarlos, se han establecido acciones de conservación del suelo y agua. El presente trabajo evaluó el impacto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en el pastizal de la cuenca Rancho Dolores de la Región Mixteca del estado de Oaxaca. Los cambios de la cobertura vegetal se identificaron con Índice de Vegetación (NDVI y SAVI) utilizando imágenes de satélite para antes y después de la construcción de las zanjas; con estimaciones de cobertura verde, seca y total, producción de biomasa, e índices de vegetación en tres polígonos con obras y cinco sitios de muestreo (entre zanja, inicio, zanja, bordo y pie) y tres sin obras en tres sitios de muestreo (parte alta, media y baja) y el análisis de la composición florística de la vegetación en pastizales con y sin obras. Los índices de vegetación (NDVI y SAVI) se incrementaron con el establecimiento del sistema zanja bordo. La producción de biomasa en el bordo y la zanja fue de 238.68 g m<sup>-2</sup> y 229.84 g m<sup>-2</sup> respectivamente y estadísticamente mayores a los sitios de entre zanjas, inicio y pie, los porcentajes de cobertura vegetal, el IVPN, NDVI y SAVI no mostraron diferencias significativas. La entre zanja y testigo mostraron diferencias significativas en la producción de biomasa y el porcentaje de cobertura, los índices de vegetación fueron iguales. En áreas con obras, la especie dominante es *Melinis repens* (Willd.) Zizka, de potencial forrajero bajo; en áreas testigo la especie dominante es *Bouteloua griffithsii* Columbus, de potencial forrajero bueno. El Procedimiento de Permutación de Respuesta Múltiple indica que existe diferencia significativa en la composición florística de sitios con obras y testigo.

Palabras clave: Cobertura vegetal, índices de vegetación, zanjas bordo, composición florística, pastizales.

# IMPACT OF THE DITCH BOARD SYSTEM ON THE VEGETATION COVER IN THE GRASSLANDS OF REGION MIXTECA, STATE OAXACA

Alejandra Reyes Carrillo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2017.

## ABSTRACT

Intensive livestock farming has caused losses of vegetation cover associated with erosion processes and to attenuate them, soil and water conservation actions have been established. The present work evaluated the impact of the ditch board system on the vegetation cover in the grasslands of the Rancho Dolores watershed of the Mixteca Region of the state of Oaxaca. Changes in vegetation cover were identified with Vegetation Indexes (NDVI and SAVI) using satellite images before and after construction of the ditch board; with estimates of green, dry and total cover, biomass production, and Vegetation Indexes' in three polygons with works and five sampling sites (between trench, start, trench, board and foot) and three without works in three sampling sites (high, medium and low) and the analysis of the floristic composition of the vegetation in grasslands with and without works. Vegetation indices (NDVI and SAVI) were increased with the establishment of the ditch board system. Biomass production at the board and trench was  $238.68 \text{ g m}^{-2}$  and  $229.84 \text{ g m}^{-2}$  respectively and statistically higher than the sites between trenches, start and foot, the percentages of vegetal cover, IVPN, NDVI and SAVI did not show significant differences. Between trench and control showed significant differences in biomass production and coverage percentage, but the vegetation indexes were the same. In areas with works, the dominant species is *Melinis repens* (Willd.) Zizka, of low forage potential. In control areas the dominant species is *Bouteloua griffithsii* Columbus, of good forage potential. The Multiple Response Permutation Procedure indicates that there is a significant difference in the floristic composition of sites with ditch and control.

Key words: Plant cover, Vegetation Índices, ditch board system, floristic composition, grasslands.

## AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados y al programa de hidrociencias por darme la oportunidad de ser parte de esta institución y contribuir en mi formación profesional.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me otorgo para realizar los estudios de maestría.

Al Dr. Mario Martínez Menez por todo su apoyo para realizar este trabajo, por dirigirme y por todo el tiempo dedicado, asesoría y compromiso, muchas gracias.

Al MC. Erasmo Rubio Granados por su apoyo para el análisis de datos, asesorías, correcciones y por disponer de su valioso tiempo para resolver mis dudas, muchas gracias.

Al Dr. Edmundo García Moya por su asesoría y sus observaciones en el apartado de vegetación.

Al Dr. Humberto Vaquera Huerta y Dr. Mario Luna Cavazos por su asesoría para el análisis estadístico y de vegetación respectivamente.

Al Dr. Adolfo Antenor Exebio García por formar parte de mi consejo particular y por brindarme su apoyo durante el trabajo de investigación.

A la MC. María Eugenia Delgadillo Piñón por ser parte de mi consejo particular y por las sugerencias para mejorar este trabajo.

Al M.C. Esteban Torrez Vivar e Ing. Carlos Palacios Espinoza por las asesorías para el procesamiento de las imágenes de satélite.

Al Dr. Martín Bolaños y Dr. Adán Villa Herrera por su asesoría para el uso del radiómetro e interpretación de datos y por prestar el equipo para realizar las mediciones.

A MC. Luvia Marlen Pintado López, MC. Ma. Lorenza Toledo Medrano y MC. Betsy Estefanía Pallares Gonzales e Ing. Ángela Maribel Cruz Hernández por su amistad, por su apoyo y vivencias compartidas que me hicieron crecer como persona.

MC. Iralda Yadira Pérez González y M.C. Isabel Villa Montes por su apoyo durante el trabajo de campo.

## DEDICATORIA

A DIOS por el regalo que me das cada día: la VIDA.

A mis padres, Juan Reyes Barragán y Mercedes Carrillo Carrera, por brindarme su amor, confianza, motivación y apoyo; por enseñarme las cosas importantes y valiosas de la vida.

A mis hermanos Roque, Cirilo, Lucia, Pánfilo, Hugo, Antonia y Salvador de quienes he aprendido mucho, gracias por su apoyo, motivación y su amor.

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
3.1	Objetivo general	4
3.2	Objetivos específicos	4
<b>4</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>SUPUESTOS</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL</b>	<b>5</b>
6.1	Tipos de vegetación y uso de la tierra en México	5
6.2	Importancia de los pastizales	6
6.3	Pastizales en México	7
6.4	Manejo de pastizales en México	8
6.5	Pastizales en Oaxaca	10
6.6	Cobertura vegetal en pastizales	11
6.7	Diversidad de especies en pastizales de la Región Mixteca de Oaxaca	12
6.8	Estimación de los cambios de cobertura vegetal	13
6.9	Sensores remotos	14
6.10	Satélite SPOT	15
6.11	Uso de sensores remotos para el seguimiento de vegetación	19
6.12	Índices de vegetación (IV)	20
6.13	Intervalos de cambio en el Índice de vegetación (NDVI)	23
6.14	Correlación entre índices de vegetación y biomasa con imágenes de satélite	24
6.15	Obras y prácticas de conservación de suelos	26
<b>7</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>34</b>
7.1	Localización del área de estudio	34
7.2	Localización de la zona de pastizales en la cuenca Rancho Dolores	34
7.3	<b>Medio biofísico de la zona de pastizales</b>	<b>36</b>
7.4	Localización de las zanjas bordo en la zona de pastizal	42
7.5	Cambios de cobertura vegetal	43
7.6	Análisis de imágenes del satélite SPOT	44



7.7	Evaluación del efecto de las obras entre periodos en polígonos con obras y sin obras	46
7.8	Validación de índices de vegetación de imágenes de satélite con mediciones en campo	54
7.9	Análisis estadístico .....	59
<b>8</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
8.1	Índices de vegetación en pastizales con obras.....	61
8.2	Efecto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en polígonos con obras.....	68
8.3	Correlación entre las variables medidas en parcelas con obras y sin obras .....	82
8.4	Validación de imágenes de satélite con mediciones en campo y composición florística del pastizal con obras y sin obras .....	84
8.5	Composición florística en los polígonos con obras y polígonos testigo .....	85
8.6	Composición florística en pastizales con obras y sin obras .....	90
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>99</b>
<b>10</b>	<b>..... BIBLIOGRAFÍ</b>	
<b>A</b>	<b>.....</b>	<b>100</b>

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de vegetación y usos de la tierra en México. ....	6
Cuadro 2. Coeficientes de agostadero por entidad federativa.....	9
Cuadro 3. Coeficientes de agostadero por tipo de vegetación. ....	10
Cuadro 4. Coeficientes de agostadero en los pastizales de Oaxaca. ....	10
Cuadro 5. Familias con mayor número de especies registradas en la Región Mixteca Oaxaqueña. .....	12
Cuadro 6. Zacates identificados en los pastizales de la región Mixteca Oaxaqueña. ....	13
Cuadro 7. Índices de Vegetación más empleados en el seguimiento de la cobertura vegetal. ....	20
Cuadro 8. Precipitación media anual (mm) en el periodo 2005 a 2016 (Estación meteorológica automatizada 20275). ....	38
Cuadro 9. Imágenes SPOT utilizadas para identificar los cambios de cobertura vegetal.....	44
Cuadro 10. Valor del factor de ajuste en función del porcentaje de cobertura registrado en los sitios de muestreo. ....	51
Cuadro 11. NDVI y SAVI registrado en el área de pastizal, antes y después del establecimiento de las obras. ....	62
Cuadro 12. Análisis de varianza del NDVI y SAVI, antes y después del establecimiento de obras. .....	66
Cuadro 13. Comparación de medias del NDVI y SAVI en los periodos evaluados, con el método de Tukey.....	67
Cuadro 14. Cobertura vegetal e IV en sitios de muestreo del sistema zanja bordo por períodos. ....	69
Cuadro 15. Análisis de varianza de la cobertura vegetal y producción de biomasa en el sistema zanja bordo.....	71
Cuadro 16. Análisis de varianza de los IV en el sistema zanja bordo. ....	72
Cuadro 17. Comparación de medias entre períodos de muestreo, polígonos y sitios en el sistema zanja bordo.....	73
Cuadro 18. Comparación de medias en sitios con el sistema zanja bordo. ....	74
Cuadro 19. Valor medio y desviación estándar de las variables analizadas en los sitios testigo y entre zanjas.....	75
Cuadro 20. Análisis de varianza de los porcentajes de cobertura vegetal y producción de biomasa en los sitios testigo y entre zanjas. ....	77

Cuadro 21. Análisis de varianza de los IV en sitios testigo y entre zanjas.....	78
Cuadro 22. Comparación de medias entre períodos, polígonos y sitios de entre zanja y testigo. ....	79
Cuadro 23. Análisis de varianza del porcentaje de cobertura y producción de biomasa usando dos factores.....	80
Cuadro 24. Análisis de varianza de los IV utilizando la interacción.....	80
Cuadro 25. Comparación de medias considerando la interacción de los polígonos con los sitios de entre zanja y testigo. ....	81
Cuadro 26. Matriz de correlación de variables evaluadas en sitios testigo y entre zanjas. ....	83
Cuadro 27. Correlación entre IV estimados con imágenes de satélite y variables estimadas a partir de mediciones de campo. ....	85
Cuadro 28. Comparación del número de especies registradas en las parcelas con obras y testigo. ....	85
Cuadro 29. Especies encontradas en áreas con zanja bordo. ....	87
Cuadro 30. Especies registradas en áreas testigo.....	87
Cuadro 31. Índices de riqueza, diversidad y semejanza en polígonos con obras y sin obras. ....	89
Cuadro 32. Familias, géneros y especies identificados en áreas muestreadas.....	90
Cuadro 33. Frecuencia del registro de las especies en las unidades de muestreo en pastizales con obras y sin obras.....	92
Cuadro 34. Nombres científicos y acrónimos de especies registradas. ....	97
Cuadro 35. Procedimiento de Permutación de Respuesta Múltiple (MRPP) para identificar diferencia significativa en la composición florística. ....	99

### **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Elementos de los sensores remotos. ....	15
Figura 2. Obras de recolección de agua de lluvia en colinas degradadas, Rajastán, India. ....	30
Figura 3. Tipos de vegetación y usos de la tierra en la cuenca Rancho Dolores, Región Mixteca Oaxaqueña.....	35
Figura 4. Localización del pastizal en la cuenca Rancho Dolores, Región Mixteca Oaxaqueña. ....	36
Figura 5. Climograma de la estación Huajuapán de León, Oaxaca. ....	39
Figura 6. Precipitación diaria registrada en la estación de Huajuapán de León, Oaxaca. ....	39
Figura 7. Unidades geológicas del pastizal en la cuenca Rancho Dolores. ....	40
Figura 8. Tipos de suelo que se presentan en el área de pastizal. ....	41

Figura 9. Pendiente del área de pastizal de la cuenca Rancho Dolores. ....	42
Figura 10. Polígonos con el sistema zanja bordo en el pastizal de la cuenca Rancho Dolores. ....	43
Figura 11. Ubicación de los polígonos de muestreo (con zanjas y sin zanjas). ....	46
Figura 12. a) Polígonos de muestreo; b) Distribución de las obras medidas y sitios de muestreo en polígonos testigo; c) Sitios de muestreo en el sistema zanja bordo. ....	48
Figura 13. Registro de datos radiométricos e imagen nadir en un polígono sin obras. ....	49
Figura 14. Cosecha de biomasa desarrollada en un metro cuadrado. ....	50
Figura 15. Muestreo de vegetación en los polígonos con obras y testigo. ....	50
Figura 16. Distribución de sitios de muestreo en áreas de pastizal con obras y sin obras. ....	55
Figura 17. Condiciones evaluadas en pastizales con obras. ....	56
Figura 18. Registro de datos en sitios de muestreo en las zanjas, bordos y entre zanjas. ....	57
Figura 19. Registro y colecta de especies desarrolladas en el sitio de muestreo. ....	57
Figura 20. Cosecha de biomasa verde en el sitio de muestreo, separación del material. ....	58
Figura 21. Sitios de muestreo en pastizales sin obras. ....	59
Figura 22. Distribución del NDVI (inciso a y b) y SAVI (inciso c y d) en pastizales con el sistema zanja bordo. ....	65
Figura 23. Agrupamiento de sitios de muestreo con el método de Jaccard con base en presencia/ausencia de especies. ....	96

## 1 INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo y la desertificación son procesos naturales complejos que dependen de las condiciones geográficas, meteorológicas y ecológicas, por lo que se consideran como problemas ambientales y sociales (Cotler *et al.*, 2007; Higginbottom and Symeonakis, 2014; Zhou *et al.*, 2016). En México se estima que 64% de la superficie nacional presenta degradación de suelos de diferente tipo química (10.6%), física (2.8%), biológica (5.6%), erosión eólica (23.3%) e hídrica (57.8%) (INEGI, 1999). Las principales causas de la degradación son las actividades agrícolas (17.5%), ganaderas (17.5%), deforestaciones (7.4%), urbanización (1.5%), sobre-explotación de la vegetación (1.1%) y actividades industriales (SEMARNAT, 2005).

La erosión del suelo es un fenómeno natural, provocado por el impacto de la lluvia sobre el suelo, la susceptibilidad de este a erosionarse y la topografía del terreno, la combinación de estos factores determina la erosión potencial (Zhou *et al.*, 2016), que es acelerado por las actividades de manejo del suelo y la vegetación que realiza el hombre, que han causado el constante empobrecimiento del suelo, lo que reduce su productividad (López *et al.*, 2003). La erosión causa la degradación del suelo de forma irreversible ya que se pierden los horizontes superiores del suelo, lo que reduce su calidad y capacidad productiva para generar los bienes y servicios que brinda a la sociedad (Rodríguez *et al.*, 2004; Higginbottom y Symeonakis, 2014).

La vegetación protege al suelo contra la erosión, por lo que, este proceso se ve afectado en función de la cubierta vegetal que se desarrolla sobre el suelo. México presenta diferentes tipos de vegetación como matorral, selva, bosques, pastizales y otros. Los pastizales se distribuyen en 14.52% del territorio nacional (INEGI, 2015), se desarrollan principalmente en extensas regiones secas, en suelos someros y con baja capacidad de almacenamiento de agua para satisfacer los requerimientos hídricos de las plantas, con frecuencia son usados para actividades de apacentamiento.

Estas áreas son sometidas a cargas animales mayores a las que puede soportar la producción de biomasa, sin poner en riesgo la regeneración de la vegetación, lo que provoca que disminuya la cobertura vegetal y la infiltración de agua en el suelo, aumente el volumen de los escurrimientos

superficiales y la erosión hídrica, la productividad del agostadero, se reduzca la producción de biomasa de especies con buena calidad nutritiva y palatable.

En la Región Mixteca del estado de Oaxaca el 95% de la superficie, presenta diferentes grados de erosión, que van de muy alto a moderado, causadas por el aprovechamiento inadecuado de la tierra en actividades agrícolas y ganaderas; en particular el sobrepastoreo ha causado daños severos en el entorno natural ( Cruz y Aguirre 1992; Contreras *et al.*, 2003; Contreras *et al.*, 2005), esto origina una producción de biomasa de 2.8 t ha<sup>-1</sup>, con capacidad de carga animal promedio de 0.3089 UA ha<sup>-1</sup>, con coeficientes de agostadero de 3.23 ha UA<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> situación que ha provocado una tasa de erosión de 17.04 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Fernández *et al.*, 2013).

Para atender el problema de pérdida de suelos en la región Mixteca Oaxaqueña, al igual que en otras regiones del país, el gobierno a través de apoyos otorgados a ejidos y pequeños propietarios financia acciones para captar agua y reducir las pérdidas de suelo, con la construcción de zanja bordo entre otras obras y prácticas, con la finalidad de recuperar y conservar el suelo, reducir los escurrimientos superficiales, aumentar la infiltración del agua en el suelo y favorecer el desarrollo de la biomasa para el consumo del ganado.

El sistema zanja bordo se realiza en diferentes condiciones topográficas; sin embargo, en México existen pocos estudios que evidencien su impacto en las áreas donde se establecieron. El gobierno evalúa las obras con el cumplimiento de metas físicas y financieras (montos invertidos) antes de finiquitarlas y comprueba que se hayan realizado de acuerdo a los criterios establecidos en las reglas de operación de los programas de apoyo; contabiliza la superficie, ejidos, pequeños productores apoyados y el monto económico invertido.

Las evaluaciones hechas a los programas de gobierno consideran la cantidad y tipo de obras apoyadas, el grado de conservación de la obra, volumen de azolves retenidos (erosión evitada en t ha<sup>-1</sup>), capacidad máxima de captación de agua. En el 2006 las obras más realizadas fueron las zanja bordo (35% del total de obras), los resultados indican el volumen total de azolves retenido fue de 696.79 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y es la obras con mayor capacidad de retención con 69.40 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (Magaña y Diakite, 2007). En el 2009 la retención de azolves de las zanjas fue de 512.2 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y redujo la erosión en un 84% (Torres *et al.*, 2010).

Cotler *et al.* (2013) y Cotler *et al.* (2015) evaluaron las condiciones ambientales (sustratos, pendientes, altitudes, variabilidad climática, texturas del suelo, tipos de vegetación y condiciones de erosión) y sociales en las que se realizaron obras del sistema zanja bordo, así como su aceptación en las comunidades rurales, pero no existen evaluaciones que analicen los cambios la cobertura vegetal asociadas al efecto de las obras.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto del sistema zanja bordo en el desarrollo de la cobertura vegetal en un pastizal de la cuenca Rancho Dolores, Región Mixteca Oaxaqueña, donde se realizan actividades de pastoreo, para lo cual fue necesario estimar los cambios de cobertura vegetal en el sistema zanja bordo y en áreas sin obras, determinar la relación entre el porcentaje de cobertura aérea y producción de biomasa con índices de vegetación y evaluar el efecto del sistema zanja bordo en el desarrollo de especies forrajeras.

## 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El pastizal es una comunidad vegetal dominada por gramíneas y herbáceas de diferentes familias, se desarrollan en suelos poco profundos en mesetas, valles y laderas poco inclinadas, fértiles y medianamente ricos en materia orgánica. Este tipo de vegetación toma importancia debido a que es un medio natural propicio para la alimentación del ganado y es aprovechado mediante el pastoreo extensivo o semi intensivo (Waite, 1994; Gyde, 2007).

En México por su ubicación geográfica y diversidad climáticas la capacidad productiva de los pastizales varía en cada región; los coeficientes de agostadero fluctúan de 1.80 ha UA<sup>-1</sup> en Chiapas a 52.17 ha UA<sup>-1</sup> en Baja California Sur, para Oaxaca es de 4.12 ha UA<sup>-1</sup>, valores estimados en condiciones naturales (COTECOCA, 2002<sup>1</sup>); sin embargo, mantener este ecosistema sin disturbios es complicado porque no existe una cultura de manejo del agostadero por falta de organización y planeación de uso por los propietarios, lo que origina que se reduzca la productividad y se incremente el coeficiente de agostaderos.

Las deficiencias en manejo de los pastizales son reduce la cobertura vegetal, la altura de los pastizales varia de 20 a 70 cm en condiciones naturales y el sobrepastoreo disminuye la altura y la cobertura hasta en 50% (Rzedowski, 2006). El pastoreo modifica la composición florística,

---

<sup>1</sup> COTECOCA. 2002. Coeficientes de agostadero por entidad federativa. 1:2002–2002.

disminuye la densidad de especies nativas con buenas cualidades forrajeras, propician el desplazamiento de especies nativas por invasoras, indicadoras de disturbio o sobrepastoreo; esto convierte a los pastizales en áreas susceptibles a la erosión hídrica.

Por lo anterior, es importante conocer la producción de biomasa en los pastizales, la cual se puede estimar con inventarios de vegetación donde se mide la altura, cobertura, frecuencia y densidad de especies (Thomson *et al.*, 1998; Contreras *et al.*, 2003); otros métodos involucran el uso de índices de vegetación (IV) estimados con valores de reflectancia registradas en áreas de cultivo (Olson y Cochran, 1998; Calera *et al.*, 2004); en pastizales para estimar la capacidad de carga animal (Villa *et al.*, 2014), así como el uso de IV estimados con imágenes de satélite (Wylie *et al.*, 1995; Medina *et al.*, 2009); los métodos mostraron resultados confiables pero son válidos solo en los sitios bajo estudio.

En la Mixteca Oaxaqueña, los pastizales muestran deterioro y reducción de la cobertura vegetal y existe mayor superficie de suelo expuesto a las intensas lluvias que se presentan en la región lo cual ocasiona pérdidas de suelo en diferentes grados y ocasionan la degradación de los terrenos. Debido a los problemas de erosión en las áreas de pastoreo, el gobierno ha aportado incentivos para establecer obras y prácticas de conservación de suelo y agua, como el sistema zanja bordo. En este trabajo se estudió el efecto del sistema zanja bordo en la cobertura vegetal y producción de biomasa en áreas de Pastizal, en la cuenca Rancho Dolores de la Región Mixteca Oaxaqueña.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo general

- Evaluar el impacto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en un pastizal de la cuenca Rancho Dolores, Región Mixteca Oaxaqueña.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Estimar la diferencia entre la cobertura vegetal en las áreas con y sin el sistema zanja bordo.
- Determinar la relación entre el porcentaje de cobertura aérea y producción de biomasa con índices de vegetación.



- Evaluar el efecto del sistema zanja bordo en el desarrollo de especies de preferencia forrajera.

#### 4 HIPÓTESIS

- El sistema zanja bordo incrementa la calidad y cantidad de cobertura vegetal en zonas de pastizales degradados.
- Los índices de vegetación permiten estimar el porcentaje de cobertura vegetal en áreas con el sistema zanja bordo.

#### 5 SUPUESTOS

- Los datos de reflectancia obtenidos con el radiómetro son confiables para estimar Índices de Vegetación.
- La información obtenida de las imágenes de satélite SPOT, es confiable para el análisis de vegetación.

#### 6 MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL

Este apartado menciona los trabajos relacionados con el tema de investigación, como la importancia de los pastizales en la ganadería, el sobrepastoreo en México en general y en la región Mixteca Oaxaqueña en particular, sus efectos en la disminución de la cobertura vegetal. las herramientas que se han utilizado para la medición de la cobertura vegetal, el uso de sensores remotos e Índices de vegetación (IV) para el seguimiento de producción de biomasa en pastizales y la confiabilidad del uso de imágenes de satélite para estimar IV.

##### 6.1 Tipos de vegetación y uso de la tierra en México

INEGI, (2015) identificó 59 tipos de vegetación en México, entre los que se encuentran los pastizales, matorrales, selvas, bosques, entre otros; se estima que diferentes tipos de matorrales ocupan una superficie que representa 26.42% del territorio nacional, seguido por los bosques en 17.82%, selvas con 17.15%, pastizales naturales e inducidos en 14.52% y otros tipos de vegetación ocupan 7.41%. Las áreas agrícolas, urbanas y sin vegetación en 16.68% (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tipos de vegetación y usos de la tierra en México.

<b>Tipos de vegetación y uso de la tierra</b>	<b>Superficie (millones de ha)</b>	<b>Porcentaje‡</b>
Matorral	51.03	26.42
Bosque	34.41	17.82
Selva	33.12	17.15
Área agrícola	30.26	15.67
Pastizal	28.04	14.52
Otros tipos de vegetación	14.32	7.41
Área urbana	1.06	0.55
Área sin vegetación	0.90	0.46
<b>Total</b>	<b>193.14</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Usos de suelo y tipos de vegetación de México (INEGI, 2015). ‡ Respecto al total del territorio nacional.

## 6.2 Importancia de los pastizales

Los pastizales son comunidades vegetales donde las especies dominantes corresponden al estrato herbáceo, la cobertura arbórea es escasa, menor a 10%; por lo general, se desarrollan en zonas áridas y semiáridas; el uso que el hombre da este tipo de vegetación considera la interacción de plantas y animales domésticos, razón por la que se considera el principal recurso natural no cultivado para la alimentación y crianza de ganado en muchas partes del mundo (Waite, 1994; Gyde, 2007).

El pastizal tiene extensa distribución en el mundo, pero las estimaciones referidas tienen una alta variabilidad debido a la diferencia que existe en las fuentes de información consultadas (Gyde, 2007). Se menciona que 10.7 millones de km<sup>2</sup> (8.3%) de la superficie total de la tierra están cubiertos por pastizales. En México la superficie de pastizal considera pastizal natural, áreas de transición, áreas fragmentadas, así como mezquital y ocupa el décimo segundo lugar entre los países con mayor superficie (White *et al.*, 2000).

Los pastizales se consideran un recurso natural importante por sus funciones ecológicas y ambientales, entre ellas la protección de protección del suelo y el almacenamiento de carbono, la diversidad biológica y la oferta de servicios; que proporcionan bienes y servicios a la sociedad

como es la producción alimentos, el desarrollo de plantas medicinales y forrajeras (White *et al.*, 2000; Gyde, 2007). El manejo adecuado de este tipo de vegetación proporciona seguridad alimentaria, reduce la pobreza y es la fuente principal de alimento que utilizan millones de personas para el ganado, por lo que también representa una alternativa de ingresos para las personas de las comunidades rurales (Cruz y Aguirre, 1992; Gyde, 2007).

Las actividades ganaderas tienen una función importante en la sociedad e influyen de forma directa en la conservación de los recursos naturales del país, debido al aprovechamiento de pastizales y matorrales, que con frecuencia presentan sobrepastoreo que ocasiona degradación en el suelo y la vegetación, reduce la cubierta vegetal y ocasiona pérdida de la capa superficial del suelo (Cruz y Aguirre, 1992; Contreras *et al.*, 2003).

Además del sobrepastoreo los pastizales se ven amenazados por el cambio de uso de la tierra, fragmentación de la cobertura vegetal, introducción de especies exóticas e incendios (White *et al.*, 2000; Gyde, 2007); los cambios que se producen en los pastizales se reflejan en la composición florística, en especial en la presencia de especie deseables, lo cual incide sobre la cobertura vegetal e incrementa la pérdida del suelo (Cruz y Aguirre, 1992; White *et al.*, 2000).

Dada la importancia de los pastizales es necesario definir que es un agostadero y cuáles son los servicios que se obtienen.

Un agostadero es un área natural no apta para la agricultura, con frecuencia son áreas de pastizal; sin embargo, no son exclusivos de un tipo de vegetación, pueden estar ubicados en zonas áridas, semiáridas y tropicales; comprenden otros tipos de vegetación como matorrales, bosques y áreas ribereñas; el principal servicio que los agostaderos ofrecen a la sociedad es el desarrollo de la ganadería (Melgoza, 2006; INIFAP, 2011<sup>2</sup>).

### 6.3 Pastizales en México

Los pastizales ocupan una superficie que representa 14.52% del territorio nacional en México, incluye pastizales naturales e inducidos, está asociado a condiciones climáticas que favorecen el desarrollo de las comunidades vegetales que caracterizan este ecosistema. Se desarrollan en zonas

---

<sup>2</sup> INIFAP (2011). Ajuste de carga animal en tierras de pastoreo. [http://utep.inifap.gob.mx/pdf\\_s/MANUAL\\_AJUSTE\\_DE\\_CARGA.pdf](http://utep.inifap.gob.mx/pdf_s/MANUAL_AJUSTE_DE_CARGA.pdf).

con baja precipitación que varían entre 400 a 600 mm anuales y se distribuye en estados del noreste, noroeste y centro de México, así como en pequeñas porciones de los estados de Tlaxcala, Puebla, Oaxaca y Guerrero (Rzedowski, 2006); proveen forraje para el apacentamiento de ganado caprino, ovino, vacuno y equinos principalmente, de los cuales el hombre obtiene productos como carne, leche, lana, entre otros e ingresos que apoya su economía familiar (Cruz y Aguirre, 1992; Gyde, 2007).

#### 6.4 Manejo de pastizales en México

El manejo adecuado implica conocer la productividad de las áreas en cuestión, para ello, se utiliza la capacidad de carga animal (CCA) y el coeficiente de agostadero (CA). La CCA es la cantidad de ganado en UA<sup>3</sup> que puede mantenerse durante todo el año en una unidad de producción sin deteriorar los recursos naturales, se expresa en unidad animal por hectárea (UA ha<sup>-1</sup>) (INIFAP, 2011) y se calcula con la siguiente ecuación.

$$CCA = \frac{\sum MUAE \times FU}{RUA}$$

Donde:

CCA: capacidad de carga animal (UA ha<sup>-1</sup>).

MUAE: masa por unidad de área por cada especie.

FU: factor de uso.

RUA: requerimiento de la Unidad Animal.

Factor de uso (FU) es el porcentaje del forraje que puede consumir como alimento el ganado, bajo un determinado manejo del agostadero/pastizal sin comprometer su regeneración. Este se determina con muestreos de la producción de materia seca de las diferentes especies presentes en el agostadero para obtener la materia seca total disponible en el sitio.

---

<sup>3</sup> La Unidad animal (UA) la constituye una vaca adulta (vientre bovino) de 400 a 450 kg de peso, en gestación o mantenimiento que para satisfacer sus necesidades alimenticias y cumplir con su función zootécnica.

Requerimiento por Unidad Animal (RUA) es la cantidad aproximada de forraje en materia seca que cada UA consume por día (13.5 kg), por mes (410.6 kg) y por año (4,927.5 kg) para mantenerse (INIFAP, 2011).

El coeficiente de agostadero (CA), es el número de hectáreas necesarias para sostener una UA durante un año y varía según las condiciones de clima, suelo y vegetación de la región.

$$CA = \frac{ha}{UA}$$

Donde:

CA: coeficiente o índice de agostadero

ha: hectáreas

UA: Unidad animal.

México presenta diferentes coeficientes de agostadero por entidad federativa, para condiciones naturales, en años con precipitación normal, pero para fines de manejo se debe considerar la condición actual de la vegetación. El Cuadro 2, muestra el coeficiente de agostadero para Oaxaca, y los estados con mayor y menor CA.

Cuadro 2. Coeficientes de agostadero por entidad federativa.

Entidad federativa	ha UA <sup>-1</sup>		
	Mínimo	Máximo	Ponderado
Baja California Sur	28.0	80.0	52.2
Baja California	15.0	45.0	33.9
Oaxaca	0.8	33.4	4.1
Chiapas	0.8	18.9	1.8
Veracruz	0.8	26.3	1.8
Promedio	4.7	33.8	11.9

Fuente: Comisión Técnico consultiva de Coeficientes de agostadero (COTECOCA), obtenida de Memorias de coeficientes de agostaderos de México (1972 – 1986).

Debido a que los agostaderos pueden establecerse en diferentes tipos de vegetación, donde se desarrollan especies arbustivas y arbóreas dependiendo del tipo de ganado que se produce en la región (Franco *et al.*, 2014; Ramírez *et al.*, 2014). Se determinaron los CA por tipo de vegetación con base en la presencia de especies nativas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Coeficientes de agostadero por tipo de vegetación.

Tipos de vegetación	Superficie (ha)	CA mínimo (ha UA <sup>-1</sup> )	CA máximo (ha UA <sup>-1</sup> )
Pastizal	22,769,641	5.01	26.6
Matorral	61,542,091	7.46	80
Selva	47,818,710	0.8	32.04
Bosque	45,974,597	0.8	43.52
Otros tipos de vegetación	6,933,256	1	48.19

Fuente: Comisión Técnico consultiva de Coeficientes de agostadero (COTECOCA), obtenida de Memorias de coeficientes de agostaderos de México años 1972 – 1986.

### 6.5 Pastizales en Oaxaca

El pastizal se desarrolla como vegetación inducida en diferentes partes del estado; en la región Mixteca se distribuyen en los municipios de Nochixtlán, Coixtlahuaca, Juxtlahuaca , Tepozcolula, Centro, Huajuapán, Zaachila, Zimatlan, Tlacolula, Ejutla, Ixtlan, Tehuantepec, Tuxtepec, Juchitán, Sola de Vega y Miahuatlán en terrenos con pendientes que varían de 1% a 65%, en altitudes de 1,500 a 2,150 msnm (SARH, 1980).

Desde 1980 Oaxaca se consideró entre los estados importantes de México por sus condiciones ecológicas, con perspectivas para el desarrollo ganadero, por lo cual se determinó el CA para los pastizales y los resultados indicaron que en promedio se produce 390.37 kg de forraje, para un CA de 12.6 ha UA<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, con variación de 32.02 a 10.4 ha UA<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de acuerdo a la condición del pastizal (Cuadro 4) (SARH, 1980).

Cuadro 4. Coeficientes de agostadero en los pastizales de Oaxaca.

Condición del pastizal	CA (ha UA <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )‡
Pobre	32.02
Regular	17.45
Buena	12.60
Excelente	10.40

Fuente: (SARH, 1980).‡ El coeficiente de agostadero se calculó en condiciones de precipitación normal y con base a vegetación nativa.

Tiltepec, Oaxaca es el municipio donde 96% de los habitantes tienen ganado, sin embargo, la falta de reglamentos y organización para el manejo de las áreas de apacentamiento en la propiedad privada y comunal tiene como consecuencia un número de animales que supera la carga animal, situación que también se presenta en otras regiones de la entidad. (Cruz y Aguirre, 1992).

El municipio de Tiltepec Oaxaca en 1992 registro un CA con variaciones de 2.77 ha UA<sup>-1</sup> en los meses de octubre a marzo, a 3.84 ha UA<sup>-1</sup> en los meses de noviembre a febrero (Cruz y Aguirre, 1992). El municipio de Santo Domingo Yanhuitlán, Oaxaca en 1996 se cuantificaron 3,246 animales (2,128 caprinos y 1,118 ovinos) en 1,143 ha, los CA que variaron de 15, 25 y 34 ha UA<sup>-1</sup>, propuestos por la COTECOCA se requerían 10,063 ha de agostadero para mantener el hato ganadero estimado (Contreras *et al.*, 2003). Las estimaciones para el Rio Mixteco, dentro de la región Mixteca Oaxaqueña indican CA de 3.23 ha UA<sup>-1</sup> (Fernández *et al.*, 2013) con variaciones estacionales de acuerdo a la época del año.

La consecuencia del sobrepastoreo en la región se refleja en la condición de la cubierta vegetal, de regular a pobre de acuerdo con los criterios establecidos por Holechek *et al.*, (1989), que en combinación de las condiciones topográficas del favorecen la erosión laminar y en algunos casos erosión más avanzadas con cárcavas abundantes (Contreras *et al.*, 2003).

## 6.6 Cobertura vegetal en pastizales

El desarrollo de la vegetación y la reducción de la pérdida del suelo son dos procesos dependientes, durante el proceso de erosión, se pierde la parte del estrato que almacena el agua y nutrientes, necesarios para el desarrollo vegetal (García, 2004). La cobertura protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia que causan el desprendimiento de las partículas, rotura de agregados y la pérdida de suelo, este efecto se ha observado al evaluar el escurrimiento superficial en parcelas de cultivos (Lianes y Marchamalo, 2009; Huerta *et al.*, 2012) y en bosques donde se presentan diferentes estratos vegetales (Zhou *et al.*, 2016).

La cobertura vegetal también tiene efectos a diferentes profundidades del suelo, esto depende de la longitud y densidad de su sistema radical, esto se ha comprobado al obtener correlaciones negativas entre densidad longitudinal de la raíz, el escurrimiento y pérdida de suelo (Huerta *et al.*, 2012; Ruiz *et al.*, 2013). La cobertura vegetal viva y muerta contribuye a mejorar el suelo y reduce

de 4 a 6 veces la erosión, de 0.6 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a 1.3 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Stanchi *et al.*, 2012; Ruiz *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2016).

### 6.7 Diversidad de especies en pastizales de la Región Mixteca de Oaxaca

La diversidad biológica se define como la variabilidad entre organismos, incluye diversidad dentro de las especies, entre especies y entre ecosistemas. La diversidad incluye la riqueza y equidad de especies (Moreno, 2001); el primero es el número de especies establecidas en un área determinada, constituye el término más antiguo y simple de la diversidad de especies. La equidad de especies es el grado de repartición de los individuos de cada especie presente (Badii *et al.*, 2008).

Estudios realizados en la región Mixteca Oaxaqueña registraron 188 familias, 980 géneros y 3,284 especies, de estas más del 40% de la riqueza de especies corresponde a las familias Asteraceae, Fabaceae, Orchidaceae y Poaceae, en menor porcentaje se desarrollan especies que pertenecen a Lamiaceae, Euphorbiaceae, Cactaceae y Solanaceae; además de otras familias menos comunes (Cuadro 5). Los distritos con mayor riqueza de especies son Juxtlahuaca y Huajuapán con 30.2% y 18.63% de las especies encontradas en la región en la Región Mixteca Oaxaqueña<sup>4</sup>.

Cuadro 5. Familias con mayor número de especies registradas en la Región Mixteca Oaxaqueña.

	Familia	Género	%	Taxa	%
1	Asteraceae	137	13.98	565	17.20
2	Fabaceae	77	7.86	467	14.22
3	Orchidaceae	52	5.31	157	4.78
4	Poaceae	64	6.53	149	4.54
5	Lamiaceae	17	1.73	107	3.26
6	Euphorbiaceae	16	1.63	87	2.65
7	Cactaceae	21	2.14	78	2.38
8	Solanaceae	13	1.33	76	2.31
9	Bromeliaceae	7	0.71	74	2.25
	Total global	980		3284	

<sup>4</sup> Reyes-Samntiago, J., G.E. Moreno-Cárdenas. Lista florística de la Mixteca Oaxaqueña. Reporte Técnico Final. Retrieved from <http://www.proyectomixteca.org.mx/documentos/> consultado 27 de julio del 2017.



Los pastizales de la región Mixteca permiten el desarrollo de zacates con capacidad de adaptación a condiciones limitativas como suelos delgados con baja capacidad de retención de humedad, alta pedregosidad y periodos de sequía prolongados; las especies presentan diferente preferencia forrajera que va de excelente a pobre; entre las que presentan excelente valor se pueden mencionar *Brachiaria brizantha* y *Pennisetum clandestinum* ( SARH 1980; Fernández *et al.*, 2013) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Zacates identificados en los pastizales de la región Mixteca Oaxaqueña.

Nombre científico	Nombre común	Valor forrajero
<i>Andropogon hirtiflorus</i>	Sin nombre común	Bueno
<i>Aristida ternipes</i>	Zacate araña	Regular
<i>Bothriochloa barbinodis</i>	Popotillo plateado	Regular
<i>Bouteloua repens</i>	Navajita rastrera	Bueno
<i>Brachiaria brizantha</i>	Pasto insurgente	Excelente
<i>Cenchrus echinatus</i>	Zacate cadillo	Bueno
<i>Chloris virgata sw.</i>	Barbas de indio	Regular
<i>Eragrostis mexicana</i>	Zacate casamiento	Pobre
<i>Heteropogon contortus</i>	Zacate barba negra	Regular a bueno
<i>Hilaria cenchroides</i>	Galleta grama	Bueno
<i>Rhynchelytrum repens</i>	Zacate rosado	Pobre a medio
<i>Pennisetum clandestinum</i>	Zacate kikuyo	Excelente
<i>Setaria leucopila</i>	Tempranero	Bueno a excelente
<i>Setaria macrostachya</i>	Pajita tempranera	Bueno

### 6.8 Estimación de los cambios de cobertura vegetal

Los cambios en la cobertura vegetal se pueden estimar con muestreos de campo en diferentes épocas y al igual que el índice de área foliar, son variables importantes que se han utilizado para el seguimiento sistemático de la dinámica de la vegetación debido a que regula la cantidad de luz penetrante, en caso de coberturas arbóreas (Aguirre *et al.*, 2011). También se pueden estimar con el uso de sensores remotos que permiten estimar la reflectancia de diferentes longitudes de onda que genera la cubierta vegetal, para obtener índices de vegetación (IV) que deben estar asociados con las mediciones de campos (sitios de entrenamiento) para asociar los IV con los porcentajes de cobertura vegetal.

## 6.9 Sensores remotos

La teledetección es la ciencia o arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos con dispositivos llamados sensores remotos; estos dispositivos son capaces de captar relaciones espectrales y espaciales de objetos y materiales sin estar en contacto directo con ellos, bajo el supuesto que entre el suelo y el sensor existe una interacción energética solar o de un haz energético artificial, ya sea por emisión propia o a través del registro de datos en formato fotográfico y digital (numérico), pero deben estar en formato digital para ser procesados en computadora (Perez, 2007).

Los sensores remotos pueden ser colocados en plataformas (satélites) o transportados (aviones), esta característica determina la resolución espacial y espectral, lo cual permite generar datos para diferentes usos como el diseño de un mapa, monitoreo de recursos en la tierra, entre otros (Figura 1). Los elementos que incluye un sistema de sensores remotos son los que se describen a continuación (Pérez, 2007).

- a) Fuente de energía que es el origen de la energía electromagnética detectada por el sensor, la fuente de energía más importante es el sol, pero también puede realizarse teledetección a partir de la energía emitida por los mismos objetos observados o desde fuentes artificiales.
- b) Propagación a través de la atmosfera.
- c) Rasgos de la superficie terrestre formada por distintas masas de vegetación, suelo, agua o infraestructura que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- d) Retransmisión a través de la atmosfera al sistema de recepción – comercialización en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y después de realizar las correcciones oportunas se distribuyen a los interesados.
- e) Sistema integrado por el sensor y la plataforma que lo alberga, capta la energía procedente de la cubierta terrestre, la codifica y graba o envía en forma directa al sistema de recepción.

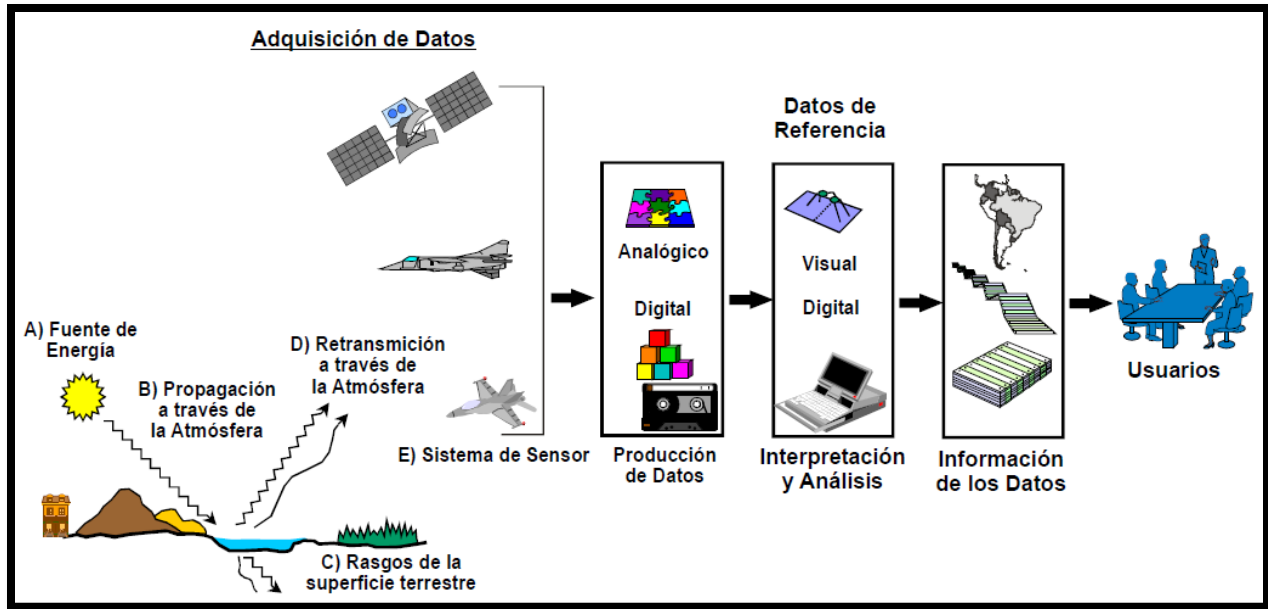


Figura 1. Elementos de los sensores remotos.

Fuente: imagen tomada de Pérez. (2007).

## 6.10 Satélite SPOT

En este apartado se mencionan los niveles de procesamiento, la precisión de localización sobre la tierra y las ecuaciones necesarias para las correcciones que deben hacerse de las imágenes del satélite SPOT 5, 6 y 7 antes de obtener algún indicador.

El Satelite Pour l'Observation de la Tierra (SPOT, por sus siglas en francés) es un sistema de imágenes ópticas espaciales de alta resolución; se considera el satélite más potente de su generación, los datos SPOT constituyen la primera referencia mundial en el ámbito de imágenes satelitales.

Actualmente las escenas del satélite SPOT se distribuyen en dos niveles de procesamiento que son: nivel Primary y Estandar Ortho. En el Nivel Primary, la imagen es lo más parecido a su forma original como fue capturada por el sensor; las imágenes con este nivel de procesamiento son óptimas para personas familiarizadas con las técnicas de procesamiento de imágenes satelitales que puedan aplicar sus propios métodos de orto-rectificación. En el Nivel Estándar Otho, corrige

las imágenes por el ángulo de visión y efectos de la superficie terrestre para ser superpuesta sobre la tierra; los ajustes radiométricos y geométricos, para ello se realizan una orto-rectificación, utilizando un MDE para eliminar el efecto de perspectiva sobre el suelo (no sobre edificios). Este nivel de procesamiento permite el uso sencillo y directo de la imagen en cualquier sistema de información geográfica (Astrium, 2010<sup>5</sup>).

#### 6.10.1 Corrección de imágenes SPOT

Las correcciones se hacen con la finalidad de minimizar o eliminar las distorsiones producidas durante su adquisición, las cuales dependen del tipo de sensor con que se adquieren (cámara o imagen) y la plataforma (avión plataforma). Las correcciones que se aplican son geométricas y radiométricas.

#### 6.10.2 Corrección geométrica

Corrige los desplazamientos y distorsiones geométricas ocasionadas por diversas fuentes como son: inclinación del sensor, la influencia del relieve, la rotación de la tierra durante el tiempo de adquisición de las imágenes, velocidad limitada por el barrido de los sensores en relación de la velocidad de la plataforma y la curvatura de la tierra; la corrección geométrica permite representar la imagen en una proyección cartográfica (Perez, 2007).

Esta corrección consiste en determinar puntos de control sobre el terreno con un GPS y ubicarlos en la imagen, se hace un análisis de regresión lineal múltiple entre coordenadas de origen y coordenadas destino, se calculan los parámetros de ajuste, mismos que servirán para proyectar la imagen. Se lleva a cabo un método de muestreo para otorgar a los píxeles un valor de referencia en la nueva ubicación, para ello existen tres opciones vecino más cercano, interpolación bilineal y convolución cúbica (Reséndiz, 2015).

---

<sup>5</sup> Niveles de preprocesamiento y precisión de localización. Disponible en [http://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r2006\\_9\\_spot\\_niveles\\_de\\_preprocesamiento\\_esp\\_sept2010.pdf](http://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r2006_9_spot_niveles_de_preprocesamiento_esp_sept2010.pdf). Consultado el 16 de febrero del 2016.

La opción del vecino más cercano, se basa en situar en cada celda de la imagen corregida el nivel digital del pixel más cercano en la imagen original, en este método conserva la variabilidad espacial y existe menos transformación en los niveles digitales originales, su principal inconveniente es la distorsión de los rasgos lineales de la imagen (carreteras y caminos).

En la interpolación bilineal se promedian los números digitales de los cuatro pixeles más cercanos en la imagen inicial. Promedia la distancia del pixel más cercano en la imagen inicial. Reduce el efecto de reducción de rasgos lineales y desvanece un tanto los contrastes espaciales de la imagen original.

La convolución cúbica considera los niveles digitales de los 16 pixeles más próximos, el efecto visual es mejor y supone el cálculo más elevado.

### 6.10.3 Corrección radiométrica

Se aplica para corregir los cambios producidos en la intensidad de los pixeles que componen una imagen distorsionados por efectos de la atmosfera sobre el campo electromagnético; la atmosfera extiende la energía en relación a las longitudes de onda y absorbe la energía en determinadas longitudes de onda debido a los gases atmosféricos.

Las correcciones radiométricas es convertir la información de cada pixel de la imagen original, de números o niveles digitales (ND) a reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmosfera, es decir, sin los efectos de la misma; esto permite disminuir los efectos de dispersión o absorción ocasionados por la presencia de partículas en la atmosfera. Además, buscan remover el efecto del ángulo de incidencia de energía solar y la distancia de la tierra al sol, que se produce por las diferencias de tiempo en la toma de las imágenes (Pérez, 2007; Reséndiz 2015).

#### a) Conversión de niveles digitales a radianza

El cálculo de la reflectancia en la parte superior de la atmosfera (TOA) es el primer paso en el proceso de corrección radiométrica; esta fase considera parámetros de calibración para la fecha de adquisición, que son coeficientes absolutos y los valores de ganancia analógica, el ángulo del zenit solar y la irradiación solar normalizada, con el fin de obtener mediciones físicas independientes de las características del radiómetro. Para ello convertimos los conteos numéricos a radianza con la siguiente relación (Valdez *et al.*, 2006; Astrium, 2013; Navarro, 2014).

$$L_{(b)}(p) = \frac{DN(p)}{GAIN(b)} + BIAS(b)$$

Donde:

$L_{(b)}(p)$ : radianza espectral al tope de la atmósfera (en  $Wsr^{-1} m^{-2} \mu^{-1}$ ).

$DN(p)$ : números digitales de la banda.

$GAIN(b)$ : valor de ganancia de la banda.

$BIAS(b)$ : valor de la desviación de la banda.

b) Conversión de radianza a reflectancia

A partir de la radianza se calcula la reflectancia que estará expresada en fracción decimal entre 0 y 1. Para las imágenes SPOT 5 la fórmula para hacer esta conversión es la recomendada por Posada, (2012); Navarro, (2014).

$$\rho = \frac{\pi \times L_{(b)} \times d^2}{ESUN \times \cos(SZ)}$$

Dónde:

$\rho$ : reflectancia de la banda.

$L_{(b)}$ : radianza espectral.

$d^2$ : cuadrado de la distancia del sol a la tierra en unidades astronómicas  $d^2 = (1 - 0.01674 \times \cos(0.9856(DJ - 4)))^2$ , DJ: día juliano

$ESUN$ : irradianza solar media de la atmósfera. Para este parámetro los datos se tomaron de irradianza mencionados por Navarro, (2014).

$SZ$ : ángulo cenital solar en radianes  $SZ = (90 - \theta_e) \frac{\pi}{180}$ ,  $\theta_e$ : ángulo de elevación de adquisición de la imagen.

La transformación de radianza a reflectancia de las imágenes SPOT 6 y 7 se realiza con la fórmula propuesta por Astrium, (2013).

$$P_{(b)}(p) = \frac{\pi \times L_b(p)}{E_0(b) \times \cos(\theta_s)}$$

Dónde:

$P_{(b)}(p)$ : reflectancia de la banda.

$L_b(p)$ : radianza espectral.

$E_0(b)$ : irradianza solar media de la atmósfera.

$\cos \theta_s$ : coseno del ángulo de paso.

### 6.11 Uso de sensores remotos para el seguimiento de vegetación

El uso de los sensores remotos para el seguimiento sistemático de los recursos naturales terrestres inicio en 1970, se emplean con frecuencia para identificar cambios en la cobertura vegetal y dar seguimiento a las etapas de desarrollo de los cultivos, debido a que puede caracterizarse con base en la resta entre los valores de las bandas espectrales roja (R) e infrarrojo cercano (IRC), que permiten diferenciar la cobertura vegetal de otros objetos sobre la superficie de la tierra ( Tucker, 1979; Valdez *et al.*, 2006). El uso de estas dos bandas se debe a que 90% de la información de la vegetación está contenida en las bandas del rojo (por el contenido de clorofila) e infrarrojo cercano controlado por el Índice de Área Foliar (IAF) y la densidad de la cobertura verde (Gilbert *et al.*, 1997).

Otra alternativa que se ha implementado para registrar información de la reflectancia de cobertura vegetal es el uso de radiómetros espectrales con diferente número de bandas; con frecuencia contienen las bandas Azul (A), Verde (V), Rojo (R), Infrarrojo Cercano (NIR) e Infrarrojo Medio (SWIR); debido a que las bandas R e NIR utilizan el diseño de los diferentes índices de vegetación, los radiómetros que contienen estas bandas son de utilidad para realizar mediciones directas y obtener información precisa.

El uso de radiómetros espectrales facilita el registro de datos para el diseño y calibración de modelos, con los que es posible analizar el desarrollo fenológico de la vegetación (Calera *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2009; Romero *et al.*, 2009; Casiano y Paz, 2014); proponer modelos para corregir la geometría sol-sensor en los sensores satelitales por el ancho de barrido y la variación

en el ángulo de visión (Bolaños y Paz, 2010), monitorear el crecimiento de plantas sometidas a estrés (Reyes *et al.*, 2011; Ruiz *et al.*, 2011), estima la producción de biomasa y rendimiento en cultivos (Pascual *et al.*, 2011), producción de biomasa y capacidad de carga animal en agostaderos (Villa *et al.*, 2014).

## 6.12 Índices de vegetación (IV)

Los IV son indicadores del estado de desarrollo de la cobertura vegetal o bien de las condiciones de uso de suelo, se calculan a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda (Gilabert *et al.*, 1997); representa cantidades desconocidas de cobertura vegetal y suelo y características funcionales de la planta activa, así como el vigor y la estructura del dosel (Rodríguez y Bullock, 2013).

El uso de sensores remotos para el seguimiento de la vegetación ha dado lugar a la propuesta de diferentes IV para medir variables como el índice de área foliar y la cobertura aérea de las plantas (Paz *et al.*, 2014), la mayoría de estos índices emplean las bandas espectrales Rojo e Infrarrojo Cercano. Los índices más empleados durante los últimos 30 años, para el seguimiento de la dinámica de la vegetación se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Índices de Vegetación más empleados en el seguimiento de la cobertura vegetal.

Formula	Índice de Vegetación	Referencia
$RVI = \frac{IRC}{R}$	Índice de Vegetación de Proporción	Pearson y Miller (1972)
$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	Rouse <i>et al.</i> (1974)
$PVI = \frac{(NIR - aR - b)}{\sqrt{a^2 + 1}}$	Índice de Vegetación Perpendicular	Richardson <i>et al.</i> (1977)



Formula	Índice de Vegetación	Referencia
$WDVI = NIR = (aR)$	Índice de Vegetación de Diferencia Ponderada	Richardson <i>et al.</i> (1977)
$SAVI = \left( \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right) (1 + L)$	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo	Huete (1988)
$MSAVI = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - [8(NIR - R)]}}{2}$	SAVI Modificado	Qi <i>et al.</i> (1989)
$TSAVI = \frac{[a(NIR - aR - b)]}{(R + aNIR - ab)}$	SAVI transformado	Baret <i>et al.</i> (1989)

Fuente: Gilabert *et al.* (1997).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es el más utilizado por la facilidad con que se aplica, se ha empleado para evaluar los cambios que ocurren en la vegetación como: la degradación del suelo, los cambios de cobertura vegetal y es una técnica muy utilizada en el seguimiento de cultivos. Se ha empleado en análisis de cambios de cobertura vegetal asociando diferentes fechas y los sitios que se relacionan con cambio en producción de biomasa (Higginbottom and Symeonakis, 2014).

El NDVI como indicador en el seguimiento de la dinámica de un ecosistema ha mostrado alta correlación con las evaluaciones hechas en campo, por lo que en áreas boscosas (Aguirre *et al.*, 2011) y de pastizales se considera un buen indicador para la toma de decisiones (Medina *et al.*, 2009; Wylie *et al.*, 1995).

A pesar de los resultados favorables, se han identificado problemas en la fotointerpretación por influencia del brillo del suelo y el contenido de humedad; algunos resultados de investigación con datos espectrales terrestres en el mismo tipo de cobertura vegetal muestran que, en suelos de color claro los valores de NDVI son inferiores a los NDVI obtenidos en suelos oscuros, este problema es más notable en ambientes áridos y semiáridos donde la cobertura vegetal con frecuencia es menor al 30% (Schmidt y Karnieli, 2001).

Para reducir el efecto del brillo del suelo se ajustó la fórmula del NDVI, así surge el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), que es el índice con el que se pueden obtener datos espectrales para medir la vegetación sin influencia del sustrato; este considera el factor de ajuste del brillo del suelo (L) que varía de acuerdo a la densidad de la cobertura vegetal, para densidad de cobertura baja L=1, para densidad intermedia L=0.50 y para densidad alta L=0.25; para un conjunto de datos con diferente densidad de cobertura vegetal el factor de ajuste óptimo que reduce el error por efectos del brillo del suelo es 0.5 (Huete, 1988).

El SAVI se le clasifica como uno de los índices más eficientes para eliminar la influencia del suelo y con mayor aplicabilidad en áreas con vegetación escasa, pero presenta variación lineal con el índice de área foliar y se ha comprobado que muestra valores altos en la relación señal/ruido (Gilabert *et al.*, 2002; Rodríguez y Bullock, 2013).

(Pettorelli *et al.*, 2005), mencionan que el monitoreo de la vegetación no solo se refiere al incremento o reducción del área que ocupa un tipo de vegetación, es necesario distinguir entre los diferentes tipos de cobertura (bosques de hoja caducifolia, coberturas arbóreas y arbustivas, entre otras) y el incremento y disminución de los valores de los índices de vegetación de acuerdo con la etapa fenológica.

A pesar de que el SAVI y NDVI son los más empleados en el seguimiento de la vegetación, no consideran todas las etapas de crecimiento de la vegetación; un algoritmo matemático basado en las bandas del sensor ETM+ del satélite Landsat 7, permitió desarrollar el NDVI<sub>cp</sub> para estimar el IAF y la biomasa aérea. Paz *et al.* (2007) obtienen una relación lineal entre el NDVI<sub>cp</sub> y estos parámetros, alcanzando estimaciones confiables con un IAF máximo de 3.0, cuando el IAF es mayor la relación entre las variables se desajusta. El NDVI<sub>cp</sub> sirvió de base para desarrollar el Índice de Vegetación de Pendientes Normalizadas (IVPN) que mantiene los mismos patrones lineales con el IAF y la producción de biomasa vegetal de acuerdo con la ecuación propuesta por Villa *et al.* (2014).

$$IVPN = \ln\left(\frac{b_0}{b_s}\right)$$

Donde:

$b_s$ : línea del suelo, estimada con radiómetro espectral.

$b_0$ : Línea de igual índice de área foliar (Paz *et al.*, 2007).

$$b_0 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{2A}; \quad A = R; \quad B = -\left[\frac{c}{d} + IRC\right] \quad y \quad C = \frac{1}{d}$$

Donde  $b_0$  es la pendiente de las curvas iso-IAF, se estima con los valores constantes supuestos de  $c=1.0$  y  $d=-0.022$  y  $R$  e  $IRC$  son los valores de las bandas espectrales (Paz *et al.*, 2007).

El IVPN se relaciona de forma lineal con el IAF y la biomasa aérea verde de la vegetación en sitios de muestreo de pastizales que presentaban follaje homogéneo y cobertura vegetal máxima del 40%; durante la validación de este IV fue posible estimar la producción de biomasa en áreas de pastizal y matorral en el estado de Coahuila. Villa *et al.* (2014), obtuvieron coeficientes de determinación de  $r^2=0.9553$  y  $0.779$  respectivamente, con lo que se demostró que es posible analizar información mediante patrones espectrales con el uso de líneas de igual IAF.

### 6.13 Intervalos de cambio en el Índice de vegetación (NDVI)

El intervalo de variación en los valores del NDVI varía de -1 a +1, para superficies con agua los valores del NDVI son negativos, las nubes y nieve presenta valores de NDVI negativos pero cercanos a cero, en el suelo descubierto o con vegetación escasa los valores del NDVI son positivos pero cercanos a cero; por último la vegetación densa y vigorosa presenta valores del NDVI cercanos a 1 (Merg *et al.*, 2011).

Los NDVI presentan pequeñas diferencias según el tipo de sensor con el que se registran las reflectancias, en datos obtenidos con cuatro sensores diferentes se identificó que para superficies cubiertas de hielo el NDVI varía entre -0.07 y -0.08, para suelos desnudos oscuros varía entre 0.35 y 0.36, para suelos claros el NDVI varía entre 0.15 y 0.16, para vegetación herbácea los valores van de 0.52 a 0.60 y en vegetación caducifolia el NDVI varía de 0.67 a 0.76 (Van *et al.*, 2006).

En Noruega el análisis de datos de masa corporal de renos, presento correlación con la temperatura, precipitación, profundidad de la nieve y el índice Oscilación del Atlántico Norte (NOA, por sus siglas en inglés) se identificaron incrementos del NDVI, los rangos observados fueron de -0.04 a

0.19, -0.04 a 0.26 y -0.05 a 0.06, en diferentes áreas de pastizal los cambios fueron correlacionados de forma significativa con el incremento de masa corporal de renos (Pettorelli *et al.*, 2005).

#### 6.14 Correlación entre índices de vegetación y biomasa con imágenes de satélite

Se ha demostrado que el uso de imágenes de satélite son una alternativa para estimar la cobertura vegetal, estudios realizados en bosque con IV se calculó esta variable mediante la clasificación supervisada de imágenes Ikonos y QuickBird-2 con resolución espacial de 1 y 2.4 m, fueron similares a los estimados mediante mediciones hechas en campo, a diferencias de las imágenes SPOT 4 y Landsat 7 ETM+ con menor resolución espacial, 20 y 30 m, los resultados fueron diferentes de forma considerable respecto a las mediciones de campo (Valdez *et al.*, 2006). En otros estudios las estimaciones de cobertura vegetal obtenidas con el NDVI tienen una relación directa y alta correlación ( $r^2=0.92$ ) con la presencia de vegetación, al analizar los porcentajes de cobertura con fotografías hemisféricas tomadas en campo (Aguirre *et al.*, 2011).

La estimación del porcentaje de cobertura mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite y las correlaciones entre el NDVI y la cobertura vegetal varía de acuerdo con las condiciones de la cobertura vegetal arbórea y los valores obtenidos son para cada sitio específico o para áreas que presenten condiciones similares (Aguirre *et al.*, 2011; Valdez *et al.*, 2006).

Los trabajos realizados en áreas de pastizales son limitados, el uso del NDVI se ha empleado para estimar la producción de biomasa, mostrando variabilidad en los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) de 0.25, 0.67, 0.74 y 0.80 pero se consideraron aceptables para la toma de decisiones de manejo en pastizales de Níger, África (Wylie *et al.*, 1995).

En México estimaciones realizadas a nivel nacional usando imágenes MODIS, para áreas con cobertura herbácea estimaron coeficientes de determinación de  $r^2=0.4882$ , ajustado a un comportamiento exponencial (Meneses, 2011); para áreas pequeñas de pastizal destinadas al pastoreo la correlación entre producción de biomasa y valores de NDVI estimados con imágenes SPOT es de  $r^2=0.66$  (Medina *et al.*, 2009). En pastizales y en áreas boscosas, los coeficientes de determinación varían debido a las condiciones del área y se restringe al área de estudio o bien a zonas con cobertura vegetal en condiciones similares (Aguirre *et al.*, 2011; Medina *et al.*, 2009; Valdez *et al.*, 2006).

Las relaciones establecidas para estimar la producción de biomasa utilizando índices de vegetación calculados con imágenes de satélite requiere de mediciones en campo que permita establecer dicha relación con mayor confiabilidad. Para ello se han empleado radiómetros espectrales con los que se han registrado datos en campo, para análisis de mayor confiabilidad.

Casiano y Paz (2014) caracterizaron la etapa reproductiva de los bosques tropicales caducifolios con datos espectrales obtenidos de un experimento en el que simularon los componentes de la vegetación; se midieron plantas ornamentales en diferentes etapas fenológicas, así como follaje verde y frutos de otras especies; se realizaron mediciones de reflectancia con un radiómetro de resolución espectral de cinco bandas; las mediciones permitieron identificar que las bandas R e NIR normalizados y estandarizados crecen y decrecen de forma simultánea, utilizaron el Índice de Vegetación del Suelo (IVIS) que tuvo un comportamiento opuesto al de las bandas, presenta el valor más bajo durante la floración máxima, excepto en el caso de las flores amarillas donde crecen y decrecen igual que las bandas R e NIR normalizadas.

Calera *et al.* (2004) analizaron la tasa de crecimiento y producción de biomasa de cebada y maíz bajo distintas condiciones de riego, así como los cambios en el NDVI; para ello midió la producción de biomasa, altura de la vegetación, fracción de la cobertura verde, IAF y estado fenológico de la planta; se registraron datos radiométricos y se estimó el NDVI. Se observó que no existe una relación directa entre producción de biomasa del maíz y el NDVI debido a que el valor de NDVI permanece casi constante (0.85), mientras la producción de biomasa varía de 0.20 a 2 kg m<sup>-2</sup>.

Consideran apropiado establecer relaciones entre biomasa y valores de NDVI con los modelos de Monteith<sup>6</sup>, debido a que se obtienen ajustes adecuados para la cebada y maíz. Sin embargo, los parámetros de las relaciones establecidas varían dependiendo de las condiciones de estrés hídrico del cultivo; con base en los modelos Monteith el NDVI mantiene una relación con la tasa de crecimiento del cultivo y la producción de biomasa en condiciones óptimas de humedad. Por el

---

<sup>6</sup> Modelos basados en la relación positiva entre la producción primaria y radiación fotosintéticamente activa absorbida; consideran que la tasa de crecimiento de muchos cultivos es casi proporcional a la velocidad a la que la energía radiante es interceptada por el follaje.

contrario, los coeficientes de los modelos cambiaran en función del estrés hídrico de la vegetación, lo cual es muy frecuente en zonas áridas y semiáridas.

## 6.15 Obras y prácticas de conservación de suelos

Las obras y prácticas de conservación de suelos son acciones que contribuyen a disminuir la pérdida del suelo e incrementar la captación de agua (CONAFOR, 2017), Se han implementado en distintos tipos de vegetación y usos de suelo que presentan pérdida de suelo. Se han utilizado con mayor frecuencia en regiones áridas y semiáridas donde las lluvias son escasas, pero de alta intensidad, razón por la cual es esencial la captación y el aprovechamiento del agua precipitada para el desarrollo de la vegetación.

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) han financiado diferentes tipos de obras y prácticas de conservación de suelo; las obras y prácticas de conservación son de diferentes tipos y se establecen de acuerdo con los objetivos a cumplir y las condiciones del terreno. En este trabajo nos enfocaremos al sistema zanja bordo que es una obra que se realiza en áreas para captar agua de lluvia, desarrollar vegetación y reducir la erosión.

### 6.15.1 Características del sistema zanja bordo

Son excavaciones perpendiculares a la pendiente del terreno, que se construyen siguiendo las curvas a nivel. El volumen de tierra removido se coloca aguas abajo para formar el bordo. Estas obras son importantes para captar agua en zonas donde las lluvias son escasas e intensas o donde se produce escurrimiento superficial con rapidez. Las zanjas y los bordos algunas veces tienen diques divisores para controlar la velocidad del flujo de agua.

Los beneficios de estas obras son: captar azolves y escurrimientos, controlar la velocidad del escurrimiento, reducir la erosión hídrica, recarga de acuíferos, aumento de la infiltración, retener la humedad por mayor tiempo y mejorar las condiciones del suelo para la germinación y desarrollo de la raíz de las plantas (CONAFOR, 2014).

### 6.15.2 Criterios técnicos para la construcción del sistema zanja bordo

Las zanjas se construyen con la finalidad de captar agua, en un área donde se presenta erosión laminar ligera o moderada, los factores considerados para implementar el sistema zanja bordo son:

profundidad del suelo mayor a 40 cm, pendiente menor a 25%, topografía del terreno uniforme (sin depresiones u ondulaciones); aunque este tipo de obras tiene mayor eficiencia en la captación e infiltración de agua para la recarga de los mantos acuíferos; el diseño de estas obras considera los siguientes criterios (CONAFOR, 2017).

- a) Las zanjas se construyen siguiendo una línea guía con base en una curva a nivel.
- b) Espaciamiento de las zanjas. Existen diferentes formas de calcular el espaciamiento entre obras y son:

1. Mediante el cálculo del escurrimiento. Se calcula el escurrimiento medio de una lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 5 años, se consideran las dimensiones promedio de 0.4 m de profundidad, 0.4 m de ancho y un de largo para obtener una capacidad de almacenamiento. El escurrimiento promedio de una lluvia durante 24 horas se multiplica por 0.5 (considera la capacidad de almacenamiento de la obra al 50%). Se divide el volumen de captación de la obra entre el volumen requerido para almacenar el escurrimiento y de esta forma se obtiene la separación entre obras, la distancia se puede ajustar de acuerdo a la pendiente del terreno.
2. El cálculo del intervalo vertical y horizontal. Se utiliza en caso de no tener datos de precipitación. Para ello es necesario conocer la pendiente del terreno y cantidad de lluvia anual en el lugar. La separación vertical se calcula con la siguiente fórmula.

$$IV = \left(2 + \frac{P}{3 \text{ o } 4}\right) (0.305)$$

Donde:

IV: intervalo vertical (m)

P: pendiente del terreno (P)

3: factor para áreas con menos de 1,200 mm de lluvia al año

4: factor para precipitaciones mayores de 1,200 mm de lluvia al año

0.305: factor de conversión de pies a metros.

El intervalo horizontal se calcula con la siguiente formula.

$$IH = \frac{IV}{P} \times 100$$

Donde:

IH: intervalo horizontal (m).

IV: intervalo vertical (m).

P: pendiente del terreno (%).

3. Conociendo la erosión actual del terreno. Esta forma es la más adecuada para calcular la separación entre obra, pero es necesario conocer la erosión actual del terreno, que puede obtenerse con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS).

- c) Proceso de construcción de zanjas. El bordo se debe formar con suelo extraído de la zanja y colocado aguas abajo; para controlar la velocidad del escurrimiento del agua se recomienda dejar un dique de 30 o 40 cm aproximadamente, cada 4 o 5 metros.
- d) Recomendaciones. La distancia entre diques debe ser más corta en medida que se incremente la pendiente.

#### 6.15.3 Antecedentes de la implementación de zanjas

En diferentes partes del mundo se han ejecutado actividades con el objetivo de detener la pérdida de suelo por erosión hídrica, para conservar el suelo, retener la humedad y nutrientes en el suelo para obtener mayor producción de biomasa o incrementar los rendimientos en la producción de cultivos en áreas agrícolas.

En México 70% de las acciones para reducir la pérdida de suelo y conservar la humedad, son obras mecánicas (Cotler *et al.*, 2015) y aunque se han construido en diferentes partes del país existe poca información obtenida de forma independiente a las dependencias de gobierno que evalúe y apruebe la eficiencia de las obras y no hay certeza de que el establecimiento de las obras cumplan con los objetivos.

Existen estudios (Moradi *et al.*, 2015; Jing-an *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014; Kyalo *et al.*, 2014; Samra, 2015<sup>7</sup>), así como informes técnicos (Magaña y Diakite, 2007; Torres *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 2013) que han identificado resultados positivos; su eficiencia se ha evaluado de diferentes formas según las condiciones en las que se establecen y aunque en algunos casos muestra resultados menos favorables que otro tipo

---

<sup>7</sup> Samra, J. S. 2015. Rainwater harvesting and its impact on farming systems.



de obra o práctica de conservación (Moradi *et al.*, 2015), se han obtenido resultados favorables en comparación de las áreas testigo.

En Kenia la evaluación cualitativa de efectos de múltiples prácticas de conservación de suelo en el rendimiento de la producción agrícola donde las practicas establecidas variaban de acuerdo a las condiciones topográficas y de tipo de suelo de cada parcela o incluso dentro de la misma parcela. Se identificó un incremento en la producción agrícola de 34.5%; sin embargo, solo en áreas de baja productividad y pendiente moderada se tenían beneficios, lo cual indica que la implementación de obras es rentable solo en determinadas condiciones del terreno. Se considera que los efectos en áreas con obras de conservación no son los identificados en un tiempo específico, sino una tendencia del área evaluada (Kyalo *et al.*, 2014).

Samra, (2015) analizó el efecto de las prácticas de conservación de suelo y cosecha de agua de lluvia in situ en el Himalaya; identificó incrementos significativos en los porcentajes de sobrevivencia de los árboles, desarrollo de vegetación herbácea y en consecuencia mayor producción de biomasa de 1.0 a 3.7 veces más. Este efecto es el resultado de reducir el escurrimiento superficial de 41.5% en áreas control a 29.8% en áreas con barreras vegetativas, 11.6% en parcelas con zanjas y 8.2% en áreas donde combinaron el establecimiento de zanjas con barreras vegetativas; así como efectos positivos en la conservación de recursos naturales en un sistema de producción agrícola donde se observó incremento de la producción de leche, de fruta y alimento.

Las obras para la recolección de agua de lluvia con diferente diseño CT, BT, GD y VD (Figura 2) establecidas en laderas degradadas permitió evaluar su efecto desde diferentes enfoques como la diversidad del estrato herbáceo y la productividad en laderas degradadas (Singh *et al.*, 2011), las propiedades del suelo y el crecimiento de *Emblica officinalis* durante la restauración de laderas degradadas (Singh *et al.*, 2012) y el crecimiento de las plantas, la dinámica del agua en el suelo y producción de biomasa herbácea (Singh *et al.*, 2013); para realizar dichas evaluaciones fue necesario considerar las condiciones de humedad y nutrientes en el suelo dentro de las parcelas con obras y en parcelas testigo.



Figura 2. Obras de recolección de agua de lluvia en colinas degradadas, Rajastán, India.

Fuente: Singh (2012). CT: zanja de contorno; BT: zanja de caja; GD: Gradonie; y VD: V-zanja.

a) Contenido de humedad en el suelo

Se ha observado que la cosecha de agua de lluvia in situ propicia incrementos significativos en el contenido de humedad en el suelo (Samra, 2015). Las obras influyen en la dinámica del agua en el suelo, en áreas con obras el contenido de humedad en el suelo en promedio ha sido de 7.6% mayor que en las parcelas control, con un incrementos promedio de 9.4% en parcelas con CT, 12% en parcelas con GD, 4.2% en parcelas con BT y 5.0 en parcelas de VD comparados con las parcelas control (Singh *et al.*, 2011).

El contenido de agua en el suelo también está en función de la pendiente y la distribución temporal de la precipitación, ya que, en regiones semiáridas, las áreas con pendientes menores de 10% el contenido de humedad es mayor al registrado en pendientes que van del 10 al 20% sin importar el periodo de medición, antes y después del periodo de precipitación. El contenido de humedad varía de acuerdo con el periodo de medición, es decir, al inicio, antes o después de la temporada de lluvias; se identificaron incrementos en el contenido de humedad de 58.9% y 24.3% en pendientes menores de 10% y mayores de 20%, respectivamente, los contenidos de humedad son de 15% a 17% más altos que los obtenidos en parcelas control (Singh *et al.*, 2013).

En zonas boscosas las zanjas almacenan y retienen mayor cantidad de agua durante un periodo más largo comparado con terrazas (Zhang *et al.*, 2014); el establecimiento de zanjas muestran resultados favorables, sin embargo se ha comprobado que no son la mejor alternativa para conservar la humedad en el suelo debido a que el contenido de humedad ha sido menor al registrado en áreas donde se realizan prácticas de manejo de cobertura (Moradi *et al.*, 2015).

La implementación de zanjas también ha propiciado una reducción en el contenido de agua entre los meses de diciembre a junio de 74% y 67,4%, en pendientes menores de 10% y entre 10% y 20%, respectivamente; en las parcelas control el contenido de humedad registran disminución en la disponibilidad de agua en el suelo (menos de 65.8%) en comparación con áreas de cualquier tratamiento de zanjas (Singh *et al.*, 2013). La disminución de agua también ha variado entre meses y sitios medidos en las parcelas, se observó mayor reducción de agua en la parte alta en parcelas VD con 78% y menor en la parte media en parcelas con obras BT con 74.74% durante los meses de septiembre a diciembre; las parcelas con obras CT y GD, presentaron valores similares a los observados en las parcelas control con 77.1%, 77.4% y 77.3% respectivamente (Singh *et al.*, 2011).

Este efecto se ha atribuido a que existe mayor contenido de humedad en la capa superior del suelo (los primeros 20 cm), la variación que existe se debe a una mayor exposición de la superficie del suelo a los rayos solares que aumentan la evaporación comparado con las capas más profundas; además influye el tipo de vegetación que se desarrolla en el área por efectos de evapotranspiración (Jing-an *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2013). Se obtuvieron correlaciones positivas entre la reducción de contenido de agua en el suelo y la altura de la vegetación con el gradiente de pendiente existente (Singh *et al.*, 2011).

#### b) Sobrevivencia de repoblación vegetal

Se ha observado que la sobrevivencia de las plantas es mayor en áreas donde se establecen zanjas para el almacenamiento de agua aunque el crecimiento no es muy evidente (Zhang *et al.*, 2014). La sobrevivencia de cada especie varía dependiendo de la pendiente del terreno; sin embargo la sobrevivencia de especies es mayor al registrado en áreas control (Singh *et al.*, 2013).

Respecto al crecimiento, el diámetro del tallo de la planta y altura varían de acuerdo a la estructura de conservación de agua y pendiente en que se desarrollan; algunas especies presentan la tendencia

de disminuir la altura y diámetro del tallo conforme incrementa el gradiente de pendiente (menores de 10% a más de 20% de pendiente); en general las plantas de todas las especies fueron más pequeñas y delgadas en las parcelas control que en áreas con obras de almacenamiento de agua (Singh *et al.*, 2013).

c) Desarrollo de vegetación y producción de biomasa

El crecimiento de la vegetación en parcelas con obras de conservación de suelo y agua ha mostrado que favorece el crecimiento de las plantas, la altura de la vegetación ha mostrado tendencias crecientes de la parte baja a la parte alta en la mayoría de las parcelas con obras y fue 7.5% más baja en pendientes de entre 10 a 20%; en pendientes mayores al 20%, la altura de la vegetación fue mayor 34.7%, que la vegetación que se desarrolló en pendientes menores al 10%; en general todas las observaciones se tuvieron correlaciones positivas entre contenido de agua en el suelo y altura de la vegetación (Singh *et al.*, 2011).

El desarrollo de la cobertura vegetal ha sido favorecida al implementar obras en áreas agrícolas abandonadas y en áreas naturales debido a que se observa menor densidad y cobertura de hierbas, pero mayor producción de pasto (Zhang *et al.*, 2014). Otros estudios donde se ha observado conservación de humedad en el suelo ha favorecido mayor desarrollo de vegetación herbácea, se ve reflejado en el rendimiento de la producción de biomasa la cual varía de acuerdo a la cantidad de precipitación y la eficiencia de las acciones de conservación de agua en el suelo en diferentes pendientes (Samra, 2015; Singh *et al.*, 2013).

La producción de biomasa varía en función de los sitios medidos dentro de las parcelas con obras, se registran incrementos promedio de 1.52 veces en la parte baja y 1.56 veces en la parte alta de las parcelas; se identificaron incrementos en la producción de biomasa de 2.13 veces, 1.65 veces y 1.97 veces en pendientes menores al 10%, de 10% a 20% y mayores al 20%, respectivamente (Singh *et al.*, 2011).

Se ha registrado mayor producción de biomasa en pendientes de 10% a 20%, con 383.4 g m<sup>-2</sup> en áreas con zanjas, comparado con las áreas control donde la producción de biomasa fue de 293.8 g m<sup>-2</sup>; los incrementos de biomasa herbácea fueron de 15.9%, 21.1%, 25.2% y 70.5% en diferentes

estructuras de conservación de agua estos incrementos se registraron en zanjas de diferente diseño, entre las que destaco la zanja con un diseño en V (Singh *et al.*, 2013).

d) Diversidad de especies

Las obras de cosecha de agua, al igual que la pendiente no influye de forma significativa respecto a la diversidad, riqueza, dominancia y uniformidad de especies; pero se ha observado mayor diversidad con 2.9% y riqueza con 2.7% en la parte baja de las parcelas con obras, mayor uniformidad en la parte media de las parcelas testigo; en promedio la riqueza (12.5%), la diversidad (17.4%) y la uniformidad de especies (7.4%) fue mayor en pendientes menores a 10%; en las parcelas con obras la diversidad y uniformidad fueron más bajos, mientras la dominancia fue mayor en parcelas control. Entre las obras establecidas las parcelas con obras VD registraron mayor riqueza y uniformidad de especies, pero mayor diversidad en parcelas con obras CT (Singh *et al.*, 2011).

e) Evaluaciones realizadas en México

En México los efectos de las zanjas y obras complementarias permitieron comparar parámetros como densidad aparente, carbono, nitrógeno y el pH de los suelos las cuales no mostraron diferencias significativas al compararlas con áreas donde no existen obras (Cotler *et al.*, 2013); por el contrario, se han identificado efectos negativos por la implementación de zanjas en diferentes condiciones geográficas y ecológicas, ya que deja expuesto a la intemperie de 0.42 t a 6.3 t de carbono orgánico total por ha, los bordos formados por el suelo extraído presentan menor retención de humedad comparado con los sitios testigo, esto se explica por la mezcla de partículas con menor contenido de materia orgánica y el arreglo de los agregados que modifica los espacios porosos en el suelo (Cotler *et al.*, 2015).

La evaluación de diferentes obras y prácticas vegetativas redujo el volumen de escurrimiento de 41.5% en áreas control a 29.8% en áreas con barreras vegetativas, 11.6% en zanjas y a 8.2% en zanjas combinado con barreras vegetativas.

En México la implementación de modelos hidrológico – productivo permitió evaluar las zanjas comparadas con pretilos de piedra acomoda, donde se identificaron efectos positivos en el rendimiento de producción de biomasa de 4.733 t ha<sup>-1</sup>, que fue mayor al rendimiento obtenido en

áreas sin obras donde se obtuvo  $1.808 \text{ t ha}^{-1}$  de biomasa (Fernández *et al.*, 2013). Se atribuye a la mayor capacidad para retención de agua y azolves, disminución de escurrimientos en un 82.1%, reduce la erosión en un 92.3% (Torres *et al.*, 2010).

## 7 MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 Localización del área de estudio

La cuenca Rancho Dolores se ubica en la Región Mixteca Oaxaqueña, entre las coordenadas  $17^{\circ} 49' 52.711''$  y  $17^{\circ} 54' 15.37''$  Latitud Norte y  $97^{\circ} 48' 40.407''$  y  $97^{\circ} 45' 7.873''$  Longitud Oeste con una altura sobre el nivel del mar que varía de 1660 m a 2000 m y una superficie de 1,853.17 ha. En la cuenca se identificaron dos usos de la tierra y cinco tipos de vegetación: bosque de encino en 556 ha que corresponde al 30.59% de la superficie total de la cuenca, 550 ha de pastizales (29.70%), selva baja caducifolia en 403 ha (21.76%), el matorral cubre 167 ha (9% del total), las zonas agrícolas cubren 163 ha (8.8%) y los asentamientos humanos cubren 2.37 ha (Figura 3).

### 7.2 Localización de la zona de pastizales en la cuenca Rancho Dolores

El área de estudio considera una zona de pastizales con y sin obras de conservación de suelos, está ubicada entre las coordenadas  $17^{\circ} 49' 58.038''$  y  $17^{\circ} 53' 18.799''$  Latitud Norte y  $97^{\circ} 47' 35.857''$  O  $97^{\circ} 45' 17.458''$  Longitud Oeste, con una altitud que varía de 1660 a 2000 msnm en una superficie de 550.41 ha. El pastizal se encuentra distribuido en la parte media y baja de la cuenca (Figura 4); en esta zona se delimitaron los polígonos en los que se establecieron sistemas de zanja bordo, que cubren 80.43 ha, que representan 15% de la zona de pastos.

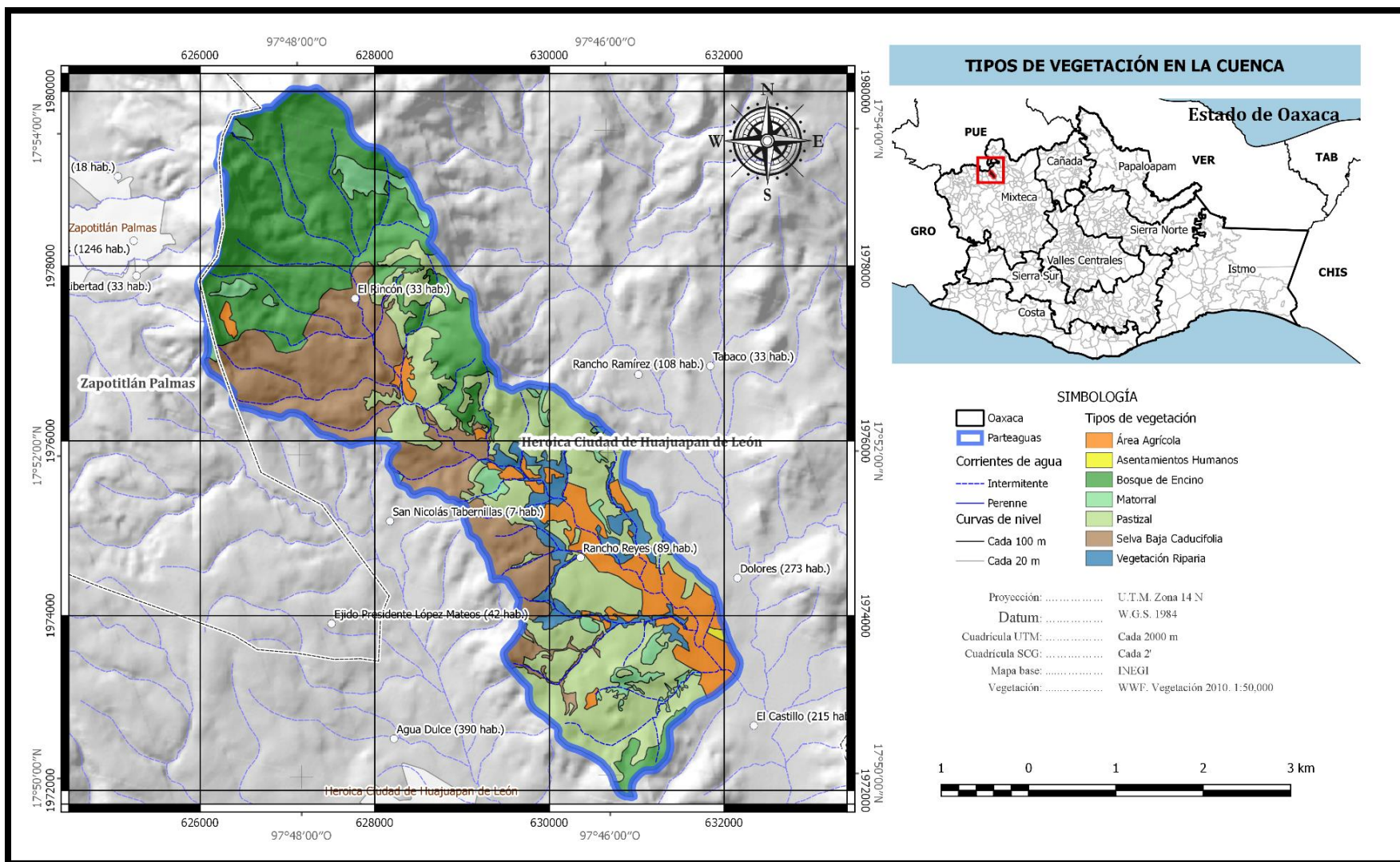


Figura 3. Tipos de vegetación y usos de la tierra en la cuenca Rancho Dolores, Región Mixteca Oaxaqueña.

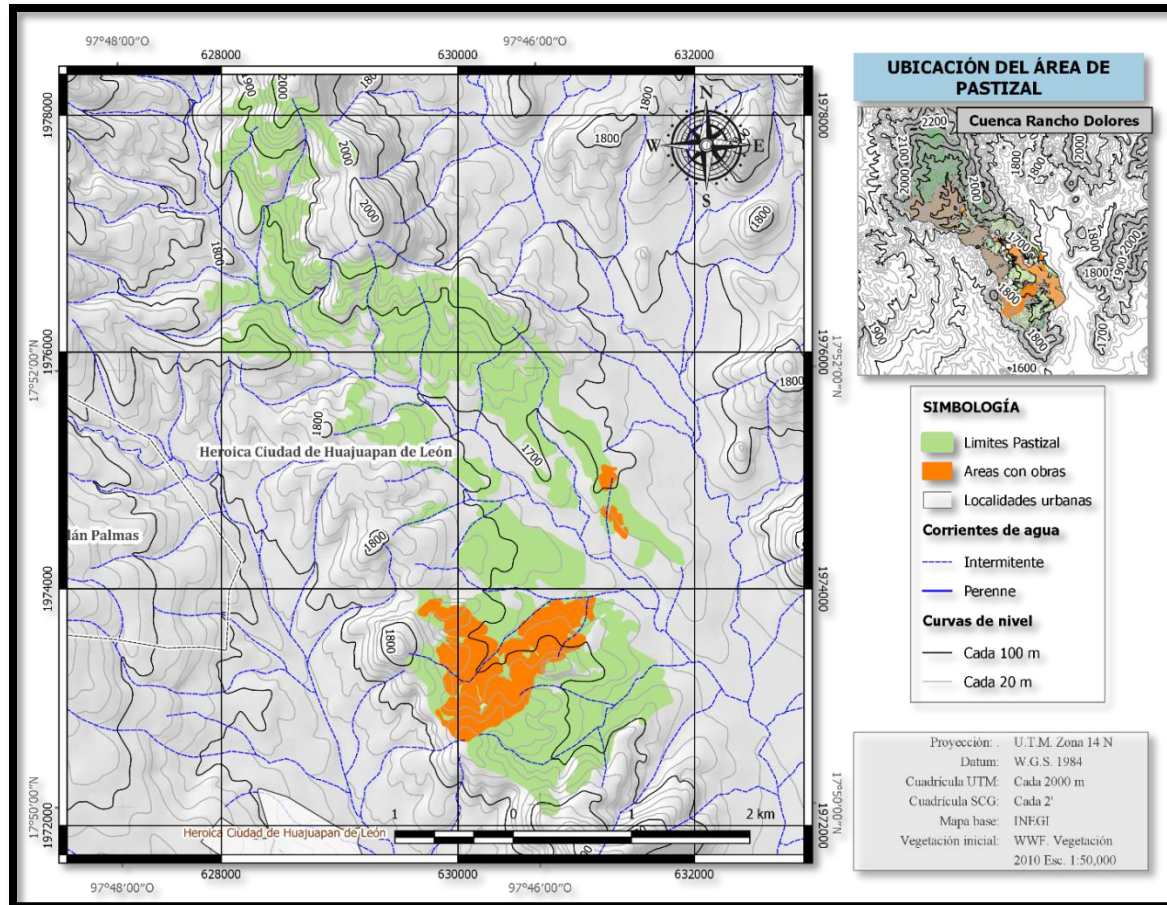


Figura 4. Localización del pastizal en la cuenca Rancho Dolores, Región Mixteca Oaxaqueña.

### 7.3 Medio biofísico de la zona de pastizales

#### 7.3.1 Análisis de las variables climáticas

Los datos de precipitación para el periodo de 2005 a 2016, se tomaron de los registros de la estación meteorológica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM). La precipitación media anual fue de 681 mm con un rango de variación de 377 a 982 mm, desviación estándar de 189 mm y coeficiente de variación de 27.8% que indica la aleatoriedad y la presencia de años secos y húmedos que hacen que la producción de forraje sea variable (Cuadro 8. Cuadro 8).

El climograma indica que el período de sequía se presenta de octubre a abril y el húmedo de mayo a septiembre. La temperatura media anual es de 21 °C, en los meses de diciembre y enero se registran las temperaturas más bajas (17 °C) y las máximas en mayo (23.4 °C). La evaporación



media anual es de 2,151 mm y la evapotranspiración potencial estimada fue de 1,828 mm con valores mensuales menores a 120 mm en los meses de invierno y de más 190 mm en abril y mayo (Figura 5). La variación de la evapotranspiración indica que en los años húmedos es posible satisfacer la demanda de agua del pasto, pero en años secos se tienen problemas por déficit de agua.

La precipitación para el 2015 fue de 780 mm, la mayor parte de las lluvias se presentaron de marzo a noviembre. En marzo, las precipitaciones fueron de menos de 10 mm; en abril se registraron lluvias de hasta 30 mm, de mayo a agosto las precipitaciones fueron variables con datos de menos de 20 mm y en septiembre se presentaron lluvias de más 45 mm. Los últimos eventos de lluvia se presentaron a fines de octubre y principios de noviembre (Figura 6).

En el 2016 la precipitación de enero a septiembre fue de 695 mm, con lluvias de 10 y 20 mm en enero y marzo; en abril se presentaron eventos aislados con baja precipitación; de mayo a julio se registraron eventos de lluvias de menos de 20 mm; en agosto se presentaron dos eventos con lluvia de 40 y 48 mm y en septiembre se presentaron lluvias de hasta 20 mm (Figura 6).

En general, la precipitación en los dos años de estudio, fue mayor a 600 mm anuales, con buena distribución temporal que sugiere que no hubo restricción para cubrir la demanda de agua de los pastizales.

Cuadro 8. Precipitación media anual (mm) en el periodo 2005 a 2016 (Estación meteorológica automatizada 20275).

Mes	Precipitación media (mm)												Prom PP
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Ene	-	-	0.30	-	1.60	23.90	0.30	-	0.90	0.50	0.80	8.40	<b>4.59</b>
Feb	-	-	22.90	4.60	-	24.70	0.30	38.60	0.50	-	-	-	<b>15.27</b>
Mar	-	8.00	12.70	-	-	0.30	1.10	7.20	1.50	88.40	49.40	43.20	<b>23.53</b>
Abr	21.40	24.90	35.40	36.40	4.10	7.40	3.90	0.60	2.60	1.30	94.15	9.40	<b>20.13</b>
May	43.80	57.80	106.40	70.90	64.80	5.20	15.30	7.80	17.10	77.90	76.27	102.21	<b>53.79</b>
Jun	28.40	124.20	172.10	172.40	-	74.70	226.00	139.50	62.90	357.70	99.51	167.67	<b>147.73</b>
Jul	61.80	105.50	116.70	142.40	19.30	217.10	167.70	314.30	18.30	133.80	119.38	82.52	<b>124.90</b>
Ago	157.40	147.40	138.70	144.70	60.30	232.70	109.30	242.20	18.60	120.50	55.06	128.84	<b>129.64</b>
Sep	41.40	134.80	117.30	141.50	220.80	220.80	57.70	60.50	126.10	90.10	226.21	153.54	<b>132.56</b>
Oct	29.20	11.30	71.60	17.50	82.50	0.30	34.20	39.40	101.50	94.40	47.21		<b>48.10</b>
Nov	-	81.20	-	-	1.10	0.30	2.50	-	15.20	6.00	12.31		<b>16.94</b>
Dic	5.00	-	0.60	-	0.30	-	-	-	11.80	12.20	-		<b>5.98</b>
<b>Anual</b>	<b>388.40</b>	<b>695.10</b>	<b>794.70</b>	<b>730.40</b>	<b>454.80</b>	<b>807.40</b>	<b>618.30</b>	<b>850.10</b>	<b>377.00</b>	<b>982.80</b>	<b>780.30</b>	<b>695.78</b>	<b>681.26</b>

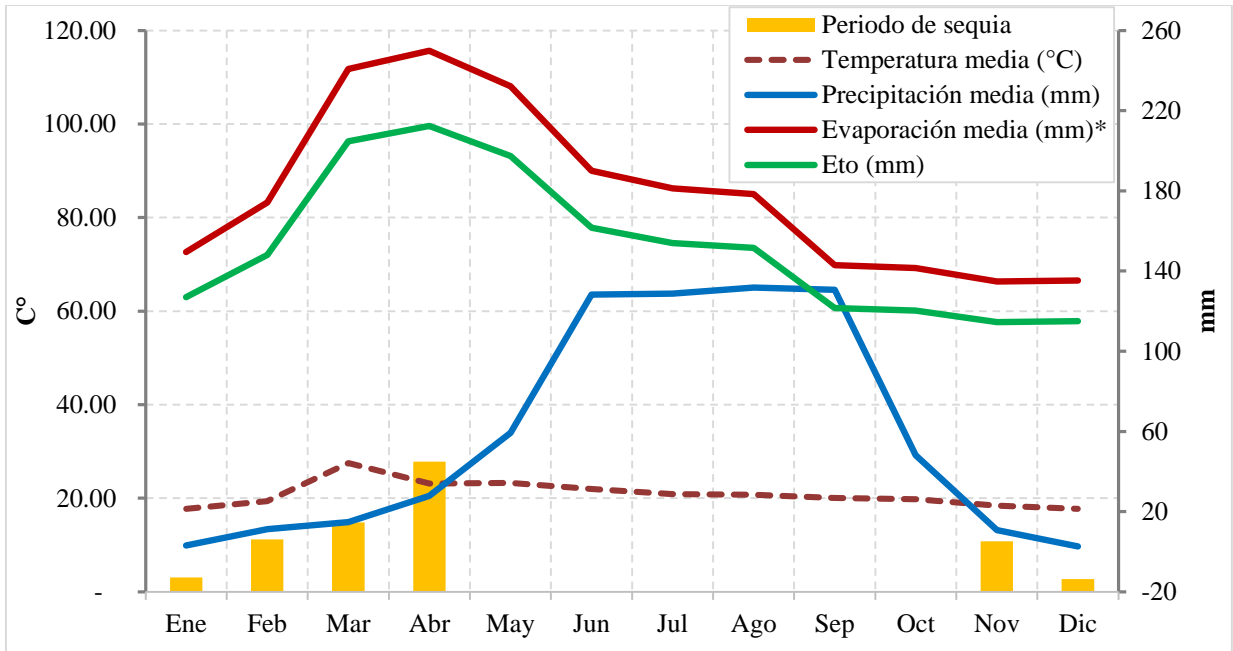


Figura 5. Climograma de la estación Huajuapán de León, Oaxaca.

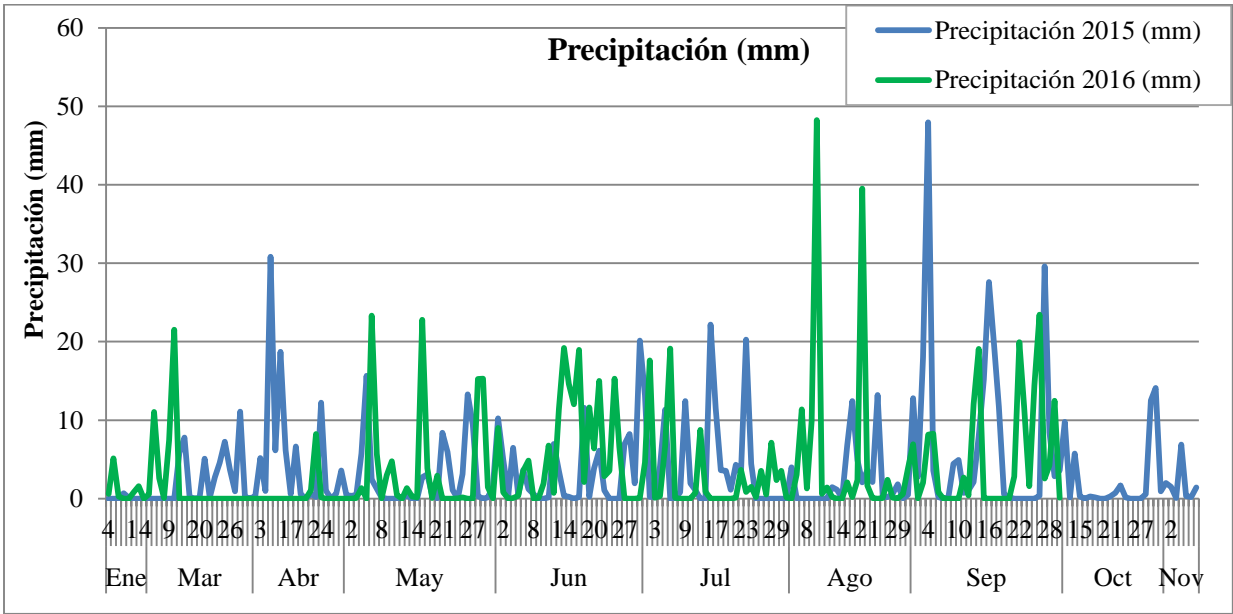


Figura 6. Precipitación diaria registrada en la estación de Huajuapán de León, Oaxaca.

### 7.3.2 Geología

En el área de pastizal se presentan dos tipos de roca: Andesita-Brecha volcánica intermedia en 313.25 ha (56.91% de la superficie total) y Arenisca-Conglomerado en 237.16 ha (43.09%) (Figura 7).

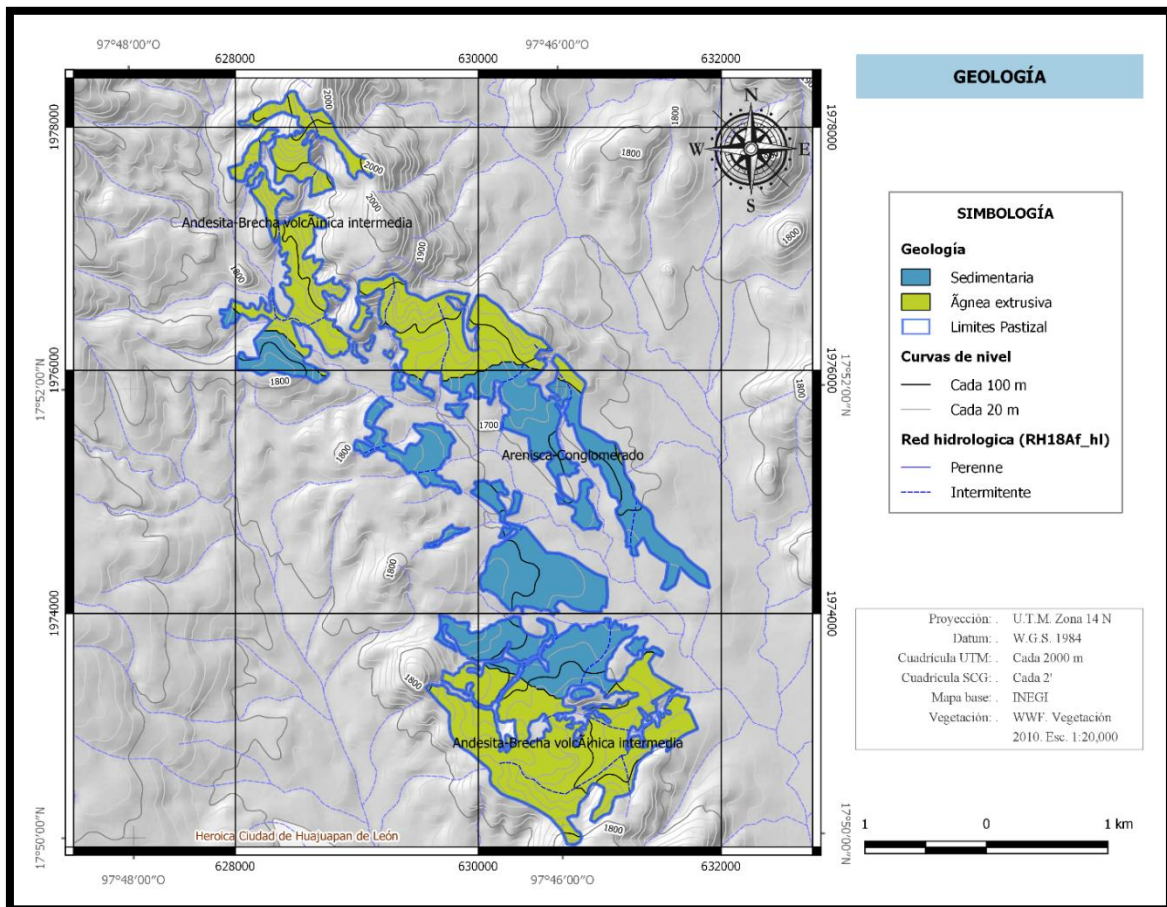


Figura 7. Unidades geológicas del pastizal en la cuenca Rancho Dolores.

### 7.3.3 Suelos

Se presentan dos tipos de suelo, Regosol y Vertisol (Figura 8). Los regosoles cubren 514.77 ha, que representa 93.52% del área total. Se caracterizan por presentar textura media (limo y migajón limoso), la profundidad media es de 0.36 m, densidad aparente de 1.43 g cm<sup>-3</sup> y el contenido de materia orgánica varía de 1.43% a 2.08% (Fernández *et al.*, 2013). Son suelos someros, color claro y la productividad está condicionada por la profundidad y pedregosidad (INEGI, 2004).

Los vertisoles se localizan en la parte baja de la zona de los pastizales y cubren 35.64 ha (6.48% del área total). La profundidad promedio es de 1.0 m, la densidad aparente es de  $1.57 \text{ g cm}^{-3}$  y el contenido de materia orgánica es de 2.21% (Fernández *et al.*, 2013). En general este tipo de suelos se caracterizan por su alto contenido de arcilla, de color negro o gris oscuro, de buena productividad, baja susceptibilidad a la erosión (INEGI, 2004).

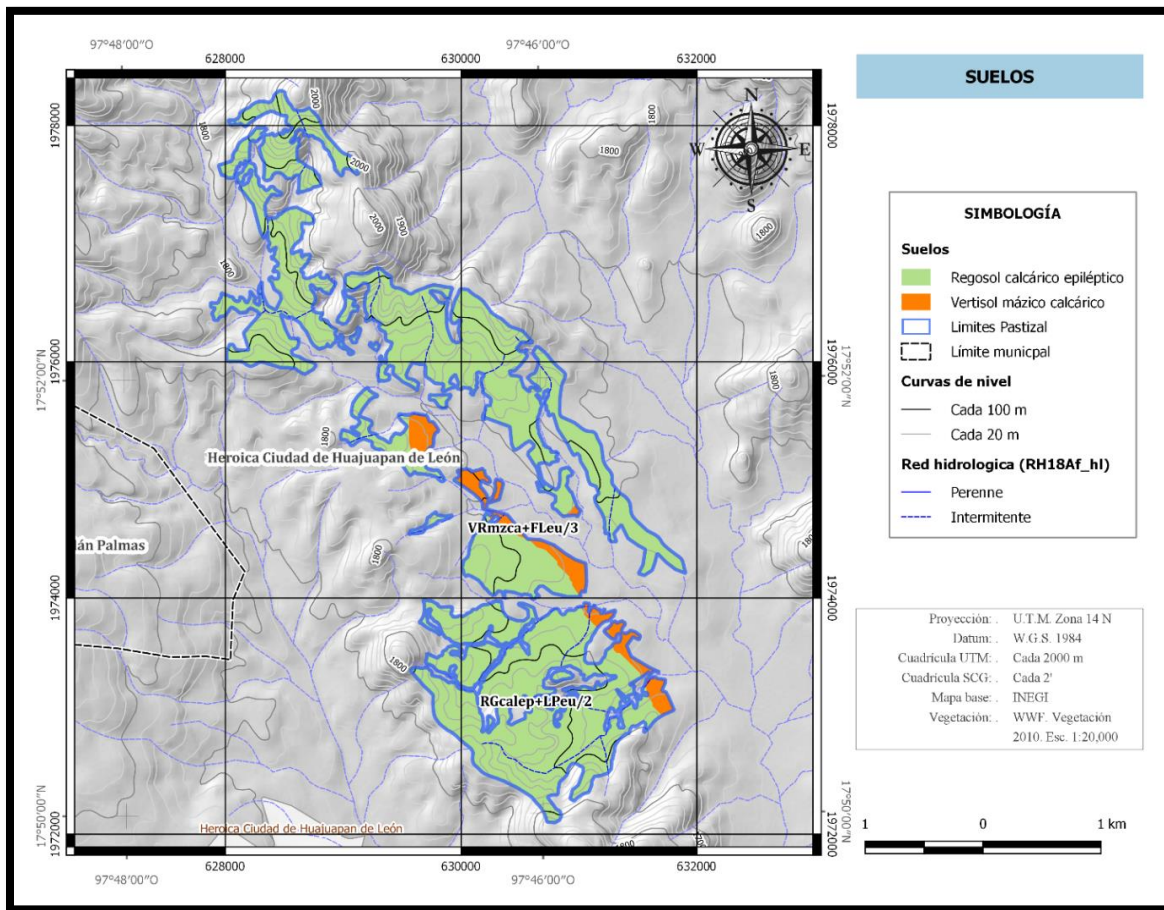


Figura 8. Tipos de suelo que se presentan en el área de pastizal.

### 7.3.4 Pendiente

El área de pastizal se encuentra distribuida de la siguiente forma: terrenos con pendientes entre 0 a 10% cubren 157.17 ha (28.56% de la superficie); del 10 al 20% de pendiente en 166.54 ha (30.26%); del 20 al 30% en 103.37 ha (18.78%); del 30 al 40% se presentan en 63.45 ha (11.53%) y en el resto del área de pastizal la pendiente es mayor al 40% (Figura 9).

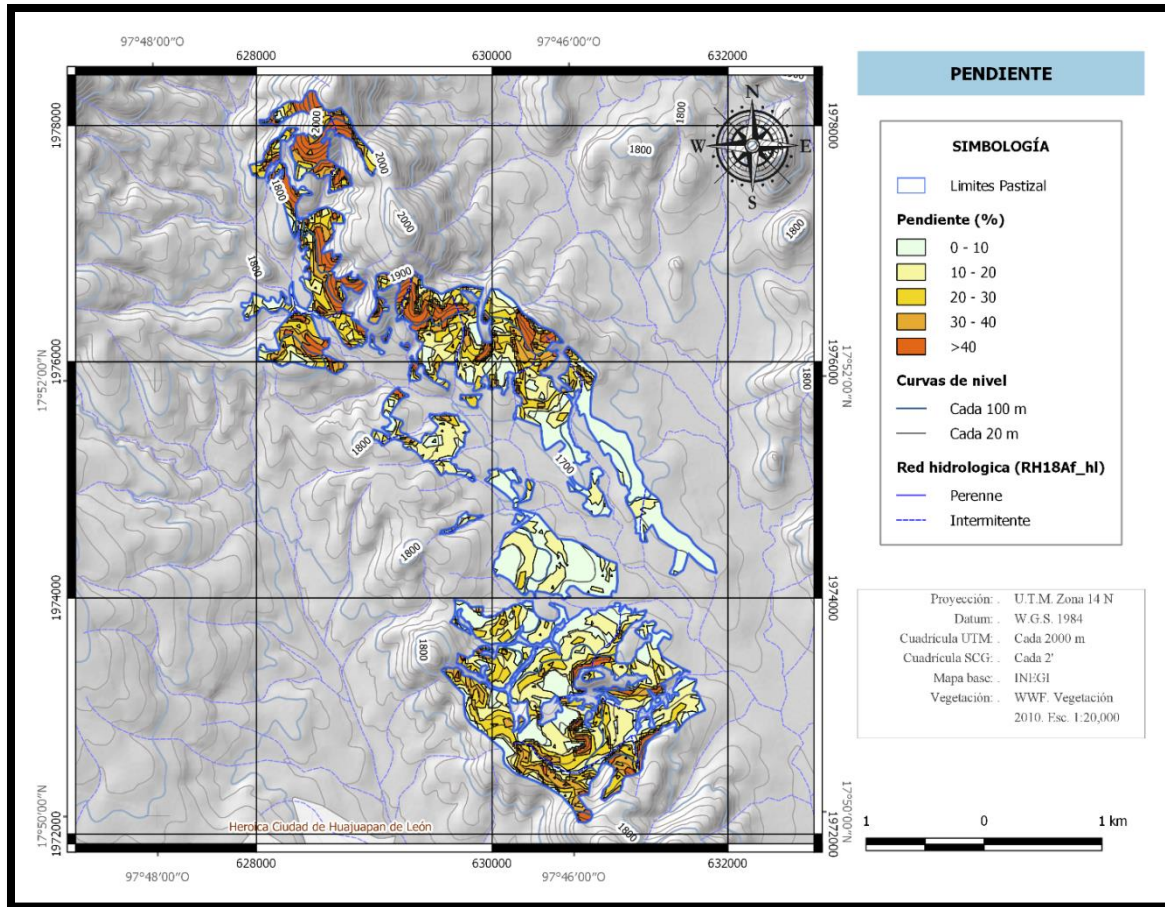


Figura 9. Pendiente del área de pastizal de la cuenca Rancho Dolores.

#### 7.4 Localización de las zanjas bordo en la zona de pastizal

Los terrenos de pastizales con zanjas bordo se ubican en siete polígonos de diferentes tamaños y dueños, estos se delimitaron en campo con auxilio de un Global Positioning System (GPS) Garmin (Figura 10). Las obras se realizaron en dos etapas, las primeras se establecieron en el año 2005 y las segundas en el año 2007.

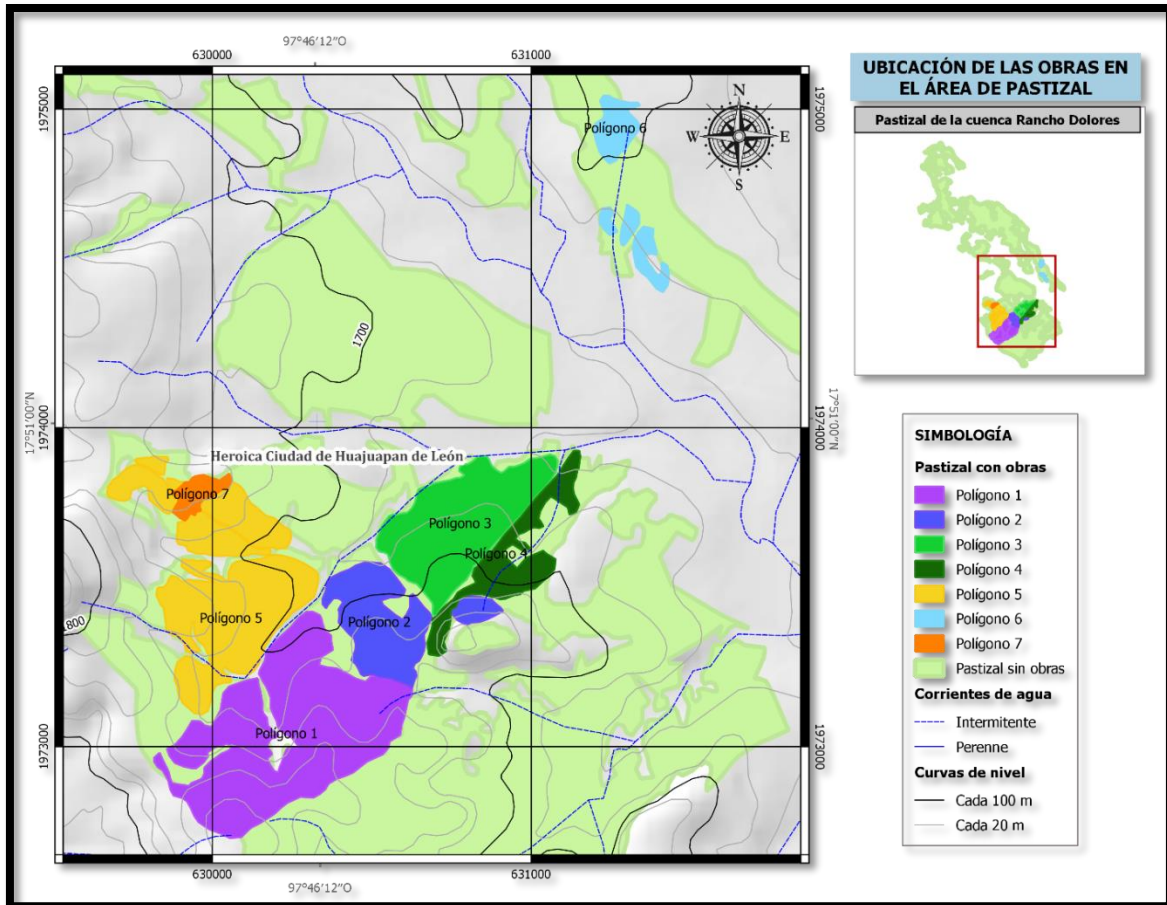


Figura 10. Polígonos con el sistema zanja bordo en el pastizal de la cuenca Rancho Dolores.

En este trabajo se utilizaron imágenes de satélite para diferentes años y periodos, equipo para registrar la reflectancia, prensa botánica para la colecta de muestras de vegetación herbácea (pastos y hierbas de hoja ancha), equipo de laboratorio para identificar las especies vegetales muestreadas y determinar el peso de material vegetal, así como softwares para el procesamiento de imágenes de satélite y nadir, los cuales se mencionan durante la descripción de la metodología.

### 7.5 Cambios de cobertura vegetal

Los cambios en la cobertura vegetal, por efectos de las zanja-bordo se determinaron en tres etapas; en una primera etapa se realizó el análisis de la cobertura vegetal mediante índices de vegetación (NDVI y SAVI) calculados con cuatro imágenes del satélite SPOT para los años 2003, 2005, 2015 y 2016 que corresponden a antes y después de la construcción de las zanjas bordo, se analizaron dos periodos (abril y diciembre).

La segunda fase consistió en analizar el efecto de las obras en la cobertura vegetal en tres polígonos con el sistema zanja bordo y tres polígonos sin obras (testigo (T)), donde se realizaron mediciones de reflectancia, se tomaron y analizaron imágenes a nadir, se determinó la producción de biomasa y se hizo el registro de especies en el estrato herbáceo. Las mediciones se hicieron al final e inicio del periodo húmedo (noviembre del 2015 y julio del 2016) y en el periodo seco (abril del 2016).

La tercer etapa se empleó para validar los índices de vegetación calculados con la imagen de satélite de agosto del 2016, con los estimados con las medidas de reflectancia determinadas en campo en julio del mismo año; durante los recorridos en campo se obtuvo información para conocer la composición florística y calcular el porcentaje de cobertura y producción de biomasa, estas variables se correlacionaron con los índices de vegetación calculados con la imagen de satélite para conocer el grado de asociación.

#### 7.6 Análisis de imágenes del satélite SPOT

Antes de calcular los índices de vegetación con las imágenes de satélite, se hizo la corrección radiométrica de las imágenes SPOT 5, 6 y 7 para las fechas antes y después del establecimiento del sistema zanja bordo (Cuadro 9). El procesamiento de las imágenes de satélite se realizó en el programa Qgis 2.8.1.

Cuadro 9. Imágenes SPOT utilizadas para identificar los cambios de cobertura vegetal.

Satélite	Fecha de la imagen
SPOT 5	27 de diciembre del 2003
	30 de abril del 2005
SPOT 7	4 de noviembre del 2015
SPOT 6	7 de abril del 2016
	3 de agosto del 2016



### 7.6.1 Corrección radiométrica

Se transformaron los números digitales (ND) a radianza ( Posada *et al.*, 2012; Astrium, 2013; Navarro, 2014<sup>8</sup>; Aguilar *et al.*, 2014). Después se transformó la radianza a reflectancia para imágenes SPOT 5, se utilizó la ecuación propuesta por Posada *et al.* (2012); Navarro, (2014) y Aguilar *et al.* (2014). Para las imágenes SPOT 6 y 7, la radianza se transformó a reflectancia con la ecuación propuesta por Astrium, (2013).

### 7.6.1 Calculo de los índices de vegetación NDVI y SAVI

Los IV se calcularon con las imágenes corregidas. Para el NDVI y SAVI se utilizaron las ecuaciones 1 y 2.

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$SAVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R+L)} (1 + L) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

NIR: banda del infrarrojo cercano.

R: banda roja.

L: factor de ajuste al brillo del suelo, para este caso se utilizó el factor de corrección L=0.5, recomendado por Huete (1988).

### 7.6.2 Cambios de índices de vegetación NDVI y SAVI en pastizales con obras y sin obras

La variación de los índices de vegetación (NDVI y SAVI), para antes y después de la construcción de las zanjas bordo se utilizaron para asociar los cambios de cobertura con el establecimiento de las obras del sistema zanja bordo. Los índices de vegetación se compararon entre fechas antes y después de construir las zanjas, se hicieron pruebas de homogeneidad de Bartlett y la prueba de Kolmogorov-Smirnov para evaluar la normalidad de los datos, después de compararon los valores medios con el método de Tukey.

---

<sup>8</sup> Navarro. 2014. Calculation of TOA reflectance – SPOT5.

## 7.7 Evaluación del efecto de las obras entre periodos en polígonos con obras y sin obras

Para evaluar el efecto de las obras del sistema zanja-bordo en el área de pastizales se seleccionaron seis parcelas de muestreo (tres con obras y tres sin obras), las parcelas sin obras se consideraron como testigo y se seleccionaron considerando la similitud en sus características con las parcelas con zanjas bordo (Figura 11).

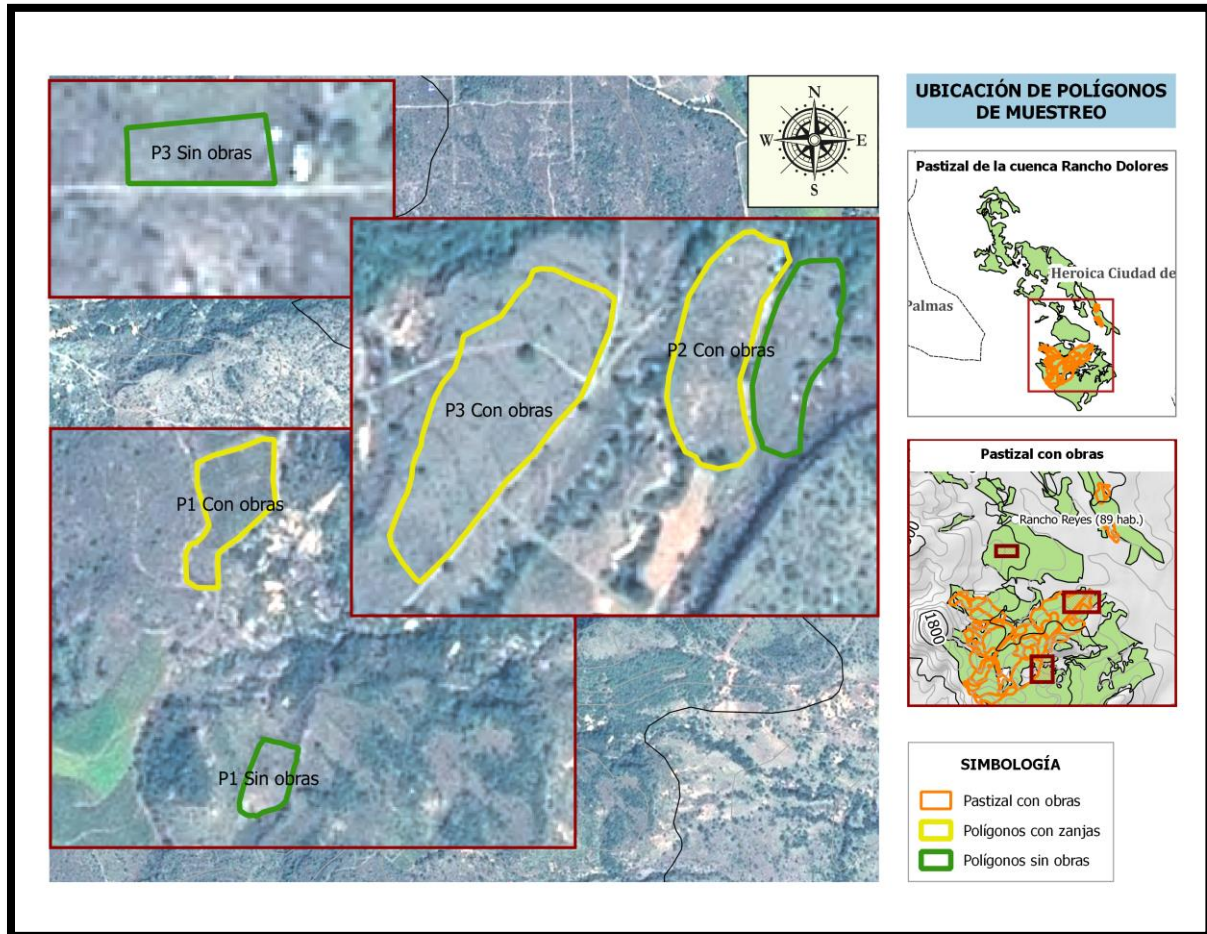


Figura 11. Ubicación de los polígonos de muestreo (con zanjas y sin zanjas).

### 7.7.1 Descripción de los polígonos de muestreo

El polígono uno con obras tiene una superficie de 0.76 ha, ubicada en altura media de 1,718 msnm, exposición N; con pendiente promedio de 10% y profundidad del suelo promedio mayor a un

metro. El polígono testigo tiene una superficie de 0.22 ha, ubicada a 1,740 msnm, exposición N, la pendiente media es de 12% y profundidad promedio del suelo mayor a un metro.

El polígono dos con obras tiene una superficie de 0.73 ha, situada a una altura media de 1,660 msnm, exposición N, pendiente media de 10.6% y la profundidad promedio del suelo mayor a un metro. El polígono testigo tiene una superficie de 0.47 ha, ubicada a 1670 msnm, exposición N, la pendiente promedio es de 9.5% y profundidad promedio del suelo mayor a un metro.

El polígono tres con obras cubre una superficie de 1.70 ha, está ubicada a una altura promedio de 1,660 msnm, exposición N; pendiente media dominante de 11.6% y profundidad promedio del suelo de 0.10 m. El polígono testigo abarca 0.17 ha, ubicada a una altura media de 1,720 msnm, exposición NE, pendiente media de 11.7% y profundidad promedio del suelo de 0.24 m.

#### 7.7.2 Sitios de muestreo y tratamientos establecidos en áreas con obras

En cada parcela con obras se midieron tres zanjas distribuidas en la parte alta, media y baja (Figura 12b); en cada obra se establecieron cinco sitios de muestreo: la entre zanja, inicio, zanja, bordo y pie (Figura 12c). En total en cada parcela con obras se establecieron 15 sitios de muestreo. En cada parcela sin obras se establecieron tres sitios de muestreo distribuidos en la parte alta, media y baja de la parcela (Figura 12b).

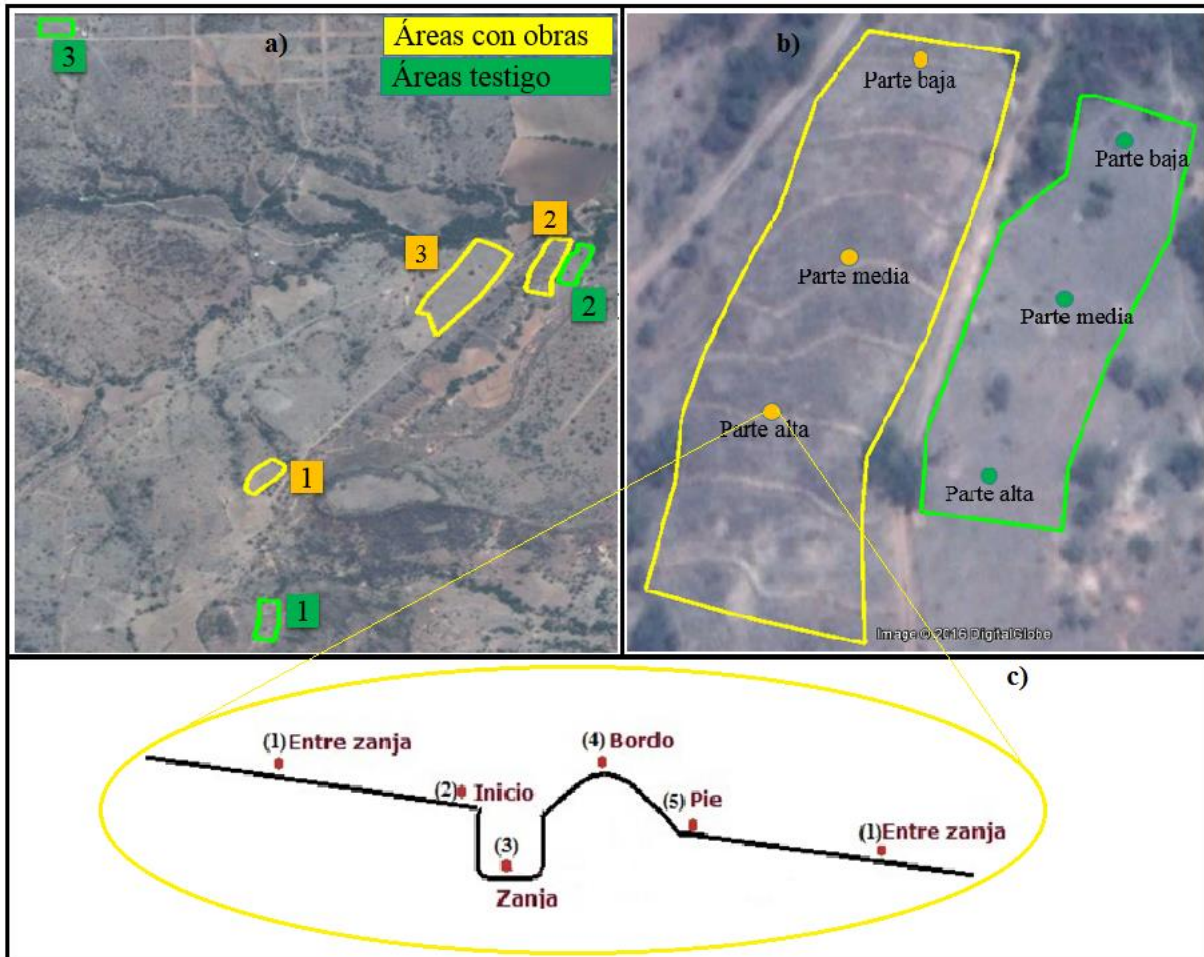


Figura 12. a) Polígonos de muestreo; b) Distribución de las obras medidas y sitios de muestreo en polígonos testigo; c) Sitios de muestreo en el sistema zanja bordo.

### 7.7.3 Periodos de muestreo y variables medidas

Los muestreos se realizaron en tres periodos, a fines del periodo húmedo en octubre del 2015, en el periodo seco (abril 2016) y en el período húmedo (agosto del 2016). En cada sitio de muestreo se obtuvieron datos radiométricos, imágenes nadir y producción de biomasa para los tres períodos. Solo en el primer muestreo se muestreo la vegetación en el estrato herbáceo, se registró la densidad, cobertura y altura de las especies encontradas.

#### 7.7.4 Registro de datos en campo

a) **Medición de reflectancia e imágenes nadir.** La reflectancia se midió con un radiómetro espectral Cropscan, Inc. Modelo MSR16R que contiene las mismas bandas del sensor LANDSAT TM (bandas azul, verde, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio), la captura de la imagen nadir se realizó con una cámara fotográfica digital, SONY de 10.1 mega píxeles. Para registrar las mediciones, el radiómetro y la cámara fotográfica se colocaron a una altura aproximada de 3.20 m, se obtuvieron datos radiométricos en una superficie circular de 2.01 m<sup>2</sup> con un diámetro de 1.6 m. En cada punto se hicieron tres registros radiométricos y se tomó una imagen nadir desde la misma altura (Figura 13).



Figura 13. Registro de datos radiométricos e imagen nadir en un polígono sin obras.

b) **Colecta de vegetación.** En el área donde se registraron los datos de reflectancia y la imagen nadir se delimitó una superficie de 1 m<sup>2</sup>, se cortó la vegetación existente en el área, se colectó en una bolsa de papel para secarla en una estufa y obtener su peso seco (g m<sup>-2</sup>) (Figura 14).



Figura 14. Cosecha de biomasa desarrollada en un metro cuadrado.

c) **Muestreo del estrato herbáceo.** En la parte baja de cada parcela se estableció un cuadrante para el muestreo del estrato herbáceo, se registraron las especies desarrolladas en un metro cuadrado, se midió cobertura, altura y densidad de cada especie; para identificar las especies se colectó un ejemplar fuera del sitio de muestreo (Figura 15).



Figura 15. Muestreo de vegetación en los polígonos con obras y testigo.

### 7.7.5 Procesamiento de la información obtenida en campo

Los datos radiométricos, las imágenes nadir y las muestras de vegetación obtenidas en campo se procesaron para estimar índices de vegetación con la metodología antes señalada, el porcentaje de cobertura vegetal, la producción de biomasa en seco y la composición y estructura florística en las parcelas con obras y sin obras.

**Datos de reflectancia.** Se descargaron en un archivo de formato “mv”, con el programa PROSTPROC se generaron dos archivos con formato “cmv” y “rfl”, con este último, se generó un archivo de Excel. Los datos fueron depurados y se obtuvieron los promedios de las reflectancias registradas en cada sitio de muestreo. Con esta información, se calcularon los índices de vegetación.

El NDVI se calculó con la ecuación propuesta por Rouse *et al.* (1974), el IVPN se estimó con relación Propuesta por (Villa *et al.*, 2014) y el SAVI se estimó como lo propone Huete. (1988). En este apartado al factor de ajuste al brillo del suelo (L), se le asignó un valor en función del porcentaje de la cobertura vegetal obtenido en los sitios de muestreo (Cuadro 10) (Huete, 1988).

Cuadro 10. Valor del factor de ajuste en función del porcentaje de cobertura registrado en los sitios de muestreo.

Valores recomendados por Huete, (1988)		Porcentaje de cobertura vegetal‡
L=1	Densidades de cobertura vegetal bajas	Menor al 50%
L=0.5	Densidades de cobertura vegetal intermedias	Del 50 al 75%
L=0.25	Densidades de cobertura vegetal altas	Mayores del 75%

‡ Criterio establecido para este trabajo.

a) **Imágenes nadir.** Las imágenes nadir fueron procesadas para calcular el porcentaje de cobertura vegetal; primero se hizo una máscara para homogeneizar las superficies medidas por el radiómetro y cámara fotográfica, debido a que la superficie captada por la cámara fotográfica fue mayor a la del radiómetro, para ello, se generó una máscara para uniformizar las áreas captadas por la cámara con la superficie medida con el radiómetro 2.01 m<sup>2</sup>.

La máscara se hizo en el programa Corel Photo Paint 12®, para lo cual, se consideró el área medida con el radiómetro (área circular de 2.01 m<sup>2</sup>, de 1.6 m de diámetro). Las imágenes se recortaron con la máscara, después con el programa ENVI Classic 32 bit, se calculó el porcentaje de cobertura vegetal con una clasificación supervisada por el método de Máxima verosimilitud, se utilizaron siete clases: vegetación verde, seca, inflorescencia, espigado, sombras, suelo desnudo y suelo sombreado.

b) **Producción de biomasa.** La biomasa cosechada y colectada se pesó con una balanza analítica para anotar el peso inicial, las muestras se metieron a una estufa de secado a una temperatura de 65 °C y se sacaron de la estufa hasta alcanzar un peso constante, el peso obtenido se registró en gramos por metro cuadrado (g m<sup>-2</sup>).

c) **Datos de vegetación.** Se identificaron los nombres de las especies encontradas y se calcularon los siguientes índices con las ecuaciones que se indican.

El Índice de Valor de Importancia (IVI) se calculó con la  $IVI = \text{Dominancia relativa} + \text{Densidad relativa} + \text{Frecuencia relativa}$  Ecuación 3.

$IVI = \text{Dominancia relativa} + \text{Densidad relativa} + \text{Frecuencia relativa}$  Ecuación 3

Donde:

$$\text{Dominancia relativa} = \frac{\text{Dominancia absoluta por especie}}{\text{Dominancia absoluta de todas las especies}} \times 100$$

$$\text{Dominancia absoluta por especie} = \frac{\text{Cobertura de la especie}}{\text{Área muestreada}}$$

$$\text{Cobertura de la especie} = \frac{\pi}{4} (\text{diametro promedio que cubre la especie})^2$$

$$\text{Densidad relativa} = \frac{\text{Densidad absoluta de cada especie}}{\text{Densidad absoluta de todas las especies}} \times 100$$



$$\text{Frecuencia relativa} = \frac{\text{Frecuencia absoluta de cada especie (FA)}}{\text{Frecuencia absoluta de todas las especies}} \times 100$$

$$\text{Frecuencia absoluta} = \frac{\text{Número de sitios en los que se presentó la especie}}{\text{Número total de sitios muestreados}}$$

El índice de Margalef ( $D_\alpha$ ) se calculó con la ecuación 4.

$$D_\alpha = \frac{S-1}{\log N} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

S: número de especies

N: número total de individuos

El índice de Shannon – Wiener ( $H'$ ) se estimó con la ecuación 5.

$$H' = \sum_{i=1}^S Pi * \ln(Pi) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

S: número de especies

Pi: proporción de individuos de la especie i

El índice de Simpson ( $D_{St}$ ) se calculó con la ecuación 6.

$$S = \frac{1}{\sum \frac{ni(ni-1)}{N(N-1)}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

ni: número de individuos en la enésima especie

N: número total de individuos

El Índice de equidad (E) se calculó con la ecuación 7.

$$E = \frac{H'}{\ln(S)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

H': índice de Shannon-Wiener

S: número total de especies

El índice de Sorensen ( $I_{scuant}$ ) se estimó con datos cuantitativos con la ecuación 8.

$$I_{scuant} = \frac{2pN}{aN+bN} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

aN = número total de individuos en el sitio A

bN = número total de individuos en el sitio B

pN = sumatoria de la abundancia más baja de cada una de las especies compartidas entre ambos sitios; en este trabajo se consideró la densidad de las especies como valor de abundancia de acuerdo con Bruce y James (2002).

#### 7.8 Validación de índices de vegetación de imágenes de satélite con mediciones en campo

La imagen del 3 de agosto del 2016 se utilizó para calcular los índices de vegetación NDVI y SAVI con las ecuaciones 1 y 2; y compararlos con los IV calculados con la reflectancia medida en campo durante un muestreo en pastizales con obras y sin obras en julio del 2016.

Para establecer los sitios de muestreo de vegetación se realizaron recorridos de campo que permitieron valorar las condiciones actuales del pastizal; así se establecieron 14 sitios de muestreo en las zonas con obras y 16 en áreas sin obras (Figura 16). Los criterios utilizados para establecer los sitios de muestreo fueron los siguientes:

- Que los sitios de muestreo estuvieran a una distancia mínima de 100 m de cualquier camino o vereda.
- Que representarán las condiciones naturales, es decir que no hubiera ningún manejo o intervención del hombre, excepto las obras de conservación.
- Que el área estuviera libre de pastoreo al menos durante el último ciclo de desarrollo.

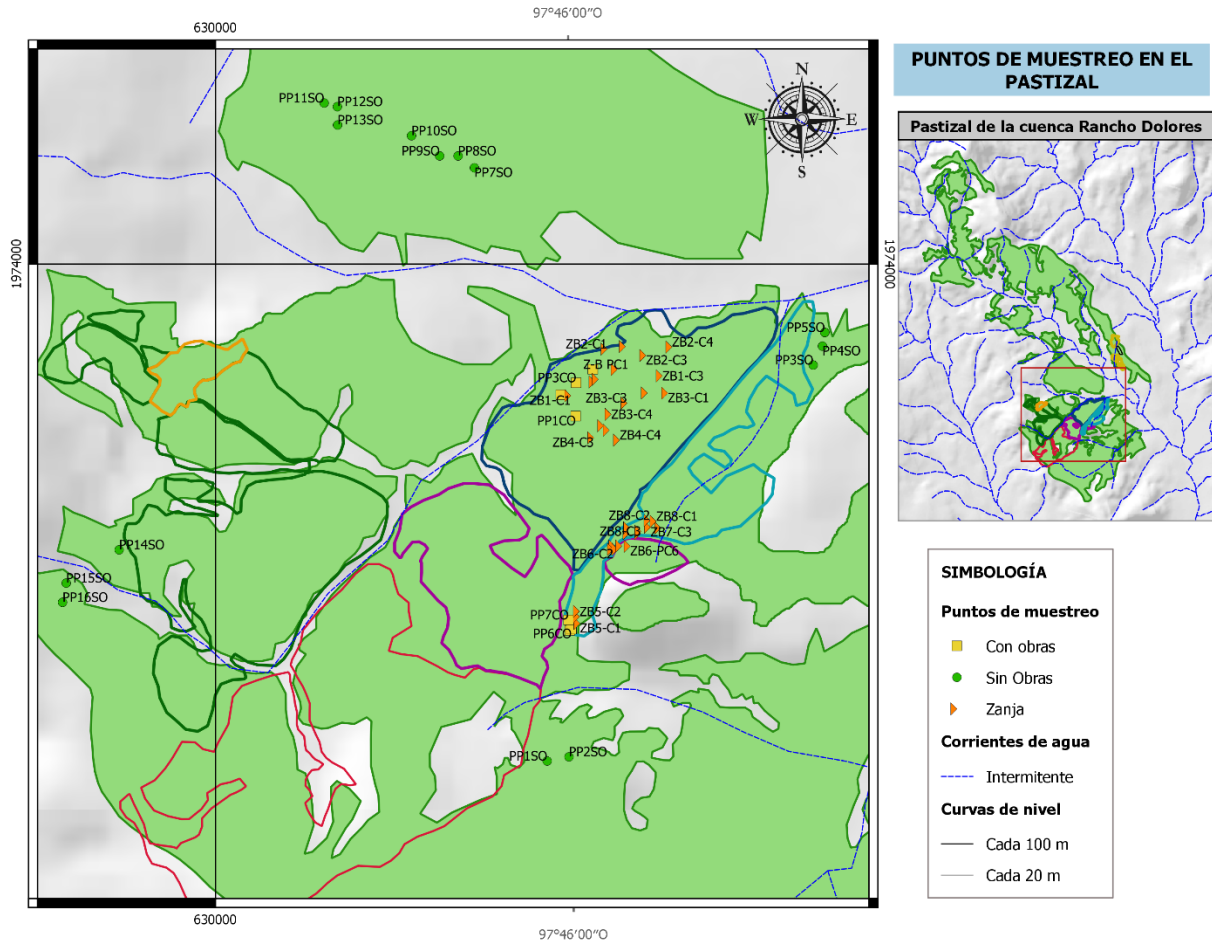


Figura 16. Distribución de sitios de muestreo en áreas de pastizal con obras y sin obras.

#### 1.6.4.1. Muestreo en áreas de pastizal con obras

Los sitios de muestreo se realizaron entre zanjas, zanjas y bordos para conocer la variación de la vegetación por efecto de las obras en cada sitio de muestreo (Figura 17).

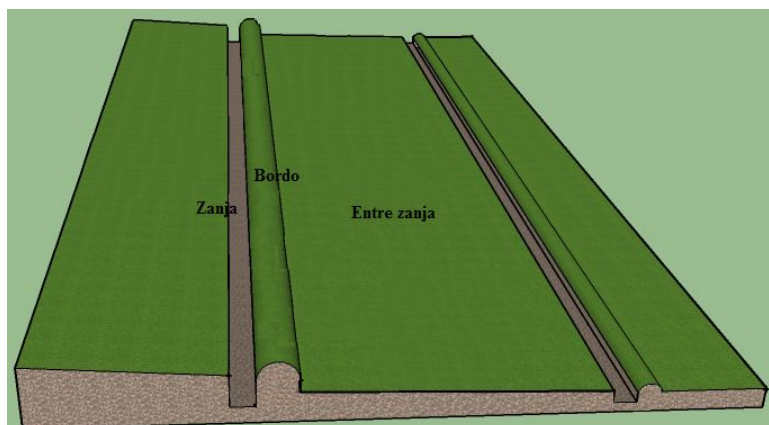


Figura 17. Condiciones evaluadas en pastizales con obras.

**Entre zanjas.** Se establecieron seis parcelas de muestreo de  $9 \text{ m}^2$ . Dentro de cada parcela, se realizaron cuatro sitios de muestreo de área circular de  $0.25 \text{ m}^2$  y  $0.55 \text{ m}$  de diámetro y en el centro de la parcela, un sitio de muestreo circular de  $2.01 \text{ m}^2$  y  $1.60 \text{ m}$  de diámetro (Figura 18).

En los sitios de  $0.25 \text{ m}^2$ , se registraron datos de reflectancia con un radiómetro espectral diseñado con el mismo espacio espectral que el sensor LANDSAT TM y las imágenes nadir con la cámara fotográfica una altura aproximada de  $1.10 \text{ m}$ . En los sitios de  $2.01 \text{ m}^2$  también se registró la reflectancia e imágenes nadir, para esto el radiómetro y la cámara fotográfica se colocaron a una altura aproximada de  $3.20 \text{ m}$  (Figura 18; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

**Zanjas y bordos.** Se evaluaron 8 zanjas bordo, en cada obra se establecieron cuatro sitios de muestreo a lo largo de la zanja y cuatro sitios a lo largo del bordo, los sitios de muestreo fueron un área circular de  $0.25 \text{ m}^2$ . También se realizaron dos sitios de muestreo circulares de  $2.01 \text{ m}^2$  que cubriera la zanja y el bordo. Se hicieron 80 sitios de muestreo, 32 sitios en zanjas, 32 sitios en bordos y 16 sitios que cubrió la zanja y el bordo.

En los sitios de muestreo de  $0.25 \text{ m}^2$  y  $2.01 \text{ m}^2$  se registraron datos radiométricos, imágenes a nadir (a las alturas antes mencionadas). El registro de información, colecta de especies y cosecha de biomasa se realizó de la misma forma que en los sitios establecidos en entre zanjas (Figura 18).

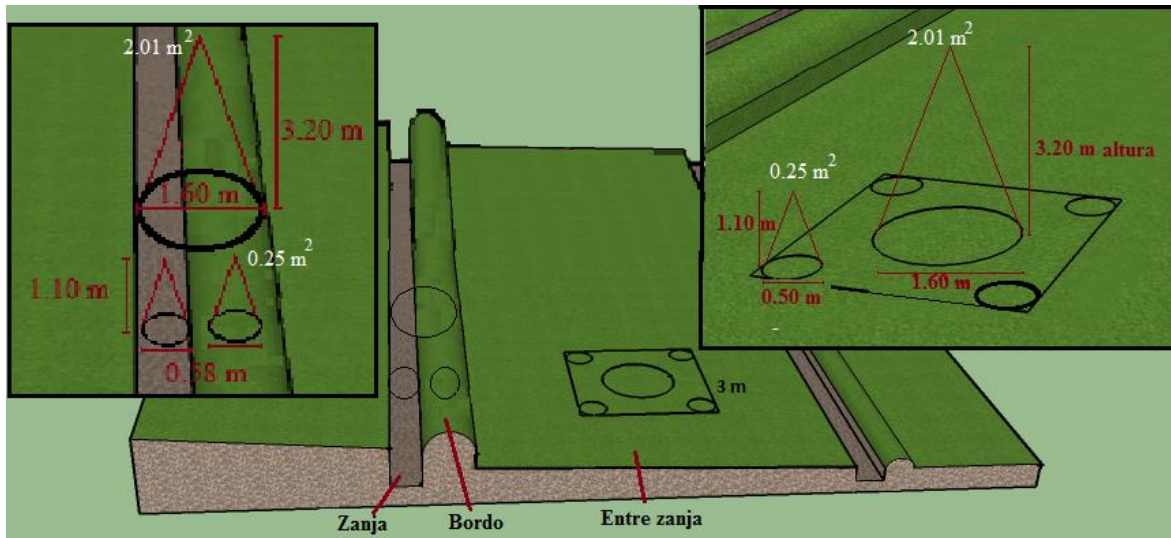


Figura 18. Registro de datos en sitios de muestreo en las zanjas, bordos y entre zanjas.

**Registro y colecta de especies.** En los sitios de muestreo de 0.25 m<sup>2</sup> donde se obtuvo la reflectancia (entre zanjas, zanjas y bordos) se delimitaron cuadrantes de 0.5 m x 0.50 m, donde se registró la presencia de especies herbáceas de hoja ancha, gramíneas forrajeras y gramíneas no forrajeras; fuera de los sitios de muestreo se colectó un ejemplar por especie encontrada que se colocó en una prensa botánica y se llevó al herbario para identificarla (Figura 19).



Figura 19. Registro y colecta de especies desarrolladas en el sitio de muestreo.

**Cosecha de biomasa.** En los sitios de 0.25 m<sup>2</sup> se cosechó la biomasa verde, las muestras fueron colocadas en bolsas de papel para llevarlas al laboratorio, donde se metieron a una estufa a una temperatura aproximada de 65 °C hasta que las muestras registraron un peso constante (Figura 20).



Figura 20. Cosecha de biomasa verde en el sitio de muestreo, separación del material.

#### 1.6.4.2. Muestreo en áreas de pastizal sin obras

Se establecieron 16 parcelas de muestreo, en cada parcela se ubicaron cuatro sitios circulares de  $0.25 \text{ m}^2$  y un sitio de muestreo circular de  $2.01 \text{ m}^2$  donde en todos los sitios se registró la reflectancia y se tomaron imágenes nadir. Solo en los sitios de  $0.25 \text{ m}^2$  se registraron las especies y cosecha de biomasa; en cada parcela también se realizó (Figura 21). En total se establecieron 64 sitios de  $0.25 \text{ m}^2$  y 16 sitios de  $2.01 \text{ m}^2$ .

La información de todas las variables se obtuvo de la misma forma como se realizó en los sitios de entre zanjas.

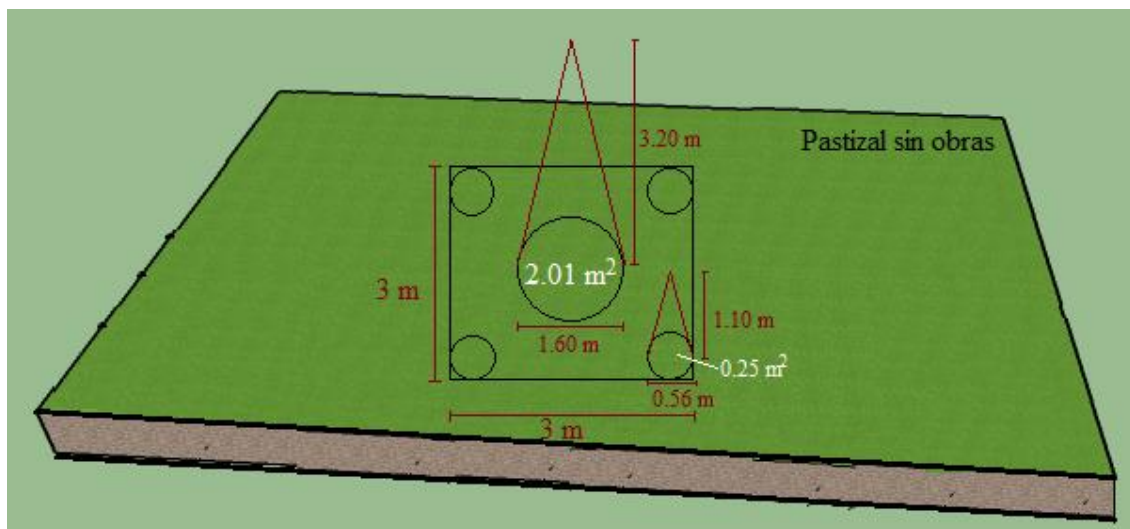


Figura 21. Sitios de muestreo en pastizales sin obras.

#### 1.6.4.3. Procesamiento y análisis de la información registrada en los pastizales

Los datos de reflectancia, producción de biomasa e identificación de especies se procesaron de la misma forma como se indicó en la metodología para el análisis del efecto de las obras entre periodos.

**Imágenes nadir.** Las imágenes nadir fueron procesadas para obtener el porcentaje de cobertura de la misma forma como se ha indicado anteriormente, pero en este caso, se generaron dos máscaras para uniformizar los sitios de muestreo a superficies de  $2.01 \text{ m}^2$  y de  $0.25 \text{ m}^2$ .

a) **Identificación de especies vegetales.** Se realizó la identificación taxonómica de las especies colectadas en campo y se obtuvo la frecuencia, el índice de semejanza y se identificaron diferencias significativas entre las áreas evaluadas.

**Porcentaje de frecuencia de especies.** Se obtuvo el número de especies presentes en pastizales con obras y sin obras, así como el tipo de especie (herbáceas, gramíneas forrajeras y no forrajeras) y la frecuencia relativa se estimó con la relación del número de cada especie entre el número total de especies identificadas en cada sitio de muestreo.

## 7.9 Análisis estadístico

### 7.9.1 Índices de vegetación calculados con las imágenes de satélite

Para NDVI y SAVI se obtuvieron los estadísticos descriptivos, en pastizales con obras y sin obras, para los dos periodos evaluados, para identificar los intervalos de cambios entre los IV antes y después del establecimiento de las obras; la comparación de los IV se realizó con histogramas de distribución y se analizaron con base en el coeficiente de asimetría (sesgo) y Curtosis). Se corroboró la homogeneidad de los datos con la prueba de Bartlett y la normalidad con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, después se compararon las medias con el método de Tukey.

### 7.9.2 Efecto de las obras entre periodos de medición

Para el porcentaje de CV, CS, CVT, la PB, IVPN, NDVI y SAVI se hicieron dos comparaciones: la primera se hizo entre los sitios de muestreo dentro de los polígonos con zanjas (entre zanja, inicio, zanja, bordo y pie); la segunda comparación fue entre sitios de entre zanja y sitios testigo. Las comparaciones se realizaron en el programa Minitab 17, consistió en un análisis de varianza multifactorial (período, polígono y sitio de medición) con el modelo lineal general y comparación de medias con el método de Tukey, para identificar diferencias entre sitios de muestreo y sus interacciones. Además, se calculó la correlación entre los porcentajes de cobertura vegetal y PB con IVPN, NDVI y SAVI.

Se calculó el Índice de Valor de Importancia (IVI) para conocer la estructura florística de los sitios que incluye a el índice de Margalef para la riqueza de especies, los Índices de Shannon – Wiener y Simpson para la diversidad y el índice de Equidad (Zarco *et al.*, 2010), para conocer la proporción de las especies en las polígonos con obras y sin obras; para conocer el grado de semejanza entre polígonos con y sin obras, se calculó el índice de Sorensen con el método cuantitativo (Moreno, 2001).

Con el programa PC-ORD v 6.0, se hizo una clasificación para esquematizar la semejanza entre sitios de muestreo con base en la presencia y ausencia de especies, también se aplicó la prueba de Procedimiento de Permutación de Respuesta Múltiple (PPRM) esta prueba es análoga a un ANOVA o MANOVA con un nivel de confiabilidad del 95% (Mielke *et al.*, 1981; Cai, 2006; Torres *et al.*, 2010), para saber si existe diferencia significativa en la composición florística de las áreas evaluadas.

### 7.9.3 Validación de los índices de vegetación estimados con la imagen de satélite

El porcentaje de cobertura vegetal, PB, el IVPN, NDVI y SAVI de los datos medidos durante julio del 2016, se utilizaron como puntos de entrenamiento para validar los resultados obtenidos con la imagen de satélite, para ello se estas variables se correlacionaron con el NDVI y SAVI calculados con la imagen de satélite de agosto del 2016.



## 8 RESULTADOS

En este apartado se muestran el análisis de los índices de vegetación (NDVI y SAVI) estimado con las imágenes de satélite SPOT, antes y después del establecimiento de las zanjas bordo; las mediciones de porcentaje de cobertura, producción de biomasa e índices de vegetación (IVPN, NDVI y SAVI) en los polígonos con y sin obras; la relación entre los IV estimados con imágenes de satélite y variables estimadas con determinaciones realizadas en campo y la composición florística de las áreas.

### 8.1 Índices de vegetación en pastizales con obras

Para los IV se encontró que para el período seco (abril) antes de construir las obras, el valor promedio de NDVI fue de 0.17 con un rango de variación de 0.11 a 0.38 y después con las obras, el NDVI aumento ligeramente a 0.20 con variaciones de 0.02 a 0.53 (Cuadro 11; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); que contrasta con los valores de NDVI del período semiseco (noviembre) ya que antes de las obras el promedio registrado fue de 0.21 con un rango de 0.09 a 0.42 y con obras el NDVI aumento a 0.31 con fluctuaciones de 0.01 a 0.63, lo que indica presencia de mayor cobertura vegetal.

El SAVI durante el período seco (abril) antes de construir las zanjas bordo registró un valor promedio de 0.114 con variaciones de 0.073 a 0.257; después de establecerlas, el valor promedio fue de 0.106 con variaciones de 0.01 a 0.37; durante el período semiseco (noviembre) fue similar al observado en el NDVI, antes de establecer las obras el promedio de 0.114 con rangos que fluctuaron entre 0.038 a 0.207 y después de construir las zanjas se registró un valor promedio de 0.175 con fluctuaciones de 0.004 a 0.455 que tienen la tendencia a incrementarse por la presencia de mayor cobertura vegetal (Cuadro 11).

Cuadro 11. NDVI y SAVI registrado en el área de pastizal, antes y después del establecimiento de las obras.

NDVI (período seco)			NDVI (período semiseco)			SAVI (período seco)			SAVI (período semiseco)		
Clases	Frecuencia (%)		Clases	Frecuencia (%)		Clase	Frecuencia (%)		Clase	Frecuencia (%)	
	Antes	Después		Antes	Después		Antes	Después		Antes	Después
< 0.06	-	0.08	< 0.06	-	0.08	>0.04	-	0.31	> 0.05	0.05	0.15
0.06 - 0.12	0.49	1.70	0.07 - 0.12	0.12	0.13	0.04 - 0.08	0.12	14.95	0.05 - 0.09	8.02	1.51
0.12 - 0.16	51.48	20.83	0.12 - 0.18	16.02	1.43	0.08- 0.11	42.68	38.84	0.09 - 0.13	70.32	13.42
0.16 - 0.21	40.10	35.95	0.18 - 0.24	67.39	9.18	0.11 - 0.14	48.99	35.13	0.13 - 0.17	21.22	32.47
0.21 - 0.25	6.10	31.25	0.24 - 0.29	14.22	26.24	0.14 - 0.17	7.33	9.10	0.17 - 0.21	0.39	36.71
0.25 - 0.30	1.53	8.31	0.29 - 0.35	1.98	38.14	0.17 - 0.21	0.66	1.15	0.21 - 0.26	-	12.15
0.30 - 0.35	0.21	1.40	0.35 - 0.41	0.26	19.16	0.21 - 0.30	0.19	0.40	0.26 - 0.30	-	2.42
0.35 - 0.39	0.09	0.44	0.41 - 0.46	0.01	4.20	0.24 - 0.27	0.02	0.10	0.30 - 0.34	-	0.74
0.39 - 0.44	-	0.01	0.46 - 0.52	-	1.01	0.27 - 0.31	-	0.01	0.34 - 0.38	-	0.24
0.44 - 0.48	-	0.01	0.52 - 0.58	-	0.29	0.31 - 0.34	-	0.00	0.38 - 0.42	-	0.13
> 0.48	-	0.01	> 0.58	-	0.16	> 0.34	-	0.01	> 0.42	-	0.05
Estadísticos descriptivos											
N	8085	22320		8,040	22,310		8,084	22,319		8,039	22,309
Mínimo	0.107	0.025		0.087	0.010		0.073	0.010		0.038	0.004
Máximo	0.376	0.531		0.421	0.633		0.257	0.370		0.207	0.455
Media	0.167	0.199		0.210	0.312		0.114	0.106		0.114	0.175
Desviación estándar	0.029	0.045		0.033	0.062		0.018	0.029		0.020	0.045
Coefficiente de asimetría	1.755	0.389		0.851	0.229		1.447	0.619		0.116	0.592
Curtosis	5.400	0.683		2.360	1.355		4.296	1.548		0.233	2.186
Nivel de confianza (95%)	0.0006	0.0006		0.0007	0.0008		0.0004	0.0004		0.0004	0.0006

Antes: abril del 2005 y diciembre del 2003. Después: abril del 2016 y noviembre del 2015, período seco: abril, período semiseco: noviembre.

En ambos períodos se observa un incremento en los valores de los IV asociado a una mejor condición de la vegetación (Aguirre *et al.*, 2011; Casiano y Paz, 2014; Higginbottom y Symeonakis, 2014). Los valores de IV obtenidos después de la construcción de las zanjas bordo tienen un rango de variación mayor con tendencia a incrementarse, fue en el período después de las lluvias (noviembre) cuando se registraron valores de IV más altos comparados con el período seco (abril).

Los valores de NDVI y SAVI se analizaron con distribuciones probabilísticas<sup>9</sup> y se encontró que los valores de NDVI para el período seco antes de construir las obras, el 91.55% de los valores se ubica en el rango de 0.12 a 0.21; con obras, ese rango de valores solo represento el 56.77%, lo que indican que el resto de las estimaciones son mayores, y se confirma que existe mayor reflectancia por la presencias de mayor cobertura vegetal. Los valores de SAVI tuvieron un comportamiento similar para antes de las obras, ya que el 91.7% de los valores se agruparon en el rango de 0.08 a 0.14 y con obras, el 98 % de los datos se presentaron en un rango más amplio de 0.06 a 0.25, lo que muestra una mayor varianza y un mayor sesgo, razón por la cual, no existe incremento en los valores de SAVI estimado con o sin obras en este período (Cuadro 11 y Figura 22).

Para el período semiseco, más del 97% de los valores de NDVI se encuentran en el rango de 0.12 a 0.25, con las obras solo el 36.8% estuvieron en ese rango y 57.3% de los valores se encontraron en el rango de 0.25 a 0.35 que indica un desfaseamiento a la derecha con valores de NDVI más altos. El 91.54% de los valores de SAVI tienen un rango de 0.09 a 0.17; con obras, el 98.7% de los valores varían de 0.12 a 0.30, siguen la misma tendencia pero con un coeficiente de variación mayor (Cuadro 11 y Figura 22).

Los valores del NDVI en el período seco antes de la construcción de las obras presentan un coeficiente de asimetría positivo (1.755), lo cual indica que valores mayores a la media; después de la construcción de las zanjas este indicador es menor (0.389) y cercano a cero, que indica que la distribución de los valores es más simétrica. Para el período de noviembre antes de las obras el

---

<sup>9</sup> El número total de valores de los índices de vegetación (NDVI y SAVI) estimados varía por la resolución espacial de las imágenes de satélite SPOT, antes de establecer las obras el tamaño del pixel de las imágenes era de 10 m y después de la construcción de las obras el tamaño del pixel fue de 6 m.

coeficiente de asimetría fue de 0.851 y para después de la construcción de las zanjas de 0.229, en ambos casos es positiva pero después de las obras los datos tienen un comportamiento más simétrica (Cuadro 11 y Figura 22).

Los valores del SAVI en el período seco antes de la construcción de las obras presentan un coeficiente de asimetría positivo de 1.447 que indica que existe una extensión hacia valores más altos que la media como se reportó para los datos de NDVI; después de las obras, el coeficiente de asimetría sigue siendo positivo, pero más cercano a cero 0.619, esto indica que la distribución de los datos es más simétrica que antes de las obras. Los valores del SAVI en el período semiseco presentan coeficientes de asimetría cercanos a cero (0.116 y 0.592), antes y después de las obras, respectivamente; esto indica que existe una distribución casi simétrica en las dos fechas (Cuadro 11 y Figura 22).

El Curtosis del NDVI en el período seco antes de las obras es de 5.4, indica una distribución leptocurtica donde 91.58% de los datos se concentran alrededor del valor central (0.167); después de las obras el Curtosis también es positivo pero cercano a cero 0.683, donde los datos se distribuyen en forma mesocurtica o normal, donde existe una concentración media de los datos alrededor del valor central en este caso de 0.199. Los datos registrados en el período semiseco se distribuyen de forma similar al período seco, donde antes de las obras 81.61% de los datos se concentran alrededor de la media (0.21) y después de las obras la distribución de los datos se acerca a una distribución normal donde se tiene una concentración alrededor de los valores centrales en este caso de 0.312 (Cuadro 11 y Figura 22).

El Curtosis de los valores del SAVI en el período seco y semiseco antes de la construcción de las obras es positivo y presentan una distribución leptocurtica, con una alta concentración de datos alrededor de la media, en este caso de 0.114 para los dos períodos; el Curtosis después de las obras en los dos períodos es positivo pero menor, con una concentración de datos alrededor de los valores centrales de 0.106 y 0.175, en el período seco y semiseco, respectivamente (Cuadro 11 y Figura 22).

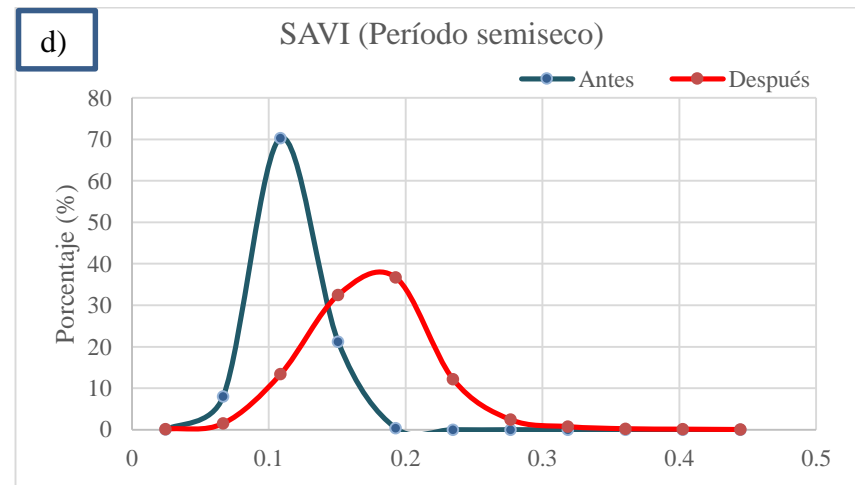
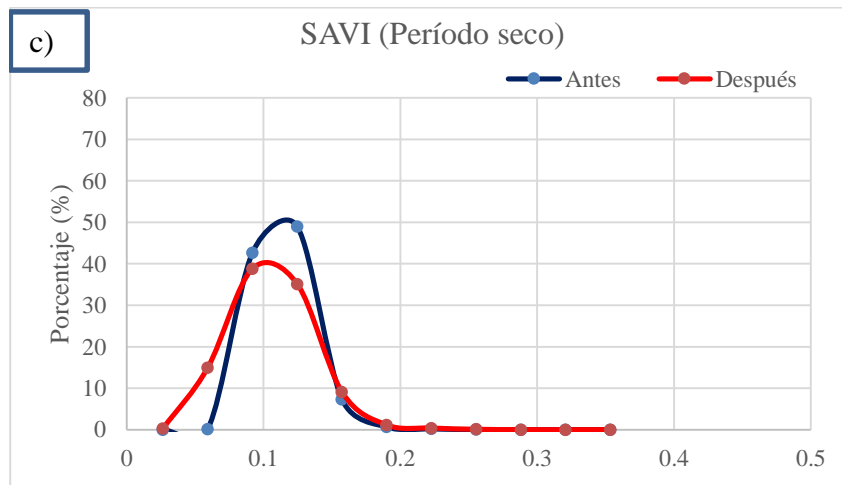
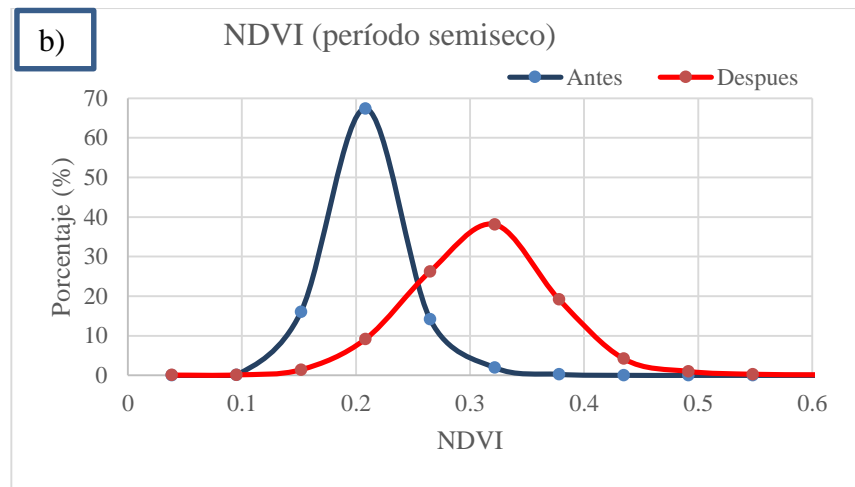
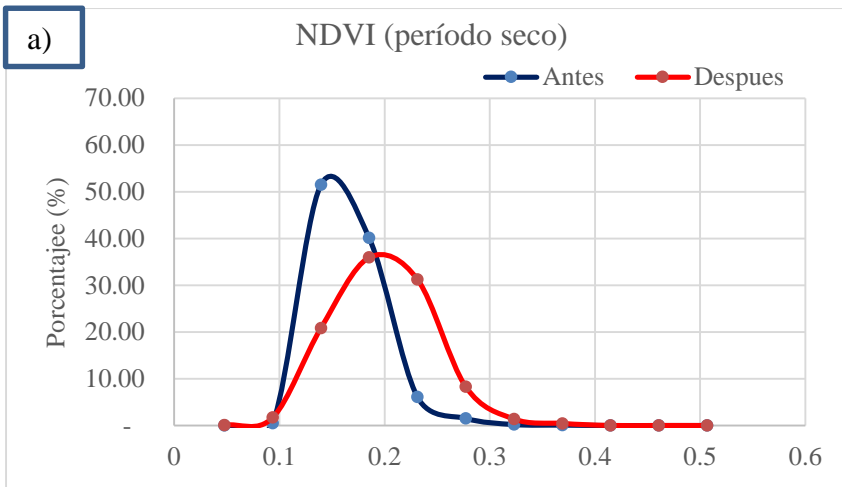


Figura 22. Distribución del NDVI (inciso a y b) y SAVI (inciso c y d) en pastizales con el sistema zanja bordo.

La distribución probabilística de los valores del NDVI y SAVI antes del establecimiento de las obras, se debe a que los datos provienen de imágenes con menor resolución espacial, lo cual reduce el registro de los valores extremos; este efecto se ha observado en investigaciones donde utilizan imágenes de diferente resolución espacial, donde a mayor resolución se tiene la posibilidad de cuantificar los datos extremos, tanto en el límite inferior como en el límite superior, que hacen que la distribución de los datos sea más amplia que en imágenes de menor resolución (Girolimetto *et al.*, 2011).

#### 8.1.1 Diferencias estadísticas entre los valores de NDVI y SAVI antes y después de las obras

Los datos de NDVI y SAVI cumplen con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza de varianza, analizados con las pruebas de Kolmogorov - Smirnov y Bartlett, por ello se realizó un análisis de varianza para identificar si existe diferencia significativa entre los IV antes y después de construir las zanjas bordo y en los períodos seco y semiseco (Cuadro 12)

Cuadro 12. Análisis de varianza del NDVI y SAVI, antes y después del establecimiento de obras.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
NDVI (período seco)					
Modelo	1	6.00	6.00	3,496.31	<.0001
Error	30403	52.21	0.00		
Total	30404	58.21			
NDVI (período semiseco)					
Modelo	1	61.10	61.10	19,395.20	<.0001
Error	30348	95.61	0.00		
Total	30349	156.72			
SAVI (período seco)					
Modelo	1	0.32	0.32	436.90	<.0001
Error	30403	22.07	0.00		
Total	30404	22.39			
SAVI (período semiseco)					
Modelo	1	21.38	21.38	13,716.70	<.0001
Error	30348	47.31	0.00		
Total	30349	68.69			

La prueba de medias con el método de Tukey mostró que existen diferencias significativas entre los valores medios de los IV en los períodos seco y semi seco evaluados y para antes y después de la construcción de las zanjas bordo. El valor medio de los IV del periodo semiseco fue mayor al del periodo seco y, que el valor medio de los IV registrado después de establecer las obras es mayor a los registrados antes de las obras, excepto el SAVI durante el período seco, donde el valor de dicho índice fue más alto antes del establecimiento de las obras (Cuadro 13).

Cuadro 13. Comparación de medias del NDVI y SAVI en los periodos evaluados, con el método de Tukey.

NDVI							
Agrupamiento	Abril			Tratamiento	Noviembre		
	Media	N			Media	N	
A	0.199	22320	Después	A	0.312	22310	Después
B	0.167	8085	Antes	B	0.210	8040	Antes
SAVI							
A	0.114	8085	Antes	A	0.175	22310	Después
B	0.106	22320	Después	B	0.114	8040	Antes

Los resultados muestran que después del establecimiento de las obras, la cobertura vegetal ha sido mayor a la que había antes de establecer las obras, lo cual puede atribuirse a la presencia de las zanjas bordo; un factor que influye en el valor de los IV es el período de lluvias, el cual interviene de forma directa en el desarrollo de las plantas por el tipo de vegetación analizada, ya que, un alto porcentaje de las plantas son de ciclos anuales y se ven favorecidas de forma evidente por las condiciones de humedad o sequía.

Los cambios registrados con el NDVI y SAVI en los pastizales con obras, en los períodos analizados no solo se pueden atribuir al efecto de la construcción de las zanjas, debido a que los IV estimados con las imágenes de antes de las obras consideran un tamaño de pixel de 10 m y cubren una superficie de 100 m<sup>2</sup> y el tamaño del pixel de las imágenes después de las obras es de 6 m y cubre un área de 36 m<sup>2</sup>, razón por la que en estas últimas el tamaño del pixel permiten identificar con mayor precisión la vegetación del estrato herbáceo y las especies arbustivas y arbóreas, propiciando un incremento en los valores de estos índices ya que en pastizales los IV son bajos, comparado con la vegetación arbolada (García y Martínez , 2010; Meneses, 2011); o bien

donde la vegetación es escasa los IV son bajos en comparados a la vegetación densa donde los IV son altos (Merg *et al.*, 2011; López *et al.*, 2015).

Otro factor importante que influye en los índices de vegetación es la temporada de lluvias, se observa incremento de los IV, los cuales son más evidentes durante el período semiseco después de la temporada de lluvias. Que en este caso solo se mostró que en el año 2005 (antes del establecimiento de las zanjas bordo) la precipitación anual fue de 388.40 mm y después de las obras fue de 780.30 mm, lo cual podría haber influido en la cobertura vegetal en los diferentes años y que, en este caso, se atribuye a las zanjas bordo.

Los IV no indican una tendencia del pastizal, más bien refleja la condición de la vegetación en el momento de la captura de las imágenes, por esta razón, no es posible afirmar o descartar la posibilidad de que existe un cambio en la condición de la cobertura vegetal debido a que el ciclo fenológico de las especies que se desarrollan es corto y dinámico comparado los bosques, que han sido analizados con IV estimados con imágenes de satélite (Aguirre *et al.*, 2011).

## 8.2 Efecto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en polígonos con obras

Para el efecto de las obras sobre la cobertura vegetal total se determinó el porcentaje de cobertura verde, seca y total, producción de biomasa y los índices de vegetación (IVPN, NDVI y SAVI) en tres épocas del año. Al final del período de lluvias (FPL) en octubre del 2015, en el período seco (PS) en abril del 2016 y al inicio del periodo de lluvias (IPL) en julio del 2016, en seis polígonos (tres con obras y tres sin obras), en los primeros se establecieron cinco sitios de muestreo (entre zanja, inicio, zanja, bordo y pie) y tres sitios de muestreo (parte alta, media y baja) en los polígonos testigo.

### 8.2.1 Cobertura vegetal, producción de biomasa y los IV en el sistema zanja bordo

Para los períodos secos, inicio y final del período de lluvias el porcentaje promedio de CVT que considera la suma del porcentaje de CS y CV, mostro una variación de 70.99, 72.35 y 75.53% respectivamente, que corresponde al 4%, siendo contrastantes las variaciones promedio de CS y CV entre periodos por la presencia de agua de lluvia. La PB promedio al final del periodo de lluvia ( $238.97 \text{ g m}^{-2}$ ) fue más alto comparado con los otros periodos, destacando que obtuvo una mayor reducción de biomasa del 31.7% en comparación con el IPL (Cuadro 14).



Los índices de vegetación, mostraron valores más altos al final del periodo de lluvia (0.48, 0.48 y 0.66, respectivamente), seguido del inicio de las lluvias con una reducción promedio de más del 30% y de más del 50% para el periodo seco (Cuadro 14).

En los sitios de muestreo (EZ, I, Z, B y P) del sistema zanja bordo se observaron las diferencias de cobertura vegetal e IV por periodos de muestreo. La variación de CVT por sitio de muestreo al final del periodo de lluvia mostró una variación de 71.12 a 80.44% siendo el inicio de la zanja la que registro mayor cobertura vegetal, seguido de la zanja con una reducción del 2.5%, el bordo con 6.5%, la entre zanja con 9.77% y el pie con 11.5%, lo que indica que el sistema zanja bordo permitió al I y el B mayor cobertura vegetal por la captación de agua.

La PB mostró valores más altos ( $288.17 \text{ g m}^{-2}$ ) en la zanja, seguido del inicio con una reducción de 7%, de 19% en EZ, de 22% en el B y de 37% en el P, lo cual está asociado con los porcentajes de cobertura en seco y en húmedo; sin embargo, existe consistencia en que la zanja propicia un pequeño incremento en la producción de biomasa. Los índices de vegetación (IVPN, NDVI y SAVI) más altos en los sitios de EZ, I y Z con ligeras diferencias, lo que sugiere que a pesar las diferencias en CVT y PB la reflectancia de la vegetación no muestra cambios (Cuadro 14).

La CVT y la PB al IPL redujo más del 7% con respecto al FPL y muestra que el sitio que reporto la mayor CVT fue EZ (77.3%), seguido del sitio I con una reducción del 5% B y los sitios Z, B y P con una reducción promedio del 8.8%, lo cual indica una respuesta al desarrollo de la vegetación ya que domina la CS sobre la CV. La variación en los porcentos de CS y CV provoco que la mayor PB ( $206.9 \text{ g m}^{-2}$ ) se encontrara en el bordo, seguido del sitio Z con una reducción del 15.4% y de los sitios P, EZ e I con reducciones de más del 25%. Los índices de vegetación tuvieron poca variación en los diferentes sitios de muestreo (Cuadro 14).

Cuadro 14. Cobertura vegetal e IV en sitios de muestreo del sistema zanja bordo por períodos.

Período de muestreo	Sitios	Variables						
		CV%	CS (%)	CVT (%)	PB ( $\text{g m}^{-2}$ )	IVPN	NDVI	SAVI
FPL	EZ	37.74	34.85	72.58	232.74	0.51	0.49	0.70
		$\pm 20.58$	$\pm 14.88$	$\pm 19.55$	$\pm 132.78$	$\pm 0.11$	$\pm 0.09$	$\pm 0.11$
	I	36.60	43.83	80.44	267.19	0.51	0.51	0.66
		$\pm 17.75$	$\pm 15.51$	$\pm 11.89$	$\pm 175.14$	$\pm 0.14$	$\pm 0.10$	$\pm 0.12$
	Z	37.55	40.84	78.39	288.17	0.51	0.51	0.67

Período de muestreo	Sitios	Variables							
		CV%	CS (%)	CVT (%)	PB (g m <sup>-2</sup> )	IVPN	NDVI	SAVI	
PS	B	±16.16	±13.88	±18.56	±94.24	±0.12	±0.11	±0.11	
		30.87	44.27	75.14	224.80	0.42	0.43	0.63	
	P	±14.84	±14.42	±15.67	±74.93	±0.05	±0.06	±0.09	
		21.08	50.05	71.12	181.93	0.47	0.47	0.65	
			±12.94	±18.40	±12.45	±64.45	±0.06	±0.04	±0.08
			3.01	66.73	69.74	206.51	0.24	0.13	0.20
IPL	EZ	±5.30	±18.19	±17.39	±140.34	±0.05	±0.09	±0.13	
		2.44	68.58	71.02	188.92	0.23	0.13	0.18	
	I	±5.30	±12.57	±13.28	±125.23	±0.05	±0.08	±0.11	
		1.88	68.46	70.34	200.12	0.24	0.15	0.20	
	Z	±3.77	±24.21	±26.16	±94.94	±0.04	±0.08	±0.10	
		0.94	70.95	71.89	250.51	0.24	0.16	0.22	
	B	±1.27	±10.83	±10.60	±114.63	±0.05	±0.09	±0.11	
		1.42	70.56	71.98	183.83	0.24	0.15	0.22	
	P	±2.04	±15.22	±16.14	±112.81	±0.04	±0.08	±0.12	
				18.48	58.83	77.31	148.19	0.34	0.25
			±26.87	±20.00	±17.11	±77.53	±0.20	±0.24	±0.29
	IPL	I	13.17	59.79	72.96	141.53	0.36	0.25	0.33
±20.88			±14.17	±12.26	±57.04	±0.23	±0.25	±0.30	
Z		10.82	59.75	70.58	175.65	0.34	0.26	0.36	
		±19.16	±23.82	±25.05	±102.11	±0.20	±0.25	±0.32	
B		14.45	55.95	70.40	206.90	0.29	0.24	0.33	
		±22.12	±21.13	±10.51	±129.48	±0.12	±0.21	±0.26	
P	13.19	57.30	70.49	155.99	0.30	0.21	0.28		
	±22.03	±23.21	±15.76	±70.89	±0.16	±0.20	±0.24		
Promedio general por períodos									
Período de muestreo		CV%	CS (%)	CVT (%)	PB (g m <sup>-2</sup> )	IVPN	NDVI	SAVI	
FPL		32.77	42.77	75.53	238.97	0.48	0.48	0.66	
		±16.45	±15.42	±15.63	±108.31	±0.10	±0.08	±0.10	
PS		1.94	69.06	70.99	205.98	0.24	0.14	0.20	
		±3.53	±16.20	±16.71	±117.59	±0.05	±0.09	±0.11	
IPL		14.02	58.32	72.35	165.65	0.33	0.24	0.32	
		±22.21	±20.47	±16.14	±87.41	±0.18	±0.23	±0.28	

El periodo seco presentó una ligera reducción en los valores de IV por presencia de la CS lo cual provoca, que la reflectancia de la cubierta vegetal disminuya, así como los IV. En los sitios B, P, Z e I registraron mayor porcentaje de CVT en comparación con la EZ y en el sitio de B se tuvo mayor PB (250.5 g m<sup>-2</sup>) comparado con el resto de los sitios de muestreo, pero se conserva el

efecto de la zanja para la mayor producción de biomasa por efecto de la humedad del suelo captado por la zanja como ya fue señalado (Cuadro 14).

Lo anterior concuerda con lo obtenido por Singh *et al.* (2013) que identificaron variaciones del contenido de agua en el suelo entre las épocas del año, registrando una reducción de la humedad de diciembre a junio; la construcción de las obras se relacionó con el crecimiento de las plantas y en consecuencia con la producción de biomasa de vegetación herbácea. También se ha identificado que las zonas con zanjas presentan mejores condiciones en el contenido de humedad en el suelo que favorece el desarrollo de la cobertura vegetal comparado con áreas control o con otro tipo de obras (Zhang *et al.*, 2014).

El cambio de cobertura vegetal (durante periodos y entre sitios de medición) afecta la estimación de los IV debido a que estos tienen mayor respuesta a la cobertura verde, por lo que, el incremento y disminución de la cobertura vegetal también son registrados con los IV, así como también existe diferencia por la presencia de cobertura verde o seca (Tucker, 1979; Huete, 1988, Rodríguez y Bullock, 2013; Villa *et al.*, 2014).

### 8.2.2 Análisis de cobertura e índices de vegetación en zanjas bordo

El análisis de varianza muestra que existen diferencias significativas en los porcentajes de cobertura vegetal al comparar entre períodos de medición y polígonos con un nivel de significancia de 95%, excepto en el porcentaje de cobertura seca, donde el nivel de significancia fue menor al 90%. La comparación entre sitios de muestreo dentro del sistema zanja bordo (EZ, I, B, Z y P) no mostraron diferencias (Cuadro 15).

Cuadro 15. Análisis de varianza de la cobertura vegetal y producción de biomasa en el sistema zanja bordo.

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Value	P-Value
CV (%)					
Período de muestreo	2	33817	16909	116.60	0.00
Repetición	2	4673	2337	16.11	0.00
Sitio de muestreo	4	1087	272	1.87	0.12

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Value	P-Value
Error	122	17692	145		
Total	146	63166			
CS (%)					
Período de muestreo	2	20211	10105	39.47	0.00
Repetición	2	970	485	1.89	0.16
Sitio de muestreo	4	1396	349	1.36	0.25
Error	122	31232	256		
Total	146	58336			
CVT (%)					
Período de muestreo	2	2994	1497	6.85	0.00
Repetición	2	2581	1291	5.91	0.00
Sitio de muestreo	4	686	172	0.78	0.54
Error	122	26663	219		
Total	146	37179			
PB (g m <sup>-2</sup> )					
Período de muestreo	2	333552	166776	24.52	0.00
Repetición	2	287761	143880	21.15	0.00
Sitio de muestreo	4	32420	8105	1.19	0.32
Error	111	755036	6802		
Total	135	706835			

Repetición: Tres polígonos de muestreo.

Los IV mostraron diferencias entre periodos y polígonos con un nivel de confiabilidad >99%, pero no se identificaron diferencias entre sitios de muestreo; solo el IVPN mostro diferencias entre sitios de muestreo con un nivel de confiabilidad de 98% (Cuadro 16)

Cuadro 16. Análisis de varianza de los IV en el sistema zanja bordo.

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Value	P-Value
IVPN					
Período de muestreo	2	2.41	1.20	165.20	0.00
Repetición	2	0.19	0.10	13.29	0.00
Sitio de muestreo	4	0.09	0.02	3.03	0.02
Error	117	0.85	0.01		

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Value	P-Value
Total	141	3.90			
NDVI					
Período de muestreo	2	4.66	2.33	379.52	0.00
Repetición	2	0.26	0.13	21.27	0.00
Sitio de muestreo	4	0.02	0.00	0.67	0.61
Error	117	0.72	0.01		
Total	141	5.90			
SAVI					
Período de muestreo	2	7.68	3.84	354.39	0.00
Repetición	2	0.26	0.13	11.88	0.00
Sitio de muestreo	4	0.01	0.00	0.25	0.91
Error	117	1.27	0.01		
Total	141	10			

Repetición: Tres polígonos de muestreo.

### 8.2.3 Comparación de medias utilizando el método de Tukey

La comparación de medias cobertura vegetal, la PB y IV entre periodos mostraron diferencias altamente significativas. La comparación entre polígonos mostró que la CV, CVT, PB e IV mostraron diferencias altamente significativas y solo el porcentaje de CS no mostro diferencia. Entre sitios de muestreo, los porcentajes de cobertura vegetal, PB, NDVI y SAVI no mostraron diferencias significativas y solo el IVPN mostró diferencias altamente significativas (Cuadro 17).

Cuadro 17. Comparación de medias entre períodos de muestreo, polígonos y sitios en el sistema zanja bordo.

	N	Prueba de Tukey							
		CV (%)	CS (%)	CVT (%)	PB (g m <sup>-2</sup> )	IVPN	NDVI	SAVI	
Periodo	FPL	52	32.64 A	42.2 B	74.84 B	235.48 A	0.48 B	0.48 B	0.66 B
	PS	50	2.39 B	68.7 A	71.09 B	208.72 A	0.24 C	0.14 C	0.20 C
	IPL	45	36.54 A	45.68 B	82.22 A	117.99 B	0.54 A	0.56 A	0.73 A
Polígonos	1	48	32.16 A	49.74 A	81.90 A	252.17 A	0.48 A	0.45 A	0.58 A
	2	45	20.10 B	51.11 A	71.20 B	150.07 B	0.38 B	0.34 C	0.47 B
	3	54	19.32 B	55.73 A	75.05 AB	159.95 B	0.41 B	0.40 B	0.54 A

		N	Prueba de Tukey						
			CV (%)	CS (%)	CVT (%)	PB (g m <sup>-2</sup> )	IVPN	NDVI	SAVI
Sitios de muestreo	EZ	31	27.88 A	47.26 A	75.14 A	180.49 A	0.44 AB	0.39 A	0.53 A
	I	31	23.51 A	56.41 A	79.92 A	192.45 A	0.45 A	0.41 A	0.52 A
	Z	30	26.00 A	50.90 A	76.90 A	208.01 A	0.43 AB	0.41 A	0.55 A
	B	29	22.04 A	52.52 A	74.56 A	194.15 A	0.38 B	0.38 A	0.52 A
	P	26	19.87 A	53.87 A	73.74 A	161.89 A	0.41 AB	0.39 A	0.52 A

#### 8.2.4 Interacción entre polígonos y sitios de muestreo del sistema zanja bordo

La interacción de polígonos con sitios del muestreo del sistema zanja bordo mostro que existen diferencias en la PB entre polígonos y sitios. El polígono uno en el sitio de I donde se reportó el valor de PB promedio más alto (314.76 g m<sup>-2</sup>), seguido de EZ con una reducción de 10.3%, P con 23.8 %, B con 30.9%% y Z con 34%, que se explica porque el polígono tiene mayor capacidad de retención del agua de lluvia por la profundidad del suelo que es mayor a un metro (Cuadro 18).

Cuadro 18. Comparación de medias en sitios con el sistema zanja bordo.

Interacción	N	Prueba de Tukey						
		CV (%)	CS (%)	CVT (%)	PB (g m <sup>-2</sup> )	IVPN	NDVI	SAVI
Polígono 1 – EZ	9	39.81 A	41.52 A	88.31 A	281.25 AB	0.49 A	0.44 A	0.57 A
Polígono 1 – I	9	33.59 A	51.11 A	84.70 A	314.76 A	0.54 A	0.48 A	0.60 A
Polígono 1 – Z	9	32.25 A	56.06 A	82.09 A	207.71 ABCD	0.51 A	0.48 A	0.61 A
Polígono 1 – B	9	30.52 A	51.57 A	81.33 A	217.17 ABCD	0.40 A	0.43 A	0.57 A
Polígono 1 – P	9	24.62 A	48.45 A	79.38 A	239.95 ABC	0.45 A	0.43 A	0.55 A
Polígono 2 – EZ	9	26.71 A	49.05 A	79.15 A	162.61 BCD	0.40 A	0.35 A	0.47 A
Polígono 2 – I	10	19.96 A	55.94 A	76.65 A	136.34 CD	0.39 A	0.34 A	0.44 A
Polígono 2 – Z	9	19.40 A	43.59 A	76.40 A	186.46 ABCD	0.39 A	0.33 A	0.48 A
Polígono 2 – B	9	16.41 A	48.50 A	75.90 A	126.57 CD	0.37 A	0.33 A	0.48 A
Polígono 2 – P	9	17.96 A	58.43 A	75.77 A	138.36 CD	0.37 A	0.33 A	0.45 A
Polígono 3 – EZ	9	17.10 A	51.19 A	73.07 A	97.60 D	0.42 A	0.38 A	0.55 A
Polígono 3 – I	9	16.96 A	62.18 A	71.73 A	126.25 CD	0.42 A	0.41 A	0.54 A
Polígono 3 – Z	9	26.33 A	53.04 A	68.30 A	229.84 ABCD	0.41 A	0.41 A	0.52 A
Polígono 3 – B	9	19.17 A	57.48 A	64.92 A	238.68 ABC	0.36 A	0.39 A	0.51 A
Polígono 3 – P	9	17.00 A	54.73 A	63.00 A	107.35 CD	0.41 A	0.41 A	0.55 A

La diferencia observada en la producción de biomasa del polígono tres muestran que las zanjas tienen un efecto importante en áreas de suelos poco profundos ya que las zanjas contribuyen a retener mayor humedad, lo cual indica que si bien, existen otros casos donde no se observan efectos positivos, la implementación del sistema zanja bordo en áreas de suelos someros contribuye al mejorar en la producción de biomasa (Cotler *et al.*, 2015).

### 8.2.5 Cobertura vegetal e índice de vegetación en zonas con o sin zanjas bordo

Los porcentajes de cobertura (verde, seco y total), PB e IV se analizaron entre los sitios de EZ y los sitios en polígonos testigo en los tres periodos FPL, PS e IPL. El porcentaje de CV y CS variaron dependiendo de la época de lluvia, encontrando que el porcentaje de CV al FPL y IPL fue mayor que en el PS, por el contrario en el este último período se presentó mayor porcentaje de CS (Cuadro 19).

Cuadro 19. Valor medio y desviación estándar de las variables analizadas en los sitios testigo y entre zanjas.

Período de muestreo	Sitios	Variables						
		CV (%)	CS (%)	CVT (%)	PB (g m <sup>-2</sup> )	IVPN	NDVI	SAVI
FPL	EZ	37.74	34.85	72.58	232.74	0.51	0.49	0.70
		±20.58	±14.88	±19.55	±132.78	±0.11	±0.09	±0.11
	T	34.75	37.14	71.88	229.43	0.51	0.50	0.72
		±10.83	±20.90	±22.46	±78.13	±0.05	±0.05	±0.13
	Promedio	36.24	35.99	72.23	231.08	0.51	0.49	0.71
		±15.70	±17.89	±21.01	±105.45	±0.08	±0.07	±0.12
PS	EZ	3.01	66.73	69.74	206.51	0.24	0.13	0.2
		±5.30	±18.19	±17.39	±140.34	±0.05	±0.09	±0.13
	T	2.81	69.28	72.09	122.41	0.25	0.15	0.2
		±2.79	±23.01	±24.69	±59.37	±0.05	±0.08	±0.09
	Promedio	2.91	68.01	70.91	164.46	0.24	0.14	0.2
		±4.04	±20.60	±21.04	±99.85	±0.05	±0.08	±0.11
IPL	EZ	18.48	58.83	77.31	148.19	0.34	0.25	0.33
		±26.87	±20.00	±17.11	±77.53	±0.20	±0.24	±0.29
	T	8.18	59.37	67.55	107.56	0.31	0.24	0.35
		±9.80	±25.72	±24.21	±60.16	±0.15	±0.20	±0.30
	Promedio	13.33	59.1	72.43	127.88	0.33	0.24	0.34

Período de muestreo	Sitios	Variables						
		CV (%)	CS (%)	CVT (%)	PB (g m <sup>-2</sup> )	IVPN	NDVI	SAVI
		±18.33	±22.86	±20.66	±68.85	±0.18	±0.22	±0.29

El porcentaje promedio de cobertura total, la producción de biomasa y los valores de índices de vegetación fueron mayores al FPL, seguido de IPL y PS (Cuadro 19); en general, en el FPL e IPL se registró más o menos la misma CVT, y redujo 1.8% en el PS, que contrasta, con la PB que fue de 231.08 g m<sup>-2</sup> en el FPL y que se redujo en más del 29% entre los otros periodos. De acuerdo con el porcentaje de cobertura vegetal total y la producción de biomasa promedio, los valores más altos de los IV estimados fueron para el FPL. El IVPN se redujo 53% al IPL y PS; el NDVI redujo hasta 71% respecto a los otros periodos y el SAVI redujo 72% (Cuadro 19). La reducción en los valores de los índices se debe principalmente a los períodos de lluvias y la respuesta de los índices de vegetación a la cobertura verde ya que cuando se reducen la humedad del suelo lo que domina es la cobertura vegetal seca que tiene menor reflectancia que la cobertura verde (Cuadro 19).

Al final del período de lluvias, los sitios de EZ registraron 0.70% más de cobertura total y 3.31 g m<sup>-2</sup> más en producción de biomasa que los valores promedio de los polígonos testigo; por el contrario, los IV fueron más altos en los polígonos testigo, aunque las diferencias promedio fueron de 0.01 y 0.02 (Cuadro 19).

Durante el periodo seco, el polígono testigo en promedio registró el 2.34% más cobertura total que los sitios de entre zanja, pero se obtuvo 84.10 g m<sup>-2</sup> menos en la producción de biomasa; los IV fueron más altos en los sitios testigo que en los entre zanja, aunque con diferencias mínimas de 0.01. Al inicio del período de lluvias, los sitios de entre zanja tuvieron 9.77 % más cobertura total promedio y 40.63 g m<sup>-2</sup> menor producción de biomasa que en el polígono testigo promedio. Esta información sugiere que los sitios de EZ del sistema zanjas bordo no tienen el impacto en los cambios en los porcentajes de cobertura vegetal, producción de biomasa e índices de vegetación, sin embargo como se detalló previamente, se demostró que en Z y B se tienen incrementos en las variables de medición (Cuadro 19; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



### 8.2.6 Análisis de cobertura vegetal, producción de biomasa e índices de vegetación en áreas con y sin obras

Con el análisis de varianza se identificaron diferencias significativas entre el porcentaje de cobertura verde y seca, así como en la PB entre periodos. La comparación entre polígonos (repeticiones) mostro diferencias significativas en CS, CVT y PB con un nivel de significancia de 99%, para la CV se observó un nivel de confiabilidad de 95%. La comparación entre sitios de muestreo (EZ y testigo) no mostro diferencia significativa en los porcentajes de cobertura y PB con un nivel de confiabilidad del 95%, lo que confirma que no existen diferencias entre sitios de EZ y testigo (Cuadro 20).

Cuadro 20. Análisis de varianza de los porcentajes de cobertura vegetal y producción de biomasa en los sitios testigo y entre zanjas.

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados	Cuadrados de la media	F-Value	P-Value
CV (%)					
Período medido	2	15199.4	7599.68	51.92	0.00
Repetición	2	651	325.51	2.22	0.12
Sitios medidos	1	111.4	111.4	0.76	0.39
Error	48	7026.2	146.38		
Total	57	26651			
CS (%)					
Período medido	2	11,401.20	5,700.58	20.88	0.00
Repetición	2	1,910.00	955.00	3.50	0.04
Sitios medidos	1	30.60	30.58	0.11	0.74
Error	48	13,107.30	273.07		
Total	57	30,037.90			
CVT (%)					
Período medido	2	899.60	449.82	1.73	0.19
Repetición	2	4,194.60	2,097.28	8.05	0.00
Sitios medidos	1	25.30	25.25	0.10	0.76
Error	48	12,506.00	260.54		
Total	57	19,699.70			
PB (g m-2)					
Período medido	2	108,058	54,029	9.72	0.00
Repetición	2	121,220	60,610	10.90	0.00
Sitios medidos	1	6,303	6,303	1.13	0.29
Error	44	244,570	5,558		

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados	Cuadrados de la media	F-Value	P-Value
Total	53	565,999			

Repetición: Tres polígonos con obras, Sitios medidos: entre zanja y testigo

Los índices de vegetación mostraron diferencias en la comparación entre periodos, pero no se observa diferencia entre polígonos y entre sitios de EZ y T (Cuadro 21).

Cuadro 21. Análisis de varianza de los IV en sitios testigo y entre zanjas.

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados	Cuadrados de la media	F-Value	P-Value
INPN					
Período medido	2	1.06	0.53	88.40	0.00
Repetición	2	0.03	0.01	2.28	0.11
Sitios medidos	1	0.00	0.00	0.18	0.68
Error	48	0.29	0.01		
Total	57	1.43			
NDVI					
Período medido	2	1.98	0.99	136.30	0.00
Repetición	2	0.01	0.00	0.67	0.52
Sitios medidos	1	0.01	0.01	1.03	0.32
Error	48	0.35	0.01		
Total	57	2.41			
SAVI					
Período medido	2	3.54	1.77	133.62	0.00
Repetición	2	0.06	0.03	2.43	0.10
Sitios medidos	1	0.01	0.01	0.83	0.37
Error	48	0.64	0.01		
Total	57	4.30			

Repetición: Tres polígonos con obras, Sitios medidos: entre zanja y testigo

### 8.2.7 Comparación de porcentajes de cobertura, producción de biomasa e índice vegetación medidos

La comparación de medias entre períodos con la prueba de Tukey muestra que, el porcentaje CV y CVT, PB y los IV obtuvieron valores más altos en el IPL; la diferencia entre este período comparado con el PS es de 32.25% en CV, 0.74% en CVT y 57.3 en PB y de 0.26, 0.35 y 0.5 en IVPN, NDVI y SAVI, respectivamente (Cuadro 22).

El FPL registró valores más altos a los obtenidos al IPL en la CS y PB con diferencias de 3.54% y 111.41 g m<sup>-2</sup> respectivamente; por el contrario, la CVT y los IV fueron más bajos al FPL comparados con el IPL (Cuadro 22).

Cuadro 22. Comparación de medias entre períodos, polígonos y sitios de entre zanja y testigo.

Período, polígonos y sitio de medición	Prueba de Tukey						
	CV (%)	CS (%)	CVT (%)	PB (g m <sup>-2</sup> )	IVPN	NDVI	SAVI
FPL	35.70 A	39.85 B	72.00 A	225.90 A	0.50 A	0.49 B	0.70 A
PS	3.45 B	67.81 A	71.26 A	168.60 AB	0.24 B	0.14 C	0.20 B
IPL	40.30 A	36.31 B	80.15 A	114.49 B	0.55 A	0.57 A	0.75 A
Polígono 1	29.40 A	47.30 AB	83.67 A	229.37 A	0.46 A	0.42 A	0.57 A
Polígono 2	28.22 A	55.44 A	76.70 A	166.53 B	0.42 A	0.38 A	0.50 A
Polígono 3	21.82 A	41.22 B	63.05 B	113.10 B	0.42 A	0.40 A	0.58 A
EZ	27.88 A	47.26 A	75.14 A	180.49 A	0.44 A	0.39 A	0.53 A
T	25.09 A	48.72 A	73.81 A	158.84 A	0.43 A	0.41 A	0.56 A

La comparación entre polígonos muestra que en el polígono uno registró 6.07% y 20.62% más CVT que el polígono dos y tres respectivamente y mayor PB con 62.84 g m<sup>-2</sup> y 116.27 g m<sup>-2</sup>. Los IV alcanzan valores más altos en el polígono uno, excepto en el SAVI que tiene mayor valor en el polígono tres, seguido por el uno y por último el polígono dos; la CV, el IVPN, NDVI y SAVI no mostraron diferencias significativas (Cuadro 22).

Al comparar los sitios de muestreo (EZ y testigo) no se identificaron diferencias significativas en ninguna de las variables, esto indica que los sitios de entre zanja son iguales a los sitios testigo, aunque se observa que entre zanja se registraron valores ligeramente más altos que en sitios testigo, con 1.33% más en cobertura total y 21.65 g m<sup>-2</sup> más en la producción de biomasa; el IVPN mostro la misma tendencia, pero el NDVI y SAVI fueron más altos en sitios testigo (Cuadro 22). Los resultados obtenidos son diferentes a lo registrado en otras áreas donde la construcción de obras de conservación mejoro de forma significativa las condiciones de vegetación y producción de biomasa (Singh *et al.*, 2011).

Debido a que no se identificaron diferencias significativas entre los sitios de medición se realizó una comparación de medias considerando el efecto de las parcelas de muestreo y los sitios medidos, este análisis podría identificar si existen diferencias significativas en los porcentajes de cobertura y en la producción de biomasa (Cuadro 23).

Cuadro 23. Análisis de varianza del porcentaje de cobertura y producción de biomasa usando dos factores.

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados	Cuadrados de la media	F-Value	P-Value
CV (%)					
Interacción	2	2488.5	1244.26	8.5	0.00
Total	57	26651			
CS (%)					
Interacción	2	3,343.30	1,671.64	6.12	0.00
Total	57	30,037.90			
CVT (%)					
Interacción	2	2,038.50	1,019.26	3.91	0.03
Total	57	19,699.70			
PS (g m <sup>-2</sup> )					
Interacción	2	46,558	23,279	4.19	0.02
Total	53	565,999			

Interacción: Polígonos con sitios de muestreo.

Para identificar diferencias significativas en el IVPN, NDVI y SAVI se realizaron análisis de varianza considerando el efecto de los polígonos y los sitios medidos, pero no se encontraron tampoco se identificaron diferencias significativas entre testigo y entre zanja, los niveles de significancia fueron menores al 95% (Cuadro 24).

Cuadro 24. Análisis de varianza de los IV utilizando la interacción.

Fuente de variación	DF	Suma de cuadrados	Cuadrados de la media	F-Value	P-Value
INPN					
Interacción	2	0.02	0.01	1.88	0.16
Total	57	1.43			
NDVI					
Interacción	2	0.03	0.02	2.33	0.11
Total	57	2.41			
SAVI					
Interacción	2	0.01	0.00	0.36	0.70
Total	57	4.30			

Interacción: Polígonos con sitios de muestreo.

La interacción muestra que existe diferencia significativa entre sitios de muestreo, en porcentajes de cobertura vegetal y en PB. En el polígono uno el porcentaje de CV, CVT y PB se obtuvieron valores más altos en sitios de EZ. La cobertura vegetal y producción de biomasa obtuvieron, 9.26% y 103.77 g m<sup>-2</sup> más entre zanja que lo obtenido en los sitios testigo. Los IV en entre zanja también registraron valores más altos que en sitios testigo y fluctuaron de 0.01 a 0.05 (Cuadro 25).

El polígono dos mostró diferencias significativas en el porcentaje de CS con 12.78% y CVT con 15.79% más cobertura que lo obtenido en EZ. El resto de las variables tuvieron valores más altos en los sitios testigo, pero estadísticamente son iguales. En el polígono tres los porcentajes de cobertura (verde, seca y total) fueron diferentes, donde CS y CVT mostraron que los sitios de EZ fueron más altos; por el contrario, el porcentaje de CV fue mayor en sitios testigo (9.43%) que en EZ. La PB y los IV fueron más altos en los sitios testigo, las diferencias entre los sitios fue de 30.98, 0.04 y 0.06 para el IVPN, NDVI y SAVI, respectivamente (Cuadro 25).

Cuadro 25. Comparación de medias considerando la interacción de los polígonos con los sitios de entre zanja y testigo.

Polígono vs sitio de medición	Prueba de Tukey						
	CV (%)	CS (%)	CVT (%)	PB (g m <sup>-2</sup> )	IVPN	NDVI	SAVI
Polígono 1 - Entre zanja	39.81 A	41.52 AB	81.33 AB	281.26 A	0.49 A	0.44 A	0.57 A
Polígono 1 - Testigo	18.99 B	53.08 AB	72.07 ABC	177.49 AB	0.44 A	0.40 A	0.56 A
Polígono 2 - Entre zanja	26.72 AB	49.05 AB	75.77 ABC	162.61 B	0.40 A	0.35 A	0.48 A
Polígono 2 - Testigo	29.73 AB	61.83 A	91.56 A	170.44 B	0.44 A	0.42 A	0.52 A
Polígono 3 - Entre zanja	17.11 B	51.20 AB	68.30 BC	97.61 B	0.42 A	0.38 A	0.55 A
Polígono 3 - Testigo	26.54 AB	31.25 B	57.79 C	128.59 B	0.42 A	0.42 A	0.61 A

Los resultados observados en el polígono uno son similares a los obtenidos en otros trabajos donde las áreas testigo presentan condiciones menos favorables, con menor sobrevivencia de repoblaciones, menor contenido de humedad y producción de biomasa (Singh *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014). Por el contrario, en el polígono dos y tres donde se observaron valores más altos en los sitios testigo, coincide con los resultados obtenidos por Cotler *et al.*, (2015) que mencionan que la construcción de zanjas no incrementa la retención de humedad, debido a la mezcla de partículas con menor contenido de materia orgánica y modificación de los espacios porosos; que en caso

contrario, los sitios sin obras presenta condiciones originales que contribuyen a retener la humedad que favorece el desarrollo de la cobertura vegetal.

Los resultados obtenidos muestran que no es posible identificar cambios entre los sitios medidos en forma general, por lo que es necesario tomar en consideración la temporada de lluvias porque el efecto es más evidente durante el período húmedo que durante el período seco. También es importante considerar las condiciones de cada polígono debido a que la comparación de medias en los sitios del sistema zanja bordo mostro diferencias significativas en el polígono tres que presenta características diferentes a los polígonos uno y dos.

### 8.3 Correlación entre las variables medidas en parcelas con obras y sin obras

Las correlaciones en sitios T y EZ fueron significativas entre los índices de vegetación con los porcentajes de cobertura verde, seca y total, excepto el SAVI con el porcentaje de cobertura total donde se obtuvo un nivel de significancia menor de 0.05; sin embargo, en el porcentaje de cobertura verde fue variable con coeficientes de determinación más altos  $r= 0.85, 0.82$  y  $0.73$  que corresponden a IVPN, NDVI y SAVI. La correlación del porcentaje de cobertura verde con los IV, en los sitios de muestreo del sistema zanja bordo mostraron coeficientes de determinación de  $r=0.80, 0.80$  y  $0.75$  para el IVPN, NDVI y SAVI respectivamente (Cuadro 26).

Los correlaciones obtenidas son similares a las reportadas entre cobertura arbórea y datos espectrales de imágenes de satélite con coeficientes de correlación que varían de 0.62 a 0.79 (Aguirre *et al.*, 2011); esto se debe a que los valores espectrales de las bandas Rojo e Infrarrojo Cercano tienen mayor respuestas a la vegetación verde.

Los porcentajes de cobertura seca y cobertura total muestran correlaciones significativas con los IV, pero el coeficiente de determinación más alto fue de  $r= 0.54$  en sitios testigo y entre zanja (Cuadro 26); en el sistema zanja bordo el coeficiente de determinación más alto es  $r=0.45$ . Los valores mínimos en ambos casos son negativos con la cobertura seca.

La producción de biomasa no presentó correlación con ninguno de los Índices de Vegetación (IV), este efecto se observó cuando inicio del uso de sensores remotos en pastizales de zonas áridas donde los datos que se obtuvieron en campo no mostraron una tendencia asociada a los resultados obtenidos con las bandas de los sensores empleados (Huete and Jackson, 1987).

Cuadro 26. Matriz de correlación de variables evaluadas en sitios testigo y entre zanjas.

Sitios de medición dentro del sistema zanjas bordo (entre zanja, inicio, zanja, bordo y pie)												
Variable	CV (%)		CS(%)		CVT (%)		IVPN		NDVI		SAVI	
	r	P-Value	r	P-Value	r	P-Value	r	P-Value	r	P-Value	r	P-Value
CS (%)	-0.70	0.00										
CVT (%)	0.43	0.00	0.35	0.00								
IVPN	0.80	0.00	-0.49	0.00	0.44	0.00						
NDVI	0.80	0.00	-0.48	0.00	0.45	0.00	0.94	0.00				
SAVI	0.75	0.00	-0.57	0.00	0.27	0.00	0.90	0.00	0.97	0.00		
PB (g m <sup>-2</sup> )	0.07	0.43	0.06	0.47	0.17	0.05	-0.04	0.66	-0.07	0.43	-0.09	0.31
Sitios de entre zanja y testigo												
CS (%)	-0.65	0.00										
CVT (%)	0.36	0.01	0.48	0.00								
IVPN	0.85	0.00	-0.54	0.00	0.32	0.02						
NDVI	0.82	0.00	-0.54	0.00	0.29	0.03	0.96	0.00				
SAVI	0.73	0.00	-0.64	0.00	0.05	0.70	0.90	0.00	0.95	0.00		
PB (g m <sup>-2</sup> )	0.04	0.80	0.10	0.47	0.17	0.23	-0.03	0.84	-0.01	0.93	0.01	0.94

Otros estudios con datos radiométricos, en lo que analizan el grado de asociación entre los IV, la producción de biomasa e Índice de Área Foliar (IAF), mencionan que no existe una relación directa entre IV y producción de biomasa, esta variaba de 0.20 gr a 2 kg y el NDVI permanecía constante en 0.85, esto lo atribuyen al traslape de área foliar por la arquitectura de la planta, que los sensores remotos no cuantifican (Calera *et al.*, 2004).

Medina *et al.*, 2009; Meneses, 2011 y Wylie *et al.*, 1995, reportan que los IV pueden considerarse como una herramienta para la toma de decisiones en el manejo de pastizales y que las correlaciones entre la producción de biomasa y valores del NDVI varían de  $r^2 = 0.66$  a  $0.25$ . Para el IVPN durante su calibración se obtuvo  $r^2=0.79$  en áreas de pastizal (Villa *et al.*, 2014).

Otra razón por la que no se obtuvieron correlaciones significativas es que la vegetación no es uniforme en los sitios de muestreo, existen especies herbáceas de hojas anchas que cubren mayor superficie, pero por su estructura pierden mayor contenido de humedad que las gramíneas que cubren menor superficie sobre el suelo. Otro factor es el contenido de humedad de las plantas, las herbáceas registradas en los sitios de muestreo en promedio, reducen 72.16% de su peso verde y las gramíneas en promedio reducen 50.7% de su peso en verde.

#### 8.4 Validación de imágenes de satélite con mediciones en campo y composición florística del pastizal con obras y sin obras

Las correlaciones existentes entre los índices de vegetación obtenidos con las imágenes de satélite y las variables calculadas a partir de las mediciones realizadas en campo presentan correlaciones bajas; las correlaciones más altas se registraron entre los índices de vegetación calculados con las imágenes de satélite (NDVI y SAVI) con PB ( $\text{g m}^{-2}$ ), CS (%), IVPN y NDVI con coeficientes de correlación que fluctúan entre valores de 0.26 a 0.45.

Los índices de vegetación calculados con las imágenes de satélite se correlacionan de forma negativa con el porcentaje de cobertura verde medida en campo, esto se atribuye a la diferencia de superficie entre sitios medidos en campo ( $2 \text{ m}^2$ ) y la superficie que cubre un pixel de la imagen de satélite ( $36 \text{ m}^2$ ). Esta diferencia de áreas medidas permite que exista una subestimación o sobreestimación de cobertura vegetal, debido a que en  $36 \text{ m}^2$  la cobertura puede estar conformada por zacates, arbustos y en ocasiones también por árboles, esto desajusta la relación existente entre el



porcentaje de cobertura medida en campo y los IV obtenidos de las imágenes de satélite (Cuadro 27).

Cuadro 27. Correlación entre IV estimados con imágenes de satélite y variables estimadas a partir de mediciones de campo.

	PB (g m <sup>-2</sup> )	CV (%)	CS (%)	CVT (%)	IVPN	NDVI	SAVI	NDVISPOT	SAVISPOT
PB (g m <sup>-2</sup> )	1								
CV (%)	0.23	1.00							
CS (%)	0.36	-0.15	1.00						
CVT (%)	0.43	0.75	0.54	1.00					
IVPN	0.22	0.28	0.50	0.57	1.00				
NDVI	0.27	0.19	0.43	0.45	0.78	1.00			
SAVI	-0.03	-0.38	-0.01	-0.33	0.28	0.63	1.00		
NDVISPOT	0.29	-0.01	0.35	0.22	<b>0.38</b>	<b>0.39</b>	0.16	1.00	
SAVISPOT	0.26,	-0.03	0.30	0.18	<b>0.40</b>	<b>0.45</b>	0.25	0.94	1

### 8.5 Composición florística en los polígonos con obras y polígonos testigo

Las áreas con obras registran 10 especies de nueve géneros y cuatro familias que, comparado con los áreas testigo donde se cuantificaron 13 especies de 10 géneros correspondientes a cinco familias; de estas las más representativa en las dos áreas fue Poaceae, seguido por Asteraceae, también se encontraron otras familias con menor número de especies como Fabaceae, Polygalaceae y Polemoniaceae (Cuadro 28Cuadro 28), mismas que se reportaron en otros estudios de la Región Mixteca, Oaxaqueña (Fernández *et al.*, 2013).

Cuadro 28. Comparación del número de especies registradas en las parcelas con obras y testigo.

Familia	Con obras		Sin obras	
	Género	Especie	Género	Especie
Poaceae	4	4	6	8
Asteraceae	3	3	2	2
Polygalaceae	1	2	1	1
Fabaceae	1	1	1	2
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>13</b>

### 8.5.1 Composición florística

Las parcelas donde se estableció el sistema zanja bordo se encontraron especies como *Melinis repens* (Willd.) C.E. Hubb., *Hilaria cenchroides* Kunth y *Bouteloua chondrosioides* (Kunt Benth) con el Índice de Valor de Importancia (IVI) más alto, en conjunto representan 71% de las especies reconocidas, cada una con diferente valor forrajero (SARH, 1980, Cruz, 1992, Fernández *et al.*, 2013).

La primera tiene potencial forrajero regular antes de alcanzar la etapa de madurez (Melgoza *et al.*, 2014), las otras dos especies son buenas forrajeras (SARH, 1980; Cruz, 1992; Herrera y Pámanes, 2010; Fernández *et al.*, 2013). Las parcelas con obras registran otras especies con potencial forrajero tanto herbáceas como gramíneas (Cuadro 29).

En las parcelas con obras las especies con mayor IVI son *Dalea bicolor* Humb. and Bonpl. ex Willd., *Bouteloua chondrosioides* y *Bothriochloa barbinodis* (Lag.) Herter, que en conjunto representan 49% del total de las especies identificadas. Las dos primeras especies tienen buenas cualidades forrajeras. También se desarrollan *Bouteloua hirsuta* Lag. y *Bouteloua curtipendula* Torr., que son especies con excelente valor forrajero, pero con menor IVI; especies como *Heteropogon contortus* (L.) Roem. y Schult, *Bothriochloa barbinodis* (Lag.) Herter y *Aristida ternipes* Cav., son de valor forrajero regular (SARH, 1980; Cruz 1992; Fernández *et al.*, 2013) (Cuadro 29).

Las especies *Bouteloua chondrosioides* e *Hilaria cenchroides*, se distribuye de forma dominante en las dos áreas, presentan un alto IVI en las parcelas con obras, pero en parcelas sin obras es bajo; *Aristida ternipes* Cav. y *Porophyllum tagetoides* DC., presentan bajos valores de IVI (Cuadro 29 y Cuadro 30). En las parcelas testigo se registran la presencia de *Bouteloua hirsuta* con valor forrajero bueno y tolerancia al pastoreo continuo, así como en otras áreas de la región mixteca (Cruz, 1992).

Cuadro 29. Especies encontradas en áreas con zanja bordo.

PF	Familia	Nombre científico	Altura media (m)	Dominancia (m <sup>2</sup> )	Dominancia relativa (%)	Densidad (Ind. m <sup>-2</sup> )	Densidad relativa (%)	Frecuencia	Frecuencia relativa (%)	IVI‡
R	Poaceae	<i>Melinis repens</i> (Willd.) C.E. Hubb.	0.6	0.52	63.88	16	18.18	1	10	30.69
B	Poaceae	<i>Hilaria cenchroides</i> Kunth	0.13	0.21	26.31	38	43.18	1	10	26.50
B	Poaceae	<i>Bouteloua chondrosioides</i> (Kunt Benth)	0.2	0.06	6.91	22	25.00	1	10	13.97
R	Poaceae	<i>Aristida ternipes</i> Cav.	0.1	0.00	0.04	4	4.55	1	10	4.86
R	Fabaceae	<i>Dalea humilis</i> G. Don	0.20	0.01	1.15	3	3.41	1	10	4.85
	Polygalaceae	<i>Polygala compacta</i> Rose	0.16	0.01	1.28	1	1.14	1	10	4.14
	Asteraceae	<i>Tagetes linifolia</i> Seaton	0.35	0.00	0.35	1	1.14	1	10	3.83
	Asteraceae	<i>Porophyllum tagetoides</i> DC.	0.1	0.00	0.04	1	1.14	1	10	3.72
P	Asteraceae	<i>Bidens pilosa</i> L.	0.23	0.00	0.01	1	1.14	1	10	3.72
	Polygalaceae	<i>Polygala barbeyana</i> Chodat	0.09	0.00	0.04	1	1.14	1	10	3.72
		Total general	0.21	0.81	100.00	88	100.00	10	100.00	100.00

‡ IVI: Índice de Valor de Importancia. PF: Potencial forrajero, P: pobre, R: Regular, B: Bueno, E: Excelente.

Cuadro 30. Especies registradas en áreas testigo.

PF	Familia	Nombre científico	Altura media (m)	Dominancia (m <sup>2</sup> )	Dominancia relativa (%)	Densidad (Ind. m <sup>-2</sup> )	Densidad relativa (%)	Frecuencia	Frecuencia relativa (%)	IVI‡
B	Fabaceae	<i>Dalea bicolor</i> Humb. and Bonpl. ex Willd.	0.06	0.12	29.74	15	19.83	2	11.76	20.45
B	Poaceae	<i>Bouteloua chondrosioides</i> (Kunth) Benth. ex S. Watson	0.19	0.06	15.28	19	24.14	1	5.88	15.10

PF	Familia	Nombre científico	Altura media (m)	Dominancia (m <sup>2</sup> )	Dominancia relativa (%)	Densidad (Ind. m <sup>-2</sup> )	Densidad relativa (%)	Frecuencia	Frecuencia relativa (%)	IVI‡
R	Poaceae	<i>Bothriochloa barbinodis</i> (Lag.) Herter	0.33	0.05	13.07	12	15.52	2	11.76	13.45
E	Poaceae	<i>Bouteloua hirsuta</i> Lag.	0.10	0.03	7.05	7	8.62	2	11.76	9.14
	Fabaceae	<i>Dalea brachystachya</i> Gray	0.10	0.05	13.03	5	6.90	1	5.88	8.60
	Polemoniaceae	<i>Loeselia coerulea</i> G. Don	0.09	0.02	5.49	4	5.17	2	11.76	7.48
E	Poaceae	<i>Bouteloua curtipendula</i> Torr.	0.12	0.01	3.78	4	5.17	1	5.88	4.94
P	Asteraceae	<i>Porophyllum tagetoides</i> DC.	0.15	0.02	4.15	3	4.31	1	5.88	4.78
R	Poaceae	<i>Heteropogon contortus</i> (L.) Roem y Schult.	0.20	0.02	5.03	1	0.86	1	5.88	3.93
R	Asteraceae	<i>Sanvitalia procumbens</i> Lam.	0.05	0.00	0.80	3	4.31	1	5.88	3.66
	Poaceae	<i>Aristida ternipes</i> Cav.	0.20	0.01	1.43	1	1.72	1	5.88	3.01
B	Poaceae	<i>Hilaria cenchroides</i> Kunth	0.07	0.00	0.67	1	1.72	1	5.88	2.76
	Polygalaceae	<i>Polygala decidua</i> S.F.Blake	0.07	0.00	0.48	1	1.72	1	5.88	2.70
		Total general		0.40	100.00	77	100.00	17	100.00	100.00

‡ IVI: Índice de Valor de Importancia. PF: Potencial forrajero, P: pobre, R: Regular, B: Bueno, E: Excelente.

### 8.5.2 Diversidad y semejanza de la composición florística

Las parcelas sin obras presentan mejor índice de riqueza ( $D_{\alpha}=1.91$  nats), de diversidad ( $H'=2.18$ ), de homogeneidad ( $S=7.54$ ) y de repartición de especies ( $E=0.59$ ). Estos valores son superiores a los obtenidos en las parcelas con obras, lo cual indica que existe mejor representatividad de una especie o grupo de especies en la parcela.

El índice de Sorensen (27.02) refleja que existe baja semejanza entre las áreas evaluadas (Cuadro 31), en parcelas con obras especies como: *Hilaria cenchroides*, *Aristida ternipes* Cav. y *Bouteloua chondrosioides* registraron mayor densidad, mientras que en parcelas testigo *Porophyllum tagetoides* DC., fue la de mayor densidad, se hace referencia a la densidad de las especies, ya que se tomó como indicador de abundancia para obtener el índice de semejanza (Bruce y James, 2002). Los resultados obtenidos son diferentes a los de Singh *et al.* (2011) donde la riqueza de especies fue mayor en áreas con obras que en las parcelas control.

Cuadro 31. Índices de riqueza, diversidad y semejanza en polígonos con obras y sin obras.

Índice		Con obras	Sin obras
Riqueza de especies (Índice de Margalef)	$D_{\alpha}$	1.39	1.91
Diversidad Índice de Shannon – Wiener	$H'$	1.53	2.18
Dominancia Índice de Simpson	$S$	3.60	7.54
Índice de repartición	$E$	0.46	0.59
Semejanza (Índice de Sorensen)	$IS$	27.02%	

## 8.6 Composición florística en pastizales con obras y sin obras

El efecto del sistema zanja bordo en el desarrollo de las especies de los pastizales con obras y sin obras, se evaluó con un inventario en áreas con zanjas bordo donde se evaluaron tres condiciones: entre zanja, zanjas y bordos y en áreas donde no se construyeron obras (testigo). Se registraron las especies para conocer la composición florística y evaluar el efecto de las obras en el desarrollo de las especies de preferencia forrajera.

### 8.6.1 Composición florística

El muestreo de especies permitió identificar herbáceas y gramíneas en proporciones similares; se registraron 15 gramíneas que corresponden a 12 géneros y dos familias; 14 herbáceas distribuidas en 14 géneros y siete familias (Cuadro 32). También se reconocieron ejemplares de las familias Asteraceae, Euporbiaceae y Verbenaceae, pero debido a que las muestras no presentaban flor o fruto en el período de muestreo no fue posible identificar las especies. Las familias dominantes son Poaceae, Asteraceae y Fabaceae que en conjunto representan 72.4% de las especies registradas (Cuadro 32).

Cuadro 32. Familias, géneros y especies identificados en áreas muestreadas.

Tipo	Familia	Género	Especies	Porcentaje (%)
Gramíneas	Poaceae	10	12	41.38
Herbáceas	Fabaceae	5	6	20.68
Herbáceas	Asteraceae	3	3	10.34
Herbáceas	Cyperaceae	2	3	10.34
Herbáceas	Convolvulaceae	2	2	6.90
Herbáceas	Anthericaceae	1	1	3.45
Herbáceas	Malvaceae	1	1	3.45
Herbáceas	Scrophulariaceae	1	1	3.45
	Total	25	29	100.00

El muestreo de vegetación permitió identificar las especies de calidad forrajera más frecuentes en las zanjas y bordos o bien, entre zanjas y áreas sin obras.

Las gramíneas con mayor frecuencia en zanjas y bordos fueron *Melinis repens*, *Bouteloua hirsuta* y *Bouteloua erecta* (Vasey y Hack.) Columbus. Por el contrario, *Bouteloua griffithsii* Columbus, *Heteropogon contortus* y *Paspalum plicátulum* Michx son más frecuentes en entre zanja y áreas sin obras (Cuadro 33).

Las herbáceas con mayor frecuencia en las zanjas y bordos son *Tridax coronopifolia* (Kunth.) Hemsl y *Dalea versicolor* Zucc.; en entre zanja y áreas sin obras *Dalea versicolor* (41% y 37%, respectivamente), *Zornia diphylla* Pers. (33% y 26%), *Evolvulus alsinoides* var. *angustifolius* (L.) Torr., *Anthericum liliago* L., y *Cologania pulchella* Kunth. (Cuadro 33).

Una característica importante de las especies encontradas en las unidades de muestreo es el valor forrajero; el Cuadro 33, indica el valor forrajero de *Melinis repens* y *Heteropogon contortus* que va de regular a pobre; la primera se registró con mayor frecuencia en las zanjas y bordos; por el contrario la segunda en entre zanjas y áreas sin obras. La presencia de ambas especies es indicativa del grado de alteración de las condiciones del pastizal, se considera vegetación secundaria, exótica e invasora.

El resto de las gramíneas presentan valor forrajero regular como *Bothriochloa barbinodis*, *Hilaria belangeri* (Steud.) Nash, a excelente como *Bouteloua hirsuta*, el resto de las especies tienen con valor forrajero bueno mencionado por Fernández *et al.* (2013); algunas de estas especies además de *Bothriochloa saccharoides* (Sw.) Rydb, son parte de la composición florística de la región registradas por SARH, (1980) (Cuadro 33).

Cuadro 33. Frecuencia del registro de las especies en las unidades de muestreo en pastizales con obras y sin obras.

Potencial forrajero	Familia	Especie	Con obras			Sin obras
			Zanjas	Bordos	Entre zanja	
<b>Gramíneas</b>						
Regular a pobre	Poaceae	<i>Melinis repens</i> (Willd.) Zizka	90.63	96.88	66.67	68.75
Bueno	Poaceae	<i>Bouteloua griffithsii</i> Columbus	21.88	34.38	50.00	48.44
Regular a pobre	Poaceae	<i>Heteropogon contortus</i> (L.) Roem. y Schult.	28.13	18.75	33.33	54.69
Excelente	Poaceae	<i>Bouteloua hirsuta</i> Lag.	15.63	18.75	12.50	12.50
Bueno	Poaceae	<i>Bouteloua chondrosioides</i> (Kunth) Benth. ex S.Watson	-	3.13	-	25.00
Bueno	Poaceae	<i>Bouteloua erecta</i> (Vasey y Hack.) Columbus	12.50	12.50	4.17	1.56
Regular	Poaceae	<i>Hilaria belangeri</i> (Steud.) Nash	6.25	-	4.17	6.25
Bueno	Poaceae	<i>Paspalum plicatulum</i> Michx.	-	6.25	4.17	3.13
Bueno	Poaceae	<i>Andropogon hirtiflorus</i> (Nees) Kunth.	3.13	-	12.50	-
Sin identificar	Cyperaceae	<i>Heleocharis sp.</i>	-	-	-	4.69
Regular	Poaceae	<i>Bothriochloa barbinodis</i> (Lag.) Herter	-	-	-	4.69
Bueno	Poaceae	<i>Bathriochloa saccharoides</i> (Sw.) Rydb.	3.13	-	-	-
Bueno	Poaceae	<i>Microchloa kunthii</i> Desv.	-	-	4.17	-
<b>Herbáceas</b>						
Bueno	Fabaceae	<i>Dalea versicolor</i> Zuuc.	21.88	12.50	41.67	37.50
Pobre	Asteraceae	<i>Tridax coronopifolia</i> (Kunth.) Hemsl.	25.00	31.25	4.17	25.00
Sin identificar	Fabaceae	<i>Zornia diphylla</i> Pers.	9.38	6.25	33.33	26.56
Pobre	Convolvulaceae	<i>Evolvulus alsinoides</i> * (L.) Torr.	12.50	3.13	-	37.50
Sin identificar	Malvaceae	<i>Sida abutifolia</i> P. Miller	6.25	-	-	20.31



Potencial forrajero	Familia	Especie	Con obras			Sin obras
			Zanjas	Bordos	Entre zanja	
Sin identificar	Anthericaceae	<i>Anthericum liliago</i> L.	3.13	-	8.33	18.75
Sin identificar	Fabaceae	<i>Cologania pulchella</i> Kunth	3.13	-	8.33	12.50
Sin identificar	Asteraceae	<i>Dyssodia aurantiaca</i> B. L. Rob.	-	-	16.67	-
Bueno	Fabaceae	<i>Macroptilium gibbosifolium</i> (Ortega) A.Delgado	3.13	3.13	4.17	-
Sin identificar	Cyperaceae	<i>Cyperus spectabilis</i> Link.	-	-	-	7.81
Sin identificar	Fabaceae	<i>Galactia brachystachys</i> Benth.	3.13	-	-	1.56
Sin identificar	Scrophulariaceae	<i>Castilleja tenuiflora</i> Benth	6.25	-	-	-
Bueno	Cyperaceae	<i>Cyperus esculentus</i> L.	3.13	3.13	-	-
Sin identificar	Asteraceae	<i>Grindelia subdecurrens</i> DC	-	-	-	1.56
Sin identificar	Convolvulaceae	<i>Ipomoea costellata</i> Torr.	-	3.13	-	-
Sin identificar	Fabaceae	<i>Galactia wrightii</i> A.Gray	-	-	4.17	-

Nota. El muestreo se hizo en julio del 2016. \* var. *angustifolius*. Número de sitios de muestreo: 32 en Zanjas, 32 en bordos, 24 en entre zanjas, 64 en sin zanjas.

El potencial forrajero de algunas hierbas de hoja ancha como *Tridax coronopifolia* y *Evolvulus alsinoides* var. *angustifolius* se identificó como pobre, solo *Macroptilium gibbosifolium* (Ortega) A. Delgado, presenta valor forrajero bueno. (Cuadro 33).

Las especies que presentaron alta frecuencia en áreas sin obras, tienen menor frecuencia en las áreas con obras, específicamente en zanjas y bordos; las gramíneas que presentan esta característica son *Bouteloua griffithsii* y *Heteropogon contortus* y las herbáceas *Zornia diphylla*, *Evolvulus alsinoides* var. *angustifolius*, *Sida abutifolia*, *Anthericum liliago*, y *Cologania pulchella*.

La especie que presentó mayor frecuencia en zanjas y bordos fue *Melinis repens* (zacate rosado) es catalogada como invasora; se establece en áreas perturbadas y tiene gran capacidad de adaptación en condiciones adversas, se desarrolla sin problemas en suelos pobres (Melgoza *et al.*, 2014), esto tiene cierta relación con la opinión de Cotler *et al.* (2015), que consideran que la construcción de las obras ocasiona disturbio por la remoción del suelo y, en consecuencia, la remoción de nutrientes, lo cual favorece el establecimiento de invasoras como el *Melinis repens*.

Lo antes mencionado demuestra que las obras provocan disturbio en el área de pastizal y, en consecuencia, la disminución de las plantas nativas registradas en áreas testigo; pero favoreció el desarrollo de especies invasoras que presentan capacidad de adaptación a áreas de disturbio como *Melinis repens*.

#### 8.6.2 Clasificación de especies

El agrupamiento obtenido con el índice de Jaccard (Figura 23) muestra la semejanza entre sitios de muestreo con base en la presencia y ausencia de especies. En general se observan tres grupos, el primero está integrado por 12 parcelas de diferentes condiciones entre zanja, zanja, bordo, así como parcelas testigo, de la uno a la cinco y la 13, en estos sitios las especies compartidas fueron *Heteropogon contortus*, *Melinis repens*, *Bouteloua griffithsii*, *Dalea versicolor* y *Zornia diphylla*; también se encontraron *Tridax coronopifolia*, *Anthericum liliago* y *Heleocharis sp.*, pero las últimas dos se presentaron en un menor número de sitios (tres parcelas testigo, un entre zanja y un bordo) (Figura 23).

El segundo grupo se integra por siete parcelas, de estas cinco corresponden a zanjas y bordos, una testigo y una de entre zanja; donde las especies que se encontraron en tres o más sitios fueron

*Tridax coronopifolia*, *Heteropogon contortus*, *Melinis repens*, *Dalea versicolor* y *Bouteloua hirsuta*, esta última considerada como indicador de buen manejo de agostaderos (Herrera y Pámanes, 2010), que presenta tolerancia al pastoreo continuo (Cruz, 1992) y se ha encontrado en áreas secas y perturbadas (Meagher, 2007).

El tercer grupo está integrado por 12 parcelas, de estas una corresponde a bordo, dos a zanjas y el resto corresponden a las establecidas en áreas testigo (de la parcela 6 a la 16); además de las especies mencionadas para el grupo dos, también se contabilizaron *Evolvulus alsinoides var. angustifolius*, *Sida abutifolia* y *Bouteloua chondrosioides* que son especies casi exclusivas de estas áreas, por lo que se deduce que las condiciones de estas áreas son favorables para el establecimiento de las cuatro especies mencionadas .

Además de *Heleocharis sp.*, las especies que se reconocieron solo en un sitio de muestreo son *Microchloa kunthii*, *Dyssodia aurantiaca*, *Bathriochloa saccharoides*, *Grindelia subdecurrens*, y *Galactia wrightii* y *Ipomoea costellata*, esta última contribuye a la formación de suelo para propiciar el establecimiento posterior de otras especies<sup>10</sup> (Figura 23).

La frecuencia con que se registraron *Heteropogon contortus* y *Melinis repens*, se debe a que las dos especies se consideran invasoras con capacidad de adaptación en suelos bajos en nutrientes y deteriorados; la primera es nativa algunos estudios señalan que mayor dominancia (o invasión) de especies nativas tienen un efecto negativo en el desarrollo de las especies nativas del área que presentan menor abundancia (Viramontes *et al.*, 2012; Bielfelt y Litt, 2016). La segunda es una especie introducida catalogada como invasora por su gran capacidad de adaptación en áreas de disturbio o en deterioro, algunas de sus características son los periodos de vida cortos, rápido crecimiento, alta tasa de germinación por la facilidad con que se dispersa la semilla (Melgoza *et al.*, 2014; Nezomba *et al.*, 2017), *Melinis repens* muestra buenas características para retener los escurrimientos superficiales e incrementar la infiltración de agua en el suelo (Viramontes *et al.*, 2012).

La presencia de las dos especies que se presentaron con mayor frecuencia puede desarrollar una función importante en el proceso de recuperación de las áreas degradadas que propicie las

---

<sup>10</sup> Consultado en línea el 20 de julio del 2017. [http://bio.uaq.mx/municipioOro/fichas.php?idA=527&n\\_img=&F=1](http://bio.uaq.mx/municipioOro/fichas.php?idA=527&n_img=&F=1)

condiciones favorables al incrementar el contenido de humedad en el suelo, lo cual debería favorecer el desarrollo de otras especies nativas que requieren mayor cantidad de nutrientes y mejores condiciones del suelo.

El dendrograma (Figura 23) muestra las especies compartidas en las condiciones evaluadas y las que son exclusivas de las áreas testigo, sin embargo no es posible diferenciar especies exclusivas de zanjas, bordos y entre zanjas. Para complementar este análisis se determinó la diferencia entre las condiciones evaluadas (con la prueba de PPRM).

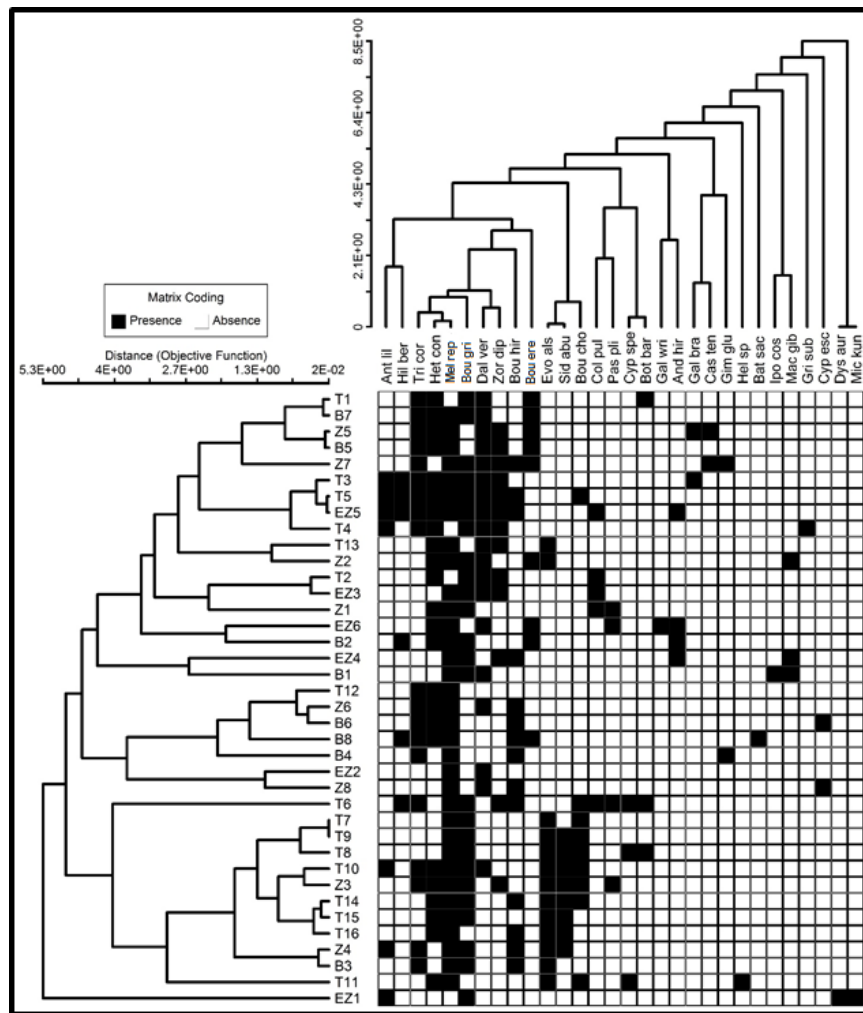


Figura 23. Agrupamiento de sitios de muestreo con el método de Jaccard con base en presencia/ausencia de especies.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. T1 a T16: 16 parcelas testigo, Z1 a Z8: ocho parcelas de muestreo en zanjas, 1 a B8: ocho parcelas de muestreo en bordo, EZ1 a EZ6: seis parcelas de muestreo en entre zanjas. Nota: Los acrónimos de las especies se muestran en el Cuadro 34.

Cuadro 34. Nombres científicos y acrónimos de especies registradas.

Acrónimo	Nombre científico
Ant lil	<i>Anthericum liliago</i> L.
Hel sp	<i>Heleocharis sp</i>
Cyp esc	<i>Cyperus esculentus</i> L.
Cyp spe	<i>Cyperus spectabilis</i> Link.
Bou gri	<i>Bouteloua griffithsii</i> Columbus, Aliso
Bou ere	<i>Bouteloua erecta</i> (Vasey y Hack.) Columbus, Aliso
Bou hir	<i>Bouteloua hirsuta</i> Lag.
Bou cho	<i>Bouteloua chondrosioides</i> (Kunth) Benth. ex S.Watson
Pas pli	<i>Paspalum plicatulum</i> Michx.
Het con	<i>Heteropogon contortus</i> (L.) Roem. y Schult.
Mel rep	<i>Melinis repens</i> (Willd.) C.E.Hubb.
Bat sac	<i>Bathriochloa saccharoides</i> (Sw.) Rydb.
Hil ber	<i>Hilaria belangeri</i> (Steud.) Nash
And hir	<i>Andropogon hirtiflorus</i> (Nees) Kunth.
Mic kun	<i>Microchloa kunthii</i> Desv.
Bot bar	<i>Bothriochloa barbinodis</i> (Lag.) Herter
Mac gib	<i>Macroptilium gibbosifolium</i> (Ortega) A.Delgado
Dal ver	<i>Dalea versicolor</i> Zuuc.
Zor dip	<i>Zornia diphylla</i> Pers.
Sid abu	<i>Sida abutifolia</i> P. Miller
Cas ten	<i>Castilleja tenuiflora</i> Benth
Tri cor	<i>Tridax coronopifolia</i> (Kunth.) Hemsl.
Dys aur	<i>Dyssodia aurantiaca</i> B. L. Rob.
Gri sub	<i>Grindelia subdecurrens</i> DC
Evo als	<i>Evolvulus alsinoides var. angustifolius</i> (L.) Torr.
Ipo cos	<i>Ipomoea costellata</i> Torr.

Acrónimo	Nombre científico
Col pul	<i>Cologania pulchella</i> Kunth
Gal bra	<i>Galactia brachystachys</i> Benth.
Gal wri	<i>Galactia wrightii</i> A.Gray

### 8.6.3 Diferencias de la composición florística del pastizal con obras y sin obras

El Procedimiento de Permutación de Respuesta Múltiple (PPMR) muestra que existen diferencias significativas en la composición florística de las parcelas de muestreo ubicadas en áreas testigo (pastizal sin obras) con las parcelas ubicados en zanja donde  $T = -3.04$ ,  $p > 99\%$  y bordo donde  $T = -4.10$ ,  $p > 95\%$ ; el resto de las comparaciones realizadas no mostraron diferencias significativas (La diferencia entre áreas testigo con zanja y bordo se atribuyen a *Bouteloua erecta* y *Melinis repens*, que se presentaron con mayor frecuencia en parcelas con obras que en áreas testigo; la presencia de *Paspalum plicatulum*, *Heleocharis sp.*, *Bothriochloa barbinodis* y *Grindelia subdecurrens* en parcelas sin obras y que no se encontraron en zanjas; caso contrario *Cyperus esculentus*, *Macroptilium gibbosifolium* y *Castilleja tenuiflora* se presentaron en zanjas, pero no áreas testigo.

La diferencia de la composición florística de áreas testigo comparadas con los bordos se debe a la presencia de *Hilaria belangeri*, *Heleocharis sp.*, *Bothriochloa barbinodis*, *Sida abutifolia*, *Anthericum liliago* y *Cologania pulchella* encontradas en áreas testigo, pero ausentes en bordos; así como la presencia de *Macroptilium gibbosifolium*, *Cyperus esculentus* en bordos, pero ausentes en áreas testigo.

Cuadro 35).

La diferencia entre áreas testigo con zanja y bordo se atribuyen a *Bouteloua erecta* y *Melinis repens*, que se presentaron con mayor frecuencia en parcelas con obras que en áreas testigo; la presencia de *Paspalum plicatulum*, *Heleocharis sp.*, *Bothriochloa barbinodis* y *Grindelia subdecurrens* en parcelas sin obras y que no se encontraron en zanjas; caso contrario *Cyperus esculentus*, *Macroptilium gibbosifolium* y *Castilleja tenuiflora* se presentaron en zanjas, pero no áreas testigo.

La diferencia de la composición florística de áreas testigo comparadas con los bordos se debe a la presencia de *Hilaria belangeri*, *Heleocharis sp.*, *Bothriochloa barbinodis*, *Sida abutifolia*,

*Anthericum liliago* y *Cologania pulchella* encontradas en áreas testigo, pero ausentes en bordos; así como la presencia de *Macropodium gibbosifolium*, *Cyperus esculentus* en bordos, pero ausentes en áreas testigo.

Cuadro 35. Procedimiento de Permutación de Respuesta Múltiple (MRPP) para identificar diferencia significativa en la composición florística.

Condiciones comparadas	T	p
Testigo vs Entre zanja	-1.16	0.12
<b>Testigo vs Zanja</b>	<b>-3.04</b>	<b>0.01</b>
<b>Testigo vs Bordo</b>	<b>-4.10</b>	<b>0.00</b>
Entre zanja vs Zanja	-0.79	0.20
Entre zanja vs Bordo	-1.71	0.06
Zanja vs Bordo	1.16	0.89

T: entre más negativo es su valor, existe mayor diferencia significativa entre las condiciones evaluadas, p: Nivel de confiabilidad.

Los resultados obtenidos presentan congruencia con los antes mencionados debido a que se había identificado poca semejanza entre las parcelas establecidas en áreas con obras y áreas testigo, en especial de la parcela 6 a la 11 y de la 14 a 16 que se observó como un grupo independiente del resto de las parcelas; este análisis mostro que las parcelas de entre zanja son similares a las establecidas en áreas testigo por lo que no existe diferencia significativa entre estas condiciones.

## 9 CONCLUSIONES

La construcción de las zanjas bordo ha influido en el incremento de la cobertura vegetal en los pastizales de la cuenca Rancho Dolores. Sin embargo, no es posible generalizar este efecto en toda la superficie donde se desarrolla el pastizal.

Los incrementos de cobertura vegetal identificados con la interpretación de los índices de vegetación (NDVI y SAVI) calculados con las imágenes de satélite, son estadísticamente significativos con un nivel de confiabilidad del 95%, pero no es posible atribuir el efecto solo a las condiciones que propician las obras de conservación, sino que también están en función de las épocas de lluvias.

Los periodos de evaluación de la cubierta vegetal y la producción de biomasa en el año permitieron analizar el potencial forrajero estacional en los pastizales evaluados.

La interacción de polígonos con sitios de muestreo mostró diferencias significativas entre los porcentajes de cobertura y la producción de biomasa, pero no en los índices de vegetación.

El porcentaje de cobertura vegetal y la producción de biomasa fueron mayores en las zanjas y bordo en comparación con la zona entre zanjas, inicio y pie del bordo, lo cual indica que la construcción de las obras, en zonas de clima seco tienen efecto positivo en el desarrollo de la vegetación por los escurrimientos superficiales captados, a pesar de las zonas de disturbio.

Se obtuvieron diferencias significativas en los porcentajes de cobertura vegetal y producción de biomasa en entre zanjas comparado con polígonos testigo, aunque no se observó el mismo comportamiento en los tres polígonos, lo cual se explica porque la entre zanja es la parte media del sistema zanja bordo con menor influencia en la captación de agua; por el contrario, el IVPN, NDVI y SAVI no mostraron diferencia significativa, pero permitieron valorar los cambios de la cubierta vegetal y tuvieron buena correlación con el porcentaje de cobertura verde.

La construcción de las zanjas bordos ayudan a captar agua y a favorecen el desarrollo de la vegetación, pero causan la presencia de especies invasoras como el zacate rosado (*Melinis repens*) que aumenta la producción de biomasa, protege al bordo de la erosión, pero su potencial forrajero es de regular a pobre.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

Aguilar-Arias, H., R. Mora-Zamora y C. Vargas-Bolaños. 2014. Metodología para la corrección atmosférica de imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 y LANDSAT 8 con el módulo Flaash del software ENVI. Revista Geográfica de América Central 53:39–59. Doi.10.15359/rgac.2-53.2.

Aguirre-Salgado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. De los Santos-Posadas y A.I. Aguirre-Salado. 2011. Mapping Leaf Area Index and Canopy Cover Using Hemispherical photography and SPOT 5 HRG data: Regresión y K-NN. Agrociencia 45:105–119.

Astrium, S. 2013. SPOT 6 y SPOT 7 Imagery - User Guide, 117. Retrieved from <http://www.intelligence-airbusds.com/spot6userguide/>.



- Badii, M. H., J. Landeros y E. Cerna. 2008. Patrones de asociación de especies y sustentabilidad. *International Journal of Good Conscience* 3(1): 632–660.
- Bielfelt, B.J., A.R. Litt. 2016. Effects of Increased *Heteropogon contortus* (Tanglehead) on Rangelands: The Tangled Issue of Native Invasive Species. *Rangeland Ecology and Management* 69:508–512.
- Bolaños-González, M. A., y F. Paz-Pellat. 2010. General modeling of the effects of the illumination - Vision geometry in the reflectance of grasslands. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias* 1(4): 349–361.
- Cai, L. 2006. Multi-response Permutation Procedure as an Alternative to the Analysis of Variance: An SPSS Implementation. *Behavior Research Methods* 38 (1): 51-59.
- Calera, A., J. González-Piqueras y J. Melia. 2004. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *International Journal of Remote Sensing* 25:97–109. Doi./10.1080/0143116031000115319.
- Casiano, M., y F. Paz. 2014. Caracterización fenológica de bosques tropicales caducifolios usando información espectral: experimentos con componentes. *Terra Latinoamericana* 32:259–271.
- Chen, J., M. Shen, X. Zhu y Y. Tang. 2009. Indicator of flower status derived from in situ hyperspectral measurement in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators* 9(4):818–823. Doi.10.1016/j.ecolind.2008.09.009
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2014. Manual de obras y Practicas. Protección, restauración y Conservación de Suelos Forestales.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2017. Criterios técnicos para la ejecución de los proyectos de conservación y restauración de suelos 2017.
- Contreras - Hinojosa, J. R., V. Volke-haller, J.L. Oropeza-Mota, C. Rodríguez-Franco, T. Martínez-Saldaña y Á. Martínez-Garza. 2003. Estado actual y causas de la degradación de los agostaderos en el municipio de Yanhuítlán, Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 21(3): 427–435.

Contreras - Hinojosa, J. V. Volke-Haller, J. Oropeza-Mota, C. Rodríguez-Franco y T. Martínez-Saldaña, Á. Martínez-Garza. 2005. Reducción del rendimiento de maíz por la erosión del suelo en Yanhuitlán, Oaxaca, México. *Terra* 23(3): 399–408.

Cotler, H., E. Sotelo, J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina y L. Quiñones. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica* 83:5–71.

Cotler, H., S. Cram, S. Martínez-Trinidad and V. Bunge. 2015. Conservation practices assessment in forest soils of Mexico: The case of the ditches. *Investigaciones Geográficas* 2015(88): 6–18. [Doi.org/10.14350/ig.47378](https://doi.org/10.14350/ig.47378).

Cotler, H., S. Cram, S. Martínez-Trinidad y E. Quintanar. 2013. Forest soil conservation in central Mexico: An interdisciplinary assessment. *Catena* 104:280–287. [Doi.org/10.1016/j.catena.2012.12.005](https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.12.005).

Cruz C, E. and J.R. Aguirre-R. 1992. The common rangelands of Tiltepec, a typical case of environmental deterioration in northwest Oaxaca, Mexico.

Fernández Reynoso D. S., M. R. Martínez-Menez., A. Quero, E. Rubio-Granados y C. Palacios-Espinoza. 2013. Estrategias de manejo para la producción sustentable Rio Mixteco, Oaxaca.

Fernández-Reynoso, D. S., M. R. Martínez-Menes, A. Quero, E. Rubio-Granados, y C. Palacios-Espinoza. 2013. Estrategias de manejo para la producción sustentable en laderas de la cuenca del Rio Mixteco, Oaxaca.

Franco-Guerra, F. J., M. Sánchez-R, J. C. Camacho-R, J.C. Hernández, J. E. Villarreal-EB, O. A. Rodríguez-C, E. L. Marcito-A. 2014. Consumo de especies arbóreas, arbustivas y sus frutos y herbáceas por cabras en pastoreo trashumante en la mixteca oaxaqueña, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 17:267–270.

García J, S. A., y L.J. Martínez M, L. J. 2010. Método para identificación de cultivos de arroz (*Oryza sativa* L.) con base en imágenes de satélite. *Agronomía Colombiana* 28 (2): 281–290.

García-Fayos, P. 2004. Capítulo 11. Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. Madrid.

Gilabert, M. A., J. González-Piqueras y J. García-Haro. 1997. Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección*.

Gilabert, M. A., J. González-Piqueras, F. J. García-Haro and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 82 (2–3):303–310. Doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00048-2.

Girolimetto, D., V. Venturini y L. Rodríguez. 2011. Influencia de la resolución espacial de los diagramas NDVI-T s en el cálculo de la fracción evaporable. *Tecnología y Ciencias del Agua* 2(3):21–33.

Gyde-Lund, H. 2007. Accounting for the World's Rangelands. *Rangelands* 29(1) 3–10. Doi.org/10.2111/1551-501X (2007)29[3: AFTWR]2.0.CO;2

Herrera-Arrieta, Y. y D. S. Pámanes-García. 2010. *Guía de Pastos de Zacatecas*.

Higginbottom, T. P. and E. Symeonakis. 2014. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: Current frameworks and future directions. *Remote Sensing* 6(10):9552–9575. Doi.org/10.3390/rs6109552.

Holechek, J.L., R.D. Pieper y C.H. Herbel. 1989. *Range management: Principles and practices*. Prentice-Hall. New York.

Holechek, J.L., R.D. Pieper y C.H. Herbel. 1989. *Range management: Principles and practices*. Prentice-Hall. New York.

Huerta-Olague, J. J., J.D. Ríos-Berber, J. L. Oropeza-Mota., M. R. Martínez-Menes, R.D. Guevara-Gutiérrez, C. Ramírez-Ayala, J. Velázquez-Mendoza. 2012. Efecto del sistema radical de cuatro cultivos en la erosión del suelo. *Terra* 30:271–278.

Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25:295–309. Doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X.

Huete, A. R. and R. D. Jackson. 1987. Suitability of spectral índices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. *Remote Sensing of Environment* 23(2): Doi.org/10.1016/0034-4257(87)90038-1.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1999. Superficie continental e insular del territorio nacional, inédito, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI). 2004. Guía para la Interpretación de Cartografía Edafología. Sierra 11–24.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI). 2015. (Disponible en línea en <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usosuelo/>) (Consultado el 21 de marzo del 2017).

Jing-an, S., W. Chao-fu, X. De-ti. 2008. Effects of Land Management Practices on Soil Water in Southwestern Mountainous Area, China. *Agricultural Sciences in China* 7(7):871–886. Doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60125-X.

Kyalo-Willy, D., E. Zhunusova and K. Holm-Müller. 2014. Estimating the joint effect of multiple soil conservation practices: A case study of smallholder farmers in the Lake Naivasha basin, Kenya. *Land Use Policy* 39:177–187. Doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.02.017.

Lianes E., M. Marchamalo y M. Roldan. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(2):217–235.

López-Flores, H. E. M. R. Martínez-Menes, J. L. Oropeza-Mota, E. Mejía-Sáens y R. Carrillo-González. 2003. Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. *Terra Latinoamericana* 21:233–244.

López-Pérez, A., M. R. Martínez-Menez, y D. S. Fernández-Reynoso. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología Y Ciencias Del Agua* VI:121–137.

Magaña-Torres, O.S, y L. Diakite-Diakite. 2007. “Evaluación externa de los apoyos de reforestación, obras y prácticas de conservación de suelos y sanidad forestal. Ejercicio Fiscal 2006”, Universidad Autónoma de Chapingo y Grupo GSP, Estado de México.

Meagher W.L. 2007. Revisión y actualización del inventario de la flora espontanea del jardín botánico “El charco del ingenio” San Miguel de Allende, Guanajuato (México). (disponible en línea [www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumenes/FLOBA/ComplementarioXXII.pdf](http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumenes/FLOBA/ComplementarioXXII.pdf).) (Consultado el 20 de junio del 2017).

Medina-García, G., R. Gutiérrez-Luna, F. G. Echavarría-Chairez, M. D. Amador-Ramírez y J. A. Ruiz-Coral. 2009. Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas. *Técnica Pecuaria En México* 47(2):135–144.

Melgoza Castillo, A., Balandran Valladares, M. I., Mata-González, R., y Pinedo Álvarez, C. 2014. Biología del pasto rosado *Melinis repens* (Willd.) e implicaciones para su aprovechamiento o control. Revisión. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias* 5(4):429–442.

Melgoza-Castillo, A. 2006. Current Situation of Rangelands in México Situación Actual de los Agostaderos. *USDA Forest Service Proceedings RMRS* 85–86.

Meneses-Tovar, C. L. 2011. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *62(238):39–46*.

Merg, C., D. Petri, F. Bodoira, M. Nini, M. Fernández, F. Schmidt, F. Blanco, R. Montalva, L. Guzmán, K. Rodríguez, F. Blanco y F. Selzer. 2011. Regional Digital Maps of Rainfall, Standardized Precipitation Index and Vegetation Index. *Revista Pilquen* 1–11.

Mielke, P. W., K. J. Berry and G. W. Brier. 1981. Application of Multi-Response Permutation Procedures for Examining Seasonal Changes in Monthly Mean Sea-Level Pressure Patterns. *Monthly Weather. American Meteorological Society* 19:120-126. [Doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0120:AOMRPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0120:AOMRPP>2.0.CO;2).

Moradi, A., C. Teh Boon Sung, K. J. Goh. A. Husni Mohd Hanif and C. Fauziah Ishak. 2015. Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. *Soil and Tillage Research* 145:62–71. [Doi.org/10.1016/j.still.2014.08.005](https://doi.org/10.1016/j.still.2014.08.005).

- Moreno, C. E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M&T - Manuales y Tesis SEA, 1, 84. Doi.org/10.1371/journal.pone.0103709.
- Nezomba, H., F. Mtambanengwe, P. Tittonell, P. Mapfumo. 2017. Practical assessment of soil degradation on smallholder farmers' fields in Zimbabwe: Integrating local knowledge and scientific diagnostic indicators. *Catena* 156: 216–227.
- Olson, K. C. and R. C. Cochran. 1998. Radiometry for predicting tallgrass prairie biomass using regression and neural models. *Journal of Range Management* 51(2):186–192.
- Pascual-Ramírez, F., F. Paz-Pellat, y M. Bolaños-González. 2011. Estimación de biomasa aérea en cultivos con sensores remotos. *Terra Latinoamericana* 30:17–28.
- Paz-Pellat, F., E. Palacios-Vélez, M. Bolaños-González, L.A. Palacios-Sánchez, M.R. Martínez-Menes, E. Mejía-Sáens y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia* 41:539–554.
- Paz-Pellat, F., M. E. Romero-Sánchez, E. Palacios-Vélez, M. Bolaños-González, J.R. Valdez-Lazalde y A. Aldrete. 2014. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: Marco Teórico. *Terra Latinoamericana* 32(3):177–194.
- Pérez, D. J. 2007. Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología. Uba, 9.
- Pettorelli, N., J. O. Vik, A. Mysterud, J. M. Gaillard, C. J. Tucker and N.C. Stenseth. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* 20 (9):503–510. Doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011.
- Posada, E., H. M. Ramírez-Daza, N. C. Espejo-Delgado. 2012. Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011.
- Ramírez, J. M. P., M.O. Sánchez, B.R. Ortiz, J. L. Zaragoza R., L.C.L.C. Ricardo, D., y G. Fuentes-Mascorro. 2014. Sistema De Producción y Zoometría De La Cabra Pastoreña. *Acta Iberoamericana de Conservación Animal* 4:231–233.

Reséndiz-Mancilla, A. E. 2015. Análisis y tratamiento digital de imágenes SPOT 5 aplicados al medio ambiente. Tesis, 181.

Reyes, M., F. Paz, M. Casiano, F. Pascual, M. I. Márin y E. Rubiños. 2011. Caracterización del efecto de estrés usando índices espectrales de la vegetación para la estimación de variables relacionadas con la biomasa aérea. *Agrociencia* 45(2):221–233.

Rodríguez, M. F., A. Florentino, J. Gauardo y D. A. García. 2004. Sistemas de información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz-España aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical* 54(4):391–409.

Rodríguez-Moreno, V. M. and S. H. Bullock. 2013. Comparison of vegetation indexes in the Sonora desert incorporating soil and moisture indicators and application to estimates of LAI. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(4):611–623.

Romero-Sanchez, M.E., F. Paz-Pellat, E. Palacios-Velez, M. Bolaños-González, R. Valdez-Lazalde y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales. *Agrociencia* 43: 291-307.

Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. pp: 1-371.

Ruiz-Colmenero, M., R. Bienes, D. J. Eldridge and Marques. 2013. Catena Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. *Catena* 104:153–160. [Doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.007](https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.007).

Ruiz-Salazar, J. G., L. Tijerina-Chávez, E. Mejía-Sáenz, M. Sandoval-Villa, P. Sánchez-García, H. Vaquera-Huerta, M. T. Colinas-León. 2011. Índices de vegetación para estimar el crecimiento de plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) estresadas por deficiencia de agua y nitrógeno. *Terra Latinoamericana* 29:47–56.

Rzedowski, J., 2006. 2006. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. (Disponible en línea en:

<http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMxC14.pdf>)

(Consultado el 13 de abril del 2016).

SARH. 1980. Comisión técnico consultiva para la determinación regional de los coeficientes de agostadero.

Schmidt, H. and A. Karnieli. 2001. Sensitivity of vegetation indices to substrate brightness in hyper-arid environment: The Makhtesh Ramon Crater (Israel) case study. *International Journal of Remote Sensing* 22(17):3503–3520. Doi.org/10.1080/01431160110063779

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2005. Informe de la situación del medio ambiente en México.

Singh, G., A. U. Khan, A. Kumar, N. Bala y U. K. Tomar. 2012. Effects of rainwater harvesting and afforestation on soil properties and growth of *Embllica officinalis* while restoring degraded hills in western India. *African Journal of Environmental Science and Technology* 6(8):300–311. doi.org/10.5897/AJEST11.040.

Singh, G., D. Mishra, K. Singh and R. Parmar. 2013. Effects of rainwater harvesting on plant growth, soil water dynamics and herbaceous biomass during rehabilitation of degraded hills in Rajasthan, India. *Forest Ecology and Management* 310:612–622. Doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.002.

Singh, G., G. R. Choadhary, B. Ram and N.K. Limba. 2011. Effects of rainwater harvesting on herbage diversity and productivity in degraded Aravalli hills in western India. *Journal of Forestry Research* 22(3):329–340. Doi.org/10.1007/s11676-011-0177-5.

Stanchi, S., M. Freppaz, A. Agnelli, T. Reinsch and E. Zanini. 2012. Properties, best management practices and conservation of terraced soils in Southern Europe (from Mediterranean areas to the Alps): A review. *Quaternary International* 265:90–100. Doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.015.

Tait, A. and X. Zheng. 2003. Mapping Frost Occurrence Using Satellite Data. *Journal of Applied Meteorology* 42(2):193–203. Doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0193: MFOUSD>2.0.CO;2.



Thomson, E. F., S. N. Mirza and J. Afzal. 1998. Technical Note: Predicting the components of aerial biomass of fourwing saltbush from shrub height and volume. *Journal of Range Management* 51:323-325-NaN, NaN al. 1998 – Technic.

Torres W., M. Méndez, A. Dorantes y R. Durán. 2010. Estructura, composición y diversidad del matorral de Duna Costera en el Litoral Yucateco. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 86: 37-51.

Torres-Rojo, J.M., V.E. Sosa-Cedillo, R. Cardoza-Vázquez, O.S. Magaña-Torres, J.D. Fernández-Medina, E.E. Gómez-Morán, J.L. Nieves-Frausto. 2010. Informe De Evaluación Externa de los Apoyos de Restauración de Suelos Forestales Ejercicio Fiscal 2009, Universidad Autónoma de Chapingo.

Tucker C.J. 1979. Red and photographic Infrared Linear Combination for monitoring Vegetation. *Remote sensing of environment* 8:127-150.

Valdez-Lazalde, J. R., M. de J. González-Guillen y H. M. de los Santos-Posadas. 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Agrociencia* 40:383–394.

Van-Leeuwen, W. J. D., B. J. Orr, S.E. Marsh and S. M. Herrmann. 2006. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment* 100(1):67–81. Doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.002.

Villa-Herrera, A., F. Paz-Pellat, M. J. Pérez-Hernández, C. Rojas-Montes, M. Rodríguez-Arvizu, S. Ortiz-Acosta, M. Casiano-Domínguez, H. Díaz-Solís. 2014. Animal carrying capacity estimation in rangelands using a Normalized Slopes Vegetation Index. *Agrociencia* 48(6):599–614.

Viramontes-Olivas, O.A., V.M. Reyes-Gómez, A. Rangel-Rodríguez, C. Ortega-Ochoa, R.A. Soto-Cruz, J. Camarillo-Acosta y T. Lebgue-Keleng. 2012. Papel hidrológico-ambiental de pastizales nativos e introducidos en la cuenca alta del río Chuvíscar, Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua* vol. 3.

Waite, R. B. 1994. The application of visual estimation procedures for monitoring pasture yield and composition in exclosures and small plots. *Tropical Grasslands* 28:38-42.

White, R., M. Rohweder and S. Murray. 2000. Grassland Ecosystems. Pilot Analysis of Global Ecosystems. Doi.org/10.1021/es0032881.

Wylie, B. K., I. Denda, R. D. Pieper, J. A. Harrington, B. C. Reed and G. M. Southward. 1995. Satellite-based herbaceous biomass estimates in the pastoral zone of Niger. *Journal of Range Management* 48:159–164. Doi.org/10.2307/4002804.

Zarco-Espinosa, V. M., J.L. Valdez-Hernández, G. Ángeles-Pérez, y O. Castillo-Acosta. 2010. Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del Parque Estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y Ciencia Tópico Húmedo* 26 (1):1–17.

Zhang, F., Z. Xing, H. W. Rees, Y. Dong, S. Li and F. Meng. 2014. Assessment of effects of two runoff control engineering practices on soil water and plant growth for afforestation in a semi-arid area after 10 years. *Ecological Engineering* 64:430–442. Doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.024.

Zhang, Z., H. Qiang, A.D. Mchugh, J. He, H. Li, Q. Wang and Z. Lu. 2016. Soil and Tillage Research Effect of conservation farming practices on soil organic matter and stratification in a mono-cropping system of Northern China. *Soil and Tillage Research* 156:173–181. Doi.org/10.1016/j.still.2015.10.008.

Zhou, J., B. Fu, G. Gao, Y. Lu, Y. Liu, N. Lu and S. Wang. 2016. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. *Catena* 137:1–11. Doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.015.