



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS SAN LUIS POTOSÍ**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS  
NATURALES**

**ANÁLISIS DE PARÁMETROS HÍDRICOS Y USO POTENCIAL  
DEL AGUA DE LLUVIA EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE**

**LUZ ANDREA LOERA ALVARADO**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí**

**Noviembre de 2018**

La presente tesis titulada: “ANÁLISIS DE PARÁMETROS HÍDRICOS Y USO POTENCIAL DEL AGUA DE LLUVIA EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE”, realizada por la alumna: LUZ ANDREA LOERA ALVARADO 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  
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

**CONSEJO PARTICULAR**

**CONSEJERO**

  
\_\_\_\_\_  
DR. JUAN FELIPE MARTÍNEZ MONTOYA

**DIRECTOR DE TESIS**

  
\_\_\_\_\_  
DR. JOSÉ DE JESÚS MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

**ASESOR**

  
\_\_\_\_\_  
DRA. MARGARITA TORRES AQUINO

**ASESOR**

  
\_\_\_\_\_  
DR. RODOLFO CISNEROS ALMAZÁN

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, 30 de octubre de 2018



**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS  
REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe Luz Andrea Loera Alvarado alumna 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 Dr. Juan Felipe Martínez Montoya, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **ANÁLISIS DE PARÁMETROS HÍDRICOS Y USO POTENCIAL DEL AGUA DE LLUVIA EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE**; y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que 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.

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, a 30 de octubre de 2018.

Firma

Vo. Bo. Profesor, Consejero o Director de Tesis

# ANÁLISIS DE PARÁMETROS HÍDRICOS Y USO POTENCIAL DEL AGUA DE LLUVIA EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE

Luz Andrea Loera Alvarado, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2018

El agua es uno de los factores críticos en las zonas áridas y semiáridas para la producción agropecuaria, donde su escasez se agrava posiblemente debido al calentamiento global. En estas regiones una alternativa viable para enfrentar la situación del agua en época de estiaje es la captación del recurso en bordos de almacenamiento. El objetivo general de esta investigación fue determinar, con base en un estudio hidrológico, el funcionamiento de este tipo de obras; asimismo, evaluar la aptitud del agua cosechada para la producción de forraje. En primer término, se determinaron las características morfológicas de cada cuenca, se estimó el volumen de agua aprovechable en cada caso y se evaluó el estado actual de los bordos. Posteriormente, se recolectaron muestras del agua cosechada y se analizó su composición química, se analizó su calidad para definir su uso potencial para la irrigación de cultivos forrajeros. Finalmente, se estableció un módulo de producción de forraje mediante riego por goteo por gravedad y fertigación, donde se evaluó el rendimiento y calidad nutricional en maíz, triticale y pasto sudán. Los resultados del estudio hidrológico, evidencia fallas en el diseño y construcción de los bordos de almacenamiento. Se encontró que la composición química del agua cosechada es de buena calidad, apta para su uso en el riego agrícola. Finalmente, se obtuvo un rendimiento aceptable de forraje con buena calidad nutrimental. Se concluye que la cosecha de agua de lluvia en bordos de almacenamiento es una alternativa factible para enfrentar la escasez del recurso en las zonas semiáridas, contribuyendo a mejorar la producción de forraje en la época de estiaje.

**Palabras claves:** bordos de almacenamiento, calidad del agua, calidad del forraje, fallas de diseño, cultivos forrajeros.

# **ANALYSIS OF WATER PARAMETERS AND POTENTIAL USE OF RAINWATER IN FORAGE PRODUCTION**

Luz Andrea Loera Alvarado, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2018

## **Abstract**

Water is one of the critical factors in arid and semi-arid areas for agricultural production and livestock, where its scarcity is possibly aggravated by global warming. In these regions, a viable alternative to face the water situation during the dry season is the capture of the resource on earth dams. The general objective of this research was to determine, with based in a study hydrologic, the functioning of this type of dams; also, evaluate the suitability of the water harvested for forage production. In the first term, the morphological characteristics of each watershed were determined, the volume of usable water from in each case was estimated and the current state of the dams was evaluated. Afterwards, samples of harvested water were collected and their chemical composition was analyzed, their quality was analyzed to define their potential use for the irrigation of forage crops. Finally, a forage production module was established by drip irrigation by gravity and fertigation, where the yield and nutritional quality of maize, triticale and sudan grass were evaluated. The results of the hydrologic study, evidence failures in the design and construction of the earth dams. It was found that the chemical composition of the water harvested is of good quality, suitable for use in agricultural irrigation. Finally, an acceptable yield of forage with good nutritional quality was obtained. It is concluded that the rainwater harvesting on earth dams is a feasible alternative to face the scarcity of the resource in the semi-arid zones, contributing to improve the forage production in the dry season.

**Key words:** earth dams, water quality, forage quality, design failures, forage crops.

## DEDICATORIA

*Hay momentos en la vida en los que simplemente las cosas no suceden de la manera en la que esperamos; momentos en los que la única solución que parecía ser de eficacia era tirar la toalla... Quiero dedicar esta tesis especialmente, al ser más especial y maravilloso para mí, a quien le debo lo que soy y todo lo que tengo.*

*Con todo mi corazón se la dedico a mi madre, la Sra. Genoveva Alvarado Cital†, quien entre muchísimas cosas más, me enseñó con el ejemplo a nunca rendirme, a pesar de los obstáculos y las críticas destructivas siempre seguir adelante y nunca dejar de soñar. Mil gracias hasta el cielo.*

*A mi papá el Sr. José Carmen Loera y mis hermanos Isidro†, Esperanza, Luis Felipe, Ignacio, María Elena y Gerardo, por su apoyo incondicional, por motivarme a superarme, sus regaños y ejemplos que sin duda me han dejado aprendizajes valiosos. Gracias por estar ahí siempre.*

*A mis sobrinos Miriam, Citlali, Samantha, Emiliano, Brisa, Sebastián, Nachito y Ángel, por iluminar mis días grises siempre con una sonrisa y contagiarme de su alegría.*

*“Mi familia, son mi hogar, mis personas favoritas. Son los que hacen que todo valga la pena, los amo”*

## AGRADECIMIENTOS

A las instituciones que hicieron posible la realización del trabajo de investigación, por la ayuda económica brindada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Colegio de Postgraduados campus San Luis Potosí por permitirme continuar con mi formación académica.

Especialmente a mi director de tesis, el Dr. José de Jesús Martínez Hernández, por su orientación, seguimiento y supervisión durante la realización de este trabajo. Así como por su inestimable paciencia y apoyo incondicional desde el inicio hasta el término de la tesis.

A los doctores Dr. Juan Felipe Montoya, Dra. Margarita Torres Aquino y Dr. Rodolfo Cisneros Almazán, integrantes de mi consejo particular, por su valiosa participación en el seguimiento, revisión, corrección y sugerencias del presente trabajo.

A la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos (SEDARH) de San Luis Potosí, por proporcionarme la información sobre los proyectos de bordos de almacenamiento y el recurso económico para el establecimiento del módulo forrajero.

A los productores de los ejidos del estudio, por permitirme el acceso a las obras. Especialmente a los señores del ejido el Sotol, por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de los cultivos en el módulo de forraje.

A la Dra. María Magdalena Crosby Galván, Dr. Héctor M. Ortega Escobar, Dr. Jorge D. Etchevers B, M. C. Margarita Crosby Galván y al Sr. Cruz, del COLPOS campus Montecillo, por su disponibilidad y apoyo en el trabajo de laboratorio.

Al Dr. Clemente Rodríguez Cuevas, M. C. Jorge Aceves de Alba y el Ing. Javier Muñoz Quintana, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por el tiempo y asesoría brindada en cuanto al diseño y construcción de bordos de almacenamiento.

A mis compañeros: José Enrique B., Andrés T., Javier R., Omar M. y Diego M., por acompañarme y apoyarme durante la última fase de trabajo de campo.

A mis amigos y compañeros del campus SLP, por el apoyo, escucharme, consolarme y todos los momentos compartidos, haciendo más llevadera la estancia en la maestría.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN GENERAL</b> .....	1
<b>2. Objetivos</b> .....	4
<b>2.1. Objetivo general:</b> .....	4
<b>2.2. Objetivos particulares:</b> .....	4
<b>3. Hipótesis</b> .....	4
<b>4. Literatura citada</b> .....	4
<b>CAPÍTULO 1. HIDROLOGIA DE MICROCUENCAS EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ</b> .....	7
<b>RESUMEN</b> .....	7
<b>ABSTRACT</b> .....	8
<b>1.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	9
<b>1.2. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	10
1.2.1. Área de estudio.....	10
1.2.2. Características de la cuenca.....	11
1.2.3. Precipitación y escurrimiento .....	12
1.2.4. Uso de imágenes de satélite para el dimensionamiento de bordos de almacenamiento .....	13
1.2.5. Evaluación visual de bordos de almacenamiento .....	14
1.2.6. Análisis estadístico .....	14
<b>1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	14
1.3.1. Características de la cuenca.....	14
1.3.2. Análisis de precipitación y cálculo del escurrimiento .....	20
1.3.4. Uso de imágenes de satélite para el dimensionamiento de bordos de almacenamiento .....	27
1.3.5. Evaluación visual de bordos de almacenamiento .....	29
<b>1.4. CONCLUSIONES</b> .....	36
<b>1.5. LITERATURA CITADA</b> .....	37
<b>CAPÍTULO 2. POTENCIAL DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA IN SITU PARA PRODUCIR FORRAJE EN SAN LUIS POTOSÍ</b> .....	43



<b>RESUMEN</b> .....	43
<b>ABSTRACT</b> .....	44
<b>2.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	45
<b>2.2. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	46
2.2.1. Área de estudio.....	46
2.2.2. Muestreo y análisis de agua .....	47
2.2.3. Aptitud del agua para la producción de forraje .....	47
2.2.4. Análisis estadístico .....	48
<b>2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	49
2.3.1. pH y CE del agua.....	49
2.3.2. Aniones solubles.....	51
2.3.3. Cationes solubles.....	51
2.3.4. Aptitud del agua para producción de forraje .....	52
<b>2.4. CONCLUSIONES</b> .....	59
<b>2.5. LITERATURA CITADA</b> .....	59
<b>CAPÍTULO 3. PRODUCCIÓN DE FORRAJE CON AGUA DE ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN UN AMBIENTE SEMIÁRIDO</b> .....	66
<b>RESUMEN</b> .....	66
<b>ABSTRACT</b> .....	67
<b>3.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	68
<b>3.2. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	70
3.2.1. Localización .....	70
3.2.2. Análisis de fertilidad del suelo y composición química del agua.....	71
3.2.3. Establecimiento del módulo forrajero mediante riego por goteo por gravedad.....	72
3.2.4. Manejo agronómico de los cultivos forrajeros .....	74
3.2.5. Variables evaluadas.....	76
3.2.6. Análisis estadístico .....	77
<b>3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	78
<b>3.4. CONCLUSIONES</b> .....	86
<b>3.5. LITERATURA CITADA</b> .....	86

<b>5. DISCUSIÓN GENERAL</b> .....	93
<b>5.1. LITERATURA CITADA</b> .....	95
<b>6. CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	97
<b>ANEXOS</b> .....	98
Anexo 1. Microcuencas para el diseño de bordos de almacenamiento en San Luis Potosí.....	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación de los bordos de almacenamiento objeto de estudio.....	11
Figura 1.2. Curva hipsométrica de cuencas de meseta o geológicamente jóvenes. .	18
Figura 1.3. Curva hipsométrica de cuencas sedimentarias o en fase de vejez. ....	18
Figura 1.4. Curva hipsométrica de cuencas en equilibrio o maduras. ....	19
Figura 1.5. Perfiles topográficos de bordos de almacenamiento en Rioverde. ....	27
Figura 1.6. Perfiles topográficos de bordos de almacenamiento en Venado. ....	28
Figura 1.7. Perfiles topográficos de bordos de almacenamiento en Villa de Reyes. .	28
Figura 1.8. Perfiles topográficos de bordos de almacenamiento en Ciudad Fernández (a) y San Luis Potosí (b) .....	29
Figura 1.9. Bordos de almacenamiento con agua. Rioverde (a, b y c); Villa de Reyes (d, e y f); San Luis Potosí (g); Venado (h,i y j). ....	30
Figura 1.10. Bordos de almacenamiento sin agua. Rioverde (a, b y c); Venado (d, e y h); Villa de Reyes (f); Arroyos Fríos (g).....	31
Figura 1.11. Agrietamiento en bordos de almacenamiento. Rioverde (a) y San Luis Potosí (b). ....	32
Figura 1.12. Azolve en el bordo Agua Nueva, Miguel Hidalgo, Rioverde, S. L. P. ....	33
Figura 1.13. Daños en vertedor y desagüe del bordo La Cueva, Cinco de Febrero, Venado, S. L. P.....	34
Figura 1.14. Excedente de arcilla para construcción de la cortina del bordo El Botón en Agua de en Medio, Venado, S. L. P.....	35
Figura 2.1. Ubicación de bordos de almacenamiento en tres microrregiones de San Luis Potosí. ....	46
Figura 2.2. Clasificación Wilcox del agua de BA en tres microrregiones de San Luis Potosí.....	53
Figura 2.3. Calidad del agua de BA en tres microrregiones de San Luis Potosí de acuerdo a las Normas de Riverside. ....	53
Figura 2.4. Valores estimados de CE en el extracto del suelo a partir de la CE del agua de BA y umbrales de tolerancia de cultivos forrajeros. ....	58
Figura 3.1. Ubicación de la comunidad y del bordo de almacenamiento de agua para el establecimiento del experimento con cultivos forrajeros. ....	70

Figura 3.2. Distribución de la precipitación y evapotranspiración durante el periodo de desarrollo de los cultivos.....	71
Figura 3.3. Diseño agronómico del módulo forrajero en la comunidad El Sotol, Venado, S. L. P. A) triticale; B) maíz; C) mijo perla y D) pasto sudán (elaboración propia).....	73
Figura 3.4. Desarrollo de cultivos forrajeros en el módulo de producción. a) triticale; b) maíz; c) pasto sudán. ....	79
Figura 3.5. Altura de plantas de cultivos forrajeros a través de su ciclo fenológico. a) maíz; b) triticale; c) pasto sudán. ....	80
Figura 3.6. Composición porcentual de tallo, hoja y elote en la planta de maíz previo a la fertilización foliar (93 DDT) y al momento de la cosecha (136 DDT). SFF) Sin fertilización foliar; CFF) Con fertilización foliar. ....	81

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Estaciones meteorológicas empleadas en el estudio. ....	13
Cuadro 1.2. Valores morfométricos calculados de microcuencas para diseño de bordos de almacenamiento de agua en San Luis Potosí. ....	15
Cuadro 1.3. Parámetros de relieve calculados en microcuencas para diseño de bordos de almacenamiento de agua en San Luis Potosí. ....	17
Cuadro 1.4. Parámetros calculados de la red de drenaje en microcuencas de San Luis Potosí. ....	20
Cuadro 1.5. Parámetros del escurrimiento superficial en microcuencas para diseño de bordos de almacenamiento de agua en San Luis Potosí. ....	21
Cuadro 1.6. Coeficientes de correlación entre los parámetros del estudio hidrológico de cuencas para el diseño de bordos de almacenamiento en San Luis Potosí. .	24
Cuadro 1.7. Comparación entre volúmenes de escurrimiento, aprovechables y la capacidad de almacenamiento de bordos de agua en San Luis Potosí. ....	26
Cuadro 2.1. Ecuaciones utilizadas para estimar la aptitud del agua para riego. ....	48
Cuadro 2.2. Parámetros químicos obtenidos en muestras de agua de BA en tres microrregiones de San Luis Potosí. ....	50
Cuadro 2.3. Índices de la calidad del agua de riego en BA en tres microrregiones de San Luis Potosí. ....	56
Cuadro 3.1. Datos de temperatura de la estación Charcas (INIFAP) del 15 de marzo al 29 de julio de 2017. ....	71
Cuadro 3.2. Características físicas y químicas del suelo en el módulo de producción. ....	72
Cuadro 3.3. Análisis químico del agua del bordo de almacenamiento El Bajío de la Gallina. ....	72
Cuadro 3.4. Suministro de agua a través de todo el ciclo de producción de cuatro cultivos forrajeros. ....	74
Cuadro 3.5. Fórmulas de fertilización y nutrimentos aportados mediante el riego de cuatro cultivos forrajeros. ....	75
Cuadro 3.6. Número de evaluaciones de altura de plantas realizadas durante el desarrollo de tres cultivos forrajeros bajo riego. ....	76

Cuadro 3.7. Parámetros de rendimiento de tres cultivos forrajeros.....	81
Cuadro 3.8. Composición nutricional (%) en maíz, triticale y pasto sudán.....	84
Cuadro 3.9. Efecto de la fertilización foliar en el rendimiento y calidad de forraje de triticale y maíz a la cosecha (98 DDS y 136 DDT, respectivamente).....	86

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El agua es un recurso esencial para el desarrollo de las comunidades humanas (Quessar *et al.*, 2004); ningún otro recurso es más completo para el bienestar, la salud y la prosperidad de los seres humanos (Escobar, 2013). Para la población, el disponer de una fuente de agua de calidad constituye una de sus principales preocupaciones (Quessar *et al.*, 2004). El consumo de agua a nivel mundial, ha incrementado en forma exponencial y se relaciona directamente con el crecimiento demográfico y el desarrollo económico (Hinrichsen y Tacio, 2002). Al respecto, Machiwal *et al.* (2004) señalan que el número de personas se ha triplicado, mientras que el uso del agua por el ser humano se ha sextuplicado.

México se encuentra entre los más de 80 países (40% de la población) que enfrentan problemas por escasez de agua. En nuestro país, el mayor crecimiento poblacional (77%) y económico se concentra en las zonas centro y norte, las cuales se caracterizan por tener una baja disponibilidad de agua (31% nacional), situación contraria a la del sureste de México donde se tiene un menor crecimiento poblacional (23%) y mayor disponibilidad del recurso hídrico (69%) (CONAGUA, 2007). Adicionalmente, el agua se distribuye de manera desproporcional: la actividad agrícola ocupa el 10.5% de la superficie del país y consume el 77% del total disponible; el sector público utiliza el 14% y la industria el 9% (CONAGUA, 2011). Lo anterior indica la importancia de incrementar la productividad del agua (IPA) en la agricultura a través del uso eficiente de la misma. Lo cual de acuerdo a la FAO (2013), contribuye a mejorar los ingresos y reducir el costo de los alimentos, así como la conservación del recurso hídrico.

En 2015, de los 653 acuíferos del país, 105 (16.07%) estaban sobreexplotados (CONAGUA, 2016). Bajo esta situación, la irrigación dejará de ser económicamente rentable, ya que se incrementará el costo del bombeo del agua (Escobar, 2013). Una alternativa para aminorar el abatimiento de los acuíferos, es la captación y conservación de agua de lluvia, la cual puede utilizarse para la producción agrícola. La FAO (2013), define a los sistemas de captación de agua de lluvia como técnicas mejoradas de manejo de suelo y agua, manejo de cultivos y animales; además, son obras hidráulicas que permiten captar, derivar, conducir, almacenar y en algunos casos distribuir el agua de

lluvia; cuya finalidad es incrementar la disponibilidad de agua para consumo humano y animal o en la producción agrícola.

Una opción para reducir los periodos de escasez de agua, es la retención de la misma en el suelo y la captación de agua de lluvia (Rockström y Falkenmark, 2015). Al respecto Akroush *et al.* (2014) consideran que, en lugar de dejar que el agua de lluvia escurra y provoque degradación del suelo, se debe cosechar y aprovechar. Bajo este contexto, en las regiones áridas y semiáridas, la recolección y almacenamiento del agua de lluvia juegan un papel muy importante en el manejo sostenible del recurso hídrico (Rosegrant *et al.*, 2002) y representan una alternativa viable para la irrigación deficitaria y suplementaria de cultivos de temporal (Helmreich y Horn, 2009), cuyo potencial ha sido demostrado por Kahinda *et al.* (2007) en las zonas semiáridas de Zimbabwe, por Oweis y Hachum (2006) al norte de Siria y por Akhtar *et al.* (2016) al sur de Asia, quienes obtuvieron un IPA, a través de riego deficitario utilizando captación de agua de lluvia.

Los esquemas actuales de uso y aprovechamiento ineficiente del agua en México, ponen en riesgo el futuro del país en lo referente al recurso hídrico. Se estima que más de 35 millones de mexicanos viven con escasez extrema de agua y más de 43 millones con baja disponibilidad del recurso. Según Breña y Breña (2007), el país es clasificado con baja disponibilidad de agua, además estos mismos autores, mencionan que la disponibilidad podría incrementarse si se optimiza su uso en zonas urbanas y agrícolas. Otra solución es el aprovechamiento de la precipitación pluvial, mediante técnicas de captación del agua a nivel familiar y comunidad. No obstante, a que las técnicas de captación han sido generadas desde hace más de 4 000 años, no se aplican de forma masiva (Phillips *et al.*, 2011).

La planificación de un sistema de captación de agua exitoso, requiere de estudios para determinar el potencial de escurrimientos pluviales en las cuencas y el volumen de almacenamiento de agua en el suelo (Ali *et al.*, 2010). Este tipo de obras deben cumplir con ciertas características, si el sitio seleccionado para la construcción no es el adecuado o se ha planteado un diseño incorrecto, las obras no desempeñan su función o lo hacen parcialmente. Además, debe estar sustentado con estudios de ingeniería, que contemplen las condiciones topográficas, hidrológicas, geológicas y de mecánica de



suelos del área de interés (SAGARPA, 2009). Entre dichos estudios destaca el hidrológico, de acuerdo con Figueras (2008), este es de suma importancia, no sólo para planificar obras de captación y conservación del agua, sino también para conocer el potencial y posibles problemas dentro de las cuencas; además, menciona que la bibliografía sobre diseño de pequeñas presas es escasa y en la mayoría no se presenta el estudio hidrológico.

Además, hay que considerar que dichas técnicas no siempre aseguran el suministro completo de agua en la zona, a pesar de que cuenten con un diseño adecuado, ya que existe la posibilidad de que el volumen de lluvia en cierto año sea menor al que se había estimado (FAO, 2013). Principalmente con el cambio climático, cuyos efectos se expresan en una mayor frecuencia de sequías, inundaciones y temperaturas extremas, la sequía tiene consecuencias directas sobre la disponibilidad de agua, lo cual afecta la planificación agrícola y por consiguiente la disponibilidad de alimentos (Escobar, 2013).

Además, la sequía limita el desarrollo de los pastos nativos en el agostadero, lo cual repercute en el nivel nutricional del ganado, que afecta su rendimiento y reproducción. Ante esta situación, es necesario establecer estrategias que permitan asegurar la alimentación o suplementación animal en épocas críticas del año. Una alternativa para la producción de forraje en estas regiones es el riego por goteo de cultivos forrajeros con agua de lluvia. Sin embargo, es necesario determinar si esta es apta para la irrigación; para lo cual se requiere conocer su calidad química y sus efectos a mediano y largo plazo sobre las propiedades químicas y físicas del suelo. Al respecto, numerosos estudios han analizado la calidad química del agua de lluvia en países industrializados, pero existe poca información disponible en las áreas rurales (Klaus-Dieter, 2008), en las cuales, es posible establecer cultivos forrajeros bajo riego, que se adapten a suelos de baja fertilidad, tolerantes a la salinidad, sequía y que produzcan un rendimiento adecuado de biomasa que pueda ser aprovechada en la alimentación del ganado.

Con base en lo anterior, se consideró importante realizar un estudio hidrológico de 17 bordos de almacenamiento de agua de lluvia distribuidos en tres microrregiones de San Luis Potosí; así como determinar las características químicas del agua de lluvia captada en estos reservorios y con base a índices determinar su potencial en la producción de

forraje; lo anterior, con la finalidad de utilizar el agua de lluvia en la producción de forraje mediante las técnicas de riego por goteo y fertirrigación.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general:**

Determinar el funcionamiento de bordos de almacenamiento con base en el estudio hidrológico y evaluar la aptitud del agua para la producción de forraje.

### **2.2. Objetivos particulares:**

1. Realizar el estudio hidrológico de 17 bordos de almacenamiento de agua construidos en zonas áridas y semiáridas de San Luis Potosí y evaluar su funcionamiento.
2. Determinar la composición química y la aptitud del agua de lluvia captada en bordos de almacenamiento para la irrigación de cultivos en tres microrregiones de San Luis Potosí.
3. Evaluar el rendimiento y la calidad de forraje de maíz, triticale y pasto sudán, como alternativa de aprovechamiento del agua captada en bordos de almacenamiento.

## **3. Hipótesis**

Para fines del trabajo de investigación, se plantearon las siguientes hipótesis:

- Los bordos de almacenamiento de agua cuentan con un diseño adecuado, que asegura la captura y conservación de agua durante todo el año.
- El agua de bordos de almacenamiento es de buena calidad para su uso en el riego agrícola.
- El agua de los bordos de almacenamiento es apta para la fertirrigación de cultivos forrajeros.

## **4. Literatura citada**

Akhtar, M., Hassan, F. U., Ahmed, M., Hayat, R., Stöckle, C. O. 2016. Is rainwater harvesting an option for designing sustainable cropping patterns for rainfed agriculture? *Land degradation & development* 27: 630-640.

Akroush, S., Shideed, K. & Bruggeman, A. 2014. Economic analysis and environmental impacts of water harvesting techniques in the low rainfall areas of Jordan.

- International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology 10 (01): 34-49.
- Ali, A., Yazar, A., Abdul Aal, A., Oweis, T. & Hayek, P. 2010. Micro-catchment water harvesting potential of an arid environment. *Agricultural Water Management* 98 (01): 96-104.
- Breña, P. A. F. y Breña, N. J. A. 2007. Disponibilidad de agua en el futuro de México. *Ciencia* 64-71. Recuperado de: <http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/ediciones-anteriores/123disponibilidad-de-agua-en-el-futuro-demexico.pdf>. Fecha de consulta: 18 de junio de 2018.
- CONAGUA. 2007. Estadísticas del agua en México. CONAGUA- SEMARNAT. México.
- CONAGUA. 2011. Atlas del agua en México 2011. México. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias /SGP-1811.pdf>. Fecha de consulta: 03 de diciembre de 2015.
- CONAGUA. 2016. Atlas del agua en México 2016. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: [http://201.116.60.25/publicaciones/AAM\\_2016.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf). Fecha de consulta: 22 de enero de 2018.
- Escobar, R. M. D. 2013. El caso de la agricultura en México tras los impactos del cambio climático. El papel de la cooperación internacional como solución (2006-2012). Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 73 p.
- FAO. 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia, opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Santiago, Chile. 272 p.
- Figueras, C. M. A. 2008. Diseño de presas pequeñas. Tesis de postgrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 223 p.
- Helmreich, B. & Horn, H. 2009. Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination* 248: 118-124.

- Hinrichsen, D. & Tacio, H. 2002. The coming freshwater crisis is already here. In: Finding the source: the Linkages between population and water. Woodrow Wilson Center. Washington, DC. pp 1-24.
- Kahinda, J. M., Rockstrom, J., Taigbenu, A. E. & Dimes, J. 2007. Rainwater harvesting to enhance water productivity of rainfed agriculture in the semi-arid Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth* 32: 1068-1073.
- Klaus-Dieter, B. 2008. Case Study "Rainwater Harvesting". In *Agricultural Technologies for Developing Countries*. European Parliament. Science Technology Options Assessment (STOA).
- Machiwal, D., Jha, M. K., Singh, P. K., Mahnot, S. C. & Gupta, A. 2004. Planning and design of cost-effective water harvesting structures for efficient utilization of scarce water resources in semi-arid regions of Rajasthan, India. *Water Resources Management* 18 (03): 219-235.
- Oweis, T. & Hachum, A. 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa.
- Phillips, V. D., Tschida, R., Hernández, M. y Hernández, M. F. 2011. Captación de agua de lluvia como alternativa para afrontar la escasez del recurso. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Quessar, A., Sghaier, M., Mahdhi, N., Abdelli, F., De Graaff, J., Chaieb, H., Yahyaou, H. & Gabriels, D. 2004. An integrated approach for impact assessment of water harvesting techniques in dry areas: the case of Oued Oum Zessar watershed (Tunisia). *Environmental Monitoring and Assessment* 99 (1-3): 127-140.
- Rockström, J. & Falkenmark, M. 2015. Agriculture: increase water harvesting in Africa. *Nature* 519 (7543): 283-285.
- Rosegrant, M., Cai, X., Cline, S. & Nakagawa, N. 2002. The role of rainfed agriculture in the future of global food production. *Environment and production technology*.
- SAGARPA. 2009. Ollas de agua, jagüeyes, cajas de agua o aljibes. Ficha técnica. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. 10 p.

# CAPÍTULO 1. HIDROLOGIA DE MICROCUENCAS EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ

## RESUMEN

La captación de agua de lluvia es una alternativa viable para disponer del recurso en las zonas áridas y semiáridas, donde la escasez de agua tiende a agravarse cada vez más, debido al calentamiento global. Sin embargo, las obras de captación como los bordos de almacenamiento, deben estar sustentados con estudios de ingeniería que permitan garantizar que las obras cumplan con su propósito, entre estos se encuentra el hidrológico, que determina en gran medida el éxito de las obras hidráulicas. Por tal razón, en el presente estudio se planteó el objetivo de realizar un estudio hidrológico por bordo (17 bordos) en San Luis Potosí, así como evaluar su funcionamiento. Se determinaron las características de la cuenca (área, perímetro, longitud, factor de forma), de relieve (elevación media, elevación mediana y pendiente), red de drenaje (longitud y pendiente del cauce principal y orden de corrientes) y del escurrimiento (precipitación media anual de la cuenca, tiempo de concentración, intensidad de la lluvia y caudal) para finalmente estimar el volumen de escurrimiento aprovechable. Se realizó un análisis de correlación de Pearson para identificar las variables que determinan el caudal en una cuenca. Mediante imágenes de satélite se pretendió estimar las dimensiones de los bordos y su volumen. Se visitaron los bordos para evaluar su estado actual. La mayoría de los bordos de almacenamiento se localizan en cuencas muy pequeñas, cuyas características favorecen el escurrimiento superficial. El área de la cuenca, longitud del cauce principal, orden de corrientes y tiempo de concentración fueron las variables de mayor correlación con el caudal. A partir del estudio hidrológico se identificaron restricciones (hidrológicas) en 41% de los bordos, lo que es de suma importancia pues representa una pérdida económica. Únicamente 58.8% de los bordos habían acumulado agua y en el 70.6% se observaron fallas (filtración de agua, agrietamiento, azolvamiento y desprendimiento de vertedor), que si bien no son catastróficas, si limitan su funcionamiento. Por lo que se requiere implementar las medidas correctivas y dar mantenimiento a las obras.

**Palabras clave:** estudio hidrológico, captación de agua, bordos de almacenamiento, fallas de diseño.

## ABSTRACT

Rainwater harvesting is a viable alternative to dispose of the resource in arid and semi-arid areas, where water scarcity tends to aggravate more and more due to global warming. However, water collection works such as earth dams must be supported by engineering studies to ensure that the dams meet their purpose, among which is the hydrological, which determines to a large extent the success of hydraulic works. For this reason, in the present study the objective of carrying out a hydrological study on earth dams (17 earth dams) in San Luis Potosi was proposed, as well as to evaluate its operation. The characteristics of the watershed (area, perimeter, length, shape factor), relief (average height, median height and slope), drainage network (length and slope of the main collector and order of currents) and drainage (average annual rainfall of the watershed, concentration time, rainfall intensity and flow) to finally estimate the usable runoff volume. A Pearson correlation analysis was performed to identify the variables that determine the flow in a watershed. Satellite images were used to estimate the dimensions of the earth dams and their volume. The earth dams were visited to evaluate their current state. Most of the earth dams are located in very small watersheds, whose characteristics favor superficial runoff. Watershed area, main collector length, order of currents and concentration time were the variables with the highest correlation with the flow. From the hydrological study restrictions (hydrologic) were identified in 41% of the earth dams, which is very important because it represents an economic loss. Only 58.8% of the earth dams had accumulated water and in 70.6% were observed failures were observed (water filtration, cracking, silting and spillway detachment), which although they are not catastrophic, limit their operation. Therefore, it is necessary to implement corrective measures and maintain the works.

**Key words:** hydrological study, rainwater harvesting, earth dams, design failures.

## 1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente y desde el punto de vista del calentamiento global, la escasez de agua tiende a agravarse en las regiones donde ya existe déficit del recurso, ya sea por reducción en los niveles de precipitación o bien, por el aumento de la evaporación y transpiración (FAO, 2013). En estas zonas, la precipitación anual es igual o menor a 600 mm, la cual se distribuye de manera irregular y en eventos torrenciales (Tarango, 2005), por lo que se aprovecha una mínima cantidad de lluvia y el resto se pierde como escurrimiento superficial (SAGARPA, 2005). Se estima que tan sólo el 0.1% del agua del planeta se encuentra en los sistemas de agua superficial, la mayor cantidad (96.5%) se localiza en los océanos, seguido por los hielos polares y los manantiales subterráneos (1.7% cada uno). En la superficie terrestre, el 61% de la precipitación anual se evapora, y el 39% restante, escurre hacia los océanos como agua superficial (Figueras, 2008). Si el agua disponible no se aprovecha al instante o se almacena, esta fluye fuera de la zona de interés y pasa a otras fases del ciclo hidrológico, como son: escorrentía, atmósfera, cauces de ríos y arroyos (FAO, 2013).

El escurrimiento se define como la precipitación pluvial que ocurre en una cuenca hidrológica, que circula sobre o debajo de la superficie terrestre y llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca (Breña y Jacobo, 2006). Conforme el volumen de agua de escurrimiento aumenta, el caudal se mueve más rápido, de modo que puede llegar a romper el suelo y abrir pequeños surcos, los cuales se suman a otros con la posibilidad de transportar grandes cantidades de suelo, que posteriormente forman las cárcavas (FAO, 2013). De ahí la importancia del manejo de escurrimientos, cuyos objetivos son: consumo humano y animal; uso doméstico; moderar la velocidad de flujo del agua y favorecer la infiltración; contrarrestar la erosión hídrica del suelo; además, puede usarse para la irrigación de cultivos (SAGARPA, 2005; FAO, 2013).

Actualmente existen varios tipos de obras para la captación de agua proveniente de escurrimientos; entre ellas, los bordos de almacenamiento, que son pequeñas presas con una cortina de tierra compactada que almacena agua proveniente de escurrimientos superficiales, cuya función principal es proveer de agua al ganado y en algunos casos para el consumo doméstico (SAGARPA, 2012). El diseño de este tipo de obras debe

estar sustentado con estudios de ingeniería que contemplen las condiciones topográficas, hidrológicas, geológicas y de mecánica de suelos del sitio, además se debe considerar: estabilidad de la obra, fuentes de recolección de agua (microcuencas) y el control de los niveles máximos de agua por medio de un vertedor (SAGARPA, 2009). Dentro de las condiciones hidrológicas se requiere de una cuenca grande y precipitación suficiente que garantice el escurrimiento necesario para el abastecimiento del vaso (SAGARPA, 2012). De acuerdo con SAGARPA (2009), los bordos de almacenamiento se construyen en sitios donde la recarga de agua de lluvia es superior a los 400 mm anuales; además, en zonas secas existe el riesgo de alta evaporación y salinización. De ahí la importancia de realizar el estudio hidrológico, el cual permite planificar obras de conservación del recurso hídrico, así como conocer el potencial y posibles problemas dentro de una determinada cuenca (Figueras, 2008).

En el caso de los bordos de almacenamiento, pese a que sus dimensiones son pequeñas, han resultado ser altamente susceptibles a daños y fallas, debido al poco rigor técnico aplicado en su diseño y construcción (Avilés *et al.*, 2007). Cuando una obra de almacenamiento es establecida en un sitio inadecuado, es mal manejada o no recibe un mantenimiento adecuado, se producen pérdidas del agua cosechada, principalmente por evaporación, infiltración, escapes por perforaciones del material y ciertos aspectos de diseño (FAO, 2013). Además, pueden presentarse fallas por rebase de cortina, sifonamiento mecánico, agrietamiento transversal, deslizamiento de taludes abajo, temblores, licuación y pérdidas por filtración como consecuencia de un mal diseño (Armas, 2003). Es por esto, que el objetivo del presente trabajo fue realizar el estudio hidrológico y evaluar el funcionamiento de 17 bordos de almacenamiento de agua, distribuidos en cinco municipios de San Luis Potosí.

## **1.2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **1.2.1. Área de estudio**

Se evaluaron 17 bordos de almacenamiento de agua que fueron financiados por la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA) en 2013 y por el Componente de Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA) en 2016, en cinco municipios de San Luis Potosí (Figura 1.1).



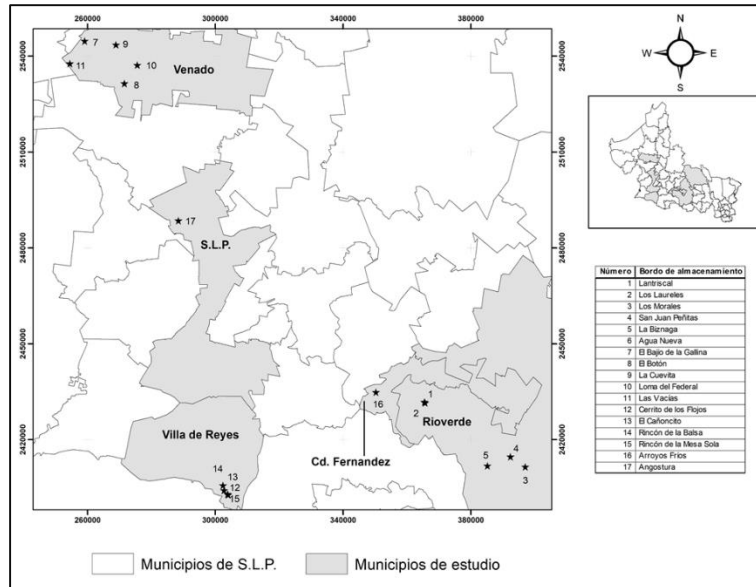


Figura 1.1. Ubicación de los bordos de almacenamiento objeto de estudio.

Para ubicar geográficamente y comprobar de manera visual el estado actual de cada una de las obras de almacenamiento, durante los meses de junio a noviembre del 2016, se realizaron recorridos de campo en compañía del representante del ejido. Todos los sitios de estudio tienen un clima semiseco (INEGI, 2008), con vegetación predominante de pastizal y matorral xerófilo (INEGI, 2011), la precipitación oscila entre 300 y 800 mm anuales (INEGI, 2006).

### 1.2.2. Características de la cuenca

Para determinar las características morfológicas de las microcuencas, se utilizó el simulador de flujos de agua en cuencas del SIATL, INEGI para obtener las cuencas definidas para cada bordo, las cuales fueron guardadas como imágenes (formato jpg). Con dichas imágenes y los archivos DXF (archivos para dibujos de diseño asistido por computadora) en AutoCAD 2007, se delimitaron las cuencas (Anexo 1) y se obtuvieron los parámetros: área, perímetro y longitud de cada una. Se calculó el factor de forma, que evalúa la elongación de una cuenca de drenaje, mediante la ecuación de Magette (1976). Se construyó la curva hipsométrica; a partir de la cual se obtuvieron las elevaciones media y mediana. Posteriormente se estimó la pendiente de la cuenca por el criterio de J. W. Alvord.

En cuanto a las características de la red de drenaje, se identificó el orden de corrientes, que se refiere al grado de ramificaciones de la red de drenaje; se elaboró el perfil topográfico del colector principal (CP) y se obtuvo la pendiente del CP por el método de Taylor y Schwarz (1952).

### 1.2.3. Precipitación y escurrimiento

Para calcular la precipitación media en cada una de las cuencas ( $P_m$ ) se utilizó el método de polígonos de Thiessen. La información de precipitación se extrajo del software Eric III versión 2.0 (IMTA, 2009); para cada estación (Cuadro 1.1) se completaron los datos faltantes de precipitación mensual por el método racional deductivo y se realizaron pruebas de homogeneidad de los datos anuales por el método de las secuencias. Además, se extrajeron los datos (volumen de lluvia) del día que más llovió por año, para cada caso.

La lluvia está definida por tres variables: magnitud, duración y frecuencia. Por lo que se calcularon las curvas de Precipitación-Duración-Periodo de retorno, utilizando la fórmula de Bell (1969). Para completar el análisis de las tormentas, se construyeron curvas de Intensidad-Duración-Periodo de retorno. Posteriormente, a partir de la ecuación de Kirpich (1940) se determinó el tiempo de concentración (TC), el cual se refiere al tiempo que tarda una gota en llegar desde el punto más alejado de la cuenca a la boquilla y representa el momento a partir del cual, el caudal de escorrentía es constante. En las gráficas de Intensidad-Duración-Periodo de retorno, se ubicó el TC para un periodo de retorno de 50 años (vida útil de bordos), la intensidad correspondiente se sustituyó en la fórmula del caudal, el cual se estimó por el método racional.

Posteriormente, en cada cuenca se calculó el volumen escurrido, a través de la siguiente ecuación:

$$V_e = C_e * P_m * A_c$$

Donde:

$V_e$ : Volumen escurrido ( $m^3$ )

$C_e$ : Coeficiente de escurrimiento

$P_m$ : Precipitación media de la cuenca (m)

A<sub>c</sub>: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Cuadro 1.1. Estaciones meteorológicas empleadas en el estudio.

Clave	Estación	Coordenadas UTM	
		x	y
24019	El Estribo, Salinas	238691	2554855
24038	Los Pilares, SLP	285539	2484011
24047	Ojo de Agua, Alaquines	386018	2416392
24096	Venado, Venado	285810	2535947
24097	Vigas, Rioverde	410099	2411197
24101	Villa de Reyes	300245	2411640
24150	Guanamé, Venado	270552	2528968
24152	Sauz de Calera	252541	2578910
24160	Coyotillos, Charcas	275139	2576237
24170	El Charco, Rioverde	363861	2435412
24172	Manantial de Media Luna	394920	2416629
24176	San Juan del Tuzal	261289	2560443
24177	Santa Catarina	350412	2439027
24180	Cañada Verde, Charcas	277711	2554738
24189	El Hospital, Charcas	275139	2570649
24196	El Toro, Villa de Ramos	245009	2527397

A partir del volumen de agua escurrido se obtuvo el volumen aprovechable en cada bordo, multiplicando el escurrimiento anual por 0.6, y se compararon respectivamente con la capacidad de almacenamiento proyectada.

#### **1.2.4. Uso de imágenes de satélite para el dimensionamiento de bordos de almacenamiento**

Con la finalidad de comparar las dimensiones de diseño de los bordos estimados en los proyectos con las obras construidas, se localizaron las coordenadas de cada bordo en Google Earth Pro 7.3.2.5491 y se capturó la imagen de cada uno. Asimismo, se creó un shapefile con las coordenadas UTM (Datum WGS84) de todos los bordos de estudio y

de la página de INEGI se descargó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la superficie que abarcó el área de estudio.

En ArcGIS se agregó el MDE y se configuró para representar el relieve del terreno. Posteriormente se agregaron los puntos de los bordos (shapefile) y las imágenes de satélite. Se creó un polígono de cada bordo delimitando su área (capas de bordos e imágenes) y se trazaron dos líneas perpendiculares entre sí, una a lo largo y otra a lo ancho del bordo. Las líneas trazadas se interpolaron de acuerdo al MDE y se obtuvo el perfil topográfico de cada línea. Sin embargo, debido al tamaño de pixel del MDE (30 x 30 m con precisión mínima de 12 m), no fue posible determinar la volumetría de los bordos, pues la altura de cortina en las obras varía entre 3.86 y 9.3 m.

#### **1.2.5. Evaluación visual de bordos de almacenamiento**

Durante el recorrido de campo para localizar los bordos de almacenamiento, se observó el estado actual de la construcción y sus complementos, con la finalidad de evaluar su funcionamiento y posibles fallas. Se consideró la acumulación de agua en el vaso y las fallas más comunes en presas de tierra.

#### **1.2.6. Análisis estadístico**

Se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las características de las cuencas, morfológicas, de relieve, red de drenaje y de escurrimiento superficial, con la finalidad de determinar aquellas variables que determinan el caudal en una cuenca. Dicho análisis de llevó a cabo en el programa estadístico Infostat V. 17/11/2016.

### **1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **1.3.1. Características de la cuenca**

Las variables morfométricas se dividen en dos tipos, aquellas de medición directa, las cuales se calculan directamente sobre el mapa topográfico, como es el caso del área y longitud de la cuenca; y las elaboradas a partir de las primeras como son: la pendiente, elevación de la cuenca y cauce principal (Rivas *et al.*, 2013). En el Cuadro 1.2, se presentan los resultados obtenidos de medición directa en las cuencas y el factor de forma.

Cuadro 1.2. Valores morfométricos calculados de microcuencas para diseño de bordos de almacenamiento de agua en San Luis Potosí.

<b>Bordo de almacenamiento</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Perímetro (km)</b>	<b>Longitud (km)</b>	<b>Factor de forma</b>
Lantriscal	0.62	4.45	1.91	0.17
Los Laureles	3.10	8.95	3.33	0.28
Los Morales	0.62	3.12	0.77	1.05
San Juan Peñitas	0.40	2.44	0.97	0.42
La Biznaga	1.53	5.51	2.10	0.35
Agua Nueva	0.82	4.17	1.38	0.43
El Bajío de la Gallina	3.07	8.03	2.05	0.73
El Botón	51.78	45.00	18.03	0.16
La Cueva	0.24	2.35	0.86	0.33
Loma del Federal	0.85	3.66	1.29	0.51
Las Vacías	1 069.96	176.34	52.71	0.39
Cerrito de los Flojos	1.15	4.05	1.23	0.76
El Cañoncito	1.54	6.04	2.38	0.27
Rincón de la Balsa	3.60	7.81	2.55	0.56
Rincón de la Mesa Sola	0.49	2.73	0.82	0.74
Arroyos Fríos	0.72	3.60	1.22	0.48
Angostura	1.22	5.54	1.83	0.36
Mínimo	0.24	2.35	0.77	0.16
Máximo	1 069.96	176.34	52.71	1.05

Para el 88.2% de los bordos de almacenamiento, las cuencas se consideraron muy pequeñas (< 25 km<sup>2</sup>), mientras que, los bordos El Botón y Las Vacías, se ubicaron como cuenca pequeña (25 a 250 km<sup>2</sup>) y cuenca intermedia grande (500 a 2 500 km<sup>2</sup>), respectivamente. Los valores superiores de área, longitud y perímetro correspondieron a la cuenca del bordo Las Vacías; mientras que, el área y perímetro menores los tuvo la cuenca del bordo La Cueva y la menor longitud se encontró en la cuenca del bordo El

Botón. Estos parámetros indican la forma de la cuenca, sin embargo, una mayor aproximación se obtiene mediante el factor de forma.

De acuerdo con Villón (2002), un factor de forma menor a la unidad corresponde a cuencas alargadas, y valores superiores a la unidad resultan de cuencas redondeadas; en el presente estudio, las cuencas tienen forma alargada a excepción del bordo Los Morales, en el cual el factor de forma fue de 1.05. En cuencas alargadas, el tiempo de concentración del agua es más largo, lo cual contribuye a que los picos de crecidas sean menos bruscos en caso de tormentas, situación contraria se presenta en las cuencas redondeadas (Fuentes, 2004), por lo tanto, en las cuencas analizadas el volumen de agua escurrido es más uniforme a través del tiempo.

De acuerdo a los parámetros de relieve (Cuadro 1.3), en el 88.2% de las cuencas, la elevación media fue mayor a la elevación mediana, lo cual indica que el área de la cuenca con altitud superior a la media es menor que la superficie con elevaciones superiores al valor medio (Guerra y González, 2002). Únicamente en dos bordos se obtuvieron valores de elevación mediana igual y mayor a la media (Loma del Federal y Angostura, respectivamente).

La pendiente media de la cuenca está relacionada de manera importante con la infiltración del suelo y la contribución del agua subterránea a la escorrentía (Anaya, 2012). De acuerdo a la clasificación de Pérez (1979), el 5.9% de las microcuencas presentaron un relieve plano (0 a 2%); 11.8% suave (2 a 5%); 11.8% accidentado medio (5 a 10%); 5.9% accidentado (10 a 25%); 17.6% fuertemente accidentado (25 a 50%) y 47.0% de tipo escarpado (>50%). A mayor pendiente se presenta menor duración de la concentración del agua de escurrimiento en la red de drenaje y afluentes al curso principal (Romero *et al.*, 2015). En las cuencas con pendientes pronunciadas, se generan crecientes en tiempos relativamente cortos y son llamadas cuencas torrenciales (Vásquez, 2018). Mientras que, en pendientes planas y suaves (15% de las cuencas de estudio) se beneficia la infiltración (FAO, 2013).

Cuadro 1.3. Parámetros de relieve calculados en microcuencas para diseño de bordos de almacenamiento de agua en San Luis Potosí.

<b>Bordo de almacenamiento</b>	<b>Elevación media (m)</b>	<b>Elevación mediana (m)</b>	<b>Pendiente (%)</b>	<b>Relieve</b>
Lantriscal	1 372.4	1 266.5	28.0%	E
Los Laureles	1 616.9	1 425.6	37.3%	E
Los Morales	1 164.1	1 139.8	33.1%	E
San Juan Peñitas	1 160.0	1 146.4	41.6%	E
La Biznaga	1 382.4	1 320.0	42.5%	E
Agua Nueva	1 120.0	1 079.5	15.6%	FA
El Bajío de la Gallina	2 175.6	2 146.6	2.9%	S
El Botón	2 178.5	2 046.0	2.8%	S
La Cueva	2 320.0	2 287.4	27.5%	E
Loma del Federal	2 012.8	2 012.8	5.6%	AM
Las Vacías	2 355.8	2 189.4	1.2%	P
Cerrito de los Flojos	1 993.8	1 979.3	16.0%	FA
El Cañoncito	1 964.3	1 961.4	10.4%	A
Rincón de la Balsa	1 948.2	1 931.8	9.8%	AM
Rincón de la Mesa Sola	1 991.3	1 984.3	18.5%	FA
Arroyos Fríos	1 385.7	1 344.3	30.8%	E
Angostura	1 813.5	1 814.5	34.5%	E

P) plano; S) suave; AM) accidentado medio; A) accidentado; FA) fuertemente accidentado; E) escarpado.

Respecto a la curva hipsométrica, esta describe la distribución del área acumulada de una cuenca de acuerdo a la altitud; su forma indica la edad (juventud, madurez o vejez) en la que se encuentra la cuenca (Ibáñez *et al.*, 2011). En la Figura 1.2, se muestran las curvas correspondientes a cuencas jóvenes (bordos Laureles y Angostura), las cuales se caracterizaron por tener mayor superficie con las altitudes más altas de la cuenca, por lo tanto, poseen un gran potencial erosivo. Situación contraria, ocurre en las cuencas sedimentarias o en fase de vejez (Figura 1.3), en el 64.7% de los casos en este estudio,

la mayor área correspondió a las altitudes más bajas de la cuenca. Finalmente, el 23.5% de las cuencas correspondieron a cuencas en equilibrio o maduras (Figura 1.4). De acuerdo con Scheidegger (1987) durante la historia de una cuenca, existe una tendencia a equilibrar los mecanismos de construcción tectónica y degradación por erosión, cuando la cuenca muestra un comportamiento permanente, ambos procesos antagónicos se encuentran en equilibrio, por lo que la forma de la curva hipsométrica la atribuye a la actividad en la cuenca. Las curvas de la Figura 1.2 indican alta actividad en la cuenca, mientras que las curvas de la Figura 1.3 y 1.4 corresponden a actividad baja y media, respectivamente.

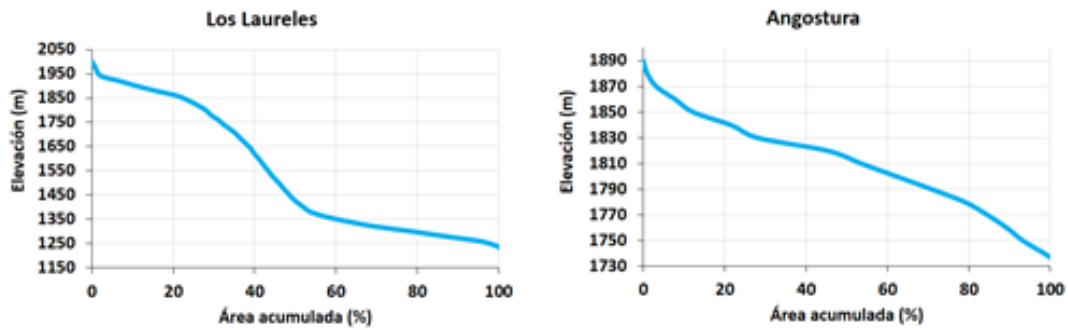


Figura 1.2. Curva hipsométrica de cuencas de meseta o geológicamente jóvenes.

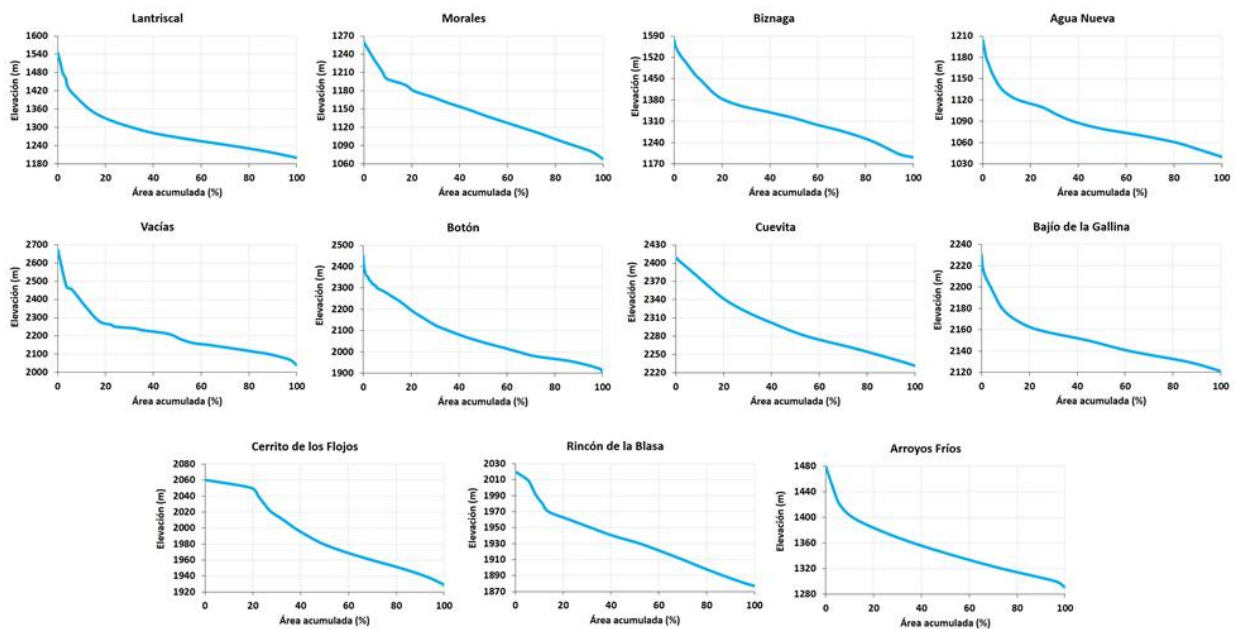


Figura 1.3. Curva hipsométrica de cuencas sedimentarias o en fase de vejez.



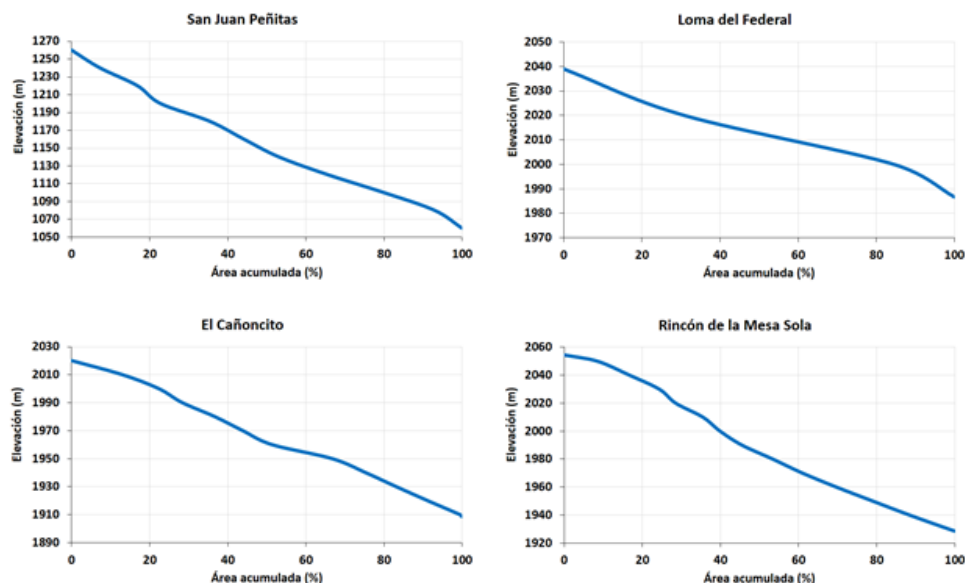


Figura 1.4. Curva hipsométrica de cuencas en equilibrio o maduras.

Los parámetros relacionados a la red de drenaje se muestran en el Cuadro 1.4. La longitud de cauce principal (CP) varió entre 0.55 a 67.27 km (Arroyos Fríos y Las Vacías, respectivamente); la pendiente del CP osciló entre 0.4 (Las Vacías) y 11.8% (Los Laureles). En el orden de corrientes se obtuvo menor variación ya que se presentaron corrientes de 1 a 5 órdenes. La longitud de los cauces principales fue muy corta (<1.69 km) en 47.0% de las microcuencas y corto (1.69 a 4.17 km) en 41.2% de los casos, por lo que los tiempos y duración de las subidas serán breves, a diferencia del 11.8% restante, ya que la longitud del CP está directamente relacionada con el tiempo de desplazamiento de las crecidas y su amortiguación (IBAL, 2009).

El grado de respuesta de una cuenca a una tormenta, está definido en gran medida por la pendiente del cauce principal (Figueras, 2008). Este parámetro indica el riesgo de arrastre y erosión en la cuenca; una pendiente del CP de 1 a 5% se clasifica como suave, de 6 a 11% es moderada y de 12 a 17% fuerte (IBAL, 2009). En este sentido, en el 52.9% de los casos la pendiente del CP fue suave, 35.3% moderada y el 11.8% pendiente fuerte.

Respecto al orden de corrientes, existen tres clases de orden, con un intervalo de 1 – 2 es bajo, de 2.1 – 4 es medio y alto de 4.1 – 5 (Fuentes, 2004). En este sentido, el 76.5%

de las cuencas presentó un orden bajo, el 17.7% medio y alto en 5.8%. Entre mayor sea el número de orden, mayor será la red y su estructura será más definida (Romero *et al.*, 2015).

Cuadro 1.4. Parámetros calculados de la red de drenaje en microcuencas de San Luis Potosí.

Bordo de almacenamiento	Cauce principal		Orden de corrientes
	Longitud (km)	Pendiente (%)	
Lantriscal	1.80	9.4	2
Los Laureles	3.75	11.8	3
Los Morales	0.77	6.5	2
San Juan Peñitas	0.84	11.3	2
La Biznaga	2.37	6.8	2
Agua Nueva	1.35	3.6	2
El Bajío de la Gallina	2.05	1.5	1
El Botón	22.05	1.7	4
La Cuevita	0.98	9.7	1
Loma del Federal	0.89	3.3	2
Las Vacías	67.27	0.4	5
Cerrito de los Flojos	0.92	5.7	2
El Cañoncito	2.33	3.2	1
Rincón de la Balsa	2.41	2.1	1
Rincón de la Mesa Sola	0.77	6.7	1
Arroyos Fríos	0.55	7.3	1
Angostura	2.04	3.3	3
Mínimo	0.55	0.4	1
Máximo	67.27	11.8	5

### 1.3.2. Análisis de precipitación y cálculo del escurrimiento

En el diseño de pequeñas obras hidráulicas, además de tener una cuenca lo suficientemente grande, se requiere tener una precipitación que garantice el

escurrimiento necesario para que se llene el vaso de la obra (SAGARPA, 2012). En el Cuadro 1.5, se presentan los resultados de precipitación media de la cuenca ( $P_{mc}$ ), tiempo de concentración (TC), Intensidad de la lluvia para el TC (I), caudal (Q) y el volumen de agua escurrido ( $V_e$ ) para cada bordo de almacenamiento.

Cuadro 1.5. Parámetros del escurrimiento superficial en microcuencas para diseño de bordos de almacenamiento de agua en San Luis Potosí.

<b>Bordo de almacenamiento</b>	<b><math>P_{mc}</math> (mm)</b>	<b>TC (min)</b>	<b>I (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>
Lantriscal	776	15.6	181.7	7.8
Los Laureles	776	25.1	141.7	30.5
Los Morales	547	9.3	200.0	8.6
San Juan Peñitas	547	8.1	210.9	5.9
La Biznaga	1 126	21.8	180.0	19.2
Agua Nueva	525	18.1	145.0	8.3
El Bajío de la Gallina	329	34.6	73.5	15.7
El Botón	431	207.1	34.3	125.8
La Cueva	503	9.6	262.4	4.4
Loma del Federal	444	13.5	125.0	7.4
Las Vacías	341	844.9	18.9	1 404.6
Cerrito de los Flojos	332	11.3	132.5	10.6
El Cañoncito	332	28.8	80.5	8.6
Rincón de la Balsa	332	34.5	72.9	18.3
Rincón de la Mesa Sola	332	9.2	145.0	5.0
Arroyos Fríos	561	6.9	181.0	9.1
Angostura	383	25.7	91.0	7.7
Mínimo	329	6.9	18.9	4.4
Máximo	1 126	844.9	262.4	1 404.6

$P_{mc}$ ) precipitación media de la cuenca; TC) tiempo de concentración; I) intensidad de la lluvia para el TC; Q) caudal

La precipitación media anual inferior (329 mm) correspondió a la cuenca del bordo El Bajío de la Gallina, mientras que la mayor precipitación (1 126 mm) se obtuvo en el bordo La Biznaga. La  $P_{mc}$  se obtuvo de una sola estación meteorológica para cada caso, a excepción de El Botón (2) y Las Vacías (6), esto debido a la ubicación y tamaño de las cuencas.

El tiempo de concentración varió entre 6.9 y 844.9 minutos (bordos Arroyos Fríos y Las Vacías, respectivamente). De acuerdo con Romero *et al.* (2015), el TC es definido como el tiempo mínimo requerido para que todos los puntos hidrológicos de la cuenca aporten agua de escurrimiento al punto de salida y corresponde al tiempo que tarda una gota de lluvia que cae en el punto más alejado de la cuenca en llegar a la sección de salida (Lux, 2016). En este sentido, los valores más altos de TC se obtuvieron en las cuencas de los bordos Las Vacías y El Botón, ambas fueron las que tuvieron una mayor área (1 069.96 y 51.78 km<sup>2</sup>, respectivamente), longitud del cauce principal (67.27 y 22.05 km) y orden de corrientes (5 y 4), así como pendientes ligeras (1.2 y 2.8%), de acuerdo con Fuentes (2004) corresponden a cuencas bien drenadas. Mientras que, los valores de TC más bajos se encontraron en las cuencas de superficie pequeña (<1 km<sup>2</sup>) y pendientes mayores de 25%, es decir, relieve escarpado.

Los datos de intensidad de la lluvia se obtuvieron de las curvas I-D-Tr de cada cuenca, cuya duración correspondió al tiempo de concentración calculado y un periodo de retorno de 50 años (recomendado para pequeñas obras hidráulicas). Suponiendo una lluvia de intensidad constante, el TC es el tiempo de equilibrio necesario para que se alcance el caudal máximo (Bentancor *et al.*, 2014), por lo que, a medida que el tiempo de concentración incrementa, la intensidad de lluvia disminuye. Lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el presente estudio (Cuadro 1.5), debido a que la menor intensidad correspondió a las cuencas de los bordos Las Vacías (TC = 844.9 min; I = 18.9 mm h<sup>-1</sup>) y El Botón (TC = 207.1 min; I = 34.3 mm h<sup>-1</sup>); mientras que, las mayores intensidades (de 145.0 a 262.4 mm h<sup>-1</sup>) se presentaron en las cuencas con TC menor a 10 minutos (Los Morales, San Juan Peñitas, La Cueva, Rincón de la Mesa Sola y Arroyos Fríos).

EL Servicio Meteorológico Nacional clasifica a la intensidad de lluvia de acuerdo a un criterio de acumulación (mm) en una hora, la intensidad es ligera cuando su valor es inferior a 5 mm h<sup>-1</sup>, moderada de 5.1 a 15 mm, fuerte de 15.1 a 60 mm y torrencial con valor superior a 60 mm. Para el bordo las Vacías, la intensidad de lluvia se categorizó como fuerte y para el resto (94.1%) de las cuencas fue torrencial, característica común de la precipitación en el área de estudio, por lo que, se descargan grandes cantidades de lluvia en tiempos muy cortos (Alfonso-Torreño y Schnabel, 2017).

El caudal o gasto es definido como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo, que recorre la sección transversal de un cauce (Rivera, 2007). Al igual que los parámetros de tiempo de concentración e intensidad de lluvia, los valores mayores de caudal se obtuvieron en las cuencas de mayor área, bordos Las Vacías (1 404.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) y El Botón (125.8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); seguidos por la cuenca del bordo Los Laureles (30.5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), que si bien tuvo una superficie pequeña, la pendiente del cauce principal fue la mayor (11.8%) en el estudio. Lo anterior coincide con González (2004) quien menciona que la rapidez de la concentración del escurrimiento se ve favorecida por las pendientes, sobre todo en cuencas pequeñas. El caudal al ser resultado de mediciones previas de otras variables, depende de varias características de la cuenca, cuyas correlaciones se muestran en el Cuadro 1.6.

Al correlacionar los parámetros de forma, se encontró que el área de la cuenca (AC) influye positivamente (> 0.9) sobre el perímetro (PeC) y longitud de la cuenca (LC), así como en la longitud del cauce principal (LCP). El PeC tuvo un valor de correlación igual a 1.00 con la LC y LCP, y 0.76 con el orden de corriente (OC). A medida que la longitud de la cuenca aumenta, la longitud del cauce principal y el orden de corrientes se incrementan. Comportamiento inverso (-0.68) se obtuvo para la pendiente de la cuenca (PC), la cual es menor cuando las elevaciones media (EM) y mediana (EMe) son mayores. Las pendientes de la cuenca y el cauce principal (PCP) se relacionaron en un 80% y el orden de corrientes con la LCP en 79%.

Cuadro 1.6. Coeficientes de correlación entre los parámetros del estudio hidrológico de cuencas para el diseño de bordos de almacenamiento en San Luis Potosí.

	AC	PeC	LC	FF	EM	EMe	PC	LCP	PCP	OC	P <sub>mc</sub>	TC	I	Q
AC	1.00													
PeC	<b>0.98*</b>	1.00												
LC	<b>0.96*</b>	<b>1.00*</b>	1.00											
FF	-0.11	-0.18	-0.22	1.00										
EM	0.38	0.43	0.44	-0.09	1.00									
EMe	0.30	0.34	0.35	-0.02	<b>0.99*</b>	1.00								
PC	-0.38	-0.44	-0.45	-0.05	<b>-0.68*</b>	<b>-0.68*</b>	1.00							
LCP	<b>0.97*</b>	<b>1.00*</b>	<b>1.00*</b>	-0.22	0.43	0.35	-0.45	1.00						
PCP	-0.39	-0.45	-0.45	-0.11	-0.49	-0.51	<b>0.80*</b>	-0.45	1.00					
OC	0.68	<b>0.76*</b>	<b>0.79*</b>	-0.34	0.17	0.07	-0.15	<b>0.79*</b>	-0.25	1.00				
P <sub>mc</sub>	-0.20	-0.21	-0.21	-0.32	-0.58	-0.63	0.68	-0.20	0.56	0.04	1.00			
TC	<b>0.98*</b>	<b>1.00*</b>	<b>1.00*</b>	-0.18	0.43	0.35	-0.44	<b>1.00*</b>	-0.46	<b>0.75*</b>	-0.22	1.00		
I	-0.47	-0.56	<b>-0.58*</b>	0.13	-0.53	-0.50	<b>0.74*</b>	-0.57	<b>0.83*</b>	-0.49	<b>0.50*</b>	<b>-0.56*</b>	1.00	
Q	<b>1.00*</b>	<b>0.99*</b>	<b>0.97*</b>	-0.12	0.38	0.31	-0.38	<b>0.97*</b>	-0.40	<b>0.70*</b>	-0.20	<b>0.99*</b>	-0.49	1.00

AC) área de la cuenca; PeC) perímetro de la cuenca; LC) longitud de la cuenca; FF) factor de forma; EM) elevación media; EMe) elevación mediana; PC) pendiente de la cuenca; LCP) longitud del cauce principal; PCP) pendiente del cauce principal; OC) orden de corrientes; P<sub>mc</sub>) precipitación media de la cuenca; TC) tiempo de concentración; I) intensidad de lluvia; Q) caudal.

\* Correlaciones sobresalientes.

Para los parámetros de escurrimiento, se obtuvo una relación positiva del 100% entre el tiempo de concentración (TC) y PeC, LC y LCP; así como valores de 0.98 y 0.75 para área de la cuenca y orden de corrientes con relación al TC. Con respecto a la pendiente de la cuenca, se obtuvo un coeficiente de -0.44, el cual indica que a mayor pendiente, el tiempo de concentración será menor; este resultado coincide con Ibáñez *et al.* (2011), quienes señalan que el tiempo de concentración depende del tamaño de la cuenca y su topografía, entre mayor sea la accidentalidad del terreno menor será el TC.

La intensidad de la lluvia (I) tuvo una correlación del 50% con la precipitación media de la cuenca ( $P_{mc}$ ). Sin embargo, su correlación fue mayor con los parámetros de pendiente del cauce principal (83%) y de la cuenca (74%), a medida que estos parámetros se incrementan, la intensidad de lluvia también aumenta. Mientras que, a mayor tiempo de concentración y longitud de la cuenca, la intensidad de lluvia disminuye (-0.56 y -0.58, respectivamente); lo cual concuerda con Bentancor *et al.* (2014).

En lo que respecta al caudal (Q), este tuvo correlación perfecta positiva con el AC (1.00), lo que confirma que el área de la cuenca es el parámetro más importante para conocer el caudal o gasto de escurrimiento (Rivera, 2007). Además, se obtuvieron valores superiores de 0.9 de correlación con el PeC, LC, LCP y TC, así como 0.70 para el orden de corrientes, parámetros que de acuerdo con Aparicio (1992) condicionan la velocidad de respuesta (orden de corrientes, pendientes de la cuenca y del cauce). Por su parte, González (2004), señala que la rapidez en la concentración de las aguas aumenta principalmente por las pendientes, en el presente estudio se reportan valores de correlación de -0.38 (PC) y -0.40 (PCP). Estas variables, contribuyen al cálculo de escurrimiento superficial, el cual permite estimar el volumen de agua por almacenar o retener (Ramírez *et al.*, 2015).

El volumen de escurrimiento describe el potencial de los recursos hídricos de una cuenca hidrológica (Aparicio *et al.*, 2006). Mientras que el volumen aprovechable indica la cantidad de agua que se puede almacenar considerando las pérdidas que normalmente se presentan en los bordos de almacenamiento por filtración, evaporación y salidas de excedentes en el vertedor, las cuales corresponden al 40% del escurrimiento medio anual (Peña y Vidrio, 1989).

En el Cuadro 1.7, se presentan los valores del escurrimiento (volumen escurrido y volumen aprovechable), así como la capacidad de almacenamiento de los bordos. Respecto al volumen escurrido, los valores superiores se obtuvieron en las cuencas de los bordos Las Vacías (35 035 816 m<sup>3</sup>), El Botón (6 692 626 m<sup>3</sup>), El Bajío de la Gallina (606 313 m<sup>3</sup>), Los Laureles (415 807 m<sup>3</sup>) y La Biznaga (334 947 m<sup>3</sup>); mientras que, el menor volumen escurrido correspondió al bordo Arroyos Fríos (11 342 m<sup>3</sup>). Misma tendencia mostró el volumen aprovechable.

Cuadro 1.7. Comparación entre volúmenes de escurrimiento, aprovechables y la capacidad de almacenamiento de bordos de agua en San Luis Potosí.

Bordo de almacenamiento	Volumen (m <sup>3</sup> )		Capacidad de Almacenamiento (m <sup>3</sup> )
	Escurreido	Aprovechable	
Lantriscal	83 075	49 845	48 824
Los Laureles	415 807	249 484	51 174
Los Morales	33 951	20 370	<b>38 613*</b>
San Juan Peñitas	32 052	19 231	<b>41 274*</b>
La Biznaga	334 947	200 968	45 116
Agua Nueva	12 043	7 226	<b>17 745*</b>
El Bajío de la Gallina	606 313	363 788	19 203
El Botón	6 692 626	4 015 576	20 780
La Cueva	13 138	7 883	<b>13 172*</b>
Loma del Federal	43 768	26 261	<b>30 681*</b>
Las Vacías	35 035 816	21 021 490	27 391
Cerrito de los Flojos	40 375	24 225	13 037
El Cañoncito	54 605	32 763	9 698
Rincón de la Balsa	110 074	66 045	17 250
Rincón de la Mesa Sola	17 409	10 446	<b>17 450*</b>
Arroyos Fríos	11 342	6 805	<b>18 965*</b>
Angostura	139 928	83 957	8 958

\* Capacidad de almacenamiento superior al volumen aprovechable de agua.



En este tipo de obras, el volumen total del bordo está supeditado a la disponibilidad del agua en la cuenca (Peña y Vidrio, 1989). En el 41% de los bordos (Los Morales, San Juan Peñitas, Agua Nueva, La Cueva, Loma del Federal, Rincón de la Mesa Sola y Arroyos Fríos) la capacidad de almacenamiento superó el volumen aprovechable, lo que de acuerdo con SAGARPA (2012) indica una restricción hidrológica en el diseño del bordo, pues la obra no podrá alcanzar el nivel máximo de almacenamiento para el cual fue diseñado. En el resto de los bordos es indispensable una obra de excedencias o vertedor eficiente, debido a que la insuficiencia de este componente genera las fallas más comunes a nivel mundial en presas de tierra (SAGARPA, 2012).

#### 1.3.4. Uso de imágenes de satélite para el dimensionamiento de bordos de almacenamiento

En las siguientes figuras, se muestran los perfiles topográficos de los bordos estudiados en diferentes municipios de San Luis Potosí. Un perfil topográfico es la representación gráfica de la intercepción del terreno con un plano vertical cualquiera, en el perfil se registran las alturas o desniveles presentes en una línea predeterminada (INEGI, 2005), lo que permite identificar los tipos de relieve en una superficie determinada. Sin embargo, con la técnica empleada es difícil distinguir los cambios de elevación en el área de los bordos, pues como ya se mencionó, el tamaño de pixel (30 x 30 m) es superior a la altura de cortina, lo que impide definir con precisión las dimensiones de los bordos y por consiguiente la estimación de su volumen.

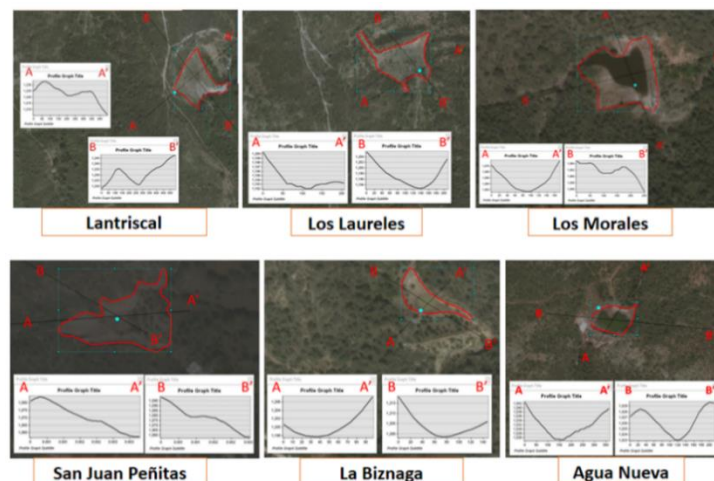


Figura 1.5. Perfiles topográficos de bordos de almacenamiento en Rioverde.

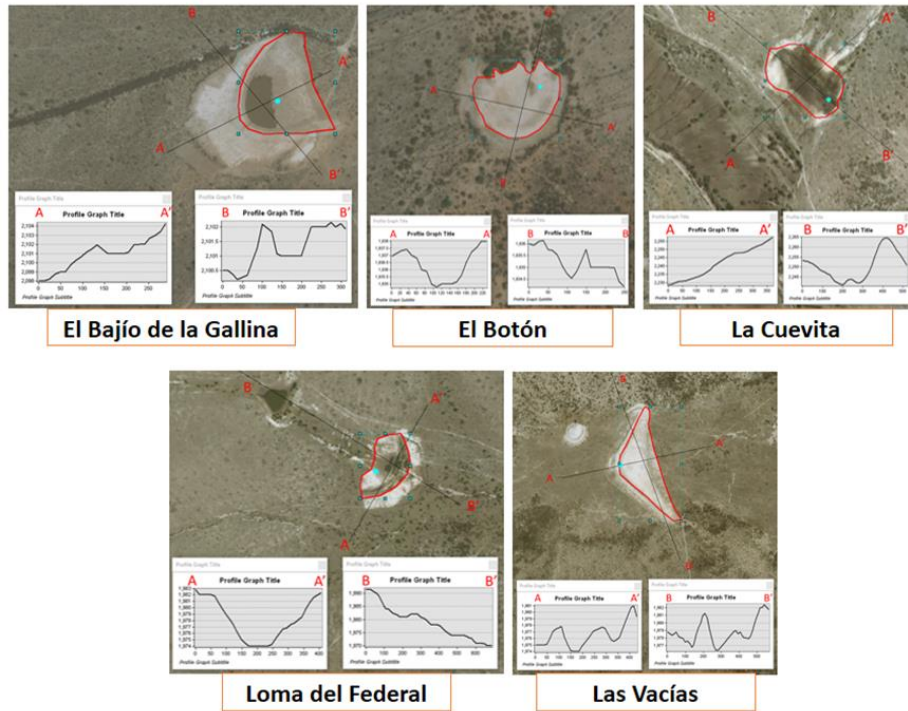


Figura 1.6. Perfiles topográficos de bordos de almacenamiento en Venado.

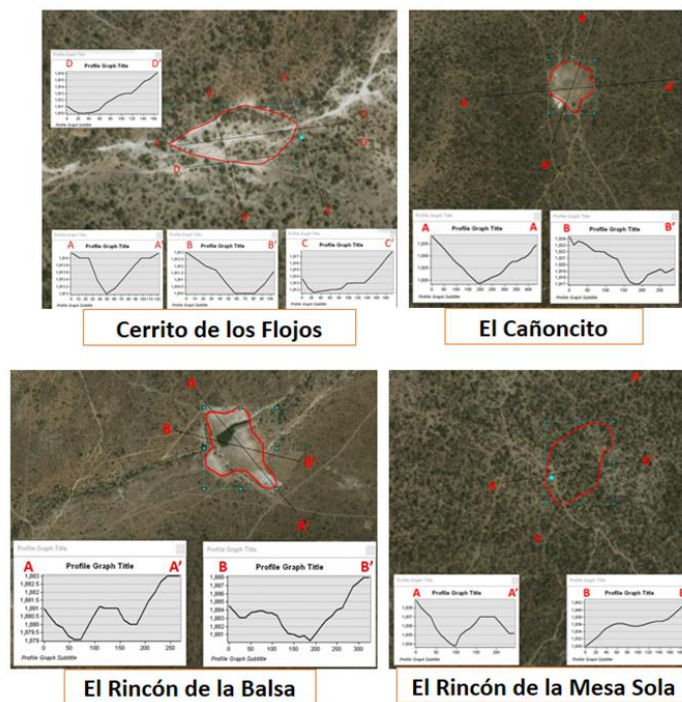


Figura 1.7. Perfiles topográficos de bordos de almacenamiento en Villa de Reyes.

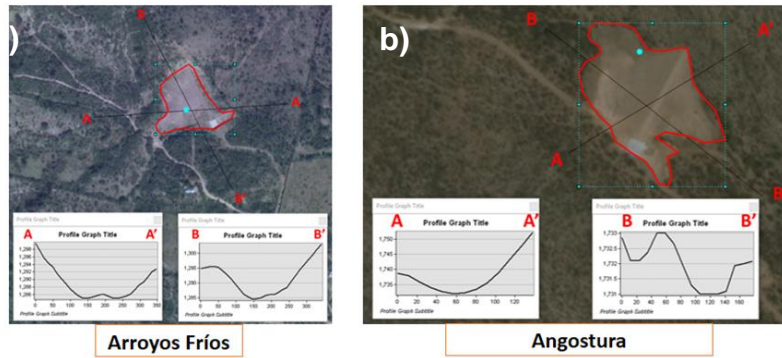


Figura 1.8. Perfiles topográficos de bordos de almacenamiento en Ciudad Fernández (a) y San Luis Potosí (b)

Actualmente, existen diversos tipos de imágenes satelitales, cuya elección depende de las características de la imagen y cómo estas contribuyen con el objetivo de estudio, además se debe considerar el costo, el cual puede ser una limitante. En cartografía, para la elaboración de modelos de elevación del terreno, se utilizan imágenes RADARSAT y SPOT, con tamaño de pixel de hasta 2.5 m (CIG, 2002). Este tipo de imágenes más precisas, podrían ser de mayor utilidad para dimensionar pequeñas obras hidráulicas. Con el uso de drones, se puede obtener ortofotos y modelos digitales de elevaciones detallados, con los cuales es posible cartografiar embalses en su nivel más bajo, lo cual permite monitorear el volumen de sedimentación que se produce en el fondo de ellos; así como hacer inspecciones en los componentes de las obras (Ojeda *et al.*, 2016), por consiguiente podrían ser utilizados para determinar las dimensiones de bordos.

### 1.3.5. Evaluación visual de bordos de almacenamiento

Para el caso de los bordos financiados por CONAZA, los proyectos consistieron en obras con cortina de tierra compactada, vertedor de mampostería, cercado del bordo, un bebedero pecuario y presas filtrantes. Mientras que, los bordos de COUSSA formaron parte de proyectos integrales de uso y conservación de los recursos, los bordos incluían únicamente la obra con cortina de tierra compactada y el vertedor de mampostería. Aunque en general, los bordos contaron con todos los elementos, se observaron algunos detalles que limitan el funcionamiento de las obras. Durante los recorridos (periodo de lluvias), se observó que únicamente diez (58.8%) de los 17 bordos tenían agua almacenada (Figura 1.9).

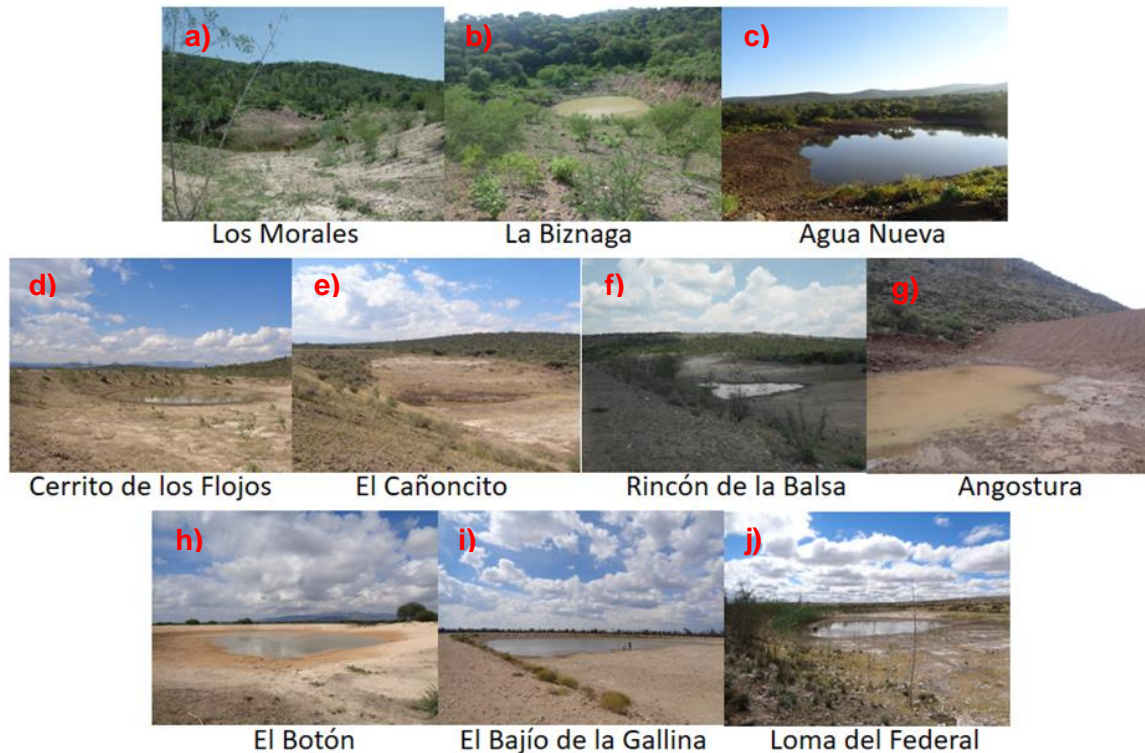


Figura 1.9. Bordos de almacenamiento con agua. Rioverde (a, b y c); Villa de Reyes (d, e y f); San Luis Potosí (g); Venado (h,i y j).

Los bordos: Lantriscal, Los Laureles, San Juan Peñitas, Las Vacías, La Cueva, Rincón de la Mesa Sola y Arroyos Fríos (41.2%) no tenían agua durante la visita. Cabe mencionar, que en la mayoría de los bordos existían indicios de captación de agua de lluvia, por lo que se infiere que el agua almacenada se perdió por filtración o evaporación, al respecto los representantes de los ejidos corroboraron que anteriormente estos bordos han captado agua pero en poco tiempo se pierde (datos no presentados). En el bordo El Botón, se observaron problemas de filtración, debido a que el agua sólo duró siete semanas aun cuando en ese tiempo se presentaron eventos de precipitación en la zona. La Figura 1.10, muestra los bordos sin agua por posible filtración del recurso, falla grave pero no catastrófica en presas de tierra, pues impide que se logre el objetivo de la misma, almacenar agua (Armas, 2003). Estas filtraciones normalmente se deben a la falta o a un inadecuado estudio de la geología del vaso de almacenamiento o a su ubicación en suelos de baja permeabilidad (Glez *et al.*, 2017).



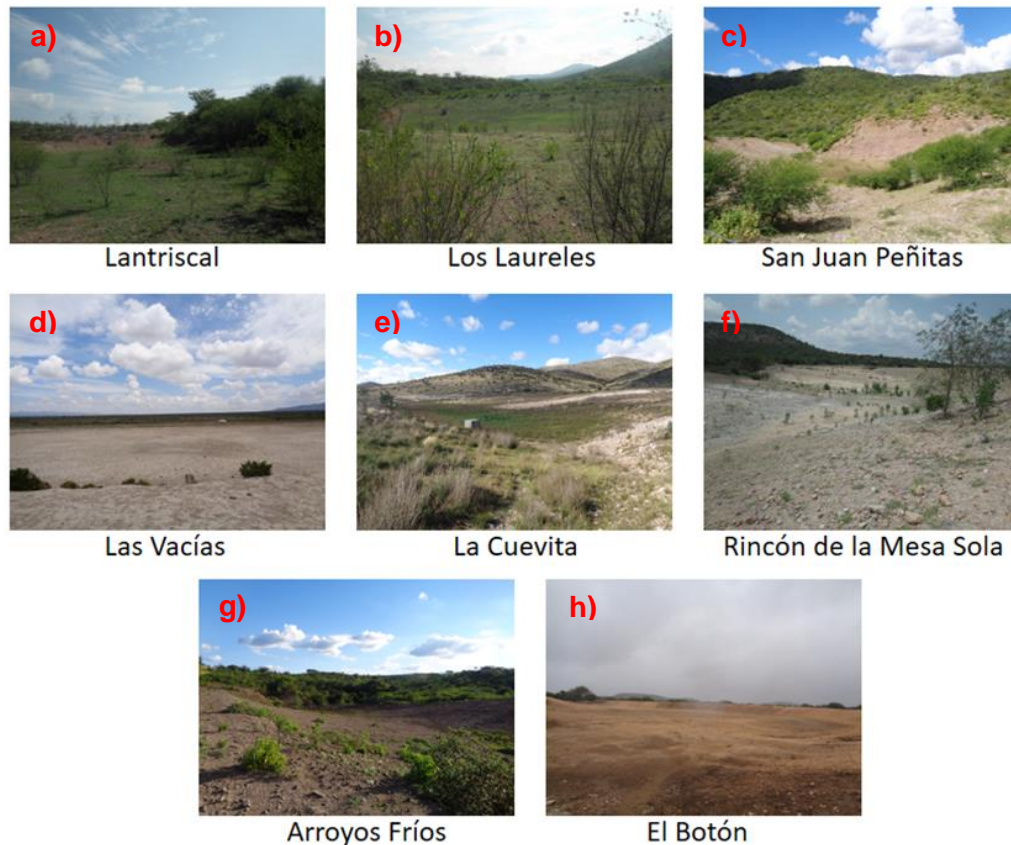


Figura 1.10. Bordos de almacenamiento sin agua. Rioverde (a, b y c); Venado (d, e y h); Villa de Reyes (f); Arroyos Fríos (g).

El problema de filtración de agua en el cuerpo (vaso) de las pequeñas presas de tierra, es posible corregir mediante el acarreo de sedimentos a través del tiempo, los cuales impermeabilizan paulatinamente el vaso, el pisoteo del ganado también reduce la infiltración, otra alternativa es aplicar una capa de tierra arcillosa en la superficie del vaso, o bien, en la entrada de este (Portillo, 2003). Otras soluciones son: a) instalación de geo membranas de polietileno, pero tanto, el precio e instalación de la membrana son muy costosas; b) utilizar pantallas de hormigón plástico, sin embargo, además del costo, dichas pantallas presentan la desventaja del tiempo requerido para su ejecución, asimismo, mientras la instalación de la pantalla no se puede realizar ningún movimiento de tierra para la construcción de la cortina (Chacón y Andino, 2014).

En la Figura 1.11, ejemplifica las pequeñas fisuras longitudinales o agrietamiento en la cortina, así como en el vaso de almacenamiento, observadas en los bordos Lantriscal y

Angostura. Este fenómeno consiste en la aparición de grietas paralelas o transversales al eje de la cortina; es más común que las fisuras tengan anchos de 1 a 2 cm, aunque es posible que se presenten de 15 a 20 cm (Armas, 2003).



Figura 1.11. Agrietamiento en bordos de almacenamiento. Rioverde (a) y San Luis Potosí (b).

De acuerdo con Juárez y Rico (2004), las grietas más peligrosas son las transversales al eje de la cortina, ya que provocan una zona de concentración de flujo. Es necesario corregir cualquier tipo de grieta para evitar problemas de mayor gravedad en la cortina. El agrietamiento se repara mediante el sellado de las fisuras con material compactado, previo a lo cual se debe evitar que las grietas tengan agua, para que no se presenten presiones hidrostáticas posteriores que amenacen la estabilidad de la cortina (Juárez y Rico, 2004).

Por otro lado, en el bordo Agua Nueva se observó arrastre excesivo de sedimentos (Figura 1.12). El azolve es uno de los principales problemas que afectan a los embalses, debido al depósito de sedimentos en el vaso de la obra, producto de la erosión hídrica de su cuenca, los cuales disminuyen su capacidad de almacenamiento y vida útil (Febles y Vega, 2016). Además, puede tener consecuencias limnológicas como la alteración de

la pendiente longitudinal del cauce, formación de humedales e incluso la eutrofización (Palau, 2002).



Figura 1.12. Azolve en el bordo Agua Nueva, Miguel Hidalgo, Rioverde, S. L. P.

Para prevenir este tipo de problemas es necesario la construcción de obras complementarias, tales como las presas filtrantes o de gaviones, las cuales tienen entre sus funciones reducir la erosión hídrica, retener azolves y con ello evitar el azolvamiento de vasos de almacenamiento (Velázquez, 2016). Mientras que, la medida correctiva más empleada es la extracción de los sedimentos del vaso en momentos de bajo nivel de agua, la cual debe realizarse periódicamente (Palau, 2002).

Por otra parte, en el bordo La Cueva ubicado en Venado, se observaron detalles en el vertedor de demasías, el cual estaba destruido y aparentemente arrastrado por la corriente de escurrimiento aguas abajo del bordo, asimismo se observaron grietas en dicha área (Figura 1.13). Al respecto, Rodríguez (2014) menciona que un vertedor mal proyectado puede provocar que el agua sobrepase la corona de la obra y desborde sobre ella ocasionando la falla de la cortina.





Figura 1.13. Daños en vertedor y desagüe del bordo La Cueva, Cinco de Febrero, Venado, S. L. P.

Aunado a lo anterior, existen otros problemas en las obras de excedencias, como la erosión por cavitación, la cual consiste en la formación de burbujas de vapor de agua que al pasar de una zona de baja presión a una de alta, colapsan erosionando la superficie o internamente al vertedor. Dicho proceso puede presentarse cuando la corriente lleva una velocidad elevada (Rosales, 2013). Este fenómeno, pudo haber sucedido en el bordo La Cueva, pues la cuenca se localiza en un terreno escarpado, de poca longitud y con un TC corto, lo cual propicia que se incremente la velocidad de la corriente, generando el colapso del vertedor. Otra posible explicación es la naturaleza del suelo donde se ubicó el vertedor (terreno inclinado), se recomienda se coloque en terreno firme para evitar que se socave (Portillo, 2003), proceso que con ayuda de la velocidad de la corriente pudo provocar el desprendimiento y arrastre del vertedor.

Finalmente en el bordo El Botón se observó un excedente del material (arcilla) de la cortina, dichos cúmulos de tierra pueden haber sobrado por un mal cálculo del volumen de terracerías, o bien, por la construcción de una cortina de menor altura a la diseñada. Además, interfieren en la captación de agua y reduce la capacidad del vaso de almacenamiento (Figura 1.14).





Figura 1.14. Excedente de arcilla para construcción de la cortina del bordo El Botón en Agua de en Medio, Venado, S. L. P.

Como resultado de la evaluación visual de las obras de almacenamiento, el 58.8% de los bordos acumularon agua durante el periodo de lluvias, de los cuales, únicamente la mitad presentaron un adecuado funcionamiento. La problemática detectada consistió en: 47.0% de los casos presentaron filtración de agua, 11.8% agrietamiento ligero, 5.9% azolvamiento y 5.9% daños del vertedor. Estos problemas pueden corregirse mediante la implementación de diversas técnicas; sin embargo, la mejor opción es prevenirlos, para lo cual se deben realizar los estudios correspondientes, con el fin de evitar nuevas inversiones que garanticen el cumplimiento del objetivo de las obras.

Como resultado del estudio hidrológico, se encontraron obras con capacidad de almacenamiento mayor al volumen de agua aprovechable en 41% de los casos, lo que representa una pérdida económica, debido a que, entre más grande sea la obra, mayor será su costo, lo cual sólo se justifica cuando el volumen de la obra sea abastecido por el escurrimiento. Por esto, la importancia de realizar un estudio hidrológico para el diseño de pequeñas obras hidráulicas, que contemple no sólo las necesidades de agua de la población del proyecto, sino también la disponibilidad del recurso para definir las dimensiones del bordo.

## 1.4. CONCLUSIONES

La mayor parte de los bordos de almacenamiento estudiados se localizaron en cuencas muy pequeñas, cuyas características morfológicas, de relieve y red de drenaje, favorecieron el escurrimiento superficial y por ende la captación del agua de lluvia. Por su curva hipsométrica, el mayor porcentaje de cuencas se encuentran en fase de equilibrio y de vejez, por lo que su actividad es media y baja, respectivamente.

Con respecto a los parámetros de escurrimiento, se obtuvieron tiempos de concentración bajos e intensidades de lluvia torrenciales. Los caudales fueron muy variables, dadas las características de cada cuenca. El área de la cuenca, la longitud del cauce principal, el orden de corriente y el tiempo de concentración fueron las variables de mayor correlación con el caudal.

No fue posible obtener el dimensionamiento de bordos mediante las imágenes de satélite utilizadas, por lo que se recomienda emplear otro tipo de imágenes o fotogrametría con drones, con el fin de obtener un modelo digital de elevaciones más preciso, tamaño de pixel de 2.5 m.

El estudio hidrológico es de gran utilidad para caracterizar las cuencas y conocer su potencial para la captación de agua. A partir de este, se identificaron siete bordos (41%) con restricciones hidrológicas, es decir, bordos con mayor capacidad de almacenamiento que el volumen de agua aprovechable. De ahí la importancia de dicho estudio para el diseño de bordos, el ajustar sus dimensiones al potencial de la cuenca, contribuye a optimizar los recursos económicos.

Aunque la mayor parte de bordos se encontraron en buenas condiciones, únicamente el 58.8% había acumulado agua. En el 70.6% de las obras se observaron fallas de: filtración de agua, agrietamiento, azolvamiento y desprendimiento de vertedor, que si bien no son catastróficas, si limitaron el funcionamiento de los bordos. Por lo que se requiere implementar las medidas correctivas correspondientes, así como dar mantenimiento a las obras.

## 1.5. LITERATURA CITADA

- Alfonso-Torreño, A. y Schnabel, S. 2017. Variación espacial de las precipitaciones en una pequeña cuenca hidrográfica del suroeste de España. *Geographicalia* 69: 65-91.
- Anaya F. O.G. 2012. Caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica Chinchao, Distrito de Chinchao, Provincia Huanuco, Región Huanuco. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 79 pp.
- Aparicio, M. F. J. 1992. Fundamentos de hidrología de superficie. Ed. Limusa. Noriega Editores. México. 303 p.
- Aparicio, M. J., Lafragua, C. J., Gutiérrez, L. A., Mejía, Z. R. y Aguilar, G. E. 2006. Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas. Documento técnico del PHI-LAC Núm. 4. UNESCO. 94 p.
- Armas, N. R. 2003. Criterios para diseñar presas de tierra. Prioridad y secuencia. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 24 (2): 26-32.
- Avilés, L. J., Bonola, A. I., Li, L. X., Salgado, M. G., Jaime, P. A. y Trueba, L. V. 2007. Manual geotécnico para el diseño de presas pequeñas. Bonola, A. I. y Jaime, P. A. (ed). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México. 376 p.
- Bell, F. C. 1969. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 95: 311-327.
- Bentancor, L., Silveira, L. y García, P. M. 2014. Incidencia de la intensidad de lluvia en el tiempo de concentración de microcuencas del Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 18 (2): 106-116.
- Breña, P. A. F. y Jacobo, V. M. A. 2006. Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. Universidad Metropolitana. México. 289 pp.
- Chacón, V. A. H. y Andino, E. J. A. 2014. Análisis comparativo en la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico entre las pantallas contra filtración y la geomembrana en presas de tierra homogénea. Tesis de licenciatura. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. 68 p.

- CIG (Centro de Investigaciones Geoespaciales). 2002. Introducción a las Imágenes Satelitales. Curso de apoyo para el Programa de Modernización de la Jurisdicción de Tierras. Santo Domingo, República Dominicana. Recuperado de: <http://percepcion-remota.intec.edu.do/Material%20de%20apoyo%20sensores%20remotos.pdf>. Fecha de consulta: 16 de octubre de 2018.
- FAO. 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia, opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Santiago, Chile. 272 pp.
- Febles, D. J. M. y Vega, C. M. B. 2016. Estimación del aporte de la erosión hídrica al azolve del embalse Mampostón. Ingeniería Hidráulica y Ambiental 37 (3): 18-30.
- Figueras, C. M. A. 2008. Diseño de presas pequeñas. Tesis de postgrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 223 p.
- Fuentes, J. J. J. A. 2004. Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro. Instituto Nacional de Ecología. México. 47 p.
- Glez, H. Y., Guedes, S. O. y Rodríguez, D. S. 2017. Monografía "Las fallas en presas de tierra. Caso de Estudio: falla por estabilidad de taludes en función de las condiciones de drenaje". Centro de Investigaciones Hidráulicas. La Habana, Cuba. 123 p. ISBN 978-959-261-563-2.
- González, M. A. I. 2004. Análisis morfométrico de la cuenca y red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles N. 38. pp. 311-329.
- Guerra, F. y González, J. 2002. Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. Geoenseñanza 7 (1-2): 88-108.
- IBAL S. A. 2009. Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Microcuenca de las Quebradas Las Panelas y La Balsa. Recuperado de: [http://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro\\_documentos/estudios/cuenca\\_panelas/DIAGNOSTICO/2.2ASPECTOS BIOFISICOS.pdf](http://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/cuenca_panelas/DIAGNOSTICO/2.2ASPECTOS BIOFISICOS.pdf). Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2018.

- Ibáñez, A. S., Moreno, R. H. y Gisbert, B. J. M. 2011. Morfología de las cuencas hidrográficas. Universidad Politécnica de Valencia. España. 12 p. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfolog%C3%ADa%20de%20una%20cuenca.pdf>. Fecha de consulta: 22 de septiembre de 2018.
- IMTA. 2009. Extractor Rápido de Información Climatológica versión 2.0 (ERIC III). Base de datos y software. Jiutepec, México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI. 2005. Guía para la Interpretación de Cartografía Uso Potencial del Suelo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de: [http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/hhregil/Guia\\_de\\_interpretacion\\_INEGI.pdf](http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/hhregil/Guia_de_interpretacion_INEGI.pdf). Fecha de consulta: 16 de octubre del 2018.
- INEGI. 2006. Carta topográfica de precipitación media anual. Mapa Digital de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjI0Ljc5ODMyLGxvbjotOTguMzI1MjAsejjoyLGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3x0YzExMXNlcnZpY2lvcw==>. Fecha de consulta: 06 de marzo de 2018.
- INEGI. 2008. Carta topográfica de unidades climáticas. Mapa Digital de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjI0Ljc5ODMyLGxvbjotOTguMzI1MjAsejjoyLGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3x0YzExMXNlcnZpY2lvcw==>. Fecha de consulta: 06 de marzo de 2018.
- INEGI. 2011. Carta topográfica de uso del suelo y vegetación. Mapa Digital de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjI0Ljc5ODMyLGxvbjotOTguMzI1MjAsejjoyLGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3x0YzExMXNlcnZpY2lvcw==>. Fecha de consulta: 06 de marzo de 2018.
- Juárez, B. E. y Rico, R. A. 2004. Mecánica de suelos. Tomo II: Teorías y aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Editorial Limusa. México. 703 p. ISBN 968-18-0128-8.
- Kirpich, Z. P. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. Journal of Civil Engineering 10 (6): 362.

- Lux, C. B. 2016. Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf>. Fecha de consulta: 25 de septiembre de 2018.
- Magette, W. L., Shanholtz, V. O. & Carr, J. C. 1976. Estimating selected parameters for the Kentucky Watershed Model from watershed characteristics. *Water Resources Research* 12 (3): 472-476.
- Ojeda, B. W., Ontiveros, C. R. E., Flores, V. J., Robles, R. B. D. y Jiménez, J. S. I. 2016. Aplicaciones a la ingeniería. En: Ojeda, B. W., Flores, V. J., Ontiveros, C. R. E. (ed). *Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México. pp: 217-284.
- Palau, Y. A. 2002. La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España. p. 847-856. Recuperado de: <http://studylib.es/doc/5560063/la-sedimentaci%C3%B3n-en-embalses.-medidas-preventivas-y-corre....> Fecha de consulta: 11 de octubre de 2018.
- Peña, R. G. y Vidrio, L. G. 1989. Estudio y construcción de un bordo de arcilla compactada para abrevadero y riego. Tesis de licenciatura. Universidad de Guadalajara. Jalisco, México. 164 p.
- Pérez, J. 1979. Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela. 38 p.
- Portillo, M. A. C. 2003. Presas de tierra y bordos. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. México D. F. 161 p.
- Ramírez, L. J. J., Cortés, T. H. G. y Gómez, G. A.; editora: Yáñez, K. M. A. 2015. Captación de agua de lluvia y uso eficiente del agua para la producción agropecuaria. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Morelos, México. 248 p. ISBN 978-607-9368-47-0 (obra digital).

- Rivas, D., Umaña, E., Somarriba-Chang, M., Garmendia, M., Noguera, A. y Acuña, E. 2013. Estudio de caracterización biofísica y socioeconómica en cinco microcuencas del Municipio de Macuelizo, Nueva Segovia. Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente UNA. 123 p.
- Rivera, M. S. D. 2007. Metodología para el análisis hidrológico de cuencas rurales de pequeñas dimensiones. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/3176/1/Methodolog%C3%ADa%20para%20el%20an%C3%A1lisis%20hidrol%C3%B3gico%20de%20cuencas%20rurales%20de%20peque%C3%B1as%20dimensiones.pdf>. Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2018.
- Rodríguez, G. L. G. 2014. Diseño para la construcción de una presa de mampostería en el ejido Jalpa, municipio de General Cepeda. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. 68 p.
- Romero, C. B., Gaspari, F. J., Rodríguez, V. A. M., Carrillo, G. F. M. y Téllez, L. J. 2015. Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. Investigación y Ciencia 23 (64): 26-34.
- Rosales, Q. J. P. 2013. Flujo aire-agua en vertedores. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 99 p.
- SAGARPA. 2005. Manejo de agua y escurrimientos superficiales. Aprovechamiento del Agua, Suelo y Vegetación para el Desarrollo Rural Sustentable. Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. México. 69 p.
- SAGARPA. 2009. Ollas de agua, jagüeyes, cajas de agua o aljibes. Ficha técnica. Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. México. 10 p.
- SAGARPA. 2012. Presas con cortina de tierra compactada para abrevadero y pequeño riego. Ficha técnica. Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. México. 21 p.
- Scheidegger, A. E. 1987. The fundamental principles of landscape evolution. Catena Supplement 10: 199-210.

- Tarango, A. L. A. 2005. Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 4(2): 17-21.
- Taylor, A. B. & Schwarz, H. E. 1952. Unit-hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 33 (2): 235-246.
- Vásquez, T. F. 2018. Valoración económica del agua y pago por servicios ambientales hídricos aplicado a la cuenca regulada del río Jequetepeque, Cajamarca-Perú. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de Cajamarca. Perú.
- Velázquez, S. J. C. 2016. Servicio: Elaboración de proyecto de presa subalvea “Los Dukes”. Informe final de actividades del programa de extensionismo 2016. Secretarías de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 88 p.
- Villón, M. 2002. Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Facultad de Ingeniería Agrícola. 2da edición. Ediciones Villón. Lima, Perú. p. 15 -64.



## CAPÍTULO 2. POTENCIAL DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA IN SITU PARA PRODUCIR FORRAJE EN SAN LUIS POTOSÍ

### RESUMEN

En las zonas áridas y semiáridas el agua es uno de los factores críticos para la productividad agrícola y pecuaria. Lo limitado del recurso y el abatimiento de acuíferos, modifican la calidad del agua (salinidad). En estas regiones la captación de agua de lluvia es indispensable, pero no existe información sobre su calidad. Razón por la cual, el objetivo de esta investigación fue determinar la calidad y la aptitud del agua de lluvia captada en bordos de almacenamiento (BA) para su uso en el riego agrícola. Se recolectaron muestras de agua de BA ubicados en tres microrregiones de San Luis Potosí; se analizó pH, CE ( $\text{dS m}^{-1}$ ), aniones y cationes. Además, se estimaron los índices: Relación de adsorción de sodio (RAS), Carbonato sódico residual (CSR), Porcentaje de sodio posible (PSP), Índice de permeabilidad (IP), Índice de Kelly (IK), Dureza, RASaj, Sólidos disueltos totales (SDT), Salinidad efectiva (SE) y Salinidad potencial (SP). A excepción del magnesio, no hubo diferencias significativas entre las microrregiones ( $p < 0.05$ ). Los resultados obtenidos indican que el agua de los BA es de buena calidad y de acuerdo a las estimaciones realizadas no tendrán un efecto negativo sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Por lo tanto, el agua de bordos tiene potencial para la producción de cultivos, esto con base en los índices calculados y la estimación del rendimiento relativo de cultivos forrajeros en las tres microrregiones.

**Palabras clave:** bordos de almacenamiento, calidad del agua, salinidad, irrigación, sobreexplotación de acuíferos.

## ABSTRACT

In arid and semi-arid areas, water is one of the critical factors for agricultural and livestock productivity. The limited resource and the depletion of aquifers, modify the quality of the water (salinity). In these regions, the collection of rainwater is essential, but there is not information about its quality. So that, the objective of this research was to determine the quality and suitability of rainwater collected on earthen dams (ED) for use in agricultural irrigation. Water samples were collected from ED located in three micro-regions of San Luis Potosi, was analyzed pH, EC (dS m<sup>-1</sup>), anions and cations ions. In addition, the indices were estimated: Sodium adsorption ratio (SAR), Residual sodium carbonate (RSC), Percentage of possible sodium (PPS), Permeability index (PI), Kelly index (KI), Hardness, SAR<sub>aj</sub>, Total dissolved solids (TDS), Effective salinity (ES) and Potential salinity (PS). With the exception of magnesium, there were not significant differences between the micro-regions ( $p < 0.05$ ). The results obtained indicate that the water of the ED is of good quality and according to the measurements made, it has no negative effect on the physical and chemical properties of the soil. Therefore, the water of earth dams has potential for the production of crops, this based on the calculated indexes and the estimation of the relative yield of forage crops in the three microregions.

**Key words:** earthen dams, quality water, salinity, irrigation, overexploitation of aquifers.

## 2.1. INTRODUCCIÓN

En las regiones áridas y semiáridas de México, el principal factor limitativo para la agricultura es el agua, debido a que es indispensable para el crecimiento y desarrollo de la planta. En el siglo XX, el volumen de agua utilizado se ha incrementado a un ritmo mayor al doble del aumento de la población. La agricultura es el sector económico que más demanda agua (FAO, 2013) siendo el agua subterránea el principal recurso hídrico y el bombeo excede en gran medida la recarga, lo que reduce los niveles de agua subterránea de manera alarmante (Pimentel *et al.*, 2004). En 2015, la Comisión Nacional del Agua identificó 653 acuíferos, de los cuales 105 (16.07%) están sobreexplotados (CONAGUA, 2016). De estos 105, 19 se ubican en el estado de San Luis Potosí, de los cuales el 15.8% se encuentran en situación crítica, 36.8% están sobreexplotados y 47.4% en equilibrio (CONAGUA, 2015). Bajo este contexto, en las regiones áridas y semiáridas, la recolección y almacenamiento del agua de lluvia juegan un papel muy importante en el manejo sostenible del recurso hídrico (Rosegrant *et al.*, 2002). La captación de agua de lluvia, dependiendo de la intensidad de la precipitación, es una tecnología en la que la escorrentía superficial es recolectada eficazmente (Helmreich y Horn, 2009). Por lo que constituye una alternativa viable para el suministro de agua en los hogares, consumo animal y puede tener un uso potencial en la irrigación deficitaria de cultivos forrajeros en la agricultura de temporal (Rosegrant *et al.*, 2002; Sazakli *et al.*, 2007; Helmreich y Horn, 2009). Diversos estudios demuestran que la cosecha de agua de lluvia es una opción potencial para producir cultivos bajo riego deficitario, como lo han demostrado Kahinda *et al.* (2007) en las zonas semiáridas de Zimbabwe, Oweis y Hachum (2006) al norte de Siria y Akhtar *et al.* (2016) al sur de Asia, quienes encontraron un incremento de la productividad del agua bajo estas técnicas. Por otra parte, numerosas investigaciones han examinado la calidad del agua de lluvia en países industrializados, sin embargo, la información para zonas rurales es escasa (Klaus-Dieter, 2008).

Cabe mencionar que en la mayor parte de los trabajos (Sazakli *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010; Cobinna *et al.*, 2013; Mahato *et al.*, 2016) se ha analizado la composición química del agua de lluvia para consumo humano y uso doméstico. En contraste, se carece de información sobre la calidad del agua de lluvia para su uso en el riego agrícola. Por lo

tanto, el objetivo de la presente investigación fue determinar la calidad y la aptitud del agua de lluvia captada en bordos de almacenamiento (BA) para la irrigación de cultivos en tres microrregiones de San Luis Potosí.

## 2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.2.1. Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el estado de San Luis Potosí, en las microrregiones económicas Altiplano Centro (MAC), Centro Sur (MCS) y Media Oeste (MMO) (Figura 2.1). Los sitios de estudio se ubican en clima semiseco (INEGI, 2008) con vegetación predominante de pastizal y matorral xerófilo (INEGI, 2011). La precipitación promedio anual varía entre 600 y 700 mm en la MMO (Rioverde) mientras que en la MAC (Venado) y MCS (Villa de Reyes) es de 400 mm (INEGI, 2006).

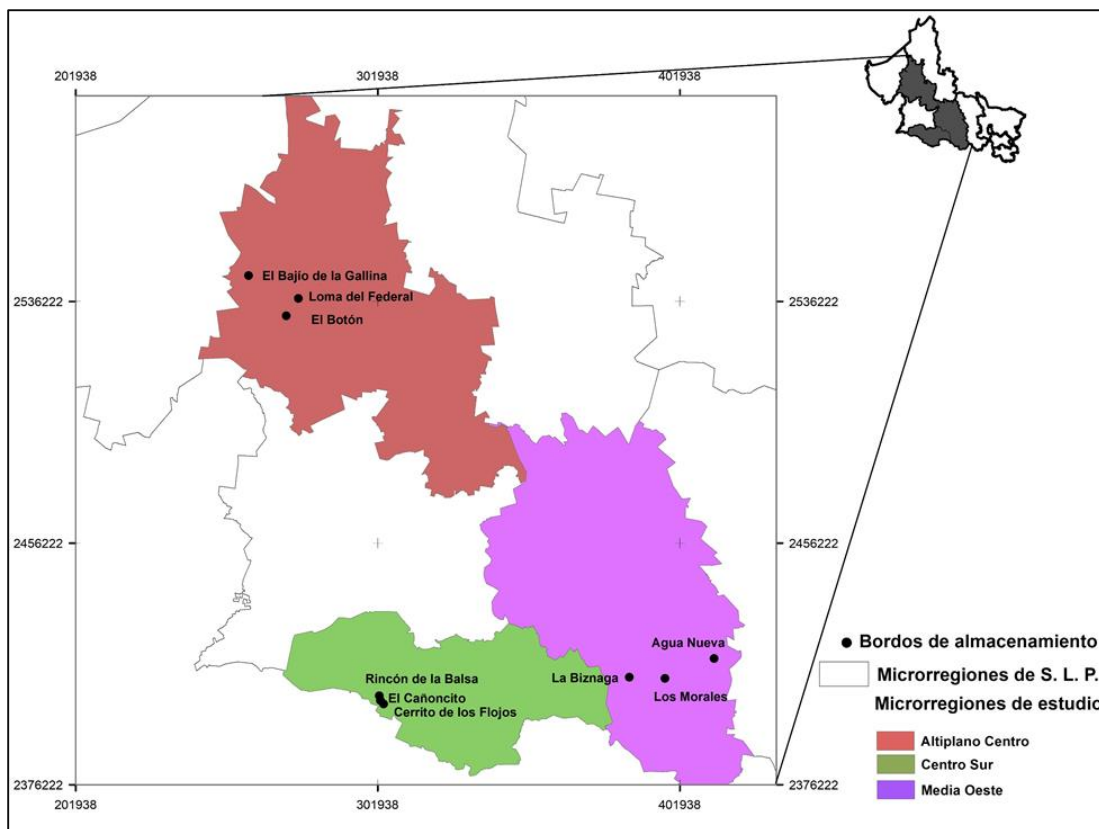


Figura 2.1. Ubicación de bordos de almacenamiento en tres microrregiones de San Luis Potosí.

### **2.2.2. Muestreo y análisis de agua**

Se seleccionaron tres BA por microrregión, los cuales se ubicaron en un mapa digital empleando el programa ArcGIS 10.3 (Figura 2.1). A partir de cartas topográficas específicas, datos vectoriales (escala 1:50 000) serie III del INEGI (2016) se trazaron las rutas de acceso a cada uno de los BA y se realizó un recorrido de campo previo a la toma de muestras de agua. Durante el periodo de junio a noviembre del 2016, en cada bordo se tomaron las muestras de agua de acuerdo a la NOM-230-SSA1-2002 (Diario Oficial de la Federación, 2005). La determinación de pH y conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) se realizó *in situ* con el potenciómetro 850051 y conductímetro 850037 de Sper Scientific; respectivamente. En laboratorio, se determinó la concentración de potasio ( $\text{K}^+$ ) y sodio ( $\text{Na}^+$ ) con el fotómetro de llama (Instrumentation Laboratory® Auto Cal Flame Photometer 643). Los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) se obtuvieron mediante titulación volumétrica con ácido sulfúrico 0.1 N. La concentración de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) se determinaron por titulación con nitrato de plata 0.01 N y E.D.T.A. 0.01 N, respectivamente. Los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) se analizaron por espectrofotometría a 420 nm (Jenway, 7305 Spectrophotometer).

### **2.2.3. Aptitud del agua para la producción de forraje**

Para determinar la calidad del agua de BA se utilizaron las Normas de Riverside (Richards, 1954) las cuales emplean la conductividad eléctrica (CE) y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) para clasificar el agua de riego. Asimismo, se utilizó la Clasificación de Wilcox (1948) en la que se relaciona la CE con el porcentaje de sodio respecto al total de cationes para definir la calidad del agua. Además, se calcularon los índices del Cuadro 2.1 para estimar la aptitud del agua de BA. Con la finalidad de conocer el potencial del agua de BA sobre el rendimiento relativo de los cultivos forrajeros: avena, maíz, cebada y sorgo, representativos de la producción de forraje en el estado de San Luis Potosí (SEDUCOP, 2012) se estimó la conductividad del extracto de saturación del suelo a partir de la CE del agua, empleando las relaciones propuestas por García (2012).

Cuadro 2.1. Ecuaciones utilizadas para estimar la aptitud del agua para riego.

Índice	Ecuación
Relación de Adsorción de Sodio (Richards, 1954)	$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$
Carbonato de Sodio Residual (Eaton, 1950)	$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$
Porcentaje de Sodio Posible (Palacios y Aceves, 1970)	$PSP = \frac{Na^+}{SE} \times 100$
Índice de Permeabilidad (Doneen, 1964)	$IP = \frac{(Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}) \times 100}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)}$
Índice de Kelly (Kelly, 1951)	$IK = \frac{Ca^{2+}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)} \times 100$
Dureza (Vásquez, 2000)	$^{\circ}F = \frac{\frac{mg}{L} Ca^{2+} + \frac{mg}{L} Mg^{2+} + 4.12}{10}$
RAS ajustada (Bower y Wilcox, 1965)	$RAS_{aj} = SAR * [1 + (8.4 - pHc)]$ donde: $pHc = (Pk'2 - Pk'c) + p(Ca^{2+} + Mg^{2+}) + p(Alk)$
Sólidos Disueltos Totales (Sparks, 1995)	$SDT(mg L^{-1}) = 0.64 * CE(\mu S cm^{-1})$
Salinidad Efectiva (Doneen, 1975)	$SE = \text{suma de cationes}^* - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ $SE = \text{suma de cationes}^* - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$
Salinidad Potencial (Doneen, 1975)	$SP = Cl^- + 1/2 SO_4^{2-}$

\* Si la suma de cationes es menor que la suma de aniones, se utiliza la suma de aniones en lugar de la de cationes

#### 2.2.4. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza bajo un diseño experimental completamente al azar y una prueba de rango múltiple de Tukey ( $p = 0.05$ ) para evaluar el efecto de las variables

de respuesta: pH del agua, CE, concentración de aniones ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ ) y cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) para las microrregiones de estudio. Los análisis se llevaron a cabo empleando el programa estadístico Infostat V. 17/11/2016.

## **2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **2.3.1. pH y CE del agua**

Los valores promedio de pH no presentaron diferencias significativas entre microrregiones ( $p = 0.6687$ ). El 100% de los BA en las tres microrregiones presentan valores alcalinos que oscilaron entre 7.0 y 7.8 (Cuadro 2.2). Asimismo, no existió diferencia significativa en CE ( $p = 0.3230$ ) entre microrregiones, la cual varió entre 0.103 y 0.373  $\text{dS m}^{-1}$ .

En el presente estudio, se encontró que el pH del agua de lluvia es alcalino, el cual varía entre 7.2 a 7.8, este resultado concuerda con el reportado por Uba y Aghogho (2000) quienes encontraron una variación de pH entre 7.02 a 7.45, sin embargo, el agua de lluvia recolectada por estos autores proviene de techos (aluminio, zinc, asbesto y paja) y la analizada en esta investigación deriva de reservorios sin ningún tipo de revestimiento. Mientras que, Lee *et al.* (2010) obtuvieron valores más altos de pH entre 7.5 a 8.5; por su parte, Cobbina *et al.* (2013) encuentran un intervalo más amplio de pH (5.0 a 9.0) con un valor promedio de 7.18, ligeramente inferior al valor promedio encontrado en el presente estudio (7.4), mientras que Lee *et al.* (2010) y Sazakli *et al.* (2007) reportan valores promedio más altos (7.8 y 8.35, respectivamente). La alcalinidad del pH puede atribuirse a los carbonatos de calcio y magnesio aportados a la atmósfera por erosión eólica y lixiviados por el agua de lluvia (Melidis *et al.*, 2007) o provienen de la erosión del suelo transportados por los escurrimientos superficiales (Ali *et al.*, 2004).

Cuadro 2.2. Parámetros químicos obtenidos en muestras de agua de BA en tres microrregiones de San Luis Potosí.

Microrregión	Bordo de almacenamiento	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Aniones (ppm)			Cationes (ppm)			
				HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
Altiplano	El Bajío de la Gallina	7.5	0.373	183	28.4	10.6	36.1	7.3	18.4	25.0
	El Botón	7.8	0.267	140.3	17.7	6.7	44.1	4.9	6.9	3.5
Centro	Loma del Federal	7.6	0.223	122.0	14.2	6.3	34.1	3.6	0.0	7.0
	<b>Promedio</b>	<b>7.6<sup>a</sup></b>	<b>0.288<sup>a</sup></b>	<b>148.5<sup>a</sup></b>	<b>20.1<sup>a</sup></b>	<b>7.9<sup>a</sup></b>	<b>38.1<sup>a</sup></b>	<b>5.3<sup>a</sup></b>	<b>8.4<sup>a</sup></b>	<b>11.9<sup>a</sup></b>
Centro Sur	Cerrito de los Flojos	7.2	0.288	134.2	17.7	9.1	36.1	8.5	4.6	18.8
	Rincón de la Balsa	7.7	0.192	85.4	14.2	10.1	24.0	8.5	4.6	15.6
	El Cañoncito	7.0	0.103	54.9	14.2	12.0	12.0	12.2	0.0	9.0
	<b>Promedio</b>	<b>7.3<sup>a</sup></b>	<b>0.194<sup>a</sup></b>	<b>91.5<sup>a</sup></b>	<b>15.4<sup>a</sup></b>	<b>10.4<sup>a</sup></b>	<b>24.0<sup>a</sup></b>	<b>9.7<sup>b</sup></b>	<b>3.1<sup>a</sup></b>	<b>14.5<sup>a</sup></b>
Media Oeste	La Biznaga	7.6	0.202	97.6	14.2	7.7	22.0	6.1	9.2	9.0
	Los Morales	7.0	0.179	85.4	10.6	7.7	20.0	6.1	0.0	8.2
	Agua nueva	7.5	0.258	152.5	14.2	1.4	44.1	4.9	0.0	10.2
	<b>Promedio</b>	<b>7.4<sup>a</sup></b>	<b>0.213<sup>a</sup></b>	<b>111.9<sup>a</sup></b>	<b>13.0<sup>a</sup></b>	<b>5.6<sup>a</sup></b>	<b>28.7<sup>a</sup></b>	<b>5.7<sup>ab</sup></b>	<b>3.1<sup>a</sup></b>	<b>9.1<sup>a</sup></b>
	<i>P</i>	0.4654	0.323	0.2237	0.2342	0.162	0.3374	0.0312	0.5287	0.6844

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)



### 2.3.2. Aniones solubles

En ningún BA se detectó la presencia de  $\text{CO}_3^{2-}$ . En las tres microrregiones, el anión dominante fue el bicarbonato, cuya concentración varió de 54.9 a 183.0 ppm, seguido por los cloruros (10.6 a 28.4 ppm) y finalmente los sulfatos (1.4 a 12.0 ppm) (Cuadro 2.2), no se encontraron diferencias significativas entre microrregiones. El orden de la abundancia de los aniones en las tres áreas de estudio fue similar ( $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ ) lo cual coincide con los resultados de Ramos-Leal *et al.* (2016) para aguas subterráneas de la región Centro de San Luis Potosí, pero difiere con lo reportado por Mahato *et al.* (2016) en agua de lluvia ( $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ ).

La mayor concentración de bicarbonato en el agua de lluvia puede ser producto del intercambio de  $\text{CO}_2$  atmosférico con el agua, el cual al ingresar al sistema cambia a  $\text{HCO}_3^-$  (Mahato *et al.*, 2016). En los BA la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  varió entre 54.9 a 183.0 ppm, fue más alta que las encontradas por Cobinna *et al.* (2013) y Mahato *et al.* (2016) cuyas concentraciones fueron de 2.4 a 43.9 ppm y 2.7 a 24.8 ppm, respectivamente. En cuanto al  $\text{Cl}^-$  se obtuvo una concentración (16.15 ppm) muy similar a la reportada por Lee *et al.* (2010) 15 ppm. Mientras que Sazakli *et al.* (2007), Cobinna *et al.* (2013) y Mahato *et al.* (2016) reportan una menor concentración de  $\text{Cl}^-$  (7.00, 3.56 y 3.25 ppm, respectivamente). El origen del  $\text{Cl}^-$  en el agua de lluvia posiblemente sea debido a actividades antropogénicas como la incineración de desechos (Younos *et al.*, 1998). En promedio se obtuvo una baja concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  (8 ppm) valor muy similar al reportado en diversas investigaciones (Mahato *et al.*, 2016; Sazakli *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010). La baja concentración de sulfato indica una moderada o insignificante transformación química de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en la atmósfera por actividad del hombre (Cobinna *et al.*, 2013).

### 2.3.3. Cationes solubles

El catión de mayor concentración en el agua de las tres microrregiones fue  $\text{Ca}^{2+}$  (12.0 a 44.1 ppm) seguido por  $\text{K}^+$  (3.5 a 25.0 ppm); posteriormente  $\text{Mg}^{2+}$  (4.9 a 12.2 ppm) y finalmente  $\text{Na}^+$  (0.0 a 9.2 ppm) en las MCS y MMO, mientras que en MAC el orden fue  $\text{Ca}^{2+}$  (34.1 a 44.1 ppm),  $\text{K}^+$  (3.5 a 25 ppm),  $\text{Na}^+$  (0.0 a 18.4 ppm) y  $\text{Mg}^{2+}$  (3.6 a 7.3 ppm) (Cuadro 2.2). Únicamente se presentó diferencia significativa en  $\text{Mg}^{2+}$  ( $p = 0.0312$ ),

donde las aguas de los BA de la MCS mostraron el valor medio más alto (9.7 ppm). El orden fue similar en las MCS y MMO ( $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ ) pero diferente en la MAC ( $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ ) estos resultados son diferentes a los encontrados por Mahato *et al.* (2016) y Ramos-Leal *et al.* (2016) quienes señalan el siguiente orden:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ .

Como anteriormente se mencionó, el catión más abundante en el agua de los BA en las tres microrregiones fue el  $\text{Ca}^{2+}$  cuya concentración promedio fue de 30.3 ppm similar al que obtuvieron Lee *et al.* (2010), pero muy superior a los encontrados por Cobinna *et al.* (2013) 2.34 ppm y Mahato *et al.* (2016) 2.7 ppm, y dos veces más alta que la que reportan Sazakli *et al.* (2007). Es importante mencionar que la mayor cantidad de agua de lluvia captada en los BA proviene de escurrimientos superficiales, por lo tanto, la mayor cantidad de calcio detectada puede atribuirse al arrastre superficial de partículas de suelo en forma de carbonatos tal y como lo señala Ali *et al.* (2004). Por otra parte, la concentración de  $\text{K}^+$  fue mayor que la registrada en los estudios realizados por Mahato *et al.* (2016) y Sazakli *et al.* (2007). Con respecto al  $\text{Na}^+$ , se obtuvo una concentración promedio de 4.9 ppm, superior a 1.9 y 0.06 ppm reportadas por Mahato *et al.* (2016) y Cobinna *et al.* (2013). Concentraciones más altas de  $\text{Na}^+$  fueron obtenidas por Sazakli *et al.* (2007) y Lee *et al.* (2010). Finalmente, la concentración de  $\text{Mg}^{2+}$  en BA (6.9 ppm) es mayor al promedio 0.6 ppm (Sazakli *et al.*, 2007) y 1.15 ppm (Cobinna *et al.*, 2013; Mahato *et al.*, 2016) pero inferior a la concentración de magnesio (16 ppm) detectada en agua de lluvia captada en reservorios (Lee *et al.*, 2010).

#### **2.3.4. Aptitud del agua para producción de forraje**

Desde un punto de vista agrícola, la calidad del agua se refiere al tipo y cantidad de sales presentes en el agua y su efecto sobre el suelo y desarrollo de los cultivos (Cortés, 2008). En este sentido, de acuerdo a la Clasificación de Wilcox, el 100% de las aguas de BA son de buenas a excelentes (Figura 2.2).

Asimismo, con base en las Normas de Riverside el 55% de las muestras clasifican como  $\text{C}_1\text{S}_1$  (baja salinidad y baja en sodio) en los BA Loma del Federal, Rincón de la Balsa, El Cañoncito, La Biznaga y Los Morales, mientras que el resto de los BA (45%) son  $\text{C}_2\text{S}_1$  (salinidad media y baja en sodio) (BA: El Bajío de la Gallina, El Botón, Cerrito de los

Flojos y Agua Nueva) (Figura 2.3). Blasco y de la Rubia (1973) señalan que la irrigación con las aguas C<sub>1</sub> podrían originar problemas de salinidad únicamente en suelos de muy baja permeabilidad, mientras que con las C<sub>2</sub>, puede requerirse el lavado de sales por lixiviación o el uso de cultivos tolerantes a la salinidad y las S<sub>1</sub>, pueden generar problemas en cultivos muy sensibles al sodio.

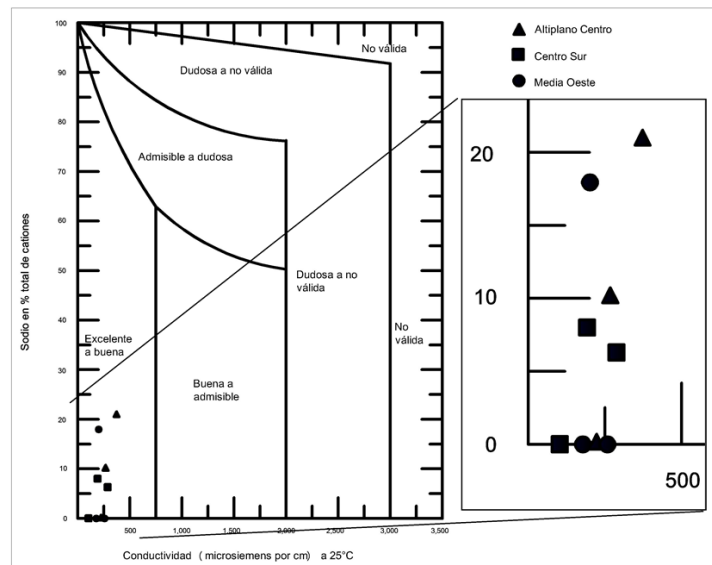


Figura 2.2. Clasificación Wilcox del agua de BA en tres microrregiones de San Luis Potosí.

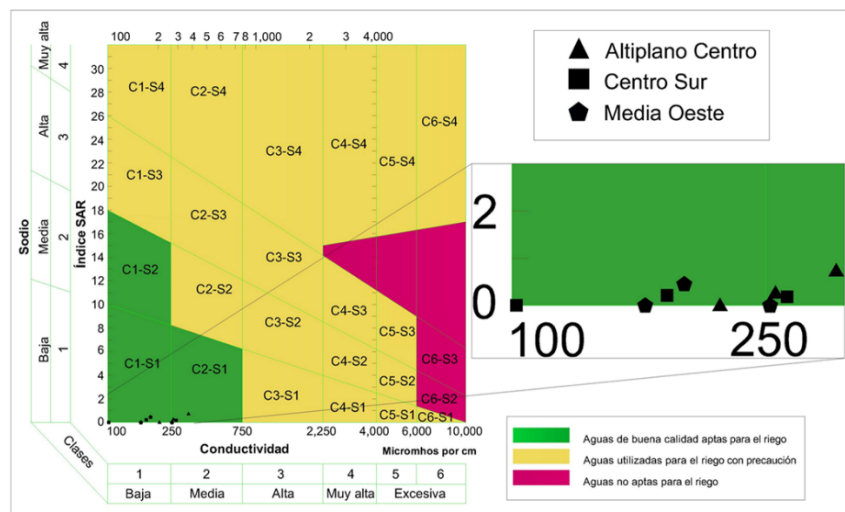


Figura 2.3. Calidad del agua de BA en tres microrregiones de San Luis Potosí de acuerdo a las Normas de Riverside.

Es importante señalar que en el área de estudio no se reportan investigaciones sobre la composición química del agua de lluvia y su utilización en la producción de cultivos, por lo que los resultados del presente estudio fueron contrastados con investigaciones realizadas en la región. Así, Ramos-Leal *et al.* (2016) reportan aguas dudosas (clasificación de Wilcox) en pozos profundos de la región Centro del estado. Por otra parte, Sarabia *et al.* (2011) al analizar el agua de pozos profundos del Valle de San Luis Potosí, clasificaron al 30% de las muestras como aptas y el 70% a utilizarse con precaución en la irrigación. Mientras que para la microrregión media oeste, Villanueva y Hernández (2001) clasificaron al 100% de las aguas subterráneas analizadas como aguas a utilizar con precaución. En el estudio realizado por Ramos-Leal *et al.* (2016) en la región Centro, señalan que el 35% de las muestras de agua investigada tiene riesgo medio de salinidad, el 60% alto y 5% muy alto; con respecto a la sodicidad 75% de las muestras presenta riesgo bajo, medio (20%) y muy alto (5%). Lo anterior nos sugiere que el agua de los BA puede tener potencial en la producción de cultivos. Sin embargo, se requiere evaluar su efecto a largo plazo sobre las características físicas y químicas del suelo.

Con base en lo anterior, se determinaron los índices RAS, CSR, PSP, IP, IK, dureza y RASaj para predecir posibles problemas por sodio y calcio en el suelo a largo plazo y los índices SDT, SE y SP para detectar afectación por sales (Cuadro 2.3). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en ninguno de los índices.

El RAS indica el riesgo potencial del exceso de sodio sobre los elementos calcio y magnesio, los valores en este estudio oscilaron entre 0.00 y 0.73 ( $\bar{x} = 0.20$ ). El índice RAS y la CE indican que si el agua de los BA se utilizara en la irrigación de cultivos y de acuerdo a los criterios de Ayers y Westcot (1985) la velocidad de infiltración del agua en el suelo se afectaría severamente en las áreas de los BA: Los Morales (MMO), El Cañoncito y Rincón de la Balsa (MCS) resultados similares se reportaron para las MCS (Reyna *et al.*, 1980) y MMO (Villanueva y Hernández, 2001). Para el resto de los BA se podría tener una infiltración de ligera a moderada.

Mediante el CSR se estima la peligrosidad del sodio cuando la concentración de carbonatos y bicarbonatos es mayor que la de calcio más magnesio, el rango obtenido

para este índice fue de  $-0.70$  a  $0.60 \text{ meq L}^{-1}$  ( $\bar{x} = -0.16 \text{ meq L}^{-1}$ ). En este sentido, en el 67% de los casos no se presentarán problemas por carbonato sódico residual en el suelo, situación inversa se presentará en los BA restantes. En los últimos, el CSR tiene signo positivo lo que indica que el calcio y magnesio se precipitan en forma de carbonatos, por lo que en la solución sólo hay sales de sodio (Medina *et al.*, 2016) las cuales pueden afectar las propiedades físicas del suelo (Naidu y Rengasamy, 1993). Por lo que se recomienda evaluar periódicamente la velocidad de infiltración del agua y pH del suelo, así como la incorporación de mejoradores del suelo (Stevens, 1994). Villanueva y Hernández (2001) reportan un índice CSR peligroso para el agua de pozos profundos de la MMO.

Otro parámetro para estimar la sodicidad es el PSP, el cual se refiere a la proporción de sodio sobre el total de cationes cuando hay precipitación de carbonatos de calcio y magnesio, así como sulfato de calcio, en este sentido se obtuvieron valores de 0.0 a 63.5% ( $\bar{x} = 21.7\%$ ). La clasificación realizada por García (2015) para el PSP indica que sólo en un caso (La Biznaga) se pueden generar acumulaciones de sodio que participen en la compactación del suelo (Ávila *et al.*, 2009).

El índice de permeabilidad (IP) indica el efecto del uso del agua de riego a largo plazo sobre la permeabilidad del suelo, cuyos resultados variaron de 59.29 a 83.25% ( $\bar{x} = 69.21\%$ ). Para este índice se utilizó el criterio propuesto por Balmaseda *et al.* (2006), de acuerdo a este, las aguas de los BA El Bajío de la Gallina (MAC), La Biznaga y Los Morales (MMO) se clasifican como excelentes ( $IP > 75\%$ ) y el resto como buenas ( $PI: 25 - 75\%$ ). Estos resultados concuerdan con los encontrados por Ramos-Leal *et al.* (2016) pero difieren con los de Gonzáles-Acevedo *et al.* (2016) quienes clasifican al agua como no recomendable. Debido a que el IP mide el riesgo del sodio sobre la permeabilidad del suelo por el uso del agua de riego a largo plazo (Brindha y Elango, 2011) y en función del tipo de suelo y la calidad del agua de riego (González-Acevedo *et al.*, 2016), las aguas de los BA en las tres microrregiones no tendrían un efecto negativo sobre el suelo a largo plazo.

Cuadro 2.3. Índices de la calidad del agua de riego en BA en tres microrregiones de San Luis Potosí.

Microrregión	Bordo de almacenamiento	RAS	RASaj	CSR	IP	IK	Dureza	SDT	SE	SP	PSP
Altiplano	El Bajío de la Gallina	0.73	0.58	0.60	79.13	56.25	12.02	238.53	1.62	0.91	49.38
	El Botón	0.26	0.42	-0.30	62.64	75.86	13.03	171.14	0.69	0.57	43.48
Centro	Loma del Federal	0.00	0.00	0.00	70.71	85.00	10.02	142.85	0.53	0.47	0.00
	<b>Promedio</b>	<b>0.33<sup>a</sup></b>	<b>0.34<sup>a</sup></b>	<b>0.10<sup>a</sup></b>	<b>70.83<sup>a</sup></b>	<b>72.37<sup>a</sup></b>	<b>11.69<sup>a</sup></b>	<b>184.17<sup>a</sup></b>	<b>0.95<sup>a</sup></b>	<b>0.65<sup>a</sup></b>	<b>30.95<sup>a</sup></b>
Centro Sur	Cerrito de los Flojos	0.18	0.36	-0.30	62.34	66.67	12.52	184.19	0.98	0.60	20.41
	Rincón de la Balsa	0.21	0.82	-0.50	65.87	57.14	9.52	122.62	1.10	0.51	18.18
	El Cañoncito	0.00	0.00	-0.70	59.29	37.50	8.02	65.79	0.93	0.53	0.00
	<b>Promedio</b>	<b>0.13<sup>a</sup></b>	<b>0.39<sup>a</sup></b>	<b>-0.50<sup>a</sup></b>	<b>62.50<sup>a</sup></b>	<b>53.77<sup>a</sup></b>	<b>10.02<sup>a</sup></b>	<b>124.20<sup>a</sup></b>	<b>1.00<sup>a</sup></b>	<b>0.54<sup>a</sup></b>	<b>12.86<sup>a</sup></b>
Media Oeste	La Biznaga	0.45	1.88	0.00	83.25	55.00	8.02	129.09	0.63	0.48	63.49
	Los Morales	0.00	0.00	-0.10	78.88	66.67	7.51	114.24	0.46	0.38	0.00
	Agua Nueva	0.00	0.00	-0.10	60.81	84.62	13.03	165.12	0.43	0.42	0.00
	<b>Promedio</b>	<b>0.15<sup>a</sup></b>	<b>0.63<sup>a</sup></b>	<b>-0.07<sup>a</sup></b>	<b>74.31<sup>a</sup></b>	<b>68.76<sup>a</sup></b>	<b>9.52<sup>a</sup></b>	<b>136.15<sup>a</sup></b>	<b>0.51<sup>a</sup></b>	<b>0.43<sup>a</sup></b>	<b>21.16<sup>a</sup></b>
	<i>P</i>	0.6191	0.8649	0.1026	0.2953	0.3331	0.5382	0.3230	0.2413	0.2286	0.7273

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). RAS y RASaj) adimensionales; CSR, SE y SP) meq L<sup>-1</sup>; IP, IK y PSP) %; dureza) ° franceses; SDT) mg L<sup>-1</sup>.

En lo que respecta al porcentaje de calcio sobre el total de cationes (IK) se encontraron valores entre 37.50 y 85.00% ( $\bar{x} = 63.96 \%$ ). Quispe (2016) menciona que si las aguas tienen un IK mayor a 35% son aptas para irrigación, en el presente trabajo el 100% de las aguas de lluvia se ubican en esta categoría. En contraste, Ramos-Leal *et al.* (2016) obtuvieron valores de IK inferiores en el 100% de las muestras (aguas inapropiadas). Por su parte, González-Acevedo *et al.* (2016) en su estudio realizado en aguas subterráneas y superficiales reportan que el 100% y el 75%, respectivamente, son inapropiadas para el riego.

Mientras tanto, la cantidad de iones calcio y magnesio solubles en el agua, dureza (expresada como  $\text{CaCO}_3$ ), varió entre 7.51 a 13.03 °f ( $\bar{x} = 10.41$  °f). De acuerdo a la clasificación propuesta por Orta (2006) en todos los bordos el agua es dulce (7 a 14 °f) resultados que contrastan con el agua de pozos profundos, donde se ha encontrado que el 70% de las aguas son duras (Sarabia *et al.*, 2011).

Aunado a lo anterior el RASaj indica la tendencia del  $\text{CaCO}_3$  a precipitarse o disolverse en la solución del suelo, los valores resultantes fueron de 0.00 a 1.88 ( $\bar{x} = 0.45$ ) (Cuadro 2.3), los cuales indican que 100% del agua en los BA presentan una tendencia a precipitar el  $\text{CaCO}_3$  de la solución del suelo.

Para conocer el posible efecto de las sales disueltas del agua en la solución del suelo se estimaron los SDT, SE y SP (Cuadro 2.3). La concentración de SDT varió entre 65.79 y 238.53  $\text{mg L}^{-1}$  ( $\bar{x} = 148.17 \text{ mg L}^{-1}$ ). La SE obtenida en el agua de BA fue de 0.43 a 1.62  $\text{meq L}^{-1}$  ( $\bar{x} = 0.82 \text{ meq L}^{-1}$ ). Finalmente la SP osciló entre 0.38 y 0.91  $\text{meq L}^{-1}$  ( $\bar{x} = 0.54 \text{ meq L}^{-1}$ ). Con base en estos índices, el 100% de las aguas de bordos no tienen restricciones para su uso en el riego de acuerdo a los límites establecidos por Castellanos *et al.* (2000). En contraste, Ramos-Leal *et al.* (2016) clasificaron el agua con restricción leve a moderada (de acuerdo a los índices SDT y SE) y sin grado de restricción por SP.

Por otra parte, un factor importante que determina la aptitud de agua para riego es la tolerancia de los cultivos a la salinidad, entre mayor tolerancia tenga un cultivo pueden utilizarse aguas más salinas sin que se presenten efectos negativos en el rendimiento (Aragües, 2011). Con los datos de CE del agua se realizó una estimación de la CE en el extracto del suelo, cuyos valores se encuentran en rango de 0.15 a 0.56  $\text{dS m}^{-1}$ , los

resultados obtenidos de este cálculo fueron contrastados con los umbrales de tolerancia (U.T.) a la salinidad propuestos por Ayers y Westcot (1985), Rhoades *et al.* (1992) y Kotuby-Amacher *et al.* (2000) para los cultivos forrajeros maíz (1.8 dS m<sup>-1</sup>), avena (2.6 dS m<sup>-1</sup>), sorgo (6.8 dS m<sup>-1</sup>) y cebada (8.0 dS m<sup>-1</sup>) a partir de los cuales el rendimiento relativo va disminuyendo conforme aumenta la CE del extracto del suelo (Figura 2.4).

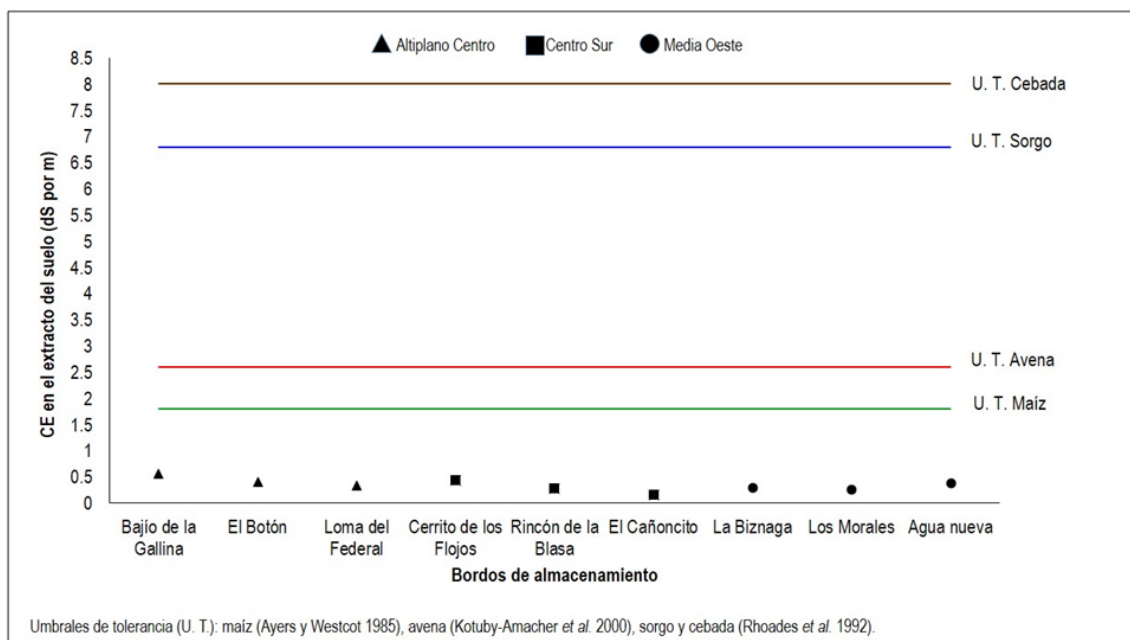


Figura 2.4. Valores estimados de CE en el extracto del suelo a partir de la CE del agua de BA y umbrales de tolerancia de cultivos forrajeros.

La CE en el extracto del suelo de todos los BA fue inferior a los umbrales de tolerancia a la salinidad de los cultivos antes mencionados, por lo que el rendimiento relativo de estos no se verá afectado si se irrigara con agua de BA. Ramos-Leal *et al.* (2016) mencionan un rango de CEE que varía de 0.35 a 3.59 dS m<sup>-1</sup>. Al realizar un análisis de estos valores se obtuvo que se disminuye el rendimiento relativo de maíz y avena, mientras que en los cultivos de sorgo y cebada no se afectaría la producción.

Considerando la buena calidad del agua de los BA y los pequeños volúmenes de agua almacenada, es recomendable su uso en la irrigación de pequeños espacios (menores a 1 ha), bajo riego deficitario, sistema de riego por goteo y fertigración para garantizar un manejo sustentable de los recursos agua y suelo.



## **2.4. CONCLUSIONES**

De acuerdo a la clasificación de Wilcox, el agua de los BA es de calidad buena a excelente para uso agrícola y según las Normas de Riverside, las aguas son aptas para el riego, únicamente se presentarían problemas en suelos de muy baja permeabilidad (C<sub>1</sub>), con cultivos sensibles a la salinidad (C<sub>2</sub>) y al sodio (S<sub>1</sub>).

Los índices IP, IK, SDT, SE y SP indican que no hay restricción para el uso del agua de BA en el riego agrícola. Sin embargo, el RAS y la CE indican ligero a severo efecto en la infiltración en el 100% de los BA. De acuerdo al CSR, en el 33% de los BA existiría un ligero riesgo de sodicidad y según el índice PSP este riego se presentaría en el 11% de los casos; el agua de los BA es dulce y con base al índice RASaj el 100% de los BA presentan una tendencia a precipitar el carbonato de calcio.

El uso del agua de BA en el riego no tendría efectos negativos sobre el rendimiento relativo de cultivos forrajeros de la región.

En general, el agua de bordos de almacenamiento en las tres microrregiones es de buena calidad para el riego, situación inversa a la de algunos pozos profundos que actualmente se utilizan para riego en el estado, en los cuales se reportan problemas de salinidad y sodicidad. Sin embargo, es necesario evaluar la aptitud del agua de bordos en conjunto con las características edafo-climáticas del sitio para definir las prácticas de manejo requeridas para incrementar la productividad del agua y los cultivos como es el uso del riego por goteo conjuntamente con la técnica de fertigración para satisfacer la demanda nutrimental durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo.

## **2.5. LITERATURA CITADA**

Akhtar, M., Hassan, F. U., Ahmed, M., Hayat, R. & Stöckle, C. O. 2016. Is rainwater harvesting an option for designing sustainable cropping patterns for rainfed agriculture? *Land degradation & development* 27: 630-640.

Ali, K., Momin, G. A., Tiwari, S., Safai, P. D., Chate, D. M. & Rao, P. S. P. 2004. Fog and Precipitation Chemistry at Delhi, North India. *Atmospheric Environment* 38: 4215-4222.

- Aragües, L. R. 2011. Agricultura y calidad de aguas a nivel fuente y sumidero. Riego y drenajes XXI 182: 24-33.
- Ávila, O. A., Cruz, S. M., Giron, G. P. y Salcedo, L. C. 2009 Índices de calidad del agua de la laguna de Zupitlan, Municipio de Acatlán, Estado de Hidalgo, memorias en extenso de la I Semana Nacional y XXII Semana de la Investigación y la Docencia en Química, Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F. pp: 370-379.
- Ayers, R. S. & Westcot, D. W. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1. Rome, Italy. 174 p.
- Balmaseda, C., Ponce, L. D., Martín, N. J. & Vargas, H. 2006. Compendio de Suelo. Facultad de Agronomía, Departamento de Riego, Drenaje y Ciencias del Suelo. Universidad Agraria de la Habana, Fructuoso Rodríguez Pérez. 288 p.
- Blasco, F. y de la Rubia, J. 1973. Guía para clasificar las aguas en relación con su calidad para el riego. Instituto para la Reforma y Desarrollo Agrario (IRY-DA). Madrid.
- Bower, C. A. & Wilcox, L. V. 1965. Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. Soil Science Society of America, Proceedings 29: 93-94.
- Brindha, K. & Elango, L. 2011. Hydrochemical characteristics of groundwater for domestic and irrigation purposes in Madhuranthakam, Tamil Nadu, India. Earth Sciences Research Journal 15 (2):101-108.
- Castellanos, J. Z., Uvalle, B. J. X. y Aguilar, S. A. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP. 2da edición. INTAGRI. México. 201 p.
- Cobbina, S. J., Michael, K., Salifu, L. & Duwiejua, A. B. 2013. Rainwater quality assessment in the Tamale Municipality. International Journal of Scientific & Technology Research 2: 1-10.
- CONAGUA. 2015. Disponibilidad por acuíferos San Luis Potosí. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/san-luis-potosi-74838>. Fecha de consulta: 22 de enero de 2018.

- CONAGUA. 2016. Atlas del agua en México 2016. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: [http://201.116.60.25/publicaciones/AAM\\_2016.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf). Fecha de consulta: 22 de enero de 2018.
- Cortés, J. J. M. 2008. Parámetros de calidad del agua procedente del acuífero del Valle de Yaqui, Sonora, e índices de riesgo asociados a su uso agrícola en suelos arcillosos. Tesis Doctoral. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. México.
- Diario Oficial de la Federación. 2005. Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación. México. México, D.F. Recuperado de: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/230ssa102.html>. Fecha de consulta: 19 de marzo de 2016.
- Doneen, L. D. 1964. Notes on water quality in agriculture. Davis: Water Science and Engineering, University of California. 400 p.
- Doneen, L. D. 1975. Water quality for irrigated agriculture. In: Plant in Saline Environments Poljakoff-Mayber, A. and J. Gale (editors). Ecological Studies. Springer Verlag, NY. 15: 56-76.
- Eaton, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Science 69: 123-133.
- FAO. 2013. Afrontar la escasez de agua, un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 97 p.
- García, H. Y. 2015. Calidad del agua con fines de riego. Revista Digital de Medio Ambiente "Ojeando la agenda" 35: 1-12. ISSN 1989-6794.
- García, O. A. 2012. Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua de riego (Primera parte). Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 6: 27-34.

- González-Acevedo, Z. I., Padilla-Reyes, D. A. & Ramos-Leal, J. A. 2016. Quality assessment of irrigation water related to soil salinization in Tierra Nueva, San Luis Potosi, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 33 (3): 271-285.
- Helmreich, B. & Horn, H. 2009. Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination* 248: 118-124.
- INEGI. 2006. Carta topográfica de precipitación media anual. Mapa Digital de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=Bgf0OjI0Ljc5ODMyLGxvbjotOTguMzI1MjAsejoyLGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3x0YzExMXNlcnZpY2lvcw==>. Fecha de consulta: 06 de marzo de 2018.
- INEGI. 2008. Carta topográfica de unidades climáticas. Mapa Digital de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjI0Ljc5ODMyLGxvbjotOTguMzI1MjAsejoyLGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3x0YzExMXNlcnZpY2lvcw==>. Fecha de consulta: 06 de marzo de 2018.
- INEGI. 2011. Carta topográfica de uso del suelo y vegetación. Mapa Digital de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjI0Ljc5ODMyLGxvbjotOTguMzI1MjAsejoyLGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3x0YzExMXNlcnZpY2lvcw==>. Fecha de consulta: 06 de marzo de 2018.
- Kahinda, J. M., Rockstrom, J., Taigbenu, A. E. & Dimes, J. 2007. Rainwater harvesting to enhance water productivity of rainfed agriculture in the semi-arid Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth* 32: 1068-1073.
- Kelly, W. P. 1951. Alkali soils – their formation, properties and reclamation. 3rd ed. Reinhold, New York. 92 p.
- Klaus-Dieter, B. 2008. Case Study “Rainwater Harvesting”. In *Agricultural Technologies for Developing Countries*. European Parliament. Science Technology Options Assessment (STOA).
- Kotuby-Amacher, J., Koenig, R. & Kitchen, B. 2000. Salinity and plant tolerance. Electronic publishing. AG-SO-03. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/pu>

blication/237537841 SALINITY AND PLANT TOLERANCE. Fecha de consulta:  
01 de mayo de 2018.

- Lee, J. Y., Yang, J. S., Han, M. & Choi, J. 2010. Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. *Science of the Total Environment* 408: 896-905.
- Mahato, M. K., Singh, P. K., Singh, A. K. & Tiwari, A. K. 2016. Assessment of major ionic compositions and anthropogenic influences in the rainwater over a coal mining environment of Damodar River basin, India. *Pollution* 2 (4): 461-474.
- Medina, V. E. K., Mancilla, V. O. R., Larios, M. M., Guevara, G. R. D., Olguín, L. J. L. y Barreto, G. O. A. 2016. Calidad del agua para riego y suelos agrícolas en Tuxcauesco, Jalisco. *IDESIA*. 34 (6): 51-59.
- Melidis, P., Akrotos, C. S., Tsihrintzis, V. A. & Trikilidou, E. 2007. Characterization of rain and roof drainage water quality in Xanthi, Greece. *Environmental monitoring and assessment* 127: 15-27.
- Naidu, R. & Rengasamy, P. 1993. Ion interaction and constraints to plant nutrition in Australian sodic soil. *Australian Journal Soil Science* 31:801-819.
- Orta, S. R. 2006. La empresa de jardinería y paisajismo: mantenimiento y conservación de espacios verdes. 3da edición. S. A. Mundi-Prensa Libros. España. 544 p.
- Oweis, T. & Hachum, A. 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management* 80: 57-73.
- Palacios, V. O. y Aceves, N. E. 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. 49 p.
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., Clark, E., Poon, E., Abbett, E. & Nandagopal, S. 2004. Water Resources: Agricultural and Environmental Issues. *BioScience* 54 (10): 909-918.

- Quispe, M. J. G. 2016. Evaluación de la calidad físico química y bacteriológica del agua de riego de la estación experimental de Cota. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia.
- Ramos-Leal, J. A., López-Álvarez, B., Santacruz-De León, G., Almanza-Tovar, O., Morán-Ramírez, J., Padilla-Reyes, D. A. & González-Acevedo, Z. I. 2016. Quality indices of groundwater for agricultural use in the region of Tierra Nueva, San Luis Potosí, Mexico. *Arabian Journal of Geosciences* 9: 736.
- Reyna, T. T., Villegas, S. M. y Gómez, T. R. A. 1980. Estudio edáfico climático del Ejido El Rosario y los potreros EL Chivato y Granadillas, en Villa de Reyes, San Luis Potosí. *Investigaciones geográficas* 10: 181-207.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A. & Mashali, A. M. 1992. The use of saline waters for crop production. *FAO Irrigation and Drainage*, 48. Rome, Italy. 133 p.
- Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of Saline and Alkali Soils. US Department of Agriculture Handbook 60, Washington, DC. 166 p.
- Rosegrant, M., Cai, X., Cline, S. & Nakagawa, N. 2002. The role of rainfed agriculture in the future of global food production. Environment and production technology division discussion paper 90.
- Sarabia, M. I. F., Cisneros, A. R., Aceves, A. J., Durán, G. H. M. y Castro, L. J. 2011. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del Valle de San Luis Potosí, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 27 (2): 103-113.
- Sazakli, E., Alexopoulos, A. & Leotsinidis, M. 2007. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Research* 41: 2039-2047.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1989. Criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89.
- SEDUCOP. 2012. Plan Estatal de Desarrollo Urbano de San Luis Potosí 2012 – 2030. Secretaría de Desarrollo Urbano, Comunicaciones y Obras Públicas. San Luis Potosí, México.

- Sparks, D. L. 1995. Environmental Soil Chemistry, Academic Press, Inc. San Diego, California. 269 p.
- Stevens, R. G. 1994. Water quality and treatment considerations. In: K. E. Williams and T. W. Ley (eds). Tree fruit irrigation: A comprehensive manual of deciduous tree fruit irrigation needs. Good Fruit Publishing (Washington State Fruit Commission). Yakima. WA. pp 115-125.
- Uba, B. N. & Aghogho, O. 2000. Rainwater quality from different roof catchments in the Port Harcourt district, Rivers State, Nigeria. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA. 49 (5): 281-288.
- Vásquez, V. A. 2000. Manejo de cuencas Alto Andinas. Tomo I. Ed. Firmart. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú. 516 p.
- Villanueva, D. J. y Hernández, R. A. 2001. Calidad de agua en tres áreas de San Luis Potosí y su efecto en la producción de cultivos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Folleto técnico Número 13. 32 p.
- Wilcox, L. V. 1948. The Quality of Water for Irrigation. Department of Agriculture. Tech Bulletin 962. Washington. D. C. 40 p.
- Younos, T. M., Bohdan, R., Anderson, E., Ramsey, K. A., Cook, N., Ross, B. & Dillaha, T. 1998. Evaluation of rooftop rainfall collection-cistern storage systems in Southwest Virginia. Blacksburg, VA 24061. 42 p.

## CAPÍTULO 3. PRODUCCIÓN DE FORRAJE CON AGUA DE ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN UN AMBIENTE SEMIÁRIDO

### RESUMEN

Una estrategia viable para enfrentar la situación de escasez de agua para la ganadería extensiva en regiones semiáridas, es la cosecha de agua de lluvia en bordos de almacenamiento. Asimismo, parte del agua almacenada puede ser aprovechada para la producción de cultivos forrajeros en pequeñas superficies del agostadero, donde se contemple la implementación de tecnologías que contribuyan a mejorar el uso eficiente del agua y la aplicación de nutrimentos, como son el riego por goteo y la fertigación. Con base en lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la producción de forraje bajo irrigación con pequeños volúmenes de agua. Para lo cual, en marzo del 2017, se estableció un módulo forrajero (1 000 m<sup>2</sup>) a 85 m de un bordo de almacenamiento ubicado en El Sotol, Venado, S. L. P. Cabe mencionar, que previo a la siembra, se realizó la preparación del terreno y la fertilización de fondo. Para evaluar la respuesta del maíz, triticale y pasto sudán a la aportación nutrimental e hídrica, se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones. Durante el ciclo de cultivo, se evaluó: altura, producción de biomasa verde y seca, proteína cruda, fibra detergente neutro y fibra detergente ácido; estas variables fueron analizadas mediante un análisis de varianza y prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). Además se calculó el índice de productividad del agua por cultivo (IPA). El maíz fue el cultivo que produjo la mayor cantidad de biomasa verde (30.9 t ha<sup>-1</sup>); sin embargo, el forraje de mayor calidad (10.2 %PC, 46.5 %FDN y 22.1 %FDA) fue el triticale, mientras que el IPA más alto se obtuvo en el pasto sudán (4.1 kg m<sup>-3</sup>). Los resultados encontrados en el presente trabajo indican la viabilidad de producir forraje de buena calidad nutrimental utilizando un bajo volumen de agua de lluvia en áreas de agostadero, lo cual podría representar una solución para los problemas de baja disponibilidad de forraje en época de estiaje.

**Palabras clave:** agua de lluvia, riego por goteo, fertigación, cultivos forrajeros, índice de productividad del agua.



## ABSTRACT

A viable strategy to face the water scarcity situation for extensive livestock in semi-arid regions is the harvesting of rainwater at earth dams. Also, part of the stored water can be used for the production of forage crops in small areas of the rangeland, where the implementation of technologies that contribute to improve the efficient use of water and the application of nutrients, such as drip irrigation and fertigation. Based on the above, the objective of the present investigation was to evaluate the forage production under irrigation with small volumes of water. For which, in March of 2017, a forage module (1 000 m<sup>2</sup>) was established at 85 m from an earth dams located in El Sotol, Venado, SLP. It should be mentioned that, prior to planting, land preparation was carried out and bottom fertilization. To evaluate the response of maize, triticale and Sudan grass to nutrient and water contribution, a completely randomized block design with three replications was used. During the crop cycle, height, production of green and dry biomass, crude protein, neutral detergent fiber and acid detergent fiber were evaluated; these variables were analyzed using an analysis of variance and Tukey's test ( $p < 0.05$ ). In addition, the water productivity index by crop (WPI) was calculated. Corn was the crop that produced the highest amount of green biomass (30.9 t ha<sup>-1</sup>); however, the highest quality forage (10.2% CP, 46.5% NDF and 22.1% ADF) was triticale, while the highest WPI was obtained in Sudan grass (4.1 kg m<sup>-3</sup>). The results found in the present work indicate the viability of producing forage of good nutritional quality using a low volume of rainwater in rangeland areas, which could represent a solution for the problems of low forage availability during the dry period.

**Keys words:** rainwater, drip irrigation, fertigation, forage crops, water productivity index.

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Las regiones semiáridas de México se caracterizan por tener un déficit hídrico muy severo, la precipitación anual es menor a 300 mm y la evapotranspiración mayor a 2 000 mm (Cortés *et al.*, 2009). Debido al cambio climático, la sequía se acentúa en el país porque no sólo es un evento estacional, sino que sus efectos duran entre dos y tres años, influyendo en las actividades agropecuarias (Suárez, 2011). A causa de la sequía no hay suficiente agua en los agostaderos y no se desarrollan las plantas forrajeras. Además, en áreas de irrigación, la sobreexplotación de los acuíferos genera abatimiento de los mismos, y se incrementa la extracción de agua con contenido de elementos no aptos para su consumo y con ciertas restricciones para uso agrícola y pecuario (Rojas y Serrano, 2007).

Por lo tanto, la baja disponibilidad de agua representa un reto para la sustentabilidad de los sistemas de producción, debido al aumento de la evapotranspiración, producto del incremento de la temperatura ambiente, lo cual incrementa los requerimientos de agua por los cultivos (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). Por lo cual, es importante impulsar tecnologías que contribuyan a mejorar el uso eficiente del agua y nutrimentos, tal es el caso del riego por goteo por gravedad y la fertigación.

En San Luis Potosí, durante el ciclo primavera-verano 2017, se sembraron 15 579 hectáreas de cultivos forrajeros (12 346 ha de avena, 2 624 ha de maíz y 609 ha de sorgo), de las cuales la superficie de forraje bajo riego fue solamente de 1 746 hectáreas (SIAP, 2017). Cabe señalar, que bajo condiciones de agostadero, la disponibilidad de forraje es adecuada únicamente de junio a noviembre y es escasa durante el resto del año (Cervantes *et al.*, 2014). Una alternativa para reducir el impacto negativo de la sequía sobre la ganadería extensiva, es la producción de forraje bajo riego por goteo para su aprovechamiento en la etapa crítica del año, este sistema de riego ha mostrado ser una técnica eficiente de irrigación para regiones áridas (Bar-Yosef, 1999).

En San Luis Potosí, alrededor de 58 960 hectáreas han sido tecnificadas con riego presurizado (SEDARH, 2017). Además, existen cultivos forrajeros con alta capacidad para producir biomasa. Estrada-Campuzano *et al.* (2012) reportan alta producción de biomasa y rendimiento de grano de triticale. El maíz forrajero, puede producir entre 40 a

95 t ha<sup>-1</sup> de biomasa, en cuatro meses (Wang-Yeong *et al.*, 1995) con un valor nutritivo de bueno a excelente, dependiendo de la etapa fenológica al momento de la cosecha (Aldrich y Leng, 1974), así como del manejo nutrimental del cultivo.

Con respecto a la infraestructura hidro-pecuaria, las obras de captación de agua superficial son de baja capacidad, en las cuales se estima que sólo se aprovecha el 7% del volumen almacenado, el resto del recurso hídrico se pierde por evaporación e infiltración (CONAGUA, 2006). En el mejor de los escenarios, el agua cosechada dura de uno a tres meses después de la época de lluvias (Frasier y Myers, 1983), lo cual indica baja eficiencia en la conservación de este recurso. Razón por la cual, es importante proponer alternativas para incrementar la eficiencia y el aprovechamiento del agua almacenada. Una opción es la producción de forraje mediante riego localizado, el cual permite ahorrar agua, incrementar su productividad e inyectar el fertilizante en la zona radical del cultivo (Bar-Yosef, 1999).

Al respecto, varios estudios reportan un incremento del rendimiento y productividad del agua bajo este sistema (Maisiri *et al.*, 2005; Aujla *et al.*, 2007; Broa-Rojas *et al.*, 2013). Para producir 1 kg de maíz forrajero se requieren 0.175 m<sup>3</sup> de agua (Pedroza *et al.*, 2014) y para pasto sudán 0.369 m<sup>3</sup> de agua (Al-Solaimani *et al.*, 2017). En otras investigaciones se ha demostrado el potencial del agua de lluvia en la irrigación deficitaria de cultivos en zonas áridas, en las cuales se ha obtenido un incremento sustancial de la productividad del agua de 0.75 kg m<sup>-3</sup> (de 0.35 a 1.00 kg m<sup>-3</sup>) de grano de trigo (Oweis y Hachum, 2006), asimismo, Akhtar *et al.* (2016) obtuvieron 1.45 kg m<sup>-3</sup> de productividad en este cultivo.

Con base en la información antes expuesta y considerando la importancia de la ganadería en las zonas semiáridas del país, así como los factores que limitan la producción de forraje en cantidad y calidad, se estableció el presente trabajo de investigación, el cual tuvo como objetivo evaluar el rendimiento y calidad de forraje de maíz, triticale y pasto sudán, en respuesta a la fertigación mediante riego por goteo por gravedad, como una alternativa de producción de forraje para aprovechar el recurso hídrico captado en bordos de almacenamiento.

## 3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.2.1. Localización

El experimento se llevó a cabo durante el ciclo primavera-verano del 2017 (del 15 de marzo al 29 de julio) en el ejido El Sotol, municipio de Venado, San Luis Potosí (Figura 3.1). La comunidad, se ubica geográficamente a 22° 56' de Latitud Norte y 101° 06' de Longitud Oeste a una altitud de 1 790 m, dentro de la cuenca hidrológica El Salado. El municipio cuenta con corrientes superficiales intermitentes que permiten la recarga de pequeñas presas y vasos de captación, los cuales se localizan principalmente en los valles, donde el agua es aprovechada en las actividades ganaderas y agrícolas de riego (Álvarez, 2010). El clima es semiárido templado. Los pastizales nativos son la vegetación predominante (INEGI, 2011). En su mayoría el tipo de suelo es el Calcisol pétrico, fuertemente cementados o endurecidos en los primeros 100 cm, se caracterizan por acumular carbonatos secundarios producto de depósitos aluviales y coluviales o eólicos de materiales alterados ricos en bases. Se asocian con clima árido o semiárido, en ambientes con elevada evapotranspiración. Las zonas colindantes se usan para la ganadería de pequeños rumiantes.

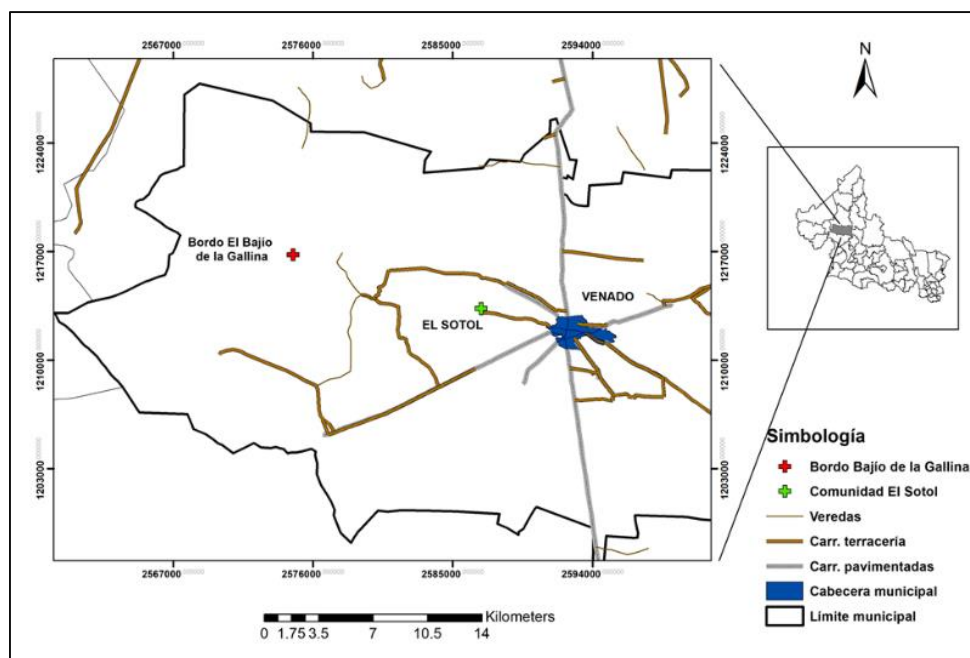


Figura 3.1. Ubicación de la comunidad y del bordo de almacenamiento de agua para el establecimiento del experimento con cultivos forrajeros.

Durante el periodo del experimento y con base en datos de la estación meteorológica Charcas del INIFAP (2017), ubicada a 28.7 km del sitio de estudio, la temperatura mínima mensual osciló entre 8.4 y 13.8°C, mientras que la máxima mensual varió entre 26.3 y 32.8°C (Cuadro 3.1). La precipitación acumulada fue de 243 mm y la evapotranspiración de 623.9 mm, cuya distribución se muestra en la Figura 3.2. El cociente de precipitación/evapotranspiración potencial fue de 0.389, lo que indica un faltante de precipitación en la zona. Cabe mencionar que sólo se presentaron dos eventos significativos de precipitación (46.4 y 40.0 mm) en el área de estudio en la segunda quincena de junio, lo cual evidencia baja disponibilidad de agua para la producción de forraje.

Cuadro 3.1. Datos de temperatura de la estación Charcas (INIFAP) del 15 de marzo al 29 de julio de 2017.

Variable	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Media
Temperatura mínima (°C)	8.4	10.0	12.8	13.8	13.5	11.7
Temperatura máxima (°C)	28.8	29.6	32.8	31.8	26.3	29.9

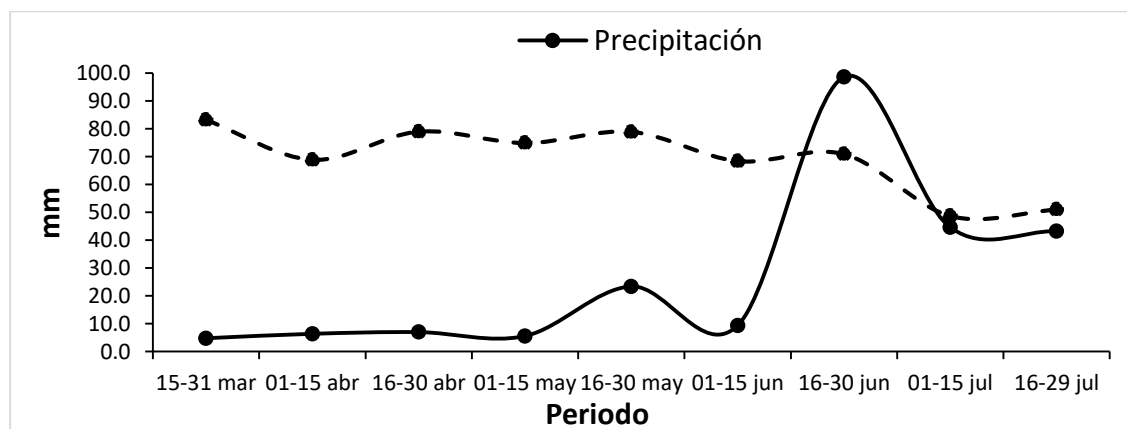


Figura 3.2. Distribución de la precipitación y evapotranspiración durante el periodo de desarrollo de los cultivos.

### 3.2.2. Análisis de fertilidad del suelo y composición química del agua

Previo al establecimiento del experimento, en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del Postgrado en Hidrociencias del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, se realizó

el análisis de la fertilidad del suelo (Cuadro 3.2), de una muestra compuesta (mezcla de cinco submuestras colectadas en el sitio experimental -1 000 m<sup>2</sup>- a una profundidad de 30 cm), así como la composición química del agua captada en el bordo de almacenamiento (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.2. Características físicas y químicas del suelo en el módulo de producción.

pH	CE	Iones intercambiables					CIC	MO	N <sub>T</sub>	R. C/N
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	P <sup>3+</sup>				
7.96	0.162	8 818	340	0	684	18 830	48.55	2.96	0.15	11.44

CE) dS m<sup>-1</sup>; Ca, Mg, Na, K y P) mg kg<sup>-1</sup> de suelo; CIC) cmol kg<sup>-1</sup>; MO y N<sub>T</sub>) %; R. C/N) adimensional.

La textura del suelo fue franca (36% de arena, 36% de limo y 28% de arcilla), el contenido de materia orgánica (MO), nitrógeno total (N<sub>T</sub>), fósforo (P) y magnesio (Mg) se consideran medios, con altos contenidos de calcio (Ca) y potasio (K). Con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) baja. La relación C/N indica una buena velocidad de mineralización de la MO presente en el suelo (Villarreal, 1988).

Con respecto a las propiedades químicas del agua (Cuadro 3.3), su pH de 7.51, indica que es alcalina y de acuerdo a la CE (0.373 dS m<sup>-1</sup>) se considera sin riesgo de salinidad para su uso agrícola (Ayers y Westcott, 1985). No se detectaron carbonatos. El anión de mayor concentración fue el bicarbonato (3.0 meq L<sup>-1</sup>) y el catión fue Ca<sup>2+</sup> (1.8 meq L<sup>-1</sup>).

Cuadro 3.3. Análisis químico del agua del bordo de almacenamiento El Bajío de la Gallina.

pH	CE dS m <sup>-1</sup>	Aniones (meq L <sup>-1</sup> )				Total	Cationes (meq L <sup>-1</sup> )				Total
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		
7.51	0.373	3.00	0.80	0.22	4.02	1.80	0.60	0.80	0.64	3.84	

### 3.2.3. Establecimiento del módulo forrajero mediante riego por goteo por gravedad

Se estableció un módulo forrajero experimental dentro del agostadero a 85 m de la cortina del bordo de almacenamiento El Bajío de la Gallina, ubicado a 21.3 km de la comunidad El Sotol. La superficie total del módulo fueron 1 000 m<sup>2</sup>, posterior a la limpieza

y preparación del terreno, se excluyó la periferia del módulo con el fin de evitar daños por fauna silvestre. El diseño agronómico del módulo forrajero se muestra en la Figura 3.3, el cual estuvo conformado por 40 camas de cultivo, cada cama tuvo una longitud de 24 m, con una anchura y profundidad de 0.7 X 0.3 m, respectivamente y una separación entre camas de 1 m. Para tener un mejor control del manejo del agua y fertilizantes, el módulo se dividió en cuatro secciones de riego (240 m<sup>2</sup> cada una) con un control independiente, el agua se distribuyó en un circuito cerrado y cada cama de cultivo fue equipada con dos mini-válvulas (llaves) al inicio y final de la misma. Para suministrar el riego y fertigar se utilizó un depósito con capacidad de 1 100 litros, el cual fue colocado sobre la cortina del bordo de almacenamiento para irrigar por gravedad. Para evitar el paso de partículas de arena e impurezas de los fertilizantes que obstruyeran los emisores (goteros) de las líneas de riego a nivel parcela, se colocó un filtro a la salida del depósito.

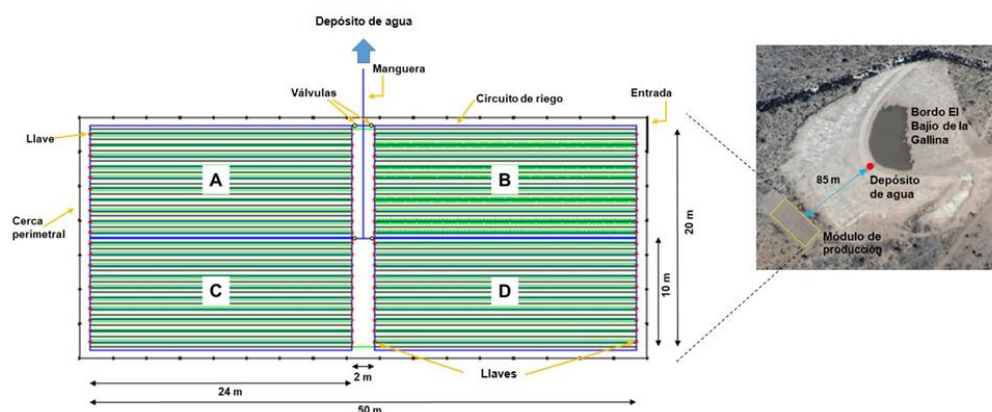


Figura 3.3. Diseño agronómico del módulo forrajero en la comunidad El Sotol, Venado, S. L. P. A) triticale; B) maíz; C) mijo perla y D) pasto sudán (elaboración propia).

**Diseño experimental.** Para evaluar la respuesta de los cultivos triticale, maíz y pasto sudán a un manejo que varió en cuanto a la aportación nutrimental e hídrica, se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones.

**Siembra o trasplante de cultivos forrajeros.** Previo a la siembra o trasplante de los cultivos, se realizó una fertilización de fondo (49 kg de superfosfato de calcio simple, 26 kg de sulfato de amonio, 10 kg de cloruro de potasio y 300 kg de estiércol ovino seco

para las 40 camas de cultivo). El fertilizante se distribuyó en banda en cantidades iguales por cama de cultivo y a una profundidad de 10 a 12 cm. Asimismo, se aplicó un riego de pre-siembra o trasplante.

La distribución de los cultivos se presenta en la Figura 3.3, en las secciones A, C y D, se sembró triticale (*x Triticosecale* Wittmack), mijo perla (*Pennisetum glaucum* L.) y pasto sudán (*Sorghum sudanense* Piper), respectivamente, la cual fue a chorrillo a una profundidad aproximada de 5 cm. Mientras que en la sección B, se trasplantaron plántulas de maíz (*Zea mays* L.) variedad NH5 de 27 días (siembra a trasplante). En todos los casos se utilizó un arreglo topológico a doble hilera. La distancia entre hileras y plántulas de maíz fue de 15 cm cuya densidad de población fue de 12.2 plantas m<sup>-2</sup>; para triticale, mijo perla y pasto sudán las densidades de siembra fueron de 68.8, 37.5 y 12.5 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

#### 3.2.4. Manejo agronómico de los cultivos forrajeros

**Riego.** Debido a que los cultivos seleccionados para la investigación tienen diferente requerimiento de agua, se aplicaron distintas láminas de agua. En triticale y maíz se aplicaron 113 y 175 mm ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Para mijo perla y pasto sudán se utilizó la misma lámina de agua (75 mm ha<sup>-1</sup>). El número de riegos y volumen total de agua aplicado se presenta en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Suministro de agua a través de todo el ciclo de producción de cuatro cultivos forrajeros.

Cultivo	Número total de riegos	Volumen total de agua aplicado (m <sup>3</sup> )
Triticale	54	27
Maíz forrajero	64	42
Mijo perla	36	18
Pasto sudán	36	18
Total		105



**Fertigación.** Los nutrimentos NPK fueron aportados al sistema radical mediante la técnica de fertigación. En el Cuadro 3.5 se presenta la cantidad total de fertilizante aplicado por hectárea y por sección del módulo forrajero de acuerdo a cada cultivo. El suministro de nutrimentos en el cultivo de maíz fue aplicado en los 54 riegos, en triticale en los últimos 29 riegos y en los 10 riegos finales en mijo perla y pasto sudán. Las fuentes de nutrimentos utilizadas para triticale y maíz fueron: nitrato de potasio, sulfato de amonio y poly feed (19-19-19). Para mijo perla y pasto sudán se empleó únicamente el sulfato de amonio.

Cabe señalar que en el cultivo de mijo perla se tuvieron problemas de emergencia de la plántula por lo que no fue posible evaluar su desarrollo y producción de forraje.

Cuadro 3.5. Fórmulas de fertilización y nutrimentos aportados mediante el riego de cuatro cultivos forrajeros.

Cultivo	Fórmula de fertilización (kg ha <sup>-1</sup> )			Total de nutrimentos aplicados (kg 240 m <sup>-2</sup> )		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Triticale	101	51	98	2.4	1.2	2.3
Maíz forrajero	262	133	233	6.3	3.2	5.6
Mijo perla	21	0	0	0.5	0.0	0.0
Pasto sudán	21	0	0	0.5	0.0	0.0
Total				9.7	4.4	7.9

**Fertilización foliar.** Con la finalidad de facilitar el establecimiento de las plántulas de maíz, se realizaron dos aspersiones foliares con nitrógeno [9 y 17 días después del trasplante (DDT)]. La concentración de la solución aplicada fue de 0.23% de nitrógeno utilizando como fuente la urea. Para determinar el efecto de la fertilización foliar sobre la calidad del forraje (proteína cruda) de maíz y triticale, se asperjó una solución nutritiva al inicio de la floración. Para maíz a partir de los 93 DDS se llevaron a cabo cuatro aplicaciones foliares de nitrógeno. Como fuente se utilizó urea 1% N de concentración en cinco camas de cultivo. Para el caso de triticale, sólo se realizó una aspersión (93 DDS) de nitrato de potasio, cuya concentración fue de 0.33% de N y 1.0% de K.

**Control de plagas.** Únicamente el cultivo de maíz fue afectado por una plaga (gusano cogollero) durante el periodo (59 a 89 DDT), la cual fue controlada con cuatro aplicaciones de los productos Controla 480 (2) y Decis Forte (2) en dosis de 1 mL de producto por litro de agua.

### 3.2.5. Variables evaluadas

**Altura de la planta.** A partir de los 66 DDT o DDS (maíz y triticale, respectivamente) y a los 79 DDS (pasto sudán) se determinó la altura de las plantas. Cabe mencionar que en el cultivo de maíz se realizaron seis mediciones, en pasto sudán cinco y cuatro en triticale (Cuadro 3.6) debido al desarrollo de cada cultivo.

Cuadro 3.6. Número de evaluaciones de altura de plantas realizadas durante el desarrollo de tres cultivos forrajeros bajo riego.

Número de muestreo	Maíz (DDT)	Triticale (DDS)	Pasto sudán (DDS)
1	66	66	79
2	79	79	93
3	93	93	115
4	115	98	128
5	128		136
6	136		

DDT) Días después del trasplante; DDS) Días después de la siembra

### Muestras destructivas

Se realizaron dos muestreos destructivos en los cultivos de maíz y triticale, el primero a los 93 DDS (triticale) o DDT (maíz) y el segundo al momento de la cosecha. El pasto sudán sólo se muestreó al final del ciclo del cultivo. En ambos muestreos se tomaron 12 submuestras por sección de cultivo (en las cuatro camas centrales) y posteriormente se integraron tres muestras compuestas por cultivo. Cada submuestra, se obtuvo en un metro lineal de la cama y se cortó el forraje 5 cm arriba de la superficie del suelo. Las muestras fueron colocadas en bolsas de papel rotuladas para su posterior análisis.

**Variables de rendimiento del forraje.** En las muestras recolectadas se determinó el peso del forraje verde (FV) en gramos, posteriormente, las muestras se secaron en la estufa a 60°C durante 72 horas y se determinó el peso de la materia seca (MS), para lo cual se utilizó una balanza digital. Asimismo se calculó el % humedad utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad} = \frac{FV - MS}{MS} * 100$$

**Índice de productividad del agua.** Para calcular este índice se consideró la producción de materia seca y la cantidad de agua utilizada por cultivo (la aplicada en el riego y la precipitación efectiva).

**Variables de calidad del forraje.** En el laboratorio de Nutrición de rumiantes del Postgrado de Ganadería del Campus Montecillo-CP, se determinó el porcentaje de Proteína Cruda (% PC), Fibra Detergente Neutro (% FDN) y Fibra Detergente Ácido (% FDA). Previo a las determinaciones, las muestras se procesaron en un molino Wiley con malla de 1 mm. Las plantas de triticale y de pasto sudán se molieron completas, mientras que del maíz se excluyó el elote. Posteriormente se determinó el peso seco total (PS<sub>T</sub>) de las muestras (requerido para las estimaciones de PC, FDN y FDA) en la mufla a 105°C por 24 horas.

El % PC se estimó mediante el método de microKjeldahl (AOAC, 1970) y las fibras FDN y FDA se obtuvieron por el método de Van Soest (1994) en el analizador de fibra ANKOM<sup>200</sup>. Todas las determinaciones se hicieron por duplicado. Adicionalmente se estimó el contenido de proteína por metro cuadrado a la cosecha para cada cultivo, multiplicando el rendimiento de materia seca (MS) por el % PC.

### **3.2.6. Análisis estadístico**

Para comparar el comportamiento a la cosecha de los tres cultivos se realizó un análisis de varianza para las variables de rendimiento y calidad de forraje. Los datos fueron analizados mediante el programa Infostat V. 17/11/2016. Para todas las variables se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey a un nivel del 5% de significancia.

### 3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La emergencia de las semillas de triticale y pasto sudán inició a los 8 y 17 DDS, respectivamente; sin embargo, la nacencia de pasto sudán se homogeneizó hasta los 76 DDS. Bande *et al.* (2015) mencionan que la nacencia del pasto sudán es lenta, escalonada y poco uniforme cuando la temperatura durante el primer mes (8.4 °C) es inferior al umbral del cultivo (<10 °C). Por otro lado, a los 93 DDS o DDT, debido al bajo nivel del agua en el bordo de almacenamiento, se suspendió el riego durante dos semanas. El ciclo de cultivo para maíz fue de 163 días, 98 para triticale y 136 para pasto sudán.

**Altura de planta.** La altura final alcanzada por el triticale fue de 52.8 cm. La cual es menor a la reportada por Mendoza-Elos *et al.* (2011) y García (2015) quienes obtuvieron alturas que varían entre 83.0 y 88.6 cm para este cultivo en densidades de siembra semejantes. Cabe mencionar que a altas densidades de siembra se incrementa la altura de la planta de triticale (Mendoza-Elos *et al.*, 2011); sin embargo, en este estudio el triticale no mostró este comportamiento, lo cual puede atribuirse al bajo volumen de agua que se aplicó (113 mm ha<sup>-1</sup>) durante el desarrollo del cultivo, a diferencia del volumen de agua disponible para el desarrollo del cultivo establecido por los autores antes señalados (600 a 1 000 mm de precipitación). La lámina de agua utilizada en el presente estudio se justifica por el riego deficitario, técnica mediante la cual se aplica menos agua que la requerida por el cultivo, aceptando cierta disminución del rendimiento (Rodríguez *et al.*, 2014), con la finalidad, de hacer un uso óptimo de agua en áreas donde se tiene escasez del recurso hídrico (Kirda, 2002), situación propia del área de estudio.

El maíz tuvo un porte muy bajo (137.4 cm) en comparación con los resultados obtenidos por Núñez *et al.* (2015), quienes reportan alturas de 184 a 268 cm, las cuales se consideran de porte bajo a medio. Para la producción de maíz para forraje se reportan láminas de agua de 500 a 800 mm (Jurado *et al.*, 2014), en el presente estudio se utilizó una lámina de 175 mm ha<sup>-1</sup>, lo cual puede explicar la menor altura de plantas. Con respecto al pasto sudán, su altura (170 cm) fue mayor a las reportadas por Al-Solaimani *et al.* (2017) e Ismail *et al.* (2017), las cuales fueron de 116 y 99.5 cm, respectivamente.

En la siguiente figura se muestra el desarrollo vegetativo de los cultivos establecidos en el módulo forrajero.

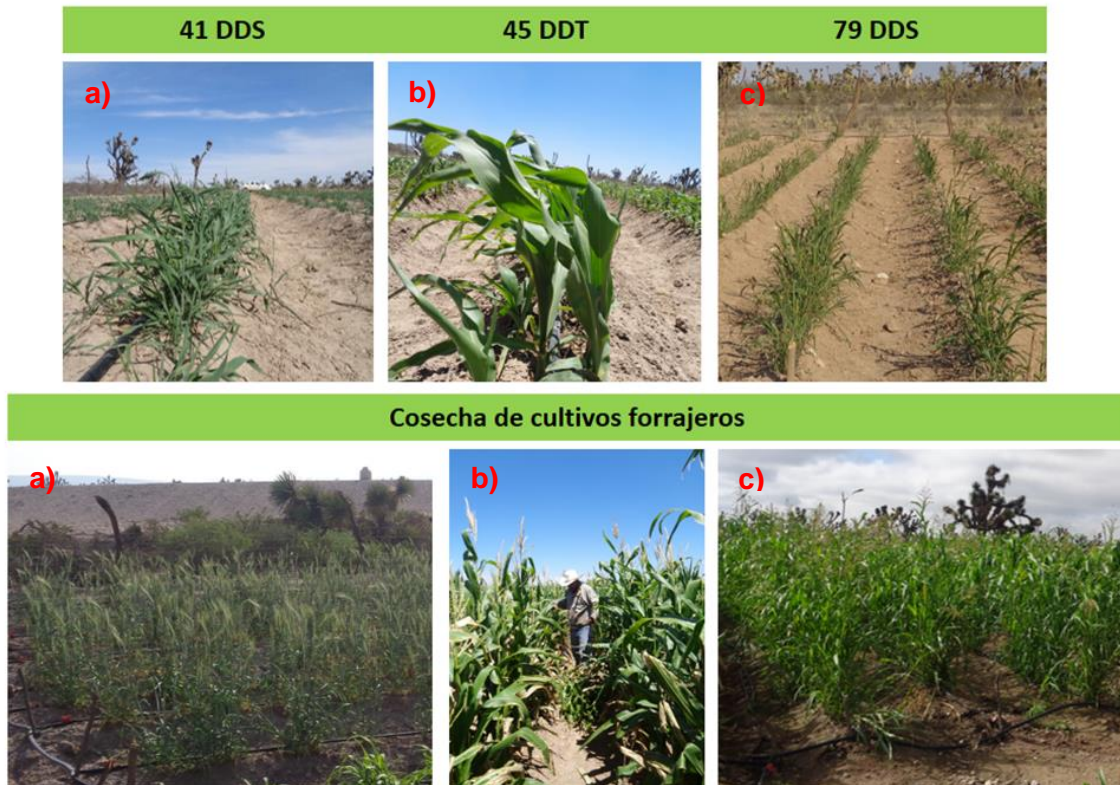


Figura 3.4. Desarrollo de cultivos forrajeros en el módulo de producción. a) triticale; b) maíz; c) pasto sudán.

Por otra parte, se determinaron los modelos de crecimiento para maíz y pasto sudán mediante las funciones de Richards donde la  $r$  fue de 0.98 y 0.99, respectivamente. La curva de crecimiento general es en forma sigmoide, con pequeños incrementos iniciales en tamaño, posteriormente la planta crece rápidamente y continúa con un periodo de lento o nulo crecimiento (Beguet y Bavera 2001). Sin embargo, en este estudio los cultivos de maíz y pasto sudán presentaron una curva ascendente durante todo el ciclo de cultivo (Figura 3.5), de acuerdo con Soplín *et al.* (1993), esto indica que las condiciones agroecológicas aún eran favorables para que las plantas continuaran su crecimiento, sin embargo, esto no fue posible debido a que no se presentaron eventos importantes de precipitación que permitieran la recarga del bordo de almacenamiento.

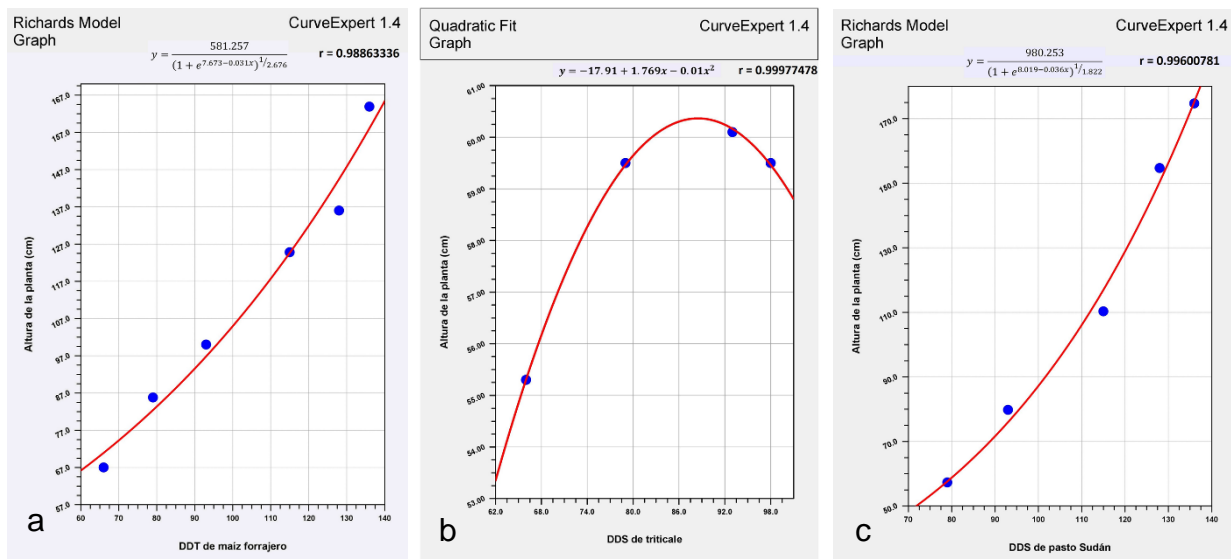


Figura 3.5. Altura de plantas de cultivos forrajeros a través de su ciclo fenológico. a) maíz; b) triticale; c) pasto sudán.

Mientras que para triticale, la altura se ajustó a un modelo cuadrático con  $r$  de 0.99 y mostró un descenso al final del ciclo, lo que de acuerdo con Soplín *et al.* (1993), significa el fin de la fase vegetativa del cultivo. El pasto sudán fue el que mostró la mayor tasa de crecimiento de  $3.3 \text{ cm día}^{-1}$ , le siguió triticale ( $1.8 \text{ cm día}^{-1}$ ) y el maíz fue el que presentó el crecimiento más lento ( $1.1 \text{ cm día}^{-1}$ ).

**Composición porcentual de las estructuras de la planta de maíz.** No se encontró efecto significativo a la aplicación foliar de nitrógeno en maíz, sin embargo, si existió diferencia significativa entre muestreos ( $p \leq 0.0363$ ). La distribución de la materia seca por órgano de la planta de maíz se muestra en la Figura 3.5, donde el tallo resultó cuatro puntos porcentuales inferior a los 93 DDT en relación al alcanzado a los 136 DDT. Situación inversa ocurrió con las hojas, ya que se reduce su porcentaje de los 93 DDT (62%) a los 136 DDT (29%), lo cual se explica por el inicio de la floración, donde la planta invierte su energía para la formación de grano, lo cual se refleja en el 30% que representa el elote (Figura 3.6). El porcentaje del elote difiere del encontrado por Núñez *et al.* (2015), quienes obtuvieron porcentajes de 37.80 a 57.69% para híbridos de maíz. Además, cuando existe estrés hídrico, la planta redistribuye los nutrimentos dando prioridad a la formación de semillas (Covarrubias, 2007).

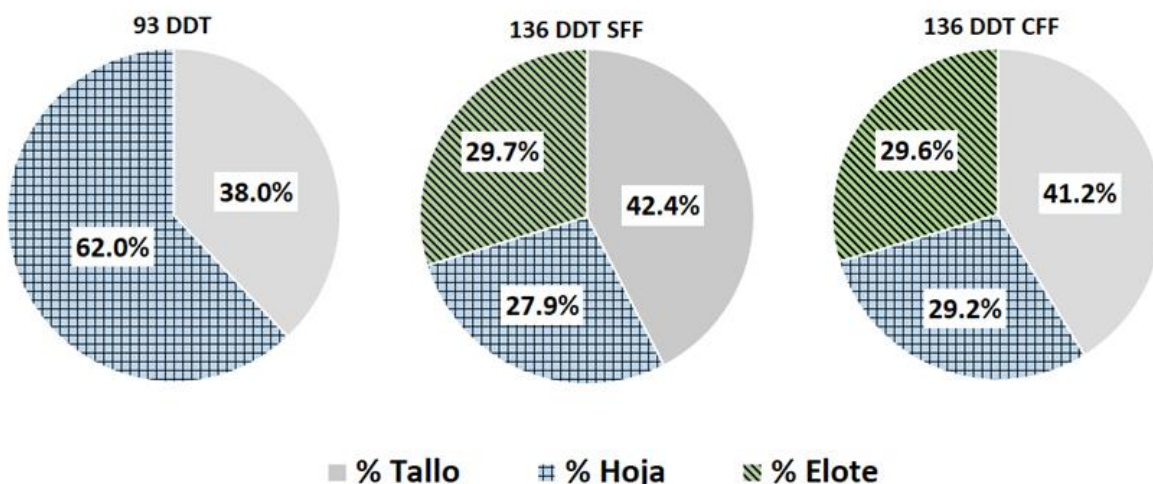


Figura 3.6. Composición porcentual de tallo, hoja y elote en la planta de maíz previo a la fertilización foliar (93 DDT) y al momento de la cosecha (136 DDT). SFF) Sin fertilización foliar; CFF) Con fertilización foliar.

**Rendimiento de tres cultivos forrajeros.** El mayor rendimiento de FV se obtuvo en maíz (Cuadro 3.7), el cual tuvo una producción de 30.9 t ha<sup>-1</sup>, el segundo lugar correspondió a pasto sudán con 18.6 t ha<sup>-1</sup> y el rendimiento más bajo se obtuvo en triticale (2.1 t ha<sup>-1</sup>). La producción de maíz y pasto sudán fueron inferiores a la reportada por SIAP (2017) para los cultivos forrajeros bajo riego en el estado de San Luis Potosí (41.408 y 28.730 t ha<sup>-1</sup> para maíz y sorgo, respectivamente). Cabe mencionar que en el municipio de Venado únicamente se produce avena forrajera con rendimiento de 26.3 t ha<sup>-1</sup>.

Cuadro 3.7. Parámetros de rendimiento de tres cultivos forrajeros.

Cultivo	FV (t ha <sup>-1</sup> )	MS (t ha <sup>-1</sup> )	% humedad	IPA (kg m <sup>-3</sup> )
Maíz	30.9 <sup>c</sup>	7.1 <sup>c</sup>	76.9 <sup>b</sup>	3.4
Triticale	2.1 <sup>a</sup>	1.2 <sup>a</sup>	41.5 <sup>a</sup>	0.8
P. sudán	18.6 <sup>b</sup>	4.5 <sup>b</sup>	77.0 <sup>b</sup>	4.1
<i>P</i>	<0.0001	<0.0001	<0.0001	

FV) forraje verde; MS) materia seca; % humedad) porcentaje de humedad; IPA) índice de productividad del agua.

La producción de FV de maíz obtenida en el presente estudio fue superior a la reportada por Cruz *et al.* (2013) quienes trabajaron con maíz de ciclo intermedio, menor densidad de siembra y mayor volumen de agua (520 mm ha<sup>-1</sup>) obteniendo 26.81 t ha<sup>-1</sup>, cabe señalar que la densidad utilizada en el presente estudio fueron 12.2 plantas m<sup>-2</sup> y 175 mm ha<sup>-1</sup> de agua. Asimismo, la materia seca del maíz fue inferior a la reportada por Cruz *et al.* (2013) quienes mencionan una producción de forraje seco de 9.67 t ha<sup>-1</sup> para maíz de ciclo intermedio, la baja producción de forraje seco en la presente investigación pudo deberse a la falta de disponibilidad de agua que sufrió la planta durante la floración, lo cual afectó el rendimiento (Covarrubias, 2007). Esta característica, así como su hábito de crecimiento determinado, le confiere al maíz inestabilidad en el rendimiento frente a situaciones de estrés durante la floración (Martínez, 2015). Por otro lado, considerando que solamente se cultive maíz forrajero en una hectárea, se tendría un rendimiento de 7.1 t de MS, forraje suficiente para alimentar un rebaño de 50 ovinos durante 95 días (tres meses aproximadamente).

La producción de FV de pasto sudán fue 40% más alto que el obtenido por Al-Solaimani *et al.* (2017) para el periodo de octubre a febrero con riego deficitario (13.2 t ha<sup>-1</sup>). Sin embargo, la producción de materia seca fue 27.5% menor a la reportada por los autores antes mencionados (5.7 t ha<sup>-1</sup>), estos valores indican un porcentaje de humedad menor al 50%, mientras que en el presente estudio se obtuvo 77%. En contraste, Ismail *et al.* (2017), reportan rendimientos superiores en FV (24.6 y 22.9 t ha<sup>-1</sup>) y en MS (8.9 y 9.6 t ha<sup>-1</sup>) con láminas de agua de 144.1 y 174.6 mm ha<sup>-1</sup> hasta el primer corte mediante riego por goteo; no obstante, la humedad fue inferior (64% y 58%) a la encontrada en este estudio.

Con respecto al porcentaje de humedad, fue similar en maíz y en pasto sudán (76% y 77%, respectivamente), y difieren a la de triticale (41%). La producción de biomasa seca en triticale es menor a la reportada por Plana *et al.* (2016) ( $\geq 2.808$  t ha<sup>-1</sup>), posiblemente debido a que se utilizó una densidad de siembra (68.8 kg ha<sup>-1</sup>) inferior a la empleada por los autores (150 kg ha<sup>-1</sup>). Asimismo, fue inferior a la obtenida por Montemayor *et al.* (2015), la cual fue de 2.61 t ha<sup>-1</sup> de triticale, con densidad de siembra de 120 kg ha<sup>-1</sup> y lámina de agua de 350 mm a los 75 DDS, lo que indica 19.5 % menos rendimiento de materia seca en este estudio pero con 67.7% menos agua.



**Índice de productividad del agua.** Este se determinó con base en la lámina de agua aplicada del bordo de almacenamiento más la precipitación efectiva (34.4 mm) producto de los eventos que se presentaron en el área, y con el rendimiento en materia seca. En Cuadro 3.7, se observa que la mayor productividad del agua corresponde a pasto sudán ( $4.1 \text{ kg m}^{-3}$ ), la cual es superior a los  $2.4 \text{ kg m}^{-3}$  reportados por Al-Solaimani *et al.* (2017). Mientras que el IPA para la producción de FV fue  $14.73 \text{ kg m}^{-3}$ , valores similares ( $12.1$  y  $15.1 \text{ kg m}^{-3}$ ) son mencionados por Ismail *et al.* (2017).

Para el caso del maíz, el IPA superó al señalado por Cruz *et al.* (2013) que corresponde a  $1.87 \text{ kg MS m}^{-3}$  mediante riego rodado (riegos de auxilio), lo cual demuestra la ventaja del ahorro de agua al utilizar riego por goteo. El IPA para triticale fue de  $0.8 \text{ kg m}^{-3}$ , similar al obtenido por Montemayor *et al.* (2017)  $0.74 \text{ kg m}^{-3}$ . Aun cuando el rendimiento de MS encontrado en este estudio fue inferior, la lámina de agua utilizada (113 mm) favoreció el IPA, lo cual coincide con los mismos autores, quienes señalan que la producción del cultivo es afectada por la cantidad de agua aplicada, pero la productividad del recurso aumenta al reducir el volumen de agua aplicado, debido a la tolerancia del cultivo al estrés hídrico.

Las láminas de agua utilizadas durante todo el ciclo de cultivo para maíz (175 mm), triticale (113 mm) y pasto sudán (75 mm) fueron significativamente menores a la evapotranspiración potencial registrada durante este periodo (623.9 mm). Por otro lado, el riego deficitario, mediante el sistema de riego por goteo, permite maximizar la productividad del agua (Zhang y Oweis, 1999). Postel *et al.* (2001) señalan que el riego por goteo puede reducir el requerimiento de riego de un 20 a un 70% mientras que se incrementa el rendimiento del cultivo de un 20 a 90%, comparado con el riego superficial convencional.

**Calidad del forraje.** Se encontraron diferencias significativas en todas las variables (Cuadro 3.8). La proteína cruda (PC) indica la capacidad del alimento para proporcionar las proteínas necesarias para el animal, las cuales son absorbidas en forma de aminoácidos y transportadas a los tejidos del cuerpo para sintetizar la proteína de los músculos (INATEC, 2016). El mayor % PC se encontró en triticale (10.2%), el cual fue estadísticamente superior al de maíz y pasto sudán (7.1%). Este resultado coincide con

Plana *et al.* (2016) quienes reportan un % PC promedio para triticale de 10.42 con una dosis de fertilización de 150 kg de N ha<sup>-1</sup>, la cual es superior a la utilizada en este estudio (101 kg de N ha<sup>-1</sup>).

Cuadro 3.8. Composición nutricional (%) en maíz, triticale y pasto sudán.

Determinación	Cultivo			P
	Maíz	Triticale	P. sudán	
MS	23.1 <sup>a</sup>	58.5 <sup>b</sup>	23.0 <sup>a</sup>	<0.0001
PC	7.1 <sup>a</sup>	10.2 <sup>b</sup>	7.1 <sup>a</sup>	0.0019
FDN	54.4 <sup>b</sup>	46.5 <sup>a</sup>	61.9 <sup>c</sup>	<0.0001
FDA	25.2 <sup>b</sup>	22.1 <sup>a</sup>	32.6 <sup>c</sup>	<0.0001

Medias con un letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). MS) materia seca; PC) proteína cruda en base seca; FDN) fibra detergente neutro en base seca; FDA) fibra detergente ácido en base seca.

El %PC del maíz obtenido, se encuentra dentro del rango (6.75 a 8.15%) obtenido por Núñez *et al.* (2015) en híbridos de maíz con riegos de auxilio, y es similar al promedio reportado por estos autores (7.23%), sin embargo, Bruno *et al.* (1995) reportan valores más bajos (5.7 a 6.7%). El %PC en pasto sudán coincide con el encontrado por Al-Solaimani *et al.* (2017), el cual fue de 7.12%; en cambio, Silungwe (2011), reporta valores superiores (14.7 y 15.0 % PC).

Las FDN y FDA están correlacionadas inversamente con la digestibilidad del forraje, ya que ésta es afectada por el grosor de la pared celular, así conforme las plantas maduran, la pared es más gruesa y como consecuencia menos digestible (McDonald *et al.*, 2002). La pared celular está formada por hemicelulosa, lignina, celulosa y sílice, estos componentes son cuantificados mediante el % FDN. Mientras que el porcentaje de FDA indica la cantidad de componentes (lignina, celulosa y sílice) que no pueden ser digeridos por los rumiantes (Cruz y Sánchez, 2000). En la presente investigación, el menor % FDN (46.5%) fue encontrado en triticale y en pasto sudán se obtuvo el mayor % FDN (61.9%), siendo estadísticamente superior ( $p < 0.0001$ ) al del maíz y triticale. Misma tendencia se obtuvo al analizar el % FDA (Cuadro 3.8).

Los valores de FDN (61.9%) y FDA (32.6%) encontrados en el pasto sudán, fueron similares a los reportados por Salama y Zeid (2016), quienes reportaron valores de 65.2 y 64.8% FDN, y porcentajes de 37.8 y 39.2 de FDA. Resultados similares obtuvo Silungwe (2011) de 62.0 y 59.9% de FDN y valores de 36.3 y 35.2% FDA. En cuanto al maíz, se obtuvo un valor de 54.4% FDN, superior a la media reportada por Núñez *et al.* (2015) de 41.4%; sin embargo, el % FDA fue similar al de dicho estudio (25.00%). Bruno *et al.* (1995) obtuvieron resultados de FDN similares (55 a 59%) a los de este estudio, mientras que la FDA fue inferior (36% FDA).

La información obtenida sobre parámetros de calidad del forraje indica que el pasto sudán fue el que tuvo mayor contenido de FDA y FDN y por consiguiente una menor digestibilidad. Por el contrario, el triticale al mostrar valores más bajos en estas variables, es un forraje de mayor digestibilidad. Estos resultados se deben principalmente a las características fenológicas de cada cultivo, así como a la etapa en que se realizó la cosecha de cada uno.

**Efecto de la fertilización foliar sobre el rendimiento y la calidad de forraje de triticale y maíz.** No se encontraron diferencias significativas entre plantas de triticale con fertilización foliar (FF) y sin FF, posiblemente debido a que la aplicación de la solución nutritiva fue tardía (una semana antes de la cosecha). De acuerdo con Oosterhuis (2009), la absorción ineficiente de nutrimentos aplicados vía foliar puede deberse a factores como déficit hídrico, aumento de la edad foliar (hojas maduras) y condiciones climáticas (viento, temperatura, humedad), lo anterior puede explicar la falta de respuesta de triticale a la fertilización foliar.

Sin embargo, en el cultivo de maíz, se detectó diferencia estadísticamente significativa en los porcentajes de humedad y FDN (Cuadro 3.9). El mayor porcentaje de humedad en las plantas con FF indica un posible efecto en la reducción de la transpiración de las plantas. Aunque en la producción de FV no hubo diferencia significativa entre aplicar o no fertilización foliar (FF), si se obtuvo un ligero incremento al aplicar FF, lo cual equivaldría a un aumento adicional del 10.6% en el rendimiento (3.275 t ha<sup>-1</sup>).

Cuadro 3.9. Efecto de la fertilización foliar en el rendimiento y calidad de forraje de triticale y maíz a la cosecha (98 DDS y 136 DDT, respectivamente).

Variable	Maíz		P
	SFF	CFF	
FV (g m <sup>-2</sup> )	3 086.1 <sup>a</sup>	3 413.6 <sup>a</sup>	0.2499
MS (g m <sup>-2</sup> )	710.9 <sup>a</sup>	715.4 <sup>a</sup>	0.9369
% humedad	76.9 <sup>a</sup>	79.0 <sup>b</sup>	0.0067
% PC	7.1 <sup>a</sup>	6.3 <sup>a</sup>	0.4381
% FDN	54.4 <sup>a</sup>	56.6 <sup>b</sup>	0.0139
% FDA	25.2 <sup>a</sup>	26.8 <sup>a</sup>	0.0647

Medias con un letra común en la misma línea no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). SFF) sin fertilización foliar; CFF) con fertilización foliar; FV) forraje verde; MS) materia seca; % PC) porcentaje de proteína cruda; % FDN) porcentaje de fibra detergente neutro; % FDA) porcentaje de fibra detergente ácido.

### 3.4. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados en el presente trabajo indican la viabilidad de producir forraje de buena calidad nutrimental, utilizando un bajo volumen de agua de lluvia en áreas de agostadero, lo cual podría representar una solución para los problemas de baja disponibilidad de forraje en época de estiaje.

Considerando que el 23% del forraje de maíz es MS (7.1 t ha<sup>-1</sup>) un ganadero podría alimentar un rebaño de 50 ovinos por un periodo de tres meses.

El rendimiento y calidad de forraje de maíz, pasto sudán y triticale, se encontraron dentro de los rangos reportados en la literatura. El forraje de mayor calidad fue el de triticale. Sin embargo, el mayor rendimiento e índice de productividad del agua se obtuvieron en maíz y pasto sudán, respectivamente.

### 3.5. LITERATURA CITADA

Akhtar, M., Hassan, F. U., Ahmed, M., Hayat, R., Stöckle, C. O. 2016. Is rainwater harvesting an option for designing sustainable cropping patterns for rainfed agriculture? Land degradation & development 27: 630-640.

- Aldrich, S. R. & Leng, E. R. 1974. Producción moderna del maíz. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. 308 p.
- Al-Solaimani, S. G., Alghabari, F., Ihsan, M. Z. & Fahad, S. 2017. Water deficit irrigation and nitrogen response of Sudan grass under arid land drip irrigation conditions. *Irrigation and drainage* 66: 365-376.
- Álvarez, M. G. 2010. Diagnóstico y plan municipal 2012-2015, Venado, S.L.P.
- AOAC. 1970. Official methods. 11<sup>th</sup> ed. William Horvist (ed). Association of Official Agricultural Chemist, Washington D. C., USA. 1015 p.
- Aujla, M. S., Thind, H. S. & Buttar, G. S. 2007. Fruit yield and water use efficiency of eggplant (*Solanum melongema* L.) as influenced by different quantities of nitrogen and water applied through drip and furrow irrigation. *Scientia Horticulturae* 112 (2): 142-148.
- Ayers, R. S. & Westcot, D. W. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1. Rome, Italy. 174 p.
- Bande, C. M. J., Resh, Z. C. y Quintela, G. M. El sorgo grano para ensilar en Galicia como nueva alternativa al maíz forrajero: producción y calidad nutritiva en siembras tardías. *Pastos* 45 (1): 47-55.
- Bar-Yosef, B. 1999. Advances in fertigation. In: *Advances in agronomy*. Vol. 65. Academic Press. pp. 1-77.
- Beguet, H. A. y Bavera, G. A. 2001. Fisiología de la planta pastoreada. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional del Río Cuarto. Provincia de Córdoba, Argentina. 6 p.
- Broa-Rojas, E., Bahena-Delgado, G., Villarreal-Manzo, L. A., Valadez-Ramírez, M. y Jaime-Hernández, M. A. 2013. Uso eficiente del agua en la producción de maíces nativos de color en Xalostoc, Morelos, México. *Ambiente y Desarrollo* 17 (33): 99-110.

- Bruno, O. A., Romero, L. A., Díaz, M. C. y Gaggiot-Ti, M. C. 1995. Efecto del momento de corte del maíz para ensilaje sobre la producción de leche. Reporte técnico. INTA. Argentina. 100 p.
- Cervantes, B. M. C., Gámez, V. H. G. y Urrutia, M. J. 2014. Producción sostenida de ganado bovino de carne en el Altiplano Norte-Centro de México. Folleto para productores. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 56 p.
- CONAGUA. 2006. Programa Hídrico del Organismo de Cuenca de las Cuencas Centrales del Norte. Visión 2030. Informe final Tomo I. Diagnóstico de la Región Hidrológico – Administrativa. SEMARNAT.
- Cortés, J. J. M., Troyo, D. E. y Garatuza, P. J. 2009. Correlaciones entre indicadores de la calidad del agua para uso agrícola. INIFAP. Folleto técnico 66.
- Covarrubias, R. A. A. 2007. Sobrevivir al estrés: cómo responden las plantas a la falta de agua. Biotecnología 14: 253-262.
- Cruz, C. J. J., Núñez, H. G., Anaya, S. A., Faz, C. R., Olguín, V. S. y Serrato, M. A. 2013. Efecto del agua aplicada en el rendimiento, calidad nutricional y eficiencia del uso del agua en maíz forrajero. Agrofaz 13 (3): 111-117.
- Cruz, C. M. y Sánchez, G. J. M. 2000. La fibra en la alimentación del ganado lechero. Nutrición Animal Tropical 6 (1): 39-74.
- Estrada-Campuzano, G., Slafer, G. A. & Miralles, D. J. 2012. Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments. Field Crops Research 128: 167-179.
- Frasier; G. & Myers, L. 1983. Handbook of water harvesting. Agriculture Handbook number 600, United States Department of Agriculture. USA.
- García, S. C. J. 2015. Influencia de la dosis de N fertilizante en el contenido de N en la planta, en el N residual del suelo, y en el rendimiento y calidad del forraje de triticale (*X triticosecale* Wittmack) en condiciones de secano en Extremadura. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura. Extremadura, España. 163 p.

- INATEC (Instituto Nacional Tecnológico). 2016. Manual del protagonista. Nutrición Animal. Dirección General de Formación Profesional. Nicaragua. 140 p.
- INEGI. 2011. Carta topográfica de uso del suelo y vegetación. Mapa Digital de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjI0Ljc5ODMyLGxvbjotOTguMzI1MjAsejoyLGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3x0YzExMXNlcnZpY2lvcw==>. Fecha de consulta: 06 de marzo de 2018.
- INIFAP. 2017. Red de estaciones del INIFAP. Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos. Recuperado de: <http://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/Estaciones/MapaEstaciones>. Fecha de consulta: 20 de agosto de 2018.
- Ismail, S. M., El-Nakhlawy, F. S. & Basahi, J. M. 2017. Sudan grass and Pearl millets productivity under different irrigation methods with fully irrigation and stresses in arid regions. Japanese Society of Grassland Science, Grassland Science 64: 29-39.
- Jurado, G. P., Lara, M. C. R. y Saucedo, T. R. A. 2014. Paquete tecnológico para la producción de maíz forrajero en Chihuahua. Folleto técnico Núm. 53. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 43 p.
- Kirda, C. 2002. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. In: Deficit Irrigation Practices. Water Reports N° 22. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. p. 3-10.
- Maisiri, N., Senzanje, A., Rockstrom, J. & Twomlow, S. J. 2005. On farm evaluation of the effect of low cost drip irrigation on water and crop productivity compared to conventional surface irrigation system. Physics and Chemistry of the Earth 30: 783-791.
- Martínez, A. D. 2015. Ecofisiología del cultivo de maíz. En: El cultivo de maíz en San Luis. Información Técnica 188. INTA Ediciones. San Luis, Argentina. pp 7-31.
- Martínez-Austria, P. F. y Patiño-Gómez, C. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. Tecnologías y Ciencias del Agua 3 (1): 5-20.

- McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D. 2002. Nutrición animal. 6ta ed. Acribilia S. A. Zaragoza, España.
- Mendoza-Elos, M., Cortez-Baheza, E., Rivera-Reyes, J. G., Rangel-Lucio, J. A., Andrio-Enríquez, E. y Cervantes-Ortiz, F. 2011. Época y densidad de siembra en la producción y calidad de semilla de triticale (*X triticosecale* Wittmack). *Agronomía Mesoamericana* 22 (2): 309-316.
- Montemayor, T. J. A., Segura, C. M. A., Munguía, L. J. y Woo, R. J. L. 2015. Productividad del agua en el cultivo de triticale (*X. Triticosecale* Wittmack) en La Comarca Lagunera de Coahuila, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6 (7): 1533-1541.
- Núñez, H. G., Anaya, S. A., Faz, C. R. y Serrato, M. H. A. 2015. Híbridos de maíz forrajero con alto potencial de producción de leche de bovino. *Agrofaz* 15 (1): 47-56.
- Oosterhuis, D. 2009. Foliar fertilization: mechanisms and magnitude of nutrient uptake. Paper for the Fluid Fertilizer Foundation meeting in Scottsdale, Arizona. pp. 15-17.
- Oweis, T. & Hachum, A. 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management* 80: 57-73.
- Pedroza, S. A., Ríos, F. J. L., Torres, M. M., Cantú, B. J. E., Peceno, S. C. y Yáñez, C. L. G. 2014. Eficiencia del agua de riego en la producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) y alfalfa (*Medicago sativa*): Impacto social y económico. *Terra Latinoamericana* 32: 231-239.
- Plana, L. R. R., González, C. P. J., Rivera, E. R., Varela, N. M. y Álvarez, G. M. A. 2016. Producción de forraje a base de triticale (*X. triticosecale* Wittmack) en suelo nitisol ferrálico lúxido, con dosis variables de nitrógeno e inoculación con hongos micorrízicos arbusculares. *Cultivos Tropicales* 37 (2): 22-32.
- Postel, S., Polak, P., Gonzales, F. & Keller, J. 2001. Drip irrigation small farmers a new initiative to alleviate hunger and poverty. *International Water Resources Association* 26 (1): 3-13.



- Rodríguez, P. R. A., Rázuri, R. L., Swarowky, A. y Rosales, D. J. 2014. Efecto del riego deficitario y diferentes frecuencias en la producción del cultivo de pimentón. *Interciencia* 39 (8): 591-596.
- Rojas, O. E. J. y Serrano, R. A. A. 2007. Importancia del agua subterránea como fuente de abastecimiento de agua potable en Venezuela. Tesis doctoral. Universidad de Oriente. Anzoátegui, Venezuela. 106 p.
- Salama, H. S. A. & Zeid, M. M. K. 2016. Hay quality evaluation of summer grass and legume forage monocultures and mixtures grown under irrigated conditions. *Australian Journal of Crop Science* 10 (11): 1543-1550.
- SEDARH. 2017. 1er Informe Eje 1: Desarrollo agropecuario y agroindustrial. Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos.
- SIAP. 2017. Avance de siembras y cosechas. Resumen Nacional por Estado. Recuperado de: [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/Resumen\\_Delegacion.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/Resumen_Delegacion.do). Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- Silungwe, D. 2011. Evaluation of forage yield and quality of Sorghum, Sudangrass and Pearl millet cultivars in Manawatu. Master thesis. Massey University, Palmerston North New Zealand.
- Soplín, J. A., Rengifo, A. y Chumbe, J. 1993. Análisis de crecimiento en *Zea mays* L. y *Arachis hypogaea* L. *Folia Amazónica* 5 (1-2): 171-189.
- Suárez, G. 2011. Acentúa problemas de sequía sobre población ganadera de hasta 300% en regiones de México. *Imagen agropecuaria* 238: 4-5.
- Van Soest, P.J. *Nutritional Ecology of the Ruminants*. 2ª ed. Ithaca, NY. Cornell University Press.
- Villarroel, J. 1988. Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos en laboratorio. Documento técnico. AGRUCO. Bolivia. 47 p.
- Wang-Yeong, C. H., Lee-Mian, L., Cheng, W., Wang, Y. C., Lee, M. & Cheng, W. 1995. Effect of planting density and nitrogen application rates on growth characteristics,

grass yield and quality of forage maize. *Journal of Taiwan Livestock Research* 28 (2): 125-132.

Zhang, H. & Oweis, T. 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management* 38 (3): 195-211.

## 5. DISCUSIÓN GENERAL

Desde los inicios de la humanidad, la escasez de agua en las zonas áridas y semiáridas, ha sido un problema para sus habitantes, condición generada principalmente por la errática e irregular distribución de la precipitación que caracteriza a esas regiones. No obstante, diversas generaciones se han desarrollado gracias al amplio manejo del agua que implementaron a través de los años, en el que se incluye la cosecha de agua de lluvia. Los sistemas de captación de agua de lluvia son técnicas de manejo de suelo y agua, que permiten captar, derivar, conducir, almacenar y en algunos casos distribuir el agua de lluvia, cuya finalidad es incrementar la disponibilidad de agua para consumo humano o en la producción agropecuaria (FAO, 2013). Los bordos de almacenamiento, que son pequeñas presas con una cortina de tierra compactada, se construyen con el principal propósito de abreviar al ganado (SAGARPA, 2012).

Los bordos han tenido gran difusión y apoyo financiero en el país; sin embargo, el poco rigor técnico aplicado en su diseño y construcción, las mantiene como obras susceptibles a daños y fallas (Avilés *et al.*, 2007). Tal es el caso de las obras de estudio, donde la problemática observada en campo fue: filtración de agua, agrietamiento longitudinal, azolvamiento y desprendimiento del vertedor; fallas comunes que afectan el funcionamiento de las obras y en algunos casos lo anulan. Aunque existen técnicas para corregir estos problemas, la mayoría pueden evitarse a través de un diseño adecuado de la obra, la realización de estudios topográficos, geológicos, hidrológicos y de mecánica de suelos, así como la inspección durante la construcción de las obras.

Entre los estudios antes mencionados, destaca el hidrológico, pues el volumen total de una obra está supeditado a la disponibilidad del agua en la cuenca (Peña y Vidrio, 1989), por lo que es indispensable contar con la mayor cantidad de datos hidrológicos para definir el escurrimiento aprovechable y estimar el almacenamiento económico factible (SAGARPA, 2012). Sin embargo, en los bordos analizados, en 41% del total se encontraron restricciones hidrológicas (capacidad de almacenamiento de agua superior al volumen aprovechable de la cuenca), es decir, bordos que no alcanzarán su capacidad máxima de almacenamiento. No obstante, en el presente estudio se localizaron obras en las que la cuenca abastece la capacidad de los bordos y estos presentaron un buen

funcionamiento y disponibilidad del recurso hídrico. Por otra parte, después de la época de lluvia, el agua puede permanecer almacenada entre uno y tres meses en este tipo de obras (Frasier y Myers, 1983), en función de los factores climáticos (temperatura, evaporación, precipitación, etc.) por lo que se requiere implementar estrategias para aprovechar el recurso hídrico, como lo es la producción de cultivos con bajos volúmenes de agua.

Se ha demostrado que la cosecha de agua de lluvia tiene potencial para la producción de cultivos para aminorar el problema de escasez de forraje, de tal modo que el agua almacenada en los bordos puede ser aprovechada para ello. Sin embargo, se requiere conocer su calidad para el uso en el riego agrícola. Razón por la cual, en el presente estudio se determinó la composición química del agua de bordos de almacenamiento para la producción de forraje. De acuerdo a las clasificaciones de Wilcox y las normas de Riverside, el agua de los bordos, se categorizó de buena a excelente calidad, apta para la producción agrícola, situación inversa a la de algunos pozos profundos que actualmente se utilizan para riego en el Estado, en los cuales se reportan problemas de salinidad y sodicidad (Villanueva y Hernández, 2001; Ramos-Leal *et al.*, 2016).

Mediante la estimación de la conductividad eléctrica en el extracto del suelo a partir de la conductividad del agua de los bordos, se obtuvieron valores inferiores a los umbrales de tolerancia a la salinidad de los cultivos forrajeros de maíz, avena, sorgo y cebada, por lo que el rendimiento relativo de estos no se vería afectado si se irrigara con agua almacenada en bordos. Sin embargo, es necesario evaluar la aptitud de esta fuente de agua en conjunto con las características edafo-climáticas del sitio donde se va a producir, para definir las prácticas de manejo requeridas para incrementar la productividad del agua y los cultivos.

Con esta finalidad, se evaluó el rendimiento y la calidad de forraje de maíz, triticale y pasto sudán en el agostadero, en respuesta a la fertigación mediante riego por goteo con pequeños volúmenes de agua almacenada en un bordo. Se obtuvieron rendimientos de forraje verde de maíz y pasto sudán que demuestran que en condiciones restrictivas de suelo y agua, y con técnicas de uso eficiente del agua, se puede incrementar la productividad del agua (3.4 y 4.1 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente) con respecto a aquellos

cultivos bajo irrigación convencional y por goteo. Asimismo, la calidad del forraje para los tres cultivos, resultó dentro del rango obtenido por otros autores y acorde a cada especie, de las cuales el triticale fue el que presentó mayor porcentaje de proteína (10.2), menor fibra detergente neutro (46.5%) y menor fibra detergente ácido (22.1%). Considerando que el 23% del forraje de maíz es MS ( $7.1 \text{ t ha}^{-1}$ ) un ganadero podría alimentar un rebaño de 50 ovinos por un periodo de tres meses, lo que no sólo permite mantener la condición corporal de los animales, sino también contribuir a reducir el deterioro del agostadero.

Los resultados de esta investigación, contribuyen en la propuesta de un desarrollo sustentable basándose en el aprovechamiento racional del recurso hídrico, sin condicionar su disponibilidad para las generaciones futuras en las zonas marginadas del país.

### **5.1. LITERATURA CITADA**

- Avilés, L. J., Bonola, A. I., Li, L. X., Salgado, M. G., Jaime, P. A. y Trueba, L. V. 2007. Manual geotécnico para el diseño de presas pequeñas. Bonola, A. I. y Jaime, P. A. (ed). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México. 376 p.
- FAO. 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia, opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Santiago, Chile. 272 p.
- Frasier; G. & Myers, L. 1983. Handbook of water harvesting. Agriculture Handbook number 600, United States Department of Agriculture. USA.
- Peña, R. G. y Vidrio, L. G. 1989. Estudio y construcción de un bordo de arcilla compactada para abrevadero y riego. Tesis de licenciatura. Universidad de Guadalajara. Jalisco, México. 164 p.
- Ramos-Leal, J. A., López-Álvarez, B., Santacruz-De León, G., Almanza-Tovar, O., Morán-Ramírez, J., Padilla-Reyes, D. A. & González-Acevedo, Z. I. 2016. Quality indices of groundwater for agricultural use in the region of Tierra Nueva, San Luis Potosi, Mexico. *Arabian Journal of Geosciences* 9: 736.

SAGARPA. 2012. Presas con cortina de tierra compactada para abrevadero y pequeño riego. Ficha técnica. Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. México. 21 p.

Villanueva, D. J. y Hernández, R. A. 2001. Calidad de agua en tres áreas de San Luis Potosí y su efecto en la producción de cultivos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Folleto técnico Número 13. 32 p.

## **6. CONCLUSIONES GENERALES**

Con esta investigación se demostró la importancia de realizar el estudio hidrológico para el diseño de bordos de almacenamiento, el cual es de gran utilidad para caracterizar las cuencas y conocer su potencial para la captación de agua. A partir de dicho estudio, se identificaron restricciones hidrológicas en algunos bordos. Además, se observaron fallas técnicas (filtración de agua, agrietamiento, azolvamiento y desprendimiento de vertedor) que limitan su funcionamiento. Por lo tanto, algunos de los bordos de almacenamiento no cuentan con el diseño adecuado y por consiguiente no aseguran la captura y conservación del agua de lluvia durante todo el año.

Sin embargo, en los bordos con buen funcionamiento, fue posible analizar la composición química del agua captada y determinar su aptitud para irrigación de cultivos. El agua de bordos se caracterizó por su baja concentración de aniones y cationes, su clasificación como agua de buena a excelente calidad (Clasificación de Wilcox) y apta para el riego (Normas de Riverside). Asimismo, el uso del agua de bordos en el riego no tendría efectos negativos sobre el rendimiento relativo de cultivos forrajeros maíz, sorgo, avena y cebada, representativos del estado de San Luis Potosí.

Finalmente, se obtuvo información sobre la productividad del agua de bordos sobre el rendimiento y calidad del forraje a nivel parcela bajo técnicas de uso eficiente del agua. Lo que permitió valorar la aptitud del agua en conjunto con las características del clima y suelo en el agostadero de cultivos forrajeros. Los resultados expresaron la viabilidad del uso del agua de este tipo de obras en pequeños volúmenes para la producción de forraje de buena calidad para el ganado, aportando una alternativa ante la problemática de escasez de alimento en época de estiaje, con la que no sólo se provee de comida al animal sino también del agua contenida en el forraje.

Por lo tanto, la cosecha de agua de lluvia en bordos de almacenamiento es una estrategia viable para hacer frente a la situación de escasez de agua en zonas semiáridas, si se llevan a cabo los estudios correspondientes, de tal modo que se garantice su correcto funcionamiento. El recurso hídrico almacenado puede emplearse para el consumo animal, y a la vez para la producción de forraje en pequeñas superficies, ya que el agua es de buena calidad, apta para el riego agrícola.

# ANEXOS

## Anexo 1. Microcuencas para el diseño de bordos de almacenamiento en San Luis Potosí.

