



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD
INSTITUTO DE ECOLOGÍA
RESTAURACIÓN AMBIENTAL

Indicadores de calidad del suelo y productividad en cultivos de maíz
bajo diferentes tipos de manejo: una integración entre la percepción de
los productores y la ecología funcional de las plantas y suelos

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:

FABIOLA ESTRADA SALINAS

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Julieta A. Rosell García

Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dra. Ana Elena Escalante Hernández

Laboratorio Nacional de Ciencia de la Sostenibilidad

Dra. Bárbara Ayala Orozco

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad

Dra. Mariana Benítez Keinrad

Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, enero 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

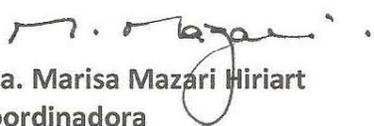
Coordinación de Estudios de Posgrado
Ciencias de la Sostenibilidad
Oficio: CEP/PCS/394/17
Asunto: Asignación de Jurado

Lic. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su trigésima sesión del 14 de noviembre del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **ESTRADA SALINAS FABIOLA** con número de cuenta **305042086** con la tesis titulada "Indicadores de calidad del suelo y productividad en cultivos de maíz bajo diferentes tipos de manejo: una integración entre la percepción de los productores y la ecología funcional de las plantas y suelos", bajo la dirección de la Dra. Julieta Alejandra Rosell García.

PRESIDENTE:	DRA. ANA LAURA WEGIER BRIUOLO
VOCAL:	DRA. AYARI GENEVIEVE PASQUIER MERINO
SECRETARIO:	DRA. ANA ELENA ESCALANTE HERNÁNDEZ
SUPLENTE 1:	DRA. BÁRBARA AYALA OROZCO
SUPLENTE 2:	DRA. JULIETA ALEJANDRA ROSELL GARCÍA

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 8 de enero de 2018.


Dra. Marisa Mazari Hiriart
Coordinadora
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

AGRADECIMIENTOS

Al posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México (**UNAM**).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACyT**) por el apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría.

Al Programa de Apoyo a Estudiantes de Posgrado (PAEP), por el apoyo económico para la participación en la XI Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, llevado a cabo en la Habana, Cuba, en julio de 2017.

Gracias al apoyo económico otorgado al proyecto **CONACyT 247672**, " biodiversidad y ecología funcional de suelos: conservación y resiliencia en sistemas naturales, agroecológicos y agroforestales" a cargo de la **Dra. Mariana Benítez Keinrad** y del cual forma parte este trabajo.

A los técnicos del proyecto CONACyT 247672: Rodrigo González Chauvet, Adriana Uscanga Castillo y Denise Arroyo Lambaer por su ayuda en la obtención de los datos de campo.

A los alumnos de servicio social: Guadalupe Vázquez Solís (pasante de Ciencias de la Tierra), Valeria Vázquez Barrios (pasante de Biología), Blanca Estela Hernández Hernández (pasante de Biología), Víctor Manuel Piña Tejeda (pasante de Biología), Yolotli Amelia Narváez Carreño (pasante de biología) y Diana Karen Ysimoto Monroy (Pasante de Biología) por su ayuda en la obtención de las muestras en campo y su procesamiento.

Al Dr. Victor Peña Ramírez por la realización de los perfiles edáficos de las parcelas de estudio y su procesamiento, así como por su ayuda y orientación para la realización de este trabajo.

A los productores de Guarapo y San Felipe, dueños de las parcelas de trabajo, quienes nos recibieron amablemente, nos permitieron trabajar en sus parcelas y, además, compartieron su conocimiento y experiencia del trabajo en campo.

A mi comité tutorial: Dra. Julieta A. Rosell García, Ana Elena Escalante Hernández, Mariana Benítez Keinrad y Bárbara Ayala Orozco por su asesoramiento, comentarios y guía durante la realización de esta tesis.

A los miembros de jurado: Dra. Ana Laura Weiger Briulo, Dra. Ayari Genevieve Pasquier Merino, Dra. Ana Elena Escalante Hernández, Dra. Bárbara Ayala Orozco y Julieta Alejandra Rosell García que con sus retroalimentación enriquecieron mi trabajo.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Quiero agradecer a la **Dra. Julieta A. Rosell García** por todo el apoyo y esfuerzo invertido para sacar adelante este trabajo. Por todos sus comentarios realizados, siempre constructivos, que buscaban hacer crecer mi trabajo. Gracias por alentarme a seguir adelante y no rendirme, pero sobretodo, gracias por dejarme conocerla más allá de lo académico, por siempre tener tiempo para escuchar, compartir momentos alegres y reír de las simpleces de la vida. Este trabajo es un logro mutuo.

Al mejor equipo del posgrado: **Juanita, Yut, Eliud, Alex, Juan y Cris** que siempre tenían algo nuevo que enseñarme. Les quiero

A todos mis compañeros y amigos que hice a lo largo del tiempo en que se desarrolló este trabajo: **Karen, Cipa, Sandra y Pao** y que de una u otra manera aportaron ideas y mucho ánimo a esta personita. Gracias por las buenas vivencias.

A mis amigos que no me han dejado a pesar del tiempo y la distancia: **Ana, Angie, Isa, Uriel, Laura, Annayantzy y Liz**. Les quiero mucho

A **Isa**, porque sigues siendo esa buena amiga que tengo desde hace ya muchos años. Gracias por el apoyo en todos los sentidos. Te quiero.

A **Lupis**, porque en cuanto llegaste hiciste mi estancia más amena. Encontré a alguien igual que yo que me hizo pasar mucho mejor este proceso. Gracias por tu apoyo tanto en lo académico como en lo personal, por las charlas y risas escandalosas. Eres un gran ser humano, y una muy muy muy buena amiga y ya sabes que te quiero.

DEDICATORIAS

A mis papás: Gracias por darme las mejores alas para poder volar muy lejos pero también gracias por darme las mejores raíces para nunca olvidar de donde vengo. Gracias por alentarme siempre y creer en mí, cuidarme y amarme. Gracias por todo su apoyo, este logro es gracias a ustedes. Los quiero mucho.

A mi hermana; Yanet y Marisol: Porque siempre han sido mi ejemplo a seguir, mi ejemplo de constancia y de lucha.

A mi abuela Mary: Por su apoyo, comprensión y cariño

A mis sobrinas Hanna Paola, Maryan Camila y la más reciente, Tania: Porque ustedes, con sus travesuras y sus sonrisas, me regalan muchos momentos lindos y una nueva forma de apreciar la vida.

A Christian: Por ser mi compañero y cómplice de vida, por quererme, cuidarme y animarme a seguir adelante. Gracias por todo tu apoyo, comprensión y ayuda en todos los aspectos. Gracias porque a pesar del tiempo aún sigues aquí escuchándome cuando lo necesito. Gracias por seguir formando parte de mi vida y dejarme seguir formando parte de la tuya. Te quiero más que antes. **Gracias a tus papis y hermanas** que se han portado súper conmigo, me apoyan, animan y orientan haciéndome sentir parte de la familia. Este logro también es gracias a ustedes.

“Enseña a tus hijos lo que nosotros enseñamos a los nuestros, que la tierra es nuestra madre. Todo lo que le sucede a la tierra les sucederá a los hijos de la tierra. Si los hombres escupen en la tierra, escupen sobre sí mismos. Al menos nosotros sabemos esto: la tierra no pertenece al hombre, el hombre pertenece a la tierra”

Jefe Seattle

Resumen	1
I. Introducción	2
1.1. Degradación del suelo	3
1.2. El Maíz, un cultivo clave a nivel nacional	5
1.3. Indicadores de calidad o salud de suelo y productividad.....	6
1.4. Rasgos funcionales de plantas como indicadores potenciales de calidad y productividad en agroecosistemas	8
1.5. Importancia del conocimiento y percepción de los expertos locales en la generación de los indicadores.....	9
II. Justificación	12
III. Objetivo	12
3.1 Objetivo general	12
3.2 Objetivos particulares del componente ecológico.....	12
3.3 Objetivos particulares sobre el componente de percepción	12
IV. Hipótesis	13
V. Materiales y métodos	14
5.1 Características de los sitios de estudio.....	14
A. Componente ecológico:	15
1. Selección de individuos y colecta de muestras biológicas.....	15
2. Medición de rasgos funcionales.....	17
3. Análisis de variables físicas y químicas del suelo	24
4. Análisis estadístico de los rasgos funcionales.....	24
B. Componente social	25
1. Análisis de la percepción de los expertos locales	25
2. Preguntas guía.....	25
3. Elaboración de tarjetas para asignar dirección en los estados de los indicadores.....	25
4. Realización y análisis de las entrevistas semiestructuradas	26
VI. Resultados	27
A. Componente ecológico	28
1. Asociación entre rasgos funcionales y variables edáficas	28

2. Asociación entre rasgos funcionales y variables de productividad	31
3. Asociación de rasgos funcionales entre órganos.....	34
B. Componente social.....	36
1a. Percepción de la salud del suelo	36
1b. Percepción de la productividad	36
2. Dirección de uso de los rasgos funcionales por los agricultores	37
3. Análisis de frecuencia de las características del maíz con mayor uso.....	44
VII. Discusión.....	46
A. Rasgos funcionales como indicadores de calidad de suelo y productividad.....	46
B. Percepción de los expertos locales en la generación de indicadores como objetos de frontera.....	49
VIII. Conclusión	51
IX. Referencias	52
Anexo A. Componente Ecológico.....	61
Anexo B. Componente Social	74

Resumen

Los altos niveles de degradación del suelo causados por los modos de producción actuales demandan la búsqueda de indicadores para un monitoreo preciso del suelo en agroecosistemas. Dada su estrecha relación con el suelo, las características funcionales de las plantas tienen gran potencial como indicadores de calidad del suelo. Se examinaron rasgos funcionales (RF) del maíz como indicadores de calidad de suelo en sistemas de producción bajo diferentes tipos de manejo. Estos indicadores se complementaron con el conocimiento local sobre características del maíz que reflejan las condiciones del suelo. Se colectaron muestras de raíz, tallo y hojas en dos localidades de Guanajuato, Guarapo y San Felipe, México. Se analizaron rasgos funcionales involucrados en la relación planta-suelo, así como variables edáficas (físicas y químicas). El conocimiento local se examinó a través de entrevistas semiestructuradas. Se realizaron ANOVAs anidadas para comparar los rasgos funcionales entre tipos de manejo y regiones, y análisis de correlación y regresión entre rasgos y las variables edáficas. Las entrevistas fueron transcritas para conocer e identificar las características que los agricultores observan en el maíz para identificar la salud del suelo y la productividad de la parcela y guiar así el manejo de sus parcelas. Se encontraron relaciones entre características del suelo y rasgos funcionales del maíz, p.ej. el área foliar específica y las concentraciones de nutrientes del suelo. Además, hubo un grado de coincidencia entre los indicadores usados por los productores y los sugeridos por los rasgos del maíz, principalmente aquellos relacionados con las estructuras aéreas como los tallos y las hojas. Los rasgos funcionales integrados con el conocimiento local pueden resultar en buenos indicadores de calidad del suelo que permita la conservación y el manejo sostenible de los suelos agrícolas.

I. Introducción

La crisis alimentaria es un fenómeno complejo provocado por la interacción de factores ambientales, económicos y sociales (Geist y Lambin, 2004; Reynolds *et al.*, 2007). Aunque en la actualidad se produce suficiente alimento para satisfacer la demanda alimentaria de la población (Torres, 2011), la monopolización del sistema alimentario del país influye en la distribución, precios y acceso a los productos, afectando, generalmente, a pequeños y medianos productores y agudizando condiciones de pobreza (Wittma *et al.*, 2010; Torres, 2011; Lazos-Chavero, 2012; Holt-Giménez, *et al.*, 2013). Aunado a esto, los modos de producción no sostenible en los sistemas agrícolas tienen un papel preponderante para agravar esta crisis (Lüdeke *et al.*, 2014). La mayor parte de la población que vive en condición de pobreza habita en zonas rurales de países en desarrollo y dependen de la agricultura para su subsistencia (FAO, 2015). Factores de pobreza, marginación y discriminación aumentan la posibilidad de que los agroecosistemas, especialmente su componente de suelos, sean sobreexplotados en un esfuerzo por elevar la producción y satisfacer las necesidades básicas (alimentarias y económicas) (Corbeels *et al.*, 2000; FAO, 2015).

Procesos de uso intensivo de los agroecosistemas han generado cambios negativos en ellos. Como resultado de esto, se reconocen varios síndromes de cambio global para estos sistemas (Lüdeke *et al.*, 2014), entre ellos el de Revolución Verde, resultante del auge en el uso de agroquímicos para elevar la producción de alimentos a partir de la década de los 60's. Si bien la Revolución Verde logró evitar la hambruna a gran escala, su implementación indiscriminada provocó un grave deterioro en los suelos agrícolas (Lüdeke *et al.*, 2014). Este proceso (síndrome) ha generado una espiral de desarrollo no sostenible, en el cual se da una retroalimentación negativa entre la degradación del suelo, el empobrecimiento, la discriminación y la marginación social (Geist y Lambin, 2004; Cotler *et al.*, 2007). Esta estrecha interacción, entre la situación del suelo y aspectos sociales, hace evidente la fuerte relación del componente ecológico y el componente social en los agroecosistemas dado que son sistemas socioecológicos complejos (Altieri y Toledo, 2011; Casanova-Pérez *et al.*, 2015).

Los agroecosistemas, como sistemas socioecológicos (SSE) complejos, proveen numerosos servicios ecosistémicos (SE; Altieri y Toledo, 2011). Estos sistemas involucran aspectos culturales, sociales, políticos, económicos y ecológicos embebidos en tres grandes componentes: el social, el económico y el ecológico (Resilience Alliance, 2015, Petrosillo *et al.*, 2015). Además, los agroecosistemas son sistemas acoplados con componentes que interactúan estrechamente y coevolucionan en un mismo tiempo y espacio (Farhad, 2012). Cualquier proceso ocurrido en uno de los sistemas modifica la estructura del otro, produciéndose ajustes simultáneos y continuos (Resilience Alliance, 2015). Los sistemas agrícolas proveen una gran variedad de bienes y SE, entre ellos: la regulación del almacenamiento y flujo de agua superficial y subterránea; hábitat para plantas, animales y microorganismos; amortiguador y/o filtro de contaminantes químicos y la provisión de alimentos, entre otros (Pieri *et al.*, 1995; MEA, 2005; López-Falcón, 2002). Malas prácticas en el manejo de los agroecosistemas, como el uso intensivo de agroquímicos y la intensificación de las técnicas de manejo, ponen en riesgo el bienestar social, económico y ecológico y la sostenibilidad de estos sistemas a largo plazo (SEMARNAT, 2010; CONAFOR, 2014). Por ello, es indispensable monitorear las condiciones del suelo, específicamente su calidad, con la finalidad de conocer su condición y tomar decisiones de

manejo informadas. Para lograr un monitoreo eficiente es necesario encontrar buenos indicadores que permitan determinar si las presiones derivadas de las actividades humanas y las acciones encaminadas a detener o revertir el deterioro del suelo avanzan por el camino correcto (OECD, 1998; SEMARNAT, 2005 y 2010; CONAFOR, 2014).

Actualmente existen diferentes tipos de indicadores para evaluar la calidad y fertilidad del suelo con el fin de conocer su grado de degradación. Como cualquier indicador, los indicadores de calidad de suelo son variables concretas y medibles que permiten inferir el estado de fertilidad del suelo (Acton y Padbury, 1993). En general, los indicadores proporcionan información concisa de manera que puedan ser entendidos y usados fácilmente para la toma de decisiones (ODCE, 1998). Además, son instrumentos esenciales para el monitoreo continuo del progreso de las acciones encaminadas a la restauración y, en el mejor de los casos, a la sostenibilidad de un SSE y la prestación de un determinado servicio ecosistémico (OECD, 1998; SEMARNAT, 2005 y 2010; CONAFOR, 2014). Los indicadores de calidad de suelo en uso actualmente se basan, en su mayoría, en aspectos físicos y químicos del suelo. Pocos indicadores se han elaborado a partir de aspectos biológicos y los que hay se centran en la presencia de lombrices y microorganismos como indicadores (p.ej. USDA, 2015). Las plantas como indicadoras de calidad y fertilidad del suelo han sido poco consideradas en la búsqueda de indicadores, aun cuando estas interactúan directamente con el suelo y pueden reflejar las condiciones de éste, y a pesar de que podrían ser indicadores fáciles de medir.

En la práctica, la implementación eficiente de un indicador depende del valor de uso y la percepción que tengan los usuarios del mismo. Por ello, los diferentes actores (comunidad científica y expertos locales) deben integrar su conocimiento en la generación de los indicadores (Díaz *et al.*, 2010; Cáceres *et al.*, 2015). Hasta hace poco, el conocimiento de los agricultores (expertos locales) sobre la calidad y fertilidad del suelo había sido poco considerado por los investigadores por ser considerados como subjetivo o empírico (Desbiez *et al.*, 2004; Pulido y Bocco, 2014). Sin embargo, con el uso creciente de los enfoques de investigación participativa, se ha hecho evidente que los agricultores tienen una capacidad bien desarrollada para percibir deficiencias en el nivel de calidad entre y dentro de los agroecosistemas (Desbiez *et al.*, 2004).

En la actualidad, la seguridad y la soberanía alimentaria (base de la soberanía económica, cultural y política) dependen, en gran medida, de la capacidad que tenga un país de producir alimentos suficientes y sanos, y de mantener esta capacidad en el largo plazo. Para alcanzar esta meta es indispensable implementar prácticas de manejo que conserven el suelo. La evaluación de estas prácticas tiene que pasar por un monitoreo preciso de las condiciones del suelo. Este monitoreo debe basarse en la integración de conocimiento local y conocimiento científico que permita crear indicadores integrales y que permitan la toma de decisiones encaminadas al uso sostenible del suelo de los agroecosistemas (Díaz *et al.*, 2011; Cáceres *et al.*, 2015). Es justamente este el objetivo central de este trabajo, que propone indicadores eficientes, de bajo costo y fácil implementación a partir de integrar el conocimiento científico y el conocimiento de los expertos locales sobre características funcionales de las plantas y su relación con el suelo.

1.1. Degradación del suelo

El suelo es un sistema compuesto de elementos minerales y orgánicos que interactúan en procesos físicos, químicos y biológicos, dando lugar a diferentes niveles de organización tanto espaciales

como temporales (Bracamontes-Nájera *et al.*, 2016). El suelo constituye un sistema abierto, con entradas de tipo atmosféricas y salidas que pueden ser superficiales y manifestarse en forma de escurrimiento y erosión. (Cotler *et al.*, 2007). El suelo también se modifica de acuerdo a la forma en que es manejado según los valores económicos y culturales de los individuos (Bracamontes-Nájera, *et al.*, 2016). La evolución del suelo es constante pero con lapsos que fluctúan de cientos a miles de años, lapso temporal que es requerido para la formación de algunos pocos centímetros de suelo. Este lapso de tiempo hace que se considere al suelo como un recurso natural no renovable (Cotler *et al.*, 2007; SEMARNAT, sf). Por ello, es necesario contar con objetos de vigilancia (indicadores) de la condición del suelo que permitan identificar cuáles pueden ser las mejores prácticas de manejo para evitar procesos de degradación en el suelo (CONAFOR, 2014).

En México, existe una gran diversidad de suelos. Esta diversidad puede explicarse por la interacción de diversos factores, entre los que se encuentra la compleja topografía, el amplio gradiente latitudinal, y los diferentes tipos de clima (SEMARNAT, sf). De acuerdo con INEGI (2007), en México existen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2007). En el país son dominantes los Leptosoles (28.3% del territorio), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.75%), Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8.6%) que, en conjunto, ocupan el 81.7% de la superficie nacional. Además de diversos, los suelos en México presentan un grado importante de degradación.

Se considera degradación del suelo a cualquier forma de alteración o afectación de su potencial natural, ya sea temporal o permanente, que repercute en la integridad de los ecosistemas (naturales y manejados). Esta afectación de la integridad reduce la productividad de los suelos, limitando su capacidad de recuperación y disminuyendo su riqueza biológica (Gef, 2006), así como la capacidad actual y/o futura para sostener la vida humana (Oldeman *et al.* 1990). Algunos estudios citan que el 90.7% de la superficie nacional presenta algún tipo de degradación de suelo, en donde el 24.3% corresponde a un tipo de degradación ligera, el 17.2% a una degradación moderada, el 38.4% a una degradación severa y el 9.4% a una degradación extrema (CONAFOR, 2014). Otros estudios sugieren que el 45% de los suelos en México presenta degradación por la acción humana (SEMARNAT-Colegio de Postgraduados, 2002 en Cotler *et al.*, 2007).

Las causas de degradación del suelo son múltiples y pueden ser derivadas de procesos naturales, antrópicos o una combinación de ambos tipos (SEMARNAT, 2010). Cuando los procesos de degradación ocurren sin que el hombre interfiera, generalmente se produce a una velocidad en equilibrio con la velocidad de restauración natural. Cuando la degradación del suelo es acelerada comúnmente es resultado de la intervención humana (Zavala-Cruz *et al.*, 2011), sobre todo como resultado del mal manejo, la deforestación, el sobrepastoreo y las prácticas agrícolas. Durante el siglo XX, la aplicación de nuevas tecnologías y de prácticas agrícolas intensivas basadas en un alto consumo de insumos generó una profunda transformación en la agricultura. Si bien esta transformación se materializó en mejores rendimientos, también trajo consigo cuestiones adversas de erosión del suelo, salinización, contaminación del suelo, desertificación, pérdida de biomasa y reducciones progresivas de la productividad (Altieri, 1994; FAO, 2007; Ortega, 2009, SEMARNAT, 2010). Además, el acelerado crecimiento poblacional constituye una presión de uso sobre los recursos naturales. Esto se ha traducido en una intensificación de cultivos en zonas agrícolas, en sobrepastoreo, extracción de leña y deforestación como mecanismo de expansión de la frontera agrícola, muchas veces hacia zonas

marginales y con bajo potencial. Otro aspecto poco mencionado y con un papel preponderante en la degradación de suelos se relaciona con el impacto de las políticas públicas (Cotler *et al.*, 2007). Por un lado, han funcionado como incentivo hacia la degradación, promoviendo el uso intensivo y poco sustentable de los recursos; y por el otro, han promovido la productividad, enmascarando procesos de degradación mediante el uso de tecnologías (fertilizantes, maquinaria, agroquímicos, sistemas de riego, entre otros), dando como resultado un sentido temporal de seguridad productiva (Cotler *et al.*, 2007, SEMARNAT, 2010).

El deterioro del suelo afecta en mayor medida a la población que habita en las zonas rurales y que basa la mayor parte de su ingreso en las actividades agropecuarias. Estos efectos se incrementan si los campesinos son pobres y no tienen acceso a tecnología, créditos, u otros ingresos. Si bien no existen estudios que explícitamente demuestren la relación directa entre el deterioro del suelo y la pobreza, es reconocido que la degradación del suelo impacta negativamente a la producción y se ha documentado la asociación entre la migración y el deterioro en la calidad de los recursos naturales, principalmente la del suelo (Ramírez Mocarro, 1998).

La degradación del suelo ha sido uno de los principales problemas ambientales globales del siglo XX, teniendo consecuencias directas sobre la seguridad alimentaria, la pobreza, la migración y la calidad del ambiente (SEMARNAT, 2010). La complejidad de este fenómeno, su intensificación y su expansión han llevado a plantear estrategias para monitorear y tratar de detener y revertir el grado de impacto que sufren los ecosistemas (Gef, 2006). Dado el nivel de degradación del suelo en el país, es necesario desarrollar herramientas de monitoreo (indicadores) con base en el conocimiento científico y el conocimiento local que permitan vigilar la calidad del suelo (Bracamontes-Nájera *et al.*, 2016). Para tener un efecto nacional, sería deseable que estas herramientas de monitoreo se incorporaran en políticas públicas y programas que atiendan la pérdida del potencial productivo de los agroecosistemas y que mejoren la calidad de vida y el entorno ecológico de las comunidades que hacen uso de este recurso (CONAFOR, 2014).

1.2. El Maíz, un cultivo clave a nivel nacional

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial (Weng-Zeng *et al.*, 2012). Tuvo su origen en América Central, probablemente en México, de donde se distribuyó hacia el norte hasta Canadá y hacia el sur hasta Argentina (Serratos-Hernández, 2009). La evidencia más antigua del maíz, de aproximadamente 7000 años de antigüedad, ha sido encontrada en el valle de Tehuacán, Puebla, México. De las 346 razas de maíz reportadas en el continente americano, por lo menos 50 se encuentran en México (Maurico-Sánchez *et al.*, 2004). Este cereal era un artículo esencial en las civilizaciones mesoamericanas, y tuvo un importante papel en sus creencias religiosas, festividades y nutrición (FAO, 1993; Serratos-Hernández, 2009). A finales del siglo XV, tras la colonización del continente americano, el maíz fue introducido en Europa a través de España. Desde ahí se difundió por los lugares de climas cálidos del Mediterráneo y posteriormente a Europa (FAO, 1993).

Desde el punto de vista económico, el maíz es el segundo cultivo a nivel mundial por producción después del trigo, y es el cereal con mayor rendimiento de grano por hectárea. El maíz se cultiva en todas las regiones del mundo aptas para la agricultura, desde regiones a nivel del mar hasta a más de 4000 msnm (Mangelsdorf y Reeves, 1939 en FAO, 1993; Paliwal, 2001). Su valor nutricional es superior a

otros cereales como el arroz y el trigo, siendo más rico en grasas, hierro y contenido de fibra (Paliwal, 2001a). Es usado en un número mayor de formas que cualquier otro cereal. Si bien la producción de grano es la razón principal del cultivo del maíz, todas las partes de la planta (hojas, tallos y olotes) son utilizadas para diversos fines (Watson, 1988). Las principales formas de uso son el consumo humano, como alimento para animales (forraje) y materia prima para la industria. Además, su descomposición sirve de abono para el suelo (FAO, 1993; Paliwal, 2001a,2011). El grano es utilizado como alimento directo, en tortillas, o bien, como harinas, azúcares y aceites, que a su vez son usadas en una amplia variedad de alimentos. En la agricultura de subsistencia, el maíz continúa siendo un cultivo alimentario básico, mientras que la mayor parte de la producción de los países en desarrollo se destina al consumo humano, la de los países desarrollados se dedica para la elaboración industrial y para forraje (FAO, 1993).

El maíz, además de poseer un fuerte contenido cultural, es el alimento básico en México (Massieu-Trigo y Lechuga-Montenegro, 2002). En México, el maíz está presente en todos los estados, los climas y en todas las altitudes. Se siembran diversas variedades y se consume de distintas formas. Es el principal cultivo, tanto por la superficie que se siembra, como por el volumen de producción que se obtiene (SAGARPA, 2016; SIAP, 2017, 217a). Desde la perspectiva productiva, se ubica como el principal cereal cultivado, por encima del sorgo, el trigo, la cebada, el arroz y la avena, representando el 85% del volumen nacional de cereales (SAGARPA, 2016). Además, para los años 2012 y 2013 el maíz participó con el 18% del valor de la producción del sector agrícola con 88 mil mdp y 78 mil mdp, respectivamente (SHCP, 2014). Para el 2016 concentró el 56% de la superficie sembrada del territorio nacional (SIAP-SAGARPA, 2017). El rendimiento nacional alcanzó en promedio 6.51 ton/ha, siendo el rendimiento de temporal de 1.91 ton/ha y el de riego de 9.2 ton/ha (SIAP-SAGARPA; 2017a). El maíz es parte de la cultura nacional, un bien intercambiable y un alimento básico de la población, lo cual le confiere un papel central en la seguridad alimentaria (Massieu Trigo y Lechuga-Montenegro, 2002). En la actualidad, el mundo se enfrenta al gran reto de proporcionar seguridad alimentaria a una población cada vez mayor (Weng-Zeng *et al.*, 2012), por lo cual cobra relevancia el cuidar los suelos de los agroecosistemas dada su importancia para la sobrevivencia y prosperidad de la población (Cotler *et al.*, 2007).

1.3. Indicadores de calidad o salud de suelo y productividad

Este trabajo se centra en la búsqueda de indicadores de calidad de suelo, un concepto muy cercano al de salud de suelo, ambos estrechamente ligados y utilizados indiscriminadamente (Karlen *et al.*, 2001; Etchevers *et al.*, 2009). Johnson *et al.* (1997) definen la *calidad del suelo* como el conjunto de medidas de la condición o estado del suelo en relación con los requisitos de una o más especies bióticas y/o cualquier necesidad o propósito humano, resaltando que los suelos proporcionan diversos usos y funciones para los seres humanos (Magdoff, 2001). La *salud del suelo*, por su parte, es un término que se aplica en agroecosistemas y es análogo al concepto de salud humana en el que ciertas características deben estar dentro de determinados rangos para que un individuo se considere sano. De igual forma, en el suelo existen características que deben estar dentro de ciertos rangos para que las plantas crezcan sanas (Magdoff, 2001). En general, la salud del suelo es definida como la capacidad continua del suelo para funcionar como un sistema vivo y vital, dentro de los límites del ecosistema y el uso del suelo (Pankhurst *et al.*, 1997; Karlen *et al.*, 2001). Este concepto reconoce la existencia de atributos ecológicos de la tierra (ej. de nutrientes, microorganismos, asociaciones simbióticas en las raíces, retención de

nutrientes, etc.) que permiten obtener la productividad biológica, promover la calidad del ambiente, aire y agua, mantener plantas, animales y la salud humana y que tienen implicaciones más allá de la capacidad para producir un cultivo en particular (Kinyangi, 2007; FAO, 2008). En este trabajo, se utilizará el término calidad de suelo por ser más cercano a los objetivos de describir las condiciones que posibilitan la producción de maíz en agroecosistemas.

Las condiciones del suelo pueden monitorearse a través de indicadores basados en las propiedades y dinámicas del mismo. En general, un indicador es un o valor que proporciona información para describir el estado de un fenómeno con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro mismo (OECD, 2003). La naturaleza de los indicadores les confiere dos grandes virtudes: primero, la capacidad de simplificar sustancialmente la visión de un fenómeno o situación, y segundo, la posibilidad de comunicar, de una manera sencilla, información científica y técnica a múltiples sectores (OECD, 2003). De acuerdo con Doran y Safley (1997, en USDA, 2015) y Pankhurst *et al.* (1997), un indicador de calidad del suelo debe 1) ser interpretable, 2) correlacionarse con procesos ecosistémicos, 3) integrar propiedades y dinámicas físicas, químicas y biológicas del suelo, 4) ser accesible a múltiples usuarios, 5) ser sensible a cambios, 6) ser reproducible, 7) tener baja variabilidad espacial y temporal, 8) ser fácil de muestrear y analizar. Además, un indicador debe fungir como objeto de frontera que permita una comunicación efectiva de la información (tanto a la sociedad como a los tomadores de decisiones) para transformar el conjunto de datos en acciones específicas (Cash *et al.*, 2003).

Los indicadores de calidad y fertilidad del suelo como objetos de frontera en los agroecosistemas son herramientas que generan puentes de comunicación entre diversos sectores (p.ej. científico y expertos locales) en un problema socioecológico determinado (Bojórquez, 2011). Los indicadores permiten comunicar, traducir y mediar el conocimiento para la gestión de un determinado servicio ecosistémico, en este caso la provisión de alimentos (Cash *et al.*, 2003). Deben ser útiles para los diferentes sectores involucrados en la problemática (Guston, 2001), deben ser suficientemente plásticos para ser adaptados a distintas necesidades locales (Star y Griesemer 1989), y deben tener un alcance que satisfaga los requerimientos de información entre los diferentes sectores, además de ser una herramienta de traducción entre dichas comunidades (Pickering, 1992). Los indicadores son eficaces cuando realzan la relevancia del servicio ecosistémico que se va a evaluar (van Bodegon y Price, 2014), además de la credibilidad y la legitimidad de la información que producen (Guston, 1999; Andrews, 2002; Cash *et al.*, 2003). Los indicadores motivan acciones específicas que van desde un movimiento de la sociedad hacia la concientización y acción en relación con una problemática ambiental específica, hasta acciones de gobierno encaminadas al diseño e implementación de estrategias para la solución de un problema. Los indicadores son también útiles para la evaluación del alcance de los objetivos y metas planteados en dichas estrategias (Etchevers *et al.*, 2009).

Actualmente existen diferentes indicadores para evaluar la calidad de los suelos basados en sus características físicas, químicas y biológicas. Entre los indicadores físicos se encuentran la estructura del suelo (USDA, 2008) y la estabilidad de agregados (USDA, 2008a). Entre los indicadores químicos se encuentra el pH (USDA, 2011), el contenido de carbono (USDA, 2014a) y el contenido de nitrógeno (USDA, 2014b). Por su parte, los indicadores biológicos proporcionan información sobre el componente vivo de la tierra y son los indicadores más informativos acerca de la función del suelo (USDA, 2015). Doran y Parkin (1994), la USDA (2015) y Bastida *et al.* (2008) enlistan una serie de indicadores biológicos

para evaluar la calidad del suelo: 1) la respiración del suelo, definida como la cantidad de CO₂ producido u O₂ consumido en el suelo resultado del metabolismo de los organismos; 2) la actividad enzimática, que depende principalmente de los microorganismos; 3) las lombrices, uno de los principales componentes de la fauna edáfica involucrado en el proceso de formación de suelo, reciclaje de nutrientes y estimulación de la actividad microbiana; y 4) la colonización micorrízica, que participa en el reciclaje de nutrientes, la regulación de organismos patógenos para las plantas y el mejoramiento de la estructura del suelo. Sin embargo, dentro de los indicadores biológicos las características de las plantas tienen un papel muy limitado como un indicador de la calidad, aun cuando éstas interactúan directamente con el suelo y la expresión de sus características (rasgos) están en función de las condiciones que el suelo presente (Díaz *et al.*, 2007; Reich, 2014; Martin y Marney, 2015). El indicador más utilizado derivado de la planta se relaciona con el color de las hojas, rasgo que se relaciona con el déficit de nutrimentos (nitrógeno y fósforo) en el suelo (p.ej. Sharma y Kumar, 2011). Aun cuando pueden ser indicadores accesibles y fáciles de medir, el potencial de los rasgos de las plantas como posibles indicadores de calidad de suelo es muy poco entendido y ha sido poco estudiado, sin embargo es un área que está tomando cada vez mayor auge.

1.4. Rasgos funcionales de plantas como indicadores potenciales de calidad y productividad en agroecosistemas

Diversas características de las plantas, ya sean silvestres o de cultivo, tienen gran potencial como indicadores biológicos de diversos procesos (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Martin y Marney, 2015). Existen características en el maíz, por ejemplo a nivel de las hojas, que son usadas rutinariamente para diagnosticar deficiencias de nutrientes en el suelo (Sharma y Kumar, 2011). Sin embargo, el presente trabajo predice que existen otras características, o rasgos funcionales, más allá de las hojas que podrían ser de utilidad para inferir las condiciones del suelo (Reich, 2014). En general, un rasgo funcional (RF) se define como una característica morfo-fisio-fenológica que, a través de sus efectos, repercute sobre el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de un individuo (Violle *et al.*, 2007). A través de prácticamente cuatro décadas de estudio, los RF han permitido vincular la fisiología y morfología de una planta con su tolerancia al ambiente y los recursos presentes en el suelo, así como sus contribuciones a la función de los ecosistemas (Díaz *et al.*, 2007, 2011; Reich, 2014). En este sentido, los RF de las plantas ejercen un control significativo sobre los servicios ecosistémicos (Díaz *et al.*, 2007 y 2011; Adam y Marney, 2015; van Bodegom y Price, 2014). Dado que diversos RF en plantas silvestres parecen reflejar de manera muy precisa las condiciones del suelo, existe un gran potencial en estas características para ser usadas como indicadores de calidad de éste (Reich, 2014).

En general, los estudios sobre rasgos funcionales han mostrado que las plantas expresan estrategias de adquisición y procesamiento de recursos según las condiciones ambientales (Reich, 2014). Entre estas condiciones se incluyen las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. Así, plantas que crecen en suelos ricos en nutrimentos (y otras variables edáficas que confieren una mejor calidad al suelo) presentan rasgos funcionales que reflejan tasas de absorción rápidas, tasas metabólicas altas y alta concentración de nutrimentos en sus órganos. Así, al ser rápidos la adquisición y el procesamiento de recursos (agua, luz, nutrimentos) serán plantas con mayor crecimiento. Sin embargo, los tejidos que se desarrollan en los órganos resultan ser menos densos y por lo tanto más efímeros (vida corta). En el otro extremo de este gradiente se encuentran las plantas que crecen en suelos con pocos nutrimentos. Estas plantas presentan rasgos funcionales de absorción lenta con tasas de lento procesamiento de

recursos, siendo así plantas de crecimiento más lento. La concentración de nutrimentos en sus órganos serán menores, sin embargo, sus tejidos tenderán a ser más densos para evitar la pérdida de biomasa, lo cual les permite ser estructuras más longevas. A la descripción del gradiente anterior de estrategias se le conoce en el campo de la ecología funcional de plantas como el espectro "rápido-lento" (Reich, 2014). Construido a partir de plantas silvestres, esta propuesta parte de la premisa de que los RF son fundamentales para el intercambio coordinado de la adquisición de los recursos existentes en el suelo. Dado que las plantas de cultivo procesan exactamente los mismos recursos a través de los mismos mecanismos que las plantas silvestres, se espera que este espectro de estrategias se presente en plantas como el maíz (Reich, 2014).

Aquellos rasgos funcionales con fuerte asociación con las condiciones del suelo podrían funcionar como indicadores de calidad de suelo en agroecosistemas de maíz. Aunque actualmente se utiliza la coloración de las hojas en el maíz para inferir la deficiencia de nutrientes como fósforo, nitrógeno, etc. (Sharma y Kumar, 2011), la ecología funcional de rasgos sugiere que podrían existir otras características a nivel de los tallos las raíces, e incluso otras características en las hojas, que potencialmente podrían utilizarse como indicadores (Wilson *et al.*, 1999; Comas y Eissenstat, 2004; Himmelbauer, 2004; Hodge, 2004; Cortez *et al.*, 2007; Sharma y Kumar, 2011; Wen-Zeng *et al.*, 2012; Comas *et al.*, 2013; van Bodegom y Price, 2014; Eissenstat *et al.*, 2015; Adam y Marney, 2015; Roumet *et al.*, 2016; Weemstra *et al.*, 2016). Por ejemplo, hay estudios mostrando asociaciones positivas del área foliar, las tasas fotosintéticas y la longitud específica de la raíz (longitud ponderada por el costo de construcción del tejido) en ambientes con altos nutrimentos; en contraste, se ha observado un aumento en la densidad y una mayor resistencia en los tejidos en plantas que se desarrollan en ambientes menos favorables (e.j. Wilson *et al.*, 1999; Comas y Eissenstat, 2004; Himmelbauer, 2004; Hodge, 2004; Cortez *et al.*, 2007; Wen-Zeng *et al.*, 2012; Comas *et al.*, 2013; van Bodegom y Price, 2014; Eissenstat *et al.*, 2015; Adam y Marney, 2015; Roumet *et al.*, 2016; Weemstra *et al.*, 2016). Este trabajo pretende proponer características que por su fuerte asociación con el suelo puedan funcionar como buenos indicadores biológicos. De estos rasgos, aquellos de medición sencilla, de bajo costo y accesibles a los productores para el monitoreo de la calidad de suelo, sobre todo a nivel local, son de sumo interés para este trabajo.

1.5. Importancia del conocimiento y percepción de los expertos locales en la generación de los indicadores

Como se había comentado previamente, la construcción de buenos indicadores para la evaluación de servicios ecosistémicos se puede beneficiar significativamente de la integración de los conocimientos científicos y aquellos de los expertos locales (Desbiez *et al.*, 2004). Conocer las características físicas, químicas y biológicas de los suelos agrícolas desde una perspectiva científica es, sin duda, una vía indispensable para tener un buen conocimiento del sistema edáfico. Sin embargo, una herramienta que permite acompañar la evaluación permanente de la calidad del suelo es la percepción de los usuarios (productores) sobre el estado cotidiano de sus cultivos y la utilidad de las características del suelo y del maíz para inferir la calidad del suelo en una parcela (Ferrazzino *et al.*, 2007). Con frecuencia, las percepciones han sido poco valoradas, principalmente por algunas disciplinas denominadas "duras", por ser consideradas como carentes de validez. Sin embargo, si los productores son quienes toman decisiones y realizan acciones según las percepciones que tengan, resulta de suma importancia

entender estas percepciones e integrarlas en la construcción de proyectos encaminados a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Ferrazzino *et al.*, 2007).

Los análisis de percepción permiten conocer el entendimiento que tienen los productores de la prestación de determinados servicios ecosistémicos que les brinda el suelo, entre ellos la de producción de alimento (Díaz *et al.*, 2007 y 2011; Adam y Marney, 2015; van Bodegon y Price, 2014). En general, los análisis de percepción dan información de la forma en que cada persona aprecia y valora su entorno (Corbeels *et al.*, 2000; Desbiez *et al.*, 2004; Ferrazzino *et al.*, 2007; Díaz *et al.*, 2011; Cáceres *et al.*, 2015). Estos análisis son de gran importancia, ya que con base en lo que los productores perciben, caracterizan y evalúan se toman las decisiones. De esta manera, las percepciones que tengan los productores se vinculan con las conductas adoptadas, las acciones y el manejo que le den al agroecosistema (Corbeels *et al.*, 2000; Ferrazzino *et al.*, 2007; Ramos *et al.*, 2014).

Las percepciones por parte de los expertos locales son resultado del conocimiento acumulado por generaciones y las observaciones minuciosas de la tierra (Ferrazzino *et al.*, 2007). Estas observaciones les permiten evaluar la fertilidad del suelo a través de variables como el color y la textura del suelo, el rendimiento de los cultivos, la profundidad del suelo, el cambio de color en las hojas (Kessler y Stroosnijder, 2006 en Pulido y Bocco, 2014), la presencia de malezas (Abdulrashid y Mashi, 2014) y el nivel de exposición de las raíces (Moges y Holden, 2007). Además, los expertos perciben la calidad del suelo en función no sólo de las propiedades del suelo, sino también del régimen actual y las pasadas administraciones del sistema. Por tal, la percepción de los expertos locales sobre la calidad del suelo puede ser más holística en comparación con la de los investigadores (Corbeels *et al.*, 2000; Desbiez *et al.*, 2004).

Existen trabajos que documentan la coincidencia entre la percepción de la calidad del suelo por parte de productores con lo mostrado por resultados en laboratorio (Corbeels *et al.*, 2000; Murage *et al.*, 2000; Desbiez *et al.*, 2004; Pulido y Bocco, 2014). Integrar ambos tipos de conocimiento permitirá crear indicadores más holísticos y facilitará su implementación (SEMARNAT, 2005; Díaz *et al.*, 2011; Kiage, 2013; Cáceres *et al.*, 2015).

Existen diferentes herramientas cualitativas que permiten el estudio de las percepciones. Una de ellas son las entrevistas semiestructuradas. Ese tipo de entrevistas son la mejor opción para obtener información en situaciones en las que no hay una segunda oportunidad de entrevistar a alguien. Estas entrevistas tienen un final abierto, pero se basan en el uso de una guía, la cual es una lista de preguntas y temas a explorar que deben ser cubiertos en un orden determinado y que permite obtener datos fiables y comparables (Arthur y Nazroo, 2003; Russell, 2006). Una guía de temas sirve de ayuda a la memoria, mejora la consistencia de la recolección de datos, y ayuda a asegurar que los temas relevantes sean abordados de manera sistemática y con uniformidad. Permite, además, flexibilidad para perseguir el detalle de lo que es relevante para cada participante, ya que permite dirigir la discusión (Arthur y Nazroo, 2003). Este tipo de entrevistas funcionan en proyectos en los que se está tratando con personas con las que no se ha tenido demasiado contacto previo y con aquellas personas que están acostumbradas a un uso eficiente de su tiempo (p.ej. burócratas y miembros de una comunidad), ya que muestra que el entrevistador tiene control total de lo que se quiere de la entrevista, sin ejercer un control excesivo, permitiendo al entrevistador y entrevistado explorar nuevas ideas (Russell, 2006).

Las preguntas en las entrevistas semiestructuradas tienen una posición en la guía que depende de varios objetivos. Russell (2006) menciona que es menos probable que las primeras y últimas preguntas

provean buenos resultados, pues al inicio no hay suficiente confianza y al final la monotonía puede sesgar los resultados. Por ello, se recomienda iniciar con temas generales que permitan crear confianza y generar un diálogo efectivo y realizar en un punto intermedio las preguntas de mayor importancia para los objetivos del proyecto (en este caso, la percepción de la calidad del suelo y productividad del agroecosistema, y el uso de las características de las plantas como indicadores). La entrevista puede auxiliarse de medios visuales (p.ej. tarjetas), herramientas que pueden enriquecer la entrevista, facilitar el diálogo y evitar la monotonía. Después de las preguntas centrales, se recomienda continuar con aquellas que puedan ser preguntas sensibles (ej. datos económicos, agroquímicos utilizados, tipo de manejo, etc.) y que sólo pueden ser contestadas una vez que existe un cierto grado de confianza. Finalmente, la entrevista puede cerrar con preguntas que permitan al entrevistado dar su propia conclusión de la situación de la que se esté hablando. La entrevista también debe estar planeada con base en el tiempo disponible del entrevistado, asegurando que las preguntas con mayor incidencia sobre los objetivos del proyecto sean abordadas a tiempo si el entrevistado tuviera que retirarse. La entrevista debe realizarse con el vocabulario adecuado al sector que se va a entrevistar (Corbeels *et al.*, 2000, Desbiez *et al.*, 2004, Knutson *et al.*, 2011; Cáceres *et al.*, 2015). Por ejemplo, si el objetivo del proyecto es conocer la percepción de los agricultores sobre la calidad del suelo de sus parcelas, el término calidad de suelo puede ser muy técnico. Por ello, se recomienda usar la palabra salud del suelo, con la premisa de que los productores tendrán una visión holística del sistema (Desbiez *et al.*, 2004). El análisis de percepciones es fundamental para conocer y, posteriormente, conjuntar el conocimiento de los distintos involucrados en la planeación y generación de indicadores de calidad de suelo.

Utilizando el marco conceptual de los servicios ecosistémicos para el análisis de sistemas socioecológicos, este trabajo combina el conocimiento ecológico con las percepciones de los productores en la construcción de propuestas de indicadores derivados de características de las plantas. Como parte de este proceso, este trabajo propone rasgos funcionales de plantas de maíz con potencial de uso como indicadores de calidad de suelo y productividad en agroecosistemas y analiza la percepción de los expertos locales respecto del uso de estas características para inferir la salud y productividad del suelo. Como parte del componente ecológico de este trabajo, al evaluar rasgos en los tres órganos de la planta de maíz (hojas, tallo y raíces), se encontró que varios de ellos reflejan en buen grado las condiciones del suelo. Por ejemplo, diversos rasgos que indicaron aspectos de inversión en recursos en la planta (p.ej. densidad, contenido de materia seca en los tejidos, área) estuvieron asociados con las condiciones del suelo. Además, esta investigación encontró que las percepciones de los expertos locales sobre las condiciones del suelo de la parcela coinciden de manera muy fuerte con lo medido, y que estas percepciones afectan el manejo del agroecosistema. Los productores utilizan ya algunos indicadores de las plantas para evaluar la calidad del suelo y la productividad, principalmente las partes aéreas (hojas y tallos) y algunas características radicales. Estas características utilizadas coinciden en buena medida con lo encontrado en este trabajo, especialmente aquellas características aéreas (hojas y tallos), sugiriendo a estas características como potenciales indicadores. Este trabajo ilustra cómo integrar el conocimiento científico y el conocimiento de los expertos locales es una vía fecunda en la generación de indicadores que permitan monitorear las condiciones del suelo y contribuir a su conservación.

Esta investigación forma parte del proyecto CONACyT #247672, biodiversidad y ecología funcional de suelos: conservación y resiliencia en sistemas naturales, agroecológicos y agroforestales. Dicho proyecto fue financiado en el marco de la convocatoria de Atención a Problemas Nacionales y

tiene como una de sus objetivos centrales la búsqueda de indicadores de calidad de suelo provenientes de diferentes fuentes. Para conocer las claves utilizada de cada parcela en este documento y su correspondencia en el proyecto global, así como la localidad a la que corresponde la parcela revisar anexo A, Tabla A1.

II. Justificación

Aunque existen diversos indicadores de calidad de suelo basados en aspectos físicos (USDA, 2008), químicos (USDA, 2011, 2014a, 2014b) y biológicos (García *et al.*, 1994; USDA, 2015), existen pocos trabajos que exploran el uso de características de las plantas, también llamados rasgos funcionales, como indicadores para evaluar su calidad (e.j. Comas y Eissenstat, 2004; Hodge, 2004; Reich, 2014). Más aún, son escasos los trabajos que integran la percepción y el conocimiento de los agricultores en la búsqueda de indicadores derivados de las plantas. El desarrollo e implementación de indicadores es más eficiente cuando éstos tienen relevancia, credibilidad y legitimidad para los usuarios. Por ello, la integración del conocimiento científico y de los expertos locales, al momento de construir estos indicadores, se vuelve fundamental para la gestión del recurso suelo (Cash *et al.*, 2003).

III. Objetivo

3.1 Objetivo general

Proponer indicadores de calidad del suelo y productividad de fácil implementación en sistemas de producción de maíz bajo diferentes tipos de manejo. Estos indicadores estarán basados en la integración de dos fuentes de información: (1) los rasgos funcionales del maíz que estén fuertemente asociados con la calidad del suelo y la productividad del sistema y (2) la percepción de los productores sobre la calidad (salud) del suelo y sobre las características de las plantas que reflejan esta calidad y productividad.

3.2 Objetivos particulares del componente ecológico

- Determinar la calidad del suelo y la productividad de las parcelas en los sitios estudiados.
- Analizar si la expresión de rasgos funcionales en hojas, tallos y raíces del maíz refleja las condiciones físicas y químicas del suelo en los sitios estudiados.
- Analizar si las plantas de maíz reflejan la disponibilidad de recursos en el suelo a través de estrategias de crecimiento adquisitivas o conservativas, y si estas estrategias son paralelas entre sus diferentes órganos.

3.3 Objetivos particulares sobre el componente de percepción

- Conocer la percepción de los productores locales sobre la calidad y productividad del suelo de su parcela y comparar estas percepciones con los datos fisicoquímicos y de productividad medidos.
- Identificar las características (indicadores) que los productores miden en las plantas de maíz que les permiten inferir la calidad y productividad de su parcela.
- Conocer la lógica detrás de la medición de dichas características como indicadores, es decir, la relaciones causa-efecto que los productores asignan a estos indicadores.

IV. Hipótesis

Los rasgos funcionales de hojas, raíces y tallos de maíz reflejarán las estrategias de crecimiento que tienen las plantas de acuerdo a la disponibilidad de recursos en el suelo. Así, las plantas de maíz reflejarán una estrategia de adquisición rápida de recursos y tasas rápidas de procesamiento en condiciones favorables de nutrientes en el suelo (alta calidad) y una estrategia opuesta en condiciones desfavorables (baja calidad). La dirección de las asociaciones esperadas entre la fertilidad del suelo y los rasgos funcionales de las hojas, los tallos y las raíces se ilustran en la Figura 1. En conjunto, las asociaciones entre los rasgos coincidirán con el “espectro rápido-lento” descrito para las plantas en general.

Por otro lado, los rasgos funcionales de hojas y tallos con fuertes asociaciones con la fertilidad del suelo y con la productividad coincidirán con aquellas características (indicadores) que los agricultores observan en las plantas de maíz, con el objetivo de inferir la calidad del suelo de sus parcelas y la productividad de la cosecha. Se espera que los productores utilicen pocos o ningún rasgo de las raíces para estas inferencias.

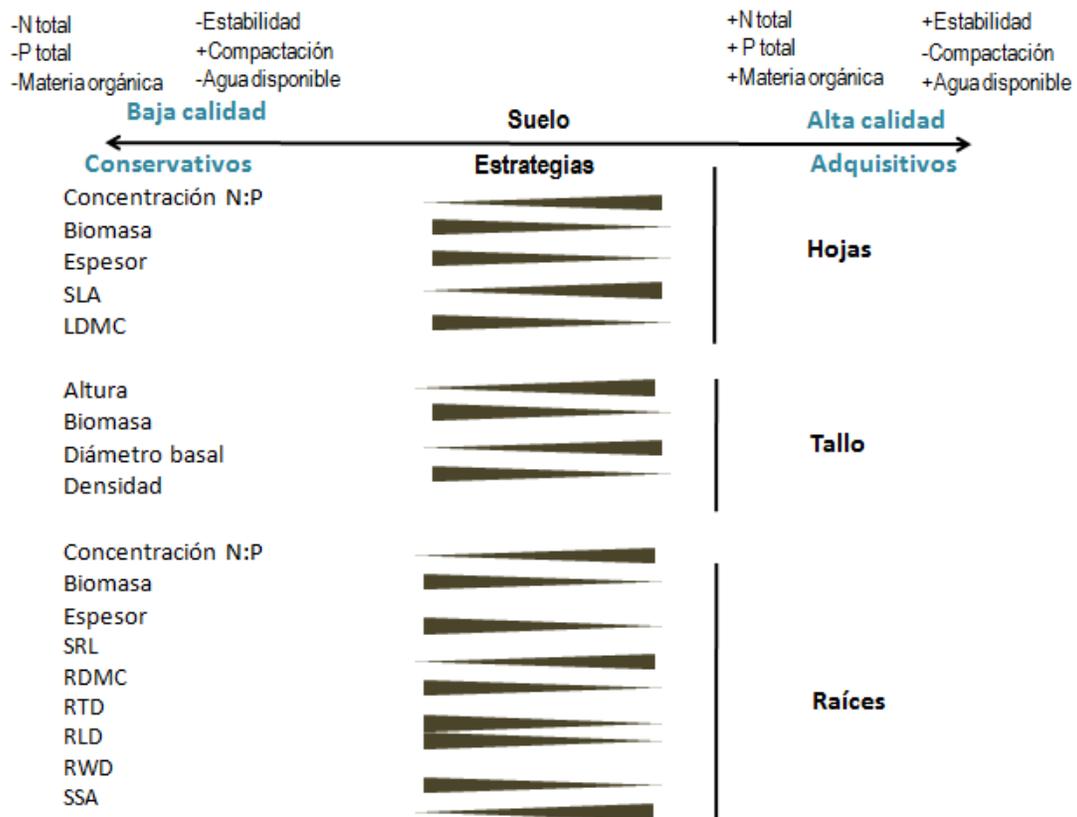


Figura 1. Dirección de las asociaciones esperadas entre la fertilidad del suelo y los rasgos funcionales de las hojas, los tallos y las raíces. El grosor de las barras muestran la dirección de cambio respecto de las condiciones de fertilidad del suelo y la estrategia conservativa-adquisitiva en cada órgano. Ver abreviaturas de los rasgos en Anexo A, Tabla A2

V. Materiales y métodos

A continuación se describen los sitios de estudio y los materiales y métodos empleados para los componentes ecológico y social de este trabajo.

5.1 Características de los sitios de estudio

Se seleccionaron dos localidades dentro del estado de Guanajuato con condiciones contrastantes: Guarapo, situada en el Municipio de Valle de Santiago, y San Felipe, cabecera del municipio del mismo nombre. Guarapo se localiza al sur del estado a 1,744.50 msnm (SEDESOL, 2013a), y es una zona predominantemente templada (Fig. 2a). Tiene influencia de las provincias fisiográficas de Sierras y Bajíos Michoacanos y el Bajío Guanajuatense (SEDESOL, 2013a, Fig. 3a), lo cual propicia climas de tipo cálidos subhúmedos a templados (Fig. 2b). La temperatura y precipitación en este municipio es de 19°C y 650mm, respectivamente (INEGI, 2009a). Los tipos de suelo dominantes son los vertisoles (en un 82% del área) y phaeozems (15.5%) (INEGI, 2009a, Fig. 3b). El uso de suelo es predominantemente para agricultura de riego (40.71%) y agricultura de temporal (32.81%), selva caducifolia (17.79%), y vegetación inducida (5.41%, SEDESOL, 2013a).

San Felipe, por su parte, se localiza al norte del estado, entre los 1,300 y 3,000 msnm (INEGI, 2009b). Es una zona predominantemente árida (Fig. 2a) con influencia de las Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato (SEDESOL, 2013b, Fig. 3a), lo cual le lleva a presentar climas de tipo semisecos a secos (Fig. 2c). Su temperatura y precipitación promedio son de 25°C y 473.4 mm, respectivamente (INEGI, 2009b). Los tipos de suelos predominantes son los phaeozems (51.1%), leptosoles (24.1%), durisoles (12.9%), luvisoles (4.8%), planosoles (4.5%), regosoles (1.2%) y vertisoles (0.1%) (INEGI, 2009b, Fig. 3c). El uso de suelo de la superficie municipal generalmente es para pastizales (35.40%), agricultura de temporal (26.01%), bosque de encino (12.70%), bosque de coníferas (10.76%), agricultura de riego (7.34%), y vegetación inducida (5.54%, SEDESOL, 2013b).

En el Municipio de Valle de Santiago, para el año 2000, habitaban 141,058 personas. Las principales ocupaciones de la población económicamente activa incluyen la agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal y pesca, siendo la agricultura la más importante (SEDESOL, 2013a). A su vez, en San Felipe, para el año 2000, había 106,952 habitantes. En este municipio las principales fuentes de ocupación son la agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal y pesca con 11,045 personas empleadas en alguna de estas actividades (SEDESOL, 2013b).

Tanto los porcentajes de uso de suelo destinados a la agricultura, como las principales actividades de ocupación, resaltan la importancia que tiene la agricultura en ambas regiones. Es así que, de los cultivos de temporal a nivel estatal, para el año 2008, destacaron por el área cosechada el sorgo grano, la avena forrajera, el frijol, el trigo grano, y el maíz grano. Para este último cultivo se cosecharon 262,301.0 ha, lo cual produjo 612,210.5 toneladas (SAGARPA, 2009a). Los municipios de Valle de Santiago y San Felipe, en el periodo 2004-2008, se colocaron dentro de los municipios con más alta producción de maíz en sistemas agrícolas de temporal y, en conjunto con otros municipios del estado de Guanajuato, sumaron 1,059,943 toneladas de maíz (SAGARPA, 2009b).

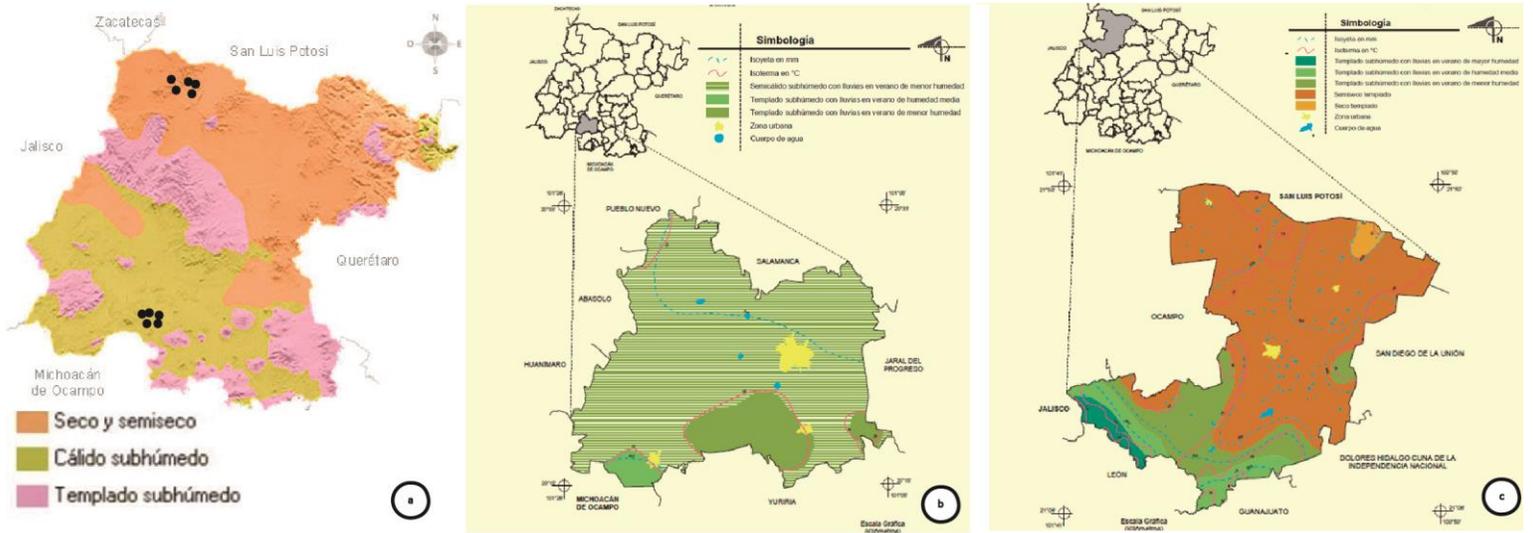


Figura 2. Distribución climática en a) el estado de Guanajuato b) el Municipio de Valle de Santiago y c) el Municipio de San Felipe. Modificado de INEGI (2009a, 2009b, 2017).

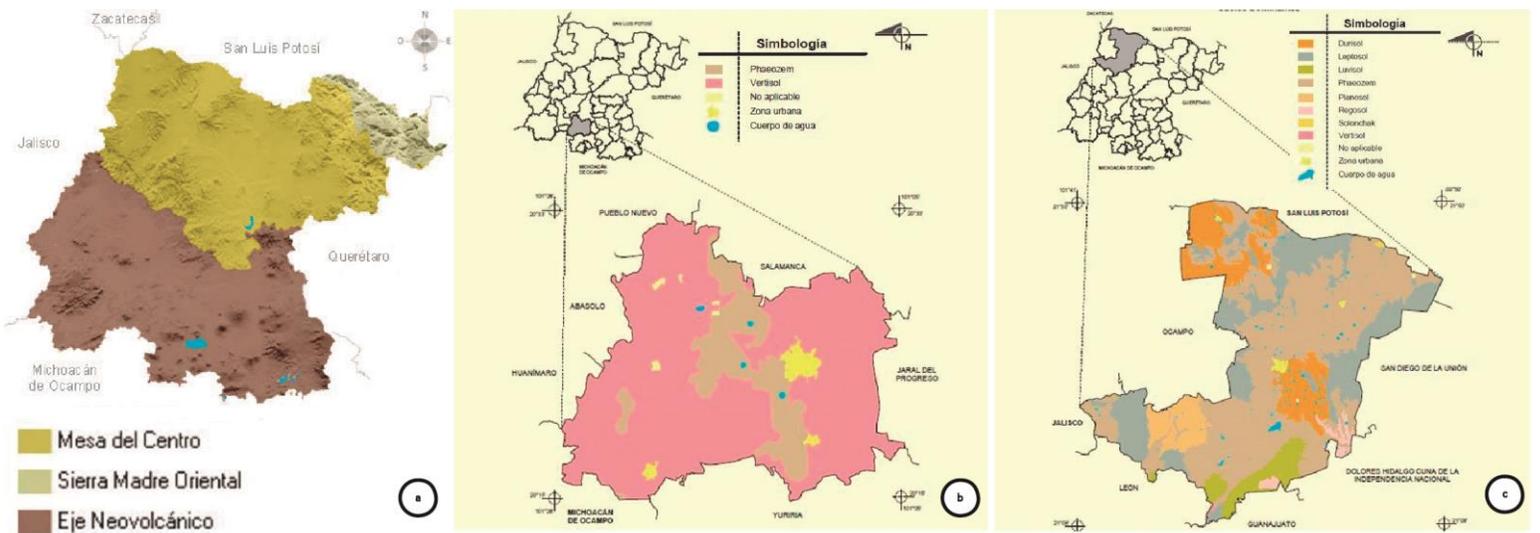


Figura 3. a) Provincias fisiográficas del estado de Guanajuato; principales suelos en el b) Municipio de Valle de Santiago y c) el Municipio de San Felipe. Modificado de INEGI (2009a, 2009b, 2017).

A. Componente ecológico:

1. Selección de individuos y colecta de muestras biológicas

El maíz estudiado correspondió a una variedad criolla proveniente de Zapotitlán, Puebla. Esta semilla fue comprada localmente y repartida entre los productores de Guanajuato que participaron en la presente investigación. Las plantas de maíz fueron colectadas del 27 agosto al 01 de septiembre del 2016 en un total de 11 parcelas de temporal, de las cuales 6 parcelas pertenecían a 5 productores agrícolas de Guarapo y el resto de las parcelas a 5 productores de San Felipe. Las parcelas presentaron suelos contrastantes debido a los distintos tipos de clima y precipitación (Anexo A, Tabla A1 y Fig. 2). En

cada parcela se seleccionaron 5 plantas de maíz representativas (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015), para un total de 55 individuos. Los individuos fueron colectados en la etapa de antesis (o floración masculina), que es señalada como la etapa de mayor desarrollo vegetativo (Wen-Zeng, *et al.*, 2012). Los individuos se seleccionaron cerca del centro de la parcela, sitio donde se realizó el perfil de suelo, con el fin de evitar el efecto de borde (SAGARPA, 2012). Además, se seleccionaron individuos bien desarrollados, expuestos a la luz del sol, sanos y con poco o nulo ataque por herbívoros o patógenos (Cornelissen *et al.*, 2003; Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015). Se seleccionaron individuos con una distancia mínima entre vecinos de fila de 30 centímetros para asegurar que las raíces de la planta muestreada pertenecieran al individuo de interés y no a su vecino.

Antes de coleccionar, se calculó la densidad de siembra para cada parcela. Para ello, se realizaron cuadrantes de aproximadamente 10 metros de largo por 6 metros de ancho. Se contabilizó el número de plantas presentes en cada una de las filas dentro del cuadrante, incluidas las plantas de frijol en parcelas de policultivo. Una vez seleccionada la planta de maíz a muestrear, se midieron las distancias de los vecinos más cercanos dentro de la fila y entre las filas vecinas con la finalidad de incorporar esta información en los análisis estadísticos y conocer si la densidad de siembra es un factor que determine la expresión de los rasgos funcionales.

Para la extracción de las plantas, se cavó un cepellón de 30 centímetros de ancho por 20 centímetros de profundidad con la finalidad de obtener la mayor cantidad de raíces (Fig. 4a,b). Se retiró cuidadosamente el exceso de suelo de las raíces; las raíces que quedaron en el suelo suelto en el cepellón, fueron recuperadas con tamices (Figura 4c). Las raíces fueron separadas del resto de la planta haciendo un corte en el tallo principal para someterlas a un laborioso proceso de lavado con agua corriente y eliminar el residuo de suelo (Fig. 4d). El resto de la planta (hojas y tallos) fue etiquetado, guardado en bolsas de plástico y mantenido en refrigeración hasta su procesamiento, mismo que ocurrió a los pocos días de la colecta.



Figura 4. Colecta de muestras biológicas. a y b) Cepellón realizado alrededor de las plantas de maíz; c) extracción completa de la planta cuidando la integridad del sistema radical; d) lavado de raíces en campo para la eliminación del exceso de suelo.

2. Medición de rasgos funcionales

En los individuos seleccionados se midieron rasgos funcionales de hojas, tallos y raíces, que reflejan procesos ecofisiológicos de la relación planta-suelo (Wilson *et al.*, 1999; Comas y Eissenstat, 2004; Himmelbauer, 2004; Hodge; 2004; Cortez *et al.*, 2007; Sharma y Kumar, 2011; Wen-Zeng *et al.*, 2012; Comas *et al.*, 2013; Reich, 2014; van Bodegom y Price, 2014; Eissenstat *et al.*, 2015; Martin y Marney, 2015; Roumet *et al.*, 2015; Weemstra *et al.*, 2016). En total se realizaron 7 mediciones de atributos foliares, 4 de tallos y 7 de raíz (Tabla 1) adaptandos a protocolos estandarizados (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; PrometheusWiki, 2013; Salgado-Negret, 2015).

Tabla 1. Rasgos funcionales evaluados por órgano. Para mayor detalle ver Anexo A, Tabla A2

Órgano	Rasgo	Descripción
Hoja	Biomasa	Cantidad de materia orgánica en las hojas
Hoja	Espesor foliar	Grosor; relacionado con el área foliar específica
Hoja	Área foliar específica (SLA)	Cociente del área foliar y la biomasa invertida en producirla.; refleja costo de construcción de área fotosintética
Hoja	Contenido foliar de materia seca (LDMC)	Proporción de biomasa seca respecto de la biomasa fresca; correlación positiva con densidad del tejido
Hoja	Cantidad de hojas	Número de hojas
Hoja	Densidad tejido foliar (LTD)	Relación entre la biomasa seca de la hoja y su volumen fresco
Hoja	Color	Relación con los nutrimentos en el suelo
Tallo	Biomasa	Cantidad de materia orgánica en el tallo
Tallo	Altura	Distancia de la base al ápice de la planta; relacionada con la fecundidad y longevidad
Tallo	Diámetro	Refleja la dimensión del tallo; fuertemente asociado con altura
Tallo	Densidad específica del tallo (SSD)	Cantidad de biomasa seca en un volumen dado; relacionada con crecimiento y mortalidad
Raíz	Biomasa	Cantidad de materia orgánica en las raíces muestreadas en el cepellón
Raíz	Longitud radical específica (SRL)	Cociente de la longitud de raíz y la biomasa invertida en producirla; refleja costo de construcción de un mm de raíz
Raíz	Densidad del tejido radical (RTD)	Cociente entre biomasa seca y el volumen fresco; relacionada positivamente con el RDMC

Raíz	Contenido radical de materia seca (RDMC)	Cociente de la biomasa seca entre la biomasa fresca de raíces finas; relacionada con densidad en tejidos y tasas de descomposición
Raíz	Área superficial específica (SSA)	Cociente entre área de raíces y biomasa seca de raíces finas; rasgo similar al SRL y refleja capacidad de adquisición de nutrientes.
Raíz	Densidad de la longitud radical (RLD)	Longitud de raíz por volumen de suelo; refleja la intensidad de exploración de la raíz
Raíz	Densidad del peso radical (RWD)	Biomasa seca de raíz por unidad de volumen de suelo

i. Espesor foliar

El espesor foliar es un rasgo relacionado con el área foliar específica (SLA) y la resistencia física de las hojas. Se encuentra determinado por el número y espesor de las células del mesófilo (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013) y es clave en las estrategias de adquisición de recursos dado que determina la cantidad de luz absorbida y la difusión de CO₂ en las hojas (Syvertsen *et al.*, 1995). Además, está relacionado positivamente con la longevidad foliar (Westoby *et al.*, 2002) y negativamente con las tasas fotosintéticas (Garnier *et al.*, 1999). Modelos de optimización que balancean beneficios de la fotosíntesis y costos de respiración y transpiración predicen que el grosor de las hojas suele ser mayor en hábitats más soleados, más secos, con suelos menos fértiles, y en hojas con mayor longevidad. Para evitar pérdida de espesor por deshidratación, este rasgo se midió el mismo día de la colecta. En cada individuo se seleccionaron 3 hojas y se midió el espesor en tres puntos a lo largo de la lámina con un vernier digital, evitando tocar las venas, los márgenes y la base de la hoja. Los valores por hoja y por individuo se promediaron. Las hojas fueron prensadas posteriormente para la medición de otros rasgos foliares.

ii. Área foliar específica

El área foliar específica (SLA, Specific Leaf Area) es el cociente entre el área y la masa seca de la hoja. Es un rasgo clave al representar el costo en carbono de construir un mm² de área foliar (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; PrometeusWiki, 2013; Salgado-Negret, 2015). Especies que crecen en suelos ricos en nutrientes tienden a presentar mayor SLA que aquellas que viven en entornos con recursos más limitados (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013). En este sentido, especies con bajo SLA suelen presentar alta inversión en defensas estructurales (e.j. taninos o lignina) y alta longevidad foliar, mientras que especies con alto SLA presentan altas concentraciones de nitrógeno en las hojas y altas tasas fotosintéticas, pero tasas de longevidad foliar menores (Reich *et al.*, 1999; Niinemets, 2001; Wright *et al.*, 2004; Pérez-Harguindeguy *et al.* 2013; Reich 2014). Para el cálculo de este rasgo, se utilizaron hojas prensadas y secadas en horno a una temperatura entre 30°C y 50°C por un periodo de 48 a 72 horas o hasta alcanzar peso constante (modificado de Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015). Posteriormente, las hojas fueron escaneadas y analizadas con el programa WinFolia

(Regent Instruments Inc., 2015) para estimar el área foliar y pesadas en una balanza analítica para estimar la masa seca.

iii. Contenido foliar de materia seca

El contenido foliar de materia seca (LDMC, Leaf Dry Matter Content) se obtiene de la división entre la biomasa y la masa fresca de una hoja (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015). Hojas con alto LDMC tienden a ser más resistentes debido a la alta densidad de sus tejidos (Wilson *et al.*, 1999). Además, el LDMC está relacionado positivamente con la inversión en defensas estructurales, lo cual confiere a la hoja mayor resistencia a peligros físicos (p.ej. herbívora, viento, granizo, etc.), pero negativamente con las tasas de descomposición (Kazakou *et al.*, 2006; Cortez *et al.*, 2007). Comúnmente, las hojas con bajo LDMC están asociadas a ambientes y suelos ricos en nutrimentos (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013). Para calcular este rasgo se dividió el peso seco entre el peso fresco de las tres hojas utilizadas para estimar el espesor foliar.

iv. Densidad del tejido foliar

La densidad del tejido foliar (LTD, Leaf Tissue Density) se obtiene dividiendo la masa seca entre el volumen fresco de la hoja (Shipley y Thi-Tam, 2011). Es un rasgo que suele presentar una relación positiva con el LDMC (Shipley y Vu, 2002; Hodgson *et al.*, 2011). En el presente trabajo, el volumen foliar se calculó a partir de la multiplicación del área (medida para el SLA) por el espesor de la hoja (medido en fresco). Este rasgo fue calculado en las hojas en las que se estimaron el espesor, el SLA y el LDMC.

v. Color de las hojas

El color de las hojas es un rasgo que se relaciona con cantidad de elementos esenciales en el suelo y que están involucrados en las funciones metabólicas de la planta. En donde la ausencia de estos elementos limita el ciclo de vida de la planta (Sharma y Kumar, 2011). La medición del color de las hojas se realizó en las hojas seleccionadas para hacer el análisis de nutrimentos (apartado xvi) previo secado al horno, con ayuda de la hoja de color para suelos.

vi. Altura de la planta

La altura máxima de la planta es la distancia desde la superficie del suelo hasta la yema apical, excluyendo las estructuras reproductivas (Cornelissen *et al.*, 2003). La altura máxima de una especie está asociada a la forma de crecimiento, a la posición de la planta en el gradiente vertical de luz, al vigor competitivo, al tamaño reproductivo, a la fecundidad y al potencial de vida útil (Kohyama *et al.*, 2003, Rijkers *et al.*, 2000). La altura se midió en campo siguiendo la curvatura de los tallos (modificado de Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013).

vii. Diámetro basal del tallo

El grosor de la base del tallo hace referencia al diámetro de la porción más cercana a la tierra. Este rasgo proporciona una estimación del costo de elevar órganos (p.ej. hojas) por encima de las plantas vecinas u otras obstrucciones de luz. Además, da una aproximación del tamaño máximo alcanzado por la planta ya que cavaría fuertemente con la longitud del tallo (ej. Niklas *et al.*, 2006). En el

presente trabajo, se midió la base del tallo por encima de las raíces adventicias con un vernier digital. Se obtuvieron dos mediciones perpendiculares entre sí, que fueron posteriormente promediadas.

viii. Densidad específica del tallo

La densidad específica del tallo (SSD, Stem-Specific Density) se define como la masa seca dividida entre el volumen fresco (Salgado-Negrete, 2015). El SSD es importante para la estabilidad, la hidráulica, la defensa, la ganancia de carbono y el potencial de crecimiento en las plantas. Bajos valores de densidad se relacionan con un rápido crecimiento y alta mortalidad del individuo, debido a los bajos costos de construcción volumétrica y a una gran capacidad hidráulica. Altos valores de densidad se relacionan con tasas bajas de crecimiento, pero mayor supervivencia debido a la seguridad biomecánica e hidráulica e inversión de biomasa para construir estructuras resistentes a patógenos, herbívoros o daños físicos (Poorter *et al.*, 2008; Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013). Para calcular este rasgo, se midió el volumen de muestras basales de tallos de 2cm de largo utilizadas para medir el diámetro basal. El volumen se estimó mediante el método de desplazamiento de agua utilizando una balanza analítica (Salgado-Negret, 2015). Las muestras se secaron posteriormente a 60°C durante 5 días o a 80°C por 3 días hasta peso constante (modificado de Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015).

ix. Longitud radical específica

La longitud radical específica (SLR, Specific Root Length) es el cociente entre la longitud y el peso seco de las raíces finas (<2mm de diámetro). Es un rasgo equivalente al SLA de las hojas y hace referencia a la relación entre una unidad de adquisición (longitud) y la inversión en carbono (masa) en las raíces. Plantas con alta SLR poseen raíces más largas (despliegan mayor superficie de absorción por unidad de masa seca invertida) y tienen mayores tasas potenciales de absorción de agua y nutrientes, menor longevidad y tasas de crecimiento superiores a plantas de baja SLR. Sin embargo, valores altos de SLR pueden ser resultado de un menor diámetro o densidad baja de tejido, cada uno de los cuales está asociado a su vez con diferentes rasgos. Por ejemplo, las raíces de menor diámetro presentan menos fuerza de penetración en el suelo y por tanto menos transporte de agua, mientras que raíces con baja densidad tienen menor longevidad pero mayores tasas de absorción bajo condiciones de altos nutrientes (Pérez- Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015).

En cada individuo se seleccionó una ramificación principal en las raíces de la corona (raíces que nacen y crecen por debajo del nivel del suelo a partir de los nodos del tallo; Fig. 5). Estas raíces fueron lavadas con agua acidulada 1M y agua desionizada para eliminar los residuos de suelo. Este lavado permitió que estas mismas raíces su utilizaran para la cuantificación de N y P (apartado xvi). Las raíces fueron escaneadas y analizadas con el programa WinRhizo (Regent Instruments Inc., 2016) para calcular la longitud, el área superficial, el volumen por clases de diámetro (0-0.05, 0.5-1, 1-1.5, 1.5-2, 2-2.5, 2.5-3, 3-3.5, 3.5-4, 4-4.5, 4.5-5mm). Posteriormente, las raíces fueron secadas a 30°C-50°C por un periodo de 48 a 72 horas (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015). Posteriormente, fueron separadas y pesadas las raíces finas. Para calcular el SRL de las raíces finas, se dividió la longitud de las raíces del intervalo 0-2 mm entre su peso seco.

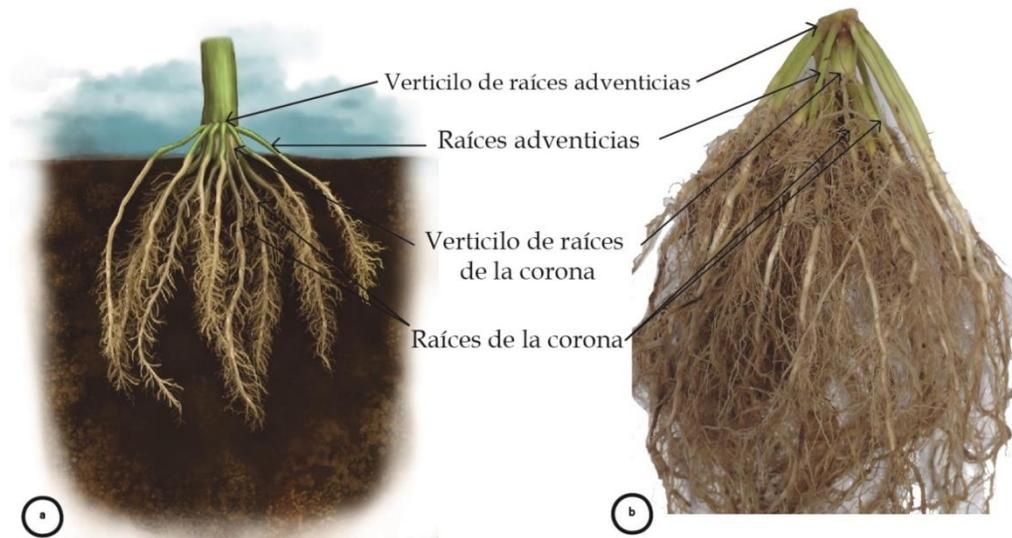


Figura 5. Raíces del maíz con sus diferentes estructuras en a) un esquema y b) en una imagen real.

x. Densidad del tejido radical

La densidad del tejido radical (RTD, Root Tissue Density) es el cociente del peso seco radical entre su volumen fresco (PrometheusWiki, 2013). Este rasgo se relaciona positivamente con el RDMC (ver apartado xi, Fig. 1). Altos valores de RTD están correlacionados con una mayor resistencia a la ruptura, a daños por herbívoros y sequía, así como a menores tasas de descomposición y, por lo tanto, mayor longevidad, pero se relaciona negativamente con la absorción de nutrimentos (Fortunel *et al.*, 2012; Pérez- Harguindeguy *et al.*, 2013; PrometheusWiki, 2013; Birouste *et al.*, 2014). Este rasgo fue calculado para las raíces finas únicamente (<2mm) dividiendo el peso seco de las raíces finas entre su volumen.

xi. Contenido radical de materia seca

El contenido radical de materia seca (RDMC, Root Dry Matter Content) representa la masa seca de las raíces finas dividida entre su masa fresca. Este rasgo ofrece información similar a la densidad de la raíz y es equivalente al LMDC en la hoja. Altos valores de este rasgo están relacionados con una alta densidad de los tejidos radicales e inversión en defensas estructurales, pero con bajas tasas de descomposición (Salgado-Negret, 2015). El cálculo de este rasgo se realizó a partir del peso seco de las raíces finas de la ramificación, entre su peso fresco.

xii. Área específica de la raíz

El área superficial específica (SSA, Specific Surface Area) es el cociente entre el área de las raíces finas y su masa seca. Es un rasgo muy similar al SLR y representa la relación entre el área de adquisición (área) y la inversión en recursos (biomasa) (Himmelbauer, 2004; Comas *et al.*, 2013). El cálculo del SSA consistió en estimar el área radical del intervalo 0-2mm dividida entre su peso seco.

xiii. Densidad de la longitud radical

La densidad de la longitud radical (RLD, Root Length Density) representa la longitud de raíz por volumen de suelo (Wen-Zeng Qi *et al.*, 2012; Guan *et al.*, 2013; van der Heijden *et al.*, 2013). Este rasgo

indica la intensidad de la exploración de la raíz y la capacidad de una especie para tomar nutrientes del suelo (Wen-Zeng Qi *et al.*, 2012; Marcel van der Heijden *et al.*, 2013; Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013). Para este rasgo se colectaron núcleos de suelo de 7 cm de diámetro por 10 cm de alto. Las muestras fueron tomadas lo más cercanas a la base de la planta de maíz, para asegurar que las raíces extraídas con el núcleo pertenecieran al mismo individuo (Fig. 6). Estas muestras fueron tomadas antes de extraer la planta completa. Las raíces del núcleo fueron tamizadas y lavadas con agua corriente para eliminar el exceso de suelo y mantenidas en bolsas de plástico en refrigeración. Las raíces de los núcleos fueron escaneadas y analizadas con el programa WinRhizo. El RLD se calculó con la longitud total de todos los intervalos de diámetro (0-5mm) dividida entre el volumen del suelo.



Figura 6. Extracción de núcleos para el cálculo de la longitud y la biomasa de raíces por volumen de suelo. Las imágenes muestran el proceso de extracción y la distancia entre la base del tallo y el punto donde fue tomando el núcleo.

xiv. Densidad del peso radical

La densidad del peso radical (RWD, Root Weight Density) es el cociente de la biomasa de raíz por volumen de suelo (Ball-Coelho *et al.*, 1998) y representa la cantidad de biomasa invertida en la raíz por unidad de volumen del suelo. Para el cálculo de esta variable, las raíces de los núcleos fueron secadas a 30°C-50°C por un periodo de 48 a 72 horas (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015). El peso seco de dichas muestras fue dividido entre el volumen del suelo colectado con el núcleo.

xv. Biomasa por órgano

La biomasa representa la cantidad de materia orgánica contenida en la planta. En sistemas de cultivo, la biomasa brinda información sobre el rendimiento y productividad de las plantaciones (Fonseca *et al.*, 2009). Para cuantificar la biomasa por órgano de cada uno de los individuos se sumaron todos los valores de peso seco para hojas, tallos y raíces. Para los tallos se sumó la porción de tallo entre los verticilos de las raíces adventicias y las raíces de la corona (Fig. 5). Al órgano correspondiente se

sumó la biomasa de las muestras que fueron separadas para la medición de otros rasgos. Para la biomasa total por individuo se sumaron las biomásas por órgano.

xvi. Análisis de nutrientes en las plantas de maíz

Se estimó el contenido total de nitrógeno (N) y fósforo (P) en las raíces y en las hojas de cinco individuos por parcela. Un alto contenido de N y P en hojas y raíces indica altas tasas fotosintéticas y altas tasas de crecimiento individual (Salgado-Negret, 2015). Las hojas para este análisis estuvieron bien desarrolladas y con niveles mínimos de herbivoría o ataque por patógenos. La muestra consistió en una muestra compuesta de 3 hojas por individuo que fueron previamente enjuagadas en agua acidulada al 1M y agua desionizada para eliminar residuos de suelo y secadas a 30-50°C por un periodo de 48-72 horas (modificado de Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015). La cuantificación de N y P se realizó en las raíces finas (<2 mm) de la corona utilizando las muestras colectadas para la medición de SRL, SSA, RTD, RDMC y raíces finas adicionales cuando fue necesario. Una vez secas, las muestras fueron molidas y tamizadas en una malla #60. El polvo fue enviado al laboratorio de Análisis de Suelo del Colegio de Postgraduados para la cuantificación de N total a través del método de Kjeldahl (Kirk, 1950) y el P total con el método de colorimetría azul de molibdeno (Fiske y Subarrow, 1925).

xvii. Medición de la productividad por parcela

Se realizó una segunda salida a los sitios de estudio durante la segunda semana de octubre del 2016 para medir la productividad. Estas mediciones estuvieron basadas en el Manual de Determinación de Rendimiento de la SAGARPA (2012). Brevemente, para determinar la biomasa de las plantas de maíz se seleccionaron 10 plantas por parcela. Por un lado, se cuantificó el peso fresco de cada una de ellas y posteriormente fueron trituradas para conformar una muestra compuesta. De la muestra compuesta se tomó una submuestras de 1k para cuantificar la biomasa, previo secado a 75°C por 48 horas. Por otro lado, de estas 10 plantas se seleccionaron las mazorcas bien desarrolladas, mismas que se secaron y pesaron para desgranarse posteriormente y pesar el grano.

La determinación del rendimiento del maíz consintió en cosechar todas las mazorcas dentro de un área conocida en cada parcela. El número de mazorcas en buen y mal estado fueron contabilizadas. Las mazorcas en buen estado fueron secadas al sol y desgranadas. Se tomaron aproximadamente 200 gramos de grano y se secó a 75°C durante 48 horas. Además, se contabilizaron 200 granos, los cuales también fueron secados. Siguiendo protocolos estandarizados (SAGARPA, 2012), se cuantificó el índice de productividad, la biomasa total de las 10 plantas, el índice de cosecha (peso seco del grano entre biomasa total de las 10 plantas), la relación grano:olote, el rendimiento seco de grano (en kg/ha), el rendimiento de biomasa (kg/ha) y el número de granos por m² (Tabla 2).

Tabla 2. Variables de productividad. Para mayor detalle ver Anexo A, Tabla A3

Variable de productividad	Variable de productividad
Biomasa total de 10 plantas	Rendimiento de biomasa
Índice de cosecha	Rendimiento de rastrojo con olote
Cociente grano: olote	Número de granos por m ²

3. Análisis de variables físicas y químicas del suelo

Se realizaron análisis de variables físicas y químicas de los primeros 10 centímetros de suelo. Los análisis de variables físicas consistieron en la cuantificación de arcilla, limos y arenas. Los análisis químicos consistieron en la cuantificación del contenido total de nitrógeno, carbono orgánico, materia orgánica y fósforo total. Las muestras de suelo consistieron en una muestra compuesta de 3 muestras por parcela para reportar un promedio. Estos análisis y la estimación de pH fueron realizados por colaboradores del presente proyecto en el Laboratorio de Biogeoquímica Terrestre y Clima del Instituto de Ecología coordinado por el Dr. Julio Campo (Tabla 3).

Tabla 3. Listado de variables de suelo y unidades de medición.

Tipo de variable	Variable	Unidad de medición
Físico	Arcilla	Porcentaje
Físico	Limo	Porcentaje
Físico	Arena	Porcentaje
Químico	Nitrógeno total	g Kg-1
Químico	Fósforo total	g Kg-1
Químico	Carbono orgánico	Porcentaje
Químico	Materia orgánica	Porcentaje
Químico	pH	-

4. Análisis estadístico de los rasgos funcionales

Para todos los rasgos funcionales se calcularon promedios por individuo y por parcela. Los datos por individuo permitieron un análisis de la asociación entre rasgos funcionales, mientras que los promedios por parcela permitieron examinar la asociación con las variables del suelo. Así, se examinó la correlación entre cada rasgo funcional del maíz y cada característica del suelo y cada variable de productividad (n=11) utilizando la correlación de Pearson. Este análisis por parejas de variables tuvo el objetivo de detectar aquellos rasgos con potencial como indicadores. Antes de analizar la asociación entre los rasgos funcionales y las variables edafológicas, se analizó la correlación entre la densidad de siembra y los rasgos funcionales. Esta exploración permitió determinar si la densidad de siembra era un factor que pudiera estar incidiendo en la expresión de los rasgos funcionales, además del suelo. Cuando se detectaron correlaciones significativas entre el rasgo funcional y la densidad de siembra, se calculó la correlación entre el rasgo y las variables edafológicas controlando por la densidad de siembra de la parcela. Esto se logró a través de correlaciones parciales.

Con el objetivo de examinar patrones de asociación más generales, se redujo la dimensión de los datos a través de un análisis de componentes principales (PCA) con la matriz de variables de suelo por un lado, y la matriz de rasgos funcionales por el otro. Este análisis multivariado permitió resumir los patrones de covariación planta-suelo para facilitar su interpretación. Utilizando esta misma aproximación, se analizó la relación entre rasgos funcionales de raíces, tallos y hojas para determinar si los patrones sugirieron estrategias adquisitivas o conservativas paralelas entre los órganos. En estos últimos análisis se utilizaron los promedios por individuo (n=55).

B. Componente social

1. Análisis de la percepción de los expertos locales

Para analizar la percepción de los expertos locales en cuanto a indicadores de la calidad del suelo y productividad derivados de las plantas, se realizaron entrevistas semiestructuradas. Con ayuda de preguntas guía (Anexo B, Listado B1), se llevaron a cabo estas entrevistas a los dueños o encargados del manejo de las parcelas de maíz colectadas. Se recabó información sobre (1) los indicadores en las plantas de maíz (características en hojas, tallo o raíces) utilizados para conocer la salud del suelo y productividad; (2) la percepción de la calidad del suelo; (3) información sobre el tipo de manejo de la parcela (p.ej. monocultivo o policultivo, cultivo usual, tipo de riego, tipo de arado, fertilizantes, etc.) y el tiempo que se ha aplicado este manejo.

2. Preguntas guía

Las preguntas guía incluyeron 7 grupos de preguntas enfocadas en los siguientes temas: características generales del agroecosistema, calidad del suelo percibida, productividad percibida, indicadores de calidad de suelo derivados de la planta, indicadores de productividad derivados de la planta, preguntas de manejo y preguntas de historia/saber local (Anexo B, Listado B1).

Siguiendo las sugerencias de Russell (2006), las preguntas guía comenzaron con preguntas generales (Grupo 1 en anexo B, Listado B1) que permitieron romper la barrera entre los participantes y crear un grado de confianza que permitió un diálogo ameno y efectivo. En un punto intermedio (Grupos 2 a 5 en anexo B, Listado B1) se colocaron las preguntas de mayor importancia para los objetivos del proyecto, es decir, aquellas relacionadas con los indicadores. Posteriormente se presentaron las preguntas que quizás sólo puedan ser contestadas objetivamente una vez que existe de por medio un grado de confianza (Grupo 6 en anexo B, Listado B1). Finalmente, la entrevista se cerró con preguntas de reflexión sobre los cambios históricos en la salud del suelo (Grupo 7 en anexo B, Listado B1). Con este orden en las preguntas, también se aseguró que aquellas más importantes fueran abordadas a tiempo en dado caso de que el productor tuviera que retirarse. Se realizaron pilotos de entrevistas para reformular y reorganizar las preguntas en caso de ser necesario con ayuda de la LCA Isabel Bueno.

3. Elaboración de tarjetas para asignar dirección en los estados de los indicadores

Para las entrevistas se realizaron tarjetas que ilustraron 11 de los rasgos de hojas, raíces y tallos que se midieron en el maíz. Para cada rasgo se elaboraron tres tarjetas con tres diferentes grados de expresión del mismo (Fig. 7). Las tarjetas fueron presentadas a los productores durante la entrevista (preguntas del grupo 2 a 5) para que las acomodaran con base en las expresiones del rasgo que se

asociaron a una buena, mediana o mala calidad del suelo y a una alta, mediana o baja productividad de la parcela. Esto permitió comparar el “ranking” utilizado por los productores y aquel sugerido por los rasgos funcionales. Cabe resaltar que únicamente se les mostraron aquellas tarjetas de rasgos que los productores mencionaron observar para evaluar la salud del suelo y la productividad de sus parcelas. Las tarjetas fueron diseñadas y elaboradas en colaboración con el M. en C. Aldo Domínguez de la Torre.

4. Realización y análisis de las entrevistas semiestructuradas

Las entrevistas fueron realizadas en dos visitas. En la primera visita (31 de julio al 7 de agosto del 2016) se realizaron 5 entrevistas con productores de Guarapo. El resto de las entrevistas se realizaron del 27 agosto al 01 de septiembre a 6 agricultores de San Felipe. En Guarapo se realizaron 5 entrevistas para las 6 parcelas muestreadas, ya que un productor realizaba el manejo de dos parcelas. En San Felipe se realizaron 6 entrevistas (5 parcelas) dado que para una misma parcela se entrevistó tanto al dueño como a la persona encargada del manejo.

Antes de iniciar la entrevista, se presentaron y explicaron los objetivos del proyecto y la finalidad que tenía la entrevista, además de su dinámica. Además, se obtuvo el consentimiento informado de los entrevistados (Anexo B, B1). Si fue autorizado por el entrevistado, la conversación fue grabada en audio. Las entrevistas duraron de 30 min a aproximadamente 2 horas y fueron realizadas en la casa del productor y en algunos casos en su parcela.

Las entrevistas fueron transcritas por un colaborador de esta investigación (P. Biól. Alejandro Moyers) con ayuda del programa en línea *otranscribe*. A partir de estos transcritos se caracterizó el manejo de cada parcela y los indicadores derivados de la planta del maíz que son usados por los productores para inferir la calidad de suelo y la productividad de su parcela. A partir de estos datos, se realizó un análisis de frecuencias de los indicadores mencionados por los productores.

Para determinar el grado de asociación entre la percepción local de la calidad del suelo y la calidad medida así como la productividad, se utilizó un análisis de correlación. Cuando un productor reportó una buena, mediana o mala calidad de suelo, o bien, una alta, mediana o baja productividad se asoció un valor de 1, 2 o 3 a la parcela, respectivamente. Finalmente, se examinó el grado de correlación de los datos de percepción con los datos del PCA del suelo que indicó aspectos de calidad a través de una correlación de Spearman.

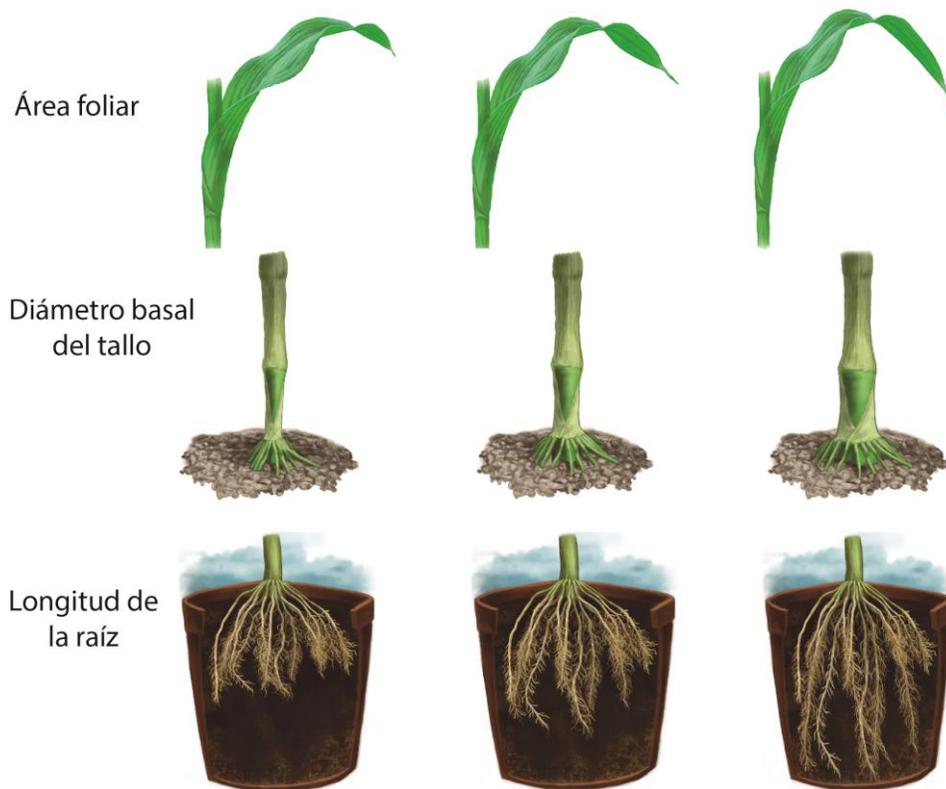


Figura 7. Ejemplos de las ilustraciones de tres estados extremos para rasgos funcionales de hojas, tallos y raíces de maíz que fueron plasmadas en tarjetas. Dichas tarjetas fueron utilizadas en las entrevistas con los productores agrícolas para su ponderación.

VI. Resultados

A continuación se presentan los resultados en dos partes. La primera incluye los resultados del componente ecológico del proyecto y presenta: (1) las correlaciones entre los rasgos funcionales y las variables de suelo, (2) entre los rasgos funcionales y las variables de productividad, y (3) entre los diversos rasgos funcionales, tanto dentro como entre órganos. Para cada grupo de correlaciones se presentan los análisis de correlación (asociación de variables pareadas) y también los resultados de un análisis de componentes principales (PCA). Estos dos resultados son complementarios. Mientras el análisis de correlación por pares de variables permite identificar las variables con potencial indicador para una determinada característica edafológica, el PCA permite disminuir la dimensión de los datos para facilitar la síntesis de los patrones de asociación.

La segunda parte de esta sección incluye los resultados del componente social. Ahí se presentan: (1) las tablas de percepción de la salud del suelo y productividad, y el grado de coincidencia entre la percepción y los datos obtenidos con procedimientos científicos, (2) las tablas con la dirección de uso que le dan los agricultores a los distintos estados de carácter de los rasgos funcionales y (3) la tabla de frecuencias de las características de la planta de maíz que más utilizan los productores.

A. Componente ecológico

1. Asociación entre rasgos funcionales y variables edáficas

Los rasgos funcionales en el maíz se correlacionaron con variables edáficas en la dirección predicha (Tabla 4). Las hojas fueron más densas cuando los nutrientes en el suelo disminuyeron. Así, el espesor foliar y el contenido de materia seca (LDMC) aumentaron cuando el contenido de nitrógeno, materia orgánica y carbono orgánico en el suelo disminuyeron. El área foliar (SLA) aumentó cuando la materia orgánica y el carbono orgánico también lo hicieron. En el caso del fósforo, este elemento se correlacionó únicamente con el contenido de materia seca de forma negativa. Aunque no significativos, hay valores de correlación que sugieren asociación entre el fósforo del suelo y el espesor ($r=-0.58$) y entre el fósforo del suelo y el área foliar ($r=0.55$). Los rasgos foliares y la densidad de siembra no mostraron correlación, por lo que estas correlaciones se obtuvieron directamente (sin correlaciones parciales) (Anexo A, Tabla A4).

En contraste con las hojas, varios rasgos de raíces estuvieron correlacionados con la densidad de siembra (Anexo A, Tabla A5) sugiriendo que no sólo las características físicas y químicas del suelo pueden estar modelando la expresión de varios rasgos radicales sino, también, la densidad de siembra. Para calcular la asociación de estos rasgos radicales con las variables de suelo se realizó una correlación parcial controlando por la densidad de siembra. Controlando por esta tercera variable, los rasgos de raíces mostraron fuertes correlaciones con las condiciones químicas del suelo (Tabla 4). El contenido de nitrógeno y fósforo total, y el porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico afectaron la densidad de la estructura radical (RLD). Cuando los nutrimentos mencionados disminuyeron, la longitud total de raíces por volumen de suelo aumentó, incidiendo en la capacidad de la raíz para tomar nutrimentos del suelo. En contraste, cuando el nitrógeno aumentó, la longitud específica de la raíz (SRL) aumentó.

Al igual que en las hojas, los rasgos de tallos no se correlacionaron con la densidad de siembra (Anexo A, Tabla A6) y tampoco con las condiciones químicas del suelo. Sin embargo, hay valores de correlación que sugirieron tendencias a un comportamiento paralelo al de hojas y raíces, sobre todo aquellos relacionados con la densidad y biomasa del tallo. Así, a menor contenido de nitrógeno y fósforo en el suelo, los tallos tendieron a presentar estructuras más densas ($r=-0.54$ y -0.53 , respectivamente) y a menor contenido de materia orgánica y carbono orgánicos, la biomasa en tallos aumentó.

Las variables físicas del suelo, específicamente aquellas que le confieren estructura como el porcentaje de arcillas, limos y arenas, también determinaron la expresión de los rasgos de la planta de maíz. Cuando el suelo presentó un mayor porcentaje de partículas finas (arcillas), y por lo tanto una mayor capacidad para retener humedad en el suelo, las plantas tendieron a desarrollar estructuras de menor espesor, menor contenido de materia seca (p.ej. LDMC), menor biomasa (p.ej. hojas y tallos) y menor densidad en tejidos (p.ej. RTD) e inciden en el aumento del área o la longitud tanto en hojas (SLA), tallos y raíces (SRL). Por el contrario, un porcentaje mayor de partículas más gruesas (arena), que por su naturaleza retienen menor cantidad de agua, se correlacionaron de manera positiva con rasgos de biomasa, densidad, y contenido de materia seca en los tres órganos, indicando que en estas condiciones de menor humedad los rasgos son más de tipo conservativo.

El análisis de correlación por pares de variables funcionales y edáficas de los párrafos previos permitió ubicar rasgos funcionales del maíz con potencial como indicadores. A continuación se presenta la correlación de estos rasgos con el primer componente principal del PCA de suelo con el objetivo de

sintetizar los patrones de asociación y entender el comportamiento de estos rasgos en suelos de mayor o menor calidad. En la Figura 8 se muestra el PCA de las variables de suelo y la distribución de las parcelas en el espacio descrito por el primer (PC1) y segundo componente principal (PC2). La variación explicada por el componente 1 (80%) y el 2 (12%) sumó 90%. El PC1 presentó cargas fuertes en prácticamente todas las variables, mientras que el PC2 tuvo fuerte peso en el porcentaje de limo (Anexo A, Tabla A7). El PC1 mostró que puede ser usado como un índice de calidad de suelo al resumir la gran mayoría de la variación y tener cargas fuertes para prácticamente todas las variables. El nitrógeno, fósforo, materia orgánica, carbono orgánico y el porcentaje de arcilla estuvieron fuerte y positivamente asociadas. El aumento en estas variables se asocia con una mayor calidad de suelo. Este grupo de variables se relacionó de manera negativa tanto con el porcentaje de arena como con el pH, variables que al aumentar le confieren menor calidad al suelo.

Con base en las correlaciones entre el PC1 y los rasgos funcionales (última columna en Tabla 4), se encontró que en condiciones de alta calidad del suelo las plantas presentaron estructuras menos densas, con menor contenido de materia seca y biomasa. Estos tejidos más efímeros fueron predichos justamente en estas condiciones más favorables. Por otro lado, la disminución del pH y aumento de partículas de arenas se correlacionó con suelos de menor calidad e incidió en la expresión de rasgos relacionados con la resistencia de los órganos. En cuanto a la distribución de las parcelas en el espacio descrito por el PC1 y el PC2, se encontró una fuerte tendencia de las parcelas de Guarapo a ubicarse en el extremo de alta calidad y las de San Felipe a estar en la zona de baja calidad de suelo, justo como se esperaba dadas las condiciones ambientales de estas zonas (Fig. 8).

Un rasgo que también se midió fue la coloración de las hojas para conocer su relación con la calidad del suelo y la productividad de la parcela, sin embargo este rasgo no tuvo variación significativa en los individuos por lo que se excluyó de los análisis.

Tabla 4. Correlación entre rasgos funcionales, variables edáficas y el primer componente principal (PC1) del PCA del suelo (n=10). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05, **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo). Abreviaturas de rasgos funcionales en Anexo A, tabla A2. En negritas se resaltan las correlaciones con magnitud mayor o igual a 0.5. Nota: Para las raíces se muestran los valores de correlación parcial.

Rasgo/variable edáfica	N total (g kg-1)	P total (g kg-1)	Materia orgánica (%)	C Orgánico(%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	PC1 de suelo ¹
Órgano: Hoja									
Espesor	-0.64*	-0.58ns	-0.72*	-0.72*	-0.79**	0.19ns	0.82***	0.76*	0.75*
Cantidad de hojas	-0.44ns	-0.43ns	-0.41ns	-0.41ns	-0.72*	0.41ns	0.7*	0.71*	0.59ns
SLA	0.6ns	0.55ns	0.77**	0.77**	0.82***	-0.24ns	-0.85***	-0.94***	-0.79**
LDMC	-0.73*	-0.73*	-0.78**	-0.78**	-0.73*	0.53ns	0.69*	0.7*	0.8**
Biomasa	-0.4ns	-0.38ns	-0.5ns	-0.5ns	-0.73*	0.26ns	0.74*	0.86***	0.61ns
Órgano: Tallo									
Altura de la planta	0.33ns	0.29ns	0.22ns	0.22ns	0.12ns	-0.16ns	-0.1ns	0.23ns	-0.17ns
Diámetro basal	0.02ns	0.03ns	-0.22ns	-0.22ns	-0.41ns	-0.13ns	0.47ns	0.63ns	0.26ns
Densidad	-0.54ns	-0.53ns	-0.37ns	-0.37ns	-0.46ns	0.79**	0.33ns	0.42ns	0.51ns
Biomasa	-0.46ns	-0.45ns	-0.56ns	-0.56ns	-0.72*	0.4ns	0.71*	0.8***	0.65*
Órgano: Raíz									
SRL	0.68*	0.67*	0.65*	0.66*	0.60 ns	-0.46ns	-0.55ns	-0.2ns	-0.63ns
RTD finas	-0.67*	-0.63ns	-0.58ns	-0.58ns	-0.75**	0.40ns	0.74*	0.37ns	0.66*
RDMC	-0.57ns	-0.58ns	-0.47ns	-0.47ns	-0.59ns	0.38ns	0.57ns	0.23ns	0.54ns
SSA	0.72*	0.68*	0.76**	0.76**	0.67*	-0.33ns	-0.66*	-0.36ns	-0.70*
RLD	-0.73*	-0.72*	-0.79**	-0.79*	-0.69*	0.20ns	0.72*	0.27ns	0.70*
RWD	-0.43ns	-0.37ns	-0.37ns	-0.37ns	-0.42ns	0.39ns	0.37ns	0.21ns	0.40ns
Biomasa	0.36ns	0.34ns	0.50ns	0.50ns	0.30ns	0.10ns	-0.36ns	-0.41	-0.38ns

¹ Valores negativos del PC1 denotan mayor calidad de suelo dado que las cargas asociadas a las variables en este componente principal son negativas. Estos valores de PC1 fueron utilizados para comparar el grado de asociación entre la percepción de la salud del suelo por los productores y la calidad de suelo (ver sección 1a del componente social).

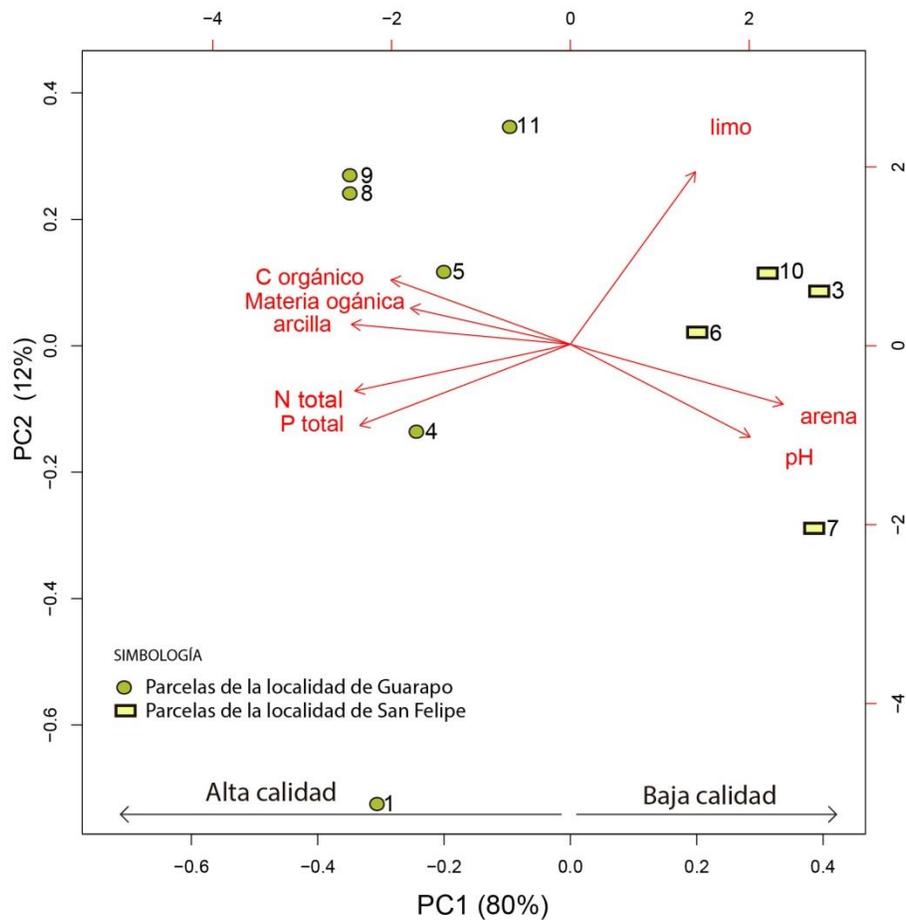


Figura 8. Análisis de componentes principales de las variables físicas y químicas de suelo (n=10). La variación explicada por los primeros dos componentes es de 92% de la variación en los datos de suelo.

2. Asociación entre rasgos funcionales y variables de productividad

Los rasgos funcionales en el maíz se correlacionaron con variables de productividad, principalmente aquellos de densidad de los tejidos (Tabla 5). Las estructuras aéreas se asociaron con la biomasa aérea de una planta (medición de productividad) de manera diferente que las estructuras subterráneas. La biomasa aérea aumentó en presencia de hojas de mayor densidad, pero no estuvo asociada con la densidad en las raíces, aunque sí negativamente con la longitud total de las raíces por m^3 de suelo (RLD) y la materia seca en las raíces (RDMC). Esto sugiere que entre más densas sean las hojas, pero menos abundantes las raíces en el suelo y con más materia seca, la biomasa aérea de los individuos aumentará en una parcela (Tabla 5), un aspecto importante para la producción de forraje. Al igual que con la biomasa aérea, el RLD y el RDMC también se relacionaron de manera negativa con el índice de cosecha (gramos de grano que se generan por cada gramo de biomasa de la planta), sugiriendo que cuando la planta asigna mayor cantidad de biomasa a la formación de sus estructuras vegetativas y no a la generación de granos, las raíces son más abundantes en un m^3 de suelo y también tienden a tener más materia seca que agua.

Los rasgos de tallos, principalmente la altura de la planta, mostraron correlaciones positivas con los distintos tipos de rendimiento y el número de granos por m². A mayor altura, la planta tendió a asignar mayor biomasa a la producción de granos (correlación positiva con el rendimiento de biomasa, 0.67), generando un mayor número de granos (correlación positiva con número de granos, $r = 0.65$), con un alto rendimiento seco de éstos (correlación positiva con rendimiento seco del grano, $r = 0.7$). En este sentido, la altura es un rasgo que está fuertemente asociado con el aumento o disminución del rendimiento. En general, las variables de rendimiento y de grano por m² están más asociados con aspectos de tallos y raíces, mientras que aspectos de biomasa se relacionaron más con los rasgos de las hojas. Se detectó una relación positiva entre el rendimiento de biomasa y la altura de la planta y, una relación negativa entre el rendimiento de biomasa con la densidad del tejido radical (RTD) y con la densidad del peso radical (RWD). Esto sugiere que entre mayor altura tenga la planta, la densidad y biomasa en tallos disminuye y un porcentaje mayor de la biomasa se destina a los granos. La asignación de biomasa a granos, a su vez, disminuyó cuando la densidad del tejido y del peso radical (asociado con mayores niveles de biomasa) aumentaron. Esto explica que el rendimiento seco del grano se vea favorecido por la altura de la planta (correlación positiva) y afectado negativamente por el contenido de materia seca (RDMC) y la densidad de la longitud radical (RLD). Además, el número de granos por m² cambió en la misma dirección que la altura de la planta y el diámetro basal del tallo (correlaciones positivas). Por su parte, el número de granos disminuyó cuando aumentó el RDMC y el RLD. Finalmente, el rendimiento del rastrojo con olote (rendimiento de toda la planta sin considerar el rendimiento del grano) también se asoció positivamente con la altura de la plantas y negativamente con la densidad del tejido y peso radical.

Además del análisis de correlación que permite observar rasgos funcionales del maíz con potencial como indicadores de productividad, también se realizó un PCA con las variables de productividad. En la Figura 9 se muestra este PCA y la distribución de las parcelas en el espacio descrito por el primer (PC1) y segundo componente principal (PC2). Para este análisis, se contó con 9 parcelas, en lugar de 11, puesto que dos de ellas no contaron con todos los datos de productividad completos. En estos casos, los productores habían realizado la cosecha antes de la medición de productividad. La variación explicada por el componente 1 (55%) y 2 (33%) sumó el 88% de la variación en los datos. El PC1 presentó cargas fuertes en prácticamente todas las variables, mientras que el PC2 tuvo fuerte peso en el rendimiento de rastrojo con olote (Anexo A, Tabla A8). El PC1 mostró que puede ser usado gruesamente como un índice de productividad ya que resume la gran mayoría de la variación. Con base en las correlaciones entre el PC1 y los rasgos funcionales, se encontró que en condiciones de mayor productividad las plantas presentan estructuras menos densas, con menor contenido de materia seca y la altura de la planta es uno de los rasgos principales que está determinando la productividad (última columna en Tabla 5). En cuanto a la distribución de las parcelas en el espacio descrito por el PC1 y el PC2 (Fig. 9) se encontró que, si bien, no hay fuertes tendencias de las parcelas a ubicarse en extremos distintos de alta o baja productividad según la localidad como sucedió con el suelo, la mayoría de las parcelas de Guarapo se ubicaron dentro del área de alta productividad (con excepción de las parcelas 4 y 5) y las de San Felipe en el área de baja productividad (con excepción de la parcela 3).

Tabla 5. Correlación entre rasgos funcionales, variables de productividad (n=9) y el primer componente principal (PC1) del PCA de productividad (n=9). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05, **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo). Abreviaturas de rasgos funcionales en Anexo A, tabla A2. En negritas se resaltan las correlaciones con magnitud mayor o igual a 0.5.

Rasgo/variable de productividad	Biomasa total de 10 plantas (g)	Índice de cosecha (g)	Cociente grano: olote (g)	Rendimiento seco del grano (kg/ha)	Rendimiento de biomasa (kg/ha)	Rendimiento del rastrojo con olote (kg/ha)	Número de granos por m ²	PC1 de productividad ²
Órgano: Hoja								
Espesor foliar	-0.42 ns	-0.16 ns	-0.13 ns	-0.23 ns	-0.05 ns	0.03 ns	-0.19 ns	0.23 ns
Cantidad de hojas	-0.5 ns	-0.02 ns	-0.04 ns	-0.11 ns	0.07 ns	0.1 ns	-0.02 ns	0.02 ns
SLA	0.08 ns	0.1 ns	0.2 ns	0.09 ns	-0.18 ns	-0.25 ns	0.01 ns	0.07 ns
LDMC	-0.08 ns	-0.07 ns	-0.38 ns	-0.05 ns	0.16 ns	0.21 ns	0 ns	-0.05 ns
Biomasa	-0.22 ns	-0.06 ns	0.27 ns	0.16 ns	0.27 ns	0.27 ns	0.31 ns	-0.23 ns
Órgano: Tallo								
Altura	0.14 ns	0.14 ns	0.16 ns	0.7 *	0.67 *	0.61 ns	0.65 *	-0.67 *
Diámetro basal	0.24 ns	0.08 ns	-0.2 ns	0.38 ns	0.45 ns	0.44 ns	0.53 ns	-0.49 ns
Densidad	-0.21 ns	0.04 ns	0.71 *	-0.35 ns	-0.4 ns	-0.44 ns	-0.28 ns	0.32 ns
Biomasa	0.03 ns	0.04 ns	-0.03 ns	0.17 ns	0.32 ns	0.32 ns	0.35 ns	-0.34 ns
Órgano: Raíz								
SRL	-0.09 ns	-0.05 ns	0.37 ns	0.06 ns	-0.12 ns	-0.13 ns	-0.01 ns	0.15 ns
RTD finas	-0.31 ns	-0.06 ns	-0.02 ns	-0.29 ns	-0.18 ns	-0.14 ns	-0.16 ns	0.19 ns
RDMC	-0.56 ns	-0.61 ns	-0.32 ns	-0.68 *	-0.4 ns	-0.27 ns	-0.56 ns	0.53 ns
SSA	-0.03 ns	0.04 ns	0.31 ns	0.14 ns	-0.07 ns	-0.1 ns	0.07 ns	0.06 ns
RLD	-0.66 *	-0.76 **	-0.28 ns	-0.57 ns	-0.23 ns	-0.07 ns	-0.6 ns	0.49 ns
RWD	-0.39 ns	-0.13 ns	0.07 ns	-0.44 ns	-0.64 ns	-0.6 ns	-0.44 ns	0.67*
Biomasa	0.3 ns	0.58 ns	0.33 ns	0.45 ns	0.1 ns	-0.04 ns	0.64 *	-0.38 ns

² Valores negativos del PC1 denotan mayor productividad dado que las cargas asociadas a las variables en este componente principal son negativas. Estos valores de PC1 fueron utilizados para comparar el grado de asociación entre la percepción de la productividad por los productores y la productividad real.

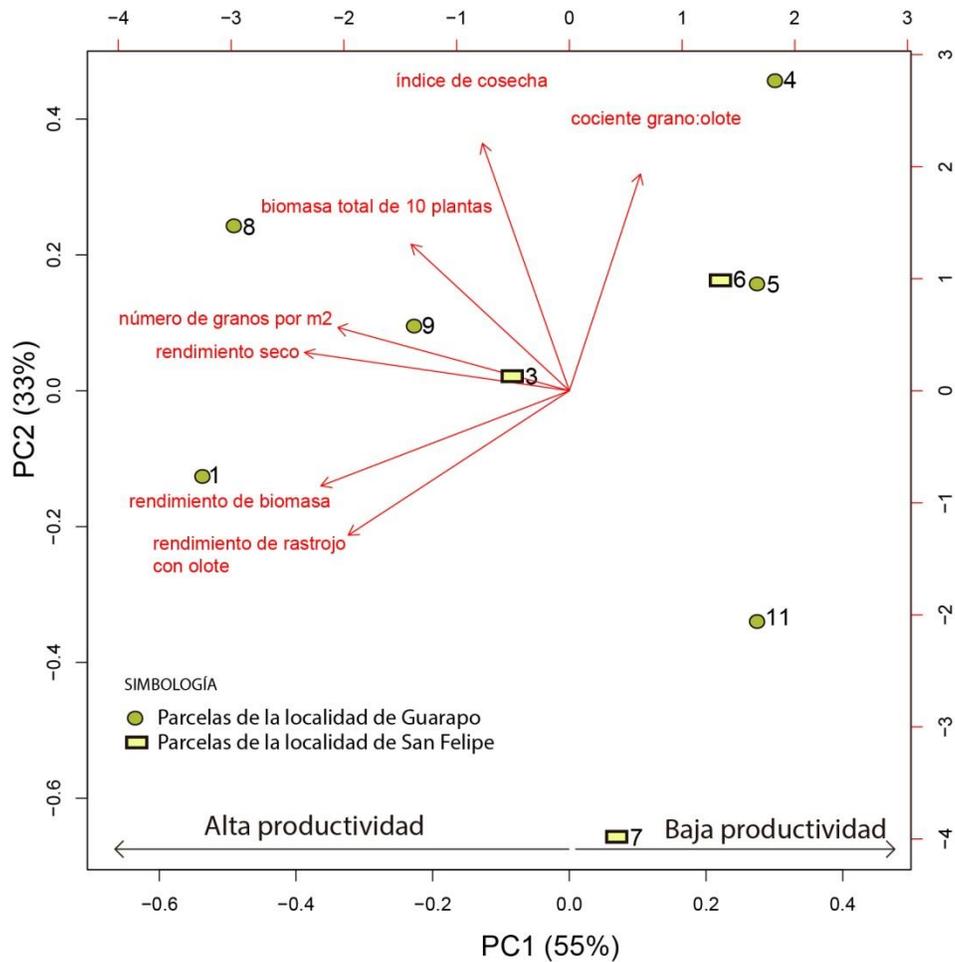


Figura 9. Análisis de componentes principales de las variables de productividad (n=9). La variación explicada por los dos primeros componentes es de 88% de la variación en los datos de productividad.

3. Asociación de rasgos funcionales entre órganos

Un análisis de PCA permitió resumir el comportamiento entre los rasgos de los distintos órganos del maíz. En la Figura 10 se muestra el PCA de todas las variables funcionales y la distribución de los individuos medidos (n=55) en el espacio descrito por el primer (PC1) y segundo componente principal (PC2). La variación explicada por el componente 1 (26%) y el 2 (17%) sumaron 43% de la variación en los datos. El PC1 presentó cargas fuertes en prácticamente todas las variables, mientras que el PC2 tuvo fuerte peso con aspectos de biomasa y densidad tanto de tallos como de raíces (Anexo A, Tabla A9). Este análisis muestra que los patrones de covariación de los rasgos funcionales de cada órgano coinciden con espectros de estrategias conservativas-adquisitivas. En las hojas, aquellas plantas con hojas de mayor espesor tienden a tener un SLA menor ($r=-0.67$, Anexo A, Tabla A10), es decir, las hojas más gruesas tienden a exponer un área menor por unidad de carbono invertido en la construcción, lo que se refleja en un mayor LDMC (Anexo A, Fig. A1). De manera similar, las raíces con menor SRL presentaron mayor densidad en tejidos ($r=-0.31$, Tabla A11, Fig. A2). Los tallos, por su parte, aumentaron en altura a la par que su diámetro ($r=0.37$), sin embargo este diámetro presentó menor densidad en los tejidos ($r=-0.43$, Anexo A, Tabla A12, Fig. A3)

En general, se encontró paralelismo en las estrategias de los diferentes órganos en el maíz. Por ejemplo, la biomasa de los tres órganos, el contenido de materia seca en raíces y hojas (RDMC y LDMC, respectivamente) y la relación entre unidad de adquisición de recursos y la inversión en recursos (SLA y SRL) covarían de manera similar (Fig. 10). Las correlaciones pareadas para todos los rasgos funcionales se presentan en el Anexo A, Tabla A13. Estos análisis, junto con el PCA (Fig.10) resumen el comportamiento de los datos y sugieren un proceso coordinado y acoplado en la expresión de los rasgos funcionales entre los diferentes órganos de la plantas: plantas con una tendencia a una estrategia adquisitiva en las hojas, presentarán esta estrategia también en tallos y raíces.

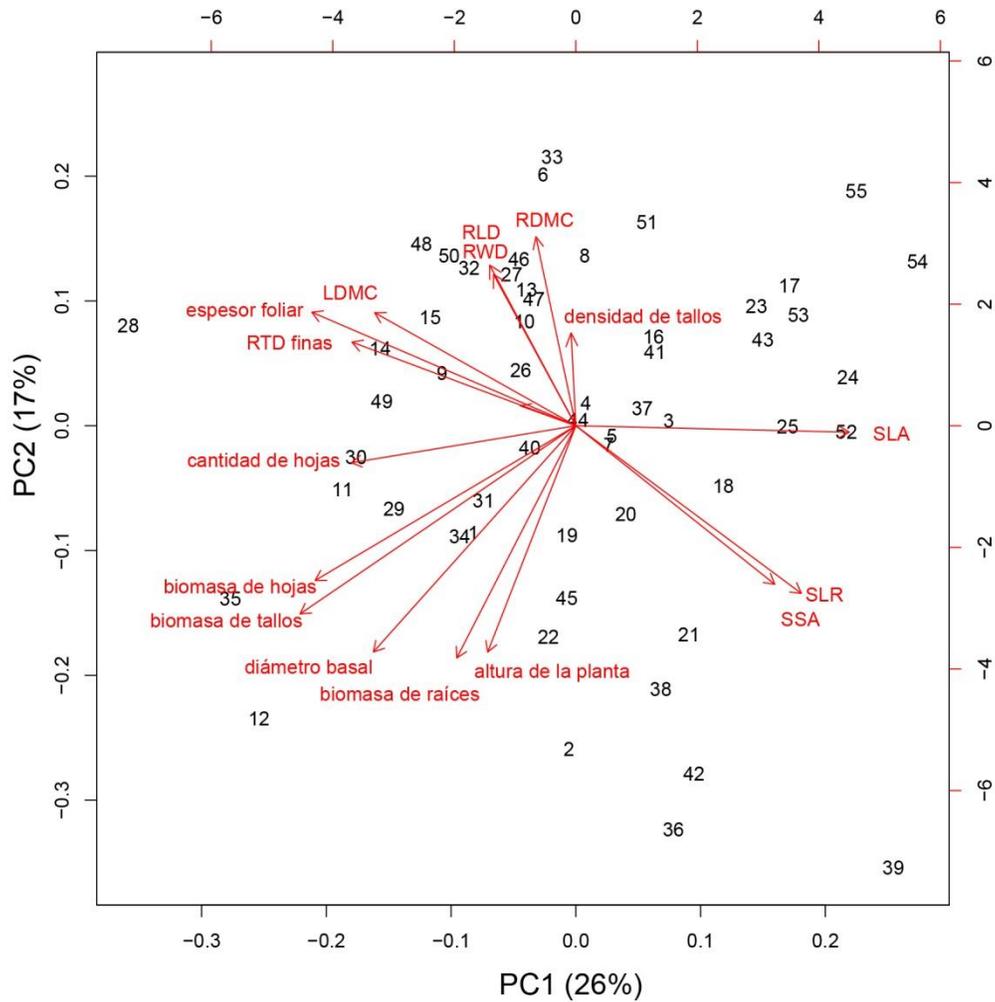


Figura 10. Análisis de componentes principales entre rasgos funcionales de los tres órganos a nivel individuo (n=55) y distribución de estos individuos en el espacio descrito por los dos primeros componentes. Los dos primeros componentes principales explicaron más del 43% de la variación en los datos.

B. Componente social

1a. Percepción de la salud del suelo

Con base en las entrevistas, se examinó la percepción que tienen los productores de Guarapo y San Felipe sobre la salud del suelo en su parcela. En las entrevistas se manejó el concepto de salud y no de calidad de suelo por ser este último un concepto muy técnico. Las percepciones de los productores de Guarapo y San Felipe se muestran en las Tablas 6 y 7 respectivamente. Los productores asignaron una categoría de salud de suelo (bueno, regular o malo) de acuerdo a criterios físicos, químicos, ambientales y biológicos que también se reportan en las mencionadas tablas.

En Guarapo, los productores asociaron y categorizaron la salud del suelo en función de (1) la producción esperada, (2) las características de las plantas de maíz, (3) la cantidad y duración del periodo de lluvia y su incidencia en la apariencia de las plantas y la productividad, (4) el porcentaje de arenas, limos y arcillas que conforman la estructura de suelo y que el productor asocia con la cantidad de "humedad que guarda el suelo", y (5) el color del suelo, en donde suelos oscuros se percibieron como suelos "más nutridos" (con mayor contenido de materia orgánica). De manera similar, en San Felipe los productores evaluaron la salud del suelo de su parcela a través de la cantidad de (1) producción, (2) las características que observan en las plantas de maíz, (3) la lluvia y (4) el color del suelo. Aunque los productores de ambas localidades mencionaron distintos aspectos que inciden en su percepción de la salud del suelo, hubo una fuerte convergencia en que diversos factores inciden en el desarrollo y las características de la planta de maíz, y en que esto repercute en la productividad. En este sentido, las características de las plantas tienen un papel central en evaluar las condiciones del suelo de una parcela.

Los productores de Guarapo y San Felipe tienen una percepción contrastante de la salud de sus suelos. En Guarapo se perciben suelos con mejor salud que en San Felipe, pues los productores los categorizaron como regulares a buenos. En San Felipe, los productores percibieron sus suelos como regulares o malos. Al examinar el grado de coincidencia entre la percepción de los productores y la calidad medida en el suelo se encontró que existe una fuerte coincidencia ($r=0.79$, Figura 11) entre ellos. Por un lado, las parcelas de Guarapo se ubicaron en el extremo de alta calidad/buena salud de suelo, mientras que las de San Felipe en la zona de baja calidad/salud de suelo.

1b. Percepción de la productividad

Las percepciones que tienen los productores de Guarapo y San Felipe de la productividad de su parcela se muestran en las Tablas 8 y 9, respectivamente. Los productores asignaron una categoría de productividad (alta, mediana o baja) con base en distintos aspectos. Muchos de ellos son compartidos con los utilizados para la evaluación de la salud del suelo, ya que la mayoría de los productores ven una relación directa entre la salud del suelo y las características de la planta, y entre estas características y la productividad. Entre los aspectos que los productores evalúan para inferir productividad se encuentran aspectos físicos del suelo, ambientales y biológicos, pero no como entidades aisladas o independientes, sino como aspectos que repercuten en el desarrollo de la planta y en su futura productividad.

Al igual que para la calidad del suelo, los productores de las dos regiones perciben la productividad de sus parcelas de manera contrastante (Tablas 8 y 9). Todos los agricultores de Guarapo perciben una alta productividad de su parcela, mientras que los productores de San Felipe categorizaron sus parcelas como de mediana o baja producción. En San Felipe sólo un productor categorizó su parcela

como de alta productividad, sin embargo, la categorización de esta parcela (con el número 10) y la de la parcela número 2, también de San Felipe, no se utilizaron en el análisis de Spearman dado que no se obtuvieron todos los datos para el cálculo de los índices de productividad y por lo tanto no fueron incluidas en el PCA.

La percepción de los productores tuvo una mediana asociación con la productividad medida (Fig. 12). Aunque el valor de correlación fue bajo ($r=0.30$), se observa que tres de las seis parcelas de Guarapo se ubicaron en el extremo de alta/buena productividad, similar a lo percibido por los productores. Las tres parcelas restantes de Guarapo (número 4, 5 y 11) presentaron una baja productividad, a pesar de que el productor percibe su productividad como alta. En el caso de las parcelas de San Felipe, todas las percepciones de productividad coincidieron con la productividad medida. Fue así que dos parcelas se ubicaron en la categoría de productividad mediana/regular y una en la categoría de mala/baja (Fig. 12).

2. Dirección de uso de los rasgos funcionales por los agricultores

En el Anexo B se muestran las tablas con los indicadores derivados de la planta del maíz que cada productor mencionó utilizar para evaluar la salud del suelo y la productividad de su parcela (Anexo B, Tablas B1 y B2). Los rasgos se reportan en el orden en el cual fueron mencionados por el productor. Este orden es relevante partiendo del supuesto de que los primeros rasgos mencionados son los más utilizados por el productor y ellos serían los rasgos con mayor potencial como indicadores. Estas tablas muestran cómo los productores interpretan los diferentes grados de expresión de los rasgos (estado de carácter). Un mismo rasgo representa una condición distinta de salud de suelo y productividad dependiendo de su grado de expresión. Por ejemplo, la coloración de las hojas en verde, morado y amarillo se relacionó con un suelo bueno, bueno a regular y malo, y con alta, mediana y baja productividad, respectivamente. En el caso de los tallos, un diámetro pequeño del tallo se asoció con un suelo malo y baja productividad. En contraste, un diámetro mayor se asoció con un suelo bueno y una alta producción.

Contrario a lo esperado, los productores no utilizan otros caracteres de hojas ni de tallo. Por ejemplo, no relacionan el área foliar con las condiciones de salud del suelo ni con la productividad, sino que asocian esta área con la variedad de la planta de maíz. Algo similar sucede con la altura de la planta, en donde los productores no la relacionan directamente la salud del suelo y productividad, ya que mencionan la existencia de plantas de pequeña altura que producen mazorcas grandes y plantas de mayor altura que producen mazorcas pequeñas. Similar a lo esperado, muy pocos productores utilizan a la raíz del maíz como indicador. Sólo algunos productores de Guarapo hacen uso de este órgano observando únicamente a las raíces adventicias, conocidas localmente como "arañas". Sin embargo, no existe convergencia en el uso de las "arañas" para evaluar la calidad del suelo por parte de los productores. Por un lado, se menciona que este rasgo no tiene relación directa con la salud del suelo (Anexo B, Tabla B1, parcela 5). Sin embargo, a mayor cantidad de raíces adventicias la planta presenta mayor resistencia física (de amortiguamiento) ante cualquier evento natural (p. ej. deslaves). Por otro lado, hay productores (Anexo B, Tabla B1, parcela 4) que reportan que entre más raíces adventicias tenga la planta, éstas le permiten tomar el agua y nutrimentos del suelo. Aunque no está bien definida la relación de las raíces adventicias con la salud del suelo por parte de los productores, quienes hacen uso de este rasgo coinciden en que estas raíces sí tienen relación con la productividad.

Tabla 6. Categorización de la salud del suelo en Guarapo. La categorización se basó en la percepción del productor, dueño o trabajador de la parcela. Se utilizó el concepto de salud del suelo como sinónimo de calidad del suelo durante las entrevistas.

Parcela	Percepción de salud del suelo			Factores evaluados por el productor	Ejemplos de observaciones del productor sobre la salud del suelo de su parcela
	Buena	Regular	Mala		
1	x			- Ambientales (como factor para la productividad) - Productividad (derivado de aspectos particulares de la planta)	"Yo le digo que el suelo es bueno porque se refleja en las cosechas"; "el suelo sí es bueno pero se necesita la lluvia,..., lloviendo da una cosecha buena"
4	x			- Ambientales (como factor de productividad) - Productividad (derivado de aspectos particulares de la planta)	"Yo digo que bueno"; "el suelo está bueno cuando llueve... Hay veces que se va el agua cuando está jiloteando (mazorca tierna y en proceso de formación de granos), pero este año yo creo que sí nos va a llover"
5	x			- Ambientales (como factor de productividad) - Físicos (incidencia en la productividad) - Productividad (derivado de aspectos particulares de la planta)	"Yo desde ahorita le puedo asegurar que mi suelo va a salir bueno... porque el suelo se ve fresco por la cantidad de humedad que guarda"; "le estoy garantizando que con la poca lluvia que nos pueda llover yo voy a llegar a producción"
8		x		- Físico-químicos (incidencia en la productividad)	"Porque tiene partes de tierra negra que es buena señal que no está muy pobre la tierra...y la planta esta aventajada (desarrollándose). En un suelo malo la planta no se desarrolla; la planta está amarilla y con la caña muy delgada y no se da buena producción"
9		x		-Biológicos (características de la planta)	
11	x			Físico-químicos (incidencia en la productividad) - Productividad (derivado de aspectos particulares de la planta)	"La tierra que tenemos es tierra negra, muy buena"; "yo digo que mi suelo es de bueno a excelente porque las plantas se ven sanas y porque el rendimiento es bastante bueno... y ese es el fin, la producción"

Tabla 7. Categorización de la salud del suelo en San Felipe. La categorización fue basada en la percepción del productor dueño o trabajador de la parcela. Se utilizó el concepto de salud del suelo como sinónimo de calidad del suelo durante las entrevistas.

Parcela	Percepción de salud del suelo			Factores evaluados por el Productor	Ejemplos de observaciones del productor sobre la salud del suelo de su parcela
	Buena	Regular	Mala		
2		x		<ul style="list-style-type: none"> - Ambientales (como factor para la productividad) - Físico-químicos (incidencia en la productividad) - Productividad (derivado de aspectos particulares de la planta) 	"Yo pienso que está más o menos... Con el abono tiene un color barroso negro y se siente húmedo... Yo no sé si sea bueno o malo pero siempre da"
3		x		<ul style="list-style-type: none"> - Físico-químicos (incidencia en la productividad) - Productividad (derivado de aspectos particulares de la planta) 	"El suelo es regular, pero ayudándole puede funcionar mejor...La tierra que sembramos no es tierra negra, pero tampoco es colorada, es gris, y esta tierra [no] produce ni mucho ni poco"
6			x	<ul style="list-style-type: none"> - Físico-químicos (incidencia en la productividad) -Biológicos (características de la planta) - Productividad (derivado de aspectos particulares de la planta) 	"Yo pienso que mi suelo es malo porque se ve en la producción. En primer lugar, el suelo está muy desnutrido, no es de color negro, es un suelo arenoso, y todo eso afecta a las plantas [que] ya no crecen bien y ya no producen"
7		x		<ul style="list-style-type: none"> - Ambientales (como factor para la productividad) - Productividad (derivado de aspectos particulares de la planta) 	"Mi tierra es más o menos buena porque ningún año la he dejado descansar y siempre levanto buena cosecha, aunque cuando no llueve pues no da buena cosecha".
10		x		<ul style="list-style-type: none"> - Químicos (incidencia en la productividad) - Productividad (derivado de aspectos particulares de la planta) 	"Yo digo que es regular porque algo le hace falta a la tierra, proteínas, no sé que sea pero en lo que me fijo es en la producción "

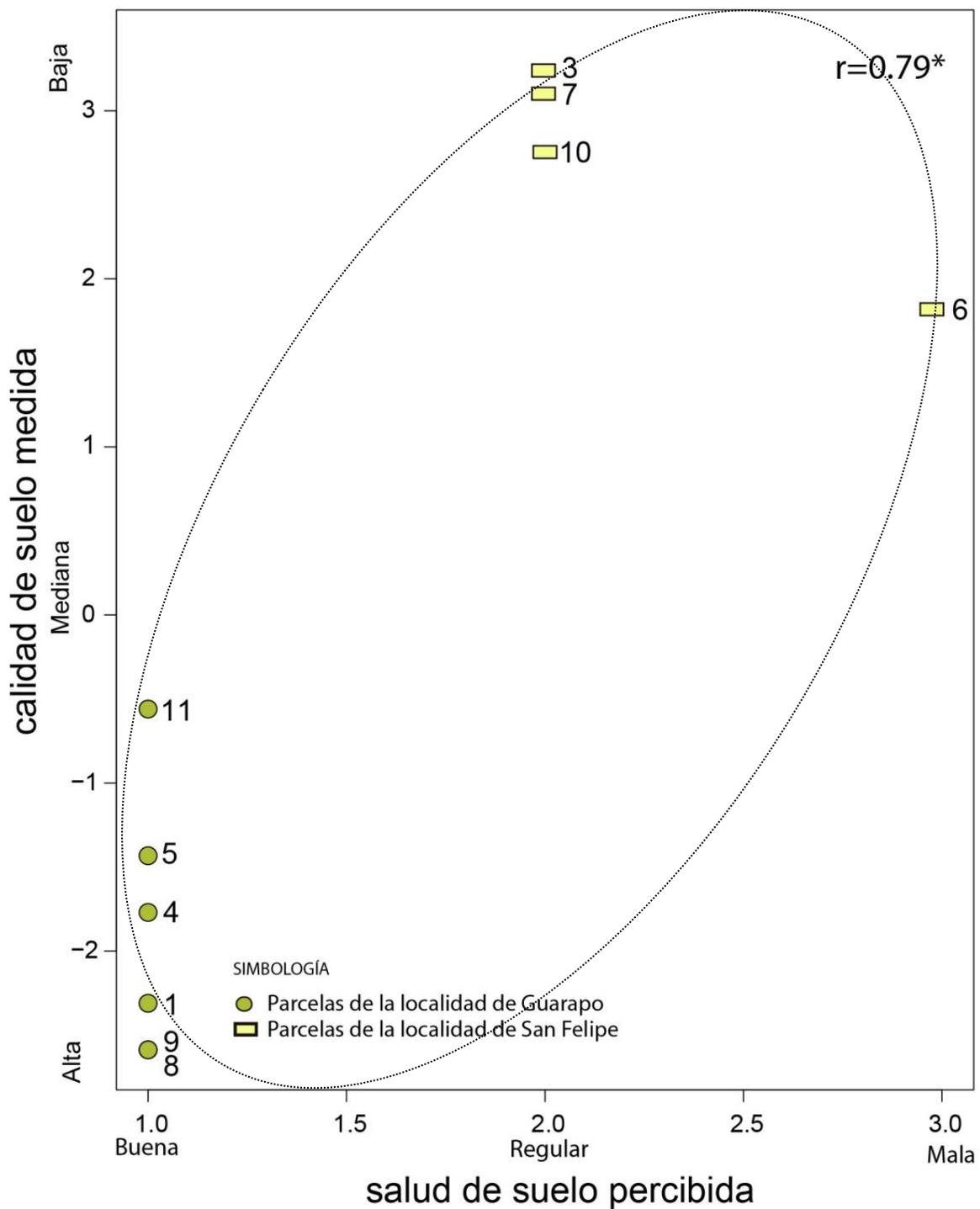


Figura 11. Grado de asociación entre la percepción de la salud del suelo y la calidad de suelo medida en laboratorio (con base en el PC1 de suelo de la tabla 5, n=10). Valores negativos del PC1 denotan mayor calidad de suelo dado que las cargas asociadas a las variables en este componente principal son negativas.

Tabla 8. Categorización de la productividad en Guarapo. La categorización fue basada en la percepción del productor dueño o trabajador de la parcela.

Parcela	Percepción de productividad			Factores evaluados por el productor	Ejemplos de observaciones del productor sobre la productividad de su parcela
	Alta	Mediana	Baja		
1	x			- Ambientales (como factor para la productividad) - Biológicos (características de la planta)	"Si sigue lloviendo, la cosecha sí será buena,..., porque entre más llueve la planta está más desarrollada hay más cosecha".
4	x			- Ambientales (como factor de productividad)	"Yo digo que buena... Hay veces que se va el agua cuando está jiloteando (mazorca tierna y en proceso de formación de granos), pero este año yo creo que sí nos va a llover".
5	x			- Físicos (incidencia en la productividad) - Biológicos (características de la planta)	"Sí va a ser buena,..., porque el suelo se ve fresco por la cantidad de humedad que guarda,..., y las plantas se ven desarrolladas".
8	x			- Físicos (incidencia en la productividad)	"Pues yo creo que buena... Ahorita ha estado lloviendo mucho y eso le ayuda a las plantas a que se pongan bonitas, verdes, y cuando están así, los maíces sí dan (producen)".
9	x			-Biológicos (características de la planta)	
11	x			-Biológicos (características de la planta)	"La producción a va a ser buena porque las mazorcas se ven bien desarrolladas". "La caña es gruesa; si la caña está delgada normalmente no te da una buena mazorca. Las hojas también tienen buen tamaño y color. Pienso que, tanto la caña como las hojas, son los que nutren a la mazorca. En ese sentido, si tienen un buen follaje, de buen color y una buena caña, gruesa y alta, automáticamente van a dar una mazorca de buen tamaño".

Tabla 9. Categorización de la productividad en San Felipe. La categorización fue basada en la percepción del productor, dueño o trabajador de la parcela.

Parcela	Percepción de productividad			Factores evaluados por el productor	Ejemplos de observaciones del productor sobre la productividad de su parcela
	Alta	Mediana	Baja		
2		x		<ul style="list-style-type: none"> - Ambientales (como factor para la productividad) - Biológicos (características de la planta) 	"Es regular porque nos faltó lluvia... No llovió a tiempo y se le pasó el tiempo a la milpa. Si no hubiera faltado agua se hubieran desarrollado pronto las plantas y se hubieran dado mejor... Además, el grano no creció como debió de haber crecido por la falta del agua, pero las plantas sí tienen buena mazorquilla...Eso afectó a la producción poquito".
3		x		<ul style="list-style-type: none"> - Ambientales (como factor para la productividad) - Biológicos (características de la planta) 	"Va a ser regular... Le afectó mucho la seca a la planta... En la punta de la mazorca se ven muchos granos que tenían que crecer y no se desarrollaron".
6			x	<ul style="list-style-type: none"> - Ambientales (como factor para la productividad) - Biológicos (características de la planta) 	"Es mala porque no llovió a su tiempo, se atrasó mucho. Sí sembramos, nació la planta, estaban verdes, pero después ya no llovió y ya no se desarrolló; se quedó chiquita".
7		x		<ul style="list-style-type: none"> - Ambientales (como factor para la productividad) - Biológicos (características de la planta) 	"Fue muy larga la seca, porque los maíces se ven bien, altos y verdes, pero tiene mucha cañilla jorra y no alcanzó a despegar bonito" (El productor hacer referencia a que la mazorca comenzó el proceso de desarrollo, sin embargo por falta de agua no terminó su desarrollo".
10	x			<ul style="list-style-type: none"> - Ambientales (como factor para la productividad) - Biológicos (características de la planta) 	"Creo que va a ser buena producción por el cambio de semilla...Yo le veo que sí crecieron las plantas, sí hicieron su mazorca, aunque no crecieron mucho por la falta de agua pero sí tiene muy buen grano y el grano está lleno".

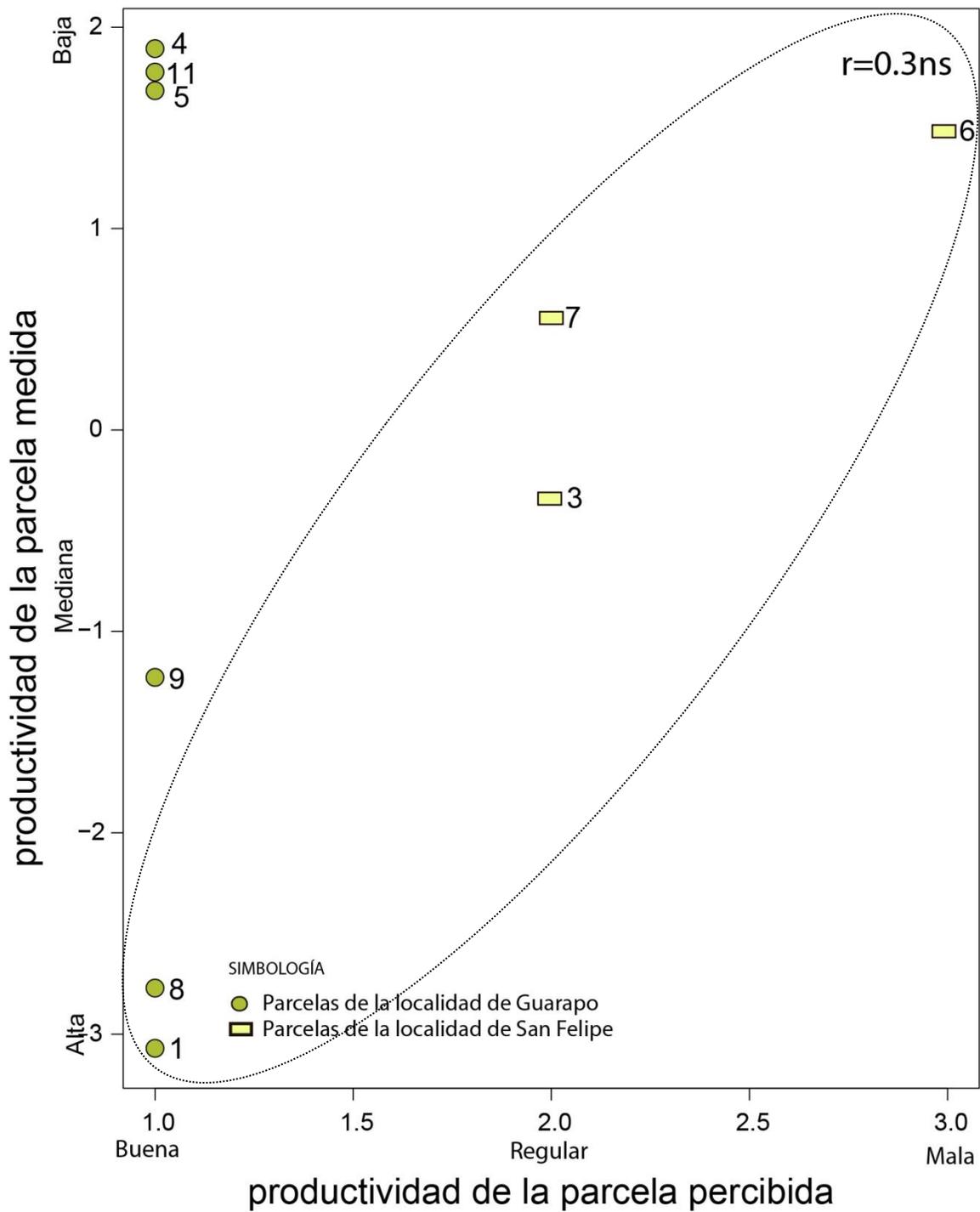


Figura 12. Grado de asociación entre la percepción de la productividad y la productividad medida a través de variables de rendimiento y biomasa (con base en el PC1 de productividad de la Tabla 6, n=9). Valores negativos del PC1 denotan mayor productividad dado que las cargas asociadas a las variables en este componente principal son negativas.

3. Análisis de frecuencia de las características del maíz con mayor uso

Derivado de las Tablas B1 y B2 del Anexo B, se realizó un análisis de frecuencias (Tabla 10) que resume el uso de determinados rasgos funcionales para evaluar la salud del suelo y la productividad del agroecosistema. Este análisis de frecuencias apunta a que rasgos con mayor potencial como indicadores son aquellos procedentes de estructuras aéreas como el color de la hoja y el diámetro del tallo. Si bien, las estructuras subterráneas aparecen en el análisis de frecuencias, estos rasgos suelen ser muy poco utilizados como indicador, al igual que la altura de la planta.

Tabla 10. Rasgos de la planta de maíz mencionados como indicadores por los productores entrevistados. En negritas, los rasgos con mayor frecuencia de mención.

Órgano	Rasgo	Frecuencia en Guarapo	Frecuencia en San Felipe	Frecuencia total
Hojas	Color	4	6	10
	Espesor	0	0	0
	Área	1	3	4
Tallos	Diámetro	3	6	9
	Altura	2	2	4
Raíces	SRL	2	0	2
	Número de raíces adventicias	3	1	4

Tabla 11. Indicadores potenciales basados en tres grupos de conocimiento. Las primeras columnas muestran los rasgos que ecológicamente se asocian con la calidad de suelo y productividad y el órgano al que pertenece dicho rasgo. Las dos columnas siguientes muestran la frecuencia de uso del rasgo por parte del productor y el significado que le dan dado el grado de expresión (estado de carácter). La última columna muestran los rasgos que son utilizados por los productores en donde hay un respaldo ecológico (indicadores potenciales). Sólo se reportan los rasgos en los cuales hubo concurrencia de ambos conocimientos.

Órgano	Rasgos funcionales	Frecuencias ³	Indicadores utilizados por los productores (estados de carácter)			Concurrencia de ambos conocimientos
			calidad y producción menor	calidad y producción moderada	calidad y producción mayor	
Hoja	Biomasa	0	-	-	-	-
	Espesor foliar	0	-	-	-	-
	Área foliar específica (SLA)	4 (1,3)	Pequeña	Mediana	Grande	Si
	Contenido foliar de materia seca (LDMC)	0	-	-	-	-
	Densidad tejido foliar (LTD)	0	-	-	-	-
	Color	10 (4,6)	Verde	Morado	Amarillo	Si
Tallo	Biomasa	0	-	-	-	-
	Altura	4 (2,2)	Pequeña	Mediana	Grande	Si
	Diámetro	9 (3,6)	Pequeño	mediano	Grande	Si
	Densidad específica del tallo (SSD)	0	-	-	-	-
Raíz	Biomasa	0	-	-	-	-
	Longitud radical específica (SRL)	2 (2,0)	Corta	Mediana	Larga	Si
	Densidad del tejido radical (RTD)	0	-	-	-	-
	Contenido radical de materia seca (RDMC)	0	-	-	-	-
	Área superficial específica (SSA)	0	-	-	-	-

³ El número fuera del paréntesis corresponde al total de menciones realizadas por los productores. Entre paréntesis se muestra la frecuencia de menciones reportada por los productores de Guarapo y San Felipe, respectivamente.

VII. Discusión

A. Rasgos funcionales como indicadores de calidad de suelo y productividad

El gradiente edáfico de los sitios estudiados fue muy amplio, condición ideal para la búsqueda de asociaciones entre los rasgos funcionales y las condiciones del suelo. Las 10 parcelas con las que se trabajó (aunque en un inicio 11 pero no se obtuvo información edáfica de una parcela) presentaron intervalos amplios de variación para las variables edáficas, reflejando las diferencias en manejo que se les aplica (Anexo B, Tablas B3 y B4). El manejo que los productores dan a la parcela es muy variado dentro y entre localidades. Si bien los productores de Guarapo (Anexo B, Tabla B3) siembran más de un cultivo en la parcela, el arreglo de estos cultivos es diferente. Es así que hay productores que siembran de manera intercalada los cultivos de maíz y frijol (p.ej. parcela 5 y 11) y otros productores que, aunque siembran maíz y frijol, separan los cultivos dentro de la parcela (p. ej. parcela 1, 4, 8 y 9). Todos los productores aseguran utilizar fertilizantes químicos en distintas proporciones todos, sin embargo hay quienes hacen uso de lonbricomposta como fertilizante orgánico y no eliminan el rastrojo después de la cosecha (p. ej. parcela 5). También hay productores que aseguran tener una labranza cero (p.ej. parcela 5 y 11) y sólo utilizar tractor para barbechar cuando hay demasiada maleza cada 3 a 5 años. Sin embargo, la mayoría hace uso de tractor (p. ej. parcelas 1, 4, 8 y 9). En el caso del manejo en San Felipe (Anexo B, Tabla B4), los productores siembran, también, más de un tipo de cultivo en la parcela, pero a diferencia de Guarapo, en San Felipe todos los cultivos se encuentran separados dentro de la parcela. Todos hacen uso de fertilizantes químicos en diferentes medidas siendo la parcela 7 en la que se menciona hacer uso de fertilizantes químicos en menor cantidad. Es en esta misma parcela (la número 7) en la que el productor hace el arado con yunta pues en el resto de las parcelas (2,3,6 y 10) se realiza con tractor. Estos distintos y variados tipos de manejo generan condiciones muy distintas de condiciones de suelo.

Las condiciones edáficas variaron entre parcelas formando un gradiente, pero estas condiciones presentaron fuertes patrones de covariación. Características químicas del suelo tales como el contenido de nitrógeno y fósforo, carbono orgánico y materia orgánica, y características físicas como un porcentaje mayor de arcilla, se asociaron de manera positiva. Un aumento en valor de estas variables incrementó la calidad del suelo, mismos que se han reportado en otros trabajos como elementos de gran importancia en los suelos agrícolas (Rees *et al.*, 2005) ya que están asociados al incremento del rendimiento de cultivos (Navarro-Bravo *et al.*, 2007; Cerón-Rincón y Arizábal-Gutierrez, 2012; Singh *et al.*, 2014)

En contraste, el porcentaje de arena y el pH se relacionaron negativamente con todas las otras variables, indicando que disminuyen la calidad del suelo. La covariación entre variables fue tan fuerte que el primer componente principal fue capaz de recuperar el 80% de la variación en estas variables edáficas. La única variable con peso importante en el PC2 fue el porcentaje de limo. Este porcentaje parece variar de manera ortogonal con todas las otras variables del suelo (Fig. 8). Así, el primer componente (PC1) fungió como un índice de calidad de suelo y permitió examinar cómo se relacionaron los rasgos funcionales con suelos de alta y baja calidad.

Los rasgos funcionales del maíz estuvieron asociados con la calidad de suelo de manera congruente con las predicciones originalmente planteadas (Fig. 1) y con lo que conocemos a partir de

plantas silvestres. El PC1 del suelo, índice de calidad de suelo, mostró numerosas correlaciones con diferentes rasgos tanto de hojas, tallo y raíces (Tabla 4, última columna). Así, las plantas creciendo en suelos de alta calidad presentaron hojas con menor espesor, con menor contenido de materia seca y con hojas con mayor área por unidad de biomasa (inversión de carbono). En resumen, estas plantas en condiciones de buen suelo mostraron una estrategia adquisitiva en las hojas. Estos patrones se han observado en las hojas de plantas silvestres que crecen en condiciones de alta calidad de suelo (Pérez-Harguindeguy *et al.* 2013; van Bodegon y Price, 2014; Reich, 2014; Salgado-Negret, 2015). Estas asociaciones se han explicado a partir de análisis costo-beneficio que señalan que las plantas optimizan el balance entre los beneficios que proporciona tener una mayor o menor área fotosintética (e.j. mayor crecimiento y mayor productividad) y los costos de respiración, transpiración y recambio de estructuras que esto implica. Por ello, en general, especies, e individuos en el caso del maíz en este estudio, que viven en ambientes con alta disponibilidad de recursos tienden a desarrollar estructuras más eficientes, pero efímeras, en comparación con aquellas que habitan en entornos con recursos menos limitados.

Algo similar a las hojas se observó en el caso de los tallos. Los análisis mostraron que a mayor calidad de suelo, la cantidad de carbono (biomasa) en tallos disminuyó (Tabla 4, última columna). Así, plantas en suelos más favorables tendieron a invertir menos biomasa en el tallo. Sin embargo, también se trató de plantas más altas, por lo que estas plantas debieron presentar menor densidad de este tejido y por lo tanto presentaron tallos más efímeros. Si bien la densidad del tallo no estuvo significativamente correlacionada con la calidad del suelo, el valor de significancia de la correlación fue marginal ($p=0.51$) y la r tuvo una magnitud considerable ($r=0.51$), sugiriendo que en suelos de mayor calidad, los tallos, al igual que las hojas, son menos densos y probablemente más efímeros. Aunque no fue una variable medida en este estudio, es muy probable que esta construcción con menor contenido de carbono por unidad de volumen (menor densidad) sea resultado de un crecimiento más rápido de los tejidos. Si bien únicamente la biomasa de los tallos fue el único rasgo que se correlacionó directamente con la calidad de suelo, rasgos como la densidad, e incluso como el diámetro basal, tuvieron asociaciones en la dirección esperada. Probablemente los valores de r y p para estas variables aumenten y disminuyan, respectivamente, si se aumenta el número de muestras en futuros estudios. De considerar estas tendencias, plantas que crecen en suelos de alta calidad son plantas que presentan tallos con un menor diámetro, menor densidad y menor biomasa, siendo la densidad y el diámetro del tallo un potencial indicador.

A pesar de que es poco entendida y estudiada, la raíz fue uno de los órganos que presentó mayor número de correlaciones con las condiciones del suelo. Esto es muy posiblemente resultado de ser el órgano que está en contacto directo con el suelo y que tiene como función principal la adquisición de agua y nutrientes del suelo (Liedgens *et al.*, 2000; López-Bucio *et al.*, 2003; Hochholdinger *et al.*, 2004). Los resultados de este trabajo sugieren que este órgano del maíz proporciona buena información sobre la calidad del suelo. Es así que las raíces de plantas creciendo en suelos de alta calidad presentan una mayor unidad de adquisición por unidad de carbono invertido (SRL), y por lo tanto despliegan sus raíces en una mayor superficie (SSA). Esto le confiere a la raíz una mayor tasa de absorción de recursos (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret, 2015). Sin embargo, raíces en estos suelos de buena calidad generan un menor contenido de materia seca (RDMC) relacionado con una menor densidad de los tejidos (RTD). Esta combinación de alto alcance por unidad de carbono invertido (alto SRL y SSA),

pero baja densidad de los tejidos, hacen que la raíz en zonas con suelo favorable sea una estructura eficiente en absorción, pero con mayores vulnerabilidad a la ruptura, a daños causados por herbívoros y la sequía (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013;). Estas características de baja densidad en un tejido están asociadas al aumento en las tasas de descomposición y, por lo tanto, una menor longevidad de los tejidos. Estos mismos patrones se han observado en plantas silvestres que crecen en condiciones de alta calidad de suelo (Fortunel *et al.*, 2012; Pérez- Harguindeguy *et al.*, 2013; PrometeusWiki, 2013; Birouste *et al.*, 2014, Salgado-Negret, 2015). De igual manera que en las hojas, estos resultados van el sentido en el que se habían planteado en las hipótesis.

Los órganos del maíz, hojas, tallos y raíces, presentaron un comportamiento paralelo en sus estrategias adquisitivas o conservativas según las condiciones del suelo en las que crecieron los individuos. Así, suelos de alta calidad se asociaron con hojas con estrategias adquisitivas que a su vez se asociaron con tallos y raíces con esta misma estrategia. Se ha observado un paralelismo en las plantas silvestres respecto a las hojas, sin embargo tanto los tallos como las raíces han sido poco estudiadas y en varios trabajos no se han encontrado estos paralelismos considerando los tres órganos de la planta. Esta covariación entre órganos es importante desde el punto de vista de los indicadores porque podrían utilizarse rasgos de las hojas y tallos para inferir lo que ocurra en las raíces. Además, considerando este paralelismo y la correlación entre los órganos, se pueden utilizar estos rasgos para conocer la productividad de la parcela.

En cuanto a la relación con la productividad, se observaron rasgos del maíz asociados con la producción de grano y de biomasa. Uno de los principales órganos que reflejó aspectos de productividad fueron los tallos. La altura, la densidad y el diámetro de los tallos fueron rasgos que mostraron correlaciones con los distintos tipos de rendimiento y el número de granos por m². A mayor altura y menor densidad de tallos, la planta asignó mayor biomasa a la producción de granos. Estas correlaciones remiten a las estrategias adquisitivas-conservativas que tienen las plantas (Reich, 2014). Plantas que invierten mayores recursos en la productividad (más biomasa y mayor número de granos por m²) se caracterizan tener mayor altura, diámetros más anchos en el tallo, pero poco densos. Así, estas plantas no invierten tantos recursos en la formación de estructuras de alta resistencia, por ello presentan poca densidad y contenido de materia seca en sus tejidos. En este sentido, son plantas altamente productivas que habitan lugares con suelos ricos en nutrientes pero probablemente son, a su vez, plantas menos longevas. Rasgos como la altura de la planta, el diámetro y la densidad podrían ser utilizados como indicadores tanto de calidad de suelo como de productividad de la parcela.

En resumen, los resultados del componente ecológico de esta investigación sugieren que rasgos como el área foliar y su espesor (que se relaciona a su vez con el contenido de materia seca), la longitud de la raíz y la superficie en la que se distribuyen (rasgos ligados a aspectos de densidad, biomasa, resistencia y longevidad de las estructuras dadas condiciones de suelo particulares) podrían ser utilizados como indicadores de calidad de suelo. En el caso de las raíces, aunque éstas no necesariamente sean medidas por los productores, podría inferirse la expresión del rasgo dado el paralelismo entre órganos de los rasgos del maíz. Por su parte, rasgos funcionales como la altura de la planta y el diámetro de tallos serían buenos candidatos a rasgos indicadores de productividad en parcelas que cultiven la variedad estudiada. Esto como resultado de que ambos rasgos están fuertemente asociados con el aumento o disminución del rendimiento y en donde a mayor altura la

planta tiende a asignar mayor biomasa a la producción de granos con un alto rendimiento seco de éstos, y en donde, además, este rendimiento disminuye a medida que aumenta la densidad en los tejidos

La búsqueda de asociaciones entre rasgos y calidad de suelo, y rasgos y productividad estuvo restringida a una variedad de maíz y a dos ecorregiones del estado de Guanajuato. Por ello, esta búsqueda y sus resultados presentan limitaciones para una generalización a otras variedades de maíz y a otras regiones. Sin embargo, aunque este estudio necesita ampliarse a otros tipos de maíz y a otras zonas, los resultados de este trabajo indican que hay una vía promisoría para buscar indicadores de calidad de suelo y productividad entre los rasgos funcionales de las plantas. Este trabajo representa el primero en examinar la variación funcional de los rasgos funcionales del maíz en la búsqueda de indicadores de calidad de suelo. Es además, uno de los pocos en hacerlo con plantas de cultivo. Otros antecedentes en esta dirección incluyen el café, en donde también se encontró que hay un comportamiento similar al de las plantas silvestres. La búsqueda de indicadores a partir de rasgos funcionales que se realiza en esta investigación hace eco del llamado reciente a unir el campo tan fértil de la ecología funcional de las plantas y el estudio de los sistemas agrícolas. En este sentido, el conocimiento acumulado en el campo de la investigación con plantas silvestres puede ser aplicado directamente a las plantas de cultivo en un esfuerzo por mejorar los rendimientos al mismo tiempo que se aplican conocimientos agroecológicos a los sistemas agrícolas. Esto en combinación con los saberes locales, permitirá sin duda un mejor entendimiento y manejo del recurso suelo y de los servicios ecosistémicos derivados de los agroecosistemas.

B. Percepción de los expertos locales en la generación de indicadores como objetos de frontera.

Considerando la percepción de los productores y los resultados biológicos, existe gran potencial de utilizar rasgos funcionales, sobre todo los rasgos aéreos, como indicadores de calidad de suelo y productividad de la parcela. Las principales características derivadas del maíz que los productores de Guarapo y San Felipe utilizan para evaluar ambas situaciones (Anexo A, Tabla B1 y B2, respectivamente) son el color de la hoja y el diámetro del tallo. Estos rasgos estuvieron seguidos por el área foliar y la altura de la planta (Tabla 10). La dirección en la que los productores interpretan la expresión de las características de las hojas del maíz es la siguiente: los productores asocian hojas verdes con plantas que viven en suelos sanos, mientras que hojas de color morado se considera crecen en suelo regulares y coloraciones amarillas se relacionan con suelo malos. Este misma lógica siguió la coloración de las hojas al evaluar la productividad de la parcela (hojas verdes se relacionan con mayor productividad que hojas amarillas). La coloración de la hoja ha sido sumamente estudiada desde el punto de vista científico. Así, se ha encontrado que colores amarillentos se relaciona con la deficiencia de nitrógeno (Penn State, 2017), mientras que la coloración morada es indicadora de la deficiencia de fósforo (Sharma y Kumar, 2011). Esto indica que los productores tienen conocimiento de la importancia de las hojas como indicadores de problemas y deficiencias en el suelo. Aunque en este trabajo se midió el color de la hoja, esta coloración se mantuvo prácticamente constante, posiblemente como resultado de que no hay deficiencias extremas de las condiciones nutrimentales (nitrógeno, fósforo y materia orgánica) en las parcelas estudiadas. Por ello, esta percepción de los productores no pudo compararse con el resultado científico, a diferencia de otros rasgos estudiados.

El diámetro del tallo (llamado por los productores diámetro de la "caña") también se relacionó con las condiciones del suelo. Así, "cañas gruesas" se asociaron con suelos buenos y con una mayor productividad que "cañas" delgadas (relación con suelos malos y baja productividad). Esto se comprobó con los análisis ecológicos, en donde efectivamente existen estos patrones de asociación dada la calidad de suelo y la futura productividad de la planta. El diámetro sería sin duda un indicador de muy fácil implementación y con muchas posibilidades de ser incorporado en un monitoreo periódico dado que los productores ya lo utilizan para inferir la calidad del suelo y la productividad de su cosecha. Además, tomar una medición cuantitativa implica equipo mínimo, enfatizando su posibilidad de implementación como indicador fácil de medir como lo siguieren Safley (1997, en USDA, 2015) y Pankhurst *et al.* (1997) en donde una de las cualidades de un indicador es ser accesible y fácil de muestrear y analizar.

Existen otros rasgos que si bien sí son utilizando como indicadores su uso no es tan frecuente por parte de los productores. Tal es el caso del área foliar y la altura de la planta (Tabla 10). Sin embargo, los resultados ecológicos mostraron que el área foliar se relacionó con la calidad de suelo, mientras que la altura de la planta lo hizo con la productividad de la parcela. Considerando que los productores sí hacen uso de estas variables, aunque sea en menor medida, éstas también tienen un gran potencial de uso como indicadores. Nuevamente, la altura y el área foliar son variables que demanda equipo mínimo y habilidades básicas.

En cuanto a la relación entre la calidad del suelo percibida y la medida científicamente se encontró un muy alto grado de coincidencia. Las Figuras 11 y 12 dejan en evidencia de que hay buena superposición entre lo que perciben los expertos locales y lo que arrojan los datos ecológicos. Esto se debe, probablemente, a que las percepciones de los agricultores son el resultado del conocimiento acumulado por generaciones y de observaciones minuciosas de la tierra, las cuales les permiten evaluar las condiciones del suelo a través de distintas variables (Moges y Holden, 2007; Kessler y Stroosnijder, 2006 en Pulido y Bocco, 2014; Abdulrashid y Mashi, 2014). Esta coincidencia se ha reportado en diversos estudios (Corbeels *et al.*, 2000; Desbiez *et al.*, 2004; Díaz *et al.*, 2010; Abdulrashid y Mashi, 2014; Cáceres *et al.*, 2015) lo que ha llevado a que el conocimiento de los expertos locales esté adquiriendo más importancia en los estudios de manejo de agroecosistemas (Knutson *et al.*, 2011). Aun cuando esta coincidencia es relativamente común, existen ejemplos en donde la percepción de los productores no coincide con la calidad de suelo medida. Continuar documentando esta presencia o ausencia de coincidencia es indispensable en los trabajos con orientación agroecológica. En el caso de este trabajo, el encontrar esta coincidencia fue vital, pues en su ausencia hubiera sido complicado combinar el conocimiento de los productores con el conocimiento ecológico en cuanto a la propuesta de potenciales indicadores.

En la actualidad, los agricultores son conscientes de los efectos negativos que están asociados a la disminución y/o pérdida de la calidad del suelo, entre ellos la disminución de la productividad de los cultivos (Corbeels *et al.*, 2000). Ahora bien, los agricultores y los investigadores tienen objetivos similares ya que ambos buscan garantizar que los recursos (servicios ecosistémicos) del suelo sean suficientes para satisfacer las necesidades actuales y las futuras (Desbiez *et al.*, 2004). Teniendo esto en cuenta, adquiere mayor importancia hacer partícipes a los expertos locales en la generación de estrategias encaminadas a la sostenibilidad de los suelos. Por ello, no se deben descartar los conocimientos, experiencias y prácticas de los expertos locales, sino sistematizarlos de tal manera que

puedan ser analizados para la obtención de información consolidada en datos y que ayuden en la generación de indicadores como objetos de frontera que permitan el monitoreo de la calidad del suelo tanto a escalas locales, como regionales e incluso nacionales en programas federales (Ferrazzino et al., 2007).

Un buen indicador debe simplificar la visión de un fenómeno, posibilitar la comunicación de forma sencilla a distintos sectores de práctica (Bojórquez, 2011), ser interpretable, relacionarse con procesos ecosistémicos, integrar propiedades y dinámicas físicas, químicas y biológicas del suelo, ser sensible a cambios, ser reproducible y sobre todo ser accesible a múltiples usuarios y ser fácil de muestrear y analizar (Pankhurst *et al.*, 1997; USDA, 2015). En este sentido, los indicadores que se detectaron en este trabajo pertenecen a tres grandes grupos. El primero incluye aquel basado en el conocimiento ecológico de rasgos funcionales asociados con calidad de suelo y productividad. En el segundo grupo se incluyen los indicadores utilizados por los productores. Un tercer grupo está formado por aquellos rasgos que son utilizados por los productores en donde hay un respaldo ecológico (Tabla 11). Este grupo (Tabla 11, última columna) constituye el núcleo central de esta investigación y son justamente los que se proponen como candidatos a indicadores como objetos de frontera.

VIII. Conclusión

Si bien en este trabajo sólo se analizó una variedad de maíz específica, en dos localidades (Guarapo y San Felipe, Guanajuato) con características particulares de clima y suelo, este trabajo ha sentado las bases para la búsqueda de variables funcionales que puedan ser utilizadas en programas de monitoreo de calidad de suelo a diversas escalas. Estos programas son sin duda una necesidad actual urgente. Con sus resultados, este trabajo ha evidenciado el potencial que tienen los rasgos funcionales del maíz para ser utilizados como indicadores de calidad y productividad de suelo agrícola. También ha mostrado la importancia de integrar la percepción los expertos locales en la generación de dichos indicadores.

Este trabajo postuló un conjunto de rasgos con gran potencial como indicadores de calidad de suelo y productividad en el maíz. Sin embargo, esta investigación no llegó a la construcción de indicadores como objetos de frontera. Para ello, es necesario sentarse a dialogar con los productores y analizar, de manera conjunta, cuáles son los mejores indicadores que se pueden aplicar en el uso diario y cotidiano y que permitan transformar los datos biológicos en acciones específicas de monitoreo. Como parte del proyecto CONACyT en el que esta investigación se inserta, se realizarán talleres en los que se presentarán estos resultados y se iniciará el proceso de diálogo entre los saberes científico y local para la construcción conjunta de indicadores que permitan el monitoreo local, en principio, y a otras escalas en el futuro. En este sentido, los investigadores proporcionarán la comprensión de los procesos biofísicos del suelo y la planta, mientras que los agricultores proporcionarán el conocimiento específico del contexto necesario para adaptar esta comprensión a las condiciones biofísicas y socioeconómicas locales. De esta forma, estos indicadores podrán fungir como verdaderos objetos de frontera en el esfuerzo por monitorear nuestros suelos y llevar a trayectorias más sostenibles a los agroecosistemas.

IX. Referencias

- Abdulrashid, L. & Mashi, S.A. (2014). Soil Degradation in Marginal Areas: Perspectives of Farming Communities of Semi-Arid Areas of Katsina State, Northern Nigeria. 3(4): 449- 460
- Acton D.F., & Padbury G.A. (1993). A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. A program to Assess and Monitor Soil Quality in Canada. Soil Quality Evaluation Summary. Res Branch Agric. Ottawa, Canada.
- Adam R. Martin & Marney E. Isaac. (2015). REVIEW: Plant functional traits in agroecosystems: a blueprint for research. *Journal of Applied Ecology*. 52: 1425-1433.
- Altieri, M.A. (sf). *Agroecología: principios y estrategias para diseñar una agricultura que conserva recursos naturales y asegura la soberanía alimentaria*. Universidad de California. Berkeley. 192p. En red: http://www.mda.gov.br/sitemda/sites/sitemda/files/user_arquivos_64/Agroecologia_-_principios_y_estrategias.pdf
- Altieri, M.A. (1992). Agroecological foundations of alternative agriculture in California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 39: 23-53.
- Altieri, M.A. (1994). Bases agroecológicas para una producción agrícola sustentable. *Agricultura Técnica*. 54(4):371-386.
- Altieri, M.A. (1995). *Agroecology: the science of sustainable agriculture*. Westview Press, Boulder (Resumen).
- Altieri, M. A. (1999). *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable (Vol. II)*. Retrieved from <http://www.leisa-al.org/web/images/stories/revistapdf/vol22n2.pdf#page=30>
- Altieri, M. A., & Nicholls, I.C. (2005). *Agroecology and the Search for a Truly Sustainable Agriculture*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Primera edición. 291p.
- Altieri, M.A., & Toledo, V.M. (2011). The agroecological revolution in Latin America: rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies*. 30:587-612.
- Arshad M.A. & Martin S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 88(2):153-150.
- Arthur S., & Nazroo J. (2003). *Designing Fieldwork Strategies and Materials*. En: Ritchie, J. y Lewis J. (eds.) *Qualitative Research Practice: A guide for Social Science Students and Researchers*. SAGE publications. Primera edición. Pp. 236
- Ball-Coelho, B. R., Roy, R.C. & Swanton, C.J. (1998). Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. *Soil & Tillage Research*. 45: 237–249.
- Bastida, F., Zsolnay, A., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147: 159–171.
- Bracamontes-Nájera, L., Fuentes-Ponce, M., Rodríguez- Sánchez, L.M., Macedas-Jímenez, J. (2016). *Manual de indicadores biológicos de la salud del suelo*. Universidad Autónoma Metropolitana. 90pp.
- Birouste, M., Zamora-Ledezma, E., Bossard, C., Pérez-Ramos, I.M. & Roumet, C. (2004). Measurement of fine root tissue density: a comparison of three methods reveals the potential of root dry matter content. *Plant Soil*. 374:299–313.
- Bojórquez-Tapia L.A., Luna-González L., Cruz-Bello G.M., Gómez-Priego P., Juárez-Marusich L., Rosas-Pérez I. (2011). Regional environmental assessment for multiagency policy making: implementing an environmental ontology through GIS-MCDA. *Environment and Planning B: Planning & Design* 38, 539-563pp.
- Cáceres D.M., Tapella E., Quétier F. & Díaz, S. (2015). The social value of biodiversity and ecosystem services from the perspectives of different social actors. *Ecology and Society* 20(1): 62.

- Casanova, F., Ramírez, L. & Solorio, F. (2007). Interacciones radicales en sistemas agroforestales: Mecanismos y opciones de manejo. *Avances en investigación agropecuaria*. 11(3): 41-52.
- Casanova-Pérez, L., Martínez-Dávila, J.P., López-Ortiz, S., Landeros-Sánchez, C., López-Romero, G. & Peña-Olvera, B. (2015). Enfoques del pensamiento complejo en el agroecosistema. *Interciencia* 40(3): 210-216.
- Cerón-Rincón L.A. y Arizábal-Gutierrez F.A.(2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos (Revisión). *Revista Colombiana de Biotecnología*. 14:285-295.
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S.L., Swenson, N.G. & Zanne, A.E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*. 12(4): 351–366
- Comas, L. H. & Eissenstat D. M. (2004). Linking fine root traits to maximum potential growth rate among 11 mature temperate tree species. *Functional Ecology*. 18(3):388–397.
- Comas, L.H., Becker S.R., Cruz V.M., Byrne P.F. & Dierig D.A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Ecophysiology of root systems-environment interaction*:18.
- CONABIO. (2012). La Biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Vol. II.
- CONAFOR. (2014). Protocolo para el Sistema Nacional de Monitoreo de Tierras con Degradación y desertificación. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Zapopan, Jalisco. 115pp.
- Conway, G.R., & Pretty, J.N. (1991). *Unwelcome harvest: agriculture and pollution*. Earthscan Publisher, London.
- Corbeels, M., Shiferaw A. & Haile M. (2000). Farmers' knowledge of soil fertility and local management strategies in Tigray, Ethiopia. *Managing Africa's Soils*. Núm. 10. 30 pp.
- Cortez, J., Garnier E., Pérez-Harguindeguy N., Debussche M., & Gillon D. (2007). Plant traits, litter quality and decomposition in a Mediterranean old-field succession. *Plant and Soil*. (296)1: 19-34.
- Cornelissen, J. H. C., Lavorel S., Garnier E., Diaz S., Buchmann N., Gurvich D. E., Reich P. B., Steege H., Morgan H. D., van der Heijden M. G. A., et al. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 51:335-380.
- Cortez, J., Garnier E., Pérez-Harguindeguy N., Debussche M. & Gillon D. (2007). Plant traits, litter quality and decomposition in a Mediterranean old-field succession. *Plant and Soil*. 296: 19-34.
- Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación del suelo: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica* 83: 5-71.
- Desbiez A., Matthews R., Tripathi B. & Ellis-Jones J. (2004). Perceptions and assessment of soil fertility by farmers in the mid-hills of Nepal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 103(1): 191–206.
- Díaz S., Lavorel S., de Bello F., Quétier F., Grigulis K. & Robson M. (2007) Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *PNAS*. 104(52):20684-20689.
- Díaz S., Quétier F., Cáceres D. M., Trainor S. F., Pérez-Harguindeguy N., Bret-Harte M.S., Finegan B., Peña-Claros M., & Poorter L. (2011). *Linking functional diversity and social actor strategies in a framework for interdisciplinary analysis of nature's benefits to society*. *PNAS*. 108(3):895-902.
- Doran, J.W. & Zeiss M.R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*. 15:3–11.

- Doran J. W. & Parkin T. B. (1994). *Defining and assessing soil quality*. En: Doran J. W., Coleman D. C., Bezdicek D. C. & Stewart B. A. (eds). (1994). *Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment*. Soil Science Society of America. Special Publication 35.
- Eamus, D., McGuinness, K. & Burrows, W., (2000). Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and western Australia. National Carbon accounting system. 56 p. (Technical report N° 5). Disponible en: <http://www.fullcam.com/FullCAMServer/Help/reps/TR5A%20Review%20of%20Allometric%20Relationships%20for%20Estimating%20Woody%20Biomass%20for%20Queensland,%20the%20Northern%20Territory%20and%20Western%20Australia.pdf>
- Etchevers J., Hidalgo C., Vergara M., Bautista M. y Padilla J. 2009. *Calidad de suelo: conceptos, indicadores y aplicación en agricultura*. En: López Blanco J. y Rodríguez- Gamiño M. de L. 2009. *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM Colección Geografía para el siglo XXI. Serie Libros de Investigación, 3: 196.
- Eissenstat, D.M., Kucharski, J.M, Zadworny, M., Adams, T.S. & Koide, R.T. (2015). Linking root traits to nutrient foraging in arbuscular mycorrhizal trees in a temperate forest. *New Phytologist*. 208: 114–124.
- FAO. (1993). *El maíz en la nutrición humana*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. En red: <http://www.fao.org/docrep/T0395S/T0395S00.htm#Contents>
- FAO. (2007). *La ADRS y ... la agroecología*. Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible (ADRS). Sumario de políticas. 4p.
- FAO. (2008). An international technical workshop Investing in sustainable crop intensification The case for improving soil health. *Integrated Crop Management Vol.6-2008*. FAO, Rome: 22-24 July 2008.
- Farhad, S. (2012). *Los sistemas socio-ecológicos: Una aproximación conceptual y metodológica*. XIII Jornada de Economía Crítica: Los costes de la crisis y alternativas en la construcción. Sevilla.
- Ferrazzino A., Ratto S., Giuffré L. & Belich F. (2007). *El lenguaje científico y el profano: Un estudio de la percepción de la calidad de suelos agrarios*. *Questión*. 1(14):4.
- SHCP. (2014). *Panorama del Maíz*. Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuaria, Rural, Forestal y Pesquero. Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica, Análisis Sectorial y Tecnologías de la Información. 2pp
- Fiske, C. H. & Subarrow Y. (1925). The Colorimetric Determination of Phosphorus. *Journal of Biological Chemistry*. 66:375-400.
- Fonseca, W., Alice, F. & María Rey, J. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Boque* 30(1): 36-47.
- Fortunel, C., Fine, P.V. & Baraloto, C. (2012). Leaf, stem and root tissue strategies across 758 neotropical tree species. *Functional Ecology*. 26:1153-1161.
- García C., Hernández T. & Costa F., (1994). Microbial activity in soils under Mediterranean environmental conditions. *Soil Biology and Biochemistry*.26(9):1185-1191.
- García-Oliva, F. (2005). Algunas bases del enfoque ecosistémico para la restauración, 101-112pp. En: Sánchez O. *et al* (Editores) *Temas sobre la restauración ecológica*, INE, SEMARNAT, U.S. Wildlife Service, Unidos para la Conservación A.C., 256p.

- Garnier, E., J. L. Salager, G. Laurent, & L. Sonie. (1999). Relationships between photosynthesis, nitrogen and leaf structure in 14 grass species and their dependence on the basis of expression. *New Phytologist* 143:119–129.
- Gef-Undp, 2006 Land Degradation. En red: <http://sgp.undp.org/index.cfm?module=projects&page=FocalArea&FocalAreaID=LD>.
- Guan, D., Al-Kaisi, M.M., Zhang, Y., Duan, L., Tan, W., Zhang, M. & Li, Z. (2013). Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize. *Field Crops Research*. 157:89-97.
- Himmelbauer, M. (2004). Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different Image analyses systems. *Plants and Soil*.260: 11-120.
- Hochholdinger F., Park W.J., Sauer M. y Woll K. (2004). From weeds to crops: Genetic analysis of root development in cereals. *Trends Plant Sci*. 9: 42-48.
- Hodge, A. (2004). The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*. 162(1): 9–24.
- Hodgson, J.G., Montserrat-Martí, G., Charles, M., Jones, G., Wilson, P., Shipley, B., Sharafi, M., Cerabolini, B. E. L., Cornelissen, J. H. C., Band, S. R., Bogard, A., Castro-Díez, P., Guerrero-Campo, J., Palmer, C., Pérez-Rontomé, M. C., Carter, G., Hynd, A., Romo-Díez, A., de Torres Espuny, L. & Royo Pla, F., (2011). Is leaf dry matter content a better predictor of soil fertility than specific leaf area?. *Annals of Botany* 108: 1337–1345, 2011
- Holt-Giménez, E. & Altieri., A.M. (2013). Agroecología, soberanía alimentaria y la nueva revolución verde. *Agroecología* 8(2):65-72.
- INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, escala 1: 250 000, Serie II (Continuo Nacional). México. En red: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx
- INEGI. (2009a). Puntuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Valle de Santiago, Guanajuato. Clave geostadística 11049. Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- INEGI. (2009b). Puntuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos:San Felipe, Guanajuato. Cave geostadística 11030. Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- INEGI. (2011). Información geográfica. En: *Perspectivas estadísticas de Guanajuato*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Diciembre, 2011.
- INEGI. (2017). Información por entidad: Territorio de Guanajuato. Cuéntame, INEGI. Pagina en red [<http://www.cuentame.inegi.org.mx>]. Consultado: 19 de abril de 2017.
- International Water Management Institute. (2007) .Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. London: Earthscan, and Colombo.
- IUSS, Grupo de Trabajo WRB. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103*. FAO. Roma.
- Karlen D. L., Andrews S. S. & Doran, J. W. (2001). Soil quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy* 74: 1-40.
- Kazakou, E., D. Vile, B. Shipley, C. Gallet, & E. Garnier. (2006). Covariations in litter decomposition, leaf traits and plant growth in species from a Mediterranean old-field succession. *Functional Ecology* 20:21-30.
- Kinyangi J. (2007). Soil heralt and soil quality: a review. s/n

- Kirk, P.L. (1950). Kjeldahl Method for Total Nitrogen. *Analytical Chemistry*. 22(2):354–358
- Knutson C.L., Haigh T., Hayes M.J., Widhalm M., Nothwehr J., Kleinschmidt M. & Graf L. (2011). Farmer perceptions of sustainable agriculture practices and drought risk reduction in Nebraska, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems*: 26(3); 255–266.
- Kohyama, T., Suzuki, E., Partomihardjo, T., Yamada, T. & Kubo, T. (2003). Tree species differentiation in growth, recruitment and allometry in relation to maximum height in a Bornean mixed dipterocarp forest. *Journal of Ecology* 91:797-806.
- Letey J., Sojka R. E., Upchurch D. R., Cassel D. K., Olson K. R., Payne, W. A., Petrie S. E., Price G. H., Reginato R. J., Scott H. D., Smethurst P. J. & Triplett G. B. (2003). Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal of Soil and Water Conservation* 58: 180 - 187.
- Liedgens M., Soldati A., Stamp P. y Richner W. (2000). Root development of maize (*Zea mays* L.) as observed with minirhizotrons in lysimeters. *Crop. Sci.* 40: 1665–1672.
- López-Bucio, J., Cruz-Ramírez A. y Herrera-Estrella L. (2003). The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Curr. Opin. Plant Biol.* 6: 280-287.
- López-Falcón, R. (2002). Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación. Centro Internacional de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela
- Magdoff F. (2001). Concept, Components, and Strategies of Soil Health in Agroecosystems. *Journal of Nematology* 33(4):169–172.
- Magdoff, F. y R. Weil (ed.). 2004. *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press, p. 327-329.
- Martin, A.M. & Marney E.I. (2015). Plant functional traits in agroecosystems: a blueprint for research. *Journal of Applied Ecology*. 52: 1425–1435
- Massiu Trigo, Y. & Lechuga Montenegro, J. (2002). El maíz en México: biodiversidad y cambios en su consumo. *Análisis Económico*. 17(36):281-303.
- Martinez de la Cruz, E., Beltrán Peña, E. & López Bucio, J. (2011). La arquitectura radicular del Maíz (*Zea mays* L.). *Ciencia Nicolaita*. 53: 40-60.
- Mauricio-Sánchez, R.A., Figueroa-Cárdenas, J., Taba, S., Reyez-Vega, M.L., Rioncón-Sánchez, F. & Mendoza-Galván, A.(2004). Caracterización de acciones de Maíz por calidad de grano y tortilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 27(3):213-222
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington DC.
- Navarro-Bravo A., Fugueroa-Sandoval B., Matrinez-Manes M., Cossio-González F y Osuna-Ceja, E.S. (2007). Indicadores Físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con los rendimientos de cultivo. *Agrícola Técnica de México*. 34(2):151-158.
- Niinemets, U. (2001). Global-scale climatic controls of leaf dry mass per area, density, and thickness in trees and shrubs. *Ecology* 82:453-469.
- Niklas, K.J., Cobb, E.D. & Marler, T. (2006). A Comparison between the Record Height-to-Stem Diameter Allometries of *Pachycaulis* and *Leptocaulis* Species. *Annals of Botany*. 97(1): 79-83.
- OECD. (1993). Core set of indicators for environmental performance reviews: a synthesis report by the Group on the State of the Environment. Organization for Economic Co-operation and Development, France.

- OECD. (1998). Environmental Indicators. Towards Sustainable Development. Paris.
- Oldeman L.R., Hakkeling, R.T.A. & Sombroek, W.G (1990) World map of human-induced soil degradation. ISRIC, Wageningen, Unep.
- Ortega, G. (2009). Agroecología vs. agricultura convencional. Base Investigaciones Sociales. Asunción Paraguay. 24p.
- Paliwal, R.L. (2001). Introducción al maíz y su importancia. En: El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma En red: <http://www.fao.org/docrep/003/X7650S/x7650s00.htm>
- Paliwal, R.L. (2001a). Usos del maíz. En: El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma En red: http://www.fao.org/docrep/003/X7650S/x7650s08.htm#PO_0
- Pankhurst, C E., Doube, B.M. & Gupta, V.V.S.R. (1997). Biological indicators of soil health: Synthesis. In Pankhurst, C.E., Doube, B.M. & Gupta, V.V.S.R. (eds.) Biological Indicators of Soil Health. CAB International.
- Papendick R.I. & Parr J.F. (1992). Soil Quality-the key to a sustainable agriculture. American Journal of Alternative Agriculture. 7(1-2):2-3.
- Penn State (2017). Nitrogene deficiencia. Departmet of Plant Science. En red: <http://plantscience.psu.edu/research/labs/roots/methods/metodologia-de-investigacion/observando-los-desordenes-nutricionales-de-las-plantas/deficiencia-de-nitrogeno>
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz S., Garnier E., Lavorel S., Poorter H., Jaureguiberry P., Bret-Harte M. S., Cornwell W. K., Craine J. M., Gurvich D. E., Urcelay C., Veneklaas E. J., Reich P. B., Poorter L., Wright I. J., Ray P., Enrico L., Pausas J. G., de Vos A. C., Buchmann N., Funes G., Quétier F., Hodgson J. G., Thompson K., Morgan H. D., ter Steege H., van der Heijden M. G. A., Sack L., Blonder B., Poschlod P., Vaieretti M. V., Conti G., Staver A. C., Aquino S. & Cornelissen J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany. 61(3):167–234.
- Pieri C., Dumanski J., Hamblin A. & Young A. (1995). Land Quality Indicators. World Bank, Discussion Papers. World Bank. Washington D.C, USA, 80pp.
- Poorter, L., Wright, S. J., Paz, H., Ackerly, D. D. , Condit, R., Ibarra-Manriquez, G., Harms, K. E., Licona, J. C., Martinez-Ramos, M., Maszer, S. J., et al. (2008). Are functional traits good predictors of demographic rates? Evidence from five neotropical forests. Ecology 89:1908-1920.
- Prometheus Wiki: Protocols in ecological & environmental plant physiology. Página en red [<http://prometheuswiki.publish.csiro.au/>]. Consultado: abril de 2016. Ultima actualización 27 of July, 2013 05:35:29.
- Pulido, J. & Bocco, G. (2014). Local Perception of Land Degradation in Developing Countries: A Simplified Analytical Framework of Driving Forces, Processes, Indicators and Coping Strategies. Living Reviews in Landscape Research. 8. Pp 14.
- Ramírez Mocarro, M. A. (1998). Pobreza y estrategias de sobrevivencia en el medio rural en México. En: M. Leal y G. Toledo. Destrucción del hábitat. PUMA-UNAM, México, pp. 259-271.
- Ramos, R.R.R., Olcina C.J., & Molina P.S. (2014). *Análisis de la percepción de riesgos naturales en la Universidad de Alicante*. Investigaciones Geográficas. 10(61): 147-157.

- Rees D.C., Tezcan A., Haynes C.A., Walton M.Y., Andrade S., Einsle O., Howard J.B. (2005). Structural basis of biological nitrogen fixation. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci.* 363 (1829): 971–984.
- Reich, P. B., Ellsworth, D. S., Walters, M. B., Vose, J. M., Gresham, C., Volin, J. C., & Bowman, W. D. (1999). Generality of leaf trait relationships: a test across six biomes. *Ecology* 80:1955-1969.
- Reich, P.B. (2014). The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology*. 102(2): 275–301.
- Restrepo, J.M., Angel, S.D.I., & Prager, M.M. (2000). *Agroecología*. Universidad Nacional de Colombia y Fundación para la investigación y el Desarrollo Agrícola (FIDAR). 134 p.
- Reynolds, J. F., Stafford-Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P. J., Downing, T. E., Dowlatabadi, H., Fernandez, R. J., Hernick, J. E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F., Ayarza, M. & Walker, B. (2007). Global desertification: building a science for dryland development. *Science (resumen)*. 316: 847–851.
- Rijkers, T., Pons, T.L., & Bongers, F. (2000). The effect of tree height and light availability on photosynthetic leaf traits of four neotropical differing in shade tolerance. *Functional Ecology* 14:77-86.
- Roumet, C., Birouste, M., Picon-Cochard, P., Ghestem, M., Osman, N., Vrignon-Brenas, S., Cao, K.F., & Stokes, A. (2016). Root structure–function relationships in 74 species: evidence of a root economics spectrum related to carbon economy. *New Phytologist*. 210: 815-826
- Russell, B. (2006). Interviewing: Unstructured and Semistructured. En: Rusesell, B. (ed.) *Research methods in anthropology: Qualitative and Quantitative Approaches*. AltaMira Press. Cuarta edición. Pp 803.
- SAGARPA. (2009a). *Síntesis del Sector agropecuario de Guanajuato*. Dirección General de Estudios Agropecuarios y Pesqueros. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2009b). *Informe: Estudios de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional*. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2012). *Manual de determinación de rendimiento.*, México, D.F.: CIMMYT.
- SAGARPA. (2016). *Agricultura de autoconsumo*. En red [<http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/oaxaca/Paginas/Autoconsumo2013.aspx>]. Última actualización 27 de julio de 2016.
- Salgado-Negret, B., Pulido-Rodríguez, N.P., Cabrera, M., Ruíz-Osorio, C. & Paz, H. (2015). *Protocolo para la medición de rasgos funcionales en plantas*. En: Salgado-Negret, B. (ed). *La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C. Colombia. 236 pp.
- SEDESOL. (2013a). *Municipio Valles de Santiago*. Unidad de Microrregiones. Cédulas de Información Municipal (SCIM): Municipios PDZP. Dirección General de Planeación Microrregional. Secretaría de Desarrollo Social. Disponible en red [<http://www.microrregiones.gob.mx/zap/medioFisico.aspx?entra=pdzp&ent=11&mun=042>]. Consultado: 20 de abril de 2017.

- SEDESOL. (2013b). Municipio San Felipe. Unidad de Microrregiones. Cédulas de Información Municipal (SCIM): Municipios PDZP. Dirección General de Planeación Microrregional. Secretaría de Desarrollo Social. Disponible en red [<http://www.microrregiones.gob.mx/zap/medioFisico.aspx?entra=pdzp&ent=11&mun=030>]. Consultado: 20 de abril de 2017.
- SEMARNAT, sf. Suelos. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F. En red: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf
- SEMARNAT. (2005). Indicadores básicos del desempeño ambiental de México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F. 337 pp.
- SEMARNAT. (2010). Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental. México, D.F. 112 pp.
- Serratos-Hernández, J.A. (2009). El origen y la diversidad del maíz en el continente americano. Universidad Autónoma de la Ciudad de México-Greenpeace México. 36 pp.
- Schlegel, B., Gayoso, J. & Guerra, J. (2000). Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: Manual de procedimientos: Muestreos de biomasa forestal. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 24 p.
- Sharma, M.K. & Kumar, P. (2011). A Guide to Identifying and Managing Nutrient Deficiencies in Cereal Crops. K. Majumdar, T. Satyanarayana, R. Gupta, M.L. Jat, G.D. Sulewski, D.L. Armstrong (Eds). International Plant Nutrition Institute (IPNI). Norcross, GA, USA. International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). El Batán, México. 50 p.
- Shipley ,B. & Thi-Tam V. (2011). Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts. *New Phytologist*. 153: 359-354.
- SIAP-SAGARPA. (Sf). Maíz: situación actual y perspectivas 1996-2010. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. 174 pp
- SIAP-SAGARPA. (2017). Avances de Siembra y Cosechas: Resumen Nacional por Cultivo. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. En red: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- SIAP-SAGARPA. (2017a). Anuario Estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera En red: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp
- Smith J.L., Halvorson J.J. y Papendick R.I. (1993). Using multivariable-indicator kriging for evaluating soil quality. *Soil Science Society of America Journal*. 57(3):743-749.
- USDA. (2008). Soil Quality Indicators: Soil structure & Macropores. USDA Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (2008a). Soil Quality Indicators: Aggregate Stability. . USDA Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (2011). Soil Quality Indicators: Soil pH. USDA Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (2014a). Soil Quality Indicators: Reactive Carbon. USDA Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (2014b). Soil Quality Indicators: Soil Nitrate. USDA Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (2015). Soil Quality Indicators: Biological Indicators and soil function. USDA Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (2016). Plant Database. USDA Natural Resources Conservation Service. En red: <https://plants.usda.gov/java/>

- van Bodegom P. & Price T. (2014). A traits-based approach to quantifying ecosystem services. En: Bouma J.A., van Beukering P.J.H. (Eds). *Ecosystem Services: From Concept to Practice*. 40-64 pp.
- Watson, S.A. 1988. Corn marketing, processing, and utilization. En: Sprague, G.F. & Dudley, J.W. (Eds). *Corn and corn improvement*. Madison, WI, USA, American Society of Agronomy. En red: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/tocs/agronomymonogra/cornandcornimpr>
- Weemstra, M., Mommer, L., Visser, E.J.W., van Ruijven, J., Kuyper, T.W., Mohren, G.M.J. & Sterck, F.J. (2016). Towards a multidimensional root trait framework: a tree root review. *New Phytologist*. Review.
- Wen-Zeng, Q., Hui-Hui, L., Peng, L., Shu-Ting, D., Qiang, Z., Hwat Bing, S., Gen, L., Heng-De, L., Ji-Wang, Z. & Bin Zhao.(2012). Morphological and physiological characteristics of corn (*Zea mays* L.) roots from cultivars with different yield potentials. *European Journal of Agronomy*. 38:54-
- Westoby, M., D. S. Falster, A. T. Moles, P. A. Vesk, & I. J. Wright. (2002). Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. *Annual Review of Ecology and Systematics* 33:125-159.
- Wilson, P., Thomson K., & Hodgson J.C. (1999). Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *New Phytology*. 143: 155–162.
- Wright, I. J., P. B. Reich, M. Westoby, D. D. Ackerly, Z. Baruch, F. Bongers, J. Cavender-Bares, T. Chapin, J. H. C. Cornelissen, M. Diemer, et al. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* 428:821-827
- van der Heijden,M., Craine, J., & Morgan, H., & PrometheusWiki contributors. (2013). Root-system morphology. PrometheusWiki. Ultima actualización 27 de julio de 2013 05:35:29 GMT. Disponible en:[<http://prometheuswiki.publish.csiro.au/tiki-index.php?page=Root-system+morphology&highlight=Root%20dry%20matter%20content>] Consultado: 10 de mayo de 2016.
- van Bodegon P., & Price T. (2014). A traits-based approach to quantifying ecosystem services. En: Bouma y Beukering (eds). *Ecosistemas Services: From concept to practice*. Cambridge University Press.
- Violle C., Navas M. L., Vile D., Kazakou E., Fortunel C., Hummel I. & Garnier E. (2007) Let the concept of trait be functional!. *Oikos*, 116: 882–892.
- Zavala-Cruz, J., Palma-López, J.D., Fernández, C., López C.A., & Shirma, E. (2011). Degradación y conservación de suelos en la cuenca del río Grijalva, Tabasco. Colegio de Postgraduados, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, Villahermosa, Tabasco, México. 90pp.

Anexo A. Componente Ecológico

Tabla A1. Parcelas de estudio, localidad, claves utilizada en este documento y en el proyecto global ⁴ en el que se inserta este trabajo, y tipo suelo.

Localidad	Clave en esta investigación	Clave en el proyecto global	Tipo de suelo
Guarapo	1	M-GS-2-LL-2016	Pheozem
Guarapo	4	M-GS-3-LL-2016	Pheozem
Guarapo	5	M-GS-4-LL-2016	Leptosol
Guarapo	8	M-GS-1-LL-2016	Pheozem verticol
Guarapo	9	M-GS-1-LL-2016	Pheozem vertico
Guarapo	11	M-GS-5-LL-2016	Pheozem
San Felipe	2	M-GN-5-LL-2016	-
San Felipe	3	M-GN-1-LL-2016	Cambisol
San Felipe	6	M-GN-3-LL-2016	-
San Felipe	7	M-GN-2-LL-2016	-
San Felipe	10	M-GN-4-LL-2016	Pheozem

⁴ Biodiversidad y ecología funcional de suelos: conservación y resiliencia en sistemas naturales, agroecológicos y agroforestales (Proyecto Conacyt 247672).

Tabla A2. Listado de los rasgos funcionales medidos, protocolo general y unidades, y referencias utilizadas para establecer los protocolos

Órgano	Rasgo funcional	Descripción	Medición y unidades	Referencias
Hoja	Biomasa	Cantidad de materia orgánica contenida en la planta o en alguna de sus partes. En sistemas de cultivo, la biomasa brinda información sobre el rendimiento y productividad de las plantaciones y del propio sistema	Peso seco en g	Fonseca et al., 2009; Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
	Contenido de N, P	Cantidad total de nitrógeno y fósforo por unidad de peso seco foliar. Alto contenido de N y P en hojas y raíces indica altas tasas fotosintéticas y altas tasas de crecimiento individual	Método de Kjeldahl (para N) y método de colorimetría azul de molibdeno (para P)	Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
	Espesor	Relacionado con el SLA y la resistencia física de la hoja. Se encuentra determinado por el número y espesor de las capas del mesófilo. Determina la cantidad de luz absorbida y la difusión de CO ₂ en las hojas	Medición a lo largo de la lámina evitando las venas, márgenes y base de la hoja. En mm	Modificado de Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Syvertsen et al., 1995; Westoby et al. 2002; Garnier et al. 1999
	SLA (Specific Leaf Area/Área Foliar Específica)	Relación entre una unidad de adquisición (área) y la inversión en recursos (masa). Representa el costo de construir un cm ² de área foliar. Mayor SLA en ambientes con alto nutrientes pero menor longevidad de la hoja	Área foliar (cm ²) ÷ masa seca foliar (g)	PrometeusWiki, 2013; Salgado-Negret, 2015; Reich et al., 1999; Niinemets, 2001; Wright et al., 2004; Pérez-Harguindeguy, et al. 2013; Reich 2014
	LDMC (Leaf Dry Matter Content/ Contenido Foliar de Materia Seca)	Correlación positiva con densidad del tejidos e inversión en defensas estructurales y negativa con las tasas de descomposición de la hojarasca. Hojas con alto LDMC tienden a ser más resistentes. Comúnmente las hojas con bajo LDMC están asociadas a ambientes y suelos poco ricos en nutrimentos	Masa seca al horno ÷ masa fresca saturada de agua. En mg/g	Wilson et al., 1999; Kazakou et al., 2006; Cortez et al., 2007; Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
	Biomasa	Cantidad de materia orgánica contenida en la planta o en alguna de sus partes. En sistemas de cultivo, la biomasa brinda información sobre el rendimiento y productividad de las plantaciones y	Peso seco en g	Fonseca, et al., 2009; Pérez-Harguindeguy, et al. 2013; Salgado-Negret, 2015

		del propio sistema		
Tallo	Altura de la planta	Asociada a la forma de crecimiento, a posición de la planta en el gradiente vertical de luz, al vigor competitivo, al tamaño reproductivo, a la fecundidad y al potencial de vida útil	Distancia desde la superficie del suelo hasta la yema apical, excluyendo las inflorescencias o estructuras reproductivas. En cm	Kohyama et al., 2003, Rijkers et al., 2000; Cornelissen et al., 2003; Modificado de Pérez-Harguindeguy, et al. 2013
	Diámetro basal del tallo	Proporciona una estimación del costo de elevar órganos (hojas, inflorescencias) por encima de las plantas vecinas u otras obstrucciones de luz. Además, da una aproximación del tamaño máximo alcanzado por la planta al covariar fuertemente con la longitud del tallo	Porción más cercana a la tierra por encima de ensanchamientos locales, contrafuertes o raíces adventicias. En cm	Niklas et al., 2006
	SSD (Stem-Specific Density/Densidad Específica del Tallo)	Importante para la estabilidad, la hidráulica, la defensa, la ganancia de carbono y el potencial de crecimiento en las plantas. Bajo SSD se relacionan con un rápido crecimiento y alta mortalidad del individuo. Alto SSD se relacionan con tasas bajas de crecimiento, pero mayor supervivencia	Masa seca al horno ÷ volumen fresco. En g/cm ³	Poorter et al. 2008; Pérez-Harguindeguy, et al. 2013; Salgado-Negret, 2015
Raíz	Biomasa	Cantidad de materia orgánica contenida en la planta o en alguna de sus partes. En sistemas de cultivo, la biomasa brinda información sobre el rendimiento y productividad de las plantaciones y del propio sistema	Peso seco en g	Fonseca, et al., 2009; Pérez-Harguindeguy, et al. 2013; Salgado-Negret, 2015
	Contenido de N, P	Cantidad total de nitrógeno y fósforo por unidad de peso seco foliar. Alto contenido de N y P en hojas y raíces indica altas tasas fotosintéticas y altas tasas de crecimiento individual	Método de Kjeldahl (para N) y método de colorimetría azul de molibdeno (para P)	Pérez-Harguindeguy et al., 2013
	SRL (Specific Length Root / Longitud Radical Específica)	Rasgo equivalente al SLA en las hojas y hace referencia a la relación entre una unidad de adquisición (longitud) y la inversión en recursos (masa). Plantas con alto SLR construyen raíces más largas, tienen mayores tasas potenciales de absorción de agua y nutrientes, menor vida y tasa	Longitud de raíces finas ÷ peso seco de las raíces finas. En cm/g	Pérez-Harguindeguy, et al. 2013; Salgado-Negret, 2015

de crecimiento superior que plantas de baja SLR

RTD (Root Tissue Density / Densidad del Tejido Radical)	Presenta una relación positiva con el RDMC. Altos valores de RTD están correlacionados con una mayor resistencia a la ruptura, daños por herbívoros y la sequía, con menores tasas de descomposición y mayor longevidad, pero se relaciona negativamente con la absorción de nutrimentos	Masa seca radical ÷ volumen fresco de dicha masa de raíces. En g/cm ³	Fortunel et al. 2012; Pérez-Harguindeguy et al. 2013; PrometeusWiki, 2013; Birouste et al., 2014
RDMC (Root Dry Matter Content / Contenido Radical de Materia Seca)	Similar a la densidad de la raíz. Altos valores de este rasgo están relacionados con una alta densidad de los tejidos radicales e inversión en defensas estructurales, pero con bajas tasas de descomposición.	Masa seca de las raíces finas ÷ masa fresca de raíces finas saturada de agua. Expresado en mg/g.	Salgado-Negret, 2015
RLD (Root Length Density / Densidad de la Longitud Radical)	Es un rasgo que indica la intensidad de la exploración de la raíz y la capacidad de una especie para tomar nutrimentos del suelo	Longitud de la raíz ÷ volumen de suelo. En cm/cm ³	Wen-Zeng Qi, et al. 2012; Marcel van der Heijden et al, 2013; Pérez-Harguindeguy et al. 2013
RWD (Root Weight Density / Densidad del Peso Radical)	Medida de la biomasa de la raíz por unidad de volumen de suelo	Biomasa de raíz ÷ volumen de suelo. En g/cm ³	Ball-Coelho et al., 1998
SSA (Specific Surface Area / Área Superficial Específica)	Rasgo similar al SLR y representa la relación entre el área de adquisición (área) y la inversión en recursos (biomasa)	Área de raíces finas ÷ masa seca de las raíces finas	Himmelbauer, 2004; Comas, et al., 2013

Tabla A3. Variables de productividad, la fórmula para su cálculo y la descripción biológica de la variable. Basado en el *Manual de determinación de rendimiento* de la SAGARPA (2012).

Variables de productividad	Medición	Descripción de la variable
Biomasa total de 10 plantas	Biomasa seca de 10 plantas sin mazorcas buenas + peso seco de mazorcas buena	Cantidad de materia orgánica contenida en la planta
Índice de cosecha	Peso seco de los granos de las mazorcas buenas ÷ biomasa total de 10 plantas (Kg granos / kg biomasa aérea-1)	Calcula los gramos de granos que se genera por cada gramo de la biomasa de la planta
Cociente grano: olote	Peso seco de los granos de las mazorcas buenas ÷ (peso seco de las mazorcas buenas - el peso seco de los granos de las mazorcas buenas)	Calcula la biomasa asignada a la producción del grano y la asignada a la producción del olote
Rendimiento seco del grano (kg/ha)	(Peso del grano total . cantidad de humedad) ÷ área	
Rendimiento de biomasa (kg/ha)	(Rendimiento seco ÷ índice de cosecha)* 100	Calcula el esfuerzo de la planta por asignar mayor biomasa a la producción de granos en lugar de asignar mayor biomasa a su estructura
Rendimiento del rastrojo con olote (kg/ha)	Rendimiento de biomasa - rendimiento seco	Calcula el rendimiento de toda la planta sin considerar el rendimiento del grano
Número de granos por m²	(Rendimiento seco ÷ (peso de mil granos/1000))*0.10	Calcula el número de granos totales en un m ²

Tabla A4. Correlación de los rasgos funcionales foliares con la densidad de siembra (n=55). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05 , **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo).

Rasgos/Rasgos	Densidad de siembra (m ²)	Densidad promedio por individuo
Órgano: Hoja		
Espesor	-0.19 ns	-0.14 ns
Cantidad de hojas	-0.06 ns	-0.11 ns
SLA	0.38 ns	0.03 ns
LDMC	-0.22 ns	-0.01 ns
Biomasa	0.04 ns	-0.06 ns

Tabla A5. Correlación de los rasgos funcionales radicales y la densidad de siembra (n=55). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05 , **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo).

Rasgos/Rasgos	Densidad de siembra (m ²)	Densidad promedio por individuo
Órgano: Raíz		
SRL	0.78 ***	-0.03 ns
RTD finas	-0.7 **	-0.03 ns
RDMC	0.18 ns	-0.2 ns
SSA	0.76 **	-0.02 ns
RLD	0.61 *	0.27 *
RWD	0.09 ns	0.06 ns
Biomasa de raíces	-0.02 ns	0.18 ns

Tabla A6. Correlación de los rasgos funcionales del tallo y la densidad de siembra (n=55). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05 , **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo).

Rasgos/Rasgos	Densidad de siembra (m ²)	Densidad promedio por individuo
Órgano: Tallo		
Altura de la planta	0.04ns	-0.07ns
Diámetro basal	-0.15ns	0.12ns
Densidad	0ns	-0.01 ns
Biomasa	-0.23ns	0.22ns

Tabla A7. Muestras las cargas (*loadings*) de las variables de suelo (n=10) con respecto a los tres primero componente principales, la proporción de varianza explicada por cada PC y la acumulada.

Variables de suelo/PC's	PC1	PC2	PC3
N total (g kg ⁻¹)	-0.378	-0.208	0.269
P total (g kg ⁻¹)	-0.369	-0.295	0.253
Materia orgánica (%)	-0.38	0.121	0.329
Carbono orgánico (%)	-0.38	0.121	0.329
Arcilla (%)	-0.384	0.089	-0.249
Limo (%)	0.219	0.768	0.468
Arena (%)	0.373	-0.267	0.171
pH	0.315	-0.413	0.581
Desviación estándar	2.525	0.993	0.79
Proporción de varianza	0.797	0.123	0.0607
Proporción acumulada	0.797	0.920	0.981

Tabla A8. Muestras las cargas (*loadings*) de las variables de productividad (n=9) con respecto a los tres primeros componentes principales, la proporción de varianza explicada por cada PC y la acumulada.

Variables de productividad/PC's	PC1	PC2	PC3
Biomasa total de 10 plantas (g)	-0.298	0.361	0.728
Índice de cosecha (g)	-0.164	0.609	-0.024
Cociente grano:olote (g)	0.134	0.534	-0.603
Rendimiento seco del grano (kg/ha)	-0.494	0.112	-0.169
Rendimiento de biomazas (kg/ha)	-0.468	-0.234	-0.187
Rendimiento de rastrojo con olote (Kg/ha)	-0.416	-0.356	-0.178
Número de granos por m ²	-0.48	0.139	-0.102
Desviación estándar	1.963	1.51	0.754
Proporción de varianza	0.551	0.326	0.081
Proporción acumulada	0.551	0.876	0.957

Tabla A9. Muestras las cargas (*loadings*) de los rasgos de los tres órganos (n=55) con respecto a los tres primeros componentes principales, la proporción de varianza explicada por cada PC y la acumulada.

Rasgos	PC1	PC2	PC3
Espesor	-0.336	0.180	-0.377
Cantidad de hojas	-0.286	-0.059	0.022
SLA	0.348	-0.010	0.187
LDMC	-0.256	0.179	-0.335
Biomasa de hojas	-0.332	-0.245	0.020
SRL	0.253	-0.251	-0.304
RTD finas	-0.285	0.132	0.249
RDMC	-0.0566	0.257	0.143
SSA	0.287	-0.265	-0.297
RLD	-0.096	0.208	0.036
RWD	-0.092	0.196	0.345
Biomasa de raíces	-0.152	-0.368	0.219
Altura	-0.112	-0.358	0.001
Diámetro	-0.258	-0.358	-0.012
Densidad	-0.006	0.111	0.232
Biomasa de tallos	-0.351	-0.298	0.022
Desviación estándar	2.179	1.752	1.371
Proporción de varianza	0.264	0.171	0.104
Proporción acumulada	0.264	0.434	0.539

Tabla A10. Correlación entre rasgos funcionales foliares y el primer componente principal (PC1) del PCA (n=55). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05, **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo). En negritas se resaltan las correlaciones con magnitud mayor o igual a 0.5.

Rasgo	Espesor	Cantidad de hojas	SLA	LTD	LDMC	Biomasa	PCA1 ⁵
Órgano: Hoja							
Espesor	-	-	-	-	-	-	-0.73***
Cantidad de hojas	0.34 **	-	-	-	-	-	-0.62***
SLA	-0.67 ***	-0.37 **	-	-	-	-	0.76***
LDMC	0.66 ***	0.24 ns	-0.65***	-0.39 ***	-	-	-0.56***
Biomasa	0.39***	0.5***	-0.44***	-0.13ns	-0.13 ns	-	-0.72***

Tabla A11. Correlación entre rasgos funcionales radicales y el primer componente principal (PC1) del PCA (n=55). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05, **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo). En negritas se resaltan las correlaciones con magnitud mayor o igual a 0.5.

Rasgo	SRL	RTD finas	RDMC	SSA	RLD	RWD	Biomasa	PC1 ⁶
Órgano: Raíz								
SRL	-	-	-	-	-	-	-	0.55***
RTD finas	-0.5 ***	-	-	-	-	-	-	-0.62***
RDMC	-0.17 ns	0.38 ***	-	-	-	-	-	-0.12ns
SSA	0.93 ***	-0.58 ***	-0.24 ns	-	-	-	-	0.63***
RLD	-0.18 ns	0.17 ns	0.24 ns	-0.21 ns	-	-	-	-0.21ns
RWD	-0.31 *	0.19 ns	0.13 ns	-0.29 *	0.28 *	-	-	-0.2ns
Biomasa	-0.04ns	0.15 ns	-0.18 ns	-0.03 ns	-0.08 ns	-0.08 ns	-	-0.33**

⁵ Valores negativos del PC1 denotan mayor productividad dado que las cargas asociadas a las variables en este componente principal son negativas

⁶ Valores negativos del PC1 denotan mayor productividad dado que las cargas asociadas a las variables en este componente principal son negativas

Tabla A12 Correlación entre los rasgos funcionales del tallos y el primer componente principal (PC1) del PCA (n=55). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05, **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo). En negritas se resaltan las correlaciones con magnitud mayor o igual a 0.5.

Rasgo	Altura de la planta	Diámetro basal tallos	Densidad tallos	Biomasa	PC1 ⁷
Órgano: Tallo					
Altura de la planta	-	-	-	-	-0.24ns
Diámetro basal tallos	0.37***	-	-	-	-0.56***
Densidad tallos	-0.01 ns	-0.43 ***	-	-	-0.01ns
Biomasa	0.47***	0.74***	0.06 ns	-	-0.76***

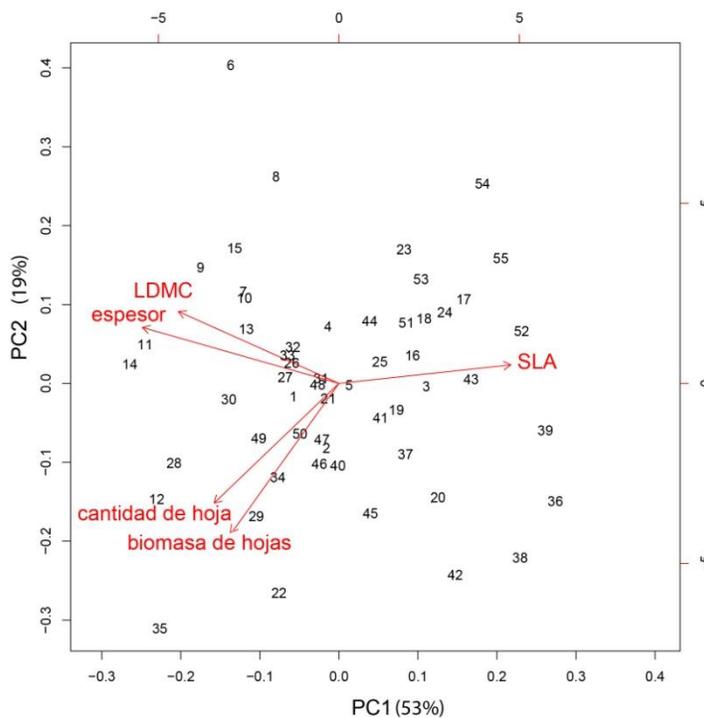


Figura A1. Análisis de componentes principales (PCA) de los rasgos foliares y ubicación de los individuos (n=55) en el espacio descrito por los dos primeros componentes principales. Los dos primeros componentes principales explican cerca del 72% de la variación en los datos.

⁷ Valores negativos del PC1 denotan mayor productividad dado que las cargas asociadas a las variables en este componente principal son negativas

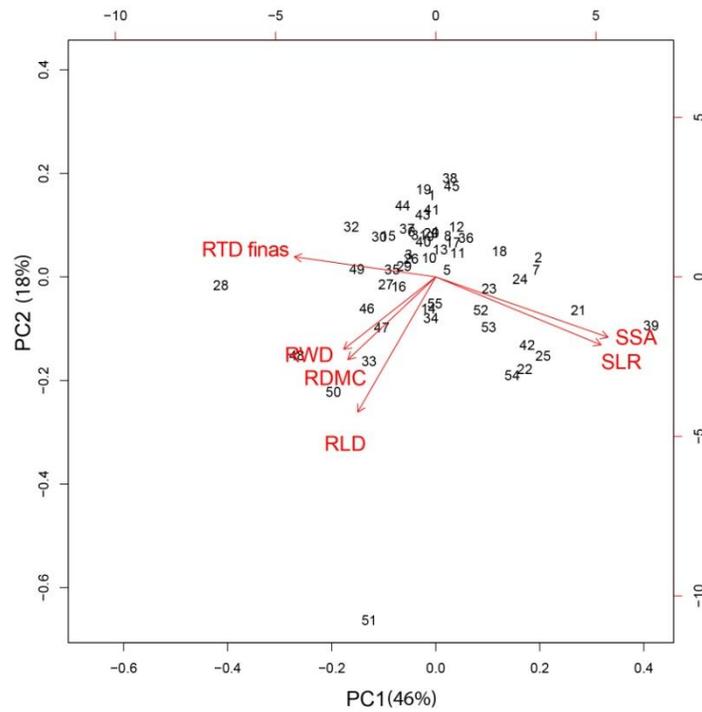


Figura A2. Análisis de componentes principales (PCA) de los rasos radicales y ubicación de los individuos (n=55) en el espacio descrito por los dos primeros componentes principales. Los dos primeros componentes principales explican cerca del 63% de la variación en los datos

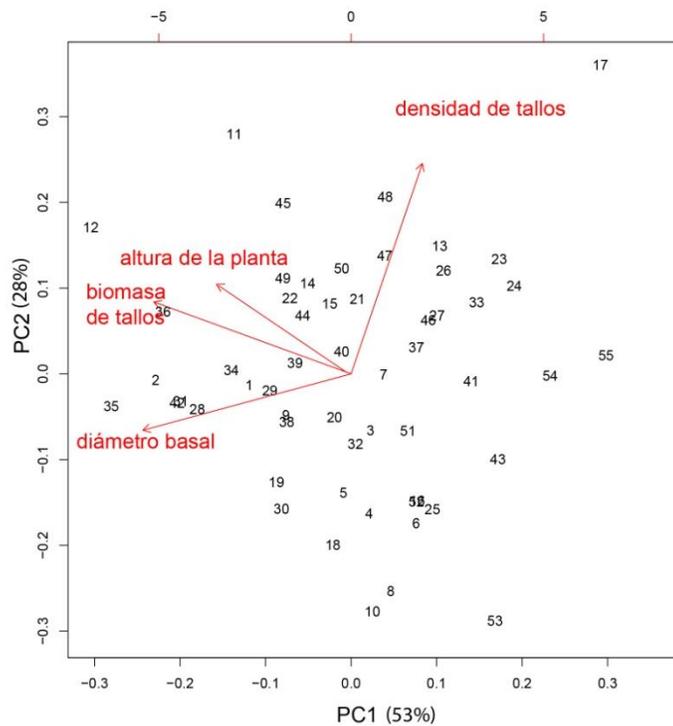


Figura A3. Análisis de componentes principales (PCA) de los rasos del tallos y ubicación de los individuos (n=55) en el espacio descrito por los dos primeros componentes principales. Los dos primeros componentes principales explican cerca del 81% de la variación en los datos.

Tabla A13. Correlación entre los rasgos funcionales de los tres órganos del maíz y el primer componente principal (PC1) del PCA (n=55). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05 , **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo). En negritas se resaltan las correlaciones con magnitud mayor o igual a 0.5.

Rasgos	Altura de la planta	Diámetro basal tallos	Densidad tallos	Biomasa de tallos	SRL	RTD finas	PC1 ⁸
Órgano: Hoja							
Espesor	-0.06 ns	0.21 ns	-0.08 ns	0.36 **	-0.28 *	0.46 ***	-0.73***
Cantidad de hojas	0.33 **	0.28 *	0.14 ns	0.5 ***	-0.23 ns	0.19 ns	-0.62***
SLA	-0.16 ns	-0.37 **	0 ns	-0.56 ***	0.32 **	-0.33 **	0.76***
LDMC	0 ns	0.02 ns	0.1 ns	0.34 **	-0.3 ns	0.15 ns	-0.56***
Biomasa de hojas	0.33 **	0.69 ***	0 ns	0.76 ***	-0.15 ns	0.35 **	-0.72***

Rasgos	RDMC	SSA	RLD	RWD	Biomasa de raíces	PC1
Órgano: Hoja						
Espesor	0.15 ns	-0.36 **	0.17 ns	-0.03 ns	-0.04 ns	-0.73***
Cantidad de hojas	0.08 ns	-0.26 *	0.19 ns	0.24 ns	0.24 ns	-0.62***
SLA	0.09 ns	0.4 ***	0.05 ns	-0.12 ns	-0.06 ns	0.76***
LDMC	0 ns	-0.33 **	0.18 ns	0.03 ns	-0.15 ns	-0.56***
Biomasa	0.03 ns	-0.19 ns	0.07 ns	0.01 ns	0.49 ***	-0.72***

⁸ Valores negativos del PC1 denotan mayor productividad dado que las cargas asociadas a las variables en este componente principal son negativas

Tabla A13. (continuación). Correlación entre los rasgos funcionales de los tres órganos del maíz y el primer componente principal (PC1) del PCA (n=55). Se reporta el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia (*p ≤ 0.05 ,**p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.005, ns no significativo). En negritas se resaltan las correlaciones con magnitud mayor o igual a 0.5.

Rasgo	SRL	RTD finas	RDMC	SSA	PC1 ⁹
Órgano: Tallo					
Altura de la planta	0.14 ns	0.03 ns	-0.2 ns	0.09 ns	-0.24ns
Diámetro basal tallos	-0.05 ns	0.28 *	-0.12 ns	-0.07 ns	-0.56***
Densidad tallos	0 ns	0.03 ns	0.04 ns	-0.07 ns	-0.01ns
Biomasa de tallos	-0.16 ns	0.28 *	-0.14 ns	-0.2 ns	-0.76***

Rasgo	RLD	RWD	Biomasa de raíces	PC1
Órgano: Tallo				
Altura de la planta	-0.17 ns	-0.18 ns	0.34 **	-0.24ns
Diámetro basal tallos	-0.02 ns	-0.09 ns	0.5 ***	-0.56***
Densidad tallos	0.04 ns	0.3 *	0.03 ns	-0.01ns
Biomasa de tallos	0.03 ns	0.08 ns	0.6 ***	-0.76***

⁹ Valores negativos del PC1 denotan mayor productividad dado que las cargas asociadas a las variables en este componente principal son negativas

Anexo B. Componente Social

Listado B1. Preguntas guía para las entrevistas semiestructuradas a productores locales.

Fecha:

Hora de inicio:

Hora de término:

Localidad:

Nombre del productor:

Edad: 0 a 20 años ___ 20 a 40 años ___ 40 a 60 años ___ más de 60 años ___

Sexo: Hombre ___ Mujer ___

Régimen de propiedad: Dueño* ___ Trabajador ___

* Tipo de predio: Ejidal ___ Comunal ___ Pequeña propiedad ___

Teléfono o datos del contacto: _____

Grupo 1: Características generales del agroecosistema

1. A parte del maíz, ¿qué otras plantas siembra o le gusta sembrar? Monocultivo() Milpa () ¿Alguna otra planta más que siembre?

2. ¿A usted, porque le gusta sembrar estas plantas y no otras?

¿Siembra algún tipo de semilla de maíz en particular?
SI ()
 - a) ¿Cuál variedad? _____
 - b) ¿Cómo son estas semillas? _____
 - c) ¿Porque siembra esta variedad y no otras? _____NO ()
 - d) ¿Porque no? _____
 - e) ¿Alguna vez ha intentado de sembrar otras semillas? SI () NO ()**
 - f) ¿Qué fue lo que paso cuando las sembró? _____
 - g) **¿Por qué no? _____
3. ¿Hace cuanto tiempo siembra las plantas que me mencionó? 0-20 ___ 20-40 ___ 40-60 ___ más de 60 años ___
4. ¿En ese tiempo siempre ha sido la misma variedad de semilla? SI() NO ()*
 - a) *¿Cuáles han sido estas variedades? _____
 - b) ¿Por qué las cambiaron? _____

Grupo 2.- Calidad del suelo percibida vs. calidad del suelo medida

1. En general, ¿Usted cree que el suelo de su parcela es bueno () regular () malo ()? ¿porqué? _____
2. ¿En qué se fija para saber que el suelo de su parcela es bueno/ regular/ malo? _____
3. En su experiencia, ¿cómo son los suelos buenos y los malos para la siembra? _____
4. ¿Usted cree que estas cosas que ve en su suelo afectan a su producción? SI() NO() ¿por qué? _____

Grupo 3.- Productividad percibida vs. productividad medida

1. ¿Cree que este año la producción de su parcela va a ser buena () regular () mala ()? ¿Por qué? _____
2. ¿En qué cosas de su parcela se fija Usted para decir esto? _____
3. ¿O de qué cosas depende la productividad? _____
4. ¿Cómo se ve la planta para saber que es momento de cosechar? _____
5. ¿Cree que las características que observa en las plantas se relacionan con la cantidad de producción? SI () NO () ¿por qué? _____

Grupo 4.- Indicadores de calidad de suelo derivados de la planta

1. ¿Usted cree que el suelo influya en la planta ya sea para bien o para mal? SI() NO () ¿Por qué? _____
2. Si el suelo es malo, ¿cómo se ve las plantas de maíz creciendo en este suelo malo? _____
3. Si el suelo es bueno, ¿cómo se ve la planta de maíz creciendo en este suelo bueno? _____
4. Si el suelo es malo, ¿cómo se ve la hoja del maíz que crecen en estos suelos? _____
5. En contrastes, si el suelo es bueno, ¿cómo se ve la hoja del maíz? _____
6. Si el suelo es malo, ¿cómo se ve el tallo del maíz que crecen ahí? _____
7. En contrastes, si el suelo es bueno, ¿cómo se ve el tallo del maíz? _____
8. Si el suelo es malo, ¿cómo se ven las raíces del maíz que crecen en estos suelos? _____
9. En contrastes, si el suelo es bueno, ¿cómo se ven las raíces del maíz? _____

Listado B1 . Preguntas guía para las entrevistas semiestructuradas a productores locales (continuación).

Grupo 5.- Indicadores de productividad derivados de la planta

1. ¿Usted cree que el suelo influya en la cantidad de producción? SI () NO ()
¿Por qué? _____
2. ¿Usted le ve algo a la **hoja del maíz** para saber que la planta va a dar muchas mazorcas?
¿Ve el **color** de las hojas? SI () NO ()
¿qué le dice? _____
¿Ve el **grosor** de las hojas? SI () NO ()
¿qué le dice? _____
¿Ve el **tamaño** de las hojas? SI () NO ()
¿qué le dice? _____
3. ¿Usted le ve algo al **tallo del maíz** para saber que la planta va a dar muchas mazorcas?
¿la **base del tallo** le dice algo? SI () NO ()
¿qué le dice? _____
¿si está delgado o ancho? _____
¿La **altura de la planta** le dice algo? SI () NO ()
¿qué? _____
4. ¿Usted le ve algo a las **raíces del maíz** para saber que la planta va a dar muchas mazorcas? SI () NO ()
¿Qué le dice? _____
¿Ve el **grosor de las raíces**? _____
¿si están **gruesas** las raíces o flacas? _____
¿Ve **si están largas** o cortas las raíces? _____
¿La **cantidad** de raíces? _____

Grupo 6.- Preguntas de manejo

1. ¿Prepara su tierra con arado con tractor () o animales ()?
2. ¿Cada cuándo siembra? _____
3. ¿Utiliza sistema de riego () o de temporal ()?
4. ¿Durante la siembra utiliza **fertilizantes químicos**?
SI () ¿Cuál le pone? _____
¿Cada cuándo lo pones? _____
¿Cómo lo aplica? _____
NO () ¿Por qué no? _____
5. ¿Usa **plaguicidas**? (Herbicidas, fungicidas, insecticidas)
SI () ¿Cuál le pone? _____
¿Cada cuándo lo pones? _____
¿Cómo lo aplica? _____
NO () ¿Por qué no? _____
6. ¿Por qué hace la siembra de esa manera? _____
7. ¿Desde hace cuanto tiempo lleva haciendo así la siembra) _____

- 0-5 años ()
5-10 años ()
Más de 10 años ()

Grupo 7.- Preguntas de historia/saber

1. Plátiqueme del maíz, ¿qué es para ustedes, qué representa el maíz y qué tan importante es el maíz para usted?
2. ¿porqué lo siembra?
3. ¿Cuál ha sido su experiencia en su trabajo con el maíz?
4. ¿Con el suelo?
5. ¿con las semillas del maíz?
6. ¿Ha habido algún cambio en sus parcelas y en la de sus vecinos, conocidos o en la zona debido al cambio ambiental?

7. ¿qué ha cambiado? _____
¿cómo eran antes y cómo son ahora? _____
¿Usted qué cree que se necesitaría hacer? _____

B2. Consentimiento informado proporcionado a los productores agrícolas al término de la entrevista.



Ciudad de México, a _____ de 201_

Estimado Señor:

Por medio de la presente solicitamos, de la manera más atenta, su autorización para llevar a cabo una entrevista con Usted sobre la forma de manejo, la calidad de suelo y la productividad de su parcela, así como su experiencia en el cultivo de maíz. El objetivo de la investigación que estamos realizando es documentarlas características, también llamados indicadores, que mide y observa en el suelo y en las plantas, y que le permiten a Usted conocerla salud del suelo y la productividad de su parcela. La idea de este trabajo es valorar y rescatar el conocimiento que Usted tiene como agricultor y combinarlo con el conocimiento científico para poder encontrar indicadores útiles que nos ayuden a mejorar el suelo y los cultivos de maíz.

Quisiéramos aclarar que cualquier información que Usted nos proporcione será tratada como anónima y absolutamente confidencial. Ni su nombre ni ningún otro tipo de información personal aparecerá en los registros del estudio. Los resultados de la entrevista serán utilizados únicamente para los objetivos de esta investigación y para fines académicos como parte de nuestro trabajo en la Universidad Nacional. Una vez finalizada la investigación Usted tendrá derecho a conocer los resultados del mismo. Para ello, nos comprometemos a entregarle una copia de los resultados del trabajo en caso de que así lo desee. También quisiéramos aclarar que la participación en este estudio no contempla ningún tipo de compensación o beneficio económico y que Usted puede dejar de participar total o parcialmente en el momento en que así lo desee.

Finalmente, quisiéramos comunicarle que somos un grupo de profesores y estudiantes del Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con sede en la Ciudad de México. Nuestro teléfono de la oficina es el _____. El proyecto que estamos realizando es financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y la propia Universidad, por lo que únicamente tiene objetivos científicos y no persigue ningún fin lucrativo.

Agradecemos su atención y estamos a su disposición para cualquier asunto relacionado con esta solicitud. Aprovechamos la oportunidad para dejarle un cordial saludo.

Atentamente

Atentamente

Responsable del proyecto
Institución de adscripción
Tel.
e-mail

Entrevistador
Institución de adscripción
Tel.
e-mail

Tabla B1. Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad. Indicadores utilizados por un productor de Guarapo, Valle de Santiago, y la dirección de uso que le dan. Se muestran únicamente los indicadores que reportan utilizar y el orden de mención

Parcela	Indicador	Carácter	Estado de caracter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
1	Hojas	Color	Verde	Suelo bueno. Coloraciones verdes indican al productor que la planta está sana	Alta producción. "Hoja muy verdes reflejan que va a haber buena la cosecha"	1
			Morado	Suelo bueno. "En ocasiones, cuando es suelo es bueno, las hojas se ponen moraditas"	Alta producción. "Hojas moraditas también pueden dar buena producción"	
			Amarillo	Suelos malo. Coloraciones amarillas cuando "el terreno está malo, débil o le hace falta algo"	Baja producción.	
	Tallos	Diámetro	Pequeño	Suelo regular a malo	Mediana a baja producción	2
			Mediano	Suelo regular	Mediana producción	
			Grande	Suelo bueno. "La caña se ve gruesa cuando está en un suelo bueno"	Alta producción. "Cuando la caña se ve gruesa, más fuerte, refleja que va a estar buena la cosecha"	

Tabla B1 (continuación). Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad

Parcela	Indicador	Carácter	Estado de caracter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
4	Hojas	Color	Verde	Suelo bueno. "Hojas verdes están en un suelo sano por que las plantas se ve que están bien"	Alta producción. "Hojas verdes en plantas quiere decir que está bien el maíz y va a tener buena producción"	2
			Morado	- Relación con la variedad de la semilla y no con la salud del suelo	Mediana producción "Va a dar menos que las plantas con hojas verdes pero más que plantas con hojas amarillas"	
			Amarillo	Suelo bueno (en menor proporción). "El suelo no está muy bueno, le hace falta abono por eso la hoja está amarilla"	Mediana producción (no necesariamente baja)	
	Tallos	Diámetro	Pequeño	Suelo regular (en menor proporción no necesariamente es un suelo malo)	Mediana producción (no necesariamente mala)	1
			Mediano	Suelo bueno	Alta producción	
			Grande	Suelo bueno	Alta producción. "Las plantas tienen cañas gruesas, producen elotes que no son grandes pero sí son pesado"	
	Raíces	Longitud de la raíz	Corta	Suelo bueno (en menor proporción) (no necesariamente es malo)	Mediana producción (no necesariamente mala)	4
			Mediana	Suelo bueno	Alta producción	
			Larga	Suelo bueno	Alta producción	
		Número de raíces adventicias	Poco	Suelo bueno (en menor proporción)	Mediana producción	3
			Intermedio	Suelo bueno (en menor proporción)	Mediana producción	
			Mucho	Suelo bueno "Hay más y le ayudan a poder tomar el agua y nutrimentos del suelo"	Alta producción "Entre más raíces más producción porque absorben el anua y abono del suelo"	

Tabla B1 (continuación). Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad

Parcela	Indicador	Carácter	Estado de caracter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
5	Hojas	Color	Verde	Suelo bueno. "La planta se está desarrollando bien porque trae toda la calidad del nutriente y está recibiendo la clorofila"	Alta producción	2
			Morado	Suelo bueno. "El suelo debe estar súper bien porque el morado es una resistencia que las plantas por naturaleza usan, ya cuando tienen este colorcito es porque ya sacaron sus defensas para protegerse del sol"	Alta producción	
			Amarillo	Suelo malo. "Se relaciona con la falta de elementos en el suelo, llámese nutriente, agua o una aplicación mal del herbicida... Ahí ya no hay clorofila, ya no hay verdor en la hoja, esto va directo a morirse la planta"	Baja producción	
	Área	Pequeña	Relación con la variedad de la semilla y no con la salud del suelo	Alta producción. "Tiene más bondades, hacen menos sobra, permiten que entre más el sol y el aire"	3	
		Mediana		Mediana producción		
		Grande		Mediana producción (no necesariamente mala). "Hacen que entre menos luz y aire"		
	Tallos	Altura	Pequeña	Suelo regular (no necesariamente es malo)	Mediana producción (no necesariamente mala)	1
			Mediana	Suelo regular (no necesariamente es malo)	Mediana producción (no necesariamente mala)	
			Grande	Suelo bueno	Buena producción. "Se relaciona con el desarrollo favorable de la planta y son plantas que dan más"	
	Raíces	Longitud de la raíz	Corta	Suelo regular	Mediana producción	5
			Mediana	Suelo bueno	Alta producción	
			Larga	Suelo bueno	Alta producción	
	Número de raíces	Poco		Mediana producción	4	
		Intermedio	No se asocia con la salud del suelo, sin embargo, a mayor cantidad de raíces adventicias la planta tienen mayor	Alta producción		

adventicias

Mucho

resistencia física (amortiguamiento)

Alta producción. "La planta resiste más y puede llegar a producir (tiempo de vida mayor-mayor probabilidad de producción)

Tabla B1 (continuación). Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad

Parcela	Indicador	Carácter	Estado de caracter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
11	Hojas	Color	Verde	Suelo bueno. "Las hojas se ven alegre de un color verde cuando están creciendo en un suelo bueno"	Alta producción. "Si el follaje tiene buen color verde, va a dar buen tamaño de mazorca"	2
			Morado	Suelo regular	Mediana producción	
			Amarillo	Suelo malo. "Las hojas de suelo malo ven triste, con color amarillo, como si estuviera enfermo el maíz y tuviera alguna plaga y el desarrollo tampoco es muy bueno"	Baja producción	
	Tallos	Diámetro	Pequeño	Suelo malo. "El tallo se ve delgado y como triste, como que le hace falta vitaminas"	Baja producción. "Entre más delgada la caña más pequeña la mazorca y menor producción"	1
			Mediano	Suelo regular	Mediana producción	
			Grande	Suelo bueno. "El tallo se ve grueso y así como jugoso, como que tiene mucha agua. Todo lo contrario del suelo malo"	Alta producción. "Entre más gruesa la caña más grande es la mazorca y va a dar una mazorca de buen tamaño"	
		Altura	Pequeña	Suelo regular (no necesariamente es un suelo malo)	Baja producción	3
			Mediana	Suelo regular	Mediana producción	
			Grande	Suelo bueno	Alta producción. "Plantas altas van a dar una mazorca de buen tamaño"	
	Raíces	Número de raíces adventicias	Poco	Suelo malo. "Porque las raíces no tocan el suelo y no se entierra"	Menor producción. "Porque es más fácil que la planta se caiga"	4
			Intermedio	Suelo regular	Mediana producción. "Pueden llegar a ser productivos porque pueden resistir más a que se caigan"	

Mucho	Suelo bueno. "Porque las raíces tocan el suelo y se entierran"	Alta producción. "Más productivos porque la planta puede llegar a desarrollarse sin que se caigan"
-------	--	--

Tabla B2. Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad. Indicadores utilizados por un productor de San Felipe y la dirección de uso que le dan. Se muestran únicamente los indicadores que reportan utilizar y el orden de mención.

Parcela	Indicador	Carácter	Estado de carácter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
3	Hojas	Color	Verde	Suelo bueno	Alta producción	1
			Morado	- No se ha observado este tipo de colores en las hojas	-	
			Amarillo	- El productor no lo relaciona con la salud de suelo, si no con la época de cosecha	-	
	Tallos	Diámetro	Pequeño	Suelo regular (no necesariamente que este mal)	Baja producción "Puede dar solo 1 mazorca"	2
			Mediano	Suelo bueno	Mediana producción (aunque las mazorcas son pequeñas)	
			Grande	Suelo bueno	Alta producción "Pueden dar 2 o 3 mazorcas"	

Tabla B2 (continuación). Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad

Parcela	Indicador	Carácter	Estado de carácter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
7	Hojas	Color	Verde	Suelo bueno	Alta producción	1
			Morado	Suelo regular	Mediana producción	
			Amarillo	Suelo malo. "La planta puede estar enferma"	Baja producción	
	Tallos	Diámetro	Pequeño	Suelo regular	Mediana producción. "Dan menor producción porque tiene menos fuerza la planta que aquellas con tallos grueso"	2
			Mediano	Suelo bueno	Mediana a alta producción	

Grande Suelo bueno

Alta producción

Tabla B2 (continuación). Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad

Parcela	Indicador	Carácter	Uso de indicador	Estado de carácter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
7	Hojas	Color	Si	Verde	Suelo bueno	Mediana producción	3
				Morado	Suelo bueno	Mediana producción	
				Amarillo	Suelo malo	Baja producción	
	Área	Si	Pequeña	Suelo regular	Baja producción (no necesariamente mala)	2	
			Mediana	Suelo bueno	Mediana producción		
			Grande	Suelo bueno	Alta producción		
	Tallos	Diámetro	Si	Pequeño	Suelo regular a malo	Baja producción (no necesariamente mala)	1
				Mediano	Suelo bueno	Mediana producción	
				Grande	Suelo bueno	Alta producción	
	Altura	Si	Pequeña	Suelo malo	Baja producción . "Les hizo falta abono o agua"	4	
			Mediana	Suelo regular a bueno	Mediana producción		
			Grande	Suelo bueno	Alta producción "Probablemente generan un elote más grande"		

Tabla B2 (continuación). Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad

Parcela	Indicador	Carácter	Estado de caracter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
6	Hojas	Color	Verde	Suelo bueno	Alta producción	1
			Morado	Suelo regular . "Crecen en suelos pobres con falta de nutrientes, falta de fósforo"	Mediana producción. "Menos productivos que plantas verdes pero más que las plantas enfermas (amarillas)"	
			Amarillo	Suelo malo. "Pueden ser plantas que crecen en suelos malo o bien, plantas que tienen algún tipo de enfermedad (plaga)"	Baja producción	
	Tallos	Diámetro	Pequeño	Suelo regular	Baja producción.. "Este delgado no da ni buen forraje, ni buen maíz.	2
			Mediano	Suelo regular a bueno	Mediana producción	
			Grande	Suelos buenos	Alta producción. Tallos más gruesos se relacionan con mayor producción ya sea para forraje o maíz para consumo	
	Raíces	Número (cantidad) de raíces finas	Poco	Suelo malo	Baja producción "porque se absorben menos nutrientes"	4
			Intermedio	Suelo regular	Mediana a alta producción	
			Mucho	Suelo bueno	Alta producción "porque se absorben más nutrientes"	
Número de raíces adventicias		Poco	Suelo malo a regular	Baja producción	3	
		Intermedio	Suelo regular	Mediana producción		
		Mucho	Suelo bueno	Alta producción		

Tabla B2 (continuación). Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad

Parcela	Indicador	Carácter	Uso de indicador	Estado de caracter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
10	Hojas	Color	Si	Verde	Suelo bueno	Alta producción	1
				Morado	Suelo regular	Mediana producción	
				Amarillo	Suelo malo	Baja producción	
	Área	Si	Pequeña	Suelo malo	Baja producción	3	
				"Algo e hace falta a la tierra que por eso no crece la hoja"			
			Mediana	Suelo regular	Mediana producción		
	Tallos	Diámetro	Si	Pequeño	Suelo malo	Baja producción	2
				Mediano	Suelo de bueno a regular	Mediana producción	
				Grande	Suelo bueno	Alta producción	

Tabla B2 (continuación) . Planta de maíz como indicador de la calidad del suelo y productividad

Parcela	Indicador	Carácter	Estado de caracter	Dirección de uso para evaluar la salud (calidad) del suelo	Dirección de uso para evaluar la productividad de la parcela	Orden de mención
2	Hojas	Color	Verde	Suelo bueno	Alta producción	1
			Morado	-	-	
			No se ha observado este tipo de colores en las hojas			
	Amarillo	Suelo malo	Baja producción			
	Tallos	Diámetro	Pequeño	Suelo malo	Baja producción (no necesariamente mala)	2
			"Hay tallos delgados en suelos menos sanos porque no se les ayuda con fertilizantes"			
Mediano			Suelo regular a bueno	Mediana a alta producción		
Grande	Suelo bueno	Alta producción				
			(con la condicionante del uso de fertilizantes" "aquí la tierra está buena pero también tiene abono"			

Tabla B3. Caracterización del manejo de las parcelas a partir de la información obtenida de las entrevistas a los productores dueños de las parcelas en Guarapo, Valle de Santiago.

Parcela	Cultivos sembrados	Variedad de maíz sembrada	Tiempo de uso de la variedad de semillas	Sistema de riego	Periodo de siembra	Tipo de arado (Tractor)	Tipo de arado (Yunta)
1	Maíz y frijol.	Variedad criolla. Semillas grandes y livianas (en peso). Los granos son más grandes que las variedades seleccionadas.	No se sabe el tiempo exacto pero refiere a al menos 4 generaciones	Temporal	Anual.	Si	No
4	Maíz y frijol	Variedad criolla. Semillas de tamaño grande. Se prefiere variedad criolla por los costos que implican las semillas mejoradas	No recuerda el tiempo exacto pero es la variedad que recuerda siempre han plantado en su familia	Temporal	Anual.	Si	No
5	Maíz y frijol.	Variedad criolla	Más de 40 años sembrando la criolla	Temporal	Anual.	No (desde hace 3 años)	Si (3 años). Anteriormente usaba tractor
8 y 9	Maíz , frijol y sorgo	"Semilla cruzada". Variedad criolla con cruza de semilla modificada aunque no reconoce específicamente cuál opina que puede ser " haber sido el de cal, 133 pudo haber sido del vida 134, del vida 137, del vida 154"	No recuerda el tiempo exacto pero es la variedad que recuerda siempre han plantado en su familia	Temporal	Anual	Si	No
11	Maíz y frijol.	Semillas modificadas de Asgrow. Semillas grandes y blancas.	Aproximadamente 10 años	Temporal	Anual	Labranza cero	Uso de tractor esporádicamente (cada 3 o 5 años). Para barbechar cuando hay demasiada maleza

Tabla B3 (continuación). Caracterización del manejo de las parcelas a partir de la información obtenida de las entrevistas a los productores dueños de las parcelas en Guarapo, Valle de Santiago.

Parcela	F. Químicos	F. Orgánicos	Herbicidas	Insecticidas	Fungicidas	Tiempo del manejo	Otras características del manejo
1	Sí. Se aplicó 5 sacos de urea (50 kilos cada saco) a todo el maíz de la parcela.	No	Sí. Para la maleza de "hoja ancha" utiliza SAGAQUAT (Sal dicloruro de paraquat). Un frascos de 900 ml se diluye en 100L. "Le aplique un tambor y medio"	No se aplicó por falta de tiempo. Generalmente sí aplica	No	2 años	*Los cultivos se encuentran separados dentro de la misma parcela *Se siembra antes de que comiencen las lluvias para "ganar tiempo" y cuando comience a llover la semilla ya esté sembrada *Se dejó de trabajar la parcela por 50 años.
4	Sí. "El triple" (NPK). Se utilizan 4 sacos de 50 kilos colocados sobre el suelo	No No se cuenta con los animales para llevar a cabo este tipo de práctica	Sí Para maleza de "hoja ancha" utiliza SAGAQUAT (Sal dicloruro de paraquat). Un frascos de 900 ml se diluye en 100L. Se aplicó un tambor de 100 L.	Sí Para el gusano cogollero. Se aplicó en toda la parcela, aunque no se especificó el nombre del insecticida	No	4 años.	*Cultivos separados dentro de la parcela *Los cultivos se rotan anualmente (frijol y maíz por separado cada año) *Cuando se cosecha el frijol se siembra garbanzo para aprovechar la humedad del suelo *Se dejó de trabajar la parcela aproximadam30 o 40 años
5	Sí. Se colocó 50 kg de nitrato de amonio (NPK, N30, P05, K05) en una hectárea.	Uso de lombricomposta	No Se eliminan las hiervas de manera manual porque pueden afectar al frijol.	Sí No son compuestos químicos. Se utiliza cal para eliminar plagas principalmente gusano cogollero	No	40 años trabajando la parcela. Desde hace 3 años tiene este sistema de manejo.	* Cultivos intercalados dentro de la parcela (2 filas de maíz y 2 de frijol). *No se elimina el rastrojo. *Los fertilizantes químicos se coloca directamente en el suelo cuando las plantas ya crecieron y hay lluvias para el agua permita que el fertilizante se filtre. *Se siembra garbanzo después de cosechar el frijol (cuando hay lluvias)
8 y 9	Sí. Coloca un saco de TRIPLE y un saco de urea de 50 kilos	No	Sí. Coloca 2 L de "GRAMUSONE" o "GRAMUSIL" (secantes) y 1/2 L de "HIERBESTE" o "HIERBAMINA" disueltos en 200 L de agua	Sí. Para combatir el gusano cogollero aplica "LORSBAN" en 200 L de agua	No	25 años	*Los cultivos se encuentran separados dentro de la parcela
11	Sí. Sulfato de amonio o nitrato de amonio llamado "triple" (NPK, N30, P05, K05). Se utilizaron 600 kilos para 1 1/2 ha. En la reabonada se ocuparon 700 kilos (14 bultos de 50 kilos) para la misma área.	No	No	Sí. Marca Lorsban (insecticida organofosforado cristalino) es para combatir a una plaga llamada "trips" y al gusano cogollero y barrenador.	No	Aproximadamente 12 años con labranza cero	*Los cultivos se encuentran intercalados dentro de la parcela (2 filas de maíz y 2 de frijol) *F químicos: se colocan do veces durante la siembra y después de 30 días. Si hay dinero se aplica una tercera reabonada

Tabla B4. Caracterización del manejo de las parcelas a partir de la información obtenida de las entrevistas a los productores dueños o trabajadores de las parcelas en San Felipe.

Propietario	Cultivos sembrados	Variedad de maíz sembrada	Tiempo de uso de la variedad de semillas	Sistema de riego	Periodo de siembra	Tipo de arado (Tractor)	Tipo de arado (Yunta)
2	Maíz, frijol, calabaza, avena, chiles	Variedad criolla. Es una semilla pequeña pero pesada. Se ha intentado plantar otro variedad de semillas pero tardan más en producir o no producen. Las semillas criollas resisten más la sequía.	Más de 20 años	Temporal	Anual	Si 20 años	No
3	Maíz, frijol y avena (para forraje de ganado)	Variedad criolla. Es una semilla de tamaño mediano, no muy ancha y de buen peso	No recuerda el tiempo exacto, sin embargo enfatiza que son los que ha sembrado desde siempre	Temporal	Anual	Si En los últimos 5 años	No
6	Maíz y frijol.	Utilizaban la variedad criolla pero se les acabo. Actualmente se mezcla una semilla modificada (BS322) con otras variedad. El grano de maíz presenta un tamaño mediano pero pesado	Aproximadamente 40 años	Temporal	Anual	Si	No
7	Maíz, frijol y chiles.	Maíz blanco (criollo) y maíz negro. La semilla de la variedad criolla es larga y la del maíz negro es más pequeña de tamaño.	Más de 30 o 40 años sembrando las variedades	Temporal	Anual	No	Si
10	Maíz, frijol y chiles	Variedades de maíz blanco, rojo, negro y amarillo.	Más de 60 años	Temporal	Anual	Si En esta ocasión se barbecho con yunta sin embargo siempre se hace con tractor	No

Tabla B4 (continuación). Caracterización del manejo de las parcelas a partir de la información obtenida de las entrevistas a los productores dueños o trabajadores de las parcelas en San Felipe.

Propietario	F. Químicos	F. Orgánicos	Herbicidas	Insecticidas	Fungicidas	Tiempo del manejo	Otras características del manejo
2	Si. Se utiliza Urea, el triple (NPK) y, a veces, un "18-46-00" (Fosfato Diamónico).	Si. En algunas partes de la parcela. Aproximadamente 2 años con abono orgánicos (estiércol)	No	No En esa temporada no se utilizó porque no fue necesario. Años anteriores sí hubo plagas ("borrego"). No se especificaron las cantidades ni la marca del insecticida	No	20 años con tractor 2 años con abono orgánico	*Los cultivos no siempre se siembran en el mismo periodo. En la fecha de trabajo sólo se sembró maíz *F. Químicos se colocan dos veces: en la siembra y cuando comienza a espigar. *F. Orgánicos. Se coloca antes de sembrar. En áreas donde se coloca ya no se pone el F. químico
3	Si. Aunque en pocas ocasiones. Sólo cuando las plantas están creciendo de manera óptima se aplica urea	No	Si. Esterol o el Sulfamil. Se aplica una sola vez durante la temporada	No	No	5 años	*Cultivos separados dentro de la parcela. *F. Químicos 2 veces: cuando se hace la siembra y cuando la planta tiene aproximadamente 20 cm de altura *El herbicida se aplica una sola vez durante la temporada cuando la planta tiene aprox. 50 cm para que no le afecte
6	Si. 100 kg de fósforo ("Súper triple") y 100 kg de nitrógeno (Urea) por hectáreas.	Poco y combinado con el químico	Si "Estereón", un litro por hectárea	Si. Mucho. Se aplica "Clorpirifós o Cipermetrina" para eliminar el gusano cogollero. Se aplica 1 litro/ha. pero se aplica hasta 3 veces durante todo el proceso.	No	40 años	*Cultivos separados dentro de la parcela en una misma temporada, sin embargo, se van rotando de lugar en las siguientes temporadas *F. Químicos 2 veces; cuando se hace la siembra y cuando la planta tiene aproximadamente 20 cm de altura *El herbicida se aplica una sola vez durante la temporada cuando la planta tiene aprox. 50 cm para que no le afecte *Años en los que se deja descansar la parcela pero depende de la producción del año anterior
7	Generalmente sí, aunque las cantidades son pocas aprox. 1	Si Se siembra el maíz en el lugar en el cual se aplicó el abono de	Si. Pero el productor no recordó el	Si. Aunque en esa temporada no aplicó. El productor no recordó el nombre del insecticida. La principal plaga es el gusano cogollero, el	No	20 años	*Plantas sembradas de manera separada dentro de la parcela *La variedad sembrada se elige por cuestiones económicas *Se hace el

10	bulto de urea para 40 surcos.	animales	nombre	chapulín y el "burro"		rastreo antes de que llueva. Se elimina el rastrojo y se siembras hasta en las épocas de lluvia * Cuando se hace la cosecha, la parcela es ocupada como potrero para vacas	
	Si. Urea , sin embargo en esa temporada no se colocó fertilizantes.	Si. Se ha utilizado por "muchos años" pero en esa ocasión se colocó nada.	No.	Si. "Malatión o el Sevi" (que no afecta a ninguno de los cultivos) al 80%. Se utilizan hasta tres veces dentro del mismo periodo. Las plagas principales son el gusano cogollero, el "frailesillo" (o burro) y el chapulín	No	Aproximadam ente 20 años	Las plantas se sembraron en una parcela de riego sin embargo se manejaron como de temporal, es decir, no se regaron más que con la lluvia. Se plantaron 15 surcos de plantas del proyecto (que no fueron regadas) junto a las de riego. La humedad se filtro aprox. 10 surcos y únicamente quedaron como de temporal. *La siembra se hace después de que llueva y la tierra se humedece.