



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

**EL SISTEMA AGRÍCOLA MILPA INTERCALADA CON
ÁRBOLES FRUTALES EN UNA LADERA DE LA SIERRA
MIXE, OAXACA: INTERACCIONES AGRONÓMICAS Y
PRODUCTIVIDAD EN UN SUELO CON HUMEDAD
RESIDUAL**

JUAN PABLO TORRES ZAMBRANO

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

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2016

La presente tesis titulada: **El sistema agrícola milpa intercalada con árboles frutales en una ladera de la Sierra Mixe, Oaxaca: interacciones agronómicas y productividad en un suelo con humedad residual**, realizada por el alumno: **Juan Pablo Torres Zambrano** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

EDAFOLOGIA

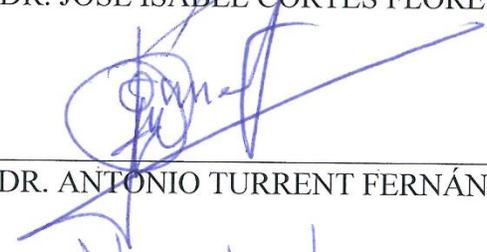
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



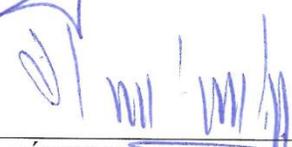
DR. JOSÉ ISABEL CORTÉS FLORES

ASESOR



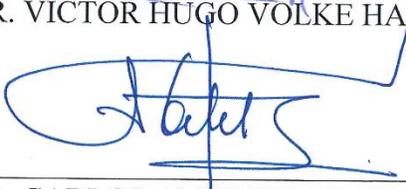
DR. ANTONIO TURRENT FERNÁNDEZ

ASESOR



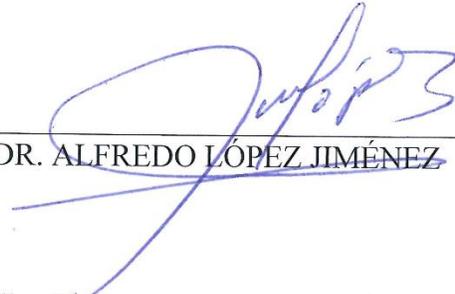
DR. VÍCTOR HUGO VOLKE HALLER

ASESOR



DR. CARLOS ALBERTO ORTIZ SOLORIO

ASESOR



DR. ALFREDO LÓPEZ JIMÉNEZ

Montecillo, Téxcoco, Estado de México, junio de 2016.

**EL SISTEMA AGRÍCOLA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES
EN UNA LADERA DE LA SIERRA MIXE, OAXACA: INTERACCIONES
AGRONÓMICAS Y PRODUCTIVIDAD EN UN SUELO CON HUMEDAD
RESIDUAL**

Juan Pablo Torres Zambrano, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2016.

RESUMEN

Los suelos de ladera en el estado de Oaxaca son cultivados básicamente con maíz y frijol, por agricultores que poseen menos de 5 ha. Los suelos están erosionados, tienen baja fertilidad y, el agricultor obtiene rendimientos bajos e ingreso negativo. El sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en ladera, es una alternativa multiobjetivo compuesto por maíz, frijol y árbol frutal, viables para resolver la problemática de la pequeña unidad de producción. La primera parte del estudio evaluó el rendimiento y la eficiencia relativa de la tierra (ERT) del maíz a la respuesta de N, P, K y D en función de la posición del surco respecto a la hilera de los árboles de durazno; la segunda, abordó la determinación de la dosis óptima económica (DOE) del maíz por posición de surco y del árbol de durazno, más los indicadores ingreso neto (IN) y la relación beneficio costo (B/C); la tercera, describió las características físicas y químicas del suelo del módulo MIAF, así como su clasificación. El experimento con el sistema MIAF en una ladera de la región Mixe, Oaxaca, incluyó: al maíz Olotón en surcos alternos con micro-rotación anual con una leguminosa, se estudiaron 26 tratamientos usando un diseño experimental de parcelas divididas con dos repeticiones; al duraznero variedad CP 2005 en hileras en curvas de nivel, se estudiaron 26 tratamientos con dos repeticiones en un diseño de bloques completos aleatorizados. El efecto de la posición del surco del maíz, y la interacción P x D a través de los seis años, indicó que el rendimiento de grano de maíz estuvo limitado por la disponibilidad de P a todos los niveles de D en los cuatro surcos. Los surcos S1, S2 y S4 tuvieron mayor rendimiento que S3. La ERT del maíz en el año 2007, en promedio osciló entre 0.56 a 0.70; y para el año 2012 de 0.56 a 1.54. La DOE de maíz en S1 fue con 140-125 kg de N-P₂O₅ y 80 mil plantas ha⁻¹ y para los tres surcos restantes con 130-150 kg de N-P₂O₅ y 80 mil plantas ha⁻¹; la DOE para el duraznero al quinto año de edad fue 130-20-51 g de N-P₂O₅-K₂O por año. Las características físicas y químicas del suelo en la zona receptora del módulo, fueron mejoradas respecto a la zona donante. El suelo se clasificó como *Typic hapludults* y Acrisol Háptico (Crómico).

Palabras clave: Eficiencia relativa de la tierra, dosis óptima económica, pequeña unidad de producción, suelo Ultisol, maíz y árboles frutales intercalados.

**AGRICULTURAL SYSTEM MILPA INTERCROPED WITH FRUIT TREES
UNDER SLOPE OF MIXE MOUNTAIN, OAXACA: AGRONOMIC
INTERACTIONS AND PRODUCTIVITY IN SOIL WITH RESIDUAL MOISTURE**

Juan Pablo Torres Zambrano, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2016.

ABSTRACT

Hillside soils in the state of Oaxaca are cropped mainly with maize and beans, by small farmers who own less than 5 ha. Soils are eroded, have low fertility and the farmer gets poor yields and negative income. The system milpa intercropped with fruit trees (MIFT) on hillside, is a multi-objective alternative consisting of maize, beans and fruit tree, which has the properties to solve the problem of small production unit. The first part of the study evaluated the yield and the land equivalent ratio (LER) of corn response to N, P, K and D according to the position of row regard to the row of peach trees; the second part, addressed the determination of the optimum economic dose (OED) of corn in terms of row position and peach tree row, plus net income indicators (NI) and the benefit cost ratio (B/C); the third part, describes the physical and chemical properties of soil of MIFT module and its classification. The experiment with the MIFT system on a hillside of the region Mixe, Oaxaca, included: 'Oloton' maize in alternate rows with micro-annual rotation with a legume, 26 treatments were studied in a split plot experimental design with two replications; the CP 2005 peach tree variety in contour rows, 26 treatments in a randomized complete block experimental design were studied with two replications. The effect of row position of maize, and the P x D interaction indicated that over the six years, the grain yield was limited by the availability of P at all levels of D in four rows. The rows S1, S2 and S4 had higher yield than row S3. LER in 2007, in four rows ranged from 0.56 to 0.70; and for 2012 it varied from 0.56 to 1.54. The OED in S1 was 140-125 kg of N-P₂O₅ and 80 thousands plants ha⁻¹ and for the three remaining rows was with 130-150 kg of N-P₂O₅ and 80 thousands plants ha⁻¹; the OED for peach tree in its fifth year was 130-20-51 g of N-P₂O₅-K₂O per year. The physical and chemical properties of soil in the area which receives sediments of MIFT module were improved regard to the donor area. The soil was classified as *Typic hapludults* and Acrisol Haplic (Chromic).

Key words: *Land equivalent ratio, economic optimum dose, small production unit, Ultisol soil, corn and fruit trees intercropping.*

DEDICATORIA

A mis dos amores Blanca y Cielo, por seguir a mi lado en este camino y darme su comprensión, paciencia y amor.

A mis padres David y Teodora, por el ejemplo de vida y de trabajo que me han enseñado, además de su comprensión y apoyo. Los amo con todo mi corazón.

A mi hermana Virginia, por la comprensión y apoyo en esta etapa. Y a mi hermano David, porque ha sido parte de mi vida.

A mis amigos que gané su respeto y me dieron su confianza en este capítulo de mi vida: Rocío, Horacio, Meztli, Citlali, Teresita, Eliezer, Giovanna, Patricio, Gonzalo, Rosita Amaro, Tertuliano, Adriana, Laura, Gaby, Guillermina, Karen por su amistad y apoyo, mil gracias.

A todos mis compañeros durante esta etapa de mi vida que compartimos experiencias y momentos agradables con mucho respeto, gracias a todos.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Isabel Cortés Flores por ser un gran maestro en mi formación, profesor y ejemplo a seguir. Gracias por su paciencia y compartir sus experiencias.

Al Dr. Antonio Turret Fernández, por ser un ejemplo a seguir en lucha del avance científico.

Al Dr. Ángel Ramos Sánchez, por brindarme su mano como maestro, ser humano y amigo en los tiempos difíciles durante mi estancia en Oaxaca.

Al Dr. Victor H. Volke Haller, por su valiosa ayuda y formación durante en mi estancia en el postgrado.

Al Dr. Carlos A. Ortiz Solorio, por sus lecciones académicas y apoyo en la investigación.

Al Dr. Alfredo López Jiménez, por sus valiosas observaciones y aportaciones en mi investigación, además de brindarme su confianza y amistad.

A la Señora Araceli y Rosalba, por su amistad, apoyo y recomendaciones durante mi estancia como estudiante de postgrado.

A los compañeros del Laboratorio de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos, por su apoyo y amistad durante el postgrado.

A la familia Flores Perea, por su amistad, apoyo, confianza y ejemplo de seres humanos.

Al Sr. Filemón Jiménez y familia, a Sr. Venustiano Gómez y familia, al Sr. Cirilo Vargas y familia, al Sr. Eustacio Vásquez y familia, a la Sra. Adelina Martínez y familia, a la familia Díaz Vargas, a los productores Rafael, Don Félix, Juan Gutiérrez, Germán Vásquez, y productores de la región, gracias por acogerme y brindar su incondicional apoyo durante mi estancia en Santa María Tlahuitoltepec, Oax.

A las autoridades Comunales y Municipales de Santa María Tlahuitoltepec, Oax., por apoyar los trabajos de investigación.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO I: EFECTO DE N, P, K, D Y POSICIÓN DEL SURCO EN EL RENDIMIENTO Y LA EFICIENCIA RELATIVA DE LA TIERRA DE MAÍZ NATIVO, EN UNA LADERA CULTIVADA CON EL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES	4
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
Sitio experimental.....	8
Diseño de tratamientos y experimental.....	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
Rendimiento de grano de maíz.....	17
Eficiencia relativa de la tierra.....	23
CONCLUSIONES.....	26
LITERATURA CITADA.....	26
CAPITULO II: OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA PARA N, P, K Y DENSIDAD DE POBLACIÓN (D) POR POSICIÓN DE SURCO EN MAÍZ, Y PARA N, P, K Y ESTIÉRCOL (E) EN ÁRBOLES DE DURAZNO, BAJO EL SISTEMA MIAF EN UNA LADERA.....	30
RESUMEN.....	31
INTRODUCCIÓN.....	32
MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
Maíz.....	40
Árbol frutal.....	44
CONCLUSIONES.....	46
LITERATURA CITADA.....	47
CAPITULO III: CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO DE LADERA MANEJADO BAJO EL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES.....	51
RESUMEN.....	52
INTRODUCCIÓN.....	53
MATERIALES Y MÉTODOS.....	55
Sitio experimental.....	55
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59

Características físicas del suelo.....	59
Características químicas del suelo.....	61
Clasificación del suelo.....	63
Características morfológicas del suelo.....	63
Características físicas y químicas del suelo.....	64
Clasificación.....	66
CONCLUSIONES.....	66
REVISIÓN DE LITERATURA.....	67
LITERATURA CITADA EN LA INTRODUCCIÓN GENERAL.....	71

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO I: EFECTO DE N, P, K, D Y POSICIÓN DEL SURCO EN EL RENDIMIENTO Y LA EFICIENCIA RELATIVA DE LA TIERRA DE MAÍZ NATIVO, EN UNA LADERA CULTIVADA CON EL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES.

	Página
Cuadro 1. Textura del suelo de la parcela “Santa Cruz”, año 2006.	8
Cuadro 2. Análisis químico del suelo de la parcela “Santa Cruz”, año 2006.	9
Cuadro 3. Establecimiento de surcos de maíz y leguminosa en el módulo MIAF bajo el arreglo de surcos alternos 1x1 en micro-rotación anual, en seis años.	11
Cuadro 4. Lista de los 26 tratamientos de la parcela chica del sub-experimento maíz en el sistema MIAF en ladera.	12
Cuadro 5. Actividades en el establecimiento y manejo del sub-experimento maíz durante seis años en la localidad de Santa Cruz, Santa María Tlahuitoltepec, Oax.	14
Cuadro 6. Matriz de variables auxiliares codificadas (a1, a2, a3, a4 y a5) para el factor año en el rendimiento de maíz bajo el sistema MIAF.	15
Cuadro 7. Matriz de variables auxiliares codificadas (p1, p2 y p3) para la posición del surco de maíz respecto a la hilera de los árboles frutales bajo el sistema MIAF.	16
Cuadro 8. Precipitación y temperatura media mensual durante cinco años en la estación Tlahuitoltepec, Oax., México.	17
Cuadro 9 Significancia de cuadrados medios del análisis de varianza combinado para el rendimiento de maíz en función de año, parcela grande y parcela chica.	17
Cuadro 10. Sub-ecuaciones de regresión del rendimiento de grano de maíz (\hat{Y} en t ha ⁻¹ dispersa) por posición de surco en la ladera a N, P, K y D en los años 2007 y 2012.	19

CAPÍTULO II: OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA PARA N, P, K Y DENSIDAD DE POBLACIÓN (D) POR POSICIÓN DE SURCO EN MAÍZ, Y PARA N, P, K Y ESTIÉRCOL (E) EN ÁRBOLES DE DURAZNO, BAJO EL SISTEMA MIAF EN UNA LADERA.

	Página
Cuadro 1. Lista de los 26 tratamientos lotificados en los sub-experimentos maíz y árbol de durazno en el año 2012 bajo el sistema MIAF en ladera.	37
Cuadro 2. Precios del año 2016 considerados en el cálculo de la dosis óptima económica para maíz y durazno.	39

Cuadro 3. Optimización económica de N, P ₂ O ₅ , K ₂ O y densidad de población, rendimiento de grano (Yg), ingreso neto (IN) y relación beneficio/costo (B/C) por año en surcos específicos de maíz en el arreglo topológico de surcos alternos con micro-rotación anual en el sistema MIAF en ladera.	42
Cuadro 4. Rendimiento de grano (Yg), ingreso neto (IN) y relación beneficio costo (B/C) de maíz en surcos alternos (SA) bajo el sistema MIAF y en cultivo simple (CS) en una ladera en seis años, Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax.	43
Cuadro 5. Rendimientos, ingresos netos y relación beneficio costo de maíz y durazno parciales y totales, bajo el sistema MIAF en ladera en un periodo de seis años.	45

CAPITULO III: CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO DE LADERA MANEJADO BAJO EL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES

	Página
Cuadro 1. Características físicas del suelo del módulo milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en una ladera en San Cruz, Tlahuitotepec, Oax.	60
Cuadro 2. Características químicas del suelo en el módulo milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en una ladera en San Cruz, Tlahuitotepec, Oax.	62
Cuadro 3. Características morfológicas del suelo en tres puntos del sitio experimental Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax.	64
Cuadro 4. Características físicas y químicas del suelo en la parte Norte, media y Sur del sitio experimental Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I: EFECTO DE N, P, K, D Y POSICIÓN DEL SURCO EN EL RENDIMIENTO Y LA EFICIENCIA RELATIVA DE LA TIERRA DE MAÍZ NATIVO, EN UNA LADERA CULTIVADA CON EL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES.

	Página
Figura 1. Módulo MIAF en ladera, posición de los surcos de maíz y leguminosa respecto a la hilera de árboles de durazno.	10
Figura 2. Efecto de la interacción P x D en el rendimiento de grano de maíz en función de la posición del surco en el sistema MIAF en una ladera en el año 2007, con tres densidades de población y tres niveles de fósforo. Zona receptora: A) surco aguas arriba alejado (S1) y B) surco aguas arriba próximo (S2) a la hilera de los árboles de durazno, respectivamente. Zona donante: C) surco aguas abajo próximo (S3) y D) surco aguas abajo alejado (S4) de la hilera de árboles de durazno, respectivamente. El S1 tuvo una dosis de 2 t ha ⁻¹ de estiércol de pollo.	20
Figura 3. Efecto de la interacción P x D en el rendimiento de grano de maíz en función de la posición del surco en el sistema MIAF en una ladera en el año 2012, con tres densidades de población y tres niveles de fósforo. Zona receptora: A) surco aguas arriba alejado (S1) y B) surco aguas arriba próximo (S2) a la hilera de los árboles de durazno, respectivamente. Zona donante: C) surco aguas abajo próximo (S3) y D) surco aguas abajo alejado (S4) de la hilera de árboles de durazno, respectivamente. El S1 tuvo una dosis de 2 t ha ⁻¹ de estiércol de pollo.	22
Figura 4. Efecto de la interacción P x D en la eficiencia relativa de la tierra (ERT) del maíz en función de la posición del surco en el sistema MIAF en una ladera en el año 2007, con tres densidades de población y tres niveles de fósforo. Zona receptora: A) surco aguas arriba alejado (S1) y B) surco aguas arriba próximo (S2) a la hilera de los árboles de durazno, respectivamente. Zona donante: C) surco aguas abajo próximo (S3) y D) surco aguas abajo alejado (S4) de la hilera de árboles de durazno, respectivamente. El rendimiento del cultivo simple fue de 5.6 t ha ⁻¹ .	23

Figura 5. Efecto de la interacción P x D en la eficiencia relativa de la tierra (ERT) del maíz en función de la posición del surco en el sistema MIAF en una ladera en el año 2012, con tres densidades de población y tres niveles de fósforo. Zona receptora: A) surco aguas arriba alejado (S1) y B) surco aguas arriba próximo (S2) a la hilera de los árboles de durazno, respectivamente. Zona donante: C) surco aguas abajo próximo (S3) y D) surco aguas abajo alejado (S4) de la hilera de árboles de durazno, respectivamente. El rendimiento del cultivo simple fue de 2.1 t ha ⁻¹ .	25
---	-----------

CAPÍTULO II: OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA PARA N, P, K Y DENSIDAD DE POBLACIÓN (D) POR POSICIÓN DE SURCO EN MAÍZ, Y PARA N, P, K Y ESTIÉRCOL (E) EN ÁRBOLES DE DURAZNO, BAJO EL SISTEMA MIAF EN UNA LADERA.

Página

Figura 1. Módulo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en condiciones de ladera.	35
Figura 2. Ingreso neto promedio del sistema MIAF vs maíz en cultivo simple en una ladera en Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax.	46

CAPITULO III: CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO DE LADERA MANEJADO BAJO EL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES

Página

Figura 1. Modelo del módulo milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en una ladera; arreglo topológico en surcos alternos con micro-rotación anual de maíz y frijol; y ubicación de las zonas donante y receptora de sedimentos.	56
Figura 2. Ubicación de los perfiles del suelo en el sitio experimental Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax., dentro del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en una ladera al sexto año de su establecimiento.	58

INTRODUCCIÓN GENERAL

Las pequeñas unidades de producción (PUP), con menos de 5 ha, representan el 72.6% del total que tiene el país (INEGI, 2007a; PND, 2013). Estas PUP, en su mayoría se dedican a cultivos básicos, fundamentalmente maíz y frijol. Alrededor del 40% de las PUP están en laderas, con pendientes mayores al 4 % y están desprotegidas en su mayoría contra la erosión hídrica (Calva, 1993; Turrent, 1986).

En el estado de Oaxaca, el 80 % de las PUP están en laderas con pendientes mayores a 20% (Vergara *et al.*, 2005; INEGI, 2007b), en las cuales se producen el maíz y el frijol en sistemas como la Roza-Tumba-Quema (RTQ) y milpa permanente con roturación (aradura) del suelo (Cruz *et al.*, 2004; Díaz *et al.*, 2004). En estas condiciones, los rendimientos no cubren las necesidades anuales de la familia, la erosión del suelo es continua y creciente, y el ingreso neto familiar es negativo (PMSL, 1999; León y Jiménez, 2001; Cortés *et al.*, 2005a).

En el mejoramiento de las técnicas de cultivo en las PUP, existen varias opciones que han sido desarrolladas en diferentes partes del mundo y en México; tales como: 1) terrazas con bordos en curvas a nivel con zanjas aguas arriba, 2) cultivo en callejones, 3) labranza de conservación, 4) agroforestería y 5) terrazas de muro vivo (TMV) (Cortés *et al.*, 2005b; Francisco *et al.*, 2006; Franzel y Scherr, 2002). Sin embargo, la experiencia muestra una baja adopción de estas tecnologías debido a tres razones fundamentales: a) la mayoría de ellas disminuye la tierra de labor de por sí ya limitada, b) no representan una opción real para incrementar de manera significativa el ingreso de los productores en el corto y mediano plazo, y c) varias de ellas demandan una inversión considerable para su establecimiento, que supera la capacidad de los productores (Cortés *et al.*, 2005b; Bellow, 2004; Ruiz *et al.*, 2012).

La agroforestería, incluye dos o más especies de plantas, de las cuales una es perenne. Se obtienen dos o más productos disminuyendo las pérdidas de cosecha por efectos de mal clima, las interacciones agronómicas y ecológicas incrementan la productividad y la eficiencia de la tierra en comparación a un monocultivo (Nair, 1997; Mead y Willey, 1980).

El sistema MIAF es una alternativa agroforestal de cultivo intercalado, constituido por tres especies, el árbol frutal, el maíz y el frijol u otra especie leguminosa de porte bajo, en intensa interacción agronómica y que tiene como propósitos: producir maíz y frijol como elementos estratégicos en la alimentación de las familias, incrementar de manera significativa el ingreso neto, incrementar el contenido de materia orgánica, controlar la erosión hídrica del suelo y con

ello lograr un uso más eficiente del agua de lluvia y nutrimentos (Cortés *et al.*, 2005b; Cortés *et al.*, 2005c; Uribe *et al.*, 2002). El principio del sistema MIAF es hacer una mayor eficiencia en el aprovechamiento integral de los recursos suelo, agua, luz solar y material genético (Lott *et al.*, 2003; Albino *et al.*, 2015; Camas, 2011; Mead y Willey, 1980). La eficiencia del sistema se puede incrementar a través del arreglo espacial de las especies componentes, el manejo de arreglos topológicos, la optimización de insumos y las prácticas agronómicas; con la finalidad de incrementar los rendimientos por unidad de área y tiempo (Francis, 1986; Caviglia, 2009; Ruiz y Loaeza, 2004).

De esta manera, en el periodo 1999-2005 se realizaron los primeros trabajos con el sistema MIAF en el Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL) en el estado Oaxaca, con resultados que mejoraron la situación de las PUP. Sin embargo, también resultó claro que era necesario continuar el trabajo de investigación para determinar las recomendaciones de fertilización para las especies componentes de acuerdo a los agrosistemas predominantes en la región (Cortés *et al.*, 2005b). Por lo tanto, en el año 2007, se inició la segunda fase del PMSL en un agrosistema representativo en la comunidad de Santa María Tlahuitoltepec, Oax. El objetivo del proyecto fue el mejoramiento del manejo agronómico del sistema y la obtención de las recomendaciones específicas de fertilización para el agrosistema predominante (Ramos, 2007).

El trabajo se llevó a cabo en un experimento conducido durante seis años en una ladera con un suelo Acrisol, que se caracteriza por su reacción ácida, bajo en fertilidad y de contenido de cationes (INEGI, 2010; WRB, 2007), con una pendiente inicial del 29.8% (Salinas, 2015), erosionada y cultivada con maíz en condiciones de temporal.

Por lo tanto, en la presente investigación se realizaron tres estudios y se plantearon los siguientes objetivos: 1) estudiar el efecto de la posición del surco de maíz y de los factores nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y densidad de población (D) en una ladera con una pendiente mayor del 20 % y con un suelo de pH ácido en el rendimiento de maíz y la eficiencia relativa de la tierra (ERT), durante un periodo de seis años; 2) determinar la dosis óptima económica (DOE) de los factores N, P, K y densidad de población (D) para el maíz en función de la posición del surco al sexto año del establecimiento del sistema MIAF; y de N, P, K y estiércol de pollo (E) para el árbol de durazno al quinto año de su establecimiento, así como determinar los indicadores de ingreso neto (IN) y la relación beneficio costo (B/C) por especie

y como sistema MIAF; y 3) la caracterización física y química del suelo del módulo MIAF después de seis años de estudio y así mismo, definir la clasificación del suelo con base a la Taxonomía de Suelos y de la Base Mundial del Recurso Suelo.

Las hipótesis de trabajo fueron: 1) en el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas con pendiente pronunciada, el rendimiento de maíz en función de la dosis de N, P, K y D, depende de la posición del surco respecto a la hilera del árbol frutal; y 2) el efecto de la interacción agronómica de las especies maíz nativo y árbol de durazno mejorado en una ladera bajo el sistema MIAF, es una alternativa sostenible para rescatar de las crisis económica, ecológica y social a la pequeña unidad de producción, mediante la optimización de las dosis de N, P, K y densidad de población para el maíz por posición del surco, y de N, P, K y estiércol para el árbol de durazno, a los seis años del establecimiento del sistema.

La prueba de esta hipótesis se hizo bajo el supuesto de que el uso del maíz “Olotón” comúnmente usado en la región, está adaptado a la acidez del suelo imperante, y la respuesta en el rendimiento de grano es positiva significativamente a la aplicación de fertilizantes minerales sin modificar el pH del suelo.

**CAPÍTULO I: EFECTO DE N, P, K, D Y POSICIÓN DEL SURCO EN EL
RENDIMIENTO Y LA EFICIENCIA RELATIVA DE LA TIERRA DE MAÍZ
NATIVO, EN UNA LADERA CULTIVADA CON EL SISTEMA MILPA
INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES.**

RESUMEN

La milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en condiciones de ladera, es una alternativa sustentable para enfrentar las crisis ambiental, social y económica de la pequeña unidad de producción. La fertilización de acuerdo a la posición del surco en una ladera cultivada en el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), es clave para maximizar la eficiencia de la producción de maíz. Por lo tanto, en un experimento de MIAF con maíz de la raza olotón adaptada a un pH del suelo fuertemente ácido, en Santa María Tlahuitoltepec, Oaxaca, México; se estudió durante seis años la respuesta del rendimiento de grano y la eficiencia relativa de la tierra (ERT), a los factores N, P, K, y densidad de población (D), en un suelo franco arcillo limoso, con humedad residual bajo condiciones de temporal, en surcos alternos con micro-rotación anual con una leguminosa. La interacción P x D indicó que en los seis años, el rendimiento de grano estuvo limitado por la disponibilidad de P a los diferentes niveles de D en los cuatro surcos de maíz, pero los surcos S1, S2 y S4 tuvieron mayor rendimiento que el surco S3. La ERT del maíz en el año 2007 sin limitación de agua en el maíz, en los cuatro surcos osciló entre 0.56 a 0.70; y para el año 2012 (año limitativo) varió de 0.56 a 1.54. Por lo tanto, se puede concluir que el maíz fertilizado específicamente según su posición en MIAF, es más eficiente en el uso de los recursos que el cultivo simple en una ladera.

Palabras clave: *Eficiencia relativa de la tierra, pequeña unidad de producción y maíz intercalado.*

INTRODUCCIÓN

En la agricultura de ladera, las unidades de producción familiar (UPF) se caracterizan por un alto y muy alto grado de marginación económica y social (León, 2001). En el estado de Oaxaca, hay 421 692 UPF que cubren una superficie de 2 461 050 ha (INEGI, 2007), alrededor del 80% de ellas se encuentran en laderas (Vergara *et al.*, 2005) y el 74.6% de estas, están afectadas por la erosión hídrica (Valdez *et al.*, 2015).

Las UPF poseen de 2 a 3.5 hectáreas, divididas en varios predios con pendientes pronunciadas. En estas condiciones se producen los alimentos básicos maíz y frijol, y otros productos bajo el sistema agrícola milpa, que se maneja de manera sedentarizada o en el sistema tradicional de roza-tumba-quema (RTQ). El rendimiento de maíz varía de 400 a 700 kg ha⁻¹, el cual es insuficiente para satisfacer las necesidades de alimento y de ingreso de la familia. Además, el manejo actual de estos dos sistemas de producción, tampoco es sustentable ecológicamente, debido a su baja eficiencia en el uso del agua de lluvia, lo cual da lugar a la erosión hídrica del suelo comúnmente presente en la agricultura de ladera (Cortés *et al.*, 2012; León, 2001).

En la Sierra Norte de Oaxaca, región Mixe Alta, el tamaño promedio de las UPF es de 1.6 ha con una producción de maíz de 654 kg ha⁻¹ año⁻¹, que sólo alcanza a cubrir las necesidades de la familia para 7.7 meses. El 57% de los productores fertilizan el maíz principalmente con nitrógeno a una dosis de 80 kg ha⁻¹ (León y Jiménez, 2001), debido a la escasez y costos de los fertilizantes y a la falta de recomendaciones acordes a la región.

Los suelos de la región se caracterizan principalmente por su reacción fuertemente ácida, baja fertilidad y desprotegidos contra la erosión hídrica (Vergara *et al.* 2005; Egodawatta *et al.*, 2013). En estas condiciones, el maíz responde de manera significativa a la aplicación de P₂O₅. Serna *et al.* (2011) reportaron que el rendimiento de maíz promedio de tres años, al incrementar la dosis de 45 a 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹, fue de 6.7 t ha⁻¹ con un híbrido comercial (30F87), en un suelo de origen volcánico con pH de 5.1. Por otra parte, Pool *et al.* (2000) reportaron la respuesta del maíz raza Olotón a las aplicaciones de N, P, K, pollinaza y la cal dolomita al cuarto año de los tratamientos. Ellos encontraron que la combinación 105-92-60 kg de N-P₂O₅-K₂O y 10 t de pollinaza ha⁻¹, respectivamente, dio un rendimiento de 10 t ha⁻¹, en un suelo de ladera terraceda con un pH de 4.8, derivado de cenizas volcánicas con presencia de alófono. Estos resultados, indicó que el maíz Olotón es tolerante a pH del suelo menor a 6.

El sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en condiciones en laderas, es una tecnología alternativa multi-objetivo para revitalizar la milpa, se empezó a estudiar en el Estado de Oaxaca, en el “Proyecto Manejo Sustentable de Laderas” (PMSL) 1999-2005, con el objetivo de mitigar las crisis ecológica, económica y social que caracterizan el entorno de la pequeña unidad producción (Cortés *et al.*, 2005; Santiago *et al.*, 2008).

En un periodo de cuatro años se obtuvo la primera aproximación de fertilización y manejo del sistema MIAF en laderas en las dos regiones Mazateca y Cuicateca. En la primera región, en un suelo con pH de 5.1, se obtuvo un rendimiento de maíz nativo promedio de 7.4 t ha⁻¹, con la dosis de 120-100 kg de N-P₂O₅, respectivamente más 2 t de pollinaza ha⁻¹. En la Cuicateca en un suelo con pH de 5.6, el rendimiento de maíz nativo fue de 4.1 t ha⁻¹, con la dosis de 130 kg de N, 120 kg de P₂O₅ y 1.5 t de pollinaza ha⁻¹ (Cortés, 2004).

Los suelos de ladera sin protección están sujetos a procesos de erosión hídrica, los cuales se acentúan con las prácticas agrícolas. La pérdida de suelo por erosión hídrica a límites permisibles que permita al pequeño agricultor seguir sembrando su maíz nativo, aprovechando la humedad residual, es posible con el sistema MIAF. Es debido al cambio de la topografía del terreno mediante el laboreo del suelo con tracción animal, que conduce al desarrollo gradual de terrazas (Turrent, 1998), a modificaciones de la profundidad del suelo entre las hileras del árbol frutal y a una disminución de los escurrimientos a través de los años (Martínez, 2004; Francisco *et al.*, 2006; Salinas, 2015). No obstante, también da lugar a que las condiciones de fertilidad del suelo y los rendimientos de maíz sean diferentes en las zonas receptora y donante del módulo MIAF en ladera (Camas, 2011). Esto indica que la dosis de fertilización para las especies anuales no debería ser uniforme, sino diferente a través de la pendiente, lo cual permitiría mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, en tiempo y espacio (Pierce y Nowak, 1999), y la productividad del sistema MIAF.

Con base a lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto de la posición del surco de maíz y de los factores nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y densidad de población (D) en una ladera con una pendiente mayor del 20 % y con un suelo de pH ácido en el rendimiento de maíz y la eficiencia relativa de la tierra (ERT), durante un periodo de seis años.

La hipótesis de trabajo fue: En el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas con pendiente pronunciada, el rendimiento de maíz en función de la dosis de N, P, K y D, depende de la posición del surco respecto a la hilera del árbol frutal.

La prueba de esta hipótesis se hizo bajo el supuesto de que el uso del maíz “Olotón” comúnmente usado en la región, está adaptado a la acidez del suelo imperante, y la respuesta en el rendimiento de grano es positiva significativamente a la aplicación de fertilizantes minerales sin modificar el pH del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El trabajo experimental se llevó a cabo en un periodo de seis años (2007 al 2012) en el municipio de Santa María Tlahuitoltepec, Oax. El sitio experimental se encuentra a 17°5'18.45" N, 96°2'53.56"O y a una altitud de 2,300 m. El clima es templado subhúmedo (Cw) con lluvias abundantes en el verano (García, 2004), y con una precipitación media anual de 1375 mm. La temperatura media anual es de 15.2 °C, siendo los meses más fríos noviembre, diciembre, enero y febrero (INEGI, 2010).

El suelo es un Acrisol (INEGI, 2010), con una pendiente inicial de 29.8%. De acuerdo a los procedimientos de análisis de suelos por Van Reeuwijk (1999), el suelo es de textura franco limoso en la profundidad de 0 a 0.20 m y franco arcillo-limoso hasta la profundidad de 1.80 m (Cuadro 1).

Cuadro 1. Textura del suelo de la parcela “Santa Cruz”, año 2006.

Profundidad (m)	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural
	%			
0 - 0.20	15.8	57.7	26.5	Franco Limoso
0.20 - 0.40	7.4	61.2	31.3	Franco Arcillo Limoso
0.40 - 1.40	9.2	54.6	36.2	Franco Arcillo Limoso
1.40 - 1.80	5.9	61.6	32.5	Franco Arcillo Limoso

El pH es moderadamente ácido (MA) de 0 a 0.20 m y fuertemente ácido (FA) hasta los 1.80 m; el contenido de materia orgánica (MO) es bajo en los primeros 0.20 m y muy bajo (MB) en el resto del perfil. La densidad aparente (Dap) a los 0.20 m de profundidad es de 1.38 g cm⁻³, aumenta a los 0.40 m, disminuye hasta 1.40 m y vuelve aumentar en los últimos 0.40 m del perfil, y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) varía de media a los 0.20 m a muy alta hasta los 1.80 m. Los contenidos de potasio (K) y fósforo (P) son trazas (Tr) y de calcio (Ca) y magnesio (Mg) muy bajos (MB) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis químico del suelo de la parcela “Santa Cruz”, año 2006.

Profundidad (m)	pH	MO (%)	Dap (g cm ⁻³)	CIC	K	Ca	Mg	P
0 - 0.20	6.5 MA	1.2 B	1.38	17.9 M	Tr	0.78 MB	0.16 MB	Tr
0.20 - 0.40	4.0 FA	0.33 MB	1.62	42.9 MA	Tr	0.25 MB	0.25 MB	Tr
0.40 - 1.40	4.1 FA	0.29 MB	1.34	51.4 MA	Tr	0.18 MB	0.32 MB	Tr
1.40 - 1.80	3.9 FA	0.29 MB	1.46	44.0 MA	Tr	0.23 MB	0.14 MB	Tr

El módulo MIAF consiste en tres franjas contiguas con una anchura de 10.6 m. En la parte media de la primera franja, se ubica la hilera de árboles frutales a curva de nivel, plantados a 1.0 m de separación entre ellos. En cada franja lateral a la de los árboles de una anchura de 3.2 m, se siembran 4 surcos de maíz y frijol con una distancia de 0.80 m entre surcos, paralelos a la hilera de los árboles frutales (Figura 1) (Cortés *et al.*, 2012). De esta forma, el maíz y el frijol cada uno estaría ocupando el 30 por ciento de la superficie, y los árboles frutales el 40 por ciento restante.

El experimento comprendió tres sub-experimentos: 1) maíz como mesocultivo, 2) exploración de una leguminosa como sotocultivo y 3) árbol de durazno como epicultivo. En el año de inicio del experimento se hizo el trazo de dos módulos MIAF, con hileras a curvas a nivel separadas entre ellas a 10.6 m. En el espacio entre dos hileras de árboles de durazno que le corresponde al cultivo de las especies anuales, se marcaron las ocho posiciones de cada surco de 0.80 m de ancho en contorno a cada hilera. El surcado y la siembra de cada año se hizo de la parte baja hacia la parte alta de la ladera en contorno a la hilera de los árboles de durazno.

El sub-experimento maíz consistió en sembrar cuatro surcos por módulo MIAF, dos surcos en cada franja que flanquea a la hilera de los árboles de durazno. Estas dos franjas corresponden cada una al área de zona receptora (aguas arriba) y donante (aguas abajo), con respecto a la hilera de los árboles frutales (Figura 1).

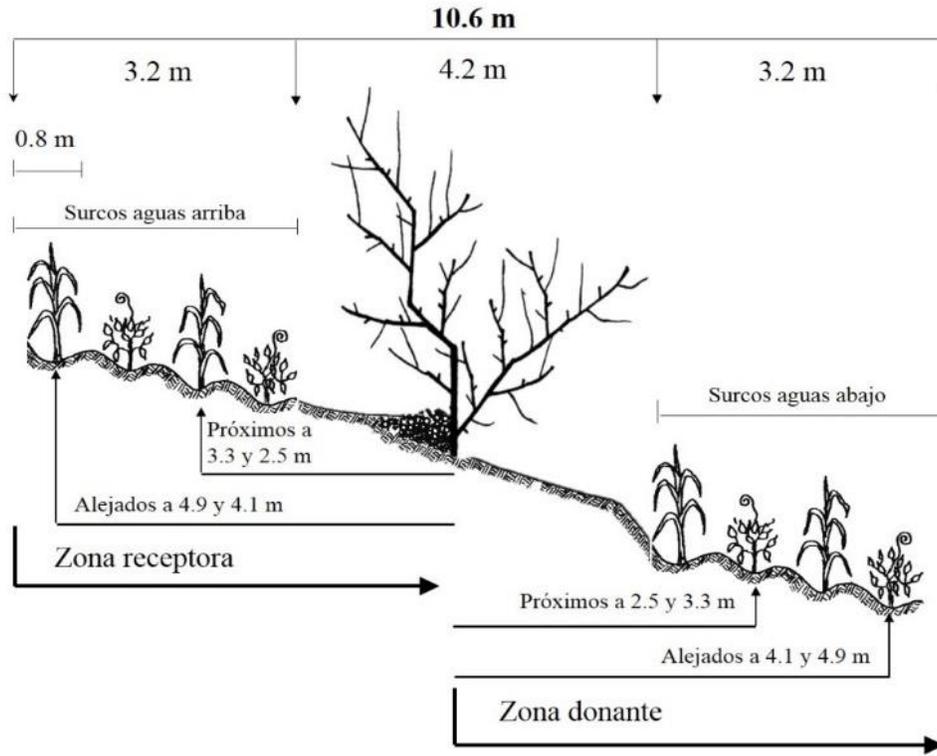


Figura 1. Módulo MIAF en ladera, posición de los surcos de maíz y leguminosa respecto a la hilera de árboles de durazno.

En cada franja destinada a la siembra de los cultivos básicos, se sembraron dos surcos de maíz y dos de leguminosa bajo el arreglo topológico de surcos alternos (1x1) en micro-rotación anual, es decir, uno de maíz y el siguiente de leguminosa. Por ejemplo, para el año 2007 en la franja aguas arriba, en el primer y tercer surco se sembró haba y en el segundo y cuarto surco se sembró maíz; mientras que en la franja aguas abajo, el quinto y séptimo surco fue con haba y finalmente el sexto y el octavo surco con maíz (Cuadro 3). Posteriormente, en el año 2008 se hizo la micro-rotación, así que la siembra en el primer surco fue con maíz, el segundo con haba, y así sucesivamente hasta terminar en el séptimo y octavo surco con maíz y

haba, respectivamente; de esta forma, la micro-rotación del maíz y la leguminosa fue continua hasta el año 2012 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Establecimiento de surcos de maíz y leguminosa en el módulo MIAF bajo el arreglo de surcos alternos 1x1 en micro-rotación anual, en seis años.

Número de surco	Distancia (m)	Año					
		2007	2008	2009	2010	2011	2012
1	4.9	Haba	Maíz	Frijol	Maíz	Chícharo	Maíz
2	4.1	Maíz	Haba	Maíz	Frijol	Maíz	Chícharo
3	3.3	Haba	Maíz	Frijol	Maíz	Chícharo	Maíz
4	2.5	Maíz	Haba	Maíz	Frijol	Maíz	Chícharo
	0	Hilera de árboles de durazno					
5	2.5	Haba	Maíz	Frijol	Maíz	Chícharo	Maíz
6	3.3	Maíz	Haba	Maíz	Frijol	Maíz	Chícharo
7	4.1	Haba	Maíz	Frijol	Maíz	Chícharo	Maíz
8	4.9	Maíz	Haba	Maíz	Frijol	Maíz	Chícharo

De esta manera, el sub-experimento de maíz se manejó bajo un diseño experimental en parcelas divididas, con cuatro tratamientos de parcela grande y 26 tratamientos de parcela chica, con dos repeticiones. La parcela grande consistió en la posición del surco con respecto a la hilera de los árboles frutales según corresponda la micro-rotación: 1) surco aguas arriba alejado de la hilera de los frutales a 4.9 o 4.1 m (S1), 2) surco aguas arriba próximo a la hilera de los árboles frutales a 3.3 o 2.5 m (S2), 3) surco aguas abajo próximo a la hilera de los árboles frutales a 2.5 o 3.3 m (S3) y 4) surco aguas abajo alejado de la hilera de los frutales a 4.1 o 4.9 m (S4).

Los 26 tratamientos de parcela chica (Cuadro 4) resultaron de un diseño de tratamientos del hipercubo doble lotificado (Martínez y Martínez, 1996; Volke *et al.*, 2005), para los factores N, P, K y D, con cinco niveles cada uno: 40, 80, 120, 160 y 200 kg de N ha⁻¹; 30, 60, 90, 120 y 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹; 0, 20, 40, 60 y 80 kg de K₂O ha⁻¹; y 40, 50, 60, 70 y 80 mil plantas ha⁻¹.

Cuadro 4. Lista de los 26 tratamientos de la parcela chica del sub-experimento maíz en el sistema MIAF en ladera.

Lote	Tratamiento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Densidad de población (D)
		----- kg ha ⁻¹ -----			Plantas ha ⁻¹
I	1	40	30	0	40000
	2	40	30	80	80000
	7	200	150	0	40000
	8	200	150	80	80000
	9	80	60	20	70000
	10	80	60	60	50000
	15	160	120	20	70000
	16	160	120	60	50000
II	3	40	150	0	80000
	4	40	150	80	40000
	5	200	30	0	80000
	6	200	30	80	40000
	11	80	120	20	50000
	12	160	60	20	50000
	13	80	120	60	70000
	14	160	60	60	70000
III	17	40	90	40	60000
	18	200	90	40	60000
	19	120	30	40	60000
	20	120	150	40	60000
	21	120	90	0	60000
	22	120	90	80	60000
	23	120	90	40	40000
	24	120	90	40	80000
	25	120	90	40	60000
	26	120	90	40	60000

El experimento se manejó durante un periodo de seis años (2007-2012), para lo cual el efecto año fue el quinto factor de estudio. Además, se manejó un tratamiento adicional en la parcela grande, y consistió en aplicar una dosis de 2 t ha⁻¹ año⁻¹ de estiércol de pollo en el surco S1.

La parcela experimental consistió de cuatro surcos de maíz, dos aguas arriba y dos aguas abajo con respecto a la hilera de los árboles frutales, con una área por surco de 3.2 m² (4 x 0.8 m). La parcela útil correspondió a los 3.0 m centrales de cada surco. También y al mismo

tiempo, se sembró cada año en el surco inmediato al de maíz, una leguminosa de porte bajo con el patrón de cultivo de surcos alteros (1x1) en micro-rotación anual.

Además de los 26 tratamientos estudiados en el sistema MIAF, se incluyó cada año el tratamiento del cultivo simple (CS) de maíz con la dosis del tratamiento central del hipercubo doble (120-90-40 kg de N, P₂O₅, K₂O y 60 mil plantas ha⁻¹), con el propósito de determinar la eficiencia relativa de la tierra (ERT). También se observaron los tratamientos de CS y surcos alternos potenciales, respectivamente, es decir, la dosis central del hipercubo más la aplicación de 10 t ha⁻¹ de estiércol de pollo bajo el supuesto de que el maíz no estuviera limitado por algún nutrimento; y el tratamiento de la milpa tradicional (MT) que estuvo sembrada y fertilizada por el productor con la densidad de 50 mil plantas y 80 kg de N ha⁻¹.

Para la siembra, cada año se llevó a cabo la preparación del suelo que consistió en roturar dos veces el área que le correspondió al maíz y a la leguminosa; es decir, la comprendida entre los árboles de durazno, utilizando el arado egipcio tirado con yunta. La primera roturación fue realizada después de la cosecha (mes de diciembre o enero) y la segunda fue aproximadamente a los 15 días antes de la siembra, con el propósito de aprovechar la humedad residual de las lluvias del año anterior.

En la siembra se utilizó un arado de doble vertedera para surcar cada año y se partió de la parte baja de la ladera hacia la parte alta. La semilla utilizada fue maíz nativo de la raza olotón, comúnmente usado y adaptado en suelos de reacción fuertemente ácida de las partes altas de la sierra norte de Oaxaca (Aragón *et al.*, 2006) y en los Altos de Chiapas (Pool *et al.*, 2000).

La siembra se hizo manual con una coa y por golpe se depositó dos semillas con el suelo ya fertilizado en banda y en el fondo del surco, aplicando 1/3 del N y todo el P₂O₅ y K₂O. Las 2/3 partes restantes del N se aplicaron al inicio de las lluvias del temporal, y además en el surco S1, se aplicó el estiércol de pollo al fondo del surco, e inmediatamente se hizo el paso del arado de doble vertedera para el aporque y el deshierbe como única labor de cultivo (Cuadro 5).

El maíz se cosechó entre 265 y 281 días después de la siembra (Cuadro 5), y se registraron por parcela útil el número de plantas, número de mazorcas, número de plantas acamadas, peso de mazorcas y rastrojo, y contenido de humedad de grano que se determinó con un medidor portátil John Deer (SW 16060[®], I11. EEUU).

Cuadro 5. Actividades en el establecimiento y manejo del sub-experimento maíz durante seis años en la localidad de Santa Cruz, Santa María Tlahuitoltepec, Oax.

Actividad	Año agrícola					
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Roturación 1	2-6-Enero	17-22-Dic-07	16-21-Dic-08	26-29-Dic-08	8-13-Enero	9-12-Enero
Roturación 2	14-18-Febrero	18-23-Febrero	16-21 Febrero	16-20-Febrero	11-15-Febrero	18-21-Febrero
	Fecha / Días de desarrollo					
Siembra	1-Marzo 0 días	5-Marzo 0 días	2-Marzo 0 días	2-Marzo 0 días	4-Marzo 0 días	2-Marzo 0 días
1ª Fertilización	1-Marzo 0 días	5-Marzo 0 días	2-Marzo 0 días	2-Marzo 0 días	4-Marzo 0 días	2-Marzo 0 días
Resiembra	21-Marzo 20 días	27-Marzo 22 días	27-Marzo 25 días	22-Marzo 20 días	24-Marzo 20 días	25-Marzo 23 días
2ª Fertilización	24-Mayo 84 días	26-Mayo 82 días	22-Junio 112 días	21-Junio 111 días	15-Junio 103 días	10-Junio 100 días
Labor de cultivo	24-Mayo 84 días	26-Mayo 82 días	22-Junio 112 días	21-Junio 111 días	15-Junio 103 días	10-Junio 100 días
Cosecha	7 Diciembre 281 días	25-Noviembre 265 días	8-Diciembre 281 días	25-Noviembre 268 días	1-Diciembre 272 días	30-Noviembre 273 días

El rendimiento de grano al 14% de humedad se estimó por hectárea dispersa, es decir, si el maíz en el sistema MIAF ocupa el 30 por ciento de la superficie, el rendimiento se estaría expresando a una hectárea multiplicándolo por el factor 3.33 (10000 m²/ 3000m²).

Por otra parte, para obtener la ERT se determinó con la fórmula propuesta por Mead y Willey (1980):

$$ERT = \frac{\text{Rendimiento de grano de maíz en surcos alternos en micro-rotación anual}}{\text{Rendimiento de grano de maíz en cultivo simple}}$$

En el análisis de la ERT, el maíz en el arreglo topológico en surcos alternos con micro-rotación anual en el terreno, se comporta como si estuviera sembrado en la mitad de la hectárea, con el propósito de que todas las hojas de la planta de maíz intercepten la mayor cantidad de radiación solar y las raíces exploren un mayor volumen de suelo, de esta manera la planta puede ser más productiva y eficiente comparado con el maíz sembrado como cultivo simple (Albino *et al.*, 2015; Willey, 1990). Por tanto, una $ERT \leq 0.5$ indicaría que el maíz no tendrían ninguna ventaja sobre su cultivo simple, y una $ERT > 0.5$ indicaría una ventaja del maíz sembrado en surcos alternos en micro-rotación anual.

En la evaluación de la respuesta del rendimiento de grano a los factores de estudio en función de la posición de los surcos en la ladera a través de los seis años, como primer paso se realizó el análisis de varianza (ANOVA, $p < 0.05$) combinado correspondiente al diseño experimental usado; para identificar los efectos significativos, lo que daría pauta al segundo paso de análisis de regresión por etapas o stepwise ($sle=0.10$ $sfs=0.05$ y variables auxiliares), utilizando el programa SAS[®] versión 9.0.

En el modelo de regresión, para obtener la respuesta del rendimiento de maíz a los factores de estudio (N, P, K y D) o variables cuantitativas en un periodo de seis años, se integraron variables cualitativas para conocer el efecto de año y la posición del surco del maíz, las cuales se consideran como variables auxiliares o “dummy”, que es un método para representar los diferentes niveles de una variable cualitativa, como lo describen Myers *et al.* (2009).

Así, para conocer el efecto de año, como primer punto, se usaron cinco variables auxiliares que se consideraron en el modelo de regresión (Cuadro 6), siendo el año 2007 el año de referencia ($a_i=0$).

Cuadro 6. Matriz de variables auxiliares codificadas (a1, a2, a3, a4 y a5) para el factor año en el rendimiento de maíz bajo el sistema MIAF.

Año	Variables auxiliares				
	a1	a2	a3	a4	a5
2007	0	0	0	0	0
2008	1	0	0	0	0
2009	0	1	0	0	0
2010	0	0	1	0	0
2011	0	0	0	1	0
2012	0	0	0	0	1

La posición del surco de maíz con respecto a la hilera de los árboles frutales, se definió como la segunda variable cualitativa, con tres variables auxiliares (Cuadro 7), siendo el surco S3 de maíz, la referencia con respecto a los otros tres, debido a que es el área de donación absoluta de sedimentos.

Cuadro 7. Matriz de variables auxiliares codificadas (p1, p2 y p3) para la posición del surco de maíz respecto a la hilera de los árboles frutales bajo el sistema MIAF.

Posición de surco	Variables auxiliares		
	p1	p2	p3
S1	1	0	0
S2	0	1	0
S3	0	0	0
S4	0	0	1

En el análisis de la ecuación general, se pueden derivar 24 sub-ecuaciones, es decir, cada año por posición de surco. No obstante, sólo se consideró describir ocho sub-ecuaciones, cuatro para año 2007 y otras cuatro para el 2012, con la finalidad de indicar el rendimiento de maíz de cada posición del surco en el año de inicio y el último año de estudio, para identificar si el efecto de la roturación y movimiento del suelo afecta significativamente el rendimiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de precipitación y temperatura promedios de la estación Tlahuitoltepec, Oax., México (Cuadro 8), indicaron que la precipitación fue mayor que el promedio de 1375 mm en los años 2008 y 2010, y ligeramente menor en 2006 y 2009, mientras que en el año 2007 se registró la menor precipitación. Durante los años de estudio, las lluvias se presentaron durante todo el año, no obstante su distribución en los años 2007, 2008, 2009 y 2010 fue como sigue: en el primer cuatrimestre llovió 6.6, 12.5, 6.2 y 9.3%, respectivamente, en el segundo cuatrimestre en general fue el de mayor precipitación con 64.0, 58.3, 50.0 y 45.4%, y en el tercer cuatrimestre la precipitación fue de 29.0, 29.2, 44.0 y 45.3%, respectivamente.

La fecha de inicio del temporal de lluvias da pauta al inicio de las labores de cultivo; para los años 2007 y 2008, fueron en el mes de mayo, y a partir del 2009 al 2012, el establecimiento del temporal fue en la segunda quincena del mes de junio. Para los años 2011 y 2012 no se cuenta con registros de precipitación, pero tuvieron un comportamiento similar al año 2009 en su distribución.

Cuadro 8. Precipitación y temperatura media mensual durante cinco años en la estación Tlahuitoltepec, Oax., México.

Mes	2006		2007		2008		2009		2010	
	¥Pp	£T	¥Pp	£T	¥Pp	£T	¥Pp	£T	¥Pp	£T
	mm	°C	Mm	°C	Mm	°C	mm	°C	mm	°C
Enero	48.4	14.7	10.6	14.5	106.5	14.9	16.4	13.9	24.1	13.4
Febrero	10.7	16.0	9.0	18.2	6.3	18.2	40.6	15.5	36.9	16.1
Marzo	13.6	16.8	13.0	16.5	6.7	17.4	6.5	15.3	0	18.4
Abril	0	19.0	28.2	20.1	75.5	18.6	9.1	19.5	103.9	19.3
Mayo	59.6	18.8	59.3	19.2	255.6	19.7	96.1	18.8	10.0	18.1
Junio	136.7	17.5	73.5	19.0	255.6	17.3	183.5	18.4	145.1	19.6
Julio	235.4	17.2	292.0	-	292	-	115	17.4	324.4	17.7
Agosto	114.6	17.5	171.0	-	104.5	-	186.9	16.9	325.4	16.7
Septiembre	186.8	17.8	125.0	-	309.2	-	228.3	18.8	672.5	17.8
Octubre	58.1	17.5	121.6	-	123.0	-	151.4	17.3	125.2	16.8
Noviembre	116.2	16.0	16.0	-	18.1	-	102.2	15.0	4.4	-
Diciembre	367.0	14.4	8.5	-	4.3	-	34.7	15.1	-	-
Total	1347.1		927.7		1557.3		1170.7		1771.9	

¥Pp= precipitación; £T= temperatura media

Rendimiento de grano de maíz

El ANOVA combinado para el rendimiento (Cuadro 9) indicó diferencias altamente significativas debido a los efectos de año (A), posición del surco (PG), tratamientos (PCh) y de las interacciones A x PG y A x PCh.

Cuadro 9. Significancia de cuadrados medios del análisis de varianza combinado para el rendimiento de maíz en función de año, parcela grande y parcela chica.

Fuente de variación	gl	Cuadrados medios
Año (A)	5	426.2***
Parcela grande (PG)	3	86.5***
A x PG	15	16.3***
Parcela chica (PCh)	25	32.4***
A x PCh	125	3.6**
PG x PCh	74	2.0
A x PG x PCh	375	1.6
Error	616	2.3
Total	1239	

,* Significativo a $P > 0.01$ o 0.001 , respectivamente

A través del análisis de regresión para seis años se generó la ecuación general del rendimiento de grano estimado (\hat{Y}_g). El rendimiento de grano de maíz ($t\ ha^{-1}$ dispersa), dependió de los efectos principales de N, P, D y de las interacciones N x D, y P x D; y de los efectos cuadráticos de N y P (N^2 y P^2); de los efectos principales de las variables auxiliares a y p , de las interacciones de estas variables auxiliares con los efectos de P y D, de las interacciones N x D y N x P, y los efectos cuadráticos de D y K (D^2 y K^2), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\hat{Y}_g (t\ ha^{-1}) = 5.55571 + 0.1089 N + 0.28314 P + 0.58464 D - 0.12986 N^2 - 0.06748 P^2 + 0.05778 ND + 0.05758 PD + 1.22059 a_1 - 0.94170 a_2 - 1.99516 a_3 - 0.46667 a_4 - 1.76991 a_5 + 1.02323 p_1 + 0.89495 p_2 + 0.40667 p_3 + 0.22968 a_1D - 0.08304 a_2D^2 - 0.18216 a_3D + 0.31078 a_4P - 0.13316 a_4D^2 - 0.14480 p_1P + 0.17989 p_1D + 0.27216 a_4p_1K^2 + 0.21801 a_4p_1ND - 0.19518 a_5p_2NP$$

Con una $R^2 = 0.6813$, lo cual indica que el 68.13 % de la variabilidad del rendimiento de grano de maíz es explicada por las variables del modelo.

Dónde: N, P, K y D fueron las variables que codificaron al N, P_2O_5 , K_2O y Densidad de población, respectivamente; a_i y p_i codificaron a las variables auxiliares año y posición de surco, respectivamente.

De acuerdo a la ecuación general de rendimiento de grano, en el análisis sólo se consideraron los años 2007 y 2012, cada uno por posición de surco resultando ocho sub-ecuaciones. De esta manera, para cada sub-ecuación se mantienen los coeficientes y variables cuantitativas de los efectos principales de N, P, D; de las interacciones N x D, y P x D; y de los efectos cuadráticos de N y P (N^2 y P^2) como se indica a continuación:

$$\hat{Y} = 5.55571 + 0.1089 N + 0.28314 P + 0.58464 D - 0.12986 N^2 - 0.06748 P^2 + 0.05778 ND + 0.05758 PD$$

A la anterior ecuación, se suman los efectos principales de las variables auxiliares con la ordenada al origen según año y posición del surco. En seguida, se integran las interacciones de las variables cuantitativas con las cualitativas, cuando las variables auxiliares corresponden

$a_i=0$ y $p_1=1$, $p_2=1$, $p_i=0$ y $p_3=1$ que son las primeras cuatro sub-ecuaciones; y cuando $a_5=1$ y $p_1=1$, $p_2=1$, $p_i=0$ y $p_3=1$ a las otras cuatro (Cuadro 10). Dado a lo anterior, la presentación de las ocho sub-ecuaciones que corresponden al año de inicio (2007) y al último año de estudio (2012).

Además se graficó la interacción P x D de estos dos años, para su descripción y análisis debido a las respuestas altamente significativas que tuvo el cultivo de maíz al factor P (en los dos años de estudio) asociados a las condiciones edáficas que caracteriza a esta región, en cuanto a la disponibilidad de fósforo.

Cuadro 10. Sub-ecuaciones de regresión del rendimiento de grano de maíz (\hat{Y} en t ha⁻¹ dispersa) por posición de surco en la ladera a N, P, K y D en los años 2007 y 2012.

Posición de surco y año	Sub-ecuaciones
$\hat{Y}_{S1\ 07} =$	$6.57894 + 0.1089 N + 0.28314 P + 0.58464 D - 0.12986 N^2 - 0.06748 P^2 + 0.05778 ND + 0.05758 PD - 0.14480 p1P + 0.17989 p1D$
$\hat{Y}_{S2\ 07} =$	$6.45066 + 0.1089 N + 0.28314 P + 0.58464 D - 0.12986 N^2 - 0.06748 P^2 + 0.05778 ND + 0.05758 PD$
$\hat{Y}_{S3\ 07} =$	$5.55571 + 0.1089 N + 0.28314 P + 0.58464 D - 0.12986 N^2 - 0.06748 P^2 + 0.05778 ND + 0.05758 PD$
$\hat{Y}_{S4\ 07} =$	$5.96238 + 0.1089 N + 0.28314 P + 0.58464 D - 0.12986 N^2 - 0.06748 P^2 + 0.05778 ND + 0.05758 PD$
$\hat{Y}_{S1\ 12} =$	$4.80903 + 0.10887 N + 0.24705 P + 0.58588 D - 0.12978 N^2 - 0.06776 P^2 + 0.05606 ND + 0.05489 PD - 0.14480 p1P + 0.17989 p1D$
$\hat{Y}_{S2\ 12} =$	$4.68075 + 0.10887 N + 0.24705 P + 0.58588 D - 0.12978 N^2 - 0.06776 P^2 + 0.05606 ND + 0.05489 PD - 0.19518 a_5p_2NP$
$\hat{Y}_{S3\ 12} =$	$3.7858 + 0.10887 N + 0.24705 P + 0.58588 D - 0.12978 N^2 - 0.06776 P^2 + 0.05606 ND + 0.05489 PD$
$\hat{Y}_{S4\ 12} =$	$4.19247 + 0.10887 N + 0.24705 P + 0.58588 D - 0.12978 N^2 - 0.06776 P^2 + 0.05606 ND + 0.05489 PD$

En el año 2007, el efecto de la interacción P x D indicó que con 40 mil plantas ha⁻¹, el rendimiento se incrementó en los surcos S1, S2, y S4 respecto a S3 al aumentar la dosis de P₂O₅ hasta 90 kg ha⁻¹. El incremento fue de 0.32 t ha⁻¹ dispersa para S1 y de 0.61 t ha⁻¹ dispersa en los surcos S2 y S4. A dosis superiores, el rendimiento prácticamente se mantuvo constante, con excepción en S1, en el cual hubo un decremento de 0.22 t ha⁻¹ dispersa (Figura 2 A, B, C y D).

La misma tendencia se observó con 60 mil plantas ha⁻¹ a los tres niveles de P para los cuatro surcos; sin embargo, con 80 mil plantas ha⁻¹ al aumentar de 30 a 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹ el rendimiento se incrementó en 0.78 t ha⁻¹ dispersa en S1 y en 1.07 t ha⁻¹ dispersa en el resto de los surcos, y al aumentar la dosis P₂O₅ a 150 kg ha⁻¹ fue de sólo 0.24 t ha⁻¹ para S1 y 0.53 t ha⁻¹ para los otros tres surcos (Figura 2 A, B, C y D).

Cabe señalar que el surco S1 en el año 2007 tuvo la primera aplicación de estiércol de pollo una dosis de 2 t ha⁻¹. En estas condiciones, con los niveles altos de P y D su rendimiento fue el más alto de 8.35 t ha⁻¹ dispersa, el cual fue mayor al de S2, S3 y S4 en 0.89, 1.09 y 0.41 t ha⁻¹, respectivamente.

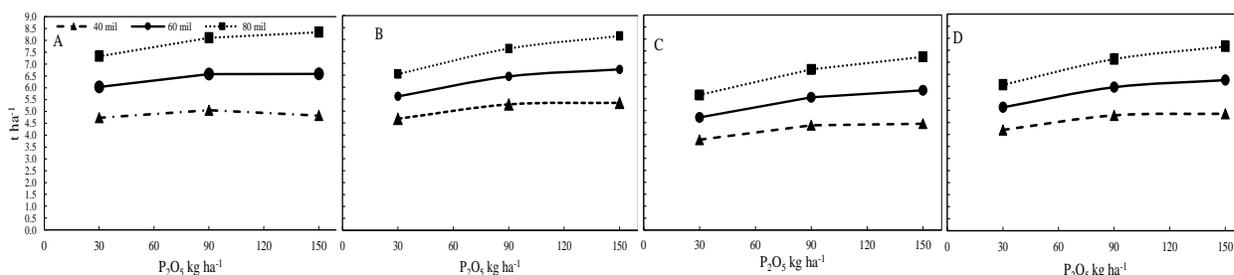


Figura 2. Efecto de la interacción P x D en el rendimiento de grano de maíz en función de la posición del surco en el sistema MIAF en una ladera en el año 2007, con tres densidades de población y tres niveles de fósforo. Zona receptora: A) surco aguas arriba alejado (S1) y B) surco aguas arriba próximo (S2) a la hilera de los árboles de durazno, respectivamente. Zona donante: C) surco aguas abajo próximo (S3) y D) surco aguas abajo alejado (S4) de la hilera de árboles de durazno, respectivamente. El S1 tuvo una dosis de 2 t ha⁻¹ de estiércol de pollo.

El año 2007 fue el inicio del establecimiento del sistema MIAF, donde se esperaba que el rendimiento de maíz para los cuatro surcos no presentara diferencias significativas entre ellos, ya que el movimiento del suelo en la ladera se iniciaría con la formación de la terraza de muro vivo. Sin embargo, las posiciones de S1 y S2 tienen el beneficio de los escurrimientos e infiltración de los surcos aguas arriba de la ladera, por estar en la zona receptora del módulo (Camas, 2011). Además, el surco S1 tiene el beneficio de la aplicación del estiércol, como complemento a los requerimientos nutrimentales del maíz con fertilizantes minerales con el fin de incrementar el rendimiento y el efecto benéfico en las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo, como lo menciona Del Pino *et al.* (2008) y Huang *et al.* (2010), y el surco S2 tiene el efecto de los escurrimientos de S1.

Por otra parte, el surco S3 aguas arriba tuvo una anchura vertical sin roturar de 4.2 m, franja que le correspondió al establecimiento de los árboles de durazno, lo que posiblemente disminuyó la infiltración y escurrimientos que lo beneficiarían; y el surco S4 aun estando en la zona donante, estuvo sujeto a los escurrimientos del surco S3.

Al paso de seis años, el movimiento del suelo causó cambios de profundidad en las franjas dedicadas al maíz y la leguminosa, por efecto de la labranza reducida y los escurrimientos superficiales, modificando la pendiente inicial de 29.8 a 20.4%, como lo reportó Salinas (2015). De esta forma, en el año 2012 la tendencia del efecto de la interacción P x D, en función de los cambios de D a los diferentes niveles de P en los surcos S1, S2, S3 y S4 (Figura 3 A, B, C y D) fue similar a lo observado en 2007; es decir, cuando la dosis de P_2O_5 aumentó de 30 a 90 $kg\ ha^{-1}$ a diferentes niveles de D, el incremento del rendimiento fue mayor que cuando la dosis cambió de 90 a 150 $kg\ de\ P_2O_5\ ha^{-1}$. Por ejemplo, a una densidad de 80 mil plantas ha^{-1} , al aumentar la dosis a 90 $kg\ P_2O_5\ ha^{-1}$, los surcos S1, S2 y S4 tuvieron 21.8, 15.3 y 7.6%, respectivamente, más rendimiento de grano que con respecto a S3, que rindió 4.96 $t\ ha^{-1}$ dispersa; y cuando la dosis cambió de 90 a 150 $kg\ de\ P_2O_5\ ha^{-1}$, los surcos S1, S2 y S4 fueron más rendidores en 16.6, 14.0 y 6.9%, respectivamente, con respecto a S3 con un rendimiento de 5.48 $t\ ha^{-1}$ dispersa (Figura 3 A, B, C y D).

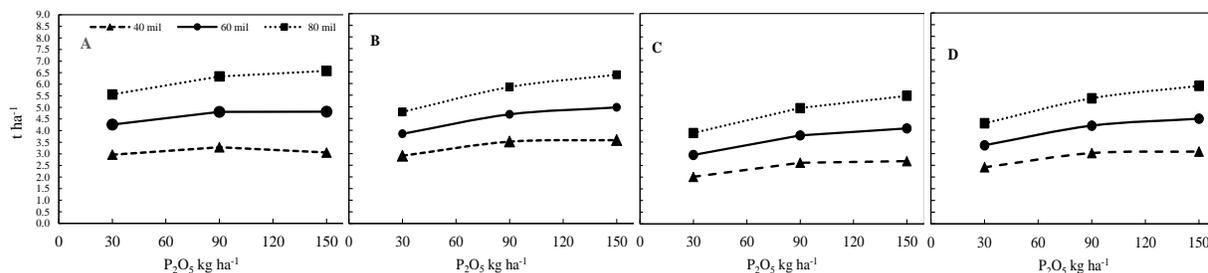


Figura 3. Efecto de la interacción P x D en el rendimiento de grano de maíz en función de la posición del surco en el sistema MIAF en una ladera en el año 2012, con tres densidades de población y tres niveles de fósforo. Zona receptora: A) surco aguas arriba alejado (S1) y B) surco aguas arriba próximo (S2) a la hilera de los árboles de durazno, respectivamente. Zona donante: C) surco aguas abajo próximo (S3) y D) surco aguas abajo alejado (S4) de la hilera de árboles de durazno, respectivamente. El S1 tuvo una dosis de 2 t ha⁻¹ de estiércol de pollo.

El rendimiento de grano al año seis en función de la posición de los surcos y del efecto de la interacción P x D, indicó que la respuesta fuerte a fósforo está en el intervalo de 30 a 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹. En este intervalo, es frecuente observar que cada unidad de P agregada es usada eficientemente a diferentes niveles de D.

Por ejemplo, en el año 2007 el surco S1 con 80 mil plantas ha⁻¹ tuvo un incremento en el rendimiento del 9.6% al incrementar la dosis de 30 a 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹, mientras que al aumentar la dosis de P₂O₅ a 150 kg ha⁻¹ el aumento fue de 2.8%. Al sexto año el incremento fue de 12.3% al incrementar la dosis a 90 kg de P₂O₅ y de 3.6% cuando pasó a 150 kg de P₂O₅, con la aplicación de estiércol. En el surco S2 en los años 2007 y 2012, con el nivel alto de D, el rendimiento tuvo un incremento del 14.0 y 18.2%, respectivamente, al pasar de 30 a 90 kg de P₂O₅ y cuando la dosis de P₂O₅ cambió de 90 a 150 kg ha⁻¹ los rendimientos fueron decrecientes en 6.5 y 8.3%, respectivamente.

En cambio para la zona donante, al nivel alto de D, el surco S3 en el año 2007 tuvo un incremento en el rendimiento de 15.9% al cambio en la dosis de 30 a 90 kg de P₂O₅ y de 7.3% al pasar al nivel alto de P₂O₅, mientras que para el año 2012 los aumentos fueron de 21.5 y de 9.6%, respectivamente, a las dosis de 90 kg y 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹.

En el último surco S4 en los años 2007 y 2012, al nivel alto de D se tuvo incrementos en el rendimiento de 15.0 y 19.9%, respectivamente, al aumentar la dosis a 90 kg de P₂O₅ y del 6.9 y 8.9%, respectivamente, cuando la dosis de P₂O₅ aumenta hasta 150 kg ha⁻¹.

Por lo tanto, estos resultados indican que una aplicación de 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹ independientemente de la posición del surco, incrementa de manera significativa el rendimiento de grano de maíz en un suelo con reacción fuertemente ácida, lo cual está de acuerdo con lo reportado por Serna *et al.*, (2011). Sin embargo, la diferencia de rendimientos estuvo sujeta por otros factores tales como el reacomodo del suelo de la zona donante a la receptora, la aportación de nutrimentos y materia orgánica del estiércol, como lo ha reportado Huang *et al.* (2010) en un suelo ultisol; y la distribución de la precipitación en fases críticas de la planta.

A lo anterior, el tratamiento adicional llamado “Potencial” bajo el arreglo de surcos alternos en micro-rotación anual con la dosis central del diseño de tratamientos más una dosis de 10 t ha⁻¹ de estiércol de pollo, en el año 2007 con una buena precipitación el rendimiento promedio de los cuatro surcos de este tratamiento fue de 10.5 t ha⁻¹, mientras que para el año 2012 con precipitación limitada, fue de 7.1 t ha⁻¹. En ambos años la diferencia fue la aplicación del estiércol de pollo que además del aporte adicional de nutrimentos, mejora la calidad física, química y microbiológica del suelo (Del Pino *et al.*, 2008).

Eficiencia relativa de la tierra (ERT)

La ERT del maíz en el año 2007, en los surcos S1 y S2 fueron mayores de 0.5 en los tres niveles de P con 60 y 80 mil plantas ha⁻¹ (Figura 4 A y B). No obstante, en el surco S3, solo fue mayor a 0.5 cuando P se incrementó de 90 a 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹ con 60 mil plantas ha⁻¹ y en los tres niveles de P y alto de D (Figura 4 C). En el surco S4, con las dosis de P₂O₅ de 90 y 150 kg con 60 mil plantas ha⁻¹, y con el nivel alto de D en los tres niveles de P también fue mayor de 0.5 (Figura 4 D).

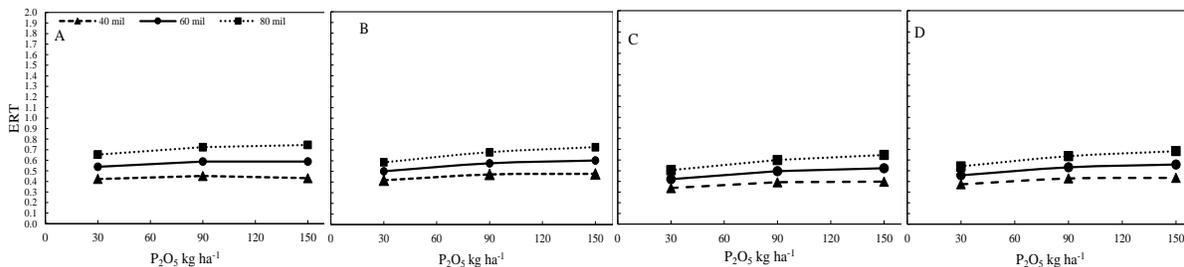


Figura 4. Efecto de la interacción P x D en la eficiencia relativa de la tierra (ERT) del maíz en función de la posición del surco en el sistema MIAF en una ladera en el año 2007, con tres densidades de población y tres niveles de fósforo. Zona receptora: A) surco aguas arriba alejado (S1) y B) surco aguas arriba próximo (S2) a la hilera de los árboles de durazno, respectivamente. Zona donante: C) surco aguas abajo próximo (S3) y D) surco aguas abajo alejado (S4) de la hilera de árboles de durazno, respectivamente. El rendimiento del cultivo simple fue de 5.6 t ha⁻¹.

La distribución y cantidad de la precipitación en el año 2007 y la aportación de los nutrientes no fueron factores restrictivos en el rendimiento de maíz bajo el sistema MIAF (para los arreglos surcos alternos con micro-rotación anual) y en cultivo simple. El rendimiento mayor en el sistema MIAF fue el uso más eficiente de la luz solar por la planta de maíz con proceso fotosintético C4 (Willey, 1990). Con 80 mil plantas ha⁻¹ a las dosis de P_2O_5 de 30, 90 y 150 kg ha⁻¹, la ERT fue de 0.65, 0.72 y 0.75 en el surco S1, 0.59, 0.68 y 0.73 para el surco S2 y 0.54, 0.64 y 0.68 para el surco S4, mientras para el surco S3 al nivel alto de D y a los tres niveles de P, los valores de ERT fueron de 0.51, 0.60 y 0.65.

En el año 2012, el factor limitante fue la distribución de la precipitación y la temperatura durante las etapas V5 a la V8 del maíz, retrasando la segunda fertilización nitrogenada por 16 días con respecto al año 2007. La planta físicamente manifestó agobio hídrico con hojas erectas y enrolladas en ambos sistemas de producción. En estas condiciones, el maíz se ve afectado seriamente en las etapas V5 y V8 con una disminución en el rendimiento (Giménez, 2012; Reta y Faz, 1999). No obstante, la ERT del maíz en los surcos S1, S2 y S4 fueron mayores de 0.5 en los tres niveles de P y D (Figura 5 A, B y D), mientras en S3 a excepción del nivel bajo de P con 40 mil plantas ha⁻¹, la ERT fue mayor a 0.5 (Figura 5 C).

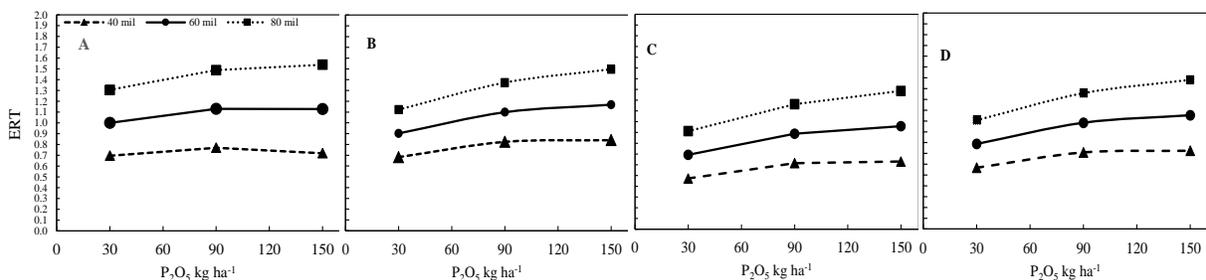


Figura 5. Efecto de la interacción P x D en la eficiencia relativa de la tierra (ERT) del maíz en función de la posición del surco en el sistema MIAF en una ladera en el año 2012, con tres densidades de población y tres niveles de fósforo. Zona receptora: A) surco aguas arriba alejado (S1) y B) surco aguas arriba próximo (S2) a la hilera de los árboles de durazno, respectivamente. Zona donante: C) surco aguas abajo próximo (S3) y D) surco aguas abajo alejado (S4) de la hilera de árboles de durazno, respectivamente. El rendimiento del cultivo simple fue de 2.1 t ha⁻¹.

Esto se debe a que las raíces de la planta del maíz intercalado en surcos alternos exploran un volumen mayor de suelo y dispongan de agua y nutrientes adicionales de estratos inferiores que no exploran las raíces de un cultivo de porte bajo, como el frijol u otra leguminosa anual (Albino *et al.*, 2015; Lv *et al.*, 2014).

Los valores de ERT con las dosis de 30, 90 y 150 kg de P₂O₅ y con 40, 60 y 80 plantas ha⁻¹ para los surcos S1, S2 y S4 que variaron de 0.57 hasta 1.54, indican que el maíz en el sistema fue 7 y 104 por ciento más eficiente con respecto al cultivo simple, y en el surco S3 con excepción del nivel bajo de P con 40 mil plantas ha⁻¹, con una ERT de 0.61 hasta 1.29, tuvo una eficiencia del 11 y 79 por ciento sobre el cultivo simple.

CONCLUSIONES

Los rendimientos de grano de maíz al año de inicio y final de estudio, en una ladera roturada bajo el sistema MIAF, indicaron una respuesta positiva a la dosis de P de 30 a 90 kg de P_2O_5 ha^{-1} dispersa y a la densidad de población de 60 a 80 mil plantas ha^{-1} dispersa en los cuatro surcos de maíz sembrados de manera alterna, independientemente de su posición. En el año de inicio, el rendimiento promedio fue de 7.4 t ha^{-1} dispersa y al sexto año de 5.6 t ha^{-1} dispersa, a la dosis de 90 kg de P_2O_5 y 80 mil plantas ha^{-1} .

La eficiencia relativa de la tierra (ERT) del maíz bajo el arreglo de surcos alternos en micro-rotación anual con una leguminosa en el sistema MIAF, en un año benigno como el 2007, fue de 0.75, 0.73, 0.65 y 0.68 para los surcos S1, S2, S3 y S4, respectivamente, a la dosis de 150 kg de P_2O_5 y 80 mil plantas ha^{-1} ; mientras que en el año 2012, que fue limitativo en cuanto la distribución de la precipitación, la ERT fue mayor a 1.0 para los surcos S1, S2, S3 y S4. El maíz en el sistema MIAF demostró mayor eficiencia respecto al cultivo simple en sus seis años de estudio.

El maíz en el sistema MIAF, en los dos surcos de la zona receptora indicaron mayor rendimiento respecto a los dos surcos de maíz de la zona donante, debido a la acumulación de sedimentos y nutrientes (como se reporta en el capítulo 3). De aquí, la necesidad en los surcos de la zona donante, de incrementar la dosis de fertilización más la aplicación de estiércol, mientras que en la zona receptora se disminuiría la dosis.

LITERATURA CITADA

- Albino, G. R.; Turrent, F. A.; Cortés, F. J. I.; Livera, M. M. y Mendoza, C. M. C. 2015. Distribuciones de raíces y de radiación solar en el dosel del maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*. 49(5): 513-531.
- Aragón, C. F.; Taba, S.; Hernández, C. J. M.; Figueroa, C. J. D.; Serrano, A. V y Castro, G. F. H. 2006. Catálogo de maíces criollos de Oaxaca. INIFAP-SAGARPA. Libro Técnico Núm. 6. Oaxaca, Oaxaca, México. 344 págs.

- Camas, G. 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 Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. México.
- Cortés, F. J. I.; Torres, Z. J. P; Turrent, F. A.; Hernández, R. E.; Ramos, S. A. y Jiménez, S. L. 2012. Manual actualizado para el establecimiento y manejo del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en Laderas. Colegio de Postgraduados, México.
- Cortés, J. I.; Turrent, A.; Díaz, P.; Jiménez, L.; Hernández, E. and Mendoza, R. 2005. Hillside agriculture and food security in Mexico: advances in the sustainable hillside management project. pp. 569-588. *In:* R. Lal, N. Uphoff, B. A. Stewart, and D. O. Hansen. Climate change and global food security. Taylor and Francis. New York, NY, USA.
- Cortés, F. J. I. 2004. Subproyecto III. Tecnologías alternativas sostenibles. Informe. Proyecto Manejo sustentable de Laderas. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Del Pino, A.; Repetto, C; Mori, C. y Perdomo, C. 2008. Patrones de descomposición de estiércoles en el suelo. *Terra Latinoamericana*. 26: 43-52.
- Egodawatta, Ch., Stamp, P. and Sangakkara, R. 2013. Uncovering the footprints of erosion by on-farm maize cultivation in a hilly tropical landscape. *Agriculture* 3: 556-566.
- 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): 253-260.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 5ª ed. México D. F. 98 p.
- Giménez, L. 2012. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia Uruguay*. 16 (2): 92-102.
- Huang, S.; Zhang, W.; Yu, X. and Huang, Q. 2010. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of southern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 138: 44-50.

- Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI). 2010. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Santa María Tlahuitoltepec, Oaxaca.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. Censo Agropecuario 2007. VIII Censo agrícola, Ganadero y Forestal. Entidad Federativa Oaxaca.
- León, M. A. 2001. Evaluación socioeconómica de comunidades indígenas. Informe 2001. Proyecto Manejo Sustentable de Laderas. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Edo. México.
- León, M. A. y Jiménez, S. L. 2001. Diagnóstico socioeconómico de la línea base en la Región Mixe, Oaxaca, México, 2000. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, Edo. México.
- Lv Y., Francis C., Wu P., Chen X. and Zhao X. 2014 Maize-soybean intercropping interactions above and below ground. *Crop Science* 54: 914–922.
- Martínez, M. M. R. 2004. Caracterización geográfica y medición de escurrimientos. Proyecto sustentable de laderas. Sub-proyecto I. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Martínez, G. A. y Martínez, D. M. A. 1996. Diseños de experimentos con fertilizantes. Publicación especial 5. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C y Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 155 págs.
- Mead, R. and R. W. Willey. 1980. The concept of a 'Land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Exp. Agric.* 16: 217-228.
- Myers, R. H.; Montgomery, D. C. and Anderson-Cook, C. M. 2009. Response Surface methodology: Process and product optimization using designed experiments. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Pierce, F. J y Nowak, P. 1999. Aspects of precision agriculture. *Advances in agronomy.* 67: 1-85.
- Pool, N. L.; Trinidad, S. A.; Etchevers, B. J. D.; Pérez, M. J. y Martínez, G. A. 2000. Mejoradores de la fertilidad del suelo en la agricultura de ladera de los altos de Chiapas, México. *Agrociencia* 34(3): 251-259.
- Reta, S. D. G. y Faz, C. R. 1999. Respuesta del maíz a diferentes niveles de humedad en el suelo I. Rendimiento de grano y sus componentes. *Terra Latinoamericana.* 17 (4): 309-316.

- Salinas, S. R. 2015. Caracterización topográfica, física y de fertilidad de un suelo de ladera manejado con el sistema milpa intercalada con árboles frutales durante cinco años. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco. Edo. de México.
- Santiago, M. E.; Cortés, F. J. I.; Turrent, F. A.; Hernández, R. E. y Jaen, C. D. 2008. Calidad del fruto del duraznero en el sistema milpa intercalada con árboles frutales en laderas. *Agricultura Técnica en México* 34 (2): 159-166.
- Serna, L. C.; Trujillo, C. L. A. y Urrea, G. R. 2011. Respuesta del maíz (*Zea mays*) a la aplicación edáfica de N-P-K en un andosol de la región Centro-Occidente de Caldas. *Agronomía* 17(1): 68-76.
- Turrent F. A.; Francisco N. N.; Uribe G. F. y Camacho, C. R. 1998. La terraza de muro vivo, tecnología para la explotación prosostenible de laderas roturadas del Trópico subhúmedo de México. *Agricultura Técnica, México*. 24 (1): 67:81.
- Valdez, Z. J. I.; Badii, M. H.; Guillen, A. y Acuña, Z. M. S. 2015. Causes and Socio-Economic and Environmental Impacts of Erosion. *International Journal of Good Conscience*. 10 (1): 76-87.
- Van Reeuwij, L. P. 1999. Procedimientos para el Análisis de Suelos, versión 1995. Traducido de: Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena, Carlos Arturo Tavares Espinoza y Carlos Alberto Ortiz Solorio. Primera Edición, 1999. Especialidad de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 145 págs.
- 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: 259-266.
- Volke, H. V.; Turrent, F. A. y Castillo, M. A. 2005. Diseños de tratamientos y estimación de funciones de respuesta en la investigación agrícola. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México. 68 págs.
- Willey, R. W. 1990. Resource use intercropping systems. *Agric. Water manage.* 17:215-231.

CAPÍTULO II. OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA PARA N, P, K Y DENSIDAD DE POBLACIÓN (D) POR POSICIÓN DE SURCO EN MAÍZ, Y PARA N, P, K Y ESTIÉRCOL (E) EN ÁRBOLES DE DURAZNO, BAJO EL SISTEMA MIAF EN UNA LADERA.

RESUMEN

El sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en condiciones de ladera ha sido propuesto como una alternativa sustentable para enfrentar la problemática en la que está inmersa la pequeña unidad de producción en el estado de Oaxaca. En Santa María Tlahuitoltepec, Mixe, Oax., se llevó a cabo un trabajo por seis años (2007-2012) con el sistema MIAF, donde se estudió el maíz nativo y el árbol de durazno variedad 'CP 2005' en cultivo intercalado. Los objetivos del presente estudio fueron generar la dosis óptima económica (DOE) por posición del surco de maíz a través de seis años a los factores N, P₂O₅, K₂O y densidad de población (D), y la del árbol de durazno al quinto año de edad a la combinación de los factores N, P₂O₅, K₂O y estiércol de polloniza (E), así como establecer los indicadores de ingreso neto (IN) y la relación beneficio costo (B/C) por especie y como sistema. Se establecieron dos sub-experimentos bajo el sistema MIAF: 1) maíz, fue sembrado con el arreglo topológico de surcos alternos con micro-rotación anual con una leguminosa, y se estudiaron 26 tratamientos generados de un diseño de tratamientos hipercubo doble lotificado con dos repeticiones en un diseño de parcelas divididas, la parcela grande fue la posición del surco con respecto a la hilera del árbol de durazno y la parcela chica los 26 tratamientos; 2) árbol de durazno, fueron plantados en hileras a curvas a nivel y a una densidad de 943 árboles ha⁻¹, y se estudiaron 26 tratamientos generados de un diseño hipercubo doble lotificado con dos repeticiones en un diseño de bloques completos con tratamientos aleatorizados. La DOE para maíz en general para los seis años en el surco S1 fue de 140-125-00 kg de N-P₂O₅-K₂O y 80 mil plantas ha⁻¹ dispersa y para los tres surcos restantes fue 130-150-00 kg de N-P₂O₅-K₂O y 80 mil plantas ha⁻¹ dispersa; la DOE para el árbol de durazno en su quinto año fue 130-20-51 g de N-P₂O₅-K₂O. En los seis años el mayor IN y relación B/C fueron de \$20 960.15 ha⁻¹ dispersa y 1.62 para el surco S2, el menor IN y B/C fue de \$17 163.88 y 1.35 para el surco S3; mientras para el árbol frutal en su quinto año de edad la DOE indicó un IN de \$264 605.71 ha⁻¹ dispersa y la relación B/C de 4.75.

Palabras clave: sistema agroforestal, ingreso neto, cultivos múltiples y región mixe.

INTRODUCCIÓN

En suelos de ladera de la región Mixe Alta del estado de Oaxaca, la pequeñas unidades de producción cultivan la milpa con un rendimiento de 650 kg ha^{-1} de grano de maíz, que no satisface las necesidades alimenticias anuales de la familia (León y Jiménez, 2001). Además año con año, el suelo se va erosionando, lo que lleva a la infertilidad del mismo. Por lo tanto, la pequeña unidad de producción está inmersa en una crisis ecológica, social y económica, que da lugar a la migración y abandono del campo. En este entorno, es urgente incrementar la productividad de la milpa y el ingreso neto de la familia mediante el uso eficiente de los recursos naturales, luz solar, agua y factores de manejo (Turrent *et al.*, 2004). En agrosistemas como los de la región Mixe, Oax., la diversificación de cultivos, como los sistemas agroforestales (Astier *et al.*, 2011), es una estrategia clave para lograrlo.

La dosis óptima económica (DOE) permite al agricultor el uso de cantidades adecuadas de fertilizantes acorde al agrosistema indicado y obtener la máxima ganancia (Rebolledo, 1998; Martínez y Martínez, 1996), mediante modelos de regresión para representar la respuesta del cultivo a las aplicaciones de fertilizantes u otros insumos de la producción (Volke, 1981).

La productividad de un sistema, puede ser medida por su rendimiento, eficiencia, ingreso neto (IN) y la relación beneficio/costo (B/C). La milpa de la región Mixe aún tiene la cosmovisión de que es sustentable, es decir con la diversidad que le caracteriza, no tiene la necesidad de usar fertilizantes y mejorar el manejo agronómico. Bajo este contexto, Ramos (2007) menciona a la relación beneficio costo (B/C) como un comparativo del sistema milpa en dos situaciones: 1) sin el uso de agroquímicos con una relación B/C de 1.88, y 2) con el uso de fertilizantes una relación B/C de 1.82 en suelos que aún mantienen una alta fertilidad o son de reciente roza-tumba. No obstante, después de un par de años, la disminución de la fertilidad del suelo (Vergara *et al.*, 2005; Valdez *et al.*, 2015), el aumento de la acidez y la erosión del suelo son cada vez más evidentes, lo que da lugar a que el sistema milpa en estas unidades de producción, sea insostenible social, ecológica y económicamente.

León (2004) indicó un IN promedio negativo de $\$614.14 \text{ ha}^{-1}$ con el cultivo de maíz. Sin embargo, los productores siguen y seguirán cultivando la milpa debido a que el maíz es el alimento básico y proporciona otras especies, principalmente el frijol, los quelites y el

chilacayote. Sumado a esto, cuando las familias llegan a obtener un excedente en la producción de maíz, se genera un ingreso marginal (Bellow, 2004; León, 2004).

Ante esto, en busca de la mejora de la milpa en el estado de Oaxaca, el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), ha sido propuesto como un sistema agroforestal de cultivo intercalado, constituido por tres especies, el árbol frutal, el maíz y el frijol u otra especie comestible de porte bajo, en intensa interacción agronómica. Este sistema es multiobjetivo: la producción de maíz y frijol como elementos estratégicos para la seguridad alimentaria de las familias rurales, el incremento de manera significativa del ingreso neto familiar, control de la erosión hídrica del suelo y con ello, lograr un uso más eficiente del agua de lluvia y nutrimentos (Cortés *et al.*, 2004; Cortés *et al.*, 2005). Se ha estimado que el sistema MIAF puede generar ingresos netos de alrededor de \$174.4 ha⁻¹ (Cortés *et al.*, 2007; Camas, 2011).

El método de campo (Turrent *et al.*, 2004), permite obtener información *in-situ* sobre la respuesta del rendimiento de cultivos y otras variables agronómicas asociadas a los tratamientos. En sistemas de cultivos múltiples y agroforestales como el MIAF, existe la necesidad de generar información *in-situ* de las ventajas que tienen las interacciones agronómicas y económicas entre los componentes (Francis, 1986). Estos sistemas, disminuyen los riesgos financieros, productivos y ecológicos, mejoran el rendimiento de los cultivos o la calidad, reducen el uso de fertilizantes u otros insumos químicos, se adaptan al cambio climático a través de sistemas de producción más flexibles, reducen la erosión del suelo y aumentan la biodiversidad (Mercer *et al.*, 2014). Lo anterior, entra en el contexto de que un sistema agroforestal requiere de 3 a 6 años para obtener los beneficios (Franzel y Scherr, 2002), de aquí la necesidad de estudiarlos de mediano a largo plazo.

Los objetivos de la presente investigación fueron determinar la dosis óptima económica (DOE) de los factores N, P, K y densidad de población (D) para el maíz en función de la posición del surco al sexto año del establecimiento del sistema MIAF; y de N, P, K y estiércol de pollo (E) para el árbol de durazno al quinto año de su establecimiento, así como determinar los indicadores de ingreso neto (IN) y la relación beneficio costo (B/C) por especie y como sistema MIAF.

La hipótesis fue: el efecto de la interacción agronómica de las especies maíz nativo y árbol de durazno mejorado en una ladera bajo el sistema MIAF, es una alternativa sostenible para rescatar de las crisis económica, ecológica y social a la pequeña unidad de producción,

mediante la optimización de las dosis de N, P, K y densidad de población para el maíz por posición del surco, y de N, P, K y estiércol para el árbol de durazno, a los seis años del establecimiento del sistema.

La prueba de esta hipótesis se hizo bajo el supuesto de que con el maíz de raza Olotón y el árbol de durazno mejorado sembrados en el sistema MIAF en una ladera erosionada, de baja fertilidad y con pH ácido, es posible sacar de la crisis a la PUP con la recomendación específica de fertilización para las especies en el sistema MIAF en este agrosistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el periodo 2007 al 2012 se condujo un experimento con el sistema MIAF en la localidad de Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax. El sitio experimental con un suelo Acrisol se localiza a 17°5'18.45" N, 96°2'53.56"O y a una altitud de 2,300 m (INEGI, 2010). El suelo después de los 0.20 m de profundidad, se caracteriza por poseer un pH fuertemente ácido, muy bajo en materia orgánica y trazas en fósforo y potasio (Ver Capítulo 1). El clima es templado subhúmedo (Cw) (García, 2004), con lluvias abundantes en verano (73.43%), con una precipitación promedio anual de 1 375 mm. La temperatura media anual es de 15.2 °C, siendo los meses más fríos noviembre (6.7°C), diciembre (6.1°C), enero (4.9°C) y febrero (5.9°C) (INEGI, 2010).

El experimento MIAF se estableció en un ladera con una pendiente inicial de 29.8%. Las especies componentes fueron el maíz nativo de la raza Olotón (Aragón *et al.*, 2006) de ciclo largo (9 meses), adaptada a suelos ácidos como lo reportan Pool *et al.*, (2000). Los árboles de durazno criollo injertados con la variedad 'CP 2005', fueron seleccionados en el mismo agrosistema, bajo el supuesto de que están adaptados a las condiciones de acidez del suelo como el maíz Olotón. Mientras que el componente leguminosa, que se estableció al mismo tiempo que el maíz, sólo fue de exploración como acompañante en el arreglo topológico de surcos alternos con micro-rotación anual.

El maíz establecido en el sistema MIAF en surcos alternos con micro-rotación anual con una leguminosa, estuvo establecido en cuatro surcos de los ocho que están asignados por módulo MIAF (Figura 1). Los primeros dos surcos, asignados como S1 y S2 se encuentran aguas arriba en zona receptora de sedimentos; y los otros dos surcos, S3 y S4 aguas abajo en la zona donante de sedimentos, con respecto a la hilera de los árboles de durazno.

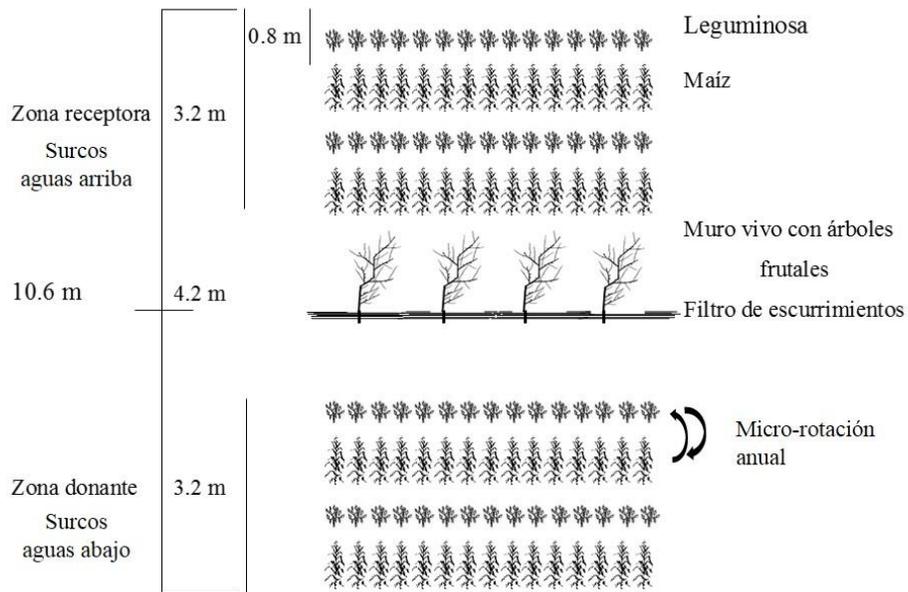


Figura 1. Módulo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en condiciones de ladera.

El experimento de maíz se manejó por un periodo de seis años incluyendo 26 tratamientos de un hipercubo doble lotificado para cuatro factores con cinco niveles cada uno (Martínez y Martínez, 1996; Volke *et al.*, 2005) (Cuadro 1), mismos que se establecieron cada año en un diseño experimental de parcelas divididas, con dos repeticiones. La parcela grande fue la posición del surco con respecto a la hilera de los árboles frutales y la parcela chica son los 26 tratamientos. Además se estableció año con año el tratamiento de cultivo simple con el tratamiento central del diseño de tratamientos.

Se estudiaron los factores nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y densidad de población (D). Para N, los niveles fueron 40, 80, 120, 160 y 200 kg ha⁻¹ dispersa; para P, 30, 60, 90, 120 y 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹ dispersa; para K, 0, 20, 40, 60 y 80 kg de K₂O ha⁻¹ dispersa; y para D, 40, 50, 60, 70 y 80 mil plantas ha⁻¹ dispersa. Como quinto factor de estudio se incluyó el año considerando seis años de información.

La siembra se hizo manual con coa en los primeros días de marzo bajo condiciones de humedad residual y por golpe se depositaron dos semillas en el suelo ya fertilizado en banda y en el fondo del surco, aplicando una tercera parte del N y todo el P y K. Las dos terceras partes restantes del N se aplicaron al inicio de las lluvias del temporal (mayo-junio); además, en el

surco S1 se aplicó estiércol de pollo al fondo a una dosis de 2 t ha^{-1} , e inmediatamente se hizo el paso del arado de doble vertedera para el aporque y el deshierbe, como única labor de cultivo.

El maíz se cosechó en los seis años entre 265 y 281 días después de la siembra. En la parcela útil de los cuatro surcos (S1, S2, S3 y S4) del módulo MIAF, constituida por los 3.0 m centrales de cada surco; se registró el número de plantas, número de mazorcas, peso de mazorcas y rastrojo, así como el contenido de humedad del grano, el cual se determinó con un medidor portátil John Deer (SW 16060[®], I11. EEUU). El rendimiento de grano al 14% de humedad se estimó por hectárea dispersa; sin embargo, el rendimiento de grano de maíz en el sistema MIAF es a la proporción del 30 por ciento de la superficie, debido a que la leguminosa ocupa otro 30 por ciento, y los árboles de durazno el 40 por ciento restante (Cortés *et al.*, 2012).

En el experimento árbol frutal, la especie fue durazno con la variedad ‘CP 2005’ del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. El diseño de tratamientos fue un hipercubo doble lotificado con 26 tratamientos, mismos que se establecieron cada año en un diseño experimental de bloques con tratamientos aleatorizados y dos repeticiones.

Se evaluó la respuesta de los factores N, P, K y estiércol de pollo (E). Para N, los niveles de estudio al año de inicio fueron 17, 24, 31, 38 y 45 g árbol^{-1} ; para P, 5, 10, 15, 20 y $25 \text{ g de P}_2\text{O}_5 \text{ árbol}^{-1}$; para K, 17, 24, 31, 38 y $45 \text{ g de K}_2\text{O árbol}^{-1}$; y para E, 0, 0.5, 1.0, 1.5 y $2.0 \text{ kg árbol}^{-1}$. Al segundo año se duplicaron los niveles de cada factor, al tercer se triplicó y a partir del cuarto año en adelante se mantuvieron constantes las dosis aplicadas del tercer año (Cuadro 1). La parcela experimental fue de cuatro árboles y como parcela útil se consideran los dos árboles centrales.

Los árboles injertados con la variedad CP 2005, se manejaron en un vivero local en Santa María Tlahuitoltepec, Oax. Esta variedad es precoz (105 días de floración a fruto maduro), requiere de 150 unidades frío, fruto chapeado en un 40 a 70%, redondo, velloso corto y época de cosecha marzo-abril (Espíndola *et al.*, 2009).

Los árboles de durazno en hileras a curva a nivel, fueron trasplantados y fertilizados el 14 de junio de 2007 con una densidad de $943 \text{ árboles ha}^{-1}$, con una distancia entre árboles en la hilera de 1.0 m y entre hileras de 10.6 m. Año con año se realizó la primera fertilización al inicio de las lluvias (mes de junio) aplicando un tercio del nitrógeno junto con todo el fósforo, potasio y estiércol según tratamientos. La segunda fertilización se aplicó con las dos terceras partes restantes del nitrógeno a inicios del mes de agosto.

Cuadro 1. Lista de los 26 tratamientos lotificados en los sub-experimentos maíz y árbol de durazno en el año 2012 bajo el sistema MIAF en ladera.

Lote	Tratamiento	Maíz				Durazno			
		N	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	K ₂ O	D (plantas ha ⁻¹)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Estiércol (kg árbol ⁻¹)
I	1	40	30	0	40000	51	15	51	0.0
	2	40	30	80	80000	51	15	135	6.0
	7	200	150	0	40000	135	75	51	0.0
	8	200	150	80	80000	135	75	135	6.0
	9	80	60	20	70000	72	30	72	4.5
	10	80	60	60	50000	72	30	114	1.5
	15	160	120	20	70000	114	60	72	4.5
	16	160	120	60	50000	114	60	114	1.5
II	3	40	150	0	80000	51	75	51	6.0
	4	40	150	80	40000	51	75	135	0.0
	5	200	30	0	80000	135	15	51	6.0
	6	200	30	80	40000	135	15	135	0.0
	11	80	120	20	50000	72	60	72	1.5
	12	160	60	20	50000	114	30	72	1.5
	13	80	120	60	70000	72	60	114	4.5
	14	160	60	60	70000	114	30	114	4.5
II	17	40	90	40	60000	51	45	93	3.0
	18	200	90	40	60000	135	45	93	3.0
	19	120	30	40	60000	93	15	93	3.0
	20	120	150	40	60000	93	75	93	3.0
	21	120	90	0	60000	93	45	51	3.0
	22	120	90	80	60000	93	45	135	3.0
	23	120	90	40	40000	93	45	93	0.0
	24	120	90	40	80000	93	45	93	6.0
	25	120	90	40	60000	93	45	93	3.0
	26	120	90	40	60000	93	45	93	3.0

Los tres primeros años de edad del árbol de durazno, son específicamente para el crecimiento vegetativo y dar formación de la estructura a través de la poda. Tal formación fue Tatura modificado, la cual consiste en que cada árbol tiene una sola rama principal con crecimiento perpendicular a la pendiente, inclinada con un ángulo de 15° con respecto al tronco del porta-injerto de manera alterna; es decir, si el primer árbol en la hilera la rama queda orientada aguas arriba, la siguiente debe quedar orientada aguas abajo, y así sucesivamente. De esta manera, cada árbol tiene un espacio de 2.0 m para ramificar lateralmente, y cada par de árboles forman la “Y” que caracteriza al sistema Tatura.

En el año 2010, tercer año de edad del árbol, se consideró año de ensaye de producción de fruto, mismo que no fue uniforme debido a que la variedad se encontraba en proceso de adaptación en un agrosistema diferente al de su liberación. La producción de fruto de 1.8 t ha⁻¹ MIAF, fue tomado en cuenta sólo para el análisis de IN y la relación B/C del sistema MIAF. El tratamiento de fertilización fue 93-45-93 g de N-P₂O₅-K₂O y 3 kg de pollinaza árbol⁻¹, respectivamente, que correspondió al punto central del diseño de tratamientos.

En el año 2011, se esperaba la primera producción, sin embargo, una helada atípica a inicios del mes de enero, eliminó la cosecha. Para el siguiente año, se cosecharon los frutos en su totalidad de cada parcela útil. El rendimiento de durazno se estimó por hectárea dispersa, es decir, el rendimiento observado en la superficie que ocupan los árboles frutales (40 por ciento en el sistema MIAF), se multiplicó por el factor de 2.5.

Con los modelos de regresión para maíz (\hat{Y}_g) y fruto de durazno (\hat{Y}_d), se obtuvieron las dosis óptima económica (DOE), de los factores en estudio, con base a las siguientes funciones de ingreso neto (IN) y relación (B/C):

$$IN = IT - (CF + CV) \quad \text{y} \quad B/C = IN / (CF + CV)$$

Donde:

$$\text{Ingreso Total} = IT = Y * PY$$

$$\text{Costos Fijos} = CF$$

$$\text{Costos Variables} = CV = \sum X_j P_{xj}$$

$$Y = \text{rendimiento total} \quad PY = \text{precio por tonelada}$$

$$X_j = \text{cantidad de insumo} \quad P_{xj} = \text{precio del insumo}$$

Para el maíz, la evaluación de la respuesta del rendimiento de grano fue en función de la posición de los surcos a través de los seis años a los factores y niveles de estudio. En el caso del fruto de durazno, la estimación del rendimiento fue para el año 2012. La lista de los precios utilizados fue del año en curso y se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Precios del año 2016 considerados en el cálculo de la dosis óptima económica para maíz y durazno.

Cultivo	Concepto	Precio (\$)
Maíz		
Costos fijos	Dos barbechos, surcado, siembra-1ª fertilización, 2ª fertilización y cosecha. Para surcos 2, 3 y 4.	7 500 ha ⁻¹
	Más estiércol de pollinaza solo para el surco 1	9500 ha ⁻¹
Costos variables	Nitrógeno	6.8 kg ⁻¹
	Fósforo	9.6 kg ⁻¹
	Potasio	8.5 kg ⁻¹
	Flete por tonelada de maíz cosechado	300 t ⁻¹
	Costo por mil plantas de maíz	4.0
Precios de venta	Precio de grano de maíz	4 500 t ⁻¹
Durazno		
Costos fijos	Podado invierno, raleo fruto, cosecha, aspersiones, poda verano, fertilización, fungicidas e insecticidas, deshierbe manual.	49 507.5 ha ⁻¹
	Nitrógeno	6.8 kg ⁻¹
Costos variables	Fósforo	9.6 kg ⁻¹
	Potasio	8.5 kg ⁻¹
	Flete por tonelada de durazno cosechado	300 t ⁻¹
	Costo de estiércol puesto en parcela	1 kg ⁻¹
Precios de venta	Precio de venta de fruta en la región	20 000 t ⁻¹

Fuente: SNIIM, 2016. Información de los productores de Santa María Tlahuitoltepec, Oax.

Utilizando el programa SAS[®] versión 9.0, en maíz se ajustó el modelo de regresión por etapas o stepwise (sle=0.10 sls=0.05 y variables auxiliares) para la variable dependiente rendimiento de grano (\hat{Y}_g). Se asignaron las variables auxiliares descritas en el Capítulo 1, con el propósito de conocer la respuesta del rendimiento en función de año y posición del surco, que son consideradas como variables cualitativas. Para los factores en estudio de maíz se asignaron

valores codificados en sus cinco niveles, igualmente espaciados para $N = (N-120)/40$; $P = (P-90)/30$; $K = (K-40)/20$ y $D = (D-60)/10$.

De la ecuación de rendimiento obtenida, se hizo un programa de optimización en SAS[®] para obtener el IN y la relación B/C, siendo los criterios de selección de la DOE, la mayor relación B/C y su menor costo variable.

Para el rendimiento de fruto de durazno (\hat{Y}_d) en el año 2012, utilizando el programa SAS[®] se ajustó el siguiente modelo de regresión:

$$\hat{Y}_d = \mu - P + K - E^2 + NK - PE + KE$$

Dónde: μ es la media general; N, P, K y E fueron las variables que codificaron al N, P₂O₅, K₂O y estiércol (E), respectivamente. Los factores de estudio fueron codificados en su cinco niveles, igualmente espaciados como: $N = (N-93)/21$; $P = (P-45)/15$; $K = (K-93)/21$ y $E = (E-3)/1.5$. También, para el rendimiento de fruto obtenido, se hizo un programa de optimización en SAS[®] con la finalidad de obtener el IN y la relación B/C, siendo los criterios de selección de la DOE, la mayor relación B/C y el menor costo variable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Maíz

La ecuación general del rendimiento de grano estimado (\hat{Y}_g) en t ha⁻¹ dispersa fue:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_g \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = & 5.55571 + 0.1089 N + 0.28314 P + 0.58464 D - 0.12986 N^2 - 0.06748 P^2 + 0.05778 \\ & ND + 0.05758 PD + 1.22059 a_1 - 0.94170 a_2 - 1.99516 a_3 - 0.46667 a_4 - 1.76991 \\ & a_5 + 1.02323 p_1 + 0.89495 p_2 + 0.40667 p_3 + 0.22968 a_1D - 0.08304 a_2D^2 - \\ & 0.18216 a_3D + 0.31078 a_4P - 0.13316 a_4D^2 - 0.14480 p_1P + 0.17989 p_1D + 0.27216 \\ & a_4p_1K^2 + 0.21801 a_4p_1ND - 0.19518 a_5p_2NP \end{aligned}$$

$$R^2 = 0.6813$$

Dónde: N, P, K y D fueron las variables que codificaron al nitrógeno, P₂O₅, K₂O y densidad de población, respectivamente; las variables auxiliares a₁, a₂, a₃, a₄ y a₅ codificaron a los años 2008, 2009, 2010, 2011 y 2012, respectivamente; y p₁, p₂ y p₃ codificaron a posición del surco de maíz S₁, S₂ y S₄, respectivamente.

De acuerdo a esta ecuación, en primer lugar la DOE no incluyó el elemento K (Cuadro 3), en los cuatro surcos de maíz en los seis años. Esto puede deberse a que el suelo es un Ultisol, pobre en K y Ca, cultivado continuamente en los últimos 15 años sin adición de este elemento, al aplicarlo fue fijado por las arcillas del suelo como lo reportan Henríquez *et al.* (1994), lo cual evitó la respuesta. Por lo tanto, en estudios futuros sería conveniente ampliar el espacio de exploración para este elemento.

En segundo, la DOE tuvo una tendencia similar durante los primeros cuatro años (Cuadro 3); sin embargo, para el año 2011 en el surco S1 la DOE de N se incrementó en 35 kg y la de P en 15 kg de P_2O_5 ha^{-1} dispersa, mientras que en el año 2012 en el surco S2 la DOE de N disminuyó en 70 kg ha^{-1} dispersa.

Durante los seis años en la zona receptora, en el surco S1 se requirió 10 kg más de N y 25 kg menos de P_2O_5 ha^{-1} dispersa, en comparación con los otros tres surcos. Cabe recordar que en este surco, año con año se aplicó 2 t ha^{-1} de estiércol de pollo, como complemento del tratamiento 140-125-00 kg de N- P_2O_5 - K_2O y 80 000 plantas ha^{-1} dispersa. Con esta combinación, se tuvo una ganancia por cada peso invertido de 0.07 a 0.93 pesos; sin embargo, en el año 2010 se tuvo una pérdida de 0.10 pesos. El surco S2, fue el que tuvo la mejor relación beneficio costo con respecto a los otros tres surcos en todos los años, con una ganancia por cada peso invertido de entre 0.37 y 1.27 pesos (Cuadro 3) con la fórmula 130-150-00 kg de N- P_2O_5 - K_2O y 80 000 plantas ha^{-1} dispersa.

Los surcos de maíz S1 y S2 corresponden a la zona receptora de sedimentos del módulo MIAF, donde el mayor ingreso se obtuvo en el surco S2 en los seis años, con excepción del año 2011, donde el surco S1 fue mayor en ingreso (Cuadro 3). El IN promedio para el surco S1 fue de \$21 035.89 y para el S2 de \$20 960.15 ha^{-1} dispersa. Ambos surcos son beneficiados por el incremento de sedimentos, nutrimentos y la infiltración de agua de lluvia, tal como lo reportan Camas (2011) y Salinas (2015) en el sistema MIAF en los estados de Chiapas y Oaxaca, respectivamente.

En la zona donante, la DOE en los surcos de maíz S3 y S4 fue la misma durante los seis años con la combinación 130-150-00 kg de N- P_2O_5 - K_2O y 80 000 plantas ha^{-1} dispersa; sin embargo, hay diferencias en el IN y la relación B/C. En el surco S3 por cada peso invertido hubo una ganancia de entre 0.03 y 1.03 pesos en cinco años, con excepción del año 2010 que tuvo una pérdida de 0.16. En el surco S4, por cada peso invertido tuvo una ganancia de entre

0.15 y 1.14 pesos, con excepción del año 2010, ya que perdió 0.03 pesos (Cuadro 3), es decir, en ambos surcos hubo pérdida. En esta zona, el surco S4 fue más favorecido que el surco S3, el cual es el donante absoluto. En el surco S3 el IN promedio fue de \$17 163.88 ha⁻¹ dispersa, mientras que en S4 el IN promedio fue de \$18 871.89 ha⁻¹ dispersa.

Cuadro 3. Optimización económica de N, P₂O₅, K₂O y densidad de población, rendimiento de grano (Yg), ingreso neto (IN) y relación beneficio/costo (B/C) por año en surcos específicos de maíz en el arreglo topológico de surcos alternos con micro-rotación anual en el sistema MIAF en ladera.

Año	Surco	Dosis óptima económica				Yg (t ha ⁻¹)	IN (\$ ha ⁻¹)	B/C
		N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	K ₂ O (kg ha ⁻¹)	D (Miles planta ha ⁻¹)			
2007	1	140	125	0	80	8.39	22 793.00	1.52
	2	130	150	0	80	8.19	23 793.36	1.82
	3	130	150	0	80	7.30	20 034.61	1.56
	4	130	150	0	80	7.71	21 742.62	1.68
2008	1	140	125	0	80	10.07	29 848.79	1.93
	2	130	150	0	80	9.87	30 849.15	2.27
	3	130	150	0	80	8.98	27 090.40	2.03
	4	130	150	0	80	9.39	28 798.41	2.14
2009	1	140	125	0	80	7.12	17 442.79	1.20
	2	130	150	0	80	6.92	18 443.14	1.45
	3	130	150	0	80	6.03	14 684.40	1.18
	4	130	150	0	80	6.43	16 392.41	1.31
2010	1	140	125	0	80	6.03	12 883.19	0.90
	2	130	150	0	80	5.84	13 883.54	1.12
	3	130	150	0	80	4.94	10 124.79	0.84
	4	130	150	0	80	5.35	11 832.81	0.97
2011	1	175	150	0	80	9.71	27 888.18	1.76
	2	130	150	0	80	7.82	22 206.81	1.71
	3	130	150	0	80	6.92	18 448.06	1.45
	4	130	150	0	80	7.33	20 156.07	1.57
2012	1	140	125	0	80	6.62	15 359.38	1.07
	2	70	150	0	80	6.38	16 584.91	1.37
	3	130	150	0	80	5.53	12 600.99	1.03
	4	130	150	0	80	5.94	14 309.00	1.15

La relación B/C del promedio de los surcos de maíz en el sistema MIAF por año, indicó que con respecto al año 2007, hubo diferencias de 0.45, -0.36, -0.69, -0.02 y -0.49 pesos de los años 2008, 2009, 2010, 2011 y 2012, respectivamente. Esto significa una desventaja económica a partir del año 2009, sin embargo, se produce el suficiente maíz para la alimentación de la familia durante todo el año; se reduce la pérdida del suelo a tasas permisibles con la formación de la terraza a través del tiempo; se incrementa la infiltración de agua; y mejoran las características físicas y químicas del suelo. Lo anterior, son algunas ventajas del sistema MIAF en laderas reportadas por Uribe *et al.* (2002), Camas (2011) y Salinas (2015).

Por otro lado, en la comparación de los promedios por año de la relación B/C en los seis años entre el maíz en surcos alteros en el sistema MIAF y como cultivo simple (Cuadro 4), la diferencia por cada peso invertido fue de 0.79, 1.25, 0.90, 1.01, 1.36 y 1.39, de los años 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 y 2012, respectivamente, a favor del maíz en el sistema MIAF.

Cuadro 4. Rendimiento de grano (Yg), ingreso neto (IN) y relación beneficio costo (B/C) de maíz en surcos alternos (SA) bajo el sistema MIAF y en cultivo simple (CS) en una ladera en seis años, Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax.

Año	Yg t ha ⁻¹		IN \$ ha ⁻¹		B/C	
	Maíz SA ^Z	Maíz CS ^W	Maíz SA ^Z	Maíz CS	Maíz SA ^Z	Maíz CS
2007	7.90	5.60	22,090.90	11 601.16	1.64	0.85
2008	9.58	5.50	29,146.69	11 391.16	2.09	0.84
2009	6.63	4.03	16,740.69	5 007.16	1.28	0.38
2010	5.54	2.70	12,181.08	- 578.84	0.96	- 0.05
2011	7.95	3.67	22,144.14	3 495.16	1.63	0.27
2012	6.12	2.13	14,714.57	- 2 972.84	1.15	- 0.24

^Z Maíz en el sistema MIAF transformado a hectárea dispersa. ^W Rendimiento de maíz observado con la dosis de fertilización 120-90-40 kg de N, P₂O₅-K₂O y 60 mil plantas ha⁻¹.

En el sistema MIAF en un año benigno (2008), el maíz tuvo una relación B/C de 2.09 mientras que el del cultivo simple fue de 0.84. La ganancia fue de 1.09 pesos por cada peso invertido; mientras que en el cultivo simple hubo una pérdida de 0.16 pesos por cada peso

invertido. En un año con sequía (2009), la ganancia por cada peso invertido con maíz en el sistema MIAF fue de 0.29 y mientras que en el cultivo simple se perdieron 0.62 pesos.

Árbol frutal

El rendimiento de fruto de durazno para el año 2012, dependió de los efectos principales de P y K, del efecto cuadrático de E (E^2) y de las interacciones NxK, PxE y KxE, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\hat{Y}_d \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = 9.19563 - 0.19762 P + 0.42100 K - 0.85560 E^2 + 1.46926 NK \\ - 0.93810 PE + 0.34307 KE \text{ ;} \\ R^2 = 0.51$$

Dónde: N, P, K y E fueron las variables que codificaron al nitrógeno, P_2O_5 , K_2O y estiércol de pollo, respectivamente.

La DOE para el rendimiento de fruto de durazno fue 123-19-48 kg de N, P_2O_5 y K_2O ha⁻¹ dispersa respectivamente, sin E, con una $\hat{Y}_d = 16.02$ t ha⁻¹ dispersa. Por lo tanto, si una hectárea MIAF tiene 943 árboles, la DOE por árbol es la 130-20-51 g de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente, y un $\hat{Y}_d = 6.41$ t ha⁻¹ MIAF. Con esta DOE, el IN sería de \$105 842.32 ha⁻¹ MIAF y la relación B/C de 4.75. Sin duda el árbol de durazno tiene la capacidad de proporcionar un ingreso neto adicional en la misma unidad de producción donde se producen los granos básicos (Cortés *et al.*, 2005; Ruíz *et al.*, 2012), el cual pudiera cubrir los costos de producción y un ingreso neto extra al productor.

Al integrar las dos especies (maíz y durazno) como parte del sistema MIAF a través de los seis años (Cuadro 5), en el año 2010, con el rendimiento de fruto promedio de 1.8 t ha⁻¹ MIAF, hubo un IN de \$17 067.15 y una relación B/C de 0.87. Sin embargo, en el año 2011 no tuvo producción de fruto, debido a que se presentó una helada cuando el fruto se encontraba iniciando la primera fase de crecimiento (mes de enero) y eliminó todo los frutos. En esta región, durante el invierno, las heladas severas no son típicas (Díaz *et al.*, 2012).

De esta manera, con las producciones de maíz y durazno, permitió generar y sumar ingresos sustanciales para cubrir los costos de producción durante estos seis años (Cuadro 5), teniendo una diferencia a favor en IN de \$102 122.06 ha⁻¹ MIAF.

Cuadro 5. Rendimientos, ingresos netos y relación beneficio costo de maíz y durazno parciales y totales, bajo el sistema MIAF en ladera en un periodo de seis años.

Año	Yg ^Z	Yd ^Y	IN _m ^X	IN _d ^V	B/C _m ^U	B/C _d ^T	IN _t ^S	BC _t ^R
	(t ha ⁻¹)		(\$ ha ⁻¹)				(\$ ha ⁻¹)	
2007	2.37	Cv ^W	6,627.27	-11,880.85	1.64	S ^Q	-5,253.58	-0.33
2008	2.87	Cv ^W	8,744.01	-10,774.49	2.09	S ^Q	-2,030.48	-0.14
2009	1.99	Cv ^W	5,022.21	-14,244.64	1.28	S ^Q	-9,222.43	-0.51
2010	1.66	1.83 ^Y	3,654.32	17,067.15	0.96	0.87	20,721.47	0.89
2011	2.38	0	6,643.24	-18,992.85	1.63	S ^Q	-12,349.61	-0.54
2012	1.84	6.41 ^Z	4,414.37	105,842.32	1.15	4.75	110,256.69	4.22

^Z Rendimiento de maíz. ^Y Rendimiento de durazno. ^W Crecimiento vegetativo. ^X Ingreso neto para maíz en surcos alternos con micro-rotación anual. ^V Ingreso neto para durazno. ^U Relación beneficio costo para maíz en surcos alternos con micro-rotación anual. ^T Relación beneficio costo para durazno. ^S Ingreso neto total. ^R Relación beneficio costo total. ^Q Sin ingreso.

En la comparación del sistema MIAF con las especies maíz y durazno y el maíz como cultivo simple, el cual fue fertilizado con el tratamiento central del diseño de tratamientos por el mismo periodo de años, el IN con el maíz como cultivo simple fue a la baja a través del paso de los años. En el año 2010 fue de -\$578.84 hasta llegar a -\$2 972.84 en el año 2012 (Cuadro 4), mientras que en estos mismos años con el sistema MIAF fue de \$20 721.47 y \$110 256.69, respectivamente (Cuadro 5).

De esta manera, al promediar el IN de los seis años, se tiene un IN de \$17 020.23 ha⁻¹ MIAF año⁻¹ (Figura 2), con los costos de producción recuperados, el ingreso negativo pasaría a \$46.6 día⁻¹ durante todo el año. Si el tamaño promedio de la unidad de producción es de 1.6 ha en esta región, la familia estaría recibiendo un IN de \$74.6 día⁻¹ año⁻¹; obtendría alrededor de 3.5 t de grano, que cubriría la necesidades del consumo para la familia que es de 1.2 t año⁻¹ y

tendría un excedente para la venta, alimentación de aves y ganado menor; se generaría empleo de 172 jornales año⁻¹ con una derrama de \$25 920; se controlaría la erosión del suelo, con la formación paulatina de la terraza y se incrementaría la infiltración de agua por efecto del muro vivo y el surcado a curvas de nivel.

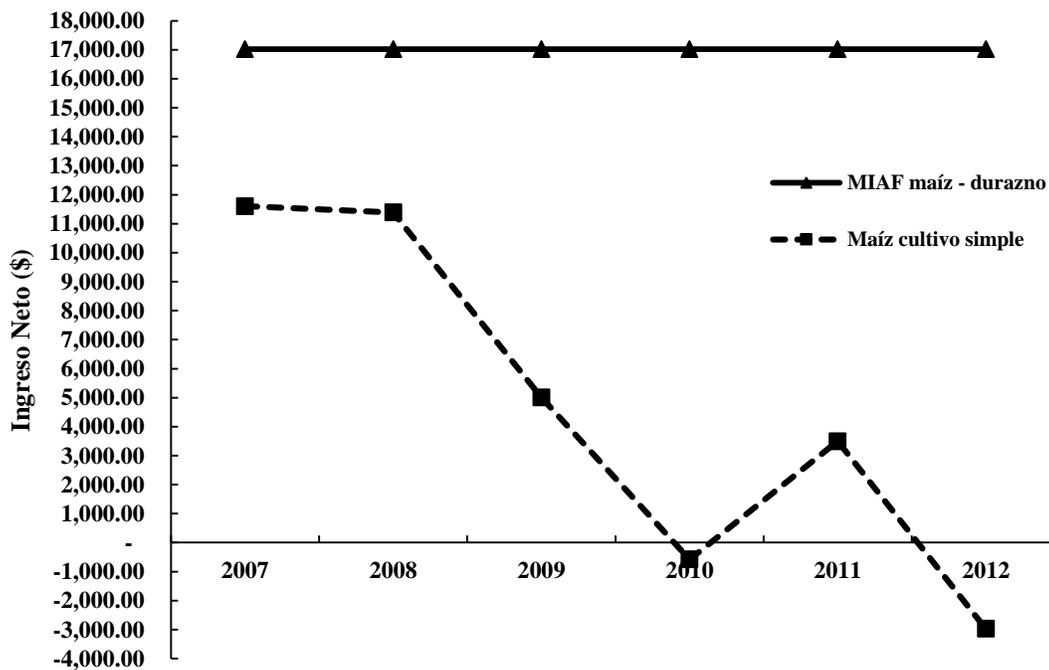


Figura 2. Ingreso neto promedio del sistema MIAF vs maíz en cultivo simple en una ladera en Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax.

CONCLUSIONES

En el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en condiciones de ladera durante seis años de estudio, la posición del surco de maíz respecto a la hilera de árboles de durazno indicó la DOE de 140-125-00 kg de N-P₂O₅-K₂O y 80 mil plantas ha⁻¹ dispersa para el surco S1 y 130-150-00 kg de N-P₂O₅-K₂O y 80 mil plantas ha⁻¹ dispersa para los surcos S2, S3 y S4. En el caso del árbol de durazno al quinto año de edad, la DOE fue 130-20-51 g de N-P₂O₅-K₂O.

Los indicadores IN y la relación B/C del maíz en el sistema MIAF, dependieron de la posición del surco en el módulo MIAF en la ladera, y fueron mayores para los surcos S1, S2, y S4 respecto al surco S3, aún con la misma DOE para los surcos S2, S3 y S4. Para el árbol de durazno al quinto año de edad, tuvo un IN de \$105 842.32 ha⁻¹ MIAF y una relación B/C de 4.75.

En el agrosistema representativo de la región Mixe, Oax., el sistema MIAF en los años de estudio, tuvo la capacidad de incrementar el rendimiento el maíz para satisfacer anualmente las necesidades de alimentación de la familia, generar un ingreso neto promedio de \$46.6 día⁻¹ año⁻¹ y emplear a 172 jornales año⁻¹ ha⁻¹ MIAF. En este sistema agroforestal, al árbol frutal se le considera el motor económico, ya que además de generar un ingreso adicional, blinda la producción de maíz cuando no se recupera su inversión, y contribuye a la formación sucesiva de las terrazas.

LITERATURA CITADA

- Aragón, C. F.; Taba, S.; Hernández, C. J. M.; Figueroa, C. J. D.; Serrano, A. V y Castro, G. F. H. 2006. Catálogo de maíces criollos de Oaxaca. INIFAP-SAGARPA. Libro Técnico Núm. 6. Oaxaca, Oaxaca, México. 344 págs.
- Astier, M.; Speelman, E. N.; López, R. S.; Maser, O. R. and González, E. C. E. 2011. Sustainability indicators, alternative strategies and trade-offs in peasant agroecosystems: analysing 15 case studies from Latin America. *International Journal of Agricultural Sustainability* 9(3): 409-422.
- Bellow, J. G. 2004. Fruit-tree-based agroforestry in the western highlands of Guatemala: an evaluation of tree-crop interactions and socioeconomic characteristics. Tesis of Doctor of Philosophy. University of Florida. 217 págs.
- Camas, G. 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 Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. México.

- Cortés, F. J. I.; Torres, Z. J. P; Turrent, F. A.; Hernández, R. E.; Ramos, S. A. y Jiménez, S. L. 2012. Manual actualizado para el establecimiento y manejo del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en Laderas. Colegio de Postgraduados, México.
- Cortés, F. J. I.; Turrent, F. A.; Díaz, V. P.; Claro, C. P.; Hernández, R. E.; Aceves, R. E. y Mendoza, R. R. 2007. La milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) una tecnología multiobjetivo para las pequeñas unidades de producción. *In: Desarrollo agropecuario forestal y pesquero. Agenda para el desarrollo. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. Coordinador José Luis Calva. p. 105.*
- Cortés J. I., Mendoza R., Hernández E., Aceves E., Turrent A., y Estrella N. 2004. Manual para Técnicos. El sistema Milpa Intercalada en Árboles Frutales (MIAF) en terrenos planos. Colegio de Postgraduados, Puebla, México. 70 p.
- Cortés, F. J. I., Turrent, F. A., Díaz, V. P., Hernández, R. E., Mejía, A. H., Mendoza, R. R., Ramos, S. A., y Aceves, R. E. 2005. Informe final. Subproyecto tecnologías alternativas sustentables “TAS”, en: Informe de actividades 1999-2005. VII Reunión del comité técnico de coordinación y seguimiento. Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL). Colegio de Postgraduados. México.
- Díaz, V. P.; Calvillo, A. F. F.; López, L. C. G.; López, A. M. G. y Martínez, T. L. I. 2012. Atlas de riesgo naturales de Santa María Tlahuitoltepec, Mixe, Oax. Secretaría de Desarrollo Social y Universidad Autónoma Chapingo. 69 págs.
- Espíndola B, M. D.; Elías, R. R. D.; Aguilar, M. J. J. y Campos, R. E. 2009. Guía Técnica para la Producción de Durazno en la Región Sur del Estado de México. Coatepec Harinas, México: Fundación Salvador Sánchez Colín, ICAMEX, Gobierno del Estado de México, CONACYT
- Franzel, S. and Scherr, S. J. 2002. Trees on the Farm: Assessing the Adoption Potential of Agrforestry Practices in Africa, CAB International, Wallingford, UK.189 págs.
- Francis, C. A. 1986. Multiple cropping systems. Macmillan Publishing Company. University of Nebraska, Lincoln.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 5ª ed. México D. F. 98 p.

- Henríquez, C.; Bornemisza, E. y Bertsch, F. 1994. Fijación de potasio en Vertisoles, Inceptisoles, Andisoles y Ultisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(2): 133-140.
- Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI). 2010. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Santa María Tlahuitoltepec, Oaxaca.
- León, M. A. 2004. Evaluación socioeconómica en comunidades indígenas. Informe 2004. Subproyecto II. Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL). Colegio de Postgraduados, Montecillo. México.
- León, M. A. y Jiménez, S. L. 2001. Diagnóstico socioeconómico de la línea base en la Región Mixe, Oaxaca, México, 2000. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, Edo. México.
- Martínez, G. A. y Martínez, D. M. A. 1996. Diseños de experimentos con fertilizantes. Publicación especial 5. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C y Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 155 págs.
- Mercer, D. E.; Frey, G. E. and Cubbage, F. W. 2014. Economics of agroforestry. In Kant S. and J. R. R. Alavalapati (eds). *Handbook of Forest Economics*. Earthscan from Routledge. New York. Pp. 188-209.
- Pool, N. L.; Trinidad, S. A.; Etchevers, B. J. D.; Pérez, M. J. y Martínez, G. A. 2000. Mejoradores de la fertilidad del suelo en la agricultura de ladera de los altos de Chiapas, México. *Agrociencia* 34(3): 251-259.
- Ramos, G. F. 2007. La milpa de los Mixes: cosmovisión, tecnología y sustentabilidad. 1ª ed. Subsecretaría de Educación Media Superior. Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria. Oaxaca, Méx. 213 págs.
- Rebolledo, R. H. H. 1998. Estimación de diferentes modelos de regresión a experimentos de fertilización y su comparación con fines de generar recomendaciones optimas económicas. I. Casos con un factor. *Terra* 16(3): 247-258.
- Ruíz, M. A. D.; Jiménez, S. L.; Figueroa, R. O. L. y Morales, G. M. 2012. Adopción del sistema milpa intercalada con árboles frutales por cinco municipios mixes del estado de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(8): 1605-1621.

- Salinas, S. R. 2015. Caracterización topográfica, física y de fertilidad de un suelo de ladera manejado con el sistema milpa intercalada con árboles frutales durante cinco años. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco. Edo. de México.
- Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM). Secretaria de Economía (SE). Precios del año 2016. <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/>
- Turrent, F. A.; Laird, R. J.; Cortés, F. J. I. y Volke, H. V. 2004. Un reencuentro con la productividad de agrosistemas: I. Fundamentos y Herramientas. *Agrociencia*. 39: 29-39.
- Uribe, G. S.; Francisco, N, N. y Turrent, F. A. 2002. Pérdida de suelo y nutrimentos en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36: 161-168.
- Valdez, Z. J. I.; Badii, M. H.; Guillen, A. and Acuña, Z. M. S. 2015. Causas e Impactos Socio-Económico y Ambientales de la Erosión. *International Journal of Good Conscience* 10(1): 76-87.
- 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: 259-266.
- Volke, H. V.; Turrent, F. A. y Castillo, M. A. 2005. Diseños de tratamientos y estimación de funciones de respuesta en la investigación agrícola. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México. 68 págs.
- Volke H., V. 1981. Estimación de funciones de producción mediante regresión en experimentos con fertilizantes y densidad de plantas, con fines de determinación de óptimos económicos. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

**CAPITULO III: CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA Y CLASIFICACIÓN
DEL SUELO DE LADERA MANEJADO BAJO EL SISTEMA MILPA INTERCALADA
CON ÁRBOLES FRUTALES**

RESUMEN

En un agrosistema representativo de la región Mixe Alta, sierra Norte de Oax., el suelo se caracteriza por su baja fertilidad, principalmente con bajos contenidos de fósforo y bases intercambiables, de reacción fuertemente ácida, alta acidez intercambiable y está desprotegido contra la erosión hídrica. En el año 2007, se estableció un experimento con el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en una ladera con una pendiente de 29.8%. Con el objeto de generar las recomendaciones específicas para las especies integrantes: maíz, frijol y durazno, que le permitan al pequeño productor salir del entorno actual, de una crisis económica, social y ambiental. Después de seis años, la topografía cambió por efecto del laboreo y del manejo agronómico de las especies. El objetivo del trabajo fue la caracterización física y química del suelo del módulo MIAF después de seis años de estudio, así como definir su clasificación de acuerdo a la Taxonomía de Suelos y de la Base Mundial del Recurso Suelo. El análisis comprendió las zonas receptora y donante del módulo MIAF. Se realizaron perfiles de suelo en tres posiciones sobre el ancho de la ladera que comprendió el sitio experimental. Los resultados indicaron que en la zona receptora de sedimentos y en el área donde descansa el filtro de escurrimientos del muro vivo, mejoraron las propiedades físicas y químicas del suelo con respecto a la zona donante. La textura a la profundidad de 0 a 0.20 m fue franco arcilloso en la zona receptora, mientras que en la zona donante fue arcilloso. El pH del suelo, en las dos zonas del módulo es moderadamente ácido. Los contenidos de fósforo fueron de medio a alto en la zona receptora, mientras que en la zona donante fue de bajo a trazas. En el área del filtro de escurrimientos de la hilera de los árboles frutales, a la profundidad de 0 a 0.10 m, el contenido de MO, P y K fue alto, medio para Ca y Mg, y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue muy alta. El suelo se clasificó como *Typic hapludults* y Acrisol Háplico (Crómico).

Palabras clave: Zona donante y receptora, módulo MIAF, suelo ácido, Ultisol y Acrisol.

INTRODUCCIÓN

Las prácticas de producción de la milpa de ladera en las regiones del estado de Oaxaca como la roza-tumba-quema (RTQ) y roturación del suelo (aradura) en pequeñas unidades de producción, dan lugar a la pérdida de la fertilidad del suelo, rendimientos bajos, erosión hídrica del suelo y migración de la gente a otros estados y países (Cortés, *et al.*, 2005). Además, el uso inadecuado del suelo en ladera provoca cambios negativos en sus propiedades, que llegan a afectar su capacidad productiva (Medina *et al.*, 2008).

La fertilidad del suelo en laderas con pendientes mayores al 20 por ciento, en las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, es agravada por el escaso uso de abonos orgánicos y químicos. Las bajas concentraciones de fósforo disponible, el bajo pH y elevada acidez intercambiable, y la baja saturación de bases son comunes en los suelos en las tres regiones, principalmente en las regiones Mazateca y Mixe. En contraste, los contenidos medios de materia orgánica de 3 a 6%, permiten deducir que la condición física de estos suelos estaría menos amenazada a la degradación (Vergara *et al.*, 2005). Sin embargo, en suelos donde el horizonte A ha desaparecido por efecto de la erosión hídrica, es más apremiante la necesidad de proteger y conservar el suelo que aún persiste en estas regiones con prácticas que aborden la problemática de manera integral.

Los sistemas agroforestales tienen la capacidad de mejorar el suelo, mantener la productividad mediante un manejo planificado, racionalizando el impacto sobre el ambiente (Shibu, 2009). También, se les considera que pueden imitar características de los ecosistemas naturales, en particular aquellas que tienen efectos beneficiosos sobre las propiedades del suelo (Tornquist *et al.*, 1999). El uso de sistemas agroforestales y la preparación adecuada del suelo en laderas, permiten el uso de cantidades bajas de fertilizantes en combinación con orgánicos, pueden corregir la degradación química del suelo resultante del cultivo continuo; al mismo tiempo, también pueden aumentar la eficiencia del uso de fertilizantes (Smith *et al.*, 2012).

Las tecnologías como el cultivo en callejones (Steppler y Nair, 1987) y la del pasto vetiver (*Vetiveria zizanioides*) (Dalton *et al.*, 1996), derivadas de sistemas agroforestales, han demostrado eficiencia en el control de la erosión hídrica del suelo en laderas roturadas (Andrade y Rodríguez, 2002), y sus principios fueron considerados para la generación de una tecnología para el desarrollo gradual de terrazas en el trópico subhúmedo de México. La terraza de muro vivo (TMV), la cual consiste en establecer hileras a curva a nivel de una leguminosa como

Gliricidia cepium y entre las hileras la siembra de maíz, con los residuos de cosecha y material podado depositados al pie y aguas arriba de las hileras de *Gliricidia* es una de ellas. La formación gradual de las terrazas en un periodo de seis años, en una ladera con una pendiente inicial de 14.5% disminuyó a 6.5 %. El proceso de formación fue a través de efectos combinados como de la fuerza erosiva de la lluvia, la roturación unidireccional, el seto como muro vivo y el filtro de sedimentos compuesto de los residuos de cosecha y material podado de los árboles de *Gliricidia* (Turrent *et al.*, 1995 y 1998).

El sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas, es el resultado de la combinación de las tecnologías TMV y MIAF en zona planas (Turrent *et al.*, 1998; Cortés *et al.*, 2004). Por tanto, es un sistema agroforestal de cultivo intercalado, constituido por tres especies, el árbol frutal, el maíz y el frijol u otra especie comestible de porte bajo, en intensa interacción agronómica y que tiene como propósitos, la producción de maíz y frijol que son estratégicos para la seguridad alimentaria de las familias rurales, incrementar de manera significativa el ingreso neto familiar, controlar la erosión hídrica del suelo y con ello lograr un uso más eficiente del agua de lluvia al mejorar la calidad física, química y biológica del suelo (Cortés *et al.*, 2012; Cortés *et al.*, 2005).

En el año 2007, se inició la segunda fase del “Proyecto Manejo Sustentable de Laderas” (PMSL) en un agrosistema representativo en la comunidad de Santa María Tlahuitoltepec, Mixe, Oax. (Ramos *et al.*, 2007). El objetivo del proyecto fue el mejoramiento de la tecnología MIAF y la obtención de las recomendaciones de fertilizaciones específicas para este agrosistema. A los seis años de estudio, el sistema MIAF generó modificaciones positivas en el suelo, disminuyó la pendiente, dando lugar a la formación paulatina de terrazas con las labores anuales de campo normales (Salinas, 2015), controló la erosión hídrica del suelo e incrementó la infiltración de agua. Sin embargo, Camas (2011) recomiendan que el manejo de la ladera debe ser por secciones (parta alta, media y baja) debido a la variación de fertilidad del suelo y además dentro del módulo MIAF, debe de haber un manejo específico por el reacomodo de sedimentos en las diferente zonas del módulo.

Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue la caracterización física y química del suelo del módulo MIAF después de seis años de estudio y así mismo, definir la clasificación del suelo con base a la Taxonomía de Suelos y de la Base Mundial del Recurso Suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El trabajo experimental se llevó a cabo en un agrosistema representativo de la región Mixe Alta en la Sierra Norte de Oaxaca, en el periodo 2007 al 2012 en la rancharía Santa Cruz, del municipio de Santa María Tlahuitoltepec. El sitio se ubica a 17°05'18.45"N, 96°02'53.56"O y a una altitud de 2,300 m. El clima según García (2004) es templado subhúmedo (Cw) con lluvias abundantes en verano y con una precipitación promedio de 1 375 mm. La temperatura media anual es de 15.2 °C, siendo los meses más fríos noviembre, diciembre, enero y febrero (García, 2004; INEGI, 2010).

La geología dominante es de origen volcánico, principalmente de rocas ígneas, toba ácida (52.39%) y andesita (30.50%); sedimentarias, caliza (14.60%) y metamórficas, esquisto (2.51%). Los suelos se han formado principalmente en las interfaces de rellenos formados por tobas andesíticas con predominio de suelos residuales y superficiales, alterados fuertemente por el interperismo químico (INEGI, 2010). Con datos de las normales climatológicas de la estación Tlahuitoltepec (Ortiz *et al.*, 2011) y el programa Newhall.1.5.1[®] (USDA, 2011), se determinó que el suelo es de un régimen de humedad údico y un régimen de temperatura isomésico.

En el sitio se estableció un experimento con el sistema MIAF en una ladera con una pendiente inicial de 29.8% (Salinas, 2015) y el suelo está clasificado como Acrisol (INEGI, 2010). En el mes de enero del año 2007, se realizó un análisis del suelo de acuerdo a la metodología de Van Reeuwijk (1999). El suelo es de textura franco limoso en la profundidad de 0 a 0.20 m y franco arcillo-limoso de 0.20 a 0.40 m; tiene un pH que va de moderadamente ácido en los primeros 0.20 m y fuertemente ácido hasta los 0.40 m; el contenido de materia orgánica es bajo a la profundidad de 0.20 m y muy bajo a los 0.40 m; la capacidad de intercambio catiónico (CIC) varía de media a muy alta a los 0.20 y 0.40 m. Los contenidos de potasio (K) y fósforo (P) fueron trazas, y en calcio (Ca) y magnesio (Mg) muy bajos en ambas profundidades.

Se establecieron dos sub-experimentos: 1) maíz como mesocultivo y 2) árbol de durazno como epicultivo, además de una leguminosa (sotocultivo) de exploración que acompaña al maíz en el arreglo topológico de surcos alternos con micro-rotación anual. Se trazaron dos módulos MIAF, con hileras a curvas a nivel separadas entre ellas a 10.6 m. Cada módulo MIAF tiene

ocho surcos de 0.80 m de ancho destinados para el maíz y la leguminosa, cuatro aguas arriba y cuatro aguas abajo con respecto a la hilera de los árboles frutales, con una anchura de 4.2 m. En la parte central de la hilera fueron plantados los árboles de durazno variedad “CP 2005” a una densidad de 943 árboles ha⁻¹, con una separación de 1.0 m entre ellos sobre la hilera (10.6 x 1.0 m) (Figura 1).

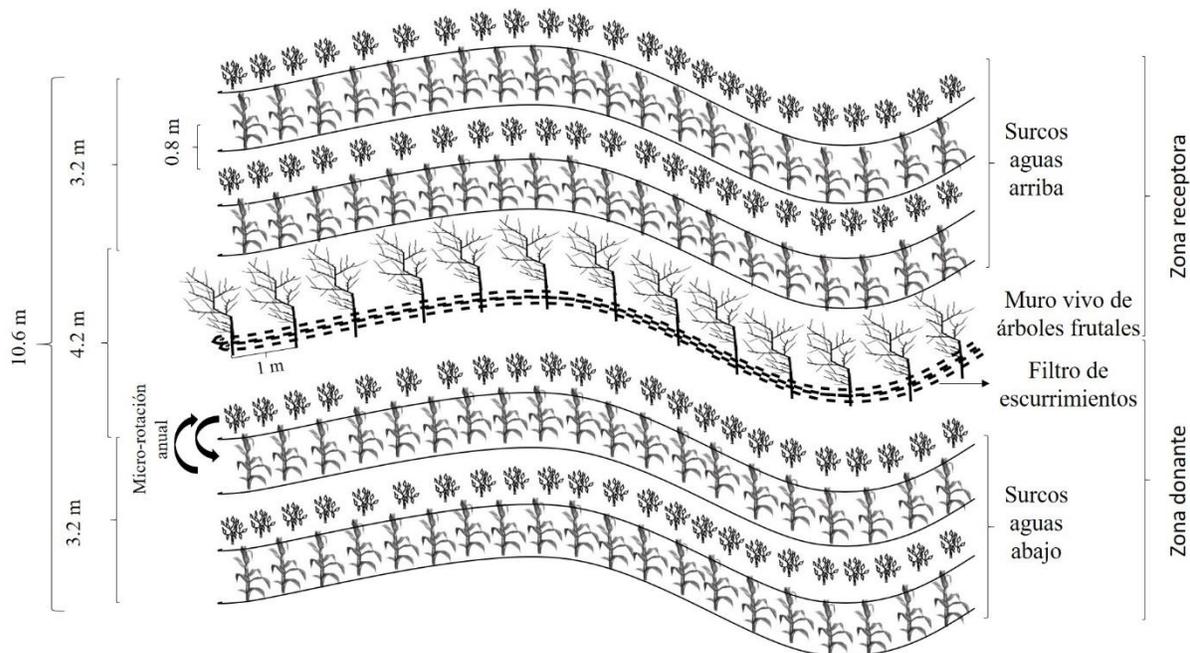


Figura 1. Modelo del módulo milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en una ladera; arreglo topológico en surcos alternos con micro-rotación anual de maíz y frijol; y ubicación de las zonas donante y receptora de sedimentos.

En el sub-experimento maíz se estudió la respuesta del rendimiento de grano a los factores N, P, K y densidad de población (D), cada uno a cinco niveles: N a 40, 80, 120 160 y 200 kg ha⁻¹; P₂O₅ a 30, 60, 90, 120 y 150 kg ha⁻¹; K₂O a 0, 20, 40, 60 y 80 kg ha⁻¹ y D a 40, 50, 60, 70 y 80 mil plantas ha⁻¹; con los cuales se obtuvieron 26 tratamientos a partir del diseño de hipercubo doble lotificado (Volke *et al.*, 2005; Martínez y Martínez, 1996). Los 26 tratamientos están distribuidos en el terreno bajo el diseño experimental de parcelas divididas con dos repeticiones. La parcela grande es la posición de cada surco, con respecto a la hilera del árbol frutal. La parcela chica comprende los 26 tratamientos antes mencionados. La parcela experimental consistió de cuatro surcos de maíz, dos aguas arriba y dos aguas abajo respecto a

la hilera de los frutales, cada uno de 4.0 m de longitud x 0.8 m de ancho y como parcela útil se consideró los 3.0 m centrales de cada surco.

Para el sub-experimento árbol de durazno se estudiaron también cuatro factores con cinco niveles cada uno: N con 17, 24, 31, 38 y 45 g árbol⁻¹; P₂O₅ con 5, 10, 15, 20 y 25 g árbol⁻¹; K₂O con 17, 24, 31, 38 y 45 g árbol⁻¹ y estiércol con 0, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 kg árbol⁻¹, por año de edad del árbol hasta el tercer año (de ahí en adelante se mantuvieron constantes), combinados también en 26 tratamientos, de acuerdo al diseño de tratamientos hipercubo doble. La parcela experimental fue de cuatro árboles y como parcela útil se consideraron los dos árboles centrales.

El muestreo del suelo para la caracterización física y química del módulo MIAF fue en el año 2013 a 5 semanas previas a la fecha de siembra (2 marzo). En el área de las especies anuales, cuya pendiente había disminuido a 20.4%, por efecto del laboreo, los escurrimientos y la formación paulatina de la terrazas (Salinas, 2015), correspondiente al tratamiento central del diseño en estudio para el maíz (120-90-40 kg de N-P₂O₅-K₂O ha⁻¹), por ser el de referencia y centro del diseño. Además, año con año se aplicó 2 t ha⁻¹ de estiércol de pollo en el surco S1 de maíz bajo micro-rotación anual (ver Capítulo 1). Se obtuvieron tres sub-muestras de suelo de la parcela útil por surco a dos profundidades: 0-0.20 y 0.20-0.40 m, en las dos repeticiones del experimento.

En la hilera de los árboles de durazno, aguas arriba se estuvo colocando el filtro de escurrimientos compuesto de rastrojo de maíz, madera podada de los árboles y malezas segadas. El tratamiento de estudio del árbol de durazno, también correspondió al central del diseño (93-45-93 g de N-P₂O₅-K₂O y 3 kg de pollinaza árbol⁻¹). Se obtuvieron muestras de suelo a dos profundidades: de 0 a 0.10 y 0.10 a 0.30 m, en la parcela útil de las dos repeticiones. La primera capa tuvo un espesor de 0.10 m, porque es el resultado de los depósitos de sedimentos y acumulación de materiales orgánicos ya en descomposición; así que la profundidad de 0.10 a 0.30 m viene siendo el suelo original del sitio.

También, se excavaron tres perfiles de suelo a lo ancho del sitio experimental (Figura 2). El perfil 1 se ubicó en la orilla de la parte Norte del terreno y entre las hileras de los árboles de durazno en una zona donde la pendiente es cóncava y el suelo superficial con un color blanquecino, el segundo perfil hacia el centro del terreno donde la pendiente es convexa y el suelo es rojizo intenso, y el tercer perfil casi al final de las hileras (parte Sur) con la pendiente cóncava, con color rojizo no tan intenso. Los tres perfiles se describieron con la metodología

propuesta por Cuanalo (1981). Además, se colectaron muestras alteradas de cada uno de los estratos identificados para sus análisis físicos y químicos.



Figura 2. Ubicación de los perfiles del suelo en el sitio experimental Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax., dentro del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en una ladera al sexto año de su establecimiento.

Las muestras compuestas de suelo del módulo MIAF y alteradas de los perfiles, se secaron a la sombra, se molieron con martillo de madera y se cribaron en un tamiz de 2 mm. En ellas se llevaron a cabo determinaciones física y químicas. En las muestras del módulo MIAF, los análisis se realizaron de acuerdo a los procedimientos del Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Postgraduados (Etchevers, 1992) para determinar pH, MO, N, P, K, Ca, Mg, CIC y acidez intercambiable; y para la determinación de CC, PMP, Da y textura fue de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000) (SEMARNAT, 2000).

En las muestras de los perfiles, los análisis se realizaron de acuerdo a los procedimientos descritos por Van Reeuwij (1999) en el laboratorio de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos del Colegio de Postgraduados. Con la información de campo recabada de los perfiles y del laboratorio, se clasificaron los suelos a nivel subgrupo con las Claves para la Taxonomía del Suelo (SSS, 2014), y con la Base Referencial Mundial del Recurso suelo (WRB, 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características físicas del suelo

En los cuatro surcos de la zona donante del módulo MIAF, el suelo a la profundidad de 0 a 0.20 m muestra un cambio en la textura con respecto a los cuatro surcos de la zona receptora, es decir de clase arcilloso (Cuadro 1). Esto se puede atribuir a la roturación y laboreo del suelo, lo que propició el reacomodo del horizonte Ap de la zona donante a la zona receptora del siguiente módulo. El contenido de humedad en la zona receptora a la profundidad de 0 a 0.20 m presentó en promedio 17.2%, mientras que en la zona donante fue de 27.31%. A la profundidad de 0.20 a 0.40 m, el contenido de humedad promedio también fue mayor en la zona donante que en la receptora, con 32.52 y 26.07 %, respectivamente (Cuadro 1). Por lo tanto, debido al reacomodo del suelo en la zona receptora, ésta presenta mejores condiciones de textura que permite una mejor infiltración respecto a la zona donante a la profundidad de 0 a 0.20 m.

En el área del filtro de escurrimientos de la hilera de los árboles frutales, que también corresponde al área receptora, el contenido de humedad a la profundidad de 0.10 a 0.30 m, fue similar que en los surcos de la zona receptora a la profundidad de 0 a 0.20 m, así como en el tipo de textura, dado que es el suelo sin perturbación y con la pendiente inicial.

La densidad aparente en la zona receptora a la profundidad de 0.20 m tuvo una disminución en el surco 4 respecto a los surcos 1, 2 y 3 (Cuadro 1), probablemente se deba a que es el último surco próximo al área no perturbada de la franja de los árboles frutales. El paso de la yunta, está limitado por las ramas aguas arriba de los árboles de durazno, razón por la que no se puede roturar en esta zona. Lo anterior, provoca que se forme una línea de acumulación de suelo entre el límite del área de los árboles y el último surco aguas arriba, como lo describe Salinas (2015) en la lectura topográfica de la sección transversal del terreno en estudio. En la zona donante del módulo a la profundidad de 0 a 0.20 m, la densidad aparente de los surcos 5 y 6 se incrementa respecto a los surcos 7 y 8 (Cuadro 1), debido a que son los surcos con mayor desprendimiento de suelo por las labores de roturación y de cultivo.

Cuadro 1. Características físicas del suelo del módulo milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en una ladera en San Cruz, Tlahuitotpec, Oax.

Sección del módulo	Surco	Profundidad (m)	Hum ^Z (%)	Da ^Y (g cm ⁻³)	CC ^X %	PMP ^W %	Fracción (%)			Clase textural
							A ^V	L ^U	R ^T	
Receptora	1	0 - 0.20	15.73	1.27	38.15	17.80	32.00	31.00	37.00	Franco arcilloso
		0.20 - 0.40	23.34	1.34	30.30	20.50	29.00	21.00	50.00	Arcilloso
	2	0 - 0.20	19.24	1.26	30.25	20.45	33.50	27.50	39.00	Franco arcilloso
		0.20 - 0.40	26.70	1.35	32.35	22.00	28.50	23.50	48.00	Arcilloso
	3	0 - 0.20	17.70	1.29	28.65	19.15	33.50	27.50	39.00	Franco arcilloso
		0.20 - 0.40	25.62	1.39	29.85	20.20	33.50	21.50	45.00	Arcilloso
	4	0 - 0.20	16.69	1.17	29.00	18.90	29.50	31.50	39.00	Franco arcilloso
		0.20 - 0.40	28.56	1.29	28.35	19.50	32.50	28.50	39.00	Franco arcilloso
Filtro de escurrimientos		0 - 0.10	11.84	1.24	33.00	21.50	42.00	28.00	30.00	Franco arcilloso
		0.10 - 0.30	16.64	1.31	28.70	20.60	34.00	26.00	40.00	Franco arcilloso
Donante	5	0 - 0.20	31.07	1.30	33.40	23.50	24.50	23.50	52.00	Arcilloso
		0.20 - 0.40	38.14	1.29	34.45	26.75	23.50	24.50	52.00	Arcilloso
	6	0 - 0.20	23.49	1.30	31.65	22.20	27.50	23.50	49.00	Arcilloso
		0.20 - 0.40	31.63	1.31	33.80	24.60	24.50	22.50	53.00	Arcilloso
	7	0 - 0.20	26.87	1.23	32.25	22.30	21.50	28.50	50.00	Arcilloso
		0.20 - 0.40	31.04	1.31	33.65	24.00	20.50	24.50	55.00	Arcilloso
	8	0 - 0.20	27.79	1.24	32.70	22.50	25.50	25.50	49.00	Arcilloso
		0.20 - 0.40	29.26	1.19	34.00	24.70	27.50	20.50	52.00	Arcilloso

^Z Contenido de humedad. ^Y Densidad aparente. ^X Capacidad de campo. ^W Punto de marchitez permanente. ^V Arena. ^U Limo y ^T Arcilla.

En este agrosistema al suelo se le considera con humedad residual, debido a que los productores siembran maíz y frijol en los primeros días de marzo y las lluvias inician en el periodo mayo-junio. En la siembra, las semillas se depositan a una profundidad entre 0.10 y 0.20 m para encontrar la humedad residual. En este contexto, el contenido de humedad al momento del muestreo, indicó que en la zona donante a la profundidad de 0.20 a 0.40 m en los surcos 6 y 7, se encontraba cercana a la CC (33.73%) con 31.34% en promedio; mientras en el surco 5 estuvo 3.69% por arriba de su CC; y en el surco 8 fue 4.74% menor respecto a su CC (Cuadro 1).

Por otro lado, en la zona receptora del módulo, el suelo a la profundidad de 0.20 a 0.40 m, el contenido de humedad en los surcos 1, 2 y 3 tuvieron una diferencia de 6.96, 5.65 y 4.23%, respectivamente, por debajo de su CC; y en el surco 4 a la misma profundidad, el contenido de humedad es similar a su CC (Cuadro 1). Sin embargo, en el área del filtro de escurrimientos, el

contenido de humedad a la profundidad de 0.10 a 0.30 m, está por debajo de su PMP en un 4.20% (Cuadro 1), esto se puede atribuir a la demanda de agua por parte de los árboles de durazno, ya que en estas fechas, los frutos iniciaban su crecimiento y son altamente consumidores de agua (Ryugo, 1993). Ante esto, la absorción de agua por la raíces de los árboles de durazno para satisfacer su demanda durante el crecimiento de frutos y el vegetativo, proviene de estratos más profundos (Lott *et al.*, 2003), entre 0.40 y 1.0 m, como lo reporta Torres (2006) y Santiago (2006), en el sistema MIAF con árboles de duraznos en suelos con pendiente somera (5%) y pronunciada (37%), respectivamente.

Características químicas del suelo

Las características químicas del suelo del módulo MIAF en las zonas receptora y donante, indican un pH medianamente ácido a las dos profundidades; la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es baja en las dos zonas, con excepción del surco 6 a la profundidad de 0.20-0.40 m donde es alta. En la zona del filtro de escurrimientos, la CIC a la profundidad 0-0.10 m es muy alta, y está relacionada por la cantidad de materia orgánica acumulada producto del filtro de escurrimientos, lo cual concuerda con lo encontrado por Camas (2011) en una ladera manejada con el sistema MIAF en el estado de Chiapas.

El contenido de materia orgánica (MO) en la zona receptora a la profundidad 0-0.20 m y además en el surco 4 hasta la profundidad de 0.40 m es medio; en la zona donante los surcos 5, 6 y 7 van de contenido bajo a la profundidad de 0.20 m y muy bajo de 0.20-0.40 m en los surcos 6 y 7, para el surco 8 se ve favorecido con un contenido medio a la profundidad de 0.20 m y bajo hasta los 0.40 m. En la zona de la franja del filtro de escurrimientos, el contenido de MO es alto a los 0.10 m de profundidad y medio de 0.10-0.30 m, lo que era de esperarse por la incorporación de residuos para el filtro de escurrimientos.

El contenido de P es medio en los surcos 1 y 2, y bajo en los surcos 3 y 4 a los primeros 0.20 m de profundidad, y a la profundidad de 0.20-0.40 m en los cuatro surcos varía de bajo a trazas. En la zona donante, en los surcos 5, 6, 7 y 8 el contenido de P es bajo en los primeros 0.20 m de profundidad y trazas hasta los 0.40 m; y en la zona del filtro de escurrimientos, es alto a los 0.10 m de profundidad y bajo de 0.10 a 0.30 m, que corresponde al suelo superficial original. El movimiento del suelo con P se debió al laboreo y los escurrimientos, siendo la zona

receptora hasta el muro vivo beneficiados con P proveniente de fertilizantes y de la pollinaza aplicados (Sanyal *et al.*, 2015). Además, en el área del filtro de escurrimientos el contenido alto de P se debió también a la no roturación del suelo, la aplicación continua de fertilizante P₂O₅ y estiércol de pollo a los árboles frutales, lo cual fue reportado por Camas *et al.*, (2012) en el sistema MIAF en Chiapas.

Cuadro 2. Características químicas del suelo en el módulo milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en una ladera en San Cruz, Tlahuitotepec, Oax.

Sección del módulo	Surco	Profundidad (m)	pH ^Z	MO ^Y (%)	N ^X (%)	P ^W (mg kg ⁻¹)	K ^V	Ca ^U	Mg ^T	CIC ^S Cmol (+) kg ⁻¹	Acidez ^R
Receptora	1	0 - 0.20	5.4	2.6	0.13	29.5	1.6	3.9	0.7	12.1	0.8
		0.20 - 0.40	5.8	0.6	0.06	0.4	1.0	4.5	0.9	11.7	0.8
	2	0 - 0.20	5.6	2.5	0.12	16.2	1.1	4.2	0.7	11.6	0.8
		0.20 - 0.40	5.7	0.9	0.06	Tr ^Q	1.0	3.8	0.7	12.2	1.5
	3	0 - 0.20	5.5	2.1	0.12	11.7	1.1	4.4	0.6	12.0	0.8
		0.20 - 0.40	5.5	0.6	0.05	Tr ^Q	0.9	3.6	0.6	9.6	3.2
	4	0 - 0.20	5.5	3.1	0.16	14.7	1.2	4.2	0.6	10.7	0.8
		0.20 - 0.40	5.5	2.4	0.14	0.9	0.9	3.6	0.5	11.7	1.1
Receptora	Área del filtro de escurrimientos	0 - 0.10	6.4	4.0	0.27	52.9	5.0	9.1	1.6	86.1	0.1
		0.10 - 0.30	5.1	2.3	0.13	0.9	1.2	3.2	0.4	14.2	1.6
Donante	5	0 - 0.20	5.4	1.0	0.08	1.0	0.5	1.5	0.3	14.1	2.2
		0.20 - 0.40	5.5	0.8	0.09	Tr ^Q	1.8	1.9	0.7	12.3	2.9
	6	0 - 0.20	5.5	0.9	0.08	1.1	0.9	5.0	0.5	14.6	1.8
		0.20 - 0.40	5.4	0.5	0.04	Tr ^Q	1.5	2.3	0.6	25.5	3.2
	7	0 - 0.20	5.4	1.6	0.09	7.7	0.6	3.5	0.3	14.2	2.1
		0.20 - 0.40	5.5	0.5	0.05	Tr ^Q	0.8	3.4	0.5	10.3	2.6
	8	0 - 0.20	5.4	1.8	0.08	3.4	0.7	4.0	0.5	15.6	1.4
		0.20 - 0.40	5.8	1.3	0.07	Tr ^Q	0.8	6.0	0.7	13.1	0.6

^Z Reacción del suelo. ^Y Materia orgánica. ^X Nitrógeno. ^W Fósforo. ^V Potasio. ^U Calcio. ^T Magnesio. ^S Capacidad de intercambio catiónico. ^R Acidez intercambiable. ^Q Trazas.

El contenido de K en toda la zona receptora es alta en las dos profundidades, mientras en la zona donante en los primeros 0.20 m en los surcos 5 y 7 es medio y en el resto de los

surcos en ambas profundidades es alto. En cuanto al Ca y Mg, en la zona receptora el contenido es bajo y en la zona donante de bajo a muy bajo; sin embargo, en el área del filtro de escurrimientos a los 0.10 m de profundidad es medio (Cuadro 2). La aplicación de pollinaza y P, además de contribuir a neutralizar en parte la acidez intercambiable, aportar fósforo y bases intercambiables, coadyuvaría a mejorar la fertilidad del suelo, como lo reportan, Pool *et al.* (2000) y Vergara *et al.*, (2005).

La acidez intercambiable del suelo en general es menor en la zona receptora respecto a la donante, principalmente a la profundidad de 0 a 0.20 m y en los primeros 0.10 m de profundidad en la zona del filtro de escurrimientos (Cuadro 2). Lo niveles altos de acidez intercambiable normalmente se relacionan con escasez de bases intercambiables y de fósforo (Fassbender, 1986). Por tanto, lo sucedió en la zona receptora del módulo, la acidez intercambiable disminuyó por la aplicación continua de fósforo y el estiércol, principalmente en el en el surco 1, donde tuvo efectos en la disminución de la acidez hasta la profundidad de los 0.40 m, lo anterior permite un sostenibilidad de la fertilidad en un suelo Ultisol como lo reportaron Ojo *et al.* (2015).

Clasificación del suelo

Características morfológicas del suelo

En las partes norte, media y sur de la ladera, el suelo es profundo (> 1.0 m), con estructuras subangulares hasta aproximadamente 0.70 m de profundidad, es friable y de permeabilidad moderada. En la parte norte, el suelo a la profundidad de 0.20 m tiene un color marrón amarillento oscuro y en el resto del perfil el color es marrón oscuro. En la parte media el color marrón amarillento oscuro llega hasta la profundidad de 0.70 m y marrón oscuro en el resto del perfil. En la parte sur, a los 0.20 m de profundidad el suelo es también de color marrón y de ahí en adelante cambia a amarillo pardo.

Estas condiciones morfológicas indican condiciones físicas favorables para el desarrollo de la raíz de las plantas. La presencia de raíces en todo el perfil, constata esto con una mayor proliferación en los primeros 0.30 m.

Cuadro 3. Características morfológicas del suelo en tres puntos del sitio experimental Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color en húmedo	Estructura	Consistencia		Permeabilidad
				Seco	Húmedo	
Ladera cóncava parte Norte						
Ap	0 - 20	10YR4/4	Bloques subangulares	Suelto		Moderada
Bw	20 - 65	7.5YR5/8	Bloques subangulares		Friable	Moderada
Bt	65 - 95	7.5YR5/8	Bloques angulares		Firme	Moderada
Bt ₂	95 - 126	7.5YR5/8	Bloques angulares		Firme	Rápida
Ladera convexa parte media						
Ap	0 - 15	10YR4/4	Bloques subangulares	Suelto		Rápida
Bt	15 - 70	10YR4/4	Bloques subangulares		Friable	Moderada
Bt	70 - 130	7.5YR 5/8	Bloques angulares		Firme	Lenta
Ladera cóncava parte Sur						
Ap	0 - 22	10YR5/3	Bloques subangulares	Suelto		Moderada
Bt	22 - 67	10YR6/6	Bloques subangulares		Friable	Moderada
Bt	67 - 103	10YR6/6	Bloques angulares		Firme	Muy lenta

Características físicas y químicas del suelo

La textura del horizonte Ap en los tres perfiles fue franco arcilloso; en los horizontes Bw, Bt y Bt₂ varió, predominando la textura franco arcillosa y franco limosa, seguido de la arcillosa y arcillo limosa, y migajón arcillo limoso. La densidad aparente en el horizonte Ap fue en general de 1.3 g cm⁻³, de 1.4 en el horizonte Bw y de 1.5 en el Bt, en los tres perfiles.

El contenido de MO y el porcentaje de nitrógeno es mayor en el horizonte Ap y menor y variable en los horizontes inferiores. El pH fue de 4.8 en el perfil de la parte Norte y de 4.2 en

las partes media y Sur, lo que indica que es un suelo fuertemente ácido. En cuanto a los cationes intercambiables, hubo variación. En la parte Norte, la concentración de K fue bajo en el horizonte Ap, media en el Bw y alto en el Bt y Bt₂; en la parte media en los horizontes Ap y Bt fue baja y muy baja en el Bt₂; y en parte Sur, fue muy baja en los tres horizontes. El Ca y Mg son muy bajos en los tres perfiles. Esto indica que, los cationes se han perdido, lo que ha ocasionado una gran variación de saturación de bases con valores de 53.7 hasta 75.8%, y en la capacidad de intercambio de cationes. En la parte Norte, la CIC fue de 11.3 a 9.9 Cmol (+) kg⁻¹ a través de la profundidad, en la parte media fue de 8.4 en el horizonte Ap y de 7.2 Cmol (+) kg⁻¹ en los horizontes Bt y Bt₂; y en la parte Sur, en el horizonte Ap fue de 6.6 hasta 8.0 Cmol (+) kg⁻¹ en Bt₂. Por tanto, la CIC en los tres perfiles es baja.

Cuadro 4. Características físicas y químicas del suelo en la parte Norte, media y Sur del sitio experimental Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Oax.

Horizonte	Profundidad (cm)	Da ^Z (g cm ⁻³)	Textura			pH ^V	MO ^U (%)	N ^T (%)	P ^S (mg kg ⁻¹)	Cationes intercambiables				
			A ^Y ----- % -----	L ^X	R ^W					K ^R	Ca ^Q	Mg ^P	CIC ^O	PSB ^N (%)
Ladera cóncava parte Norte														
Ap	0 - 20	1.3	32.2	36.3	31.5	4.8	5.2	0.06	0.06	0.3	0.6	0.3	11.3	53.7
Bw	20 - 65	1.4	27.6	28.3	44.0	4.7	1.5	0.02	0.06	0.4	0.1	0.1	12.4	40.7
Bt	65 - 95	1.4	38.8	23.9	37.3	4.8	0.7	0.01	0.06	0.7	0.0	0.4	9.9	59.4
Bt ₂	95 - 126	1.7	49.0	23.8	27.2	4.7	0.5	0.01	0.06	0.6	0.0	0.4	9.9	61.3
Ladera convexa parte media														
Ap	0 - 15	1.2	26.1	46.0	27.9	4.2	3.6	0.08	0.06	0.3	0.4	0.4	8.4	74.2
Bt	15 - 70	1.3	20.1	51.5	28.4	4.3	1.3	0.04	0.06	0.2	0.0	0.2	7.2	66.4
Bt ₂	70 - 130	1.5	18.0	41.3	40.8	4.1	0.5	0.00	0.06	0.1	0.1	0.3	7.2	72.5
Ladera cóncava parte Sur														
Ap	0 - 22	1.3	11.1	59.6	29.3	4.0	4.0	0.08	0.06	0.1	0.1	0.1	6.6	75.8
Bt	22 - 67	1.4	10.4	66.6	23.0	4.1	0.8	0.02	0.06	0.1	0.1	0.0	6.8	61.8
Bt ₂	67 - 103	1.5	14.6	61.7	23.7	4.2	0.4	0.02	0.06	0.0	0.5	0.1	8.0	63.1

^Z Densidad aparente. ^Y Arena. ^X Limo. ^W Arcilla. ^V Reacción del suelo. ^U Materia orgánica.

^T Nitrógeno. ^S Fósforo. ^R Potasio. ^Q Calcio. ^P Magnesio. ^O Capacidad de intercambio catiónico.

^N Porcentaje de saturación de bases.

Clasificación

Las características de los tres perfiles corresponden a un epipedón Ócrico de acuerdo con las Claves para la Taxonomía de Suelos (SSS, 2014), dado que cumple con los colores del value en húmedo mayor que 4 en el horizonte Ap (Cuadro 3), con un contenido bajo de carbono orgánico. Además con la cantidad de arcilla acumulada en los horizontes Bt y Bt₂, el suelo es un *Typic Hapludults*, del orden Ultisol, que se caracteriza por presentar un horizonte argílico profundo, en el cual se puede obtener dos cosechas al año. De acuerdo a la Base Mundial del Recurso Suelo (WRB, 2007), se clasifica como un Acrisol Háptico (Crómico).

CONCLUSIONES

En una ladera representativa del agrosistema del municipio de Santa María Tlahuitoltepec, Mixe, Oax., manejada con el sistema MIAF en un periodo de seis años, la zona receptora de sedimentos tuvo modificaciones positivas en las características físicas y químicas respecto a la zona donante, además de la formación de terrazas. Destacando la importancia de aplicar fertilizantes fosfatados y pollinaza, en la mejora de la fertilidad en un suelo fuertemente ácido.

El suelo del agrosistema representativo de la ranchería Santa Cruz, Tlahuitoltepec, Mixe, Oax., se clasifica como *Typic Hapludults* de acuerdo a la Taxonomía de Suelos y Acrisol Háptico (Crómico) según la clasificación de la FAO. Por lo tanto, el agrosistema se considera como de buena productividad.

LITERATURA CITADA

- Andrade, B. O. del C. y Rodríguez, P. O. 2002. Evaluación de la eficiencia de barreras vivas como sistemas de conservación de suelos de ladera. *Bioagro* 14(3): 123-133.
- Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB). 2007. Un marco conceptual para la clasificación, correlación y comunicación internacional. Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Camas, G. R.; Turrent, F. A.; Cortés, F. J. I.; Livera, M. M.; González, E. A.; Villar, S. B.; López, M. J.; Espinoza, P. N. y Cadena, I. P. 2012. Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferentes sistemas de manejo en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(2): 231-243.
- Camas, G. 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 Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. México.
- Cortés, F. J. I.; Torres, Z. J. P; Turrent, F. A.; Hernández, R. E.; Ramos, S. A. y Jiménez, S. L. 2012. Manual actualizado para el establecimiento y manejo del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en Laderas. Colegio de Postgraduados, México.
- Cortés, J. I.; Turrent, A.; Díaz, P.; Jiménez, S.; Hernández, E. and Mendoza, R. 2005. Hillside agriculture and food security in Mexico: advances in the sustainable hillside Management project. pp. 569-588. *In*: R. Lal, N. Uphoff, B. A. Stewart, and D. O. Hansen. *Climate change and global food security*. Taylor and Francis. New York, NY, USA.
- Cortés, J. I.; Mendoza, R.; Hernández, E.; Aceves E.; Turrent, A. y Estrella, N. 2004. Manual para Técnicos. El sistema Milpa Intercalada en Árboles Frutales (MIAF) en terrenos planos. Colegio de Postgraduados, Puebla, México. 70 p.
- Cuanalo, de la C. H. 1981. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 2a ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. México. 40 p.
- Dalton, P. A.; Smith, R. J. and Troung, P. N. V. 1996. Vetiver grass hedges for erosion control on a cropped flood plain: hedge hydraulics. *Agricultural water management* 31: 91-104.

- Etchevers, B. J. D. 1992. Manual de métodos para el análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes. Análisis rutinarios en estudios y programas de fertilidad. Laboratorio de Fertilidad, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. México.
- Fassbender H. W. 1986. Química de suelos, con un énfasis de suelos de América Latina. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura. San José, Costa Rica.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 5ª ed. México D. F. 98 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI). 2010. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Santa María Tlahuitoltepec, Oaxaca.
- Lott, J.; Khan, A.; Black, C. and Ong, C. 2003. Water use in a *Grevillea robusta*-maize overstory agroforestry system in semi-arid Kenya Forest Ecology and Management 180: 45-59.
- Martínez, G. A. y Martínez, D. M. A. 1996. Diseños de experimentos con fertilizantes. Publicación especial 5. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C y Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 155 págs.
- Medina, O. L. E.; Bravo, E. M.; Prat, Ch.; Martínez, M. M.; Ojeda, T. E. y Serrato, B. B. E. 2008. Pérdida de suelo, agua y nutrientes en un Acrisol bajo diferentes sistemas agrícolas en Michoacán, México. Agricultura Técnica en México 34(2): 201-211.
- Ojo, A. O.; Adetunji, M. T.; Okeleye, K. A. and Adejuyigbe, C. O. 2015. Soil fertility, phosphorus fractions, and maize yield as affected by poultry manure and single superphosphate. Hindawi Publishing Corporation. International Scholarly Research Notices. Volume 2015, Article ID 616213, 8 pages.
- Ortiz, S. C. A.; Suástegui, M. E. y Alonso, A. D. 2011. Normales climatológicas 1951-2010. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx.
- Pool, N. L.; Trinidad, S. A.; Etchevers, B. J. D.; Pérez, M. J. y Martínez, G. A. 2000. Mejoradores de la fertilidad del suelo en la agricultura de ladera de los altos de Chiapas, México. Agrociencia 34(3): 251-259.
- Ramos, S. A., Cortés, F. J. I., Turrent, F. A., Jiménez, S. L., Torres, Z. J. P., y Martínez, M. O. 2007. Proyecto Colegio de Postgraduados-Fundación Produce Oaxaca: Investigación

- agronómica y transferencia de tecnología en la fase de escalamiento del PMSL en el estado de Oaxaca. 1ª Etapa
- Ryugo, K. 1993. Fruticultura. Ciencia y arte. Traducción al español de J. Rodríguez A. AGT Editor, S. A. México, D. F. p. 227.
- Salinas, S. R. 2015. Caracterización topográfica, física y de fertilidad de un suelo de ladera manejado con el sistema milpa intercalada con árboles frutales durante cinco años. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco. Edo. de México.
- Santiago, M. E. 2006. Estado nutrimental y rendimiento del duraznero (*Prunus persica* (L) Batsch) en el sistema milpa intercalada con árboles frutales en laderas pronunciadas. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco. Edo. de México.
- Sanyal, S. K.; Dwivedi, B. S.; Singh, V. K.; Majumdar, K.; Datta, S. C.; Pattanayak, S. K. and Annapurna, K. 2015. Phosphorus in relation to dominant cropping sequences in India: chemistry, fertility relations and management options. *Current Science* 108(7): 1262-1270.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-200, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial. México.
- Shibu, J. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems*. 76: 1-10.
- Smith, J.; Pearce, B. D. and Wolfe, M. S. 2012. Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems* 28(1): 80-92.
- Soil Survey Staff (SSS). 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Steppler, H. A. and Nair, P. K. R. 1987. Agroforestry a decade of development. International Council for Research in Agroforestry (ICRAF). Nairobi, Kenya.
- Tornquist, C. G.; Honsb, F. M.; Feagleyb, S, E. and Hagggar, J. 1999. Agroforestry system effects on soil characteristics of the Sarapiquí region of Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 73: 9-28.

- Torres, Z. J. P. 2006. Rendimiento de fruto y calidad de fruto de durazno en función del número de ramas de estructura bajo el sistema milpa intercalada con árboles frutales. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. México.
- Turrent F. A.; Francisco N. N.; Uribe G. F. y Camacho, C. R. 1998. La terraza de muro vivo, tecnología para la explotación prosostenible de laderas roturadas del Trópico subhúmedo de México. *Agricultura Técnica en México*. 24 (1): 67-81.
- Turrent A., Uribe S., Francisco N. y Camacho R. 1995. La terraza de muro vivo para laderas de trópico subhúmedo de México. I Análisis del desarrollo de las terrazas durante 6 años. *Terra* 13(3): 276-298.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2011. Newhall 1.5.1. Natural Resources Conservation Service, Penn State University Center for Environmental Informatics.
- Van Reeuwij, L. P. 1999. Procedimientos para el Análisis de Suelos, versión 1995. Traducido de: Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena, Carlos Arturo Tavares Espinoza y Carlos Alberto Ortiz Solorio. Primera Edición, 1999. Especialidad de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 145 págs.
- 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: 259-266.
- Volke, H. V.; Turrent, F. A. y Castillo, M. A. 2005. Diseños de tratamientos y estimación de funciones de respuesta en la investigación agrícola. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México. 68 págs.

LITERATURA CITADA EN LA INTRODUCCIÓN GENERAL

- Albino, G. R.; Turrent, F. A.; Cortés, F. J. I.; Livera, M. M. y Mendoza, C. M. C. 2015. Distribuciones de raíces y de radiación solar en el dosel del maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*. 49(5): 513-531.
- Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB). 2007. Un marco conceptual para la clasificación, correlación y comunicación internacional. Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Bellow, J. G. 2004. Fruit-tree-based agroforestry in the western highlands of Guatemala: an evaluation of tree-crop interactions and socioeconomic characteristics. Tesis of Doctor of philosophy. University of Florida. 217 págs.
- Calva J. L. 1993. El modelo de desarrollo agropecuario impulsado mediante la ley agraria y el TLC. En: *Alternativas para el Campo Mexicano*. Fontarama S. A. México, D.F. pp. 15-42.
- Caviglia O. P. 2009. La contribución de los cultivos múltiples a la sustentabilidad de los sistemas agrícolas. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. No. 115. pp. 37-47.
- Camas, G. R. 2011. Erosión hídrica, productividad, captura de carbono y uso de la radiación solar y agua en tres agrosistemas de manejo, para agricultura de ladera en el trópico subhúmedo de México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, México.
- Cortés, F. J. I., Turrent, F. A., Díaz, V. P., Hernández, R. E., Mendoza, R. R., y Aceves, R. E. 2005a. Manual para el establecimiento y manejo del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en Laderas. Colegio de Postgraduados. México.
- Cortés, F. J. I., Turrent, F. A., Díaz, V. P., Hernández, R. E., Mejía, A. H., Mendoza, R. R., Ramos, S. A., y Aceves, R. E. 2005b. Informe final. Subproyecto tecnologías alternativas sustentables "TAS", en: Informe de actividades 1999-2005. VII Reunión del comité técnico de coordinación y seguimiento. Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL). Colegio de Postgraduados. México.
- Cortés J. I., Turrent A., Días P., Jiménez S., Hernández E. and Mendoza R. 2005c. Hillside agriculture and food security in Mexico: advances in the sustainable hillside Management project. pp. 569-588. In: R. Lal, N. Uphoff, B. A. Stewart, and D. O.

- Hansen. Climate change and global food security. Taylor and Francis. New York, NY, USA.
- Cruz, L. A.; Martínez, S. T. y Omaña, S. J. M. 2004. Fuentes de fuerza, diversidad tecnológica y rentabilidad de la producción de maíz en México. *CIENCIA ergo sum* 11(3): 275-283.
- Díaz, V. P.; Cortés, F. J. I.; Turrent, F. A.; Ortiz, S. C. A. y Martínez, G. Á. 2004. La etnoagricultura en laderas de México y su reingeniería para su reconversión sustentable. Subproyecto tecnologías alternativas sustentables "TAS". Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL). Colegio de Postgraduados. México.
- 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 de suelo. *Terra Latinoamericana*. 24:253-260.
- Francis, C. A. 1986. Multiple cropping systems. Macmillan Publishing Company. University of Nebraska, Lincoln.
- Franzel, S. and Scherr, S. J. 2002. Trees on the Farm: Assessing the Adoption Potential of Agrforestry Practices in Africa, CAB International, Wallingford, UK. 189 págs.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007a. Censo Agropecuario 2007. VIII Censo agrícola, Ganadero y Forestal. Entidad Federativa y Municipio.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007b. Censo Agropecuario 2007. VIII Censo agrícola, Ganadero y Forestal. Entidad Federativa Oaxaca.
- Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI). 2010. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Santa María Tlahuitoltepec, Oaxaca.
- León, M. A. y Jiménez, S. L. 2001. Diagnóstico socioeconómico de la línea base en la Región Mixe, Oaxaca, México, 2000. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, Edo. México.
- Lott, J., A. Khan, C. Black, and C. Ong. 2003. Water use in a Grevillea robusta-maize overstory agroforestry system in semi-arid Kenya *Forest Ecology and Management* 180: 45-59.
- Mead, R. and R. W. Willey. 1980. The concept of a 'Land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture* 16: 229-239.
- Nair, P. K. R. 1997. Agroforestería. Primera edición en español. Universidad Autónoma Chapingo. México. 541 p.

- Plan Nacional de Desarrollo (PND). 2013. Gobierno de la República, 2013-2018. Estados Unidos Mexicanos.
- Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL) 1999. Subproyecto III: Tecnologías alternativas sustentables.
http://www.colpos.mx/proy_rel/ladera/SubCResultadosA.htm#ARendimiento
- Ramos, S. A., Cortés, F. J. I., Turrent, F. A., Jiménez, S. L., Torres, Z. J. P., y Martínez, M. O. 2007. Proyecto Colegio de Postgraduados-Fundación Produce Oaxaca: Investigación agronómica y transferencia de tecnología en la fase de escalamiento del PMSL en el estado de Oaxaca. 1ª Etapa
- Ruiz, V. J., y Loaeza, R. G. 2004. Validación del método de siembra en surcos alternos para la asociación de maíz-frijol en Valles Centrales de Oaxaca. *Naturaleza y Desarrollo*. 2(1): 13:17.
- Ruíz, M. A. D.; Jiménez, S. L.; Figueroa, R. O. L. y Morales, G. M. 2012. Adopción del sistema milpa intercalada con árboles frutales por cinco municipios mixes del estado de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(8): 1605-1621.
- Salinas, S. R. 2015. Caracterización topográfica, física y de fertilidad de un suelo de ladera manejado con el sistema milpa intercalada con árboles frutales durante cinco años. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco. Edo. de México.
- Turrent A. 1986. Estimación del potencial productivo actual de maíz y frijol en la República Mexicana. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Uribe, G. S.; Francisco, N, N. y Turrent, F. A. 2002. Pérdida de suelo y nutrimentos en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36: 161-168.
- 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: 259-266.