



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

EVALUACIÓN DE LAS OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS EN LA MIXTECA ALTA DE OAXACA

BLANCA ESTELA SANTIAGO MEJÍA

**TESIS
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2016

La presente tesis titulada: **Evaluación de las obras de conservación de suelos en la Mixteca Alta de Oaxaca**, realizada por la alumna: **Blanca Estela Santiago Mejía** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. JULIO SÁNCHEZ ESCUDERO

ASESOR



DR. MARIO ROBERTO MARTÍNEZ MENEZ

ASESOR



M. C. JOSÉ DONALDO RÍOS BERBER

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2016

EVALUACIÓN DE LAS OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS EN LA MIXTECA ALTA DE OAXACA

Blanca Estela Santiago Mejía, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2016

RESUMEN

Los ecosistemas de la región Mixteca han estado sometidos a la deforestación, el sobrepastoreo, las prácticas agrícolas inadecuadas que asociadas con la falta de cubierta vegetal, topografía y altas intensidades de la lluvia han provocado la degradación de los suelos que ha sido atenuada con la construcción de obras de retención del suelo y manejo del cultivo para producir granos básicos. El presente estudio pretende conocer el efecto de las obras de conservación de suelo (lama-bordo y terraza) en la producción de granos básicos y el mejoramiento de la calidad de los suelos comparados con el sistema de cultivo convencional en tres diferentes regiones de la Mixteca. Los resultados muestran que los rendimientos de maíz y los costos de producción por hectárea en los sistemas de producción con lama-bordo y terraza fueron menores que en el sistema convencional. Los suelos del sistema lama-bordo, en general, presentan mejores condiciones físicas y químicas en comparación con los suelos con sistemas de terraza y convencional; existen diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre los contenidos de materia orgánica y carbono total entre los sitios de muestreo de las márgenes y la parte central de las parcelas y entre parte baja y alta (antigüedad en su construcción) de los sistemas lama-bordo de Santa María Tiltepec y Teotongo. El sistema lama-bordo es una tecnología prehispánica apropiada, para producir alimentos, conservar suelo, aprovechar el agua y mejorar el paisaje, que debería ser rescatada para evitar su destrucción y abandono, como sucede actualmente.

Palabras clave: Erosión, terrazas, lama-bordo, carbono y calidad del suelo

EVALUATION OF SOIL CONSERVATION WORKS IN THE MIXTECA ALTA OF OAXACA

Blanca Estela Santiago Mejía, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2016

ABSTRACT

The ecosystems of the Mixteca region have been subjected to deforestation, overgrazing, inappropriate agricultural practices associated with lack of vegetation cover, topography and high intensities of rain have caused the degradation that has been attenuated by building works retaining soil and crop management to produce basic grains. This study aims to determine the effect of the works soil conservation (lama-bordo and terrace) in the production of basic grains and improving soil quality compared with conventional cropping system in three different regions of the Mixteca. The results show that corn yields and production costs per hectare with lama-bordo and terraces were lower than in the conventional system. Generally, lama-bordo system have been better physical and chemical soils properties, compared with terraces and conventional system. There are significant differences ($\alpha=0.05$) between organic matter content and total carbon content, at sampling sites on lateral sides and central part of plots and between position plots (low or high, associated with antiquity in its construction) of the lama-bordo Santa Maria Tiltepec and Teotongo systems. The lama-bordo system is a prehispanic technology appropriate to produce food, conserve soil, use of water and improve the landscape that must be rescued from destruction and neglect.

Key words: Erosion, terraces, lama-bordo, carbon and soil quality

DEDICATORIA

A mis padres:

Célida Mejía López y Jacinto Santiago Zacarías, por el cariño y la confianza brindados, a pesar de la distancia. Los amo.

A mis hermanas (os):

Jacinto, Angélica, Sergio, Patricia, Horacio, Rocío, Elizabeth y Janitzzy, por todos los momentos compartidos en familia, cada uno de ustedes me ha dado una enseñanza en la vida.

A mis sobrinas (os):

Andrea, Rubí, Minerva, Natalia, Cosette, Tonatiuh, Isabel, Emiliano, Meztli, Sofía, Citlalli, Ameyali, Omar, Iyari y Ximena, alegría de la familia.

A mis cuñadas (os).

Por los momentos compartidos en familia.

A mis amigas (os):

Naty, Jessy, Lilí, Estrella, Lulú, Nancy, Rosalía, Montse, Edgardo, Flor y Roberto, por las experiencias compartidas y el apoyo recibido cuando lo he necesitado, muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo trabajador de México, porque a través de sus impuestos permite que se pueda financiar la investigación.

Al CONACyT por la beca proporcionada para realizar mis estudios de maestría y al Colegio de Postgraduados por la formación académica recibida.

Al Dr. Mario R. Martínez Menez por todo su apoyo, paciencia y dedicación para concluir la presente investigación.

Al Dr. Julio Sánchez Escudero por el tiempo dedicado y la revisión del presente documento.

Al M.C. José Donaldo Ríos Berber por la revisión del presente documento.

Al M.C. Erasmo Rubio Granados por su ayuda y apoyo recibido para concluir la presente investigación.

Al Dr. David Vásquez Vela, por su apoyo, tiempo brindado y consejos recibidos para culminar la presente investigación.

Ing. Carlos Palacios Espinosa, Ing. Armando Díaz Mota, Ing. Miguel Ángel Ramírez, M.C. M. Lourdes Figueroa Jáuregui y M.C. Rodiberto Salas Martínez por la ayuda proporcionada en diferentes etapas del proceso de investigación.

A los señores de las localidades de Santo Domingo Tonaltepec: Lauro Cruz Bautista, Victoria Ortiz, Sergio Aguilar, Honorio Bautista e Ignacio Hernández; Santa María Tiltepec: Ezequiel Rodríguez, Juan Lara y Esteban Santiago; y Teotongo: Mauro Malencot Espinoza Cruz, Rosendo Mendoza y Rosendo García, por las facilidades y el tiempo proporcionados para la presente investigación.

A la WWF (World Wildlife Fund for Nature) por el apoyo económico brindado para realizar parte de la presente investigación.

A Mariela Hernández por el apoyo brindado para realizar los trámites necesarios.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivos particulares	4
3. HIPÓTESIS	4
4. SUPUESTOS	4
5. REVISIÓN DE LITERATURA	5
5.1. La Región Mixteca	5
5.2. Erosión en la Mixteca	6
5.3. Obras de conservación de suelo y agua en la Mixteca	8
5.3.1. Lama – bordo	8
5.3.2. Terrazas	15
5.4. Agricultura en la Mixteca	18
5.4.1. Agricultura en lama – bordo	20
5.4.2. Agricultura en terrazas	24
5.4.3. Agricultura convencional	25
5.5. Captura de carbono	26
5.5.1. Carbono total presente en distintos suelos agrícolas	27
5.6. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo	29
6. MÉTODOS Y MATERIALES	32
6.1. Área de estudio	32
6.2. Ubicación y características de los sitios	32
6.2.1. Características del medio biofísico de los sitios bajo estudio.	30
6.2.2. Estimación del uso consuntivo del maíz.	33
6.3. Análisis de los sistemas de producción.	34
6.3.1. Estimación de los rendimientos de maíz en las parcelas.	35
6.4. Percepción de los productores de las acciones de conservación	37

6.5. Características de los suelos de las parcelas bajo estudio	38
6.5.1. Muestreo de suelo de las parcelas	39
6.5.2. Muestreo para determinar la humedad del suelo.....	39
6.5.3. Muestreo de suelo para determinar la variabilidad espacial en el sistema lama-bordo.....	40
6.6. Análisis de suelos en el laboratorio	41
6.6.1. Análisis de los suelos de las parcelas con sistemas de producción.	41
6.6.2. Análisis de la humedad del suelo de las parcelas.....	45
6.6.3. Análisis de los suelos de los sistemas lama-bordo de Santa María Tiltepec y Teotongo.....	46
6.7. Cálculo de suelo acumulado en lama – bordo.....	48
6.8. Análisis estadístico.....	49
6.9. Variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas.....	50
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
7.1. Los sistemas de producción agrícola en la zona de estudio.	51
7.1.1. Relación evapotranspiración vs precipitación.....	51
7.1.2. Análisis de los sistemas de producción.	53
7.1.3. Análisis de los sistemas de producción de maíz.....	61
7.1.4. Efecto del sistema de manejo en la humedad del suelo	68
7.2. Adopción de obras de conservación de suelo	70
7.3. Efecto del sistema de producción y manejo en las propiedades de los suelos.....	70
7.3.1. Efecto de los sistemas de producción y manejo en las propiedades físicas del suelo.....	71
7.3.2. Efecto de los sistemas de producción y manejo en las propiedades químicas de los suelos.....	73
7.4 Variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en los sistemas lama-bordo de Santa María Tiltepec y Teotongo	76
7.4.1 Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo en el sistema lama-bordo.....	81
7.6. Volumen y peso del suelo retenido por el sistema lama – bordo	86

7.7. Costos estimados de la construcción de los sistemas lama – bordo	88
8. CONCLUSIONES	91
9. LITERATURA CITADA.....	92
10. ANEXOS.....	103

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Superficie de los principales cultivos en región Mixteca.	19
Cuadro 2. Rendimientos de los principales cultivos de los tres sitios de estudios (2005 – 2014) (Datos tomados del SIAP).	20
Cuadro 3. Sitios sembrados en los años 2013 y 2014.....	30
Cuadro 4. Evaluación de adopción de obras de conservación.	38
Cuadro 5. Comparación de la evapotranspiración y precipitación en las tres zonas de estudio.	52
Cuadro 6. Caracterización de los sistemas de producción de maíz por zonas y tipos de obras de conservación en el ciclo agrícola 2013.	55
Cuadro 7. Caracterización de los sistemas de producción de maíz por zonas y tipos de obras de conservación en el ciclo agrícola 2014.	57
Cuadro 8. Costos, rendimientos, valor de la producción y utilidad de los productores de maíz en el 2013	63
Cuadro 9. Costos, rendimientos, valor de la producción y utilidad del cultivo de maíz en el 2014	64
Cuadro 10. Rendimientos de maíz por sistema, sitio y productor.....	65
Cuadro 11. Análisis de varianza (ANOVA) para rendimientos de maíz por sitio y por manejo.....	66
Cuadro 12. Comparación de las medias de rendimientos de maíz por sitio y por manejo mediante la prueba de Tukey.....	66
Cuadro 13. Porcentaje de humedad al final del ciclo en los diferentes sistemas de manejo.....	69
Cuadro 14. Análisis de varianza para conocer si existen diferencias en los contenidos de humedad por sitio, sistema y posición.....	69
Cuadro 15. Adopción de las obras de conservación.....	70
Cuadro 16. Propiedades físicas de los suelos por sitio, sistema y posición de muestreo.....	72
Cuadro 17. Comparación de medias de las propiedades físicas del suelo.....	73
Cuadro 18. Propiedades químicas de los suelos por sitio, sistema y manejo.	74

Cuadro 19. Estadísticas de las propiedades químicas de los tres sistemas de estudio.	75
Cuadro 20. Variabilidad espacial de las propiedades físicas de los suelos del sistema lama-bordo en Santa María Tiltepec.	77
Cuadro 21. Comparación de medias de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo en Santa María Tiltepec.	78
Cuadro 22. Variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo del sistema lama-bordo en Teotongo.....	79
Cuadro 23. Comparación de medias de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo en Teotongo.	81
Cuadro 24. Variabilidad espacial de las propiedades químicas de los suelos del sistema lama-bordo en Tiltepec.....	82
Cuadro 25. Estadísticas de las propiedades químicas del sistema lama–bordo de Tiltepec.	83
Cuadro 26. Variabilidad espacial de las propiedades químicas de los suelos del sistema lama-bordo en Teotongo.	84
Cuadro 27. Comparación de medias de las propiedades químicas del sistema lama-bordo.....	85
Cuadro 28. Volumen de suelo en los sistemas lama-bordo de Tiltepec y Teotongo. ...	88
Cuadro 29. Volumen obra en los sistemas lama-bordo de Tiltepec y Teotongo.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil cronoestratigráfico de lama-bordo en Nochixtlán, Oaxaca (Tomado de Pérez <i>et al.</i> , 2011).....	11
Figura 2. Comparación de lama-bordo nueva (a) y vieja (b) (Tomado de Rivas <i>et al.</i> , 2008).....	12
Figura 3. Tipos de lama-bordo: a) con árboles y muro de tierra, b) con muros de piedra acomodada (Chávez, 2012).....	12
Figura 4. Ubicación de los sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca (Tomado de Chávez, 2012).	13
Figura 5. Localización del sistema lama-bordo en la región de La Paz Tilantongo, Oaxaca (Fotografía propia tomada en el 2012 en la región de estudio).	14
Figura 6. Destrucción de un lama-bordo por el abandono en la región de La Paz Tilantongo, Oaxaca (Fotografía tomada en el 2012).....	14
Figura 7. Sistema lama-bordo en laderas pedregosas y formación de bancales en La Paz Tilantongo, Oaxaca (Fotografía tomada en el 2012).	15
Figura 8. Vocales ejecutivos de la Comisión del Papaloapan visitan terrazas en el municipio de S. J. Bautista Coixtlahuaca, en 1970, que ampliaron considerablemente la superficie agrícola disponible. Fuente: Anuario de la Comisión del Papaloapan (Tomado de Jiménez, 2010).	16
Figura 9. Terrazas de banco construidas en la región de Tiltepec (Fotografías del 2015).....	17
Figura 10. Trabajos de conservación de suelos en Tepelmeme Villa de Morelos. A la izquierda fotografía aérea, alrededor de 1970 (Anuario de la Comisión del Papaloapan) y a la derecha, el mismo lugar en la actualidad (Imagen de satélite de Google Earth) (Tomado de Jiménez, 2010).....	18
Figura 11. Sistema de cultivo en lama-bordo: a) siembra con mano de obra familiar, b) uso de coa para la siembra, c) maíz de cajete en orificio hecho con coa y d) maíz de cajete en desarrollo (Tomado de Chávez, 2012).	22
Figura 12. Sistema lama-bordo en La Paz Tilantongo, Nochixtlán, Oaxaca.	23
Figura 13. Ubicación de la región Mixteca Alta en el estado de Oaxaca.	32
Figura 14. Ubicación de los municipios de estudio en la región Mixteca Alta.	33

Figura 15. Parcelas con lama-bordos, terrazas y agricultura convencional en donde se realizaron las tomas de datos para investigación.....	34
Figura 16. Parcelas con lama-bordos: a) Santo Domingo Tonaltepec, b) Santa María Tiltepec y c) Teotongo.	35
Figura 17. Climograma tipo Gausen para la zona de Santo Domingo Tonaltepec.	31
Figura 18. Climograma tipo Gausen para la zona de Santa María Tiltepec.....	32
Figura 19. Climograma tipo Gausen para la zona de Teotongo.....	33
Figura 20. Ejemplo del esquema de muestreo en las parcelas de maíz.....	36
Figura 21. Muestreo para rendimiento de maíz: a) medición de 10 m para muestreo, b) conteo de matas y plantas, c) cosecha de mazorcas y d) ordenamiento y selección de la mazorca mediana (Fotografías del año 2013).....	37
Figura 22. Esquema de muestreo de suelo para el análisis de propiedades físicas y químicas.	39
Figura 23. Esquema de muestreo de suelo para análisis de humedad.	39
Figura 24. Ubicación del muestreo de suelo en el sistema lama-bordo de: a) Santa María Tiltepec y b) Teotongo.	40
Figura 25. Estimación de las constantes de humedad del suelo del sistema lama-bordo.....	45
Figura 26. Estimación de la conductividad hidráulica de las muestras de suelo.....	48
Figura 27. Levantamiento topográfico realizado en los sistemas lama-bordo.	49
Figura 28. Preparación del sistema lama-bordo en Teotongo, Oaxaca, 2013.....	57
Figura 29. Siembra de maíz de cajete con coa en Santo Domingo Tonaltepec, Oaxaca, 2014: a) preparación del terreno, b) siembra con coa, c) semilla utilizada para siembra (maíz y frijol y d) número de semillas por mata usadas en la siembra.....	58
Figura 30. Coa utilizada para siembra de maíz de cajete.....	59
Figura 31. Cultivo de lama-bordo sin control de arvenses en Teotongo, Oaxaca, 2013.....	60
Figura 32. Cosecha de maíz de cajete en Santa Domingo Tonaltepec, Oaxaca, 2013.....	61

Figura 33. Rendimiento de maíz por sitio y sistema de producción.....	67
Figura 34. Efecto de la densidad de plantas en el rendimiento de maíz.....	68
Figura 35. Variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo en Santa María Tiltepec.....	78
Figura 36. Variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo en Teotongo.....	80
Figura 37. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo en el sistema lama-bordo en Tiltepec.....	83
Figura 38. Variabilidad espacial de las propiedades química del suelo en el sistema lama-bordo en Teotongo.....	85
Figura 39. Proyección de las secciones transversales del sistema lama-bordo de Tiltepec y Teotongo.	87

1. INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos ha sido reconocida a nivel mundial, como resultado de fenómenos naturales y agravada por las actividades humanas, por el cambio en la cubierta vegetal, el sobrepastoreo, prácticas agrícolas inadecuadas, extracción de leña, expansión industrial y urbanización, entre otras. Al respecto Boon (1994) menciona que, a nivel mundial, el 56% de los suelos presentan erosión hídrica. En México se estima que más del 43% de los suelos presentan degradación que varía de ligera a extrema, provocada por la acción humana por cambios en el uso del suelo, el sobrepastoreo y los sistemas de laboreo, el 36.6% de los suelos presentan erosión hídrica manifiesta en pérdida de la capa superficial (25.3%), deformaciones del terreno (11.6%) y sedimentación (0.6%) (SEMARNAP, 1999).

La SARH en 1982, reportó que de las 9.1 millones de hectáreas del estado de Oaxaca, el 78% presentan erosión en diferentes grados, con el 30% de erosión muy severa. En 2002, el Colegio de Postgraduados ubica 1,675,321 hectáreas de la superficie del estado afectada por la erosión hídrica, con el 95% con la pérdida de la capa superficial y el resto a deformaciones del terreno.

Diversos estudios ubican a la Mixteca como la región con el mayor grado de erosión de los suelos a nivel mundial; y reconocen que lo que era una zona cubierta con bosque, fue deforestada paulatinamente, lo que propició el deterioro de los suelos y se agravó con la introducción de la ganadería caprina, la sobreexplotación de los recursos forestales (para madera, carbón y durmientes), en la época de la colonia, el abandono de las prácticas tradicionales de producción agrícola y la migración (Martínez, 2006; Rivas, 2008 y Nuñez y Marten, 2013).

Ante esta situación los productores en las cañadas desarrollaron sistemas tradicionales para el manejo de los escurrimientos y los suelos, con la intención recuperar áreas degradadas y establecer pequeñas áreas para la producción agrícola; conocidas como lama-bordo o jollas; estas se construían con bordos de tierra, piedra acomodada, troncos o ramas.

El sistema de lama-bordo es una práctica prehispánica para conservación de suelo, que ha sido utilizada por varios siglos en la región de la Mixteca, se ubica principalmente en los lechos de arroyos secos o barrancas, es utilizada para retener el suelo que arrastra la escorrentía, al suceder una lluvia torrencial, para formar áreas de acumulación de suelos y conservación de humedad donde se siembran maíces criollos bajo el sistema de humedad o de cajete. El sistema puede alcanzar hasta 4 kilómetros de longitud, con superficies parceladas que varían de 0.25 hasta más de una hectárea, (Pérez y Anderson, 2006; Rivas *et al.*, 2006; Galindo, 2008 y Spores *et al.*, 2008).

Actualmente, estos sistemas no sólo se siembra maíz de cajete, se ha ampliado el espectro de cultivos viables de establecimiento, ya que no hay una relación directa entre el uso de este tipo de maíz y la obra de conservación. Los sistemas de terrazas construidas con apoyo del gobierno se utilizan parcialmente y no se les da el mantenimiento requerido.

Esta investigación se planteó con la finalidad de conocer los beneficios de las obras de conservación de suelo, principalmente la lama-bordo, ya que ha sufrido abandono a través de los años, a pesar de que en la literatura se documenta su efectividad en la acumulación de suelo fértil para uso agrícola. Además de comparar los sistemas de producción, costos y rendimientos en tres sitios de la región Mixteca, considerando las obras de conservación de suelo (lama-bordo y terrazas) y el sistema convencional.

Para conocer el proceso de producción en los sitios de estudio, se entrevistó a productores, quienes proporcionaron información sobre las actividades realizadas para la producción de los cultivos, costos y formas de producción, en los ciclos agrícolas 2013 y 2014. Se aplicó la metodología de PROMAF (SAGARPA *et al.*, 2007) para estimar los rendimientos de maíz. Para conocer el efecto de los sistemas de producción y manejo en la calidad de los suelos se tomaron muestras a 30 cm de profundidad en cada uno de los sitios, y se realizaron análisis físicos y químicos en el laboratorio. Para conocer el potencial del sistema para retener suelo y los volúmenes de obra aplicados para la construcción, se realizaron levantamientos topográficos en los sitios de lama-bordo; además de un muestreo intensivo de los suelos en cada una de las parcelas que integran el sistema en Santa María Tiltepec y Teotongo para determinar la variabilidad

espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos propiciada por el sistema lama-bordo.

Los resultados permitieron conocer el impacto de las obras de conservación del suelo y los sistemas de manejo del cultivo en los rendimientos del maíz y en la variabilidad de las propiedades físicas y químicas en las parcelas de los productores. En los sistemas lama-bordo de Santa María Tiltepec y Teotongo fue posible analizar su impacto en la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas, enfatizando los cambios en la fertilidad, contenidos de carbono y acumulación de carbono total en el suelo, que bajo el contexto actual de cambio climático pueden coadyuvar a mitigar la emisión los gases de efecto invernadero, que ocasionan el aumento de temperatura en el planeta y, por lo tanto la modificación de los ecosistemas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Valorar la eficiencia de las prácticas de conservación de suelos y su impacto en la agricultura tradicional y en la calidad de los suelos en las laderas en la Mixteca Alta de Oaxaca

2.2. Objetivos particulares

- Evaluar los sistemas de producción en las zonas con obras de conservación y convencional
- Valorar el impacto de las obras de conservación de suelo y agua en la producción de alimentos y en el mejoramiento de la calidad de los suelos
- Estimar la variabilidad espacial de las propiedades físicas, químicas y captura de carbono de los suelos propiciada por el sistema de lama-bordo

3. HIPÓTESIS

- Las obras de conservación de suelo inciden en la producción de granos básicos y en la recuperación de zonas degradadas
- El sistema lama-bordo permite la captura de carbono en el suelo

4. SUPUESTOS

- El sistema de muestreo de los sitios de estudio representan las condiciones donde se realizan las acciones de conservación
- La información proporcionada por los agricultores sobre los sistemas de producción es confiable

5. REVISIÓN DE LITERATURA

En este apartado se presenta la situación que guarda la región Mixteca en relación al aprovechamiento de los recursos naturales, la erosión, los sistemas de producción asociados con las acciones de conservación del suelo realizadas, con énfasis en la agricultura convencional; los sistemas lama–bordo, sus principios, objetivos y efectividad en la retención de suelo, humedad y apoyo en la producción; y los sistemas de terrazas asociados con la agricultura a fin de orientar sus alcances para conservar los suelos y producir alimentos.

5.1. La Región Mixteca

La Región Mixteca, se ubica al noreste de la Ciudad de Oaxaca, cuenta con una extensión de 37,229 km², abarca 217 municipios (194 corresponden a Oaxaca, 16 a Guerrero y 7 a Puebla). La Mixteca Oaxaqueña comprenden de tres grandes áreas: baja, alta y costa. La población que habita en esta región se encuentran en alto y muy alto grado de marginación, debido a las condiciones adversas en las que se encuentran (Nuñez y Marten, 2013; Serrano, 2006; y Martínez, 2006).

La Mixteca Alta es una subregión formada por los distritos de Nochixtlán, Tlaxiaco, Teposcolula y Coixtlahuaca en donde convergen la Sierra Madre del Sur y la Sierra de Oaxaca (Rivas, 2008).

La Mixteca Oaxaqueña, en el pasado tuvo una buena cobertura forestal, ahora es una de las regiones con una de las poblaciones más pobres del país, con mayor deterioro ambiental, alto grado de deforestación, escasez de agua, y en un acelerado proceso de desertificación (Nuñez y Marten, 2013).

Nuñez y Marten (2013), mencionan que las causas de la degradación se originan siglos atrás, por la extracción de cantidades masivas de madera, introducción de ganadería caprina y expansión de la frontera agrícola. En la segunda mitad del siglo XX la degradación se exacerbó por las políticas agrarias y las tecnologías de la Revolución Verde. La política gubernamental solo ofrecía crédito para monocultivos, lo cual casi terminó con el sistema tradicional de milpa. La falta de rotación de los cultivos y el

monocultivo disminuyeron la fertilidad de la tierra y la expusieron a la erosión; el uso de fertilizantes químicos mejoró los rendimientos a corto plazo, aunque la erosión y la degradación continuaron, obligando a los agricultores a utilizar cada vez más fertilizantes. El agotamiento de las condiciones de fertilidad de los suelos y costos de producción elevados, han obligado a los agricultores a abandonar sus terrenos. Actualmente la región sufre de uno de los índices de erosión más altos del planeta y una alta proporción de terrenos no se cultivan porque sus dueños han emigrado en busca de empleo.

5.2. Erosión en la Mixteca

El hombre ejerce una creciente presión sobre los recursos naturales, provocando el deterioro de amplias superficies de terreno (Ceja, 2008). La erosión del suelo es un proceso paulatino, por lo que sus manifestaciones no son apreciables a corto plazo, sino hasta que se encuentran en la fase final, cuando se ha perdido la mayor parte de la capa arable (García *et al.*, 1995).

Algunos estudios sobre la erosión de los suelos en México señalan que el 42% del territorio nacional es susceptible a pérdida potencial de suelo por erosión hídrica; 17 entidades están afectadas en más de 50% de su territorio, entre ellas destaca Guerrero (79.3%), Puebla (76.6%), Morelos (75.2%), Oaxaca (74.6%) y el Estado de México (73.7%) (SEMARNAT, 2008).

En el Estado de Oaxaca, en el año 2002, se reportaban 1,668.44 miles de hectáreas con erosión hídrica (SEMARNAT, 2008), lo cual afecta directamente a la productividad de los terrenos agrícolas.

Jiménez (2010) menciona que la Mixteca Alta vivió su apogeo económico y social a partir del siglo X, que trajo como consecuencia un alto crecimiento poblacional. Esta sobrepoblación ejerció una fuerte presión sobre los recursos (sobre zonas cultivables, maderas preciosas, leña, entre otros), lo que inició el proceso acelerado de degradación; obligando a los pobladores a cambiar el uso del suelo, desforestar y roturar terrenos para satisfacer las demandas alimenticias para la numerosa población local.

Los suelos de la Mixteca, se caracterizan por ser someros en las laderas, profundos en los valles y con profundidad menor de 50 cm en el altiplano. Las texturas son medias: franco – limosa y franco – arcillosa. La pedregosidad es una de las limitantes de la agricultura ya que en el 45% de la superficie es mayor al 50%. Los contenidos de materia orgánica varían de 1 al 2%, en cuanto al pH, se encuentra suelos ácidos, neutros y alcalinos (Simosa, 1985).

Dentro de la problemática regional destacan la erosión del suelo, la insuficiente disponibilidad o falta de agua y la pérdida de la biodiversidad. La dimensión socioeconómica de tales impactos se manifiesta en la disminución, e incluso eliminación, de las aptitudes productivas en las áreas agrícolas, pecuarias y forestales, con la resultante disminución de los ingresos familiares, de su capacidad económica e incremento de la emigración (Ramírez, 2011).

Diversos estudios realizados en la Región Mixteca Oaxaqueña indican que alrededor del 95% de la superficie presenta erosión en grados de moderado a muy alto, producto de una topografía accidentada con pendientes de hasta el 50%, uso agrícola del suelo, sobrepastoreo, deforestación, falta de cubierta vegetal e intensidad de los vientos y lluvias. En la medida que las tierras se van erosionando aflora el material parental y las tierras agrícolas se van perdiendo (Contreras *et al.*, 2005 y Simosa, 1985).

En la actualidad, la erosión, pérdida de biodiversidad y degradación ambiental han alcanzado niveles desastrosos, que han llevado a que la Mixteca sea catalogada por mucho como “área de desastre ecológico” (Martínez, 2006).

Los agricultores de la región han realizado prácticas tradicionales de conservación, tales como: descanso de la tierra, labranza de conservación (como el maíz de cajete), construcción de presas de piedra acomodada y de ramas y troncos de árboles (Pérez, 1992), con la intención de conservar terrenos para la producción y disminuir los efectos de la grave situación económica y de pobreza extrema en la que se encuentran.

5.3. Obras de conservación de suelo y agua en la Mixteca

A lo largo del tiempo, la sociedad mixteca ha asumido ciertos trabajos de protección, conservación y restauración del suelo, realizados principalmente en terrenos comunales, donde participa la ayuda mutua, también conocida como el “tequio”. Las prácticas de conservación tradicionales están adaptadas a las condiciones locales con uso de materiales de la zona. La intensidad del trabajo requerido para establecer y dar mantenimiento a las obras de conservación ha provocado el abandono de algunas de ellas, permanecen solo aquellas financiadas o promovidas por el gobierno u otras organizaciones (Jiménez, 2010).

Las obras de conservación que se han construido vía institucional, son: terrazas de formación sucesiva, terrazas de banco, terrazas individuales para frutales, razamientos, presas de control de azolves y bordos de captación de agua de lluvia (o jagüeyes), con las cuales, una superficie importante cuenta con acciones de conservación de suelo y agua (Pérez, 1996), que busca tener un impacto importante en la cantidad de suelo perdido en la actualidad.

Los agricultores de la Región de Nochixtlán han realizado diversas prácticas de conservación de suelo y agua, entre ellas: rotación de cultivos, que es una práctica frecuente; construcción de represas, para establecer los sistemas de producción lama-bordo, trazo del surcado, descanso de la tierra y aplicación de fertilizantes, prácticas medianamente frecuentes; la construcción de terrazas y la aplicación de estiércol, son prácticas de baja frecuencia; la incorporación de abonos verdes (Pérez, 1992).

Dada la importancia de las obras de conservación de suelo en la región y el impacto que tienen con su construcción, a continuación se describirán las elegidas para el presente trabajo (lama-bordo y terraza).

5.3.1. Lama – bordo

En la Mixteca Oaxaqueña se han aprovechado desde la época prehispánica las escorrentías y la erosión para crear nuevas áreas para la producción de cultivos en el fondo de las barrancas mediante la construcción de bordos que retienen el suelo que se

arrastra de las partes altas durante el escurrimiento estacional y conservan el agua. Estos espacios agrícolas son utilizados para el cultivo de variedades criollas de maíz, seleccionadas ancestralmente. Regional y localmente este sistema recibe nombres, tales como: trincheras, atajadizos, aollados, enlamados, lama-bordo y jollas (Rivas, 2008).

La lama-bordo es una técnica tradicional de conservación de suelo y agua, cuyo origen se remonta al periodo preclásico tardío (500 a.C.) o el clásico temprano, creció notablemente en el periodo clásico y alcanzó su apogeo durante el posclásico. Surgió como respuesta a la escasez de tierras cultivables y solución para terrenos inclinados, es utilizada para retener, en los lechos de arroyos secos o barrancas, el agua y suelo que arrastra la escorrentía cuando se presenta una lluvia torrencial, donde se siembra maíces criollos bajo el sistema de humedad o de cajete, las superficies son variables y van de 0.25 hasta más de una hectárea (Galindo, 2008; Rivas *et al.*, 2006 y Spores *et al.*, 2008) y llegan a medir en conjunto hasta 4 kilómetros de longitud (Pérez y Anderson, 2006).

Rojas (2009), define la lama-bordo como un sistema de riego por inundación o avenidas, con una especie de presas efímeras en miniatura cuyos bordos o cortinas se construyen en las laderas montañosas con materiales locales, tales como palos, ramas, tierra y piedras, con el fin de distribuir los escurrimientos sobre un área mayor que la que cubrirían en forma natural. El agua y los sedimentos (aluvión o lama) se encauzan a las parcelas adyacentes en donde se realizan siembras tempranas de maíz de cajete, con el objetivo de asegurar la cosecha del ciclo de temporal.

La característica distintiva de ésta tecnología es la construcción de una serie de cortinas dentro de los lechos de arroyos secos con piedra acomodada o tierra compactada, las que sirven como barrera para retener la escorrentía y suelo que se dirige aguas abajo. El suelo retenido en cada lama, la materia orgánica y la humedad residual que se queda, son el sustrato para un buen desarrollo del cultivo de maíz (Galindo, 2008).

Mueller *et al.* (2012) atribuyen el surgimiento de la lama-bordo como respuesta a las condiciones que prevalecen en la región, clima seco, cálido y muy estacional, con bosque de dosel abierto y matorrales en laderas, señalan que los propios agricultores provocaban la erosión en las parte más altas, con el fin de acelerar el establecimiento de terrazas fértiles.

Leigh *et al.* (2013) y Mueller *et al.* (2012) realizaron estudios mediante técnicas de datación de radiocarbono en sistemas lama-bordo, las describen como estrategias de manejo adaptativo para aprovechar los nutrimentos, agua, sedimentos y vegetación; que resultaron atractivas para los primeros agricultores, en un contexto de presiones humanas y climáticas; encontraron que las lama-bordo en la Mixteca Alta, específicamente en Coixtlahuaca y Nochixtlán, fueron construidos hace 3,400 – 3,500 años aproximadamente y llegan a tener una profundidad de 11.50 metros, que representa una inversión importante de trabajo humano, tiempo y mantenimiento.

En un estudio de la Universidad del Norte de Arizona, en el Cerro del Jazmín en la Mixteca Alta, lugar en el que se desarrolló un asentamiento urbano importante en la región en el periodo postclásico temprano, ubica a la lama-bordo como elemento importante en el desarrollo de la economía del lugar y el abastecimiento de alimentos para la población (Pérez *et al.*, 2011). Menciona que las edades de las estructuras, que se muestran en la Figura 1, revelan una larga e intermitente historia de ocupación poblacional e intensidad de la labor necesaria para construir manejar y mantener el sistema de terrazas.

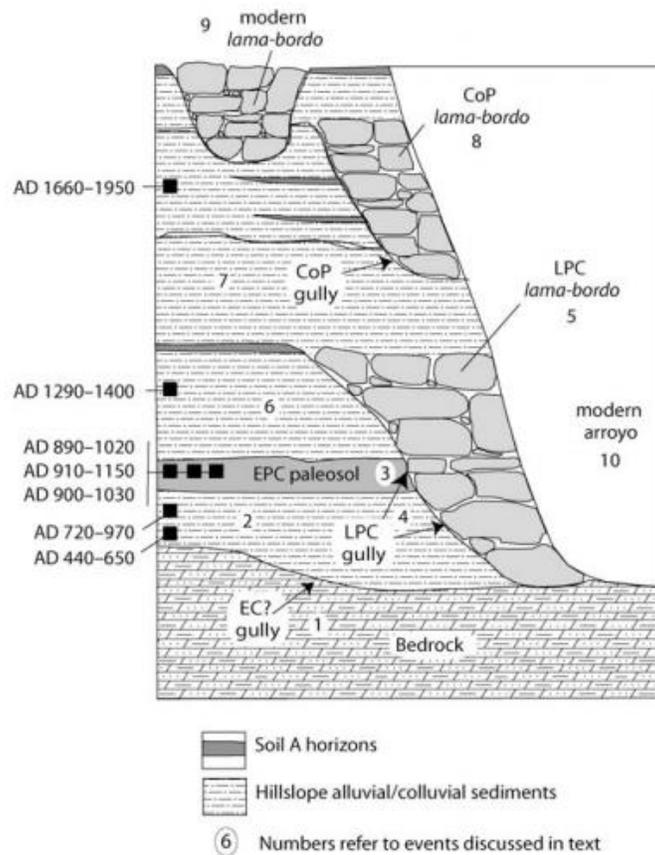


Figura 1. Perfil cronoestratigráfico de lama-bordo en Nochixtlán, Oaxaca (Tomado de Pérez *et al.*, 2011).

En los últimos años, dada la pérdida del conocimiento tradicional sobre el manejo de los recursos naturales y la migración de la población, las lama-bordo fueron sustituidas por nuevas técnicas y el pastoreo (Pérez, 2006), actividades que afectan la situación actual.

Rivas *et al.* (2008), identifican las características de lama-bordo o “jollas”, jóvenes y viejas, mencionan que las jollas jóvenes (Figura 2a) se notan claramente en el fondo de una barranca, aún son evidentes los límites entre lamas, los muros de piedra o tierra, arbustos en la corona de los muros y no son consecutivas; por su parte, en la lama-bordo vieja (Figura 2b), no son claros los límites entre lamas, se han suavizado los muros y sólo hay árboles a los costados de las lamas (Figura 2).

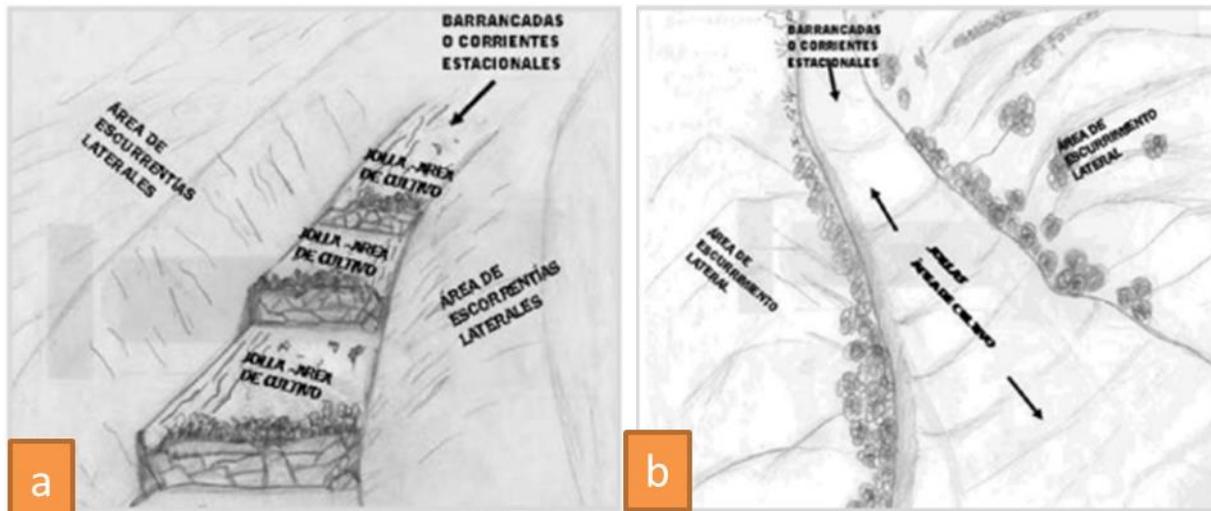


Figura 2. Comparación de lama-bordo nueva (a) y vieja (b) (Tomado de Rivas *et al.*, 2008).

Existen diferentes formas de construir el sistema lama-bordo, se pueden sembrar árboles de manera perpendicular a la dirección del flujo e ir construyendo bordos de tierra aguas arriba para conformar los bancos (Figura 3a) o construir muros de piedra acomodada (Figura 3b).



Figura 3. Tipos de lama-bordo: a) con árboles y muro de tierra, b) con muros de piedra acomodada (Chávez, 2012).

Chávez (2012), realizó una revisión de los diferentes estudios efectuados en lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca y ubicó los sistemas y los sitios donde se encuentran (Figura 4).

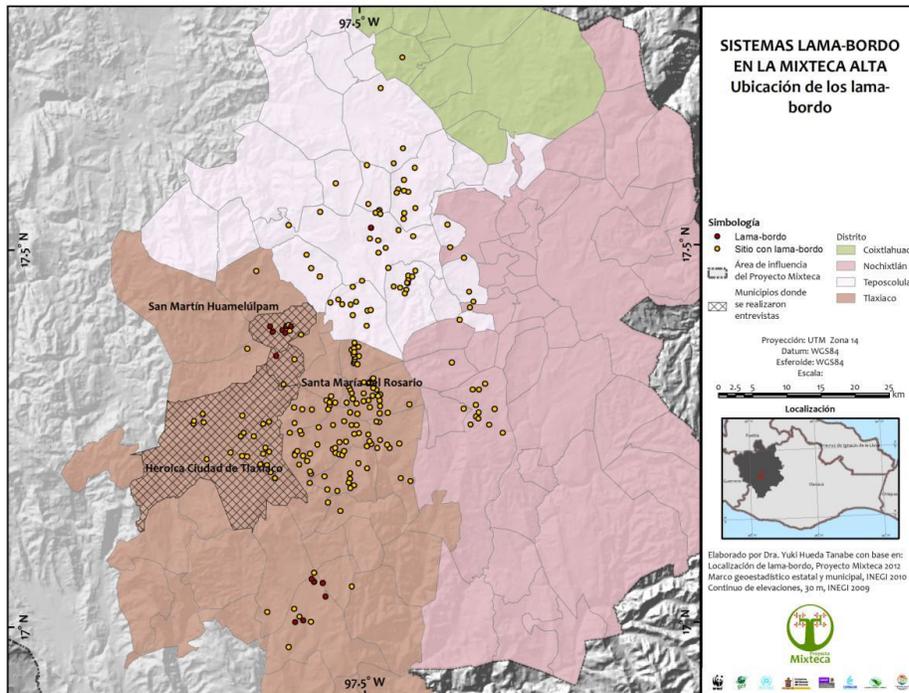


Figura 4. Ubicación de los sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca (Tomado de Chávez, 2012).

Mencionan que en terrenos degradados de ladera, aprovechando la presencia de cañadas, se establecen los sistemas lama-bordo (Figura 5a), mediante una serie de bordos donde se desarrolla la agricultura; en las partes bajas se construyen bordos de tierra para retener azolves y formar terrazas para su uso en la agricultura (Figura 5b). En las laderas alledañas se construyen zanjas bordos para retener agua y suelo y propiciar la recuperación de los suelos ya degradados (Figura 5c).

Se atribuye el abandono de las parcelas con lama-bordo a lo errático de la precipitación y la emigración de la población, se argumenta que ahora es más fácil comprar los granos básicos para la alimentación y relegando la producción de maíz en las cañadas ya que demanda mano obra y altos costos de producción.



Figura 5. Localización del sistema lama-bordo en la región de La Paz Tilantongo, Oaxaca (Fotografía propia tomada en el 2012 en la región de estudio).

En los sistemas lama-bordo, la falta de mantenimiento y uso de estructuras para controlar avenidas extraordinarias (barrancadas) provoca la destrucción lateral y/o central de los bordos, que colapsan la totalidad del sistema (Figura 6).



a) bordo construido en la cañada, b) profundidad y c) capa se suelo perdida por falta de mantenimiento del sistema
Figura 6. Destrucción de un lama-bordo por el abandono en la región de La Paz Tilantongo, Oaxaca (Fotografía tomada en el 2012).

Los sistemas lama-bordo también pueden construirse en depresiones de las laderas, donde se colocan hiladas de piedra hasta conformar bordos perpendiculares a la pendiente (Figura 7a) que con el tiempo se van sobre elevando hasta formar una

terrazza de banco; posteriormente aguas arriba y a la altura donde se depositan los azolves se construye otro bordo hasta crear una serie de lama-bordo (Figura 7b).



Figura 7. Sistema lama-bordo en laderas pedregosas y formación de bancales en La Paz Tilantongo, Oaxaca (Fotografía tomada en el 2012).

Rivas (2008) demostró que las características de la composición de las capas en el suelo de la *jollas* cumplen un papel importante en el movimiento del agua a lo largo del perfil. El agua que se desplaza a través del suelo de textura más fina, se reduce cuando hay una capa arenosa. La arena o de grava que asoma en la superficie del suelo facilita la infiltración y aunque retienen poca agua en la zona radical, ayudan a infiltrarla para retenerla en la siguiente capa de suelo arcilloso lo que facilita el almacenamiento de grandes cantidades de agua. Las capas arcillosas superficiales de los suelos de temporal, retardan la infiltración por la baja conductividad de la capa argílica. Parte del agua se acumula sobre el horizonte poco permeable y produce una capa freática temporal. En síntesis, debido a su composición y estructura, las *jollas* pueden ser consideradas como verdaderas obras de conservación o de recuperación de suelos.

5.3.2. Terrazas

Las terrazas son terraplenes formados por bordos de tierra, y/o la combinación de bordos y canales, construidos en sentido perpendicular a la pendiente del terreno. Construidos con la finalidad de reducir la erosión, aumentar la infiltración del agua, disminuir el volumen de escurrimiento, desalojar excedencias de agua superficial a velocidades no erosivas, reducir los sedimentos que transporta la escorrentía y acondicionar los terrenos para las labores agrícolas (Martínez *et al.*, 2009).

Muller *et al.* (2012) mencionan que la diferencia entre las lama-bordo y las terrazas de ladera, es que éstas últimas no se construyen siguiendo la dirección del flujo, se ubican en zonas más altas, cubren superficies más amplias e implican movimiento de grandes volúmenes de tierra.

Anta *et a.* (2006) reportan que oficialmente los trabajos de conservación de suelos en la Mixteca, los inició la Comisión del Papaloapan en los años 50's con terraceo y reforestaciones (Figura 8); en 1987, el gobierno del Estado de Oaxaca, el programa de Lluvia, Tequio y Alimento construyó bordos y reforestó y en 1996 el Programa de Desarrollo Rural Sustentable realizó reforestaciones y obras de conservación. Así mismo se reconoce la participación de las asociaciones de productores como el Centro de Desarrollo Integral Campesino de La Mixteca (CEDICAM) y Alternativas y Procesos de Participación Social A.C en las conservación de suelos.



Figura 8. Vocales ejecutivos de la Comisión del Papaloapan visitan terrazas en el municipio de S. J. Bautista Coixtlahuaca, en 1970, que ampliaron considerablemente la superficie agrícola disponible. Fuente: Anuario de la Comisión del Papaloapan (Tomado de Jiménez, 2010).

De 1950 a la fecha se han realizado programas de conservación del suelos en los que participaron la Dirección General de Conservación del Suelo y Agua (DGCSA), la Comisión Nacional de Zonas Áridas, los Programas de Desarrollo Rural y las organizaciones de productores. En los años 80's, la DGCSA y el gobierno del estado, en terrenos comunales de Tiltepec, Oaxca, construyeron terrazas de banco, pero no se incorporaron a la producción y se destruyeron con el tiempo, pero fueron rehabilitadas en los últimos años, a pesar de esto aun siguen abandonadas (Figura 9) (CEDICAM, 2015, comunicación personal)



Figura 9. Terrazas de banco construidas en la región de Tiltepec (Fotografías del 2015).

Los sistemas de terrazas construidas fueron de base angosta y bancales al contorno y con el paso del tiempo se han modificado, para poder utilizar maquinaria. Una representación gráfica la reportada Jimenez (2010), quien comparó los cambios en los sistemas de terrazas en Tepelmeme, con fotografías aéreas de 1970 e imágenes de satélite del 2010.

Encontró que en 1970 se construyeron terrazas de formación sucesiva siguiendo el contorno, parte **a** (Figura 10 A), en la actualidad el predio se dividió en dos partes, en una de ellas se eliminaron las terrazas y en otra se abandonaron (parte **a** Figura 10 B).

En la parte **b** de la Figura 10 A se aprecia que no existían obras y en la imagen actual se aprecia un sistema de terrazas (Figura 10 B).

En la zona **c** existían terrazas (Figura 10 A) y actualmente son terrenos degradados (Figura 10 B).

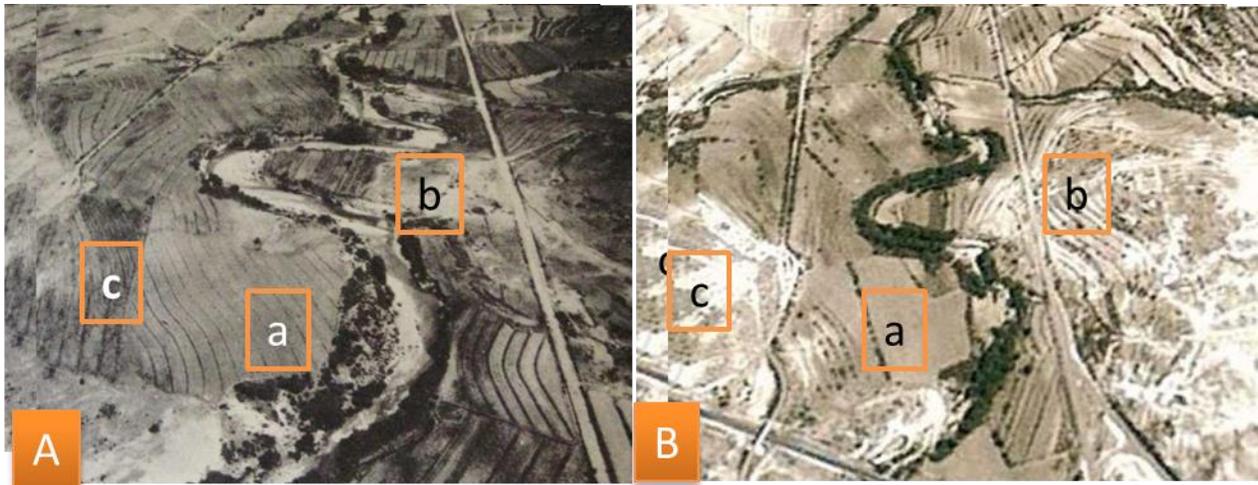


Figura 10. Trabajos de conservación de suelos en Tepelmeme Villa de Morelos. A la izquierda fotografía aérea, alrededor de 1970 (Anuario de la Comisión del Papaloapan) y a la derecha, el mismo lugar en la actualidad (Imagen de satélite de Google Earth) (Tomado de Jiménez, 2010).

Los sistemas de terrazas de diferentes tipos fueron aceptados por los productores, sin embargo con el tiempo los dejaron de usar, los cambiaron o abandonaron. Estas obras se aprovechan cuando existen autoridades y/o líderes campesinos que enseñan a los productores a utilizar los sistemas de terrazas (CEDICAM, 2015, Comunicación personal).

5.4. Agricultura en la Mixteca

Lind (2008) menciona que los mixtecos cultivaban principalmente maíz, chíca, frijol, calabaza, chile, jitomate y maguey. Además de una gran variedad de verduras y frutas como el nopal, aguacate, capulín y ciruela.

De acuerdo a la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI) (2006), indica que generalmente la agricultura se practica en terrenos poco propicios para el desarrollo de esta actividad, por las condiciones orográficas, actualmente se cultiva maíz en laderas muy pronunciadas y pedregosas.

En los años 80's la producción agrícola en la región estaba sustentada en el maíz y frijol, ambos en temporal. Simosa (1985) menciona que el 94.1% de las tierras laborables se dedicaba a éstos cultivos, tanto en asociación (75.5%) como en forma individual (15.4%) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Superficie de los principales cultivos en región Mixteca.

Cultivo	Superficie (ha)	%
Asociación maíz – frijol	35,669.00	75.5
Maíz solo	7,263.00	15.4
Frijol solo	1,518.00	3.2
Otros cultivos	2,797.00	5.9
Total	47,247.00	100

Fuente: Simosa, 1985

El SIAP (2014) reporta que a nivel nacional se cosecharon 13,469,138.43 toneladas de maíz en temporal, con un rendimiento promedio de 2.3 t ha⁻¹. Asimismo, en el Estado de Oaxaca, para el mismo año cosechó 646,851.18 toneladas, el 88% fueron en condiciones de temporal.

Para el mismo año, en la Mixteca se cosecharon 101,578.52 toneladas de maíz de temporal, con un rendimiento promedio de 0.92 t ha⁻¹; predomina el cultivo de maíz, seguido por el frijol, el trigo grano entre otros (SIAP, 2014).

Los datos anteriores, muestran la importancia de las parcelas de temporal, ya que de ellas se obtiene la mayor cantidad de producción de grano para el consumo familiar.

La agricultura se considera de subsistencia, se siembran cultivos básicos para consumo humano, pero con rendimientos muy bajos, que con frecuencia no satisfacen las necesidades familiares¹ (Berumen, 2004). El rendimiento de los cultivos varía de acuerdo a la zona de producción y las condiciones del suelo (Simosa, 1985).

Los rendimientos reportados por el SIAP (2016) para maíz, frijol y trigo en Santo Domingo Tonaltepec, San Pedro Topiltepec y Teotongo, Oaxaca en el periodo del 2005 al 2014, es importante recalcar el hecho de que rara vez superan la tonelada por hectárea, a excepción del 2010 donde los rendimientos se acercaron a la tonelada o la superaron; caso contrario sucedió en el 2013 donde fueron muy bajos o no hubo cosecha (Cuadro 2).

¹ El consumo anual estimado es de 800 kg de maíz por familia

Cuadro 2. Rendimientos de los principales cultivos de los tres sitios de estudios (2005 – 2014)
(Datos tomados del SIAP).

	Santo Domingo Tonaltepec			San Pedro Topiltepec			Teotongo		
	Maíz	Frijol	Trigo	Maíz	Frijol	Trigo	Maíz	Frijol	Trigo
2005	0.71	0.48	0.74	0.00	0.48	0.67	0.00	0.48	0.74
2006	0.27	0.15	0.40	0.36	0.30	0.33	0.29	0.40	0.52
2007	0.72	0.33	0.61	0.70	0.42	0.89	0.87	0.62	0.69
2008	0.60	0.39	0.77	0.68	0.67	0.90	1.00	0.66	0.85
2009	0.59	0.30	0.75	0.67	0.50	0.86	0.81	0.55	0.77
2010	1.40	0.75	0.96	0.58	0.44	1.20	0.99	0.50	1.00
2011	0.59	0.30	0.75	0.67	0.50	0.91	0.81	0.55	0.85
2012	0.60	0.32	0.74	0.68	0.51	0.89	0.82	0.54	0.84
2013	0.37	0.30	0.00	0.00	0.42	0.37	0.00	0.33	0.57
2014	0.43	0.24	0.49	0.60	0.38	0.44	0.67	0.50	0.45
Media	0.63	0.36	0.62	0.49	0.46	0.75	0.63	0.51	0.73

Los suelos de la Mixteca son básicos (pH de 6.8 a 8.7), generalmente carecen de materia orgánica y son deficientes en nutrientes inorgánicos. Presentan una textura mediana con pendientes de entre 9 y 20%, son someros y sujetos a erosión, lo cual dificulta la actividad agrícola (Martínez, 2006).

Altieri (1991), menciona que muchas prácticas que se consideraban mal guiadas o primitivas y que se han estudiado como agricultura tradicional, ahora son reconocidas como apropiadas, porque atienden problemas específicos de pendiente, inundación, sequía, plagas y enfermedades y baja fertilidad de suelos, entre otros. Son prácticas adaptadas a las condiciones y dependen de recurso locales, son de pequeña escala y descentralizados y suelen conservar la base de recursos naturales, entre esas prácticas se encuentra los sistema lama-bordo y terraza.

5.4.1. Agricultura en lama – bordo

Pérez y Anderson (2013) definen al sistema lama-bordo como una estrategia adaptativa y flexible para la producción de alimentos y la gestión de la tierra con gran importancia cultural para los agricultores hoy en día, como un Sistema Socio – Ecológico (SSE) que es flexible y persistente en el contexto de las técnicas, los conocimientos y tradiciones compartidas por las comunidades.

La trayectoria de un SSE persistente y adaptativo tiene las siguientes fases:

- Exploración, en el que el sistema y sus funciones o actividades se están desarrollando
- Conservación, es cuando el sistema está configurado, funciona y trabaja para seguir siendo como es, cuando la acumulación y almacenamiento de energía y materiales se enfatizan
- Liberación, cambios en el sistema debido a la perturbación exterior y partes de éste colapsan.
- Reorganización, si un sistema es persistente, pasa a ésta fase, donde el nuevo sistema aprende, cambia, hace frente y se reorganiza para restablecer sus funciones

El SSE lama-bordo ha mostrado capacidad de recuperación a través de milenios (Pérez y Anderson, 2013).

Martínez (2006), resalta que las epidemias causadas por enfermedades nuevas en América y la hambruna que se experimentaron en la colonia diezmaron a la población, por lo que se abandonaron sistemas ancestrales de cultivo, como las terrazas, que representaban un avance significativo en los sistemas de producción que ocupaban mano de obra de forma masiva para su construcción y mantenimiento, aprovechaban acumulaciones anuales de aluvión y facilitaban la agricultura intensiva de policultivos maíz – calabaza – frijol.

Resulta importante destacar lo que Chávez (2012) indica, sobre que en la Región Mixteca no en todos los casos fue abandonado el sistema lama-bordo, algunos conservan sus componentes iniciales del uso de coa y maíz de cajete, el cual ha sido una contribución de los Mixtecos del altiplano noroccidental del estado de Oaxaca, como también lo remarca Muñoz *et al.* (2002); la coa permite perforar a una mayor profundidad el suelo (20 a 30 cm) y el maíz de cajete aprovecha la humedad que existe a esa profundidad en la lama-bordo, cuando aún no se presenta el temporal del año (Figura 11).



Figura 11. Sistema de cultivo en lama-bordo: a) siembra con mano de obra familiar, b) uso de coa para la siembra, c) maíz de cajete en orificio hecho con coa y d) maíz de cajete en desarrollo (Tomado de Chávez, 2012).

En la comunidad de La Paz Tilantongo, Nochixtlán, Oaxaca, se conserva la tradición de utilizar la lama-bordo, las cuales han acumulado el suelo suficiente para la agricultura (Figura 12a); los bordos son construidos con piedras que se encuentran en el sitio, y en el mantenimiento se utiliza la misma con la que se construyó inicialmente (Figura 12b); en los bordos siembran árboles, que por medio de las raíces ayudan la estabilidad y atenúan el efecto de la erosión (Figura 12c); la siembra se realiza con yunta, a la par van los sembradores, cuando se ha detectado que la lama cuenta con la humedad suficiente para la germinación de la semilla. Dada la importancia que tiene éste sistema en el lugar, los agricultores lo conservan en buen estado y le dan mantenimiento cuando lo requieren (Figura 12).



Figura 12. Sistema lama-bordo en La Paz Tilantongo, Nochixtlán, Oaxaca.

Chávez (2012), menciona las ventajas y dificultades de cultivar en este tipo de sistema:

Ventajas:

- Frena la pérdida de suelo por erosión
- El contenido de humedad lo hace ideal para la siembra tradicional de maíz de cajete
- Requiere mantenimiento anual que va unido a la preparación del terreno para la siembra
- Son terrenos más fértiles, con suelos ricos en nutrientes que no necesitan de agroquímicos
- La humedad permite el crecimiento de árboles frutales

Dificultades:

- Los muros de piedra son más resistentes, lo que para la construcción de lama-bordo representa un problema por falta de recursos, mano de obra y materiales
- Es necesario que el bordo o muro se ubique en una barranca que tenga corrientes temporales y tener acceso al terreno con esa característica no es sencillo por la tenencia de la tierra

- Cuando bajan las barrancadas fuertes se llevan los muros que deben reconstruirse antes de perder suelo
- La reutilización o rescate de sistemas lama-bordo pueden representar una dificultad institucional si se trata de una lama-bordo asociado a un sitio arqueológico
- El sistema requiere mantenimiento anual para conservar el suelo retenido, de lo contrario en tres años de abandono y lluvias fuertes se erosiona.
- La migración de las nuevas generaciones dificulta la enseñanza del conocimiento tradicional entre generaciones

El sistema lama-bordo comprende distintos componentes, como muchas prácticas agrícolas que son el resultado de ajustes entre el ambiente natural, clima, cultivos fuerza de trabajo disponible para el cultivo y necesidades biológico – culturales, que han sido realizados a través del tiempo en las poblaciones rurales, que surgió del conocimiento individual, especializado y específico, que se divulgó a través de la transmisión generacional del conocimiento (González, 2007) y en ocasiones se acompaña de instrucciones de los mayores (Caballero, 2006).

5.4.2. Agricultura en terrazas

Las terrazas en ladera se han construido con distintos materiales en la región Mixteca, como son: piedras, arbustos, árboles frutales y maguey, éste último el más efectivo para retener la tierra suelta, como lo indica Caballero (2006).

Dada el área montañosa que compone la mayor parte del país, las terrazas agrícolas estuvieron presentes en gran parte del territorio nacional, Rojas (2001) menciona que la distribución de este tipo de obras en épocas prehispánicas se relacionaba con la topografía y con el régimen de lluvias, ya que tenían al menos una estación seca de cinco o más meses y tenían un promedio anual de precipitación de 900 mm o menos. González (2014), hace una descripción de las terrazas en el estado de Tlaxcala, desde la época prehispánica y como permitió a la población poder producir en zonas de ladera.

Francisco *et al.* (2006), en un estudio en Los Tuxtlas, Veracruz, evaluaron cuatro sistemas de manejo del suelo (labranza de conservación, labranza tradicional, terrazas de muro vivo con tracción animal y tracción mecánica); la terraza de muro vivo con tracción animal resultó más eficiente en la reducción del escurrimiento superficial y la pérdida de suelo, y mayor productividad de maíz con estabilidad aceptable en el rendimiento, se asoció con una baja relación erosión – productividad y baja pérdida de productividad en el cultivo de maíz.

Kosmas *et al.* (s/f) mencionan que la erosión disminuye la productividad, por el acarreo de suelo, pérdida de materia orgánica y nutrimentos, las terrazas agrícolas han sido una técnica para reducir dicho problema en zonas montañosas. Las terrazas tradicionales han perdido valor en los últimos años, debido a las razones siguientes:

- Dificultades relacionadas con la accesibilidad y uso de maquinaria
- Disminución de los precios de los productos agrícolas y aumento de los costos de producción
- Desarrollo de la agricultura intensiva en las zonas planas
- Alto costo de mantenimiento
- Emigración masiva de la población rural hacia las zonas urbanas

5.4.3. Agricultura convencional

La agricultura convencional en la región Mixteca, se centra en la producción de granos básicos como el maíz, frijol y trigo, se cultivan bajo un sistema de temporal y de manera asociada, en rotación o en ocasiones en monocultivo. Las labores culturales se realizan manualmente, con tracción animal (yunta) y en menor medida con tractores. Los suelos presentan degradación debido a los procesos erosivos, la poca aportación de nutrimentos a los terrenos y las extracciones de fertilizantes que realizan los cultivos.

En algunos lugares la agricultura tradicional se da en laderas, Turrent (1986; citado por Orozco, 2008) estimó que en el país existen 8,711,347 ha de tierras agrícolas localizadas en laderas; con suelo profundo (5,187,825 ha) y con suelos delgados (3,523,522 ha). Los terrenos planos y profundos de temporal ocupaban 3,217,150 ha y los terrenos planos y delgados ocupaban 2,203,777 ha. El 61.4% de las tierras de

temporal eran de laderas. Técnicamente se ha considerado que las laderas cultivables tienen suelos erosionables degradados o en proceso de degradación (Buckles, 1999; citado por Orozco, 2008).

5.5. Captura de carbono

El cambio climático global es, sin duda alguna, uno de los problemas ambientales más importantes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI (Pineda *et al.*, 2005), ocasionado por los gases de efecto invernadero. La atmósfera terrestre está compuesta en un 99% por oxígeno (O₂) y nitrógeno (N₂), el 1% restante contemplan los gases de efecto invernadero, entre los más importantes se encuentran el vapor de agua (H₂O) y el bióxido de carbono (CO₂). El efecto invernadero siempre ha existido, sin embargo, su ciclo natural ha sido alterado por las acciones humanas en los últimos siglos, la industrialización ha inyectado a la atmósfera CO₂ y otros gases (Garduño, 2004), que se ha incrementado de 280 ppm, en el periodo preindustrial, a 360 ppm en la actualidad (Acosta *et al.*, 2001).

La mayor parte de los procesos productivos y actividades domésticas requieren del uso de energía derivada de combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón mineral), emiten óxidos de carbono (principalmente CO₂) y otros gases que contribuyen al calentamiento atmosférico global (Guevara *et al.*, 2002; Garduño, 2004). La acumulación de CO₂ en la atmósfera se debe a que los sumideros naturales, no alcanzan a capturarlo y existe un déficit de sumideros de carbono (Pineda *et al.*, 2005). En México, el 18% de las emisiones de gases de efecto invernadero se generan como resultado de actividades agropecuarias y silvícolas, siendo el segundo sector en emisiones, después del energético (Jiménez *et al.*, 2012).

La captura de carbono con métodos de bajo costo es una propuesta viable para disminuir las tasas de liberación de CO₂ a la atmósfera, una de las opciones es el mejoramiento del manejo de las tierras de labor para aumentar el almacenamiento de carbono en los suelos, restaurar suelos degradados y fomentar la reforestación y manejo forestal adecuado (Camas, 2011).

Los bosques, sistemas agroforestales y áreas de cultivo en laderas, juegan un papel preponderante en el ciclo global del carbono, porque en ellos intervienen gran parte de los procesos biogeoquímicos que regulan el intercambio de carbono con la atmósfera y la biomasa aérea (Acosta *et al.*, 2001). Como una contribución para disminuir el CO₂ atmosférico se ha propuesto la acumulación en el suelo de C proveniente de la fotosíntesis de las plantas (captura o secuestro) (Hernández *et al.*, 2012), dado que almacena de 2 – 3 veces la cantidad presente en la atmósfera (Jiménez *et al.*, 2012 y FAO, 2007).

Para cuantificar el cambio en el contenido de carbono orgánico del suelo producto del laboreo se deben tomar en cuenta los cambios en la densidad aparente, la distribución de la materia orgánica del suelo y el contenido de material fino del suelo (Galantini e Iglesias, 2007).

México muestra prácticas de agricultura de conservación y diversos sistemas de producción tradicionales pueden incrementar de manera considerable el carbono orgánico en los suelos, (Cotler *et al.*, 2016). Mencionan que con los sistemas agroforestales tradicionales y la agricultura de conservación es posible mejorar la calidad de los suelos, mediante el incremento del contenido de carbono, la conservación de la humedad y el aumento de eficiencia del uso de agua, la reducción de la erosión, el control de arvenses y el incremento de la edafofauna.

De acuerdo con Vela y colaboradores (2009), las categorías de almacenamiento de carbono son: bajo (<50 t ha⁻¹), medio (50 – 100 t ha⁻¹), alto (100 – 150 t ha⁻¹) y muy alto (>150 t ha⁻¹).

5.5.1. Carbono total presente en distintos suelos agrícolas

Muchos investigadores han estudiado el tema en diferentes lugares y considerando los distintos componentes que integran el sistema. La captura de carbono propicia una mayor fertilidad del suelo y productividad de la tierra para la producción de alimentos y para la seguridad alimentaria (FAO, 2002).

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo; ya que mejora la productividad, secuestra carbono y mejora la biodiversidad. Las pérdidas de carbono del suelo, como resultado de la oxidación de la materia orgánica y la erosión, pueden revertirse con el manejo adecuado del suelo (FAO, 2007). El aumento del CO₂ atmosférico de los últimos 150 años (6 al 25%) puede atribuirse a la oxidación de la materia orgánica del suelo, lo cual puede ser remediado con manejo agronómico apropiados que permitan volver a capturar el carbono (Galantini *et al.*, 2007).

Los sistemas agroforestales, al combinar cultivos o frutales con especies forestales, incrementan sus niveles de captura de carbono, y mejoran su productividad (Lapeyre *et al.*, 2004). Hernández *et al.* (2012), en Custepec, Chiapas cuantificaron el carbono almacenado en el suelo bajo el sistema MIAF (Milpa Intercalada con Árboles Frutales) en laderas, encontraron que limón y aguacate acumulan 38 y 58 Mg ha⁻¹ de C respectivamente, observaron que la mayor acumulación de C se da en la superficie del suelo y disminuye con la profundidad.

Lapeyre *et al.* (2004), mencionan que las reservas totales de carbono almacenado en el suelo es indicativo de la eficiencia de un sistema en la captura de carbono, en San Martín, Perú, compararon la captura total de carbono en diferentes sistemas de uso de la tierra, reportan 485, 234, 19 – 47 y 5 tm C ha⁻¹ para bosque primario, bosque secundario; sistemas agroforestales y sistemas agrícolas, respectivamente. El sistema agrícola presentó fuga de gases de efecto invernadero cuando se usaron químicos y quema de rastrojos, entre otras actividades.

Por su parte, Fuentes *et al.* (2011), en el Valle de México evaluaron la retención de C de diferentes agrosistemas con diferentes tipos de labranza (cero y convencional), manejo de residuos (con y sin rastrojo), y rotaciones de cultivo (monocultivo y rotación), determinaron que los agrosistemas con cero labranza, retención de residuos y monocultivo o rotación son eficientes para maximizar la retención de C en el suelo y reducir emisiones de CO₂.

Vela *et al.* (2012) en un estudio sobre los niveles de carbono orgánico total en el suelo (COS) de conservación del Distrito Federal, encontraron cantidades de COS (Mg ha⁻¹)

de: 145.6, 121.3, 119.4, 111.7, 90.0 y 46.1, para áreas con bosques de *Abies religiosa*, *Quercus spp.*, *Pinus spp.*, matorral, pastizal y agrícola, respectivamente.

Segura *et al.* (2005), mediante una colecta de muestras de suelo estudiaron la cantidad de carbono orgánico a nivel nacional, estatal, región ecológica, uso de suelo e influencia humana, reportan que el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) varía desde 0.2 hasta 493 Mg ha⁻¹; a nivel estatal, los estados con mayor contenido son Yucatán, Quintana Roo, Querétaro, Chiapas e Hidalgo con más de 80 Mg ha⁻¹; los estados con menor COS son Baja California Sur, Baja California, Sonora, Coahuila y Tlaxcala con menos de 30 Mg ha⁻¹. La región ecológica con mayor cantidad de COS son las selvas húmedas con 110.5 Mg ha⁻¹ y la menor concentración en pastizales con 21.4 mg ha⁻¹. Por uso de suelo, el mayor y menor fueron, pecuario intensivo y agricultura de riego, con 80.6 y 40.8 Mg ha⁻¹, respectivamente. En cuanto la influencia humana el contenido mayor fue en la categoría moderada y menor la fuerte, con 57.0 y 40.1 Mg ha⁻¹, respectivamente.

CONAFOR (2010), reporta que las obras de conservación tienen la capacidad de almacenar carbono orgánico, en la evaluación que realizó en presas (gaviones, geocostales, llantas, mampostería, morillos, piedra acomodada y ramas), terrazas (material vegetativo muerto, barreras con piedra en curvas a nivel y cajetes) y zanjas (bordos en curvas a nivel, sistema zanja bordo y tinas ciegas); para el periodo 2005 – 2009 encontró que las terrazas y zanjas retiene en promedio 3.7 Mg ha⁻¹ y las presas retienen hasta 4.1 Mg ha⁻¹.

5.6. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo

Los sistemas de producción de cultivos y las prácticas de manejo del suelo y agua que realizan los productores originan cambios espaciales en las propiedades físicas y químicas de los suelos que incide en la eficiencia en la producción agrícola y cambios en los rendimientos en las parcelas. El conocer la variabilidad de las propiedades de los suelos asociados con los rendimientos de los cultivos es importante ya que son indicadores de las acciones a realizar para mejorar la calidad de los suelos.

Mzuku *et al.* (2005) estudiaron la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en cultivo de maíz con riego y su efecto en la productividad entre sitios específicos de manejo. Las propiedades medidas fueron la densidad aparente, color del suelo superficial, carbono orgánico, textura, capacidad de absorción y contenido de humedad. Las permutaciones múltiples se utilizaron para probar las diferencias significativas de las propiedades del suelo en las áreas de manejo. El estudio demostró que las propiedades físicas del suelo tienen una variabilidad espacial significativa entre los sitios de cultivo, las alternativas de manejo podrían ayudar a controlar la variabilidad de las propiedades físicas limitantes del rendimiento.

Glendell *et al.* (2014) emplearon un enfoque geoestadístico de alta resolución para caracterizar la variabilidad espacial de la densidad aparente, carbono total, nitrógeno, fósforo, fósforo inorgánico, fósforo orgánico, relación C:N, carbono almacenado y nitrógeno almacenado, en dos cuencas (agrícola y semi-natural). Encontraron mayor grado de dependencia espacial en todas las propiedades del suelo semi – natural a excepción de la densidad aparente; por otra parte la densidad aparente, fósforo, fósforo inorgánico, fósforo orgánico, la relación carbono nitrógeno y el carbono almacenado mostró mayor autocorrelación espacial en la cuenca agrícola. Los estadísticos de tendencia central (media y mediana) de las propiedades también fueron significativamente diferentes entre las dos cuencas, con excepción de fósforo inorgánico e isótopos de nitrógeno. Recomiendan incluir un análisis geoestadístico para el diseño de esquemas de monitoreo en las propiedades del suelo y en los servicios que los ecosistemas brindan.

Acevedo *et al.* (2008), caracterizaron la variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo (pH, materia orgánica (MO), nitrógeno total (Nt), fósforo disponible (F) y potasio intercambiable (K)), utilizaron el enfoque estadístico clásico (varianza y coeficiente de variación) y la geoestadística (semivarianza), para obtener valores representativos y mapas que muestren su comportamiento. Se realizó un muestreo sistemático de suelos a una profundidad de 0-20 cm. En el análisis geoestadístico encontraron que todas las variables presentan estructura espacial, manifestada en el semivariograma experimental, y ajustaron a los modelos teóricos esférico, gaussiano

lineal, lineal y efecto de agujero, para pH, MO, Nt, F y K, respectivamente. Se utilizó el método de kriging para elaborar mapas de distribución de las variables y se ubicaron zonas con diferentes gradientes y patrones de variabilidad importantes para el establecimiento de la agricultura de precisión.

6. MÉTODOS Y MATERIALES

6.1. Área de estudio

La investigación se realizó en localidades de la Región Mixteca Alta, localizada al norte del Estado de Oaxaca, entre los paralelos 16°49' y 18°25' latitud norte y los meridianos 97°00' y 98°30' longitud oeste. La extensión territorial es de 16,327.2 km², el 17.07% de la superficie de la entidad. En la región convergen la Sierra Madre del Sur y la Sierra de Oaxaca, formando el Nudo Mixteco. Presenta climas que van del cálido (A) y cálido subhúmedo (Aw) a secos (B) con temperatura media anual de 25°C, al templado subhúmedo (Cw) (Rivas, 2008). La Mixteca Alta se encuentra conformada por los distritos de Coixtlahuaca, Teposcolula, Tlaxiaco y Nochixtlán (Figura 13).

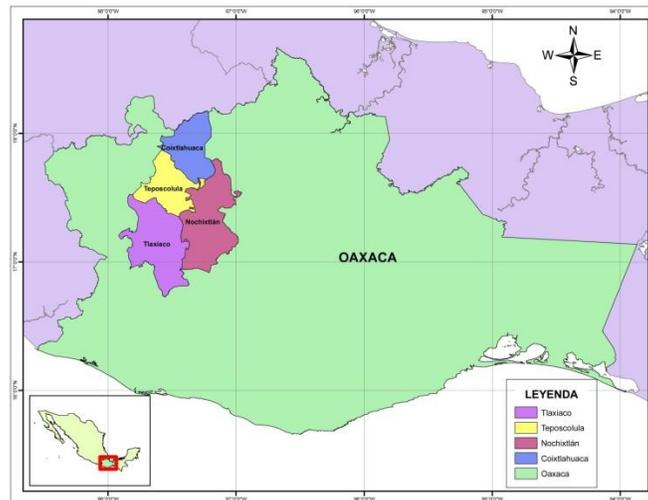


Figura 13. Ubicación de la región Mixteca Alta en el estado de Oaxaca.

6.2. Ubicación y características de los sitios

Se realizaron recorridos de campo por los municipios de la Región Mixteca Alta para ubicar sitios con sistemas de lama-bordo, terrazas y agricultura convencional cercanos, se encontró una dispersión espacial muy amplia. Finalmente se seleccionaron las localidades de Santo Domingo Tonaltepec, Santa María Tiltepec y Teotongo, dentro del Distrito de Teposcolula, que contaban con los sistemas en un área compacta y las autoridades de bienes comunales facilitaron los nombres de los dueños de los predios y apoyaron para que los productores permitieran la toma de datos.

Santo Domingo Tonaltepec se localiza, entre las coordenadas: longitud oeste 97°21' y latitud norte 17°37', a una altitud de 2500 m.s.n.m.; Santa María Tiltepec, pertenece al municipio de San Pedro Topiltepec, se localiza en las coordenadas 97°21' longitud oeste, 17°26' latitud norte y a una altura de 2170 m.s.n.m y Teotongo se ubica en las coordenadas 97°32' longitud oeste, 17°43' latitud norte y a una altura de 2060 m.s.n.m. (Enciclopedia de los Municipios de México, 2010) (Figura 14).

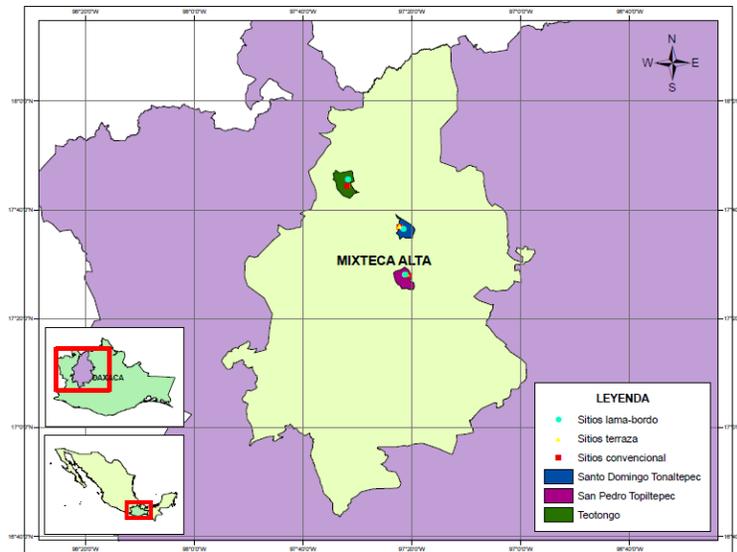


Figura 14. Ubicación de los municipios de estudio en la región Mixteca Alta.

En estas tres localidades se seleccionaron ocho sitios con prácticas de manejo: tres del sistema de lama-bordo, dos del sistema de terraza y tres denominados como agricultura convencional (Figura 15), en Teotongo solo se ubicaron sitios con lama-bordo y convencional. Los sistemas lama-bordo tuvieron: nueve parcelas en Santo Domingo Tonaltepec en 1.95 ha; en Santa María Tiltepec 10 parcelas en 3.55 ha y en Teotongo 11 parcelas en 8.47 ha. La superficie de cada parcela de las terrazas varía de 0.10 a 0.63 ha en Tonaltepec y Tiltepec y las de agricultura convencional tienen en promedio 0.19, 1.26, y 0.85 ha en Tonatepec, Tiltepec y Teotongo respectivamente (Figura16).

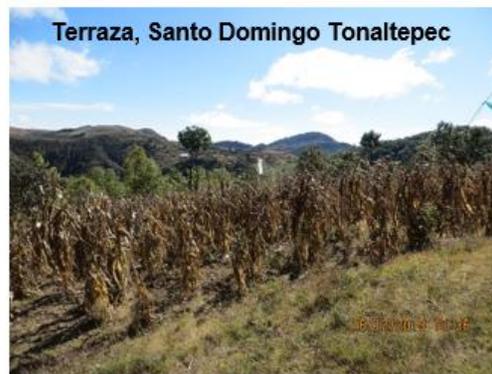
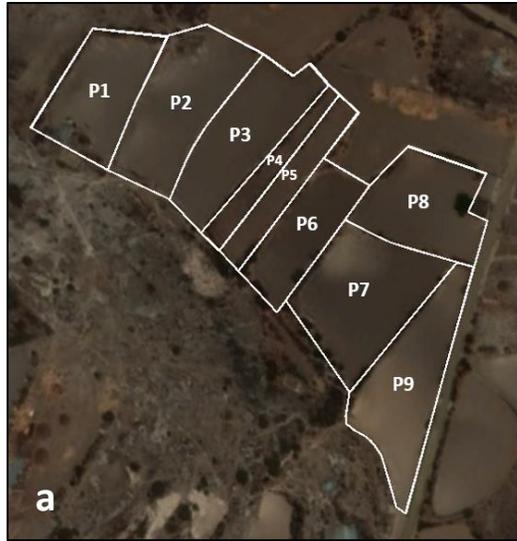
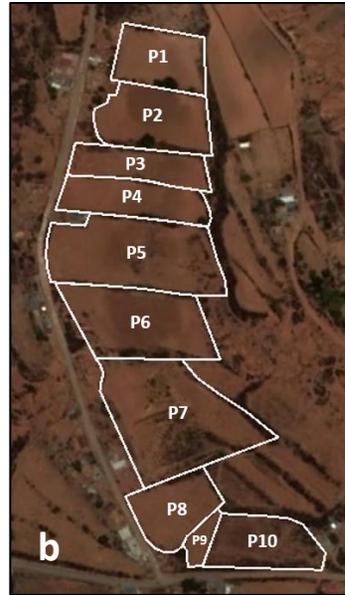


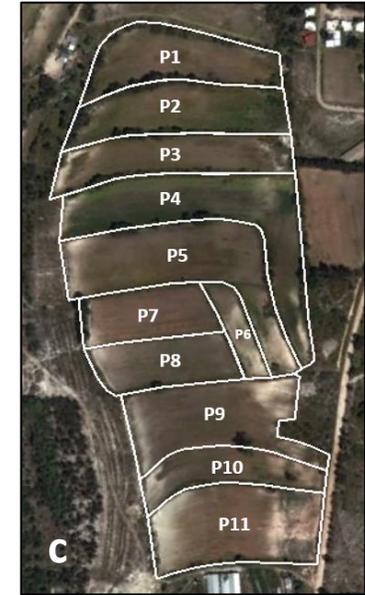
Figura 15. Parcelas con lama-bordos, terrazas y agricultura convencional en donde se realizaron las tomas de datos para investigación.



Parcela	Área (ha)
1	0.20
2	0.27
3	0.24
4	0.10
5	0.11
6	0.18
7	0.32
8	0.24
9	0.29
Total	1.95



Parcela	Área (ha)
1	0.22
2	0.38
3	0.22
4	0.27
5	0.63
6	0.50
7	0.77
8	0.23
9	0.06
10	0.25
Total	3.55



Parcela	Área (ha)
1	0.70
2	0.80
3	0.76
4	1.32
5	1.14
6	0.22
7	0.48
8	0.50
9	1.05
10	0.51
11	0.98
Total	8.47

Figura 16. Parcelas con lama-bordos: a) Santo Domingo Tonaltepec, b) Santa María Tiltepec y c) Teotongo.

Para caracterizar los sistemas de producción se seleccionó solo una parcela de lama-bordo en cada localidad (señaladas con azul en la Figura 16), dos parcelas con terrazas en dos localidades y tres parcelas con agricultura tradicional. Se solicitó permiso a los agricultores para realizar los muestreos de suelo y rendimientos en sus parcelas y proporcionaron información sobre los sistemas de producción que realizan en sus parcelas.

En el Cuadro 3 se enlistan los productores cooperantes por cada sistema de producción, el tamaño de sus parcelas y los años que sembraron. Es importante destacar que en el 2013 se sembraron todas las parcelas y en el 2014, solo sólo el 50% de ellas.

Cuadro 3. Sitios sembrados en los años 2013 y 2014.

Localidad	Nombre del productor	Sistema	Superficie (ha)	Años	
				2013	2014
Santo Domingo Tonaltepec	Sergio Aguilar	Lama – bordo	0.2	X	X
	Honorio Bautista	Terraza	0.1	X	
	Ignacio Hernández	Convencional	0.19	X	X
Santa María Tiltepec	Ezequiel Rodríguez	Lama – bordo	0.23	X	
	Juan Lara	Terraza	0.63	X	X
	Esteban Santiago	Convencional	1.26	X	X
Teotongo	Rosendo Mendoza	Lama – bordo	0.56	X	
	Rosendo García	Convencional	0.85	X	

6.2.1. Características del medio biofísico de los sitios bajo estudio.

La zona de Santo Domingo Tonaltepec tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, la temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, con variaciones de 392 a 684 mm anuales y una lluvia anual promedio de 514 mm². La temperatura media anual es de 17.2 °C, enero es el mes más frío y mayo el más cálido; la evaporación media anual es de 1,674 mm con valores máximos en los meses de marzo a mayo que indica que demandas evapotranspirativas muy altas (Figura 17).

² Fuente: Estación Meteorológica de Suchixtlahuaca-Quiotep (Clave 20143 CONAGUA-DGE)

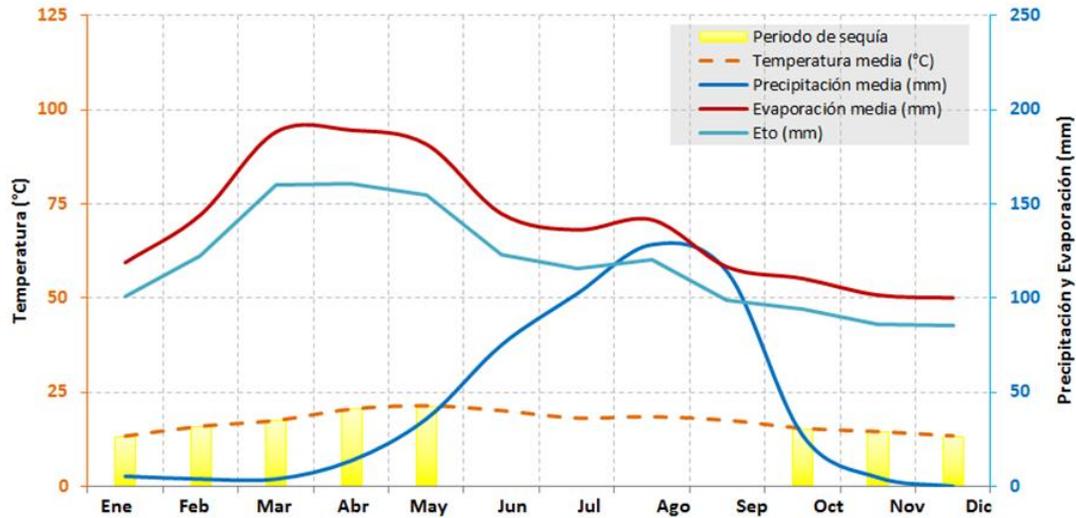


Figura 17. Climograma tipo Gausson para la zona de Santo Domingo Tonaltepec.

Domina relieve de montaña con pendientes pronunciadas y áreas de laderas en las partes altas de la cordillera donde se ubica Santo Domingo Tonaltepec. El terreno donde se construyó el sistema lama-bordos está a una altitud de 2480 m, una pendiente promedio de 7.37% y un desnivel de 16 metros en 200 m, lo que indica un desnivel entre parcelas o terrazas de casi dos metros (Figura 16 a). La zona de terraza tiene una pendiente de 8.87% y la parcela de agricultura tradicional una pendiente de 6.67%.

Predomina los Leptosoles que se caracterizan por ser suelos someros y expuestos a procesos de degradación con afloramiento del material parental, color café claro a oscuro, textura franca a arcillosa, pH de ligeramente alcalinos a alcalinos (7.5 a 8.7), bajos en materia orgánica, nitrógeno total y fósforo (Estrada, 2015 comunicación personal).

En Santa María Tonaltepec se presenta un clima semiseco templado con temperatura media anual de 12.9 °C, enero es el mes más frío y junio el más cálido. La precipitación varía de 480 a 751 mm con una media anual de 661.2 mm y con coeficiente de variación de 12%, la evaporación media anual es de 1,730 mm (Figura 18).

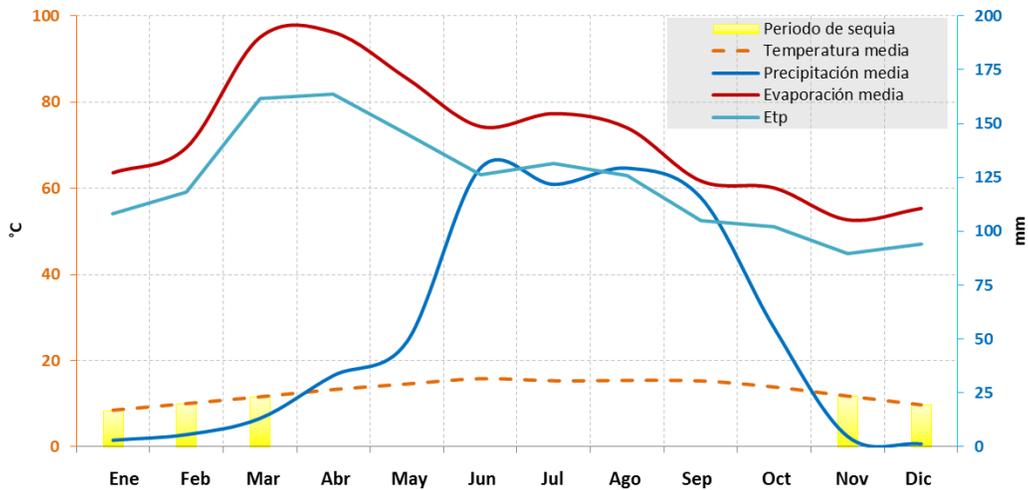


Figura 18. Climograma tipo Gausen para la zona de Santa María Tiltepec.

En Santa María Tiltepec se localiza en laderas con pendientes superiores al 20% con presencia de cárcavas que han crecido hasta conformar un sistema de drenaje difuso y terrenos improductivos.

Dominan los cambisoles, que se caracterizan por manifestar procesos de pedogénesis incipientes, han estado sometidos a procesos de erosión acelerada y formación de cárcavas una vez que la cubierta vegetal ha desaparecido; los productores han construido bordos con piedra, tierra y vegetación para captar los sedimentos que son transportados por el flujo superficial.

Teotongo presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, la temporada de lluvias va de mayo a octubre, con variaciones de 382 a 790 mm anuales y un promedio anual de 492 mm, una desviación estándar de 125 mm y coeficiente de variación de 25%. La temperatura media anual es de 16.6 °C, enero es el mes más frío y mayo el más cálido; la evaporación media anual es de 2,799 mm con valores máximos de los meses de abril a septiembre que evidencia altas demandas evapotranspirativas (Figura 19).

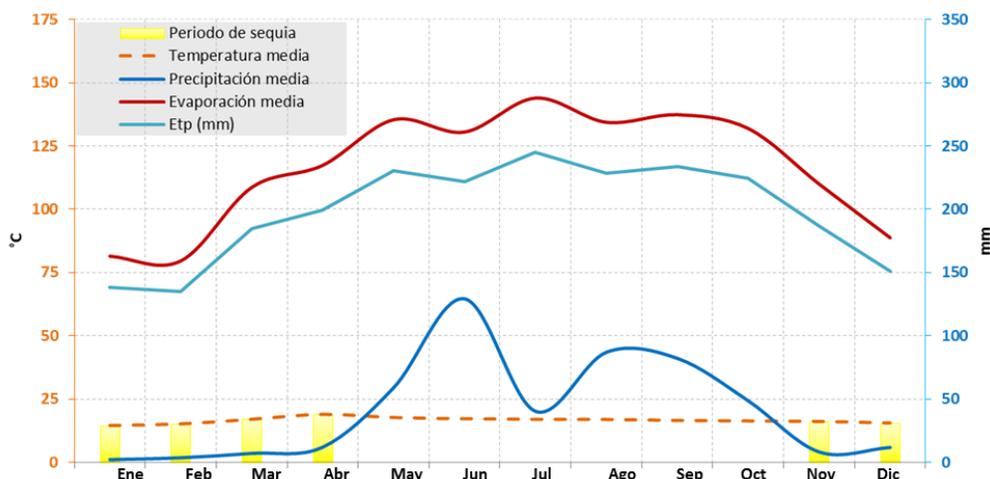


Figura 19. Climograma tipo Gausen para la zona de Teotongo.

Es una zona semiárida con restricciones para la producción de cultivos en temporal, por la variación estacional de la lluvia y en los años secos, la precipitación no alcanza a cubrir las demandas de agua del cultivo de maíz. La pendiente de los terrenos donde se ubica el sistema lama-bordo varía de 5 a 7 %.

Dominan los Feozem asociados al relieve de laderas, son poco profundos y están sujetos a procesos erosivos y afloramiento del material parental. Con la construcción de los bordos, los materiales erosionados se acumulan formando suelos coluviales profundos en la parte central y somero en la margen derecha e izquierda del sistema. En las zonas aledañas a la lama-bordo existen suelos someros con presencia de matorrales que no se utilizan para la producción.

6.2.2. Estimación del uso consuntivo del maíz.

La evapotranspiración del cultivo del maíz se estimó con el método de Blaney y Criddle que utiliza la siguiente expresión:

$$Et = K * F$$

Dónde: Et es la evapotranspiración del cultivo de maíz (cm) y F es un coeficiente de ajuste por cultivo y ubicación de la zona

F se calcula como la sumatoria de los valores de *f* de los meses de la duración del ciclo de desarrollo del cultivo de maíz, *f* se estima como:

$$f = \left(\frac{T + 17.8}{21.8} \right) * P * Duración_mes$$

Dónde: T es la temperatura promedio mensual (°C); P es el porcentaje de horas luz en el día en relación con el total anual y duración_mes es la división del número de días considerados en el mes para el ciclo vegetativo del cultivo, dividido entre el número de días que tiene el mes (adimensional).

Phelan introduce a la ecuación de Blanney-Criddle el coeficiente de ajuste por temperatura (Kt) que se calcula a través de la expresión:

$$Kt = 0.031144 * T + 0.2396$$

La evapotranspiración de referencia (Eto) se estima como $Eto = f * Kt$. La Eto se ajusta por el tipo de cultivo de la siguiente manera $Etp' = ETo * Kc$, donde Kc es el factor de cultivo. La ecuación requiere de un coeficiente de ajuste (K') que se calcula como:

$$K' = \frac{Etp'}{\sum f}$$

Considerando el coeficiente de cultivo global (K_G), la Etp se estima como:

$$Etp = Etp' * \frac{K_G}{K'}$$

6.3. Análisis de los sistemas de producción.

Para analizar los sistemas de producción de maíz con diferentes prácticas y obras de conservación (lama-bordo, terrazas, convencional), se aplicó una encuesta, para conocer cómo, cuándo y cuánto cuestan las actividades productivas en cada ciclo de cultivo y se hicieron estimaciones de los rendimientos de maíz en cada parcela.

La entrevista se aplicó a ocho pequeños productores en los predios bajo estudio³ en el 2013 y a los cuatro que sembraron sus lotes en el 2014. Durante el desarrollo del cultivo en los dos ciclos se realizaron visitas de campo para dar seguimiento al desarrollo del cultivo.

³ La entrevista con el dueño de la parcela de lama-bordo de Teotongo fue incompleta porque el productor falleció.

La encuesta (Anexo 1) permitió obtener información sobre las labores culturales, las fechas de realización de las actividades, el uso de insumos, los costos asociados con cada actividad, contenía información relacionada con:

- Localización del sitio;
- Preparación del terreno (fechas, costos y fuente de potencia para barbecho, rastra, surcado);
- Siembra (fecha, tipo de semilla, origen de la semilla, lugar de compra, densidad de siembra, costo de semilla, distancia entre matas y surcos, profundidad de siembra, altura de planta, número de mazorcas, arreglo topológico, forma de siembra y costo total);
- Riego (modalidad, fechas de riegos, lámina y costos)
- Control de arvenses (tipo de control, nombre del producto, dosis, costo del producto, fechas y costos de aplicación)
- Control de plagas y enfermedades (nombre de la plaga, tipo de control, nombre del producto, fechas de aplicación, dosis, costo del producto, número de aplicaciones y costo total del control)
- Fertilización (fecha de fertilización, producto aplicado, dosis, costo del producto, número de fertilizaciones y costo total de la fertilización)
- Otras labores culturales (actividades adicionales al ciclo productivo)
- Cosecha (fecha, destino de la producción, lugar y precio de venta; rendimiento mínimo, medio y máximo, costo de la cosecha, desgrane y transporte)

Durante la aplicación de las entrevistas hubo necesidad de estimar con algunos de los productores los costos, precisar los insumos utilizados y estimar la mano de obra utilizada y costos de los jornales por región.

6.3.1. Estimación de los rendimientos de maíz en las parcelas.

La estimación del rendimiento de maíz se realizó con la metodología propuesta por COLPOS (2009), que se basa en la selección aleatoria de sitios de muestreo en la parcela. Para esto, se midió el ancho del surco, el número de surcos por ancho de la parcela y la longitud de los surcos de cada parcela. De acuerdo con el número de

surcos existentes en cada parcela, se seleccionaron tres surcos al azar y en cada uno de ellos, la longitud del surco se dividió en tramos de 10 metros y al azar se seleccionaron los tramos para estimar el rendimiento de maíz. La parcela de ejemplo tenía 78 surcos a lo ancho y 80 metros de largo, se utilizó la metodología descrita, se seleccionaron los surcos 13, 27 y 60 y los tramos en las longitudes de 80 m, 30 m y 10 m (Figura 20).

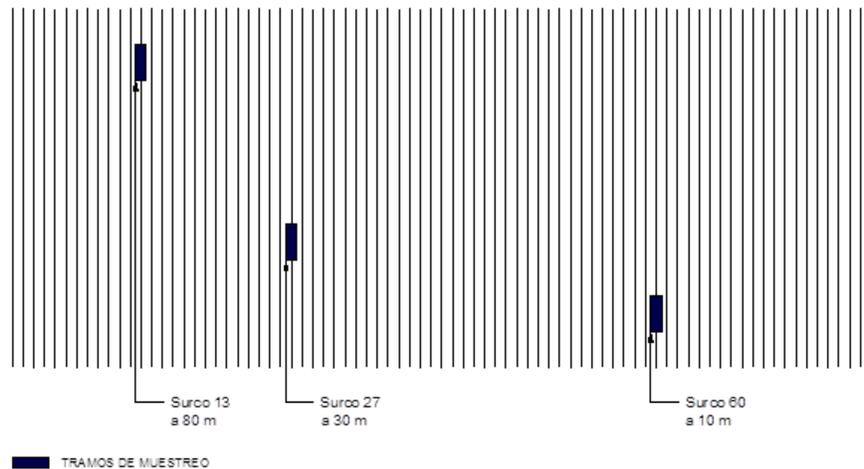


Figura 20. Ejemplo del esquema de muestreo en las parcelas de maíz.

Al momento de la cosecha, en cada tramo de 10 metros de cada parcela se contó el número de matas y plantas, se cosecharon todas las mazorcas, se ordenaron por tamaño y se tomó la mazorca mediana como representativa de la parcela (Figuras 21).

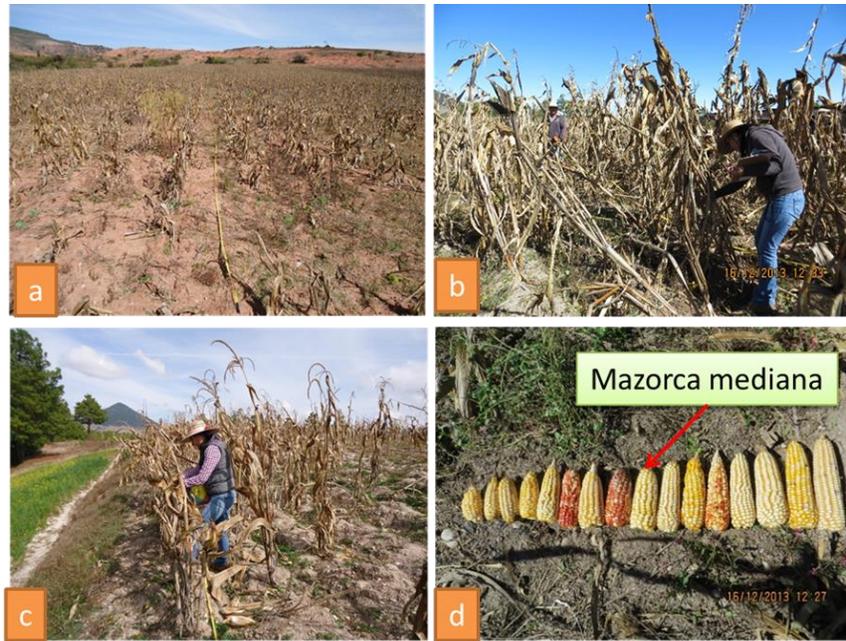


Figura 21. Muestreo para rendimiento de maíz: a) medición de 10 m para muestreo, b) conteo de matas y plantas, c) cosecha de mazorcas y d) ordenamiento y selección de la mazorca mediana (Fotografías del año 2013).

La mazorca mediana se colocó en una bolsa de papel y se llevó al laboratorio. Una vez que las muestras de las mazorcas se encontraban secas, se desgranaron y pesaron para obtener el peso del grano por mazorca y así estimar el peso promedio de la mazorca de la parcela.

La densidad de población se estimó con la separación de los surcos y el número de plantas en los tramos de 10 metros. Con el número de plantas por hectárea y el peso de grano promedio de las tres mazorcas se obtuvo el rendimiento de grano por hectárea de cada sitio.

6.4. Percepción de los productores de las acciones de conservación

Para conocer la opinión de los dueños de las parcelas sobre el tipo de práctica de conservación (loma –bordo y terraza), se aplicó una encuesta semiestructurada (Anexo 2), que permitió obtener información sobre:

- Ubicación y tipo de obra
- Antigüedad de la obra
- Mantenimiento que se le brinda

- Tiempo invertido
- Materiales usados
- Costo del mantenimiento
- Evaluación de adopción de la obra
- Apoyos recibidos
- Sugerencias de cambio en la obra

En la entrevista se preguntó a los productores si conocía la obra o estaba claro con el tipo de obra que tenía, si la había construido el mismo y si la seguiría construyendo y si la recomendaría, de esta forma se pudo construir la matriz para conocer del grado de adopción de las obras o prácticas bajo estudio (Cuadro 4).

Cuadro 4. Evaluación de adopción de obras de conservación.

Conocimiento y empleo de la práctica			Calificativo	Índice de adopción
¿La conoce?	¿La ha empleado?	¿La sigue empleado?		
Si	Si	Si	Muy alta	4
Si	Si	No*	Alta	3
Si	No**		Bajo	2
Si	Si	No**	No adopción	0
Si	No***			
No				

* No la siguió utilizando porque no la necesita o por falta de asistencia técnica.

** No la ha empleado por falta de recursos económicos, falta de asistencia o por que no la necesita.

*** No la emplea por mala experiencia o porque no le parece buena.

6.5. Características de los suelos de las parcelas bajo estudio

Para conocer las propiedades físicas y químicas de los suelos de las parcelas, se realizaron tres tipos de muestreos: 1) muestreo en las parcelas de los sistemas de lama-bordo (una sola parcela), de terraza y convencional en los tres sitios; 2) muestreo de la humedad del suelo en las parcelas de sistemas de lama-bordo (una sola parcela), de terraza y convencional de las tres localidades; y 3) muestreo intensivo de todas parcelas del sistema de lama-bordo de Tiltepec y Teotongo para analizar la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas.

6.5.1. Muestreo de suelo de las parcelas

El muestreo se realizó en los tres sistemas de producción (lama-bordo, terrazas y convencional) los días 22, 23 y 24 de abril de 2014; las muestras se tomaron a 30 cm de profundidad en cuatro puntos (parte alta, baja y a los extremos de las parcelas) para ver las variaciones espaciales de las propiedades físicas y químicas de los suelos (Figura 22).



Figura 22. Esquema de muestreo de suelo para el análisis de propiedades físicas y químicas.

6.5.2. Muestreo para determinar la humedad del suelo.

Para conocer el efecto de los sistemas de conservación de suelos y de la agricultura convencional sobre la retención de agua en el suelo se realizó un muestreo para evaluar la humedad residual del suelo después de la cosecha el 28 de diciembre del 2014. En cada parcela se tomaron tres muestras de suelo a los 20 cm de profundidad con una barrena tipo Veihmeyer para conocer los gradientes de humedad en la parte alta, media y baja de la parcela en los sistemas de manejo y de conservación de suelo (Figura 23).

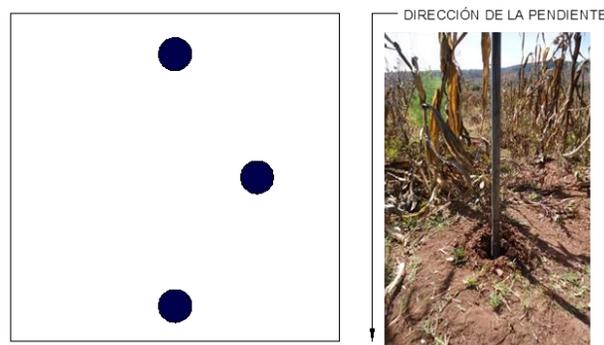


Figura 23. Esquema de muestreo de suelo para análisis de humedad.

Las muestras de suelo húmedo se colocaron en botes de aluminio debidamente cerrados y se llevaron al laboratorio para determinar el contenido humedad.

6.5.3. Muestreo de suelo para determinar la variabilidad espacial en el sistema lama-bordo.

En los sistemas lama-bordo a medida que los sedimentos se retienen en el bordo, estos se sobre elevaban para seguir acumulando azolves y los terrenos de las márgenes derecha e izquierda se integran al sistema, lo que provoca una variabilidad espacial en la calidad del suelo retenido por el bordo y el incorporado en los extremos del mismo.

Para conocer la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas se realizaron muestreos de los suelos a 30 cm en las márgenes derecha, izquierda y central de cada una de las parcelas que conforman el sistema lama-bordo de Tiltepec y Teotongo. El muestreo se realizó los días 7 y 8 de mayo del 2015, cada sitio de muestreo fue ubicado con un GPS y las muestras de suelos se colocaron en bolsas de plásticos para su proceso en el laboratorio (Figura 24).

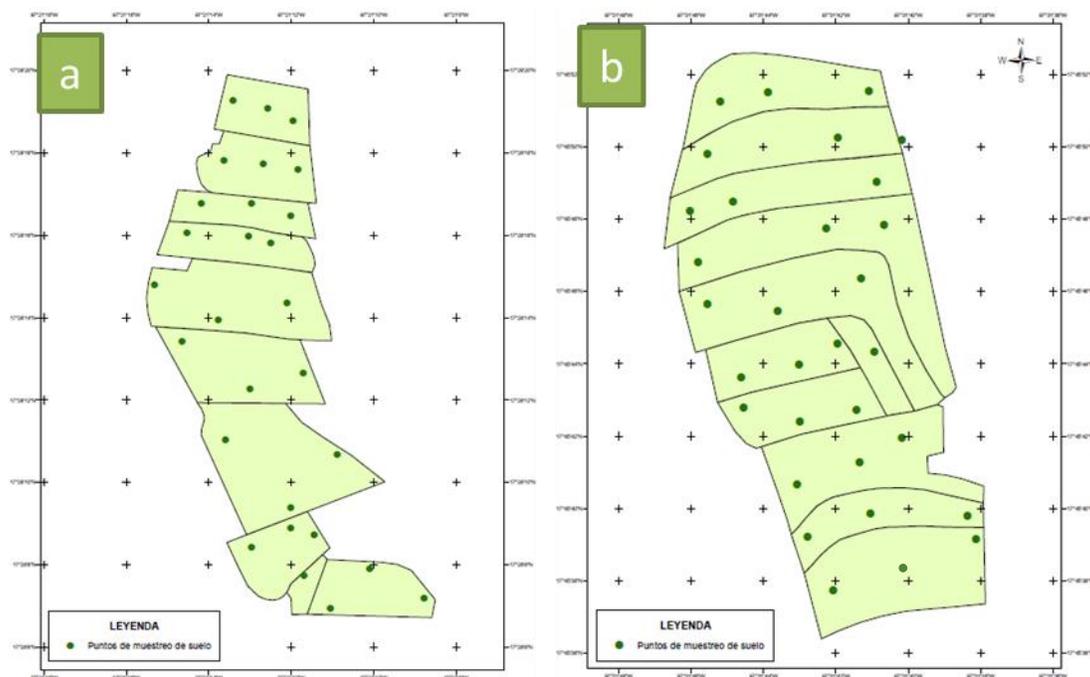


Figura 24. Ubicación del muestreo de suelo en el sistema lama-bordo de: a) Santa María Tiltepec y b) Teotongo.

6.6. Análisis de suelos en el laboratorio

Las muestras de suelo de las parcelas fueron secadas, molidas y tamizadas para determinar las propiedades físicas y químicas, y las muestras para determinar los contenidos de humedad en las parcelas se sometieron a secado en estufa a 105°C.

6.6.1. Análisis de los suelos de las parcelas con sistemas de producción.

Las muestras de suelos obtenidas de las parcelas de los tres sitios de estudio se utilizaron para determinar las características químicas como pH, porcentaje de materia orgánica (MO), fósforo (P) y potasio (K). A partir de estas propiedades se estimó el % de carbono (C), carbono orgánico del suelo (COS) y el nitrógeno mineralizado (N). Las propiedades físicas como contenido de arena (A), limo (L), arcilla (Ar), textura, porcentaje de humedad a capacidad de campo (CC), porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) y la densidad aparente (Dap) se obtuvo a partir de los porcentajes de arena y arcilla; y a partir de ellas, se obtuvieron las propiedades hidrológicas de los suelos bajo estudio.

- pH

El pH se determinó con el Potenciómetro tipo Beckman modelo H2 que se calibró con soluciones neutralizadoras. La muestra de suelo (20 g) se colocó en un vaso de precipitado donde se le aplicaron 40 ml de agua destilada, se agitó y en una solución 2:1 y se introdujeron los electrodos para medir el pH del suelo.

- Materia orgánica (MO)

El contenido de materia orgánica se determinó por el método de Walkley y Black y consistió en pesar 5 g de suelo, colocarlo en un matraz Erlenmeyer de 250 ml y se le adiciona 5 ml de Dicromato de Potasio 1N (agente oxidante) y 10 ml de ácido sulfúrico y se deja enfriar. Cuando se enfría la solución se aplican 50 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico y 3 gotas de difenilamina. Se prepara una solución en blanco (con todos los elementos pero sin suelo). Se titula la muestra normal y el blanco con una solución ferrosa 1N, la titulación se completa cuando cambia el color a verde.

El contenido de carbono orgánico se determina con la siguiente ecuación:

$$\%C = \frac{V \left(1 - \frac{M}{B}\right) * 0.003}{P_m}$$

Donde:

% C = Porcentaje de Carbono Orgánico

V = Volumen de dicromato de potasio empleado en la muestra y el blanco (ml)

M = Volumen de Sulfato Ferroso utilizado en la titulación de la muestra (ml)

B = Volumen de Sulfato Ferroso utilizado en la titulación del blanco (ml)

Pm = Peso de la muestra de suelo (g)

El porcentaje de contenido de carbono orgánico (% C) se transforma a materia orgánica (MO) mediante la siguiente relación:

$$\% MO = \% C * 1.724$$

- Carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo se estimó con la siguiente relación:

$$\%C = \%MO/1.724$$

El factor de Van Benmelen de 1.724 resulta del supuesto que la materia orgánica del suelo contiene un 58% de carbono ($1/0.58=1.724$), como lo menciona la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Para calcular el carbono orgánico del suelo (COS) se utilizó la fórmula propuesta por González *et al.* (2008):

$$COS = Da * Pr * C$$

Donde:

COS= Carbono orgánico del suelo ($t\ ha^{-1}$)

Da= Densidad aparente ($g\ cm^{-3}$)

Pr= Profundidad del suelo (cm)

C= Carbono orgánico del suelo (%)

- Nitrógeno mineralizado

El nitrógeno mineralizado se calculó a partir de la materia orgánica, con la expresión propuesta por Rivera *et al.* (2013) y el método descrito por Castellanos *et al.* (2005) que asume una tasa de mineralización del nitrógeno orgánico del 1%, que la materia orgánica está constituida por un 55% de carbono orgánico, una relación de C/N de 10:1, una superficie unitaria de suelo y una profundidad de 30 cm. La ecuación es la siguiente:

$$Nm = (((MO * 0.55) * (3,000,000) * Da))/100 * 0.001$$

Donde:

Nm = Nitrógeno mineralizado a partir de la materia orgánica, en un ciclo de cultivo (kg ha⁻¹)

MO = Materia orgánica (%)

Da = Densidad aparente del suelo (g cm⁻³)

- Fósforo asimilable

El contenido de fósforo asimilable (F) se determinó por el método de Olsen, por espectrometría a longitud de onda de 660 nm, el método consiste en colocar en tubo de ensaye de 50 ml 2.5 g de suelo y agregar 30 ml de NaHCO₃ 0.5 M pH 8.5, agitar por 30 minutos para después filtrar el contenido del tubo. Se toman 5 ml de la solución filtrada y se añade 1 ml de H₂SO₄ (2.5 M), se agitó para después agregar 10 ml de solución de trabajo para el desarrollo de color con una pipeta y se esperó 15 minutos.

- Potasio intercambiable

El potasio se estimó con el método de extracción con acetato de amonio, relación suelo: solución extractora de 1:10. Los cálculos se realizaron con la siguiente ecuación:

$$fd = \frac{\text{volumen solución extractora}}{\text{peso de suelo}} * \frac{\text{volumen final}}{\text{volumen alícuota}}$$

$$me/100 \text{ g K en suelo} = me/100 \text{ g K en curva} \frac{50}{5}$$

Donde:

fd= factor de disolución

me/100 g K en el suelo = me/100 g K en curva * 10 ppm K en suelo = me /100 g K en suelo *390

- Textura

El análisis del tamaño de partículas se fundamenta en la ley de Stokes que establece que la resistencia ofrecida por un líquido al descenso de las partículas en suspensión varia en forma directamente proporcional con el cuadrado del radio de las partículas, lo que se expresa como:

$$V = \frac{2 (Dp - Do) g r^2}{9 u}$$

Donde

V= velocidad de descenso de las partículas

Dp= densidad real del suelo

Do= densidad del agua

r= radio de las partículas

g= aceleración de la gravedad

u= viscosidad del líquido

El método de Bouyoucos conocido como el método del hidrómetro considera la velocidad de caída de las partículas en suspensión de una muestra de suelo previamente dispersada. Las lecturas del hidrómetro a diferentes tiempos permiten estimar los porcentajes de arena, limo y arcilla en la muestra y con el triángulo determinar la textura del suelo.

- Constantes de humedad

La Capacidad de Campo se determinó mediante el método de la olla de presión, el cual se basa en la aplicación de 0.3 atmósferas de presión a muestras de suelo saturadas, durante 24 horas (Figura 25). El Punto de Marchitez Permanente se determinó con el método de la membrana de presión.

El contenido de humedad a CC y PMP se calculó con las siguientes expresiones:

$$CC = \frac{Psh - Pss}{Pss} * 100$$

$$PMP = \frac{Psh - Pss}{Pss} * 100$$



Figura 25. Estimación de las constantes de humedad del suelo del sistema lama-bordo.

A partir de los porcentajes de arena, limo y arcilla, se utilizó el SPAW model (Soil Characteristics Programa) ⁴ para estimar la densidad aparente (Dap) de cada muestra de suelo.

6.6.2. Análisis de la humedad del suelo de las parcelas.

- Porcentaje de humedad

El porcentaje de humedad de suelo se determinó por el peso del bote con el suelo húmedo y se colocó en una estufa a 105 °C durante 24 horas y después se pesaron

⁴ http://www.pedosphere.ca/resources/texture/triangle_us.cfm?180,220

para obtener el peso del suelo seco más el bote. El peso de suelo húmedo (P_{sh}) y seco (P_{ss}) se obtuvo restando el peso del bote y el porcentaje de humedad se estimó con la siguiente relación:

$$\% \text{ humedad} = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100$$

6.6.3. Análisis de los suelos de los sistemas lama-bordo de Santa María Tiltepec y Teotongo.

Para conocer la variabilidad de las propiedades físicas y químicas e hidrológicas de los suelos de los sistemas de lama-bordo de Santa María Tiltepec y Teotongo se estimaron en el laboratorio las siguientes propiedades:

Las propiedades químicas como pH, MO, C, COS, nitrógeno mineralizado (Nm) se estimaron de acuerdo con las metodologías de laboratorio o de estimación mencionadas anteriormente. Complementariamente se estimó la conductividad hidráulica ($K\theta$), la capacidad de intercambio de cationes (CIC) y el nitrógeno total (Nt).

- Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) se determinó mediante el método del puente de conductividad de pasta de saturación.

- Capacidad de intercambio de cationes

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), se determinó con el método de acetato de amonio para reemplazar los cationes de intercambio y titulación con NaOH 0.1 M. Para el cálculo se utilizaron las siguientes expresiones:

$$CIC = ml \text{ NaOH} * N \text{ de NaOH} * vol \text{ extracto} / vol \text{ alícuota} * 100 / peso \text{ de la muestra}$$

$$CIC = ml \text{ NaOH} * 0.1 * 50 / 50 * 100 / 5$$

$$CIC = ml \text{ NaOH} * 2 = meq \text{ } 100^1 g \text{ de suelo}$$

- Nitrógeno total

El nitrógeno total (Nt) se determinó con el método de Micro Kjeldahl, el cual consistió en digerir alícuota de la muestra de suelo con ácido sulfúrico y una mezcla de sulfato ferroso y sulfato de cobre en la proporción de 20 a 1. Una vez digerido el suelo se liberó el amonio, del sulfato de amonio formado, con hidróxido de sodio y se destiló en corriente de vapor recogiénolo en una disolución de ácido valorada. Titulando el exceso de ácido se determinó el amonio destilado y el nitrógeno en porcentaje.

Las propiedades físicas de los suelos, como porciento de arena (A), limo (L), arcilla (Ar) y textura se estimaron por el método de Bouyoucos previamente descrito, así como CC y PMP. En laboratorio, la densidad aparente (Dap) y la conductividad hidráulicas (K) de las muestras de suelos con los métodos que se describen a continuación:

- Densidad Aparente del Suelo (Dap)

Las muestras inalteradas del suelo fueron llevadas al laboratorio y el suelo húmedo se colocó en botes de aluminio se metieron en una estufa a una temperatura de 105 °C para obtener el peso seco del suelo (Pss). Con el Pss y el volumen total del cilindro conocido (Vt) se obtuvo la densidad aparente (Dap) con la siguiente expresión:

$$Dap = \frac{Pss}{V_T}$$

- Conductividad Hidráulica (K θ)

Se utilizó el método del Permeámetro de Carga Contante que consiste en poner las muestras de suelo en los embudos colocados en una barra y donde por medio de sifones se le aplica agua con una carga constante de 3 a 5 cm y en la parte inferior del embudo se coloca una probeta graduada donde miden el agua percolada a diferentes tiempos. Para determinar la conductividad hidráulica se toman lecturas del agua percolada a las 12, 24 y 48 horas (Figura 26).



Figura 26. Estimación de la conductividad hidráulica de las muestras de suelo.

Para determinar la conductividad hidráulica K se empleó la siguiente ecuación:

$$K = \frac{Vol}{t * a * i}$$

Donde:

K = Conductividad Hidráulica (cm/hr).

Vol = cm^3 de agua medidos

t = Tiempo en horas para obtener el volumen medido.

a = Área del cilindro en cm^2 .

i = Gradiente igual a H/L .

H = Longitud total de la columna del suelo (suelo más la carga de agua en cm).

L = Longitud de la columna de suelo.

6.7. Cálculo de suelo acumulado en lama – bordo.

Para estimar el suelo retenido en el sistema lama-bordo de los sitios de Santa María Tiltepec y Teotongo, se realizó un levantamiento topográfico de las parcelas para obtener el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) (COLPOS, s/f).

El levantamiento topográfico se realizó con estación total (Sokkia SET 630 R), se tomaron puntos en la parte baja y alta de cada bordo de las terrazas y en la parte central de las parcelas de los sistemas lama-bordo en Teotongo y Tiltepec (Figura 27).



Figura 27. Levantamiento topográfico realizado en los sistemas lama-bordo.

Con ayuda del programa AutoCad Civil 3D (versión 2015), se calculó el volumen de suelo acumulado de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Con las cotas de los puntos de la parte baja de los bordos, se proyectó hipotéticamente la superficie original del suelo, ya que no se contó con un levantamiento previo y la formación de este tipo de sistema requiere mucho tiempo;
- Con los datos del levantamiento de la superficie actual, se modeló una segunda superficie con los datos del levantamiento actual;
- En ambas superficies se hizo una triangulación entre los puntos X, Y y Z
- Después de contar con la triangulación, por medio de interpolación, se trazaron las curvas a nivel, para conocer lo accidentado de las superficies
- Se delimitaron los polígonos de cada parcela que integra el sistema lama-bordo
- Con cada polígono, se procedió a cortar las superficies de referencia y la superficie actual; y
- Una vez con las diferencias de entre la superficie de referencia y actual, se realizó la estimación del volumen de suelo retenido

6.8. Análisis estadístico.

Para el análisis estadístico de los conjuntos de datos de rendimiento de maíz y parámetros de suelo se utilizó el programa Minitab 17. Los datos para los sistemas lama-bordo se agruparon por antigüedad en la construcción de las parcelas posición en el sistema y sitio de muestreo dentro de la parcela.

El tratamiento estadístico incluyó análisis de varianza (ANOVA) de un modelo lineal generalizado con un nivel de significancia de 5%, para aceptar o rechazar la hipótesis de igualdad de medias. Una vez rechazada la hipótesis de igualdad de medias, se aplicó la comparación de medias, por Tukey.

6.9. Variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas.

La variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos del sistema de lama-bordo de los sitios de Santa María Tiltepec y Teotongo se analizaron con el programa ArcGis 10.2, para ello se creó un shape a partir de la ubicación de los puntos de muestreo y los valores de cada una de las propiedades y el polígono de cada sitio y se interpoló con el método de kriging, obteniendo un archivo ráster.

Con la extensión ArcScene (visualizador 3D), los ráster de las interpolaciones y el modelo digital de elevaciones (obtenido del levantamiento topográfico) se generaron escenas en 3D con la distribución de cada una de las propiedades del suelo de ambos sitios, y se generaron los mapas de parámetros de suelo para cada sitio de acuerdo a las clases especificadas en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presenta y discute la información generada, se muestra el análisis comparativo de los rendimientos, costos y rentabilidad de los sistemas de producción en áreas con agricultura convencional, terrazas y lama-bordo; el comportamiento y variación de las propiedades físicas, químicas y de fertilidad de los suelos en esos sistemas de manejo, además del análisis de la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos, la estimación de los costos asociados al establecimiento de dos sistemas de lama-bordo (Santa María Tiltepec y Teotongo) y la eficiencia en la captación de suelo, humedad y captura de carbono.

7.1. Los sistemas de producción agrícola en la zona de estudio.

De acuerdo con Martínez (2006), la agricultura de la Mixteca se basa, principalmente, en el maíz, con las particularidades de un sistema que demanda el uso intensivo de mano de obra y tracción animal, bajos niveles de insumos externos y poca o nula irrigación.

Los tres sitios se ubican en una zona con deficiencias marcadas de humedad para el desarrollo de los cultivos, lo que limita los rendimientos y hace de la agricultura una actividad de alto riesgo, en la cual las prácticas para el manejo y conservación de la humedad son fundamentales para asegurar el rendimiento. Los resultados de las entrevistas a los productores muestran similitudes importantes en las características del manejo de los cultivos, tanto en el sistema tradicional como en aquellos con obras de conservación del suelo, las diferencias más marcadas se dan en los costos de producción del cultivo, que refleja en gran medida la capacidad de los productores para realizar inversiones adicionales para mejorar la productividad.

7.1.1. Relación evapotranspiración vs precipitación.

Previo a analizar las características de los sistemas de producción, se analiza la relación entre la oferta y demanda de agua para la producción, que actúa determinadamente en las actividades y los costos de producción.

El clima de la zona de estudio es semiseco con precipitaciones medias que varían de 400 a 700 mm, coeficientes de variación del 25% y presencia de sequía intraestival o canícula en los meses de agosto y septiembre que coincide con la época de floración del cultivo de maíz.

La información del SIAP (2015) muestra que los bajos rendimientos del maíz bajo condiciones de temporal pueden asociarse con errático de la precipitación y su distribución en el ciclo de desarrollo del maíz. En el Cuadro 5 se compara la demanda evapotranspirativa mensual del maíz, estimada con el método de Blanney- Criddle (Anexo 3), con la precipitación de cada zona y los excesos o déficits de agua en el desarrollo del cultivo.

Cuadro 5. Comparación de la evapotranspiración y precipitación en las tres zonas de estudio.

Mes	Tonaltepec			Tiltepec			Teotongo		
	Etp (mm)	Prec (mm)	Déficit	Etp (mm)	Prec (mm)	Déficit	Etp (mm)	Prec (mm)	Déficit
Junio	73.69	75.15	1.46	67.39	129.31	61.92	63.68	129.33	65.65
Julio	94.97	102.25	7.28	87.07	121.81	34.74	78.30	40.43	-37.86
Agosto	139.25	128.38	-10.87	122.99	129.33	6.35	119.83	87.06	-32.77
Septiembre	153.03	113.83	-39.21	123.41	115.71	-7.70	133.45	82.28	-51.18
Octubre	92.93	27.13	-65.81	102.6	55.08	-47.52	119.36	48.67	-70.69
Noviembre*	47.31	4.75	-42.56	36.05	4.80	-31.25	43.44	8.28	-35.16
Total	601.18	451.48	-149.71	539.50	556.05	16.55	558.06	396.04	-162.01

Etp= Evapotranspiración, **Prec=** Precipitación

*Considera 15 días

La demanda de agua para evapotranspiración en maíz de ciclo intermedio de desarrollo (168 días) varía de 540 a 600 mm y la precipitación en Tonaltepec y Teotongo es insuficiente para satisfacer las demandas hídricas de la planta con déficits acumulados superiores a los 140 mm. En Tiltepec en promedio existe un ligero excedente de agua en el ciclo de cultivo pero hay tres meses donde no se satisfacen las demandas de agua del maíz.

Los meses críticos para la producción de grano, en los tres sitios coincide con los déficits más acentuados de humedad, especialmente en Teotongo y Tonaltepec; Tiltepec a pesar que presenta tres meses con deficiencias de agua, no parecen ser tan

críticos como los otros dos sitios, pero aparece otro factor limitante relacionado con la capacidad de retención de humedad del suelo.

Bajo esta perspectiva, los métodos de siembra y obras o prácticas de captación de humedad, como lama-bordo y terrazas, son importantes para disminuir el impacto de la escasa y mala distribución de la lluvia en el rendimiento del cultivo; que deben acompañarse con los métodos de siembra (cajete) y las prácticas de manejo de los suelos que aseguren el uso eficiente del agua retenida, disminuyan los escurrimientos, aumenten la infiltración del agua y para minimicen los riesgos en la producción.

7.1.2. Análisis de los sistemas de producción.

Los sistemas de producción de maíz con diferentes prácticas y obras de conservación del suelo y agua, de acuerdo con la información proporcionada por los productores son similares en los diferentes ciclos agrícolas, difieren fundamentalmente en las fechas en que se realizan las actividades, las cuales pueden ser llegar a ser diferentes de acuerdo al comportamiento climático y a la disponibilidad de recursos. Las principales actividades se concentran en los Cuadro 6 y 7 para 2013 y 2014, respectivamente y a continuación se describen en forma general.

- Preparación del terreno

La preparación del suelo se inicia en los primeros meses del año, generalmente en el mes de febrero y mediados de marzo, incluye el barbecho con yunta o tractor de acuerdo a la disponibilidad de recursos; el 70% rastrea después del barbecho y solo el 57% de los productores surcan para sembrar. Los productores señalaron que el barbecho es indispensable para que el suelo esté en condiciones óptimas para la siembra y los productores que rastrean indican que con ella se mejora la emergencia (Cuadro 6). Para el 2014, todas las parcelas sembradas se barbecharon y surcaron y solo una no se rastreó (Cuadro 7).

Los costos estimados para la preparación en el 2013, variaron de \$1,400.00 hasta \$5,000.00 por hectárea, los costos más altos se asocian al uso de tracción animal (Cuadro 6). Para el 2014, los costos de preparación variaron de \$1,900 a \$3,158 y la

fuelle de potencia fue la mecánica (Cuadro 7). El 71% de los entrevistados utilizan el tractor, con una clara tendencia a mayor uso de la maquinaria (Figura 28).

Cuadro 6. Caracterización de los sistemas de producción de maíz por zonas y tipos de obras de conservación en el ciclo agrícola 2013.

Actividad productiva	Sistema de manejo	Lama-bordo			Terraza		Convencional		
	Productor	Sergio Aguilar	Ezequiel Rodríguez	Rosendo Mendoza*	Honorio Bautista	Juan Lara	Ignacio Hernández	Esteban Santiago	Rosendo García
	Zona de trabajo	Tonaltepec	Tiltepec	Teotongo	Tonaltepec	Tiltepec	Tonaltepec	Tiltepec	Teotongo
I. Preparación del terreno	Barbecho	15/02/2013	15/02/2013		01/02/2013	15/03/2013	01/02/2013	15/03/2013	15/03/2013
	Rastra	16/02/2013			01/03/2013		01/03/2013	15/03/2013	15/04/2013
	Surcado				01/04/2013	01/06/2013	01/04/2013	01/06/2013	
	Fuente de potencia		Tractor			Yunta		Tractor	Tractor
II. Siembra	Siembra	15/04/2013	15/04/2013		01/04/2013	01/06/2013	01/04/2013	15/07/2013	01/05/2013
	Tipo de semilla	Criolla	Criolla	Criolla	Criolla	Criolla	Cajete	Criolla	Híbrido
	Color de semilla	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco
	Origen	Propia	Propia		Propia	Propia	Propia	Propia	Comprada
	Cantidad usada (kg ha ⁻¹)	20.00	20.00		15.00	9.00	15.00	40.00	29.00
	Costo de semilla (\$/kg)	\$5.50	\$5.00		\$6.00	\$6.00	\$6.00	\$5.00	\$32.00
	Distancia entre plantas (m)	1.15	1.00	1.07	1.25	1.10	1.25	1.00	0.17
	Distancia entre surcos (m)	0.80	0.70	0.80	0.80	0.70	0.80	0.70	0.85
	Profundidad de siembra (m)	0.10	0.30		0.20	0.05	0.20	0.20	0.13
	Plantas por mata	4	3.00	4.00	4.00	3.00	4.00	3.00	1.00
	Altura de planta (m)	1.45	1.30	1.50	1.50	1.50	1.80	1.40	1.80
	Mazorcas por planta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Arreglo topológico	Tresbolillo	Tresbolillo	Tresbolillo	Tresbolillo	Tresbolillo	Tresbolillo	Sembradora	Sembradora
Forma de siembra	Yunta	Yunta		Manual	Yunta	Manual	Maquinaria	Maquinaria	
III. Riego	Modalidad	Temporal	Temporal	Temporal	Temporal	Temporal	Temporal	Temporal	Riego
	Fecha de primer riego								14/05/2013
	Fecha de segundo riego								20/08/2013
IV. Control de arvenses	Tipo de control	No realiza	No realiza		Manual	Manual	Manual	Químico	Químico
	Nombre del producto								Gesapax Combi
	Dosis								
	Fecha de aplicación								
V. Control de plagas y enfermedades	Nombre de plaga	No realiza	No realiza	No realiza	No realiza	No realiza	No realiza	No realiza	No realiza
	Fecha de fertilización	No realiza	No realiza		No realiza	No realiza	Realiza	Realiza	Realiza
VI. Fertilización	Producto aplicado						Estiércol	Químico	Químico
	Dosis								
	Costo del producto								
	Número de fertilizaciones							1	1
VII. Otras labores	Asociación de cultivos				X		X		
	Rotación de cultivos					X			X
	Incorporación de rastrojo								

Actividad productiva	Sistema de manejo	Lama-bordo			Terraza		Convencional		
	Productor	Sergio Aguilar	Ezequiel Rodríguez	Rosendo Mendoza*	Honorio Bautista	Juan Lara	Ignacio Hernández	Esteban Santiago	Rosendo García
	Zona de trabajo	Tonaltepec	Tiltepec	Teotongo	Tonaltepec	Tiltepec	Tonaltepec	Tiltepec	Teotongo
	Quema antes de la siembra								
	Deshoje								
	Otras								
VIII. Cosecha	Fecha de cosecha	15/12/2013	15/01/2014		15/12/2013	01/01/2014	16/12/2013	01/01/2014	10/01/2014
	Destino de cosecha	Autoconsumo	Autoconsumo	Autoconsumo	Autoconsumo	Autoconsumo	Autoconsumo	Autoconsumo	Autoconsumo y venta

* Productor que falleció antes de la cosecha

Cuadro 7. Caracterización de los sistemas de producción de maíz por zonas y tipos de obras de conservación en el ciclo agrícola 2014.

Actividad productiva	Sistema de manejo	Lama-bordo	Terrazas	Convencional	
	Productor	Sergio Aguilar	Juan Lara	Ignacio Hernández	Esteban Santiago
	Zona de trabajo	Tonaltepec	Tiltepec	Tonaltepec	Tiltepec
I. Preparación del terreno	Barbecho	15/01/2014	01/03/2014	01/02/2014	15/02/2014
	Rastra	16/01/2014		01/03/2014	15/03/2014
	Surcado	15/03/2014	01/05/2014	01/04/2014	15/05/2014
	Fuente de potencia	Tractor	Yunta		Tractor
II. Siembra	Siembra	15/04/2013	01/06/2013	01/04/2013	15/07/2013
	Tipo de semilla	Criolla	Criolla	Cajete	Criolla
	Color de semilla	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco
	Origen	Propia	Propia	Propia	Propia
	Cantidad usada (kg ha ⁻¹)	20.00	10.00	15.00	40.00
	Costo de semilla (\$/kg)	\$7.50	\$7.00	\$7.00	\$7.00
	Distancia entre plantas (m)	1.16	1.10	1.25	1.00
	Distancia entre surcos (m)	0.80	0.70	0.80	0.70
	Profundidad de siembra (m)	0.25	0.05	0.20	0.20
	Plantas por mata	4	3.00	4.00	3.00
	Altura de planta (m)	1.45	1.50	1.80	1.40
	Mazorcas por planta	1.00	1.00	1.00	1.00
	Arreglo topológico	Tresbolillo	Tresbolillo	Tresbolillo	Sembradora
	Forma de siembra	Yunta	Yunta	Manual	Maquinaria
III. Control de arvenses	Tipo de control	No realiza	Manual	Manual	Químico
IV. Control de plagas y enfermedades	Nombre de plaga	No realiza	No realiza	No realiza	No realiza
	Tipo de control				
V. Otras labores	Fertilización	No realiza	No realiza	Realiza	Realiza
	Producto aplicado			Estiércol	Químico
	No. de fertilizaciones				1
VI. Cosecha	Asociación de cultivos			X	
	Fecha de cosecha	15/12/2013	01/01/2014	16/12/2013	01/01/2014
	Destino de cosecha	Autoconsumo	Autoconsumo	Autoconsumo	Autoconsumo



Figura 28. Preparación del sistema lama-bordo en Teotongo, Oaxaca, 2013.

Anteriormente, la yunta era la principal fuente de potencia para preparar los terrenos, pero ha sido desplazada por el tractor, ya que no siempre es posible tener una yunta por los costos de su alimentación y la disponibilidad de mano de obra.

- Siembra

En el 2013 las siembras se realizaron de abril a junio, el 86% de los productores utilizaron semillas criollas (uno de ellos maíz de cajete), que fueron seleccionadas y guardadas por los productores el ciclo anterior, solo en Teotongo se reporta el uso de híbridos. Asimismo, el 14% de los productores sembraron bajo el sistema tradicional de cajete.

El maíz de cajete ha venido en detrimento, se usa cada vez menos, la herramienta principal, la coa, se usa en pocos lugares, Caballero (2006), menciona que paulatinamente ha sido reemplazada por el tractor. Las siembras en cajete son tempranas (febrero a marzo), se utiliza el extremo ancho de la coa para abrir una cepa en busca de humedad y con el punzón metálico se crea un hueco donde se depositan de 3 a 4 semillas y se tapa. (Figuras 29 y 30). Para este sistema se utilizan materiales de ciclo largo (nueve meses) que aprovechan la humedad residual de los sitios.



Figura 29. Siembra de maíz de cajete con coa en Santo Domingo Tonaltepec, Oaxaca, 2014: a) preparación del terreno, b) siembra con coa, c) semilla utilizada para siembra (maíz y frijol y d) número de semillas por mata usadas en la siembra.



Figura 30. Coa utilizada para siembra de maíz de cajete.

Las siembras son mateadas en el 71% de los casos, asociada con la siembra manual y las siembras en hileras (29%) con el uso de sembradoras mecánicas. Las densidades de siembra varían entre 10 y 40 kilogramos por hectárea maquinaria.

A pesar de que la semilla es seleccionada del ciclo previo, los productores señalaron que los costos de semilla para siembra oscilan entre \$5.00 y \$6.00 por kilogramo, la semilla híbrida tuvo un costo de \$32.00.

La densidad de población, está en función de la distancia entre plantas o matas, distancia entre surcos y número de plantas por golpe, vario de 39,000 a 43,000 plantas ha^{-1} en las siembras mateadas y de cerca de 70,000 plantas ha^{-1} en las siembras en hilera.

La profundidad de siembra varió de 5 hasta 20 cm, la mayor profundidad está relacionada con las siembras de cajete. La variación de la profundidad de siembra la asocian con la humedad en el suelo y la preparación del terreno, ya sea mecánica o manual. Se observó que la fuente de potencia influye en la homogeneidad de la población.

Para el año 2013, la temporada de lluvia fue errática durante el ciclo de producción, y las plantas, en algunos casos, no se desarrollaron. En el sistema lama-bordo la altura

promedio de las plantas fue de 1.40 metros (criollo); en las siembras convencionales las plantas promediaron 1.73 metros de altura, en zonas de terrazas la altura de la planta fue de 1.50 metros. Las plantas de maíz más altas (2.00 metros) fueron en las siembras convencionales de cajete.

- Control de arvenses

El control de plantas arvenses es una parte importante del manejo del cultivo, ya que las plantas tienen un mejor desarrollo fisiológico sin no existe competencia por nutrientes y espacio entre ellas. El 71% de los productores controlan las malezas; el 43% lo hace manualmente y el 28% con productos químicos o herbicidas. El resto (29%) no realiza control alguno, ya que demanda más mano de obra y recursos económicos (Figura 31).



Figura 31. Cultivo de lama-bordo sin control de arvenses en Teotongo, Oaxaca, 2013.

- Otras labores culturales

El monocultivo es una práctica generalizada para el 43% de los productores, el 29% rota cultivos (maíz, frijol y trigo, principalmente) o bien establecen cultivos asociados (maíz con frijol y calabaza) y el resto dejan los terrenos en descanso. En el tiempo que duro esta investigación se encontró que el 50% de los productores no siembran todos los años, dejan el terreno en descanso para recuperar su fertilidad o salen de la comunidad en busca de empleo.

- Fertilización

La fertilización es una parte importante del ciclo del maíz, ya que permite agregar al suelo los nutrientes que requieren el cultivo o parte de ellos, para que la planta los aproveche en su crecimiento, desarrollo y producción. Sin embargo, la mayoría de los productores no aplica fertilizantes al suelo (57%), el 29% aplica fertilizantes químicos y el 14% restante aplicar estiércol de caprinos.

- Cosecha

La cosecha se realiza manualmente y representa un importante número de jornales para la pizcar, transporte y desgrane de las mazorcas. La producción de maíz que se obtiene los productores en un 75% lo utilizan para el autoconsumo y el resto la comercializa (Figura 32).



Figura 32. Cosecha de maíz de cajete en Santa Domingo Tonaltepec, Oaxaca, 2013.

7.1.3. Análisis de los sistemas de producción de maíz

Los costos de producción, los rendimientos, el precio medio rural del maíz, el valor de producción y las utilidades para 2013 y 2014 se muestran en los Cuadros 8 y 9.

Para 2014 los costos de producción variaron de \$4,954 a \$13,840 por hectárea con un costo promedio de \$7,359/ha. Los productores de Teotongo reportaron el costo de producción más alto (\$10,473.00/ha), por ser una agricultura más comercial, en

Tonaltepec se reportan costos promedio de \$9,713/ha, debido en gran medida por el uso de mano de obra y la aplicación de abono orgánico, los costos de producción más bajos (\$6,421.83 ha⁻¹) se reportan en los productores de Tiltepec (Cuadro 8).

Los costos de producción más altos fueron para siembras convencionales y las inversiones para producir en terrenos con obras de conservación (loma-bordo y terrazas) son menores lo que sugiere que los productores no están valorando las bondades de la infraestructura para la conservación del suelo y agua.

Los rendimientos de maíz en el 2013 variaron de 0.92 a 8.46 t ha⁻¹ con un rendimiento medio de 3.6 t ha⁻¹ y un coeficiente de variación del 66%. Si se considera un costo promedio de producción de maíz (\$7,359/ha) y el rendimiento medio el costo de producción por tonelada de grano es de \$2,044.17, que si se comercializara, al precio medio rural, los productores tendrían ganancias. Para 2014 los rendimientos promedio fueron de 5.96, 4.19 y 1.53 t ha⁻¹ para Teotongo, Tonaltepec y Tiltepec respectivamente (Cuadro 8).

Cuadro 8. Costos, rendimientos, valor de la producción y utilidad de los productores de maíz en el 2013

Actividades productivas	Lama - bordo		Terraza		Convencional		
	Sergio Aguilar	Ezequiel Rodríguez	Honorio Bautista	Juan Lara	Ignacio Hernández	Esteban Santiago	Rosendo García
	Tonaltepec	Tiltepec	Tonaltepec	Tiltepec	Tonaltepec	Tiltepec	Teotongo
Preparación del terreno	\$2,000.00	\$1,400.00	\$2,500.00	\$1,600.00	\$2,400.00	\$2,126.50	\$1,510.00
Siembra	\$1,110.00	\$2,900.00	\$1,090.00	\$854.00	\$1,090.00	\$1,225.00	\$1,528.00
Riego	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$900.00
Control de arvenses	\$0.00	\$0.00	\$600.00	\$400.00	\$600.00	\$450.00	\$550.00
Control de plagas y enfermedades	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Fertilización	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$6,500.00	\$510.00	\$3,135.00
Otras labores culturales	\$0.00	\$0.00		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Cosecha	\$4,000.00	\$3,600.00	\$4,000.00	\$2,100.00	\$3,250.00	\$2,100.00	\$2,850.00
Costo total de la producción	\$7,110.00	\$7,900.00	\$8,190.00	\$4,954.00	\$13,840.00	\$6,411.50	\$10,473.00
Densidad de siembra	44,525	38,667	44,583	42,214	45,833	46,156	67,451
Rendimiento (t ha⁻¹)	3.56	0.92	3.39	1.55	5.63	2.13	8.46
Costo de la tonelada de maíz	\$1,997.00	\$8,586.00	\$2,415.00	\$3,196.13	\$2,458.00	\$3,009.00	\$1,237.94
Precio medio rural (\$/t)	\$3,400.00	\$3,400.00	\$3,400.00	\$3,400.00	\$3,400.00	\$3,400.00	\$3,400.00
Valor de la producción (\$/ha)	\$12,104.00	\$3,128.00	\$11,526.00	\$5,270.00	\$19,142.00	\$7,242.00	\$28,764.00
Utilidad (\$/ha)	4,994.00	-4,772.00	3,336.00	316.00	5,302.00	830.50	18,291.00

Cuadro 9. Costos, rendimientos, valor de la producción y utilidad del cultivo de maíz en el 2014

Actividades productivas	Lama-bordo	Terraza	Convencional	
	Sergio Aguilar	Juan Lara	Ignacio Hernández	Esteban Santiago
	Tonaltepec	Tiltepec	Tonaltepec	Tiltepec
Preparación del terreno	\$2,812.50	\$1,905.00	\$3,158.00	\$2,600.00
Siembra	\$1,350.00	\$1,070.00	\$1,305.00	\$1,100.00
Riego	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Control de arvenses	\$0.00	\$300.00	\$450.00	\$0.00
Fertilización	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$510.00
Otras labores culturales	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Cosecha	\$2,900.00	\$2,575.00	\$2,850.00	\$2,300.00
Costo total de la producción	\$7,062.50	\$5,850.00	\$7,763.00	\$6,510.00
Densidad de siembra	43,430	38,864	38,080	51,714
Rendimiento (t ha⁻¹)	2.75	1.66	2.11	0.13
Costo de por tonelada	\$2,580.00	\$3,524.10	\$3,679.15	\$50,076.92
Precio medio rural (\$/t)	\$3,290.00	\$3,290.00	\$3,290.00	\$3,290.00
Valor de la producción (\$ ha ⁻¹)	\$9,047.50	\$5,461.40	\$6,941.90	\$427.70
Utilidad (\$ ha⁻¹)	1,985.00	-388.60	-821.10	-6,082.30

En Tiltepec, los bajos rendimientos de maíz se atribuyen a los problemas de degradación de los suelos y la falta de control de arvenses, como lo reporto Contreras (1996) que, evaluó la relación entre la profundidad, color y contenido de materia orgánica del suelo con la pérdida de productividad en sitios experimentales en la Mixteca y comprobó que existe una disminución del rendimiento cuando existe un proceso de degradación del suelo por erosión. En general, los rendimientos de maíz obtenidos en este estudio son más altos que los rendimientos medios que se obtienen en la entidad (1.12 t ha⁻¹).

Los rendimientos de maíz muestran que los mayores rendimientos promedio se obtienen en sistemas convencional (5.41 t ha⁻¹), seguido del lama-bordo con 2.65 t ha⁻¹ y las terrazas 2.47 t ha⁻¹. Esto indica que los productores usan las mismas técnicas de cultivo en todos los sistemas y los rendimientos de las siembras convencionales son producto del manejo de la parcela, como es el riego y el uso de semilla mejorada.

Se esperaba que con los sistemas con lama-bordo y terrazas mostraran mejores rendimientos de maíz, pero los resultados muestran lo contrario, debido al uso de híbrido en el sistema convencional de Teotongo.

El costo de producción por tonelada varió de \$1,237, en Teotongo en una parcela comercial con riego, a \$8,858/t en Tiltepec, en el sistema lama-bordo, lo que sugiere que si producción se destinara al mercado solo algunos productores tendrían precios de venta competitivos; el 87% de los productores señalaron que la producción la destinan al autoconsumo.

Las utilidades estimadas en los sistemas de producción en estudio, considerando que la producción se destinara al mercado, con los precios medios rurales del maíz⁵, solo la parcela de Ezequiel Rodríguez en Tiltepec reportó pérdidas económicas, el resto saca al menos la inversión o registra utilidades, las mayores ganancias serían de más de \$18 mil pesos ha⁻¹ en la parcela de Rosendo García en Teotongo (Cuadro 8). Para el 2014, los costos de producción promedio de maíz fueron de \$6,796.00/ha (Cuadro 9), el rendimiento medio de maíz de 1.66 t ha⁻¹, con un rango de variación de 0.13 a 2.75 t ha⁻¹. Los mejores rendimientos se alcanzaron en el sistema lama-bordo, seguido de la parcela con agricultura convencional y con menor producción la parcela con terrazas.

El costo por tonelada de maíz producida fue menor de \$3,679.00 en las parcelas de las tres localidades y sistemas de producción y por fue muy alto en la parcela de Tiltepec por los bajos rendimientos. Al comparar el valor de la producción, obtenida como el rendimiento de maíz por el precio medio rural del maíz⁶, se observa que solo un productor obtuvo ganancias y el resto pérdidas (Cuadro 9).

Los sistemas de producción por región, por sistema de conservación de suelos y productor, muestran alta variabilidad en los rendimientos de maíz (Cuadro 10).

Cuadro 10. Rendimientos de maíz por sistema, sitio y productor.

Sistema	Sitio	Productor	2013	2014
Lama-bordo	Tonaltepec	Sergio Aguilar Cruz	3.56	2.75
	Teotongo	Rosendo Mendoza	3.46	
	Tiltepec	Ezequiel Rodríguez	0.92	
Terrazas	Tonaltepec	Honorio Bautista	3.39	
	Tiltepec	Juan Lara Cruz	1.55	1.66
	Tonaltepec	Ignacio Hernández	5.36	2.11
Convencional	Teotongo	Rosendo García	8.46	
	Tiltepec	Esteban Santiago	2.13	0.13

⁵ Precio medio rural del maíz de \$3,400.00/t para el 2013

⁶ Precio medio rural del maíz de \$3,290.00/t para el 2014

El análisis de varianza aplicado a los rendimientos en los sitios y sistemas de producción muestra diferencias significativas entre sitios y sistema de producción (Cuadro 11). Por sitio los mejores rendimientos se alcanzan en Teotongo seguidos de Tonaltepec y Tiltepec, lo cual se explica, en parte por las diferencias en los sistemas de manejo en cada sitio de estudio. El manejo, el convencional estadísticamente tiene los mayores rendimientos, seguido del sistema de terrazas y lama-bordo.

Cuadro 11. Análisis de varianza (ANOVA) para rendimientos de maíz por sitio y por manejo.

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio del error	F	P
Sitio	68.33	2	34.165	11.43	0.001
Sistema	36.95	2	18.477	6.18	0.009
Error	56.81	19	2.99		
Total	172.88	23			

La prueba de Tukey muestra que Teotongo tiene mejores rendimientos comparado con Santo Domingo Tonaltepec y Santa María Tiltepec, que estadísticamente no muestran diferencia significativa; por sistema de producción, la prueba de medias ubica al lama-bordo como estadísticamente diferente al sistema convencional y de terrazas (Cuadro 12).

Cuadro 12. Comparación de las medias de rendimientos de maíz por sitio y por manejo mediante la prueba de Tukey.

Sitio	N	Media	Grupo
Santo Domingo Tonaltepec	9	4.15648	A
Santa María Tiltepec	9	1.50152	A
Teotongo	6	5.85432	B
Sistema	N	Media	Grupo
Convencional	9	5.45602	A
Terraza	6	3.3976	A B
Lama-bordo	9	2.6587	B

La variación en los rendimientos de maíz se debe más al manejo de cultivo que a las acciones de conservación, ya que algunos productores, especialmente los del sistema lama-bordo Tiltepec, no controlan arvenses y no fertilizan lo que influye en los rendimientos.

Las diferencias de rendimientos en los tres sitios y sistemas de producción muestran que fue el manejo convencional reporta los mayores rendimientos en el sitio 3 (Teotongo), seguido de Tonaltepec (Sitio 1) y Tiltepec (Sitio 2). Los sistemas de producción de lama-bordo y terrazas tienen menor variación en los rendimientos de maíz, pero son menores que los obtenidos en el sistema convencional (Figura 33).

La tecnología que siguen los productores es tradicional, preparan la tierra con yunta o tractor, siembran mateados (algunos en cajete y a hilera), usan de tres a cuatro semillas por mata, las densidades varían de 39 a 70 mil plantas por hectárea, la mayor parte no fertilizan, ni controlan maleza, lo cual explica la alta variabilidad de los rendimientos que obtienen; sin embargo, la producción de maíz que obtienen satisface el consumo de la familia.

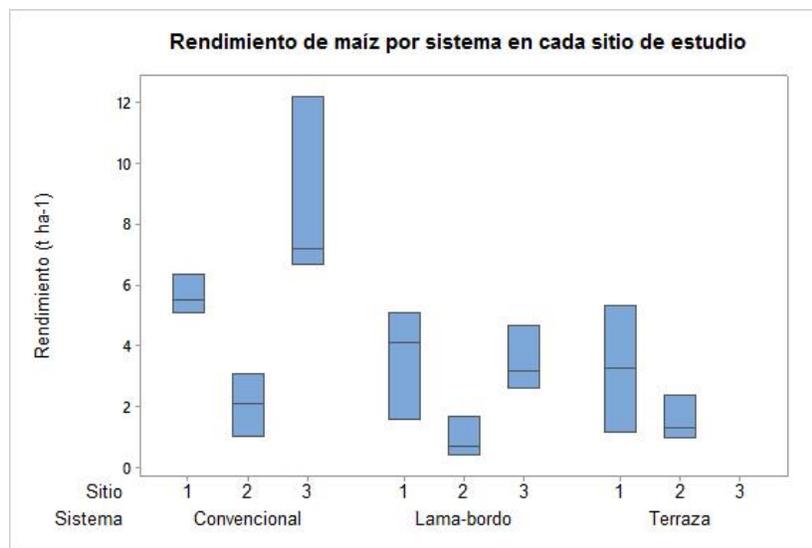


Figura 33. Rendimiento de maíz por sitio y sistema de producción.

En la zona de estudio, por lo aleatorio de la precipitación y la tecnología de producción aplicada, se debe realizar un análisis más detallado de los factores que inciden en la producción, incluyendo factores de naturaleza socioeconómica, ya que los resultados muestran tendencias productivas que pueden considerarse en el desarrollo y aplicación de programas de apoyo a la producción. En este estudio se encontró que aumentar la densidad de plantas aumenta el rendimiento (Figura 34).

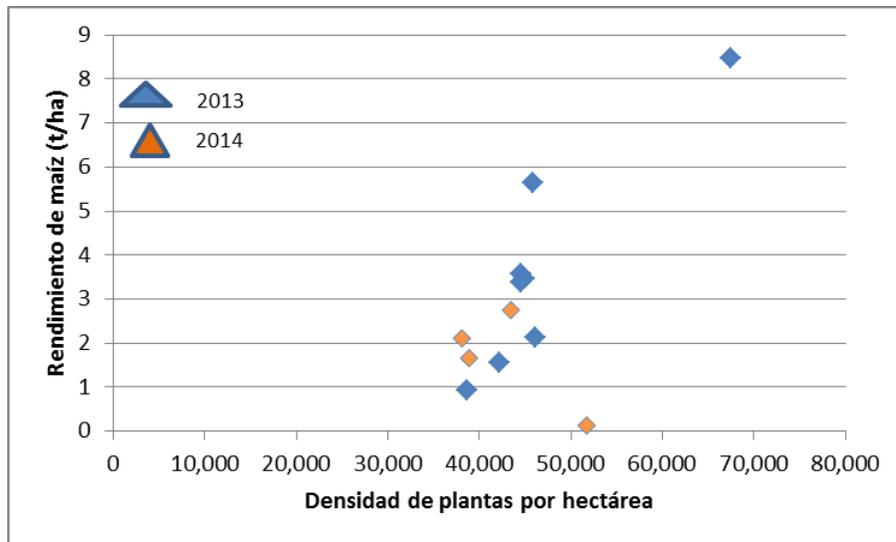


Figura 34. Efecto de la densidad de plantas en el rendimiento de maíz.

En el 2013 el máximo rendimientos de maíz se alcanzó con una densidad de 70 mil plantas, con fertilización y siembra en hileras, seguida de la parcela con 46 mil plantas y fertilizada. Para 2014, tres de las parcelas mostraron la tendencia de aumentar el rendimiento con el manejo de la densidad de plantas.

7.1.4. Efecto del sistema de manejo en la humedad del suelo

Los muestreos de humedad al final del ciclo de cultivo del 2014 muestran valores similares tanto en la parte alta, baja y media de las parcelas en los tres sitios, no se aprecian diferencias de humedad del suelo por sistema de manejo, los promedio de humedad son similares en los sitios y sistemas, con coeficientes de variación menores al 26% (Cuadro 13).

Cuadro 13. Porcentaje de humedad al final del ciclo en los diferentes sistemas de manejo.

Sitio	Ubicación en el terreno	Humedad del suelo (%)		
		Lama-bordo	Terraza	Convencional
Santo Domingo Tonaltepec	Arriba	10.78	12.22	16.63
	Abajo	10.18	11.59	12.11
	Medio	7.49	10.32	8.91
Santa María Tiltepec	Arriba	11.45		12.68
	Abajo	11.76		11.73
	Medio	11.91		11.89
Teotongo	Arriba	12.84	13.35	20.02
	Abajo	16.24	14.00	9.49
	Medio	13.13	9.44	13.39
	Mínimo	7.49	9.44	8.91
	Máximo	16.24	14.00	20.02
Estadísticos	Promedio	11.75	11.82	12.98
	Des. Est	2.37	1.74	3.45
	Coef de var (%)	20.16	14.76	26.60

El ANOVA no muestra diferencias significativas en la humedad del suelo al final del ciclo agrícola 2014 entre sitios, sistemas de producción y posición del muestreo (Cuadro 14).

Cuadro 14. Análisis de varianza para conocer si existen diferencias en los contenidos de humedad por sitio, sistema y posición.

Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	33.24	16.62	3.22	0.065
Sistema	2	7.326	3.663	0.71	0.506
Posición	2	34.592	17.296	3.35	0.059
Error	17	87.705	5.159		
Total	23	163.698			

Las lama-bordo y terraza reportan un contenido de humedad similar (11.75% y 11.82%, respectivamente) con un gradiente hacia la parte aguas abajo cercana al bordo, donde se acumula el suelo y la humedad, lo que muestra el efecto de las obras de conservación para conservar humedad en las parcelas.

En las parcelas con lama-bordo y terrazas, no es común el mantenimiento, que favorecería la reducción de los escurrimientos, mejorar la infiltración y capacidad de retención de agua, la mayor parte de las parcelas no se siembran anualmente y no se valora su impacto en la conservación del agua.

7.2. Adopción de obras de conservación de suelo

El grado de adopción de los sistemas con lama-bordo y terrazas, por los productores es bajo para el lama-bordo en los tres sitios y para terrazas en Santo Domingo Tonaltepec y solo es alto para Santa María Tiltepec (Cuadro 10).

Cuadro 15. Adopción de las obras de conservación.

Sitio	Sistema	Nivel de Adopción
Santa María Tiltepec	Lama-bordo	2
Santo Domingo Tonaltepec	Lama-bordo	2
Santa María Tiltepec	Terraza	2
Santo Domingo Tonaltepec	Terraza	3

Los productores con lama-bordo mostraron nivel bajo de adopción, a decir de ello porque heredaron las obras fueron construidas por sus antecesores (padres o abuelos), conocen el sistema, pero no están dispuestos a construirlos en otros terrenos. Las terrazas, por otra parte, muestran un nivel alto de adopción en la localidad de Tonaltepec.

Los sistemas lama-bordo se está abandonado, los dueños han emigrado y los que quedan no los siembran por la demanda de mano de obra para mantenimiento y de la necesidad de apoyos gubernamentales para mantener y conservar el sistema en forma productiva. González (2007) menciona que las estrategias de apoyo gubernamental a la agricultura no están diseñados para las condiciones ambientales, culturales e históricas de la Mixteca. Se ha tratado de aplicar una política de manejo tecnológico con el uso insumos y servicios utilizados en otros lugares con diferentes condiciones, y no se ha diseñado una política de apoyo tecnológico apropiado a las condiciones particulares de la región.

7.3. Efecto del sistema de producción y manejo en las propiedades de los suelos

El manejo del suelo y el cultivo por los productores y las condiciones topográficas afectan espacialmente las propiedades físicas y químicas y tienen efecto en su calidad y capacidad productiva como lo reporta Mzuhu *et al.* (2005); Glendell *et al.* (2014);

Acevedo *et al.* (2008) y Bacis *et al.* (2009). La variabilidad espacial de la MO, COS, Nt, Nm, CC y PMP inciden en la capacidad de producción de las parcelas de los productores y se espera que las obras de conservación del suelos tengan influencia posicional en esta variabilidad.

7.3.1. Efecto de los sistemas de producción y manejo en las propiedades físicas del suelo

La preparación de los suelos incide en el tamaño agregado y partículas, la compactación de los terrenos y la capacidad de retención de agua. Si en las parcelas se construyen obras de conservación del suelo y agua, con bordos para captar sedimentos y humedad, se espera que se incremente la variabilidad espacial de estas propiedades y las obras incidan en el mejoramiento de las propiedades físicas de los suelos por la retención del material removido y acumulado en las partes bajas de los bordos.

Para conocer la variabilidad de las propiedades físicas de los suelos (Ar, L, A, Dap, CC y PMP) por sistema de manejo, sitio y posición del muestreo, se calcularon los estadístico; los resultados muestra que las Ar tuvieron el mayor coeficiente de variación (48.95%), seguido de los limos con un 38.01% y las A con el 25.46, lo cual sugiere que las acciones de manejo provocan diferentes patrones de movimiento y acumulación de partículas en las partes altas, bajas y márgenes de las parcelas. Las propiedades hidrológicas de los suelos (CC y PMP) muestran coeficientes de variación (CV) menores al 22.53% y la Dap muestra mayor homogeneidad con un coeficiente de variación de 5.05% (Cuadro 16).

La variabilidad de estas propiedades, expresadas en el coeficiente de variación sugiere que existen diferencias espaciales en las parcelas que influyen en la capacidad de producción y en la calidad del suelo.

Cuadro 16. Propiedades físicas de los suelos por sitio, sistema y posición de muestreo.

Sistema	Sitio	Punto	Arcillas (%)	Limos (%)	Arenas (%)	Dap (t m ⁻³)	CC (%)	PMP (%)	
Lama-bordo	Santo Domingo Tonaltepec	A	49.44	17.64	32.92	1.26	39.3	24.3	
		B	29.62	19.82	50.56	1.37	21.5	12.1	
		D	25.44	15.82	58.74	1.41			
		I	25.26	21.82	52.92	1.40			
	Santa María Tiltepec	A	33.62	39.82	26.56	1.31	31.8	14.7	
		B	47.26	33.82	18.92	1.24	29	15.7	
		D	39.44	35.82	24.74	1.28			
		I	44.16	33.82	22.02	1.26			
	Teotongo	A	51.62	21.64	26.74	1.24	43.7	26.9	
		B	39.62	17.82	42.56	1.31	31.6	18.8	
		D	29.44	22.00	48.56	1.37			
		I	23.44	24.00	52.56	1.41			
Terrazas	Santo Domingo Tonaltepec	A	33.62	13.82	52.56	1.35	24.2	16.8	
		B	40.16	9.82	50.02	1.32	27.7	19.6	
		D	52.16	15.82	32.02	1.25			
		I	59.80	0.18	40.02	1.22			
	Santa María Tiltepec	A	61.62	27.64	10.74	1.22	31.1	18.8	
		B	57.08	29.64	13.28	1.20	31.3	19.4	
		D	55.08	31.64	13.28	1.21			
		I	59.08	28.00	12.92	1.22			
	Convencional	Santo Domingo Tonaltepec	A	57.44	17.64	24.92	1.22	39.7	27.5
			B	40.16	19.82	40.02	1.30	28.5	18.4
			D	34.16	13.82	52.02	1.35		
			I	55.98	22.00	22.02	1.22		
Santa María Tiltepec		A	53.62	33.82	12.56	1.21	30.4	16.3	
		B	49.44	31.64	18.92	1.23	28.3	15.1	
		D	47.44	25.64	26.92	1.26			
		I	56.16	29.82	14.02	1.21			
Teotongo		A	31.62	37.64	30.74	1.32	30.9	18.5	
		B	45.80	34.36	19.84	1.25	37	21.8	
		D	45.62	37.82	16.56	1.24			
		I	41.62	37.82	20.56	1.26			
Mínimo			23.44	0.18	10.74	1.20	21.50	12.10	
Máximo			61.62	39.82	58.74	1.41	43.70	27.50	
Promedio			44.25	25.07	30.68	1.28	31.63	19.04	
Desv. Est			11.27	9.53	15.02	0.06	5.79	4.29	
Coef de Var %			25.46	38.01	48.95	5.05	18.29	22.53	

A: arriba, B: abajo, D: derecha, I: izquierda

El ANOVA, mostró que en el porcentaje de arena existen diferencias entre sitios y sistemas, los tres sitios son diferentes estadísticamente ($P < 0.05\%$), con un comportamiento similar en terrazas y lama-bordo, pero diferente al convencional; el limo mostró diferencias en los sitios, los valores en Teotongo y Tiltepec son iguales pero diferentes a Tonaltepec, por sistema de manejo solo existen diferencias entre las terrazas y el convencional; el contenido de arcilla mostro diferencias solo por el sistema

de manejo, originado posiblemente por la magnitud del proceso erosivo que se presenta en las parcelas bajo estudio. La densidad aparente tiene bajo coeficiente de variación, pero presenta diferencias por sitio y sistema, Tonaltepec es diferente de Santa María Tiltepec y el sistema de lama-bordo es diferente del sistema de terraza y convencional. Las constantes de humedad del suelo (CC y PMP) no muestran diferencias significativas entre sitio y sistema (Anexo 4).

La prueba de Tukey muestra diferencias significativa en los contenidos de Ar, L, A y Dap y no existen diferencias significativas entre CC y PMP (Cuadro 17).

Cuadro 17. Comparación de medias de las propiedades físicas del suelo.

Propiedades	Media	
Arcilla	44.25	ab
Limo	25.07	ab
Arena	30.68	abc
Densidad aparente	1.27	ab
Capacidad de campo	31.625	
Punto de marchitez permanente	19.04	

7.3.2. Efecto de los sistemas de producción y manejo en las propiedades químicas de los suelos

La preparación de los suelos, el manejo de insumos en las parcelas, las densidades de siembra, el manejo de residuos de cosecha y el movimiento de partículas, agregados y material orgánico afecta la fertilidad química, biológica y las propiedades hidrológicas que definen la calidad del suelo. La construcción de obras de conservación del suelo como lama-bordo mejoran la fertilidad, acumulan MO y COS que mejoran la calidad de los suelos para la producción de cultivos como lo señalan Chávez (2012) y Rivas *et al.* (2008) y resultados que permiten suponer que con la construcción de terrazas se mejoren estas propiedades ya que reducen la erosión aun cuando existe transporte de suelo, nutrimentos y material orgánico de las partes altas hacia los bordos de las terrazas.

Las propiedades químicas de los suelos por sistema de manejo, sitio y posición del muestreo, muestran que el pH varió de alcalino a ligeramente alcalino con un valor promedio de 7.9 y con un CV de 3.28%; la MO fluctúa de contenidos muy bajos (0.2%)

a medios (3.28%) con un promedio bajo de 1.34% y un CV de 55.5% que sugiere que los sitios, el sistema y el sitio de muestreo en las parcelas influyen en la variación de la MO (Coeficiente de variación de 55.51%) y que existen indicios que los sistemas de manejo (lama-bordo y terrazas) tengan influencia en la acumulación de MO. Situación similar se muestra en el coeficiente de variación con COS que indica que existen las posibilidades que los sistemas de manejo influyan en la captura de carbono de los suelos producto de manejo y se acumulación de los materiales erosionados (Cuadro 18).

La fertilidad de los suelos (N_m , P y K) bajo estudio por sistema, sitio y muestreo muestran coeficientes de variación de 56.42, 63.87 y 92.69% respectivamente que indican que estos pueden influir en el movimiento de nutrientes (Cuadro 18).

Cuadro 18. Propiedades químicas de los suelos por sitio, sistema y manejo.

Sistema	Sitio	Punto	pH	M.O. (%)	N_m (kg ha ⁻¹)	P (mg/kg)	K (cmol _c kg ⁻¹)	COS (t ha ⁻¹)	
Lama-bordo	Santo Domingo Tonaltepec	A	7.49	0.40	8.39	0.47	0.44	8.85	
		B	7.55	1.71	38.63	2.64	0.45	40.74	
		D	7.73	1.07	24.95	2.55	0.42	26.31	
		I	7.62	0.94	21.67	1.61	0.30	22.86	
	Santa María Tiltepec	A	8.11	0.81	17.45	0.57	0.24	18.41	
		B	8.14	0.83	17.07	0.66	0.39	18.00	
		D	8.31	0.89	18.76	1.13	0.44	19.78	
		I	7.96	1.00	20.70	0.76	0.44	21.83	
	Teotongo	A	7.95	3.28	67.18	0.57	3.00	70.85	
		B	7.95	2.25	48.52	2.83	1.63	51.18	
		D	7.90	2.95	66.65	1.32	0.44	70.29	
		I	8.10	1.01	23.39	1.32	0.27	24.66	
Terrazas	Santo Domingo Tonaltepec	A	7.66	0.67	14.99	0.38	0.33	15.81	
		B	7.88	1.45	31.65	1.89	0.38	33.38	
		D	7.96	2.05	42.19	1.04	0.62	44.49	
		I	7.07	0.83	16.79	0.28	0.29	17.71	
	Santa María Tiltepec	A	7.94	0.86	17.34	0.47	0.43	18.28	
		B	7.95	0.87	17.25	2.46	0.54	18.19	
		D	8.09	0.20	4.01	1.04	0.44	4.23	
		I	7.89	1.47	29.67	1.04	0.53	31.30	
	Convencional	Santo Domingo Tonaltepec	A	7.76	1.72	34.67	0.47	0.45	36.57
			B	7.77	1.87	40.12	1.70	0.55	42.31
D			7.78	1.53	34.03	1.04	0.46	35.89	
I			7.87	1.34	26.98	1.32	0.33	28.45	
Santa María Tiltepec		A	7.85	1.08	21.49	1.32	0.42	22.67	
		B	8.35	0.51	10.38	0.28	0.35	10.94	
		D	8.23	0.57	11.75	0.38	0.31	12.39	
		I	8.35	0.73	14.51	0.19	0.32	15.30	
Teotongo		A	7.87	2.66	58.03	0.94	0.50	61.20	

Sistema	Sitio	Punto	pH	M.O. (%)	N _m (kg ha ⁻¹)	P (mg/kg)	K (cmol _c kg ⁻¹)	COS (t ha ⁻¹)
		B	7.82	2.14	44.23	1.13	0.83	46.64
		D	7.86	1.47	30.16	1.04	0.64	31.81
		I	7.91	1.61	33.44	1.23	0.40	35.26
		Mínimo	7.07	0.20	4.01	0.19	0.24	4.23
		Máximo	8.35	3.28	67.18	2.83	3.00	70.85
		Promedio	7.90	1.34	28.35	1.13	0.55	29.89
		Desv. Est	0.26	0.74	15.99	0.72	0.51	16.87
		Coef de Var %	3.28	55.51	56.42	63.87	92.69	56.42

A: arriba, B: abajo, D: derecha, I: izquierda

Los coeficientes de variación de las propiedades químicas de los suelos sugieren que existe una alta variabilidad espacial por parcelas y que estas influyen en la calidad del suelo, ya que los contenidos de materia orgánica, carbono total del suelos y nutrimentos son indicadores de la calidad del suelo interpretado como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo (Carter et al., 1997) y el estado de las propiedades dinámicas del suelo (MO, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular) constituyen la salud del suelo (Romig *et al.*, 1995), como fue reportado por Bautista *et al.* (2004).

Los resultados del ANOVA y prueba de medias indican que en el pH existen diferencias en los sitios, Tonaltepec es diferente a Tiltepec, Teotongo se mantiene cercano a ambos sitios; en la MO y Nm Tonaltepec y Tiltepec son diferentes a Teotongo, este último muestrea los valores más altos; no hay diferencias por sistemas de manejo y posición del muestreo en las parcelas (Cuadro 19). En P y K existen diferencia en la ubicación del punto de muestreo, con diferencias significativas en las muestras de “arriba” y “abajo”, el contenido en los márgenes es similar; y el COS mostró diferencias entre sitios, Teotongo muestra la mayor cantidad y es diferente de Tonaltepec y Tiltepec (Anexo 5).

Cuadro 19. Estadísticas de las propiedades químicas de los tres sistemas de estudio.

Propiedades	Media
pH	7.89 ab
Materia orgánica	1.34 ab
Nitrógeno mineralizado	28.34 ab
Fósforo	1.13 ab
Potasio	0.549 ab
Carbono orgánico total	29.893 ab

7.4 Variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en los sistemas lama-bordo de Santa María Tiltepec y Teotongo

En el análisis de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos en los sistemas de lama-bordo, por la posición de los sitios de muestreo y la antigüedad de los bordos, se trató de conocer la parte de la parcela con mejor calidad de suelo.

- Santa María Tiltepec

Las propiedades físicas de los suelos de Tiltepec muestra una textura migajón arenosa, con contenidos promedio de 39.71, 31.57 y 28.71% en arcilla, limo y arena, y CV de 23.85, 11.09 y 31.73%, respectivamente, el comportamiento espacial muestra que los mayores contenidos de arcilla se encuentran en la línea de flujo del escurrimiento en el sistema. La capacidad de campo con un CV de 13.55%, y el punto de marchitez permanente con 21.26%, muestran una correlación positiva con el contenido de arcilla, con valores mayores en la porción central de las parcelas. La Dap y conductividad hidráulica (Ch) muestran un comportamiento consistente con la textura dominante, en los márgenes, últimas áreas en incorporarse a la parcela, dominan fracciones gruesas y valores de Dap y Ch más elevados (Cuadro 20).

Espacialmente los mayores contenidos de arena se presentan en los márgenes izquierda y derecha de las parcelas en la parte baja y alta; los limos se acumulan en mayor proporción en las partes bajas del sistema lama-bordo; las arcillas tienden a concentrarse en parte central de las parcelas. La variación espacial de la Dap es mínima y las constantes de humedad del suelo (CC y PMP) se distribuyen espacialmente de acuerdo con los tamaños de partículas, se destacaron los valores en las partes centrales de las parcelas y en las parcelas de parte baja lama-bordo (Figura 35).

Cuadro 20. Variabilidad espacial de las propiedades físicas de los suelos del sistema lama-bordo en Santa María Tiltepec.

Parcela	Ubicación	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	CC (%)	PMP (%)	Da (t m ⁻³)	Conductividad hidráulica (mm h ⁻¹)
1	Derecha	24	30	46	28	16	1.47	10.88
	Izquierda	26	28	46	28	16	1.53	7.11
	Centro	40	30	30	37	24	1.43	1.64
2	Derecha	40	34	26	38	24	1.40	2.15
	Izquierda	40	34	26	38	24	1.41	1.95
	Centro	52	26	22	43	31	1.32	0.88
3	Derecha	38	32	30	36	23	1.43	2.17
	Izquierda	54	26	20	44	31	1.30	0.79
	Centro	56	30	14	45	33	1.25	1.21
4	Derecha	42	32	26	38	25	1.42	1.34
	Izquierda	52	28	20	43	30	1.31	0.93
	Centro	46	28	26	39	25	1.36	2.30
5	Derecha	32	30	38	32	19	1.50	3.42
	Izquierda	40	30	30	37	24	1.43	1.64
	Centro	40	28	32	37	24	1.44	1.58
6	Derecha	28	38	34	30	17	1.52	4.27
	Izquierda	30	38	32	32	18	1.51	3.54
	Centro	52	30	18	43	30	1.30	1.07
7	Derecha	34	36	30	35	21	1.42	3.85
	Izquierda	28	26	46	29	17	1.51	6.35
	Centro	46	36	18	40	27	1.20	6.69
8	Derecha	30	32	38	31	18	1.53	3.68
	Izquierda	40	36	24	38	24	1.36	2.99
	Centro	36	32	32	36	22	1.41	3.52
9	Centro	40	34	26	38	24	1.40	2.01
	Derecha	52	32	16	42	30	1.27	1.85
	Izquierda	26	34	40	32	18	1.30	15.24
10	Centro	48	34	18	41	28	1.30	2.02
	Mínimo	24	26	14	28	16	1.20	0.79
	Máximo	56	38	46	45	33	1.53	15.24
	Media	39.71	31.57	28.71	36.79	23.68	1.39	3.47
	Desv. Est.	9.47	3.50	9.11	4.98	5.03	0.09	3.26
	Coef de Var %	23.85	11.09	31.73	13.55	21.26	6.60	93.95

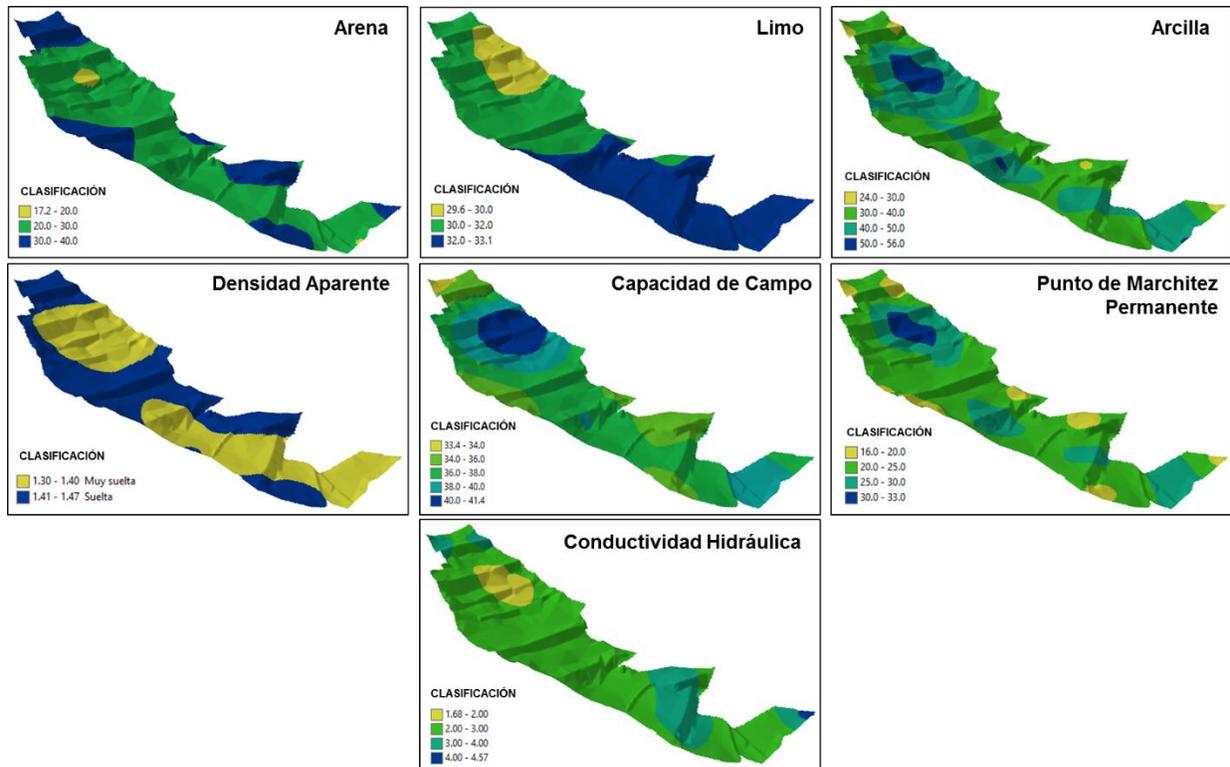


Figura 35. Variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo en Santa María Tiltepec.

El ANOVA mostró que la antigüedad) y la ubicación del muestreo en las parcelas (margen derecha, izquierda o centro), para arcilla ($p= 0.035$), CC ($p= 0.034$) y PMP ($p= 0.035$) tienen diferencia estadísticamente significativas. Los contenidos de arena, limo y Ch no mostraron diferencias significativas entre sitios de muestreo y posición (Anexo 6).

La prueba de Tukey no muestra diferencias significativas de Ar, CC y PMP (Cuadro 21).

Cuadro 21. Comparación de medias de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo en Santa María Tiltepec.

Propiedades	Media	
Arcilla	39.71	ab
Limo	31.57	
Arena	28.71	
Densidad aparente	1.39	
Capacidad de campo	36.79	ab
Punto de marchitez permanente	23.68	ab
Conductividad hidráulica	3.47	

- Teotongo

En Teotongo la textura es franco arcilloso arenoso, con contenidos promedio de 32.65, 18.32 y 49.03% y CV de 31.27%, 29.14% y 15.44% en arcilla, limo y arena respectivamente, dominan los contenidos de arena que mejoran la infiltración del agua del suelo. La capacidad de campo tiene un CV de 16.75% y el PMP de 25.7%. (Cuadro 22).

Los mayores contenidos de arena se ubican en las márgenes derechas e izquierda, producto de la inclusión de terrenos degradados y roturados al sistema; los mayores contenidos de limos se ubican la parte baja del sistema y los mayores contenidos de arcillas se ubican en la parte central de las parcelas.

Cuadro 22. Variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo del sistema lama-bordo en Teotongo.

Parcela	Ubicación	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	CC (%)	PMP (%)	Da (t m ⁻³)	Ch (mm h ⁻¹)
1	Derecha	32	18	50	30	19	1.56	3.30
	Izquierda	42	16	42	37	25	1.47	8.50
	Centro	38	16	46	34	23	1.56	14.22
2	Derecha	28	16	56	29	18	1.49	2.59
	Izquierda	38	14	48	36	24	1.50	5.92
	Centro	38	12	50	34	23	1.48	12.5
3	Derecha	22	14	64	23	14	1.47	3.61
	Izquierda	34	12	54	33	21	1.41	57.07*
	Centro	46	12	42	39	27	1.47	22.48*
4	Derecha	36	12	52	34	22	1.48	26.35*
	Izquierda	32	10	58	29	19	1.44	1.20
	Centro	36	16	48	34	22	1.41	2.75
5	Derecha	30	14	56	30	19	1.49	3.35
	Izquierda	32	12	56	29	18	1.55	3.88
	Centro	38	16	46	31	19	1.54	5.23
6	Centro	22	24	54	25	14	1.48	2.57
	Derecha	24	20	56	27	16	1.42	2.79
	Izquierda	36	18	46	34	22	1.45	10.39
7	Centro	42	18	40	38	26	1.44	5.55
	Derecha	34	20	46	33	21	1.41	4.72
	Izquierda	38	18	44	36	24	1.50	1.70
8	Centro	40	22	38	37	25	1.50	1.71
	Derecha	4	38	58	20	5	1.44	0.58
	Izquierda	26	24	50	29	17	1.49	2.51
9	Centro	44	20	36	39	27	1.46	6.04
	Derecha	18	26	56	23	13	1.52	13.3
	Izquierda	32	20	48	32	20	1.41	1.57
10	Centro	50	20	30	41	30	1.40	2.28
	Derecha	16	26	58	22	11	1.38	1.65
	Izquierda	34	24	42	34	22	1.34	0.99

Parcela	Ubicación	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	CC (%)	PMP (%)	Da (t m ⁻³)	Ch (mm h ⁻¹)
	Centro	30	20	50	31	19	1.45	6.63
	Mínimo	4	10	30	20	5	1.34	0.58
	Máximo	50	38	64	41	30	1.56	14.22
	Media	32.65	18.32	49.03	31.71	20.16	1.46	4.72
	Desv. Est.	9.51	5.73	7.57	5.31	5.22	0.05	3.82
	Coef de Var %	29.14	31.27	15.44	16.75	25.87	3.61	81.91

* Valores no considerados por ser atípicos

La Dap no muestra variabilidad, lo que coincide con lo reportado para Tiltepec, los valores de CC y PMP más altos se ubican en la parte central y a los largo del sistema. La conductividad hidráulica reporta valores medios relativamente bajos en la parte central y se incrementa en las márgenes (Figura 36).

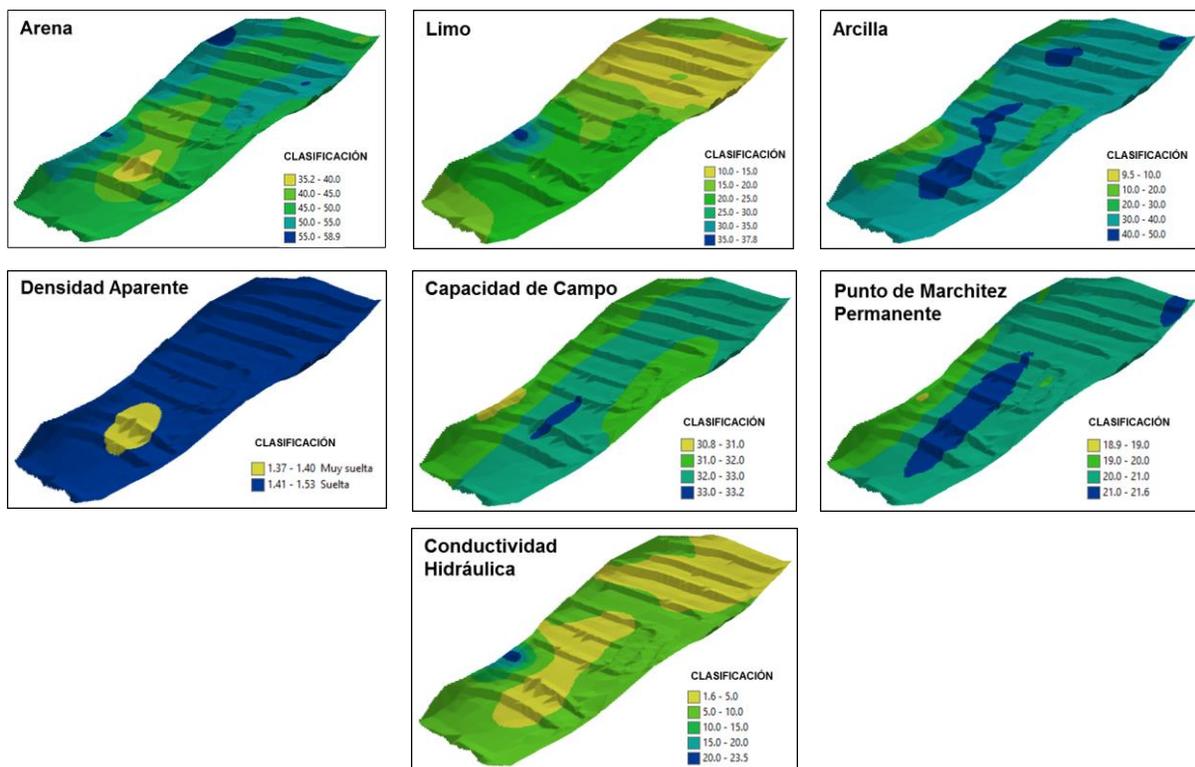


Figura 36. Variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo en Teotongo.

El ANOVA muestra efectos significativos para los márgenes en Ar, A, CC, y PMP, lo que sugiere que al incorporar nuevos materiales al sistema, las márgenes cambian su composición granulométrica y en la parte central tienden a acumularse fracciones finas; para limos y densidad aparente existen diferencias estadísticas por la antigüedad de la

parcela que puede explicarse por ser la fracción más erodible, no se encontraron diferencias significativas en la Ch a pesar del alto CV reportado (Anexo 7).

La comparación de medias por posición del muestreo y antigüedad, mostró diferencias significativas en Ar, L, Dap, CC, PMP (Cuadro 23).

Cuadro 23. Comparación de medias de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo en Teotongo.

Propiedades	Media	
Arcilla	32.64	ab
Limo	18.32	abc
Arena	49.03	abc
Densidad aparente	1.46	ab
Capacidad de campo	31.71	ab
Punto de marchitez permanente	20.16	ab
Conductividad hidráulica	7.67	

7.4.1 Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo en el sistema lama-bordo

- Santa María Tiltepec

El análisis químico del suelo en Tiltepec muestra que los suelos son ligeramente alcalinos (pH 8.0) y con un CV de 2.16%; la MO es baja con un CV de 81.58%; el COS varían de 4.32 a 271.16 t ha⁻¹ con un promedio de 35 t ha⁻¹ y un CV de 142.5% que sugiere que el sistema lama-bordo acumula carbono, su eficiencia es variable de acuerdo a la dirección del flujo y el crecimiento lateral del sistemas, pero que incide en la captura de carbono. Los contenidos promedio de N, P y K son bajos, con CV alto (>46%) lo que indica que los sistema de manejo en las parcelas, su posición topográficas influyen en la fertilidad del suelo, como lo reporta Chávez (2012), Rivas *et al* (2008), Leigh *et al.* (2013) y Mueller *et al.* (2012) (Cuadro 24).

Los mapas de variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo de Tiltepec por sitio de muestreo y por posición de la parcela muestran que no existe diferencias entre el pH del suelo a lo largo del sistema; que los contenidos de MO son más altos en la parcelas de parte baja del (9, 10 y 11) del sistema lama-bordo que sugiere que los bordos con mayor antigüedad en su construcción retienen suelo y material orgánico que

mejora la calidad de los suelos con incrementos de 1.2% en comparación con la parte alta y baja. EL COS muestra una acumulación en las parcelas de la parte baja (75 t ha⁻¹) en comparación con las parcelas de la parte alta (25 t ha⁻¹) que indica un incremento de 50 t ha⁻¹ que es atribuible al sistema lama-bordo (Figura 37).

La fertilidad del suelo en el sistema muestra una variabilidad espacial en los contenidos de Nt que van de extremadamente pobre en las márgenes izquierda y derecha de las parcelas y mediamente pobre en la parte central de dichas parcelas. Los contenidos de P son medio y los de K son muy bajos, lo que indica que dentro de estos rangos podrían existir diferencias en la parcela y la ubicación de la misma (Figura 37).

Cuadro 24. Variabilidad espacial de las propiedades químicas de los suelos del sistema lama-bordo en Tiltepec.

Parcela	Ubicación	pH	M.O. (%)	Nitrógeno total (%)	Fósforo (mg kg ⁻¹)	Potasio (cmol (K)kg ⁻¹)	COS (t ha ⁻¹)
1	Derecha	8.08	2.22	0.11	40.79	0.37	28.41
	Izquierda	8.07	1.07	0.04	8.12	0.14	14.31
	Centro	8.07	0.79	0.06	4.16	0.11	9.81
2	Derecha	8.24	1.36	0.08	11.09	0.26	16.58
	Izquierda	8.28	1.07	0.03	4.16	0.14	13.19
	Centro	8.05	1.36	0.05	5.15	0.15	15.64
3	Derecha	7.95	1.07	0.04	3.17	0.16	13.37
	Izquierda	8.24	1.07	0.05	5.15	0.14	12.16
	Centro	8.15	1.36	0.06	2.18	0.12	14.81
4	Derecha	8.15	0.50	0.04	6.14	0.17	12.39
	Izquierda	8.18	1.07	0.05	13.07	0.08	20.42
	Centro	8.19	2.22	0.03	5.15	0.10	43.81
5	Derecha	8.10	0.79	0.04	18.02	0.18	10.29
	Izquierda	8.23	0.79	0.06	11.09	0.16	9.81
	Centro	7.90	0.79	0.01	15.05	0.23	19.75
6	Derecha	8.22	0.50	0.03	5.15	0.09	6.63
	Izquierda	8.28	0.50	0.03	4.16	0.09	4.39
	Centro	8.11	1.07	0.08	9.11	0.12	32.42
7	Derecha	8.23	1.80	0.03	6.14	0.12	51.77
	Izquierda	8.22	1.52	0.02	4.16	0.08	39.93
	Centro	7.89	6.49	0.05	9.11	0.15	271.16*
8	Derecha	8.13	0.41	0.06	5.15	0.12	11.03
	Izquierda	7.99	2.35	0.05	5.15	0.18	74.10
	Centro	7.98	2.21	0.06	2.18	0.14	54.23
9	Centro	7.94	1.24	0.07	3.17	0.14	25.24
	Derecha	7.71	2.62	0.09	13.07	0.06	52.21
10	Izquierda	7.60	4.84	0.01	9.11	0.16	54.69
	Centro	7.79	2.35	0.07	3.17	0.42	47.81
Mínimo		7.60	0.41	0.01	2.18	0.06	4.39
Máximo		8.28	6.49	0.11	40.79	0.42	271.16
Media		8.07	1.62	0.05	8.26	0.16	35.01
Desv. Est.		0.17	1.32	0.02	7.58	0.08	49.89
Coef. de Var. %		2.16	81.56	46.83	91.73	51.38	142.50

Valor fuera de rango *

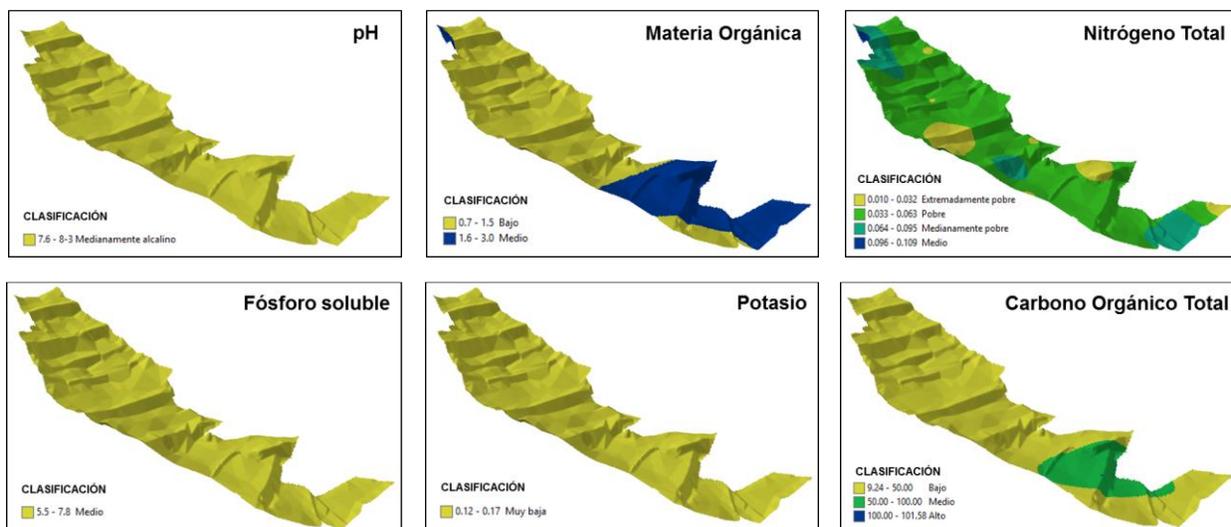


Figura 37. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo en el sistema lama-bordo en Tiltepec.

De acuerdo al análisis de varianza realizado para cada una de las propiedades químicas, se observó que sólo existe diferencia significativa en pH (Anexo 8). La prueba de Tukey mostró que la diferencia es en antigüedad, siendo las parcelas 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 iguales entre sí y diferentes de las parcelas 1, 2 y 3 (Cuadro 25).

Cuadro 25. Estadísticas de las propiedades químicas del sistema lama-bordo de Tiltepec.

Propiedades	Media	
pH	8.07	ab
Materia orgánica	1.62	
Nitrógeno total	0.05	
Fósforo soluble	8.26	
Potasio	0.16	
Carbono orgánico	35.01	

- Teotongo

Las propiedades químicas de los suelos del sistema lama-bordo de Teotongo, muestra que el pH presente un bajo coeficiente de variación (3.65%) y el resto de las propiedades materia orgánica, nitrógeno total, fósforo, potasio y carbono total tienen altos coeficientes de variación lo que indica que existe una variabilidad espacial de estas propiedades en el sistema lama-bordo (Cuadro 26 y Figura 38).

Cuadro 26. Variabilidad espacial de las propiedades químicas de los suelos del sistema lama-bordo en Teotongo.

Parcela	Ubicación	pH	M.O. (%)	Nitrógeno total (%)	Fósforo (mg kg ⁻¹)	Potasio (cmol (K)kg ⁻¹)	COS (t ha ⁻¹)
1	Derecha	7.93	1.43	0.02	3.17	1.19	38.70
	Izquierda	7.80	2.00	0.11	3.17	1.01	66.85
	Centro	7.79	1.14	0.01	2.18	1.10	51.60
2	Derecha	7.75	3.14	0.14	7.13	1.02	29.57
	Izquierda	7.74	4.28	0.19	9.50	1.04	49.61
	Centro	7.50	1.43	0.07	5.15	0.82	33.80
3	Derecha	7.92	1.43	0.03	3.17	0.80	26.50
	Izquierda	7.82	1.71	0.11	9.11	0.53	32.20
	Centro	7.84	2.00	0.21	2.18	0.91	33.57
4	Derecha	7.78	2.28	0.14	11.09	0.42	30.24
	Izquierda	7.80	1.14	0.10	6.14	0.49	50.01
	Centro	7.74	1.71	0.09	4.16	0.85	104.93
5	Derecha	7.73	2.28	0.11	6.14	0.31	14.78
	Izquierda	7.65	1.43	0.07	3.17	0.50	30.76
	Centro	7.68	2.28	0.09	9.11	0.77	19.10
6	Centro	7.60	1.71	0.06	10.10	0.17	22.03
	Derecha	7.58	2.62	0.09	5.15	0.75	42.67
	Izquierda	7.58	1.71	0.08	8.12	0.38	36.60
7	Centro	7.57	2.90	0.07	6.14	0.79	39.81
	Derecha	7.25	2.07	0.05	7.13	0.38	38.98
	Izquierda	7.30	3.45	0.10	3.17	0.49	59.53
8	Centro	7.29	2.90	0.08	5.15	0.46	49.61
	Derecha	7.22	2.62	0.06	5.15	0.20	50.01
	Izquierda	7.30	2.90	0.10	8.12	1.13	147.85
9	Centro	7.35	3.73	0.11	4.16	0.69	193.16
	Derecha	7.19	2.62	0.06	5.15	0.14	22.62
	Izquierda	8.19	3.18	0.07	3.17	0.42	237.27
10	Centro	7.84	3.73	0.14	10.10	0.72	235.58
	Derecha	8.25	2.35	0.03	8.12	0.08	298.56
	Izquierda	8.13	3.18	0.09	3.17	0.41	289.91
11	Centro	7.92	2.90	0.10	4.16	0.33	36.60
	Mínimo	7.19	1.14	0.01	2.18	0.08	14.78
	Máximo	8.25	4.28	0.21	11.09	1.19	298.56
	Media	7.68	2.39	0.09	5.83	0.62	77.84
	Desv. Est.	0.28	0.83	0.04	2.62	0.32	82.74
	Coef de Var %	3.65	34.46	49.00	44.87	50.78	106.29

La variación espacial de las propiedades químicas de los suelos muestra que el pH varía de 7.1 a 8.2 y es ligeramente alcalino; la MO reporta una acumulación en las parcelas 11, 10 y 9 de la parte baja y va decreciendo hacia la parte alta del sistema hasta reportar los valores más bajos en las parcelas 1 y 2. Los cambio promedio de MO es de 1.6% atribuible a la acumulación de suelo que propicia el sistema lama-bordo como ya fue discutido. La acumulación de COS se muestra en las partes medias de las

parcelas y se explican por el efecto de los bordos para capturar carbono, situación que no sucede en las márgenes izquierda y derecha de las parcelas (Figura 38).

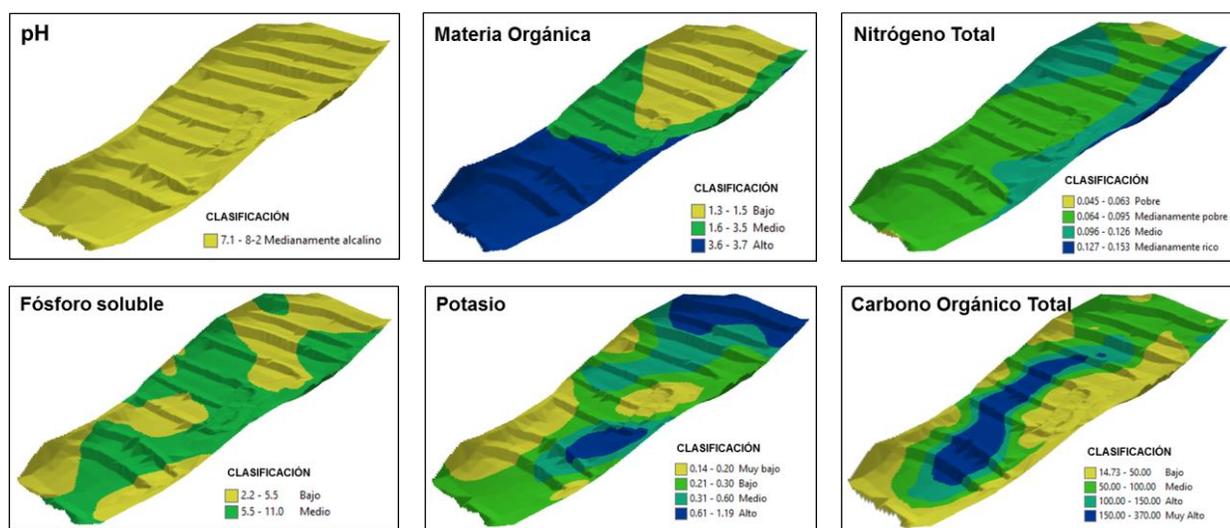


Figura 38. Variabilidad espacial de las propiedades química del suelo en el sistema lama-bordo en Teotongo.

La variabilidad geoespaciales de la MO muestra una acumulación en la parte baja donde se ubican los muros más antiguos, lo que sugiere que este sistema permite la captura del carbono que se mueve con los escurrimientos superficiales y las partículas del suelo.

En el análisis de varianza (ANOVA) realizado a cada una de las propiedades químicas del suelo de las diferentes parcelas (Anexo 9) muestran que existen diferencias significativas en los contenidos de MO, K y carbono orgánico, pero que no existen diferencias entre los contenidos de pH, Nt y P. Esto se comprobó con la prueba de Tukey que muestra que existe diferencia entre las medias de los contenidos de MO, K y COS como se obtuvo con el análisis de varianza (Cuadro 27).

Cuadro 27. Comparación de medias de las propiedades químicas del sistema lama-bordo.

Propiedades	Media
pH	7.67
Materia orgánica	2.39 ab
Nitrógeno total	0.09
Fósforo soluble	5.83
Potasio	0.62 abc
Carbono orgánico	77.84 ab

De acuerdo a la prueba de Tukey realizada para la comparación de medias se encontró que los contenidos de MO tuvo diferencias estadísticamente significativas por la posición de la parcelas (antigüedad de las lama-bordo) y que fueron las parcelas 9, 10, 11 de las parte baja las que reportaron los más altos contenidos de materia orgánica en comparación de las parcelas de la parte alta del sistema de lama-bordo (parcelas 1, 2 y 3). Como se señaló previamente las obras de conservación de suelos como el sistema lama-bordo no solo captan los sedimentos transportados por los escurrimientos y propician la infiltración y almacenamiento de agua en las terrazas formadas, sino que también retiene el material orgánico que se acarrea con el suelo, que mejora la calidad y salud de los suelos en las zonas de sedimentación.

Los contenidos de potasio tuvieron diferencias significativas entre parcelas, la parcela 1 está dentro de la clase alta a diferencia de la parcela 11 que está dentro de la clase baja; y el carbono orgánico total tuvo diferencia significativas en cuanto al margen de la parcela, el centro es diferente del margen derecho e izquierdo.

7.6. Volumen y peso del suelo retenido por el sistema lama – bordo

Es de especial interés conocer la capacidad que tiene el sistema lama-bordo para almacenar suelo, dada la complejidad que lo compone, se realizó una estimación del volumen a partir de la topografía, en los sitios de Santa María Tiltepec y Teotongo.

De acuerdo a los datos obtenidos en el levantamiento topográfico en Tiltepec, existe una diferencia en elevación de 34 m en una longitud de 401 m y una pendiente promedio de 8.0%. Las terrazas (parcelas) tienen un desnivel de dos metros en promedio. El modelo digital de elevaciones (MDE) permitió elaborar un mapa tridimensional que muestra la distribución de las parcelas (Figura 39). En el sistema lama-bordo de Teotongo hay una diferencia en elevación de 20 m en 480 m longitud y una pendiente promedio de 4%. El sistema está conformado por 11 parcelas (terrazas) con desnivel promedio de dos m entre cada parcela y el mapa tridimensional se muestra en la Figura 39).

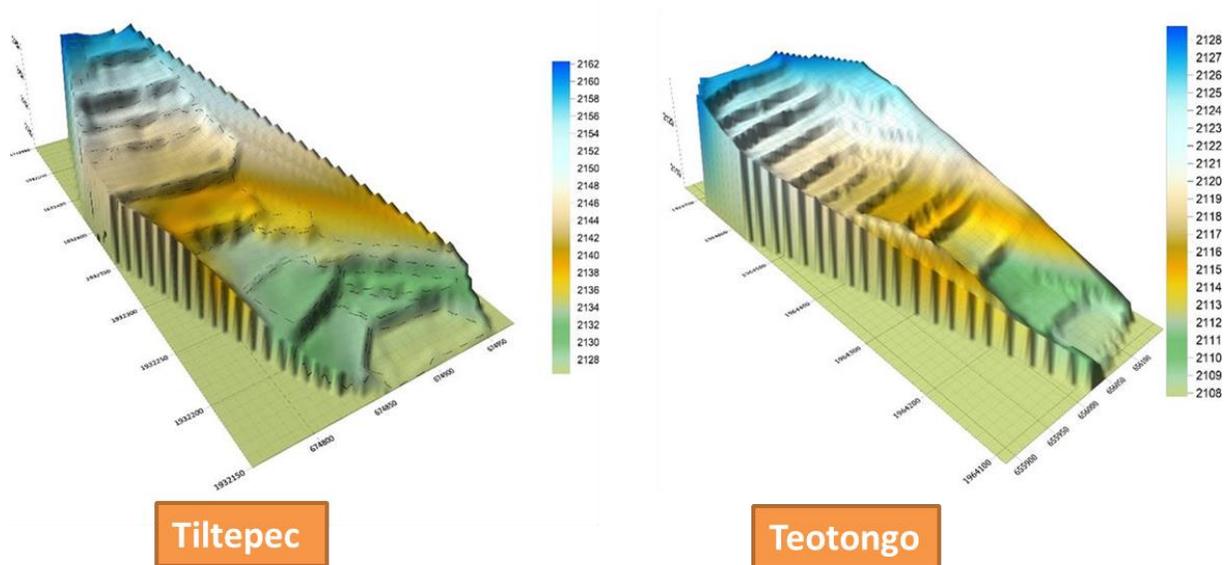


Figura 39. Proyección de las secciones transversales del sistema lama-bordo de Tiltepec y Teotongo.

Con el programa AutoCad Civil 3D, se estimó el volumen de suelo acumulado y retenido por el bordo de cada parcela en Tiltepec. Con la altura del bordo y la proyección del terreno original hasta la base de la terraza aguas arriba, se estimó que el volumen de suelo retenido varió de 182. 59 m³ a 6,621.65 m³ por parcelas con un total de 24,292.21 m³. El peso del sedimento retenido en cada parcela se estimó multiplicando el volumen de suelo por la densidad del material de acarreo (1.8 t m⁻³), dando un total de 43,365.98 toneladas de sedimentos retenidos en el sistema (Cuadro 28).

En Teotongo, con la altura del bordo y la proyección del terreno original hasta la base de la terraza aguas arriba, se estimó que el volumen de suelo retenido por cada bordo varió de 649 m³ a más de 5, 290 m³ con un total de 35,633 m³ de suelo retenido que al multiplicarlo por la densidad de los sedimentos se estimó un peso de sedimentos 64, 139 toneladas (Cuadro 28).

Cuadro 28. Volumen de suelo en los sistemas lama-bordo de Tiltepec y Teotongo.

Parcela	Tiltepec				Teotongo			
	Longitud (m)	Área (ha)	Volumen de suelo (m ³)	Peso del suelo (t)	Longitud (m)	Área (ha)	Volumen de suelo (m ³)	Peso de suelo (t)
1	62.60	0.22	1,987.20	3,576.90	195.00	0.70	4,027.00	7,248.60
2	95.60	0.38	3,369.30	6,064.80	185.40	0.80	3,592.30	6,466.20
3	105.30	0.22	1,128.40	2,031.00	191.10	0.76	4,976.50	8,957.70
4	112.40	0.27	1,168.30	2,102.90	310.90	1.32	5,296.00	9,532.80
5	112.50	0.63	4,402.80	7,925.10	227.60	1.14	4,896.90	8,814.40
6	81.10	0.50	2,723.70	4,902.70	95.50	0.22	649.00	1,168.10
7	122.40	0.77	6,621.70	11,919.00	111.30	0.48	1,561.70	2,811.10
8	50.70	0.23	894.50	1,610.10	110.00	0.50	2,053.70	3,696.60
9	43.90	0.06	182.60	328.70	167.00	1.05	4,094.90	7,370.80
10	88.70	0.25	1,613.90	2,904.90	168.70	0.51	2,683.00	4,829.40
11					134.90	0.98	1,802.30	3,244.10
Total	875.20	3.55	24,292.20	43,366.00	1,897.20	8.47	35,633.10	64,139.60

En Tiltepec el sistema lama-bordo cubre una superficie de 3.55 ha y los sedimentos retenido fueron 12, 215 t ha⁻¹ con una lámina de 0.80 m de profundidad⁷. En Teotongo, la superficie del sistema lama-bordo es de 8.47 ha y los sedimentos retenidos fueron 64,139 toneladas que dan un total de 7,547 t ha⁻¹ retenidos que corresponde a una lámina retenida de 0.50 m de profundidad.

7.7. Costos estimados de la construcción de los sistemas lama – bordo

El volumen de obra se estimó con el modelo digital de elevaciones para determinar la longitud, altura y ancho de los bordos de captación de sedimentos de cada parcela de los sistemas lama-bordo. Para Tiltepec se estimó una longitud de bordos de 860.30 m, altura promedio de 2.10 m, ancho promedio de 2.00 m y un volumen de obra de 4,145.70 m³ y para Teotongo la longitud de bordos fue de 1,897.20 m, altura y ancho de 1.60 y 1.70 m y un volumen de obra de 5,369.90 m³ (Cuadro 29).

Cuadro 299. Volumen obra en los sistemas lama-bordo de Tiltepec y Teotongo.

Parcela	Tiltepec				Teotongo			
	Longitud (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Volumen de obra (m ³)	Longitud (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Volumen de obra (m ³)
1	57.30	2.20	1.50	189.20	195.00	2.00	1.50	584.90
2	92.10	3.00	2.50	690.80	185.40	1.80	2.00	667.30
3	105.60	2.00	2.50	528.20	191.10	2.00	2.00	764.40

⁷ Asumiendo que 1 mm de suelo por hectárea pesa 15 toneladas

Parcela	Tiltepec				Teotongo			
	Longitud (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Volumen de obra (m ³)	Longitud (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Volumen de obra (m ³)
4	112.40	1.50	2.00	337.20	310.90	1.80	1.50	839.50
5	105.90	2.50	2.00	529.40	227.60	1.50	1.50	512.00
6	81.20	4.00	2.20	714.60	95.50	1.00	1.50	143.20
7	122.40	2.50	2.50	765.00	111.30	1.00	1.50	167.00
8	50.70	1.30	1.50	98.90	110.00	1.50	2.00	330.00
9	43.90	0.50	1.20	26.40	67.00	1.80	1.50	450.80
10	88.70	1.50	2.00	266.20	168.70	1.80	2.00	607.40
11					34.90	1.50	1.50	303.50
Total	860.30			4,145.70	1,897.20			5,369.90

Con estas dimensiones se estimó el área de ubicación de los bordos (largo x ancho), el volumen de excavación (área de los bordos x profundidad para el empotramiento) y el volumen de obra (área del bordo x altura). Se estimó el área de los bordos en m², el volumen de excavación en m³ para construir los bordos y el volumen de obra de mampostería seca en m³ para los bordos de los sistemas lama-bordo de Tiltepec y Teotongo (Cuadro 30).

Los costos de inversión de los sistemas lama-bordo de Tiltepec y Teotongo se estimaron considerando que el volumen de piedra tiene un costo de \$165.00/m³ considerando la pepena y acarreo, el costo de trazo es de \$16.91/m² y el costo de excavación para del despalme es de \$60.58/m³ (Cuadro 30).

Cuadro 30. Volumen obra en los sistemas lama-bordo de Tiltepec y Teotongo.

Presas filtrantes piedra acomodada			Tiltepec		Teotongo	
Concepto	Unidad	P. Unitario (\$)	Unidad	Costo (\$)	Unidad	Costo (\$)
Limpia, trazo y nivelación de terreno	m ²	16.91	1,712.02	28,950.21	3,190.80	53,956.43
Excavación manual en material tipo II.	m ³	60.58	513.61	31,114.20	915.84	55,481.87
Pepena, acarreo y acomodo de piedra para la construcción de muros de mampostería seca	m ³	164.44	3,595.00	591,161.80	5,134.00	844,234.96
Costo estimado del sistema lama-bordo				651,226.20		953,673.26
Costo estimado por hectárea				183,444.00		112,594.25

⁸ Precios unitarios actuales para obras de conservación de suelos del Componente de Conservación y Uso Sustentable del Suelo y Agua (COUSSA). Información proporcionada por el M. C. Rodiberto Salas Martínez, prestador de servicios profesionales

La inversión estimada en el sistema lama-bordo de Tiltepec fue de \$ 651,226.20 para construir 10 parcelas (terrazas) con un costo promedio de \$183,444.00 por hectárea. En Teotongo, la inversión estimada fue de \$ 953,673.26 para construir en el tiempo 11 parcelas en una superficie de 8.47 ha con un costo de \$112,594.25 por hectárea.

En ambos sitios los trabajos fueron realizados por los productores por varias décadas con el uso de su mano de obra, sus propios medios para acarrear la piedra, limpiar, trazar, hacer la zanja para el empotramiento y en forma paulatina conformar los bordos para tener los sistemas lama-bordo. A este esfuerzo en la construcción se le debe sumar el costo por el mantenimiento del sistema⁹.

La formación de suelo, la captura de carbono, fertilidad de suelos y mejoramiento de la capacidad de retención de agua que ofrece el sistema lama-bordo, debería ser un tecnología rescatar por parte de las autoridades comunales con apoyo los programas de gobierno para conservar y mantener los sistemas y tenerlos bajos producción.

⁹ No se consideró el costo de mantenimiento

8. CONCLUSIONES

Los rendimientos obtenidos en la agricultura convencional fueron mejores que los obtenidos con terrazas y lama-bordo y mejores que los reportados por la SAGARPA.

Las propiedades físicas y químicas de los suelos en los diferentes sitios y sistemas de manejo mostraron diferencias estadísticas que asociados con el manejo de los cultivos en las parcelas de los productores incidieron en los rendimientos del cultivo de maíz.

El sistema lama-bordo mostró una acumulación de materia orgánica, carbono orgánico total y nitrógeno mineralizado en la parte central de los bordos que fue diferente estadísticamente a lo encontrado en las zonas con terrazas y agricultura convencional.

Las parcelas con lama-bordo y terrazas por si mismas no aseguran una buena producción, pero fue notorio que con un buen manejo del cultivo se obtienen rendimientos son similares a los convencionales, lo que indica que las buenas prácticas de manejo son claves para la producción del cultivo.

En el sistema lama-bordo existe una variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo, mostrando que apoya la captura de carbono, la capacidad de retención de agua en el suelos mejorando en centro en comparación con las márgenes derecha e izquierda de la parcelas y que las parcelas de la parte baja tienen mejor calidad del suelo que las de la parte alta del sistema.

Los productores reconocen las bondades del sistema lama-bordo, pero se encontró que el 50% de la parcelas no siembran anualmente, existe un abandono por la emigración y la falta de mano de obra para producir alimentos.

El sistema lama-bordo es una inversión importante en mano de obra que permite producir alimentos y mejorar la calidad de los suelos que se ha ido perdiendo con el tiempo. Por las bondades que ofrece y por las inversiones realizadas en el sistema deberían ser rescatadas por los productores con apoyo de los programas de gobierno, como una estrategia apropiada para la incorporación de terrenos degradados a la producción, la captura de carbono, el mejoramiento de fertilidad, la calidad y salud de los suelos.

9. LITERATURA CITADA

- Acevedo, C., Álvarez S., M. E., Hernández A., E., Maldonado T., R., Pérez G. M. y Castro B., R. 2008. Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Terra Latinoamericana*. 26 (4):317 – 324.
- Acosta, M., Quednow, K., Etchevers J. y Monreal, C. 2001. Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. Simposio Internacional Medición y Monitorio de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile Octubre del 2001.
- Altieri, M. A. 1991. ¿Por qué estudiar la agricultura tradicional? *Agroecología y desarrollo*. Número especial 1. 1 – 14.
- Altieri, M. A. y Nicholls, C. 2008. Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*. 3 (1): 7 – 28.
- Anta F., S., Blauert, J., Pérez, P. y Sánchez, A. 2006. Análisis institucional de organismos gubernamentales y de la sociedad civil en proyectos de conservación y restauración de suelos y agua en la región de la Mixteca. En Martínez, Juan (Coord.). 2006. Manejo del agua y restauración productiva en la región indígena mixteca de Puebla y Oaxaca. Resultados de los estudios y recomendaciones para los tomadores de decisiones de las comunidades y Organizaciones de la Sociedad Civil. México, D. F. 103 p.
- Bautista C. A., Etchevers B. J., Del Castillo R. F. y Gutiérrez C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista Ecosistemas*. 13 (2): 90 – 97.
- Berumen Barbosa, M. E. 2004. Región Mixteca. Aspectos Socio Económicos y Propuestas de acción para su Crecimiento y Desarrollo. Editorial Eumend.net. Huajuapán de León, Oaxaca, México. 58 p.

- Bolaños H., H. 1996. Políticas agrícolas y pobreza rural en la Mixteca oaxaqueña. *Revista Comercio Exterior*. 46 (8):644 – 651.
- Caballero, J. J. 2006. Tecnologías tradicionales de transmisión oral en la región de la Mixteca. En Martínez, J. (Coord.). *Manejo del agua y restauración productiva en la región indígena mixteca de Puebla y Oaxaca. Resultados de los estudios y recomendaciones para los tomadores de decisiones de las comunidades y Organizaciones de la Sociedad Civil*. pp 61 – 70.
- Camas Gómez, R. 2011. Erosión hídrica, productividad, captura de carbono y uso de la radiación solar y agua en tres sistemas de manejo, para la agricultura de ladera en el trópico subhúmedo de México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, estado de México, México. 171 p.
- Castellanos R. J. Z., Cueto W. J. A., Macías C. J., Salinas G. J. R., Tapia V. L. M., Cortés J. J. M., González A. I. J., Mata V. H., Mora G. M., Vásquez H. A., Valenzuela S. C. y Enríquez R. S. A. 2005. *La fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación – Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Celaya, Guanajuato, México. 44 p.
- Ceja M., M. C. 2008. Degradación de los suelos y pobreza en México. *Economía Informa*. 350. pp 89-93.
- Chávez G., L. E. 2012. Los sistemas lama-bordo en la Mixteca Alta, Oaxaca, México. Reporte para el Proyecto Mixteca. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas – Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – Fondo Mundial para la Naturaleza – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Comisión Nacional Forestal y Comisión Nacional de Agua. 44 p.
- Colegio de Postgraduados. s/f. *Topografía aplicada a obras COUSSA*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 40 p.
- Colegio de Postgraduados. 2009. Proyecto estratégico de apoyo a la cadena productiva de los productores de maíz y frijol (PROMAF 2009). Acompañamiento técnico e

indicadores de impacto: Informe. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y alimentación y Fideicomiso de Riesgo. 120 p.

Comisión Nacional Forestal. 2010. Informe de evaluación externa de los Apoyos de Restauración de Suelos Forestales. Ejercicio Fiscal 2009. Comisión Nacional Forestal; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Universidad Autónoma Chapingo – Centro de Educación Continua. 137 p.

Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. 2006. Elementos para el Desarrollo Regional Integral Sustentable de la Mixteca Oaxaqueña. Unidad de Planeación y Consulta. Dirección del Desarrollo y Cultura de los Pueblos Indígenas. 22 p.

Contreras Hinojosa, J. R. 1996. Erosión en Yanhuitlán, Mixteca Alta, Oaxaca: una estrategia integral de combate. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, estado de México, México. 214 p.

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

Cotler, H., Martínez, M. y Etchevers, J. D. 2016. Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación políticas públicas. *Terra Latinoamericana*. 34 (1). pp. 125 – 138.

Enciclopedia de los municipios de México. 2010. En línea: http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_oaxaca. Consultado el 14 de marzo de 2013.

Francisco N., N., Turrent F., A., Oropeza M., J. L., Martínez M., M. R. y Cortés F., J. I. 2006. Pérdida de suelo y relación erosión – productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. *Terra Latinoamericana*. 24 (2). pp. 253 – 260.

Fuentes, M., Dendooven, L., De León, F., Etchevers, J., Hidalgo, C. y Govaerts, B. 2011. Distribución del carbono orgánico en agregados del suelo y emisiones de

- CO² en diferentes agrosistemas del Valle de México. En Paz P., F. y Cuevas, R. M. (editores). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono – Universidad Autónoma del Estado de México – Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Estado de México, México. pp. 201 – 208.
- Galantini J. A. e Iglesias J. O. 2007. Capacidad de secuestro de carbono y efecto de las prácticas agronómicas en suelos de la región Pampeana de Argentina. En Gallardo L. J. F. (editor). Captura de carbono de ecosistemas terrestres de Iberoamérica. Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España. pp. 169 – 182.
- Galindo Escamilla, E. 2008. Captación de agua de lluvia y retención de suelos en *jollas* en el parte aguas de las cuencas de los ríos Actopan y Amajac. Boletín del Archivo Histórico del Agua. Año 13, número especial. pp 17 – 20
- García J., F., O. Fuentes M., J. Gracia S. 1995. Erosión de laderas. Cuaderno de investigación No. 24. CENAPRED, México D.F. 30 p.
- Garduño, R. 2004. ¿Qué es el efecto invernadero? En J. Martínez y A. Fernández (compiladores). Cambio climático: una visión desde México. INE – SEMARNAT. pp. 29 – 39.
- Glendell, M., Granger, S. J., Bol, R. y Brazier R. E. 2014. Quantifying the spatial variability of soil physical and chemical properties in relation to mitigation of diffuse water pollution. *Geoderma*. (214 – 215): 25 – 41.
- González J., A. 2014. Sistemas agrícolas en orografías complejas: las terrazas de Tlaxcala. *Perspectivas Latinoamericanas*. 11 (1):1 – 30.
- González J., A. 2007. Conversión social y cultural. De los agroecosistemas tradicionales a los alternativos en México. En González J., A., Del Amo R., S. y Gurri G., F. D. Los nuevos caminos de la agricultura: procesos de conservación y perspectivas. pp. 59 – 95. México, D.F.

- González M., L., Etchevers B, J. D. e Hidalgo M., C. 2008. Carbono en suelos de ladera: Factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*. 42 (7):741 – 751.
- Guevara S., A. y Torres R, J. M. 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*, abril-junio, 40-59.
- Ibarra C. D., Ruiz C. J. A., González E. D. R., Flores G. J. G. y Díaz P. G. 2009. Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Revista Agricultura Técnica en México*. 35 (3). 267 – 276.
- Hernández F. J., Etchevers J. D. Hidalgo C., Padilla J. Saynes V. y Cortés J. I. 2012. Línea base de carbono en un suelo establecido con el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF). En F. Paz, M. Bazán, R. M. Cuevas y V. Saynes (editores). *Dinámica del carbono en el suelo 2012. Serie: avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones. Programa Mexicano del Carbono – Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo*. Texcoco, Estado de México, México. pp 69 – 73.
- Ibarra C. D., Ruiz C. J. A., Flores G. J. G. y González E. D. R. 2007. Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Revista Terra Latinoamericana*. 25 (2). 187 – 194.
- Instituto Mexicano del Petróleo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. 2006. *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. 180 p.
- Jiménez Barrios, C. 2010. *Evaluación de obras de conservación de suelos en el Distrito de Coixtlahuaca (Oaxaca, México) y bases para actuaciones futuras. Proyecto fin de carrera*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid, España. 183 p.
- Jiménez D. E., Saynes V., Hidalgo C. y Etchevers J. D. 2012. Protocolo de operación para medición de carbono en el suelo. En F. Paz, M. Bazán, R. M. Cuevas y V.

- Saynes (editores). Dinámica del carbono en el suelo 2012. Serie: avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones. Programa Mexicano del Carbono – Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo. Texcoco, Estado de México, México. pp 81 – 86.
- Julca O. A., Meneses F. L., Blass S. R. y Bello A. S. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. Revista IDESIA (Chile). 24 (1). 49 – 61.
- Kosmas, C., Yassoglou, N., Kounalaki, A. y Kairis, O. Sin fecha. Estructuras tradicionales y actuales para la conservación y el cultivo de los suelo. Land Care In Desertification Affected Areas. From Science Towards Application. Colección de folletos C (2). 4 p.
- Lapeyre T., Alegre J. y Arévalo L. 2004. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. Ecología Aplicada. 3 (1):35 – 44.
- Leigh, D., Kowalewski, S. y Holdridge, G. 2013. 3400 years of agricultural engineering in Mesoamerica: lama-bordos of the Mixteca Alta, Oaxaca, México. Journal of Archaeological Science. 40 (11):4107 – 4111.
- Lind M. 2008. Arqueología de la mixteca. Desacatos. Mayo – agosto, Núm. 027. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. Distrito Federal, México. pp. 13 – 32.
- Martínez M., M., Rubio G., E y Palacios E., C. 2009. Terrazas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Montecillos, Texcoco, Estado de México. 11 pp.
- Martínez H. E., Fuentes E. J. P. y Acevedo H. E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. R. C. Suelo Nutr. Veg. 8 (1): 68 – 96
- Martínez, Juan (Coord.). 2006. Manejo del agua y restauración productiva en la región indígena mixteca de Puebla y Oaxaca. Resultados de los estudios y

recomendaciones para los tomadores de decisiones de las comunidades y Organizaciones de la Sociedad Civil. México, D. F. 103 p.

Mueller, R., Joyce, A. y Borejsza, A. 2012. Alluvial archives of the Nochixtlan valley, Oaxaca, Mexico: Age and significance for reconstructions of environmental change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (321 – 322):121 – 136.

Muñoz O. A., G. Pérez J., P. A. López y R. J. Salvador. 2002. Maíz de cajete: agroecosistema y resistencia a sequía. En: Jacinta Palerm Viqueira (Editora). *Antología sobre pequeño riego. Sistemas de riego no convencionales. Vol. III. Colegio de Postgraduados. pp. 137 – 161.*

Mzuku, R., Kholá, R., Inman, D., Smith, F. y MacDonald, L. 2005. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. *Soil Sc. Soc. Am. J.* (69): 1572 – 1579.

Nuñez D. y G. Marten. 2013. Combatiendo la desertificación con reforestación comunitaria y agricultura sustentable. En línea: <http://www.ecoinflexiones.org/historias/detallados/mexico-oaxaca-reforestacion-comunitaria-mixteca.html>. Consultado el 14 de marzo de 2013.

Olivera V., S.M. 2013. La productividad del maíz del temporal en México: repercusiones del cambio climático. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos CEPAL. Unidad de Cambio Climático. Santiago de Chile, Chile. 24 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2002. *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos No. 96.* Roma, Italia. 69 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2007. *Secuestro de carbono en tierras áridas. Informes sobre recursos mundiales de suelos No. 102.* Roma, Italia. 120 p.

- Orozco Cirilo, Sergio. 2008. Escuelas de campo y adopción de tecnología en agricultura de laderas. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Puebla, Puebla, México. 217 p.
- Palerm Viqueira, J. 2002. Antología sobre pequeño riego. Vol. III. Sistemas de riego no convencionales. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, Estado de México. pp 137 – 161.
- Pérez Nieto, Joel. 1996. Efectos de la erosión y sistemas de labranza sobre la productividad y rentabilidad de dos suelos de Oaxaca. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 178 p.
- Pérez Nieto, Joel. 1992. Factores socioeconómicos relacionados con la conservación del suelo y agua en dos comunidades de la Mixteca Alta Oaxaqueña. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 188 p.
- Pérez R., V., y Anderson, K. C. 2006. Terracing in the Mixteca Alta, Mexico: Cycles of resilience of an ancient land – use strategy. *Human Ecology*. 41: 335 – 349.
- Pérez R., V., Anderson, K. C. y Neff, M. K. 2011. The Cerro Jazmin Archaeological Project: Investigating prehispanic urbanism and its environmental impact in the Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Journal of Field Archaeology*. 36 (2): 83-99.
- Pineda L. M. del R., Ortiz C. G. y Sánchez V. L. R. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques*. 11 (2):3 – 14.
- Ramírez B. V. H., Jaramillo R. A. y Arcila P. J. 2010. Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. *Revista Cenicafé*. 61 (1):55 – 66.
- Ramírez López, A. 2009. Organización comunitaria, reapropiación territorial y reforestación como estrategia de desarrollo rural sustentable. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 93 p.
- Ramírez López, A., H. Navarro Garza, A. Pérez Olvera y V. M. Cetina Alcalá. 2011. Experiencia organizativa para la reforestación con *Pinus oaxacana* Mirov. en

suelos degradados de la Mixteca Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(7):57 – 70.

Rivas Guevara, M., J. Palerm Viqueira, A. Muñoz Orozco, J. Cuevas Sánchez y T. Martínez Saldaña. 2006. “Las Jollas” en la mixteca oaxaqueña. Una técnica tradicional de captación de agua de lluvia para riego. 52° Congreso Internacional de Americanistas. En Palerm J. y R. García Blanco. “El acceso al agua en la historia de América”. Sevilla, España. pp. 1 – 22.

Rivas Guevara, M., Rodríguez Haros, B. y Palerm Viqueira, J. 2008. El sistema de jollas una técnica de riego no convencional en la Mixteca. En: Comisión Nacional del Agua. Boletín del archivo histórico del agua. Año 13 (número especial). México, D. F. pp 6 – 16.

Rivas Guevara, María. 2008. Caracterización del manejo del suelo y uso del agua de lluvia en la Mixteca Alta: *jollas* y maíces de cajete. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 245 p.

Rivera G. M., Trucios C. R., Estrada A. J. Delgado R. G. y Macías R. H. 2013. La materia orgánica y el nitrógeno mineralizado, para los suelos del territorio mexicano y áreas agrícolas de los Distritos de Riego. *Revista Agrofaz*. 13 (2):107-111.

Rojas Rabiela, T. 2009. Las obras hidráulicas en las épocas prehispánica y colonial. En Comisión Nacional de Agua. *Semblanza histórica del agua en México*. México, D. F. pp 9 – 25.

Rojas Rabiela, T. 2001. La tecnología agrícola. En Manzanilla, L. y López L., L. (coordinadores). *Historia antigua de México: Aspectos fundamentales de la tradición cultural mesoamericana*. México, D.F. pp 13 – 55.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1982. *Manual de conservación del suelo y del agua*. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua. Colegio de Postgraduados, Chapingo. México.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2008. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Edición 2008. México D. F. 358 p.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1999. Proyecto de Norma Oficial Mexicana para la Cartografía y Clasificación de Suelos. México, D.F.
- Segura C, M. A., Sánchez G., P., Ortiz S., C. A. y Gutiérrez C., M. C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*. 23 (1):21 – 28.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2014. Cierre de la producción agrícola. En línea: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>. Consultado el 18 de agosto de 2014.
- Simosa Alarcón, M. A. 1985. La agricultura en la Mixteca de Cárdenas. Tesis de Maestría. Colegio de postgraduados. Chapingo, México. 203 p.
- Spores, R., Robles, N. M., Luna, L. D., Tenorio, J. L., Roldán, L. y Matsubara N. 2008. Investigaciones arqueológicas en Yucundaa, el pueblo viejo de Teposcolula, Oaxaca. *Arqueología*. 37 (1):155-173
- Vela C., G., López B., J. y Rodríguez G., M. L. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 77. pp 18 – 30.
- Vela C., G., López B., J., Rodríguez G. M. de L. y Chimal H., A. 2009. Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación. Informe final. Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México, Instituto de Ciencia y Tecnología del D.F., Instituto de Geografía – UNAM. 63 p.
- Vergara S. M. A., Etchevers B. J. D. y Padilla C. J. 2005. La fertilidad de los suelos de ladera de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*. 39 (3):259 – 266.

Zotarelli L., Duckes M. D. y Morgan K. T. 2013. Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad. Departamento de Ingeniería Agrícola y Biológica, Servicio de Extensión Cooperativa, Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas, Universidad de Florida. 1 – 4. En línea: <https://edis.ifas.ufl.edu/ae496>.

10. ANEXOS

Anexo 1. Entrevista para sistema de producción

No. de entrevista: _____ Fecha: _____

1. PRODUCTOR

Nombre: _____ Apellido paterno: _____ Apellido materno: _____
Superficie sembrada (Ha): _____

2. LOCALIZACIÓN

Localidad: _____ Municipio: _____
Latitud: _____ Longitud: _____ Atura: _____

3. LABORES CULTURALES

I. Preparación del terreno

Barbecho: Fecha (dd/mm/aaaa) __/__/__, Costo (\$ ha⁻¹) _____, Fuente de potencia _____

Rastra: Fecha (dd/mm/aaaa) __/__/__, Costo (\$ ha⁻¹) _____, Fuente de potencia _____

Surcado: Fecha (dd/mm/aaaa) __/__/__, Costo (\$ ha⁻¹) _____, Fuente de potencia _____

Observaciones: _____

II. Siembra

Fecha (dd/mm/aaaa): __/__/__, Tipo de semilla: _____, Color: _____

Comprada/propia (C/P): _____, Lugar de adquisición: _____

Cantidad de semilla (kg ha⁻¹): _____, Costo (\$/kg): _____, Distancia entre plantas (m): _____

Distancia entre surcos (m): _____, Profundidad de siembra (m): _____, Plantas/mata: _____

Altura de planta (m): _____, Número de mazorcas/planta: _____, Arreglo topológico _____

Forma de la siembra (manual/maquinaria): _____, Costo de la siembra (\$ ha⁻¹): _____

Observaciones: _____

III. Riego

Modalidad (Temporal, Riego, Punta de riego, humedad residual, Riego de auxilio): _____

Fecha de primer riego (dd/mm/aaaa): __/__/__, Lámina (cm): _____, Costo (\$): _____

Fecha de segundo riego (dd/mm/aaaa): __/__/__, Lámina (cm): _____, Costo (\$): _____

Fecha de tercer riego (dd/mm/aaaa): __/__/__, Lámina (cm): _____, Costo (\$): _____

Fecha de cuarto riego (dd/mm/aaaa): __/__/__, Lámina (cm): _____, Costo (\$): _____

Observaciones: _____

IV. Control de malezas

Tipo de control: _____, Nombre de herbicida: _____
Dosis: _____, Costo (\$): _____
Fecha de la primera limpia (dd/mm/aaaa): ___/___/___, Costo de la primer limpia (\$): _____
Fecha de la segunda limpia (dd/mm/aaaa): ___/___/___, Costo de segunda limpia (\$): _____
Total de limpieas: _____, Costo total por limpieas (\$/Limpia): _____
Observaciones: _____

V. Control de plagas y enfermedades

Nombre de plagas: _____
Tipo de control: _____, Nombre del producto: _____
Fecha de aparición (dd/mm/aaaa): ___/___/___, Fecha de control (dd/mm/aaaa): ___/___/___
Dosis: _____, Costo de producto (\$): _____, Número de aplicaciones: _____
Costo de control (\$ ha⁻¹): _____, Frecuencia de aparición: _____
Observaciones: _____

VI. Fertilización

Fecha de fertilización (dd/mm/aaaa): ___/___/___, Producto químico: _____
Dosis: _____, Costo de producto(\$): _____, Número de fertilizaciones: _____
Costo de fertilización (\$ ha⁻¹): _____
Observaciones: _____

VII. Otras labores culturales

Asociación de cultivos: _____, Rotación de cultivos: _____
Incorporación del rastrojo: _____, Quema antes de la siembra: _____
Deshoje: _____, Otras: _____
Observaciones: _____

VIII. Cosecha

Fecha (dd/mm/aaaa): ___/___/___, Autoconsumo (%): _____, Venta (%): _____
Precio de venta (\$/ton): _____, Lugar de venta: _____
Rendimiento mínimo (ton ha⁻¹): _____, Rendimiento máximo (ton ha⁻¹): _____, Rendimiento medio (ton ha⁻¹): _____
Costo de la cosecha (\$): _____, Costo del desgrane (\$): _____, Costo de transporte (\$): _____
Observaciones: _____

4. OBSERVACIONES GENERALES

Croquis de la parcela	Foto de la parcela

Anexo 2. Entrevista para obras de conservación

N° de entrevista:		Fecha	/ /
-------------------	--	-------	-----

1. PRODUCTOR

PRODUCTOR					
Nombre:		Apellido paterno:		Apellido materno:	
Superficie sembrada (ha):					

2. LOCALIZACIÓN

LOCALIZACIÓN					
Localidad:		Municipio:			
Latitud:		Longitud:		Altura:	

3. OBRA DE CONSERVACIÓN

OBRAS DE CONSERVACIÓN				
Tipo de obra		Antigüedad de la obra		
Tipo de suelo:		Mantenimiento	Si	No
Tipo de mantenimiento		Tiempo de mantenimiento		
Costo de mantenimiento				
Materiales usados para el mantenimiento				

4. ADOPCIÓN DE LA OBRA DE CONSERVACIÓN

CONOCIMIENTO Y EMPLEO DE LA PRÁCTICA			CALIFICATIVO	ÍNDICE DE ADOPCIÓN
¿La conoce?	¿La ha empleado?	¿La sigue empleado?		
SI	SI	SI	MUY ALTA	4
SI	SI	NO*	ALTA	3
SI	NO**		BAJA	2
SI	SI	NO**	NO ADOPCIÓN	0
SI	NO***			
NO				

* No la siguió utilizando porque no la necesita o por falta de asistencia técnica.

** No la ha empleado por falta de recursos económicos, falta de asistencia o por que no la necesita.

*** No la emplea por mala experiencia o porque no le parece buena.

¿Está dispuesto a seguir haciendo la obra? _____

¿Beneficios obtenidos con la obra? (Acumulación de suelo, calidad de suelo, mayor rendimiento, mayor superficie de producción, etc.) _____

5. APOYOS

¿Recibió apoyos para la construcción de la obra? _____

¿Cuáles? _____

¿Qué recibió como apoyo? _____

Sugerencias de cambio en el sistema – obra

Anexo 3. Cálculos para la estimación del uso consuntivo del maíz

Estación Yanhuítlán

Año: 2013

Latitud: 17.5167

Longitud: -97.3167

Altitud: 2225

Mes	Duración del mes	Temp. Media	T	p (%)	f (cm)	Kt	Eto	Kc	Etp'	Etp (cm)
Junio	1	17.22	1.59	8.95	14.25	0.56	7.98	0.49	3.93	6.74
Julio	1	16.16	1.54	8.70	13.43	0.53	7.08	0.72	5.07	8.71
Agosto	1	15.97	1.54	8.91	13.68	0.52	7.13	1.01	7.17	12.30
Septiembre	1	16.17	1.54	8.28	12.78	0.53	6.74	1.07	7.19	12.34
Octubre	1	15.31	1.51	8.20	12.34	0.50	6.18	0.97	5.98	10.26
Noviembre	0.5	13.61	1.43	7.64	5.45	0.45	2.44	0.86	2.10	3.60
Total					71.93		37.56		31.44	53.95

T= Tmed+17.8/21.8; p= Valor de tablas; Kt= 0.031144*T+0.2396; Kc= Valor de tablas y duración del ciclo; Etp'= Eto*KC; Etp= Etp'*(KG/K')

Estación Suchixtlahuaca

Año: 2013

Latitud: 17.6667

Longitud: -97.3917

Altitud: 2348

Mes	Duración del mes	Temp. Media	T	p (%)	f (cm)	Kt	Eto	Kc	Etp'	Etp (cm)
Junio	1	21.00	1.77	8.95	15.81	0.68	10.72	0.49	5.27	7.37
Julio	1	19.50	1.70	8.85	15.03	0.63	9.49	0.72	6.80	9.50
Agosto	1	20.00	1.72	8.91	15.33	0.65	9.92	1.01	9.97	13.92
Septiembre	1	21.50	1.79	8.28	14.81	0.69	10.27	1.07	10.95	15.30
Octubre	1	16.50	1.56	8.20	12.78	0.54	6.88	0.97	6.65	9.29
Noviembre	0.5	19.00	1.67	7.64	6.40	0.62	3.94	0.86	3.39	4.73
Total					80.16		51.21		3.03	60.12

T= Tmed+17.8/21.8; p= Valor de tablas; Kt= 0.031144*T+0.2396; Kc= Valor de tablas y duración del ciclo; Etp'= Eto*KC; Etp= Etp'*(KG/K')

Estación Tamazulapan

Año: 2013

Latitud: 17.7167

Longitud: -97.5497

Altitud: 2076

Mes	Duración del mes	Temp. Media	T	p (%)	f (cm)	Kt	Eto	Kc	Etp'	Etp
Junio	1	18.22	1.64	8.96	14.67	0.59	8.68	0.42	3.64	6.37
Julio	1	16.89	1.58	8.91	14.05	0.55	7.73	0.58	4.48	7.83
Agosto	1	17.39	1.60	8.91	14.27	0.57	8.07	0.85	6.86	11.98
Septiembre	1	16.93	1.58	8.28	13.07	0.55	7.21	1.06	7.64	13.35
Octubre	1	16.17	1.54	8.20	12.66	0.53	6.68	1.02	6.83	11.94
Noviembre	0.5	14.96	1.49	7.64	5.69	0.49	2.79	0.89	2.49	4.34
Total					74.41		41.14		31.94	55.81

T= Tmed+17.8/21.8; p= Valor de tablas; Kt= 0.031144*T+0.2396; Kc= Valor de tablas y duración del ciclo; Etp'= Eto*KC; Etp= Etp'*(KG/K')

Anexo 4. ANOVA de las propiedades físicas del suelo de cada uno de los sitios de estudio

Arcilla					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	528.3	264.14	3.23	0.057
Sistema	2	1066.8	533.41	6.53	0.005
Ubicación	3	142.2	47.41	0.58	0.634
Error	24	1961.0	81.71		
Total	31	3934.0			

Limo					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	1613.55	806.74	24.08	0.000
Sistema	2	266.26	133.128	3.97	0.032
Ubicación	3	13.97	4.657	0.14	0.936
Error	24	803.93	33.497		
Total	31	2814.28			

Arena					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	3604.4	1802.21	21.01	0.000
Sistema	2	1099.6	549.81	6.41	0.006
Ubicación	3	208.0	69.33	0.81	0.502
Error	24	2059.1	85.80		
Total	31	6991.6			

Capacidad de campo					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	59.93	29.967	0.97	0.413
Sistema	2	16.87	8.434	0.27	0.767
Ubicación	3	81.90	81.902	2.64	0.135
Error	24	310.19	31.019		
Total	31	502.01			

Punto de marchitez permanente					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	61.575	30.787	1.72	0.228
Sistema	2	3.251	1.626	0.09	0.914
Ubicación	1	32.776	32.776	1.83	0.206
Error	10	178.755	17.875		
Total	15	276.099			

Densidad aparente					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	0.029535	0.014768	5.87	0.008
Sistema	2	0.032306	0.016153	6.42	0.006
Ubicación	3	0.003825	0.001275	0.51	0.681
Error	24	0.060385	0.002516		
Total	31	0.129350			

Anexo 5. ANOVA de las propiedades químicas del suelo de cada uno de los sitios de estudio

pH					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	1.05255	0.52627	15.70	0.000
Sistema	2	0.09734	0.04867	1.45	0.254
Ubicación	3	0.12383	0.04128	1.23	0.320
Error	24	0.80472	0.03353		
Total	31	2.08426			

Materia orgánica					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	7.9600	3.97998	12.48	0.000
Sistema	2	0.0010	0.00049	0.00	0.998
Ubicación	3	0.5833	0.19443	0.61	0.615
Error	24	7.6545	0.31894		
Total	31	17.0650			

Nitrógeno mineralizado					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	3790.34	1895.17	13.43	0.000
Sistema	2	11.62	5.81	0.04	0.960
Ubicación	3	276.31	92.10	0.65	0.589
Error	24	3387.79	141.16		
Total	31	7928.05			

Fósforo					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	1.366	0.6832	1.87	0.176
Sistema	2	1.208	0.6038	1.65	0.213
Ubicación	3	4.688	1.5628	4.27	0.015
Error	24	8.780	0.3658		
Total	31	16.072			

Potasio					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	1.366	0.6832	1.87	0.176
Sistema	2	1.208	0.6038	1.65	0.213
Ubicación	3	4.688	1.5628	4.27	0.015
Error	24	8.780	0.3658		
Total	31	16.072			

Carbono orgánico					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Sitio	2	4215.66	2107.83	13.42	0.000
Sistema	2	12.91	6.46	0.04	0.960
Ubicación	3	307.21	102.40	0.65	0.586
Error	24	3768.47	157.02		
Total	31	8817.95			

Anexo 6. ANOVA de las propiedades físicas del suelo del sistema lama-bordo de Tiltepec

Arcilla					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	196.5	98.24	1.35	0.279
Margen	2	567.7	283.85	3.90	0.035
Error	23	1672.2	72.70		
Total	27	2421.7			

Limo					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	70.56	35.28	3.43	0.050
Margen	2	26.78	13.39	1.30	0.292
Error	23	236.82	10.30		
Total	27	330.86			

Arena					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	55.15	27.57	0.36	0.704
Margen	2	399.29	199.64	2.58	0.098
Error	23	1779.69	77.38		
Total	27	2241.71			

Capacidad de campo					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	49.60	24.80	1.23	0.311
Margen	2	158.25	79.13	3.93	0.034
Error	23	463.52	20.15		
Total	27	670.71			

Punto de marchitez permanente					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	58.60	29.30	1.44	0.259
Margen	2	158.83	79.41	3.89	0.035
Error	23	469.44	20.41		
Total	27	684.11			

Densidad aparente					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Margen	2	0.01222	0.006112	0.84	0.446
Antigüedad	2	0.04599	0.022995	3.15	0.062
Error	26	0.16787	0.007299		
Total	30	0.22867			

Conductividad hidráulica					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	15.62	7.811	0.73	0.494
Margen	2	26.84	13.418	1.25	0.305
Error	23	246.65	10.724		
Total	27	286.41			

Anexo 7. ANOVA de las propiedades físicas del suelo del sistema lama-bordo de Teotongo

Arcilla					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Margen	2	1277.6	638.80	13.44	0.000
Parcela	10	765.8	76.58	1.61	0.182
Error	18	855.7	47.54		
Total	30	2715.1			

Limo					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	537.51	268.75	18.48	0.000
Margen	2	69.03	34.51	2.37	0.113
Error	26	378.13	14.54		
Total	30	984.77			

Arena					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Margen	2	793.9	396.93	13.51	0.000
Parcela	10	488.9	48.89	1.66	0.167
Error	18	528.8	29.38		
Total	30	1719.0			

Capacidad de Campo					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Margen	2	392.5	196.23	11.82	0.001
Parcela	10	214.6	21.46	1.29	0.305
Error	18	298.9	16.60		
Total	30	846.4			

Punto de Marchitez Permanente					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Margen	2	354.9	177.43	11.07	0.001
Parcela	10	226.4	22.64	1.41	0.251
Error	18	288.5	16.03		
Total	30	816.2			

Densidad aparente					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Margen	2	0.010565	0.005283	2.72	0.085
Antigüedad	2	0.022789	0.011394	5.86	0.008
Error	26	0.050584	0.001946	0.42	
Total	30	0.083774			

Conductividad hidráulica					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Margen	2	74.53	37.26	2.84	0.079
Antigüedad	2	29.50	14.75	1.12	0.342
Error	26	301.72	13.12		
Total	30	393.02			

Anexo 8. ANOVA de las propiedades químicas del suelo del sistema lama-bordo de Tiltepec

pH					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	0.32613	0.16306	8.70	0.002
Ubicación	2	0.04428	0.02214	1.18	0.325
Error	23	0.43117	0.01875		
Total	27	0.82410			

MO					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	4.190	2.095	1.19	0.323
Margen	2	2.116	1.058	0.60	0.557
Error	23	40.595	1.765		
Total	27	47.362			

Nitrógeno total					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	0.001694	0.000847	1.76	0.194
Margen	2	0.001984	0.000992	2.06	0.150
Error	23	0.011057	0.000481		
Total	27	0.014800			

Fósforo					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	42.93	21.46	0.38	0.689
Margen	2	190.21	95.11	1.67	0.209
Error	23	1306.06	56.79		
Total	27	1550.27			

Potasio					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	0.006089	0.003044	0.44	0.649
Margen	2	0.008889	0.004444	0.64	0.535
Error	23	0.159071	0.006916		
Total	27	0.174443			

Carbono orgánico					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	5844	2922	1.20	0.319
Margen	2	5027	2513	1.03	0.372
Error	23	55982	2434		
Total	27	67214			

Anexo 9. ANOVA de las propiedades químicas del suelo del sistema lama-bordo de Teotongo

pH					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	0.37627	0.18814	2.52	0.100
Margen	2	0.03327	0.01663	0.22	0.802
Error	26	1.94164	0.07468		
Total	30	2.35962			

Materia orgánica					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	5.71	2.85	5.00	0.015
Margen	2	0.26	0.13	0.23	0.799
Error	26	14.85	0.57		
Total	30	20.82			

Nitrógeno total					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	0.002668	0.001334	0.68	0.515
Margen	2	0.004789	0.002395	1.22	0.311
Error	26	0.050992	0.001961		
Total	30	0.058358			

Fósforo					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Antigüedad	2	4.107	2.0534	0.27	0.768
Margen	2	1.556	0.7778	0.10	0.904
Error	26	199.963	7.6909		
Total	30	205.457			

Potasio					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Margen	2	0.2312	0.11560	2.38	0.121
Parcela	10	1.9818	0.19818	4.08	0.005
Error	18	0.8735	0.04853		
Total	30	2.9986			

Carbono orgánico total					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Margen	2	96311	48155	11.03	0.001
Parcela	10	44431	4443	1.02	0.466
Error	18	78577	4365		
Total	30	205360			