



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
INSTITUTO DE GEOLOGÍA
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

**RESPUESTA DEL CARBONO EDÁFICO Y ACTIVIDAD MICROBIANA DEL SUELO
ANTE DIFERENTE TIPO DE MANEJO EN AGROECOSISTEMAS TRADICIONALES
DEL SUR DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

NADIA EDITH NAVA ARSOLA

TUTOR PRINCIPAL: DR. BRUNO MANUEL CHÁVEZ VERGARA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. FELIPE FRANCISCO GARCÍA OLIVA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS
Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

DR. JOHN LARSEN
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS
Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., NOVIEMBRE, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

ENTIDAD INSTITUTO DE GEOLOGÍA

OFICIO CPCB/927/2022

ASUNTO: Oficio de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted, que en la reunión ordinaria (Virtual) del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **20 de junio de 2022**, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Manejo Integral de Ecosistemas** de la estudiante **NAVA ARSOLA NADIA EDITH** con número de cuenta **310041823** con la tesis titulada **“RESPUESTA DEL CARBONO EDÁFICO Y ACTIVIDAD MICROBIANA DEL SUELO ANTE DIFERENTE TIPO DE MANEJO EN AGROECOSISTEMAS TRADICIONALES DEL SUR DE LA CIUDAD DE MÉXICO.”**, realizada bajo la dirección del **DR. BRUNO MANUEL CHÁVEZ VERGARA**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO
Vocal: DRA. PATRICIA VÉLEZ AGUILAR
Vocal: DR. NOÉ MANUEL MONTAÑO ARIAS
Vocal: DRA. VINISA SAYNES SANTILLÁN
Secretario: DR. FELIPE FRANCISCO GARCÍA OLIVA

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 11 de octubre de 2022

COORDINADOR DEL PROGRAMA



DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA



AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Al **Posgrado en Ciencias Biológicas** de la UNAM por la oportunidad de continuar con mi formación académica.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por otorgarme la beca 1084774 a través del Programa de Becas Nacionales para realizar mis estudios de maestría.

Al **Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP)** por otorgarme el apoyo económico para la participación en el VIII Congreso Mexicano de Ecología.

A la **Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECTEI)** por la financiación del proyecto “Manejo de suelos volcánicos en la porción Sur de la cuenca de México (zona cerril del Teuhtli y planicie de la región de Tetelco) para potencializar su producción alimentaria sustentable, recarga de agua y mitigación del cambio climático (Clave, SECTEI/268/2019)” en el que la tesis contribuyó como parte del proyecto.

A mi tutor principal, el **Dr. Bruno M. Chávez Vergara**, así como a los miembros de mi comité tutorial, el **Dr. Felipe García Oliva** y el **Dr. John Larsen**, por todo su tiempo, observaciones y comentarios positivos para mejorar el desarrollo de la tesis.

AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL

Al **Instituto de Geología (IGI, UNAM)** y al **Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM, IGI, UNAM)** por las facilidades para el uso de las instalaciones y laboratorios en los que realicé los análisis.

Al **Laboratorio de Biogeoquímica y Materia Orgánica del Suelo (IGI, UNAM-LANGEM)** y al **Laboratorio de Biogeoquímica de Suelos (IIES, UNAM)**, específicamente a la **Mtra. Ofelia Ivette Beltrán Paz** y al **Mtro. Rodrigo Velázquez Durán**, por todo el apoyo que me brindaron durante la determinación de los análisis químicos y de actividad biológica de la presente tesis.

Al **Laboratorio de Paleosuelos (IGI, UNAM)**, específicamente al **Mtro. Jaime Diaz Ortega** por todo su apoyo en la determinación e interpretación de los análisis de textura.

Al **Laboratorio Nacional de Innovación Ecotecnológica para la Sustentabilidad (LANIES) (IIES, UNAM)** por la determinación de los análisis de estructura microbiana.

Al **Dr. Felipe García Oliva, Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Dr. Noé Manuel Montaña Arias, Dra. Patricia Vélez Aguilar y Dra. Vinisa Saynes Santillán** por aceptar ser parte del jurado y por todos sus comentarios para el mejoramiento de la tesis.

DEDICATORIA

A **Bruno y Ofe**, por todo el conocimiento teórico/práctico e incluso personal que a lo largo de los años me han brindado. Gracias por su amistad, apoyo y consejos durante este proceso de maestría, créanme que fueron de gran ayuda para mí. Y lo más importante, gracias por ser una fuente de inspiración y esperanza de que la ciencia puede y debe hacerse desde la colaboración y la retroalimentación. No dejen de seguir formando gente con esta perspectiva que mucha le falta le hace a la academia.

A quienes forman y formaron parte del **BiogeoMOS**, gracias por su retroalimentación en cada seminario, sus comentarios enriquecieron mi formación durante la maestría. Especialmente gracias a **Toño** por sus comentarios siempre muy atinados sobre la tesis, pero más por aquellos comentarios personales que me ayudaron a ver algunas de mis capacidades, siempre me levantaron el ánimo.

A la organización **Jóvenes comuneros y comuneras de Milpa Alta**. Gracias **Verónica Briseño** por abrirme las puertas y darme un espacio en su página para platicar sobre mi proyecto y por el intercambio de saberes que se realizó en conjunto con el BIOGEOMOS. Gracias **Donaji Meza** por ser el contacto con los productores de la región, por darme acompañamiento en el proceso de búsqueda de sitios, con tu ayuda pude agilizar el proceso de muestreo. Gracias a ambas por mantener en pie la lucha por la protección de los bienes de Milpa Alta, así como visibilizar las problemáticas sociales, económicas, políticas y ambientales de la región. Son una inspiración como mujeres para mí.

A **Juan Carlos Lozano y padres, Abraham y Misaim Gómez, Ernesto Reyes y familia, Andrés Hermosillo y Alicia Flores**, por permitirme estudiar sus parcelas, por la disposición para invertir su valioso tiempo y acompañarme durante el muestreo, además de la constante resolución de dudas. Espero que todo este trabajo sea de gran ayuda para ustedes.

A mi amiga **Kass**, por su amistad y acompañamiento durante la maestría, especialmente por esos momentos en los que desahogábamos nuestros problemas juntas, gracias por escucharme.

A mi **abuelito chico** y a **Martita**, gracias por recibirme en su hogar y considerarme parte de su familia, gracias por todos esos consejos de vida y por enseñarme a que las cosas salen mejor si dejamos de preocuparnos por todo.

A **Erick**, no encuentro palabras para agradecerte todo lo que has hecho por mí, llegaste a mi vida justo cuando más lo necesitaba, y llegaste para cambiarla por completo con tu amor y comprensión. No tienes ni idea de cuánto me has enseñado en miles de aspectos, eres mi ejemplo a seguir, te admiro y te respeto. No me queda más que agradecer a la vida por ponerte en mi camino.

A mis **padres y hermanos**, por todo su amor, apoyo y comprensión durante este proceso de maestría, por escucharme y darme consejos cuando los necesitaba. Estoy orgullosa de ustedes, y sé muy bien que ustedes lo están de mí y de lo que hasta ahora he logrado. Mi esfuerzo es por ustedes y para ustedes siempre.

*¿Cómo volverá el mundo a ser lo que era después de tanta maldad como ha sufrido?
Pero al final, todo es pasajero. Como esta sombra, incluso la oscuridad se acaba, para
dar paso a un nuevo día. Y, cuando el sol brilla, brilla más radiante aún.*

El señor de los anillos, J.R.R Tolkien

Tesis dedicada a...

MI FAMILIA

Y

AMIGOS

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS	ii
LISTA DE TABLAS	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	vi
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Carbono edáfico	5
1.2. Materia orgánica del suelo en agroecosistemas anuales y perennes.....	7
1.3. Modificación de las propiedades edáficas en agroecosistemas perennes y anuales como consecuencia del manejo	9
1.4. Descripción del manejo de los agroecosistemas anuales y perennes representativos de Milpa Alta, Cd. Mx.	12
2. JUSTIFICACIÓN.....	25
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	27
4. HIPÓTESIS	27
5. OBJETIVOS.....	28
6. METODOLOGÍA	29
6.1. Área de estudio.....	29
6.2. Tipos de manejo y parcelas de estudio	29
6.3. Diseño experimental.....	33
6.4. Diseño de muestreo y colecta de muestras.....	33
6.5. Caracterización de la dinámica agrícola	34
6.6. Caracterización en laboratorio	35
6.7. Análisis estadísticos	43
7. RESULTADOS	45
7.1. Caracterización de la dinámica agrícola en Milpa Alta	45
7.2. Caracterización física y química del suelo.....	53
7.3. Estructura, actividad y estado metabólico de la comunidad microbiana.....	60
7.4. Caracterización mineralógica del nopal.....	66
7.5. Análisis de componentes principales (ACP).....	67
7.6. Análisis de regresión múltiple por pasos	68
7.7. Análisis de redundancia (ARD).....	69
8. DISCUSIÓN.....	71
8.1. Importancia del análisis de la dinámica agrícola de Milpa Alta.....	71
8.2. Modificación de las propiedades edáficas como consecuencia del manejo agrícola.....	73
9. CONCLUSIONES	87
10. LITERATURA CITADA	89
11. ANEXO 1	109

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características funcionales y clases de suelo con aptitud para el cultivo de nopal (Obtenido de Inglesse et al., 2018).....	14
Cuadro 2. Principales tipos de plagas y enfermedades asociadas al cultivo de nopal (INEGI, 2007).....	19
Cuadro 3. Principales tipos de plagas y enfermedades asociadas al cultivo de maíz (SADER, 2020; ONUAA, s.f.).....	24
Cuadro 4. Tipos y características de los manejos agrícolas identificados en Villa Milpa Alta, Cd. Mx. Nopal orgánico (NORG), nopal orgánico con control químico (NCQ) y maíz orgánico (MORG).....	32

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ácidos grasos asociados a distintos grupos microbianos.....	39
Tabla 2. Número de hectáreas destinadas a uso agrícola en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México y su cambio con respecto al año anterior en hectáreas y su representación en porcentaje. NA=No aplica (SIAP, 2010–2019).....	45
Tabla 3. Cociente de la superficie cosechada respecto a la superficie sembrada para los principales cultivos en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. NA=No aplica (SIAP, 2010–2019).....	47
Tabla 4. Volumen de producción en miles de toneladas para los principales cultivos en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. NA=No aplica (SIAP, 2010–2019).	47
Tabla 5. Valor de la producción en millones de pesos mexicanos para los cultivos más representativos de la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. NA=No aplica (SIAP, 2010–2019).....	49
Tabla 6. Resultados de la correlación de Pearson entre las condiciones climáticas y el rendimiento de los cultivos de nopal y maíz para el periodo de 2010–2019 de la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Se muestran los valores de r obtenidos.....	52
Tabla 7. Medias (\pm error estándar) de los parámetros físicos y químicos analizados en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas representan diferencias significativas ($p<0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con $p<0.1$	54
Tabla 8. Medias (\pm error estándar) de la concentración de nutrientes totales en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas representan diferencias significativas ($p<0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con $p<0.05$	59
Tabla 9. Medias (\pm error estándar) de la concentración de ácidos grasos para la caracterización de la estructura microbiana del suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas representan diferencias significativas ($p<0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NORG=cultivo de nopal	

orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con $p < 0.1$ 61

Tabla 10. Medias (\pm error estándar) de la actividad microbiana en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NORG=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. BG= β -glucosidasa, POX=polifenol oxidasa, LIP=lipasa, NAG=n-acetil glucosaminidasa, FOS=fosfomonoesterasa, DHG=deshidrogenasa, AEE=actividad enzimática específica, Cmic= C en biomasa microbiana, qCO_2 =coeficiente metabólico. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con $p < 0.1$ 66

Tabla 11. Análisis de regresión lineal múltiple por pasos de la mineralización de C. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con $p < 0.1$. Min C= mineralización de C, CT=carbono total, NT=nitrógeno total, PT= fósforo total, BG= β -glucosidasa, POX=polifenol oxidasa, LIP=lipasa, Cmic= C en biomasa microbiana, AEE=actividad enzimática específica, G^- =bacterias gram negativas, G^+ =bacterias gram positivas, Hsap=hongos saprobios, H:B=cociente hongos sobre bacterias y C:N=cociente carbono sobre nitrógeno. 69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de la conceptualización de las fracciones de la MOS. Las fracciones son físicamente definidas en el eje x por la densidad en $g\ cm^{-3}$ y en el eje y por el tamaño en μm . MOP=materia orgánica particulada, MOAM= materia orgánica asociada a minerales, CBPM= compuestos de bajo peso molecular, MOD= materia orgánica disuelta (Imagen obtenida y traducida de Lavallee et al., 2020). 7

Figura 2. Sistemas de producción de nopal *Opuntia ficus-indica* en Milpa Alta, Cd. Mx. **A.** Producción tradicional a cielo abierto, **B.** Sistema de microtúneles y **C.** Sistema de invernadero (Imágenes obtenidas de Inglese et al., 2018). 17

Figura 3. **A.** Mapa de la ubicación de las parcelas seleccionadas, así como el tipo y uso de suelo de la zona de estudio ubicada en la alcaldía Milpa Alta, Cd. Mx. **B.** Grafica de temperatura y precipitación media mensual promedio para el periodo de 2010–2019 de la alcaldía Milpa Alta, Cd. Mx. NORG=nopal orgánico, NCQ=nopal con control químico, MORG=maíz orgánico, ENE=enero, FEB=febrero, MAR=marzo, ABR=abril, MAY=mayo, JUN=junio, JUL=julio, AGO=agosto, SEP= septiembre, OCT=octubre, NOV=noviembre y DIC=diciembre. 31

Figura 4. Parcelas de estudio ubicadas en Villa Milpa Alta, Cd. Mx. **A.** Nopal orgánico (NORG), **B.** Nopal orgánico con control químico (NCQ) y **C.** Maíz orgánico (MORG). 32

Figura 5. Esquema de muestreo para las parcelas de los tres tipos de manejo: NORG, NCQ y MORG, ubicadas en Villa Milpa Alta, Cd. Mx. 33

Figura 6. Porcentaje de la superficie sembrada de los principales cultivos en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México (SIAP, 2010–2019). 46

Figura 7. Porcentaje del volumen de la producción en toneladas para los principales cultivos en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México (SIAP, 2010–2019). 48

Figura 8. Porcentaje del valor de la producción en pesos de los principales cultivos para la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México (SIAP, 2010–2019). 50

- Figura 9.** Rendimiento para los cultivos de **A.** nopal y **B.** maíz y su relación con la temperatura y precipitación media anual en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México (SIAP, 2010–2019). 51
- Figura 10.** Gráficas de pastel de las encuestas realizadas a los productores de nopal y maíz en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** ¿Quién está a cargo de la producción?, **B.** Destino de la producción, **C.** Cambios en la producción en la última década y **D.** Intereses de los productores. 53
- Figura 11.** Media (\pm error estándar) de **A.** carbono total (CT), **B.** carbono inorgánico total (Cinorg) y **C.** carbono orgánico total (COT) en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 55
- Figura 12.** Media (\pm error estándar) de **A.** nitrógeno total (NT), **B.** fósforo total (PT) y **C.** nitrógeno disponible en forma de nitratos (NO_3^-) en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 56
- Figura 13.** Media (\pm error estándar) de **A.** contenido de carbono orgánico total (Cont COT), **B.** contenido de carbono inorgánico total (Cont Cinorg), **C.** contenido de nitrógeno (Cont NT) y **D.** contenido de fósforo (Cont PT) en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 57
- Figura 14.** Media (\pm error estándar) de los cocientes **A.** C:N, **B.** C:P y **C.** N:P en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 58
- Figura 15.** Distribución del contenido de COT en las fracciones de materia orgánica en las muestras de suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. MOPL: materia orgánica particulada libre, MOPO: materia orgánica particulada ocluida, MOAMG: materia orgánica asociada a minerales gruesa ($>20\mu\text{m}$), MOAMF: materia orgánica asociada a minerales fina ($<20\mu\text{m}$). Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 59
- Figura 16.** Media (\pm error estándar) de **A.** concentración total y por grupo microbiano de ácidos grasos y **B.** cocientes entre grupos microbianos en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras mayúsculas representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre los ácidos grasos totales y letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre los tipos de manejo para cada grupo microbiano. G⁻=bacterias gram negativas, G⁺=bacterias gram positivas, HMA=hongos micorrízicos arbusculares, Hsap=hongos saprobios, H:B=cociente hongos sobre bacterias, G⁻:G⁺=cociente bacterias gram negativas sobre gram positivas, HMA:Hsap= cociente HMA

sobre hongos saprobios, NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 60

Figura 17. Media (\pm error estándar) de **A.** C en biomasa microbiana, **B.** mineralización de C y **C.** coeficiente metabólico (qCO_2) en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p<0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 62

Figura 18. Media (\pm error estándar) de la actividad enzimática y actividad enzimática específica (AEE) en el suelo asociada al C y para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** β -glucosidasa (BG), **B.** lipasa (LIP), **C.** polifenol oxidasa (POX), **D.** AEE BG, **E.** AEE LIP y **F.** AEE POX. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p<0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 63

Figura 19. Media (\pm error estándar) de la actividad enzimática y actividad enzimática específica (AEE) en el suelo asociada al N y para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** N-acetil glucosaminidasa (NAG) y **B.** leucina amino peptidasa (LAP) y su respectiva actividad enzimática específica (AEE), **C.** AEE NAG, **D.** AEE LAP. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p<0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 64

Figura 20. Media (\pm error estándar) de la actividad enzimática y actividad enzimática específica (AEE) en el suelo asociada al P y para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** fosfomonoesterasa (FOS) y **B.** AEE FOS. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p<0.1$) entre los tratamientos. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 65

Figura 21. Media (\pm error estándar) de la actividad enzimática y actividad enzimática específica (AEE) en el suelo asociada al la actividad metabólica general y para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** deshidrogenasa (DHG) y **B.** AEE DHG. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p<0.1$) entre los tratamientos. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. 65

Figura 22. Difractogramas de la biomasa aérea de nopal maduro, obtenido de las parcelas NORG, Milpa Alta, Cd. Mx., México. Cada color representa las distintas formas de oxalato de Ca. 67

Figura 23. Análisis de componentes principales de las variables obtenidas de los análisis de suelo de parcelas en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Proyección de las variables en el componente 1 y 2 para **A.** variables absolutas y **B.** variables funcionales. Proyección de los casos (parcelas) en el componente 1 y 2 para **C.** variables absolutas y **D.** variables funcionales. Letras minúsculas diferentes en C y D representan diferencias significativas ($p<0.1$) entre los casos para el componente 1. En color verde oscuro se agrupan las parcelas de NORG (nopal orgánico), en color verde claro las parcelas de NCQ (nopal orgánico con control químico) y en color amarillo las parcelas de MORG (maíz orgánico). 68

Figura 24. Análisis de redundancia de los datos de estructura microbiana (variables predictoras) vs variables dinámicas de actividad enzimática, $Cmic$ y NO_3^- (variables de

respuesta). G⁺=bacterias gram positivas, G⁻=bacterias gram negativas, HMA= hongos micorrícicos arbusculares, Hsap=hongos saprobios, BG= β-glucosidasa, POX=polifenol oxidada, LIP=lipasa, NAG= N-acetil glucosaminidasa, LAP= leucin aminopeptidasa, FOS=fosfatasa y DHG=deshidrogenasa..... 70

Figura 25. Modelo de las rutas principales de formación de C inorgánico en el suelo en los agroecosistemas de nopal. H⁺=ion hidrógeno, CO₂=dióxido de carbono, H₂O=agua, Ca²⁺ ion calcio, C₂O₄²⁻=ion oxalato, H₂C₂O₄=ácido oxálico, CaC₂O₄=oxalatos de calcio, HCO₃⁻=ion bicarbonato, CaCO₃=bicarbonato de calcio..... 78

Figura 26. Modelo general del estado edáfico en los tres tipos de manejo estudiados y ubicados en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. En el modelo se muestra de lado izquierdo cuatro apartados: 1) *Propiedades físicas y químicas*, 2) *Nutrientes*, representados con letras y color, carbono (C) (gris oscuro), nitrógeno (N) (azul) y fósforo (P) (amarillo); además se muestra la distribución de COT en cada una de las fracciones obtenidas en el fraccionamiento de MOS, 3) *Actividad biológica*, representada con la actividad enzimática asociada a la despolimerización de cada nutriente y se muestra la concentración de ácidos grasos para cada grupo microbiano, y 4) *Indicadores de eficiencia metabólica*, representados por el coeficiente metabólico (qCO₂) y la actividad enzimática específica (AEE). El tamaño de letra y de las cajas indica mayor o menor valor de cada uno de los parámetros evaluados. Abreviaturas: CE= conductividad eléctrica, MOS=materia orgánica del suelo, Cinorg=C inorgánico, COT=C orgánico total, NO₃⁻=nitratos, MOPL=materia orgánica particulada libre, MOPO=materia orgánica particulada ocluida, MOAMG=materia orgánica particulada adociada a minerales gruesa (>20 μm), MOAMF=materia orgánica particulada adociada a minerales fina (<20 μm), BG=β-glucosidasa, LIP=lipasa, POX=polifenol oxidasa, NAG=N-acetil glucosaminidasa, LAP= Leucina amino peptidasa, FOS=fosfatasa, G⁻=bacterias gram negativas, G⁺=bacterias gram positivas, HMA=hongos micorrícicos arbusculares, H:B=cociente hongos sobre bacterias y Cmic=C en biomasa microbiana. 86

LISTA DE ABREVIATURAS

ACP= análisis de componentes principales

AEE= actividad enzimática específica

ANOVA= análisis de varianza

ARD= análisis de redundancia

BG= β-glucosidasa

CE= conductividad eléctrica

Cinorg= carbono inorgánico

Cmic= carbono en biomasa microbiana

Cont Cinorg= contenido de carbono inorgánico

Cont COT= contenido de carbono orgánico total

Cont N= contenido de nitrógeno

Cont P= contenido de fósforo
COS= carbono orgánico del suelo
COT= carbono orgánico total
CT= carbono total
DA= densidad aparente
DHG= deshidrogenasa
FOS= fosfomonoesterasa
G⁻= bacterias gram negativas
G⁺= bacterias gram positivas
GEI= gases de efecto invernadero
HMA= hongos micorrícicos arbusculares
Hsap= hongos saprobios
K= conductividad hidráulica
LAP= leucina aminopeptidasa
LIP= lipasa
MAC= metabolismo ácido de las crasuláceas
MO= materia orgánica
MOS= materia orgánica del suelo
MOP= materia orgánica particulada
MOPL= materia orgánica particulada libre
MOPO= materia orgánica particulada ocluida
MOAM= materia orgánica asociada a minerales
MOAMF= materia orgánica asociada a minerales de tamaño fino
MOAMG= materia orgánica asociada a minerales gruesa de tamaño grueso
MORG= maíz orgánico
NAG= N-acetil glucosaminidasa
NCQ= nopal con control químico
NORG= nopal orgánico
NO₃⁻= nitratos
NT= nitrógeno total
PLFA= análisis de ácidos grasos de fosfolípidos

POX= polifenol oxidasa

PT= fósforo total

Pg= petagramo

qCO₂= coeficiente metabólico

UTO= unidad taxonómica operacional

WCFA= análisis de ácidos grasos de célula completa

RESUMEN

El carbono (C) edáfico tiene dos componentes: el C inorgánico (Cinorg) y el C orgánico o también denominado materia orgánica del suelo (MOS). El primero se refiere a carbonatos y bicarbonatos, los cuales son relevantes en ecosistemas áridos y semiáridos. El segundo se encuentra en forma de residuos de plantas, animales y microorganismos, y es la base para sostener la fertilidad en los agroecosistemas. Sin embargo, las prácticas de manejo agrícola modifican la dinámica de este C edáfico, así como la actividad microbiana del suelo.

Al sur de la Ciudad de México (Cd. Mx.) en la alcaldía Milpa Alta, los sistemas de producción agrícola más frecuentes son los de nopal y maíz. No obstante, la dinámica agrícola y el estado edáfico de estos sistemas es poco conocida. Por esta razón, el objetivo general de este trabajo fue evaluar el C edáfico y la actividad microbiana del suelo en diferentes tipos de manejo en agroecosistemas tradicionales del sur de la Cd. Mx. Para la dinámica agrícola se analizó la dinámica agrícola de la alcaldía de Milpa Alta, a partir del análisis de bases de datos agrícolas y climáticos de la SIAP-SADER y SMN-CONAGUA, respectivamente. Posteriormente, se evaluó el efecto del tipo de manejo sobre el C edáfico y la actividad microbiana en las condiciones más comunes de manejo de los agroecosistemas de nopal y maíz en la región de Villa Milpa Alta, los cuales fueron: agroecosistemas de maíz (MORG) con labranza y poca fertilización con estiércol, y agroecosistemas de nopal, sin labranza, fertilizados en grandes cantidades con estiércol, pero con diferente control de arvenses: mecánico (NORG) y químico (NCQ).

En cada tipo de manejo se seleccionaron tres parcelas y se tomaron muestras de suelo a 15 cm de profundidad para formar una muestra compuesta. En el laboratorio se determinó: textura, humedad, densidad aparente (DA), conductividad eléctrica (CE) e hidráulica (K), pH, concentración total de C orgánico (COT), C inorgánico (Cinorg), nitrógeno (NT) y fósforo (PT), fraccionamiento por densidad de la MOS, análisis de ácidos grasos de célula completa (WCFA), mineralización potencial de C, C en biomasa microbiana (Cmic) y actividad de enzimas asociadas a la despolimerización de C, N y P. Con estos datos, se obtuvieron indicadores de la eficiencia metabólica de la comunidad microbiana: la actividad enzimática específica (AEE) y el coeficiente metabólico (qCO_2).

Con base en el análisis de la dinámica agrícola, se encontró que, en Milpa Alta, los cultivos dominantes de 2010 a 2019 fueron el nopal, el maíz y la avena. Sin embargo, se observó una reducción gradual de la superficie sembrada y del volumen y valor de la producción. Así también, que esta disminución no tiene relación con las condiciones climáticas, lo cual sugiere que la dinámica agrícola está influida por determinantes sociales y económicas de la región. Con la caracterización en laboratorio, se observó que en los suelos de los agroecosistemas de nopal están ocurriendo procesos que dan lugar a la formación de carbonatos secundarios. Además, independientemente de la forma de manejo de arvenses, estos mismos sistemas presentaron menor DA, mayor humedad, pH, K, CE y concentración de nutrientes en comparación con MORG. En el caso del fraccionamiento de MOS, se observó que en MORG el 80% del COT se distribuyó en la fracción de materia orgánica asociada a minerales (MOAM), mientras que en los agroecosistemas de nopal fue el 50%. En estos últimos sistemas hubo mayor eficiencia metabólica de la comunidad microbiana en cuanto al uso de recursos, y mayor actividad enzimática, mineralización e inmovilización de C. Por otro lado, la estructura de la comunidad microbiana fue modificada en NCQ ya que la biomasa de hongos y bacterias fue menor, y además se registró mayor actividad de las enzimas asociadas al uso del N.

Los datos sugieren que el tipo de manejo de los suelos en los agroecosistemas promueve cambios en las fracciones de la MOS, en la concentración de nutrientes y en la estructura, actividad y eficiencia microbiana. Esto ocasiona que la dinámica del C sea contrastante entre los sistemas, y que incluso se desvíe de lo esperado en suelos de origen volcánico, como lo es: la formación de carbonatos secundarios (presumiblemente biogénicos) y condiciones de alcalinidad en los suelos bajo cultivo de nopal. Con base en este trabajo, se puede plantear que el entendimiento de la dinámica agrícola en conjunto con la caracterización del estado edáfico en los agroecosistemas de Villa Milpa Alta es relevante, ya que brinda información de cómo la producción ha cambiado durante la última década y de cómo el tipo de manejo impacta las propiedades edáficas. Esto puede ser utilizado para establecer estrategias para mantener o mejorar la producción agrícola de la región y ampliar el entendimiento del ciclo del C en agroecosistemas periurbanos de la Cd. Mx.

ABSTRACT

Edaphic carbon (C) has two components: inorganic C (C_{inorg}) and organic C, also called soil organic matter (SOM). The first refers to carbonates and bicarbonates, which are relevant in arid and semi-arid ecosystems. The second is derived from in plant, animal, and microorganism residues and is the basis for sustaining fertility in agroecosystems. However, agricultural management practices modify the dynamics of this edaphic C and soil microbial activity.

Nopal and maize are the most common agricultural production systems in the Milpa Alta, south of Mexico City. However, these systems' agricultural dynamics and edaphic status are poorly known. For this reason, the objective of this work was to evaluate edaphic C and soil microbial activity under different types of management in traditional agroecosystems in southern Mexico City. For this purpose, the agricultural dynamics of the Milpa Alta district were analyzed based on the agricultural and climatic databases of SIAP-SADER and SMN-CONAGUA, respectively. Subsequently, the effect of the type of management on edaphic C and microbial activity was evaluated in the most common management conditions of nopal and maize agroecosystems in the Villa Milpa Alta district, which were: maize agroecosystems (MORG) with tillage and little fertilization with manure, and nopal agroecosystems, without tillage, fertilized in large quantities with manure, but with different weed control: mechanical (NORG) and chemical (NCQ).

We selected three plots for each type of management. We took five soil samples in each plot at a depth of 15 cm to form a composite sample. In the laboratory, we determined: texture, moisture, bulk density (DA), electrical conductivity (CE), hydraulic conductivity (K), pH, total organic and C concentration (COT), inorganic C (C_{inorg}), nitrogen (NT), and phosphorus (PT), MOS density fractionation, whole-cell fatty acid analysis, potential C mineralization, C in microbial biomass (C_{mic}) and enzyme activity associated with C, N and P depolymerization. With these data, we obtained indicators of the metabolic efficiency of the microbial community: specific enzyme activity (AEE) and metabolic coefficient (qCO₂).

Based on the analysis of agricultural dynamics, we found that in Milpa Alta, the crops dominate from 2010 to 2019 were nopal, maize and oat. However, a gradual reduction in the

area planted and, the volume, and value of production was observed. Also, this decrease is not directly related to climatic conditions, suggesting that the dynamics are influenced by social and economic determinants of the region. With the laboratory characterization, we observed that processes that lead to the formation of secondary carbonates are occurring in the soils of the nopal agroecosystems. In addition, regardless of the control of weeds, these same systems presented lower DA, higher moisture, pH, K, CE, and nutrient concentration than MORG. In the case of SOM fractionation, we observed that in MORG, 80% of the COT was distributed in the fraction of organic matter associated with minerals (MOAM). At the same time, in the nopal agroecosystems, it was 50%. In addition, we determined that in these systems, there was more significant enzymatic activity, mineralization, C immobilization, and metabolic efficiency of the microbial community in terms of resource use. On the other hand, the microbial community structure was modified in NCQ since the biomass of fungi and bacteria was lower, and there was higher activity of enzymes associated with N use.

The data suggest that soil management in agroecosystems promotes changes in SOM fractions, nutrient availability, microbial structure, activity, and efficiency. This cause contrasting C dynamics between the systems and even deviates from what we expected in soils of volcanic origin, such as the formation of secondary carbonates (presumably biogenic) and alkalinity conditions in soils under nopal cultivation. Based on this work, we suggest that understanding agricultural dynamics in conjunction with the characterization of the edaphic state in the agroecosystems of Villa Milpa Alta is crucial since it provides information on how production has changed during the last decade and how the management impacts edaphic properties. We can use this information to establish strategies to maintain or improve agricultural production in the region and to broaden the understanding of the C cycle in the peri-urban agroecosystems of Mexico City.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Carbono edáfico

A nivel global, el carbono (C) se almacena en cinco grandes almacenes están en constante interacción entre sí y son: oceánico (38 000 Pg C), geológico (5 000 Pg C), biótico (560 Pg C), atmosférico (760 Pg C) y pedológico o edáfico (2 500 Pg C). Este último se constituye de: carbono inorgánico y carbono orgánico (Lal, 2004).

1.1.1. Carbono inorgánico del suelo

El carbono inorgánico del suelo (Cinorg) se refiere a todo aquel C que se encuentra en el suelo en forma de carbonatos y bicarbonatos. Su almacén en las regiones áridas se estima en 700 – 1 700 Pg C a 1 m de profundidad, mientras que en zonas templadas ha sido poco estudiado (Lorenz y Lal, 2018). De manera general, los carbonatos son clasificados de acuerdo con su origen en: carbonatos primarios o litogénicos, 2) carbonatos secundarios o pedogénicos y 3) carbonatos secundarios biogénicos (Lal et al., 2015; Zamanian et al, 2016; An et al., 2019, Zamanian et al., 2021). Los carbonatos primarios o litogénicos se originan del material parental de la roca madre (calizas, por ejemplo). Los carbonatos secundarios o pedogénicos se originan durante la formación del suelo a través de reacciones de disolución y precipitación de carbonatos primarios, aunque también se forman por reacciones entre el CO₂ disuelto y cationes (Ca²⁺ y Mg²⁺) que dan lugar a la formación de carbonatos y bicarbonatos (Bronick y Lal, 2005; Lal et al., 2015). Finalmente, los carbonatos biogénicos se forman a partir del CO₂ producto del metabolismo de plantas y microorganismos (He et al., 2014).

1.1.2. Carbono orgánico del suelo: funciones y su conceptualización en fracciones

El carbono orgánico del suelo (COS) se encuentra en residuos de plantas, animales y microorganismos en varias etapas de descomposición. En conjunto también es denominado como materia orgánica del suelo (MOS) y su almacén se estima en 1 500 – 3 000 Pg C (Lal et al., 2015; Lorenz y Lal, 2018). En los ecosistemas, esta MOS se involucra en diversas funciones como la retención de humedad, formación y estabilidad de agregados, capacidad de amortiguamiento e intercambio catiónico, almacenamiento y liberación de nutrientes. Esto

último es crítico para el mantenimiento de la actividad biológica del suelo y del crecimiento de las plantas (Krull et al., 2004).

Por estas razones, la MOS es considerada como la base para la fertilidad física, química y biológica de los suelos y es un indicador clave en el entendimiento de la dinámica de los ecosistemas. Sin embargo, esta estrecha relación con diversos procesos en el suelo es lo que le confiere también mayor complejidad para su estudio. En este contexto, diversos autores proponen la separación de la MOS en múltiples componentes con el fin de poder contrastar y comprender su dinámica. Por ejemplo, Lavallee et al. (2020) sugieren que la mejor forma de separar la MOS es en dos fracciones: la materia orgánica particulada (MOP) y la materia orgánica asociada a minerales (MOAM), las cuales presentan características distintas y será la conceptualización que se usará en el desarrollo de la presente tesis (Figura 1).

La MOP se constituye en su mayor parte por fragmentos ligeros ($53 - 2\ 000\ \mu\text{m}$) relativamente poco descompuestos y puede subdividirse en dos subconjuntos: la MOP libre (MOPL) y la MOP ocluida (MOPO). Estas fracciones, a pesar de que requieren mayor inversión de energía para su descomposición, son las más susceptibles al ataque microbiano debido a su baja protección en el suelo. En el caso de la MOPL no presenta ningún mecanismo de protección, mientras que la ocluida, como su nombre lo dice, es aquella que se encuentra ocluida dentro de agregados (generalmente macroagregados), los cuales les confieren cierta protección física frente a los microorganismos (Lavallee et al., 2020).

La MOAM está conformada por moléculas o fragmentos microscópicos ($< 53\ \mu\text{m}$) de material orgánico de origen vegetal (p. ej. exudados) o microbiano con un mayor grado de descomposición. Su menor tamaño le permite establecer interacciones fisicoquímicas con la parte mineral del suelo (p. ej. arcillas), tales como la encapsulación en microagregados e interacciones electrostáticas. Estas interacciones le confieren mayor protección ante el ataque microbiano y, por ende, presenta mayor tiempo de residencia en el suelo. Sin embargo, cambios ambientales pueden desestabilizarla y ponerla disponible para los microorganismos. Finalmente, y al igual que la MOP, esta fracción puede dividirse en varias fracciones de acuerdo al tamaño de partículas de interés (Lavalle et al., 2020).

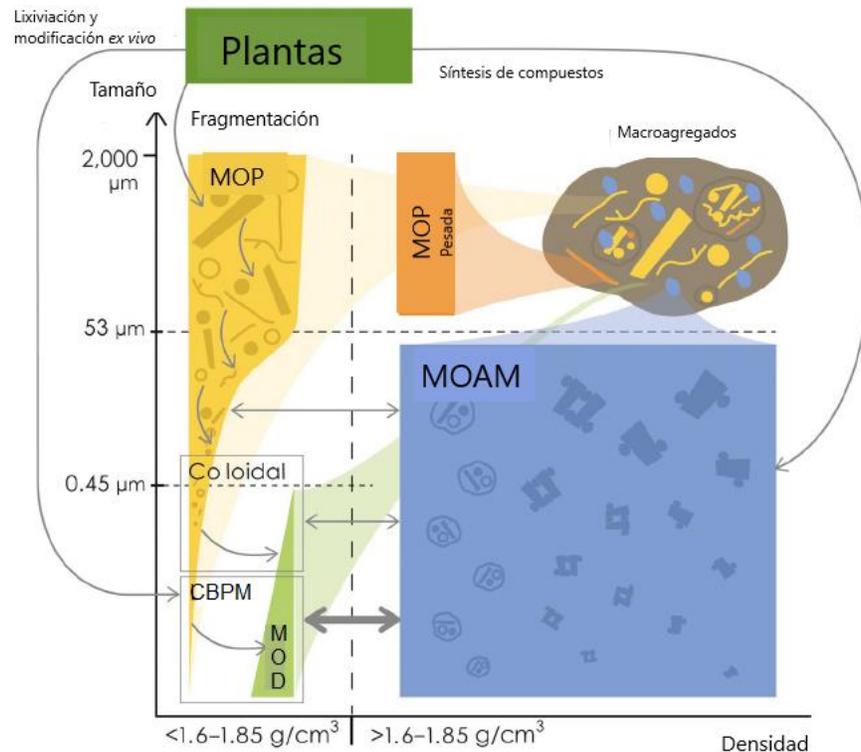


Figura 1. Modelo de la conceptualización de las fracciones de la MOS. Las fracciones son físicamente definidas en el eje x por la densidad en g cm^{-3} y en el eje y por el tamaño en μm . MOP=materia orgánica particulada, MOAM= materia orgánica asociada a minerales, CBPM= compuestos de bajo peso molecular, MOD= materia orgánica disuelta (Imagen obtenida y traducida de Lavallee et al., 2020).

1.2. Materia orgánica del suelo en agroecosistemas anuales y perennes

En ecosistemas naturales, los aportes de materia orgánica (MO) al suelo provienen de fuentes nativas, por ejemplo, en sistemas forestales el mantillo aporta aproximadamente el 75% de la MOS (Ondrasek et al., 2019). Su almacenamiento en estos sistemas depende de factores como: la composición de especies vegetales, el clima, las condiciones fisicoquímicas del suelo y de la actividad y heterogeneidad de la comunidad microbiana (Galicía et al., 2016). Estas dos últimas son relevantes, ya que determinan el grado, tiempo de descomposición y permanencia de la MOS (Schmidt et al., 2011).

Sin embargo, el cambio de uso de suelo y las prácticas agrícolas han modificado la dinámica, calidad y cantidad de MOS en los suelos. Se tiene reportado que, como consecuencia del cambio de uso de suelo, se puede perder más del 50% del carbono orgánico del suelo (COS) (Lal, 2018) y específicamente, en agroecosistemas, definidos como una

multiplicidad de arreglos agroproductivos asociados a un entorno social y ecológico, el contenido de MOS puede llegar a ser menor al 1%. Aunado a esto, generalmente en estos sistemas existe poco aporte de MO al suelo, debido a que se retira la biomasa aérea y subterránea durante la cosecha o durante la preparación del terreno (Cotler et al., 2016; Ondrasek et al., 2019). Debido a esta situación de pérdida de MOS en agroecosistemas, se han establecido iniciativas internacionales como la iniciativa “4 por mil” y la *RECSOIL: recarbonization of global soils*, en las que se plantea la posibilidad de aumentar el COS en sistemas agrícolas, pecuarios y forestales para mitigar el efecto de la emisión de CO₂ a la atmósfera (Minasny et al., 2017; ONUAA, 2020).

Por otro lado, todas estas modificaciones en la MOS están influenciadas por el tipo de manejo agrícola y por el tipo de agroecosistema. Estos últimos, se clasifican de manera general en tres tipos: i) los enfocados a producción agrícola, ii) los enfocados a producción ganadera y iii) los mixtos. Dentro del primer tipo, se encuentran los agroecosistemas anuales y los agroecosistemas perennes (Hart, 1985). Los agroecosistemas anuales, son aquellos cultivos con un período vegetativo menor a 12 meses, y que requieren de una nueva siembra para la obtención de cosecha (SADER, 2019). Se caracterizan por tener un manejo convencional que incluye la perturbación física de suelo (labranza), uso de agroquímicos y la remoción de la biomasa aérea y subterránea. Ejemplos de este tipo de agroecosistemas son los agroecosistemas de trigo, frijol, avena y maíz. En el caso del maíz, diversos estudios mencionan que, a largo plazo, el manejo convencional de este cultivo tiene como consecuencia la pérdida de MOS, y que solamente con adición de fertilizantes orgánicos y con la disminución de la perturbación física del suelo se observa un aumento de la MOS (Asenso et al., 2019; Balík et al., 2020; Lal, 2020).

En contraparte, los agroecosistemas perennes son cultivos con un periodo vegetativo que se extiende más allá de un año, y que una vez establecida la plantación no es necesario realizar nuevas siembras. Ejemplos de este tipo de agroecosistema son pastizales, árboles frutales y cultivos del género *Opuntia*. Estos agroecosistemas se caracterizan por la remoción parcial de biomasa aérea y presentan baja o nula perturbación física (SADER, 2019). En cultivos perennes de pastizales (Beniston et al., 2014), alfalfa (Niu et al., 2020) y de *Opuntia*

ficus-indica (Bautista-Cruz et al., 2017) las concentraciones de COS son mayores (entre un 10 – 35%) en comparación con cultivos anuales.

1.3. Modificación de las propiedades edáficas en agroecosistemas perennes y anuales como consecuencia del manejo

El manejo agrícola modifica la estructura del suelo, fracciones de MOS, disponibilidad de nutrientes y actividad microbiana (Liu et al., 2006; Bai et al., 2018). Según McLaughlan (2006) y Crew y Rumsey (2017) estas modificaciones se dan por lo menos por tres mecanismos descritos a continuación:

a) Perturbación física del suelo

La perturbación física del suelo se define como toda aquella práctica que puede modificar la estructura del suelo. Esta se da por prácticas como la labranza manual o mecanizada, más comunes en agroecosistemas anuales. En estos últimos, la labranza promueve la pérdida de la estructura y agregación del suelo, altera la infiltración y retención de agua, el intercambio de gases con la atmósfera y la dinámica de la MOS, lo cual impacta el crecimiento y desarrollo de las plantas. En diversos estudios se menciona que la disminución en la perturbación física del suelo es una práctica que favorece considerablemente la estructura del suelo, al permitir la formación y estabilización de agregados (Littrell et al., 2021; Mondal y Chakraborty, 2021; da Silva et al., 2021).

Aunado a esto, se sabe que la perturbación física es el proceso principal por el cual la MOS se pierde en agroecosistemas anuales, debido a que el rompimiento de los agregados favorece que la MOS quede expuesta a procesos de mineralización por acción de los microorganismos (Plaza et al., 2013; Crew y Rumsey, 2017). Como consecuencia de lo anterior, también las fracciones de la MOS son modificadas, por ejemplo, la fracción particulada disminuye en el suelo debido a que es la más susceptible a cambios por el manejo agrícola (Liu et al., 2006). En agroecosistemas perennes, donde la perturbación del suelo es baja o nula, los procesos de mineralización de MOS son más lentos y son favorecidos los procesos de almacenamiento de MOS (Milne y Haynes, 2004; Crew y Rumsey, 2017). Littrell et al. (2021) mencionan que la no labranza en conjunto con la adición de fertilizantes

orgánicos favorece la acumulación de COS, mientras que Varvel y Wilhelm (2010) observaron que el tratamiento con no labranza favorece el aumento en la concentración de COS en comparación con otros sistemas de labranza.

La labranza también puede tener un impacto en las propiedades biológicas, aunque sus impactos han sido menos estudiados. Por ejemplo, Nivelles et al. (2016) encontraron que la no labranza en asociación con otras prácticas agrícolas como los cultivos de cobertura aumentan el contenido de C y la actividad exoenzimática de los microorganismos del suelo.

b) Fertilización

La fertilización es una de las prácticas más comunes para aumentar la productividad de los agroecosistemas. La aplicación de fertilizantes orgánicos tiene efectos positivos en las propiedades del suelo en comparación con la fertilización inorgánica. Por ejemplo, la fertilización con estiércol aumenta el contenido de MOS (Kaur et al., 2008; Lima et al., 2009; Ludwig et al., 2010; Tian et al., 2017) y de sus respectivas fracciones (Cookson et al., 2005; Gong et al., 2009), aumenta la concentración de nutrientes como C, N y P, además de que suple de nutrientes fácilmente asimilables para la comunidad microbiana (Triberti et al., 2008; Zavatarro et al., 2017). Sin embargo, si su aplicación se hace con poca frecuencia, los efectos a largo plazo pueden ser poco consistentes; y si se realiza de forma inadecuada (frecuencia y dosis), incluso podría incentivar procesos de pérdida de nutrientes y MOS por mecanismos de pulsos de entrada de MO fácilmente mineralizable por la comunidad microbiana (*priming effect*), y generar que los sistemas funcionen como emisores netos de gases de efecto invernadero (GEI) (Zavatarro et al., 2017).

En el caso de agroecosistemas de maíz, la adición de estiércol incrementa considerablemente el COS (Liang et al., 2012; Tian et al., 2017), la disponibilidad de N, P y K (Miner et al., 2020; Mei et al., 2020), la biomasa microbiana (Liang et al., 2012) y modifica la composición de la comunidad microbiana al aumentar la abundancia de bacterias y hongos (Tian et al., 2017). Con respecto a los agroecosistemas perennes, el estudio de De León-González et al. (2017) es uno de los pocos estudios dónde se analizan cultivos de *Opuntia* spp. El trabajo consistió en analizar seis tipos de sistemas de manejo: i) suelo forestal, ii) monocultivo de maíz con labranza convencional y fertilización, iii) maíz con menos de 4

años de barbecho y sin control de malezas y iv) cultivo de nopal con y sin adición de estiércol. En cada sistema se midieron pulsos de flujo de CO₂ y se determinó el carbono orgánico total (COT). Como resultados encontraron que, en los campos de maíz, las emisiones fueron inestables con varios picos de respiración, mientras que el cultivo de nopal presentó valores de COT de 60 mg g⁻¹ y emisiones de CO₂ semejantes al del suelo forestal. Por otro lado, Bautista-Cruz et al. (2017) compararon el impacto de la conversión de bosques en campos de maíz (*Zea mays*) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) con diferente manejo agrícola sobre el COS, la biomasa microbiana y la actividad enzimática. Como resultado se reporta que la conversión de bosques a campos de maíz disminuye el COS en más del 60%. Sin embargo, el cambio de uso de suelo de sistemas forestales a cultivos de nopal mantuvo el contenido de COS cercano a los valores observados en el bosque original (64 g kg⁻¹) y aumentó la biomasa microbiana y actividad de la enzima β -glucosidasa.

c) Uso de agroquímicos

Los agroquímicos se usan principalmente para aumentar y eficientizar la producción agrícola al eliminar cualquier tipo de plaga que afecte el cultivo. Sin embargo, su uso inadecuado contribuye a la degradación del suelo, debido a que son una fuente de contaminación. Su uso también tiene un gran impacto en las funciones del suelo, como el ciclaje de nutrientes, ya que modifica propiedades edáficas como el pH, la concentración de nutrientes y la actividad de los microorganismos (Mandal et al., 2020).

En algunos estudios, la disponibilidad de nutrientes en el suelo, como el N, P y K disminuye como consecuencia de la adición de pesticidas. Los efectos de los agroquímicos en los microorganismos están relacionados con la modificación en el metabolismo de estos. Por ejemplo, su adición modifica la biomasa microbiana, la dominancia y diversidad grupos microbianos como los hongos y las bacterias (Mandal et al., 2020). Así mismo, promueve o inhibe la actividad de varios grupos de enzimas como las hidrolasas, oxidorreductasas, deshidrogenasas, entre otras. Lo anterior tiene repercusiones en los procesos biogeoquímicos que involucran la transformación y uso de nutrientes, ya que estos dependen en gran medida del metabolismo de la comunidad microbiana (Malik et al., 2017; Mandal et al., 2020; Meena et al., 2020).

Por otro lado, a pesar de que se ha demostrado que algunas prácticas agrícolas, como la labranza de conservación, los cultivos perennes y la fertilización orgánica mejoran la cantidad y permanencia de la MOS, así como otras propiedades edáficas (Magdoff y Weil, 2004; Crew y Rumsey, 2017), estas no responderán de la misma forma en todos los agroecosistemas, ya que dependen de las condiciones climáticas, edáficas y del tipo de cultivo (Lal et al., 2015; Lehmann y Kleber, 2015). Por estas razones, es necesario estudiar los agroecosistemas desde un enfoque holístico, donde se incluya la evaluación de parámetros socioeconómicos y biogeoquímicos. Todo esto permitirá evaluar el impacto de las prácticas agrícolas sobre las propiedades edáficas, y a su vez, permitirá establecer estrategias de manejo que busquen el mejoramiento de los servicios que proveen estos sistemas de producción agrícola.

1.4. Descripción del manejo de los agroecosistemas anuales y perennes representativos de Milpa Alta, Cd. Mx.

1.4.1. Características del cultivo de nopal

El nopal comestible, también denominado nopalito o nopal verdura, perteneciente al género *Opuntia*, es un cultivo representativo de México, país que es su principal productor y consumidor en el mundo (Maki-Díaz et al., 2015). La Cd. Mx. a pesar de ser el estado de menor superficie en el país, es el segundo productor más importante de nopal a nivel nacional, después del estado de Morelos. La zona productora de nopal en la Cd. Mx. se distribuye principalmente en la alcaldía de Milpa Alta, ubicada al sureste de la ciudad, y en donde la introducción del cultivo data del año de 1938 (SADER, 2019). En esta región, se cultiva la especie *Opuntia ficus-indica* variedad Milpa Alta, que es una de las más importantes por los volúmenes de producción (Osorio-Córdoba et al., 2011). Para el año 2019 se registró una superficie de cultivo de nopal de 2 655 ha y un volumen total anual de producción de 224 000 t con un valor de 748 millones de pesos mexicanos (SIAP, 2019). Por lo que, económicamente es una fuente importante de ingresos para la alcaldía y específicamente para los productores de la región, y que incluso se utiliza en la fabricación y comercialización de medicina tradicional y cosmetológica. Además, es utilizado como forraje para los animales y es una fuente de alimento para las personas (SADER, 2019).

1.4.1.1. Tipo de fotosíntesis

Los nopales son plantas suculentas capaces de acumular grandes cantidades de agua en períodos cortos de tiempo. Presenta cladodios, que son estructuras de tipo tallo encargadas de llevar a cabo la fotosíntesis y de almacenar agua, lo que los hace adecuados para el consumo humano. Presentan como mecanismo fotosintético el tipo MAC (metabolismo ácido de las crasuláceas, CAM por sus siglas en inglés), que consiste en separar temporalmente la captación y fijación de CO₂. Este último es adquirido por la planta al abrir sus estomas durante la noche, cuando las tasas de transpiración son bajas. Posteriormente, este CO₂ se une al fosfoenolpiruvato y es transformado en ácido málico. Durante el día sus estomas permanecen cerrados y es cuando se lleva a cabo el ciclo de Calvin. Este tipo de metabolismo disminuye la pérdida de agua por transpiración en un 20 – 30% en comparación con las plantas con metabolismo C₃ o C₄, y permite hacer un uso eficiente de ella (Sayed, 2001; Inglese et al., 2018; Heyduk et al., 2019).

1.4.1.2. Composición química

El nopal es 85% agua y tiene una composición química diferenciada en sus estructuras. Específicamente, los cladodios poseen una capa externa de cera constituida de cutina y una capa interna de cristales de oxalato de calcio, denominados drusas. Internamente tienen un alto contenido de polisacáridos hidocoloides (mucílago y pectina) que absorben y retienen agua. También son ricos en minerales (calcio, cobalto, cobre, potasio, magnesio, sílice, sodio, hierro, aluminio y manganeso), clorofila, aminoácidos, carbohidratos (glucosa, fructosa, arabinosa, rhaminosa, xilosa, galactosa y ácido galacturónico), polifenoles y flavonoides (isoquercetina, isorhamnetina-3-0-glucosido, nicotiflorina, rutina y narcisina) (INEGI, 2007; Maki-Díaz et al., 2015; Inglese et al., 2018).

1.4.1.3. Requerimientos ambientales

O. ficus-indica se cultiva bajo un amplio rango de ambientes, ya que está adaptado a sobrevivir en zonas con poca disponibilidad de agua (200 – 300 mm anuales) y altas temperaturas (30 – 65 °C), es decir, en zonas áridas o semiáridas (Nobel y De la Barrera, 2003; INEGI, 2007; Inglese et al., 2018). La mayor productividad del cultivo se encuentra en regiones con precipitación anual entre 400 – 800 mm, con humedad relativa superior al

40% y temperatura diurna/nocturna de 25°C/15°C. En regiones semiáridas donde hay baja humedad relativa y altas temperaturas nocturnas pueden ocasionar menor productividad o incluso la muerte de la planta (Paiva et al., 2016).

Características edáficas

El nopal puede crecer prácticamente en cualquier tipo de suelo, pero, como la mayoría de los cactus, es sensible a condiciones salinas y anóxicas por inundación del suelo. La inhibición de su crecimiento, en la mayoría de los casos tiene un comportamiento lineal con el contenido de sodio. Se ha caracterizado que el nopal es tolerante a bajos de materia orgánica y que los suelos más aptos son aquellos que tienen alta disponibilidad de calcio (Ca) y potasio (K). En el Cuadro 1 se muestran las características funcionales de la planta y los suelos con aptitud para el cultivo del nopal (Inglese et al., 2018).

Cuadro 1. Características funcionales y clases de suelo con aptitud para el cultivo de nopal (Obtenido de Inglese et al., 2018).

Características funcionales	Clases de suelo			
	Suelo muy apto	Suelo apto	Suelo menos apto	Suelo no apto
Temperatura mínima (°C)	> 3	> 3	-3 – 3	< -5
Temperatura promedio (°C)	18 – 23	15 – 18	10 – 15	< 10
Precipitación anual (mm)	> 400	> 400	200 – 400	< 100
Clase textural	Arenosa a franca	Arenosa a franca	Arcillo-limosa	Arcillo-limosa
Profundidad	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Carbonatos	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indiferente
pH en KCl	5 – 8	5 – 8	5 – 8	< 5; > 8
Materia orgánica (%)	< 0.5	< 0.6	< 0.7	< 0.8
Ca disponible	Elevado	Elevado	Medio	Insuficiente
K disponible	Elevado	Elevado	Medio	Insuficiente
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	< 2	2 – 4	4 – 7	> 7
Agua subsuperficial	Ausente	Ausente	Ausente	Presente

Respuesta a la temperatura

Opuntia ficus-indica es tolerante a altas temperaturas del aire durante el día. Sin embargo, si estas se mantienen durante la noche puede afectar su crecimiento, reducir la producción y eventualmente su valor económico. Por otro lado, las temperaturas por debajo del nivel de congelación (< 0°C), incluso por un par de horas, pueden provocar daños irreversibles al

tejido de los cladodios y del fruto (Inglese et al., 2018). La planta puede llegar a tolerar temperaturas de cladodio superiores a 60 °C, pero puede lesionarse a temperaturas de -6 °C. Su crecimiento es óptimo a temperaturas del aire diurnas/nocturnas de 25°C/15°C, respectivamente (Drennan y Nobel, 1998).

Respuesta a la disponibilidad de agua

Los nopales también están adaptados a condiciones de baja disponibilidad de agua. Sin embargo, pueden ser sensibles a periodos prologados de sequía (superiores a los tres meses). Bajo condiciones de riego suficiente, los cambios en el grosor de los cladodios están relacionados con las variaciones de la temperatura. Aunado a esto, el crecimiento de los cladodios es extremadamente sensible a la rehidratación después de periodos largos de sequía (Scalisi et al., 2016; Inglese et al., 2018).

1.4.1.4. Comunidad microbiana asociada a *O. ficus-indica*

Algunos estudios han descrito los grupos microbianos que están asociados a la especie *O. ficus-indica*. Por ejemplo, en la región semiárida de Brasil, Bezerra et al. (2012) aislaron 44 especies de hongos endófitos. Los más comunes pertenecieron a los géneros *Cladosporium*, *Acremonium*, *Monodictys*, *Penicillium* y *Phoma*. En otro estudio realizado por Gargouri et al. (2021) evaluaron la influencia del aumento de la aridez en la dinámica de las comunidades fúngicas en la rizósfera y endosfera asociada a *O. ficus-indica*. Como resultados obtuvieron que el filo más abundante en la rizósfera y en la endosfera fue Ascomycota, seguida de los Basidiomycota. Dentro de los Ascomycota, las clases más importantes fueron Eurotiomycetes, Sordariomycetes, Dothideomycetes, mientras que para los Basidiomycota la clase más importante fue Agaricomycetes. Otro resultado, fue que, a lo largo del gradiente, la diversidad alfa fue similar en la rizósfera y endosfera, pero la colonización endomicorrícica arbuscular disminuyó conforme aumentaba la aridez, además de que esta se correlacionó negativamente con la concentración de Ca^{2+} en el suelo. Algo que resaltan los autores fue que a lo largo del gradiente la estructura fúngica cambió, además de que, al aumentar la aridez, la conectividad entre las redes fúngicas fue más cohesiva.

Como estudio complementario al anterior, en la misma zona de estudio, Karray et al. (2020) evaluaron los grupos bacterianos asociados a la rizósfera y endosfera de *O. ficus-*

indica. Encontraron que los filo Actinobacteria, Firmicutes y Chloroflexi fueron más abundantes en la rizósfera, mientras que las Cianobacterias y las Proteobacterias (especialmente las clases Gammaproteobacteria y Betaproteobacteria) fueron más dominantes en la endosfera. En este mismo estudio evaluaron los cambios en la estructura bacteriana en un gradiente de aridez. Encontraron que la abundancia de Alphaproteobacteria y Actinobacteria aumentó significativamente tanto en la rizósfera como en la endosfera. Sin embargo, en la endosfera aumentaron las Betaproteobacteria y disminuyeron las Cianobacterias y Deltaproteobacterias, mientras que la rizósfera se enriqueció de Verrucomicrobia y Firmicutes y las Betaproteobacteria disminuyeron. Aunado a esto, se detectaron UTO (unidad taxonómica operacional, OTU por sus siglas en inglés) específicas en cada zona bioclimática. Estos estudios sugieren que potencialmente la aridez modifica la diversidad y composición de la comunidad microbiana en la rizósfera y endosfera.

1.4.1.5. Proceso de cultivo

El cultivo de nopal inicia con la selección del material vegetativo. Se eligen cladodios libres de plagas, enfermedades y con las mejores características morfológicas. La propagación se realiza principalmente por multiplicación asexual, es decir, se utilizan los cladodios como material reproductivo, ya que esto garantiza mantener las características de la planta madre de donde fueron extraídos. Posteriormente, se prepara el terreno a través de la remoción de maleza, rocas y con el rompimiento de los agregados. Esto con el objetivo de emparejar lo más posible el suelo y evitar encharcamientos y procesos erosivos (INEGI, 2007).

Después, se procede a realizar la siembra de los cladodios por medio de hileras con un distanciamiento de 70 cm a 1.5 m, con una distancia entre plantas de 30 a 50 cm y a una profundidad de 10 a 20 cm. La plantación se debe hacer preferentemente antes de la temporada de lluvias o durante la temporada de secas, es decir, a finales del mes de febrero y hasta abril. Esto se realiza para evitar humedad excesiva en el suelo y el desarrollo de bacterias y hongos fitopatógenos. Otro periodo en el que se puede realizar la plantación es entre los meses de agosto y septiembre, aunque no es recomendable, ya que se pueden presentar heladas tempranas y dañar a la planta. Una vez sembrados los cladodios, se hacen fertilizaciones con abono inorgánico u orgánico, los cuales se deben aplicar dos o tres meses después de la siembra (INEGI, 2007).

1.4.1.6. Sistemas de cultivo

Actualmente existen diversos sistemas de producción de nopal (Figura 2): i) nopaleras silvestres, que se refieren a todas aquellas nopaleras naturales; ii) huertos de traspatio, familiares o urbanos; iii) producción tradicional a cielo abierto, es el más utilizado en la región y surgió en la alcaldía de Milpa Alta, consiste en cultivos en hileras separadas que pueden llegar a tener una densidad de 10 000 – 40 000 plantas por ha, cabe resaltar que por ser un sistema a cielo abierto depende de las condiciones ambientales; iv) microtúneles de plástico, consiste en el uso de túneles de plástico que forman un arco en cada hilera del cultivo y que surgió como una forma de controlar los efectos de las heladas; v) invernaderos de baja tecnología, que tienen como objetivo mantener una temperatura constante de entre 10 y 30°C. Estos dos últimos sistemas son los más avanzados en la región y se usan con la finalidad de mantener la producción aún en temporada de invierno (Inglese et al., 2018; SADER, 2019).

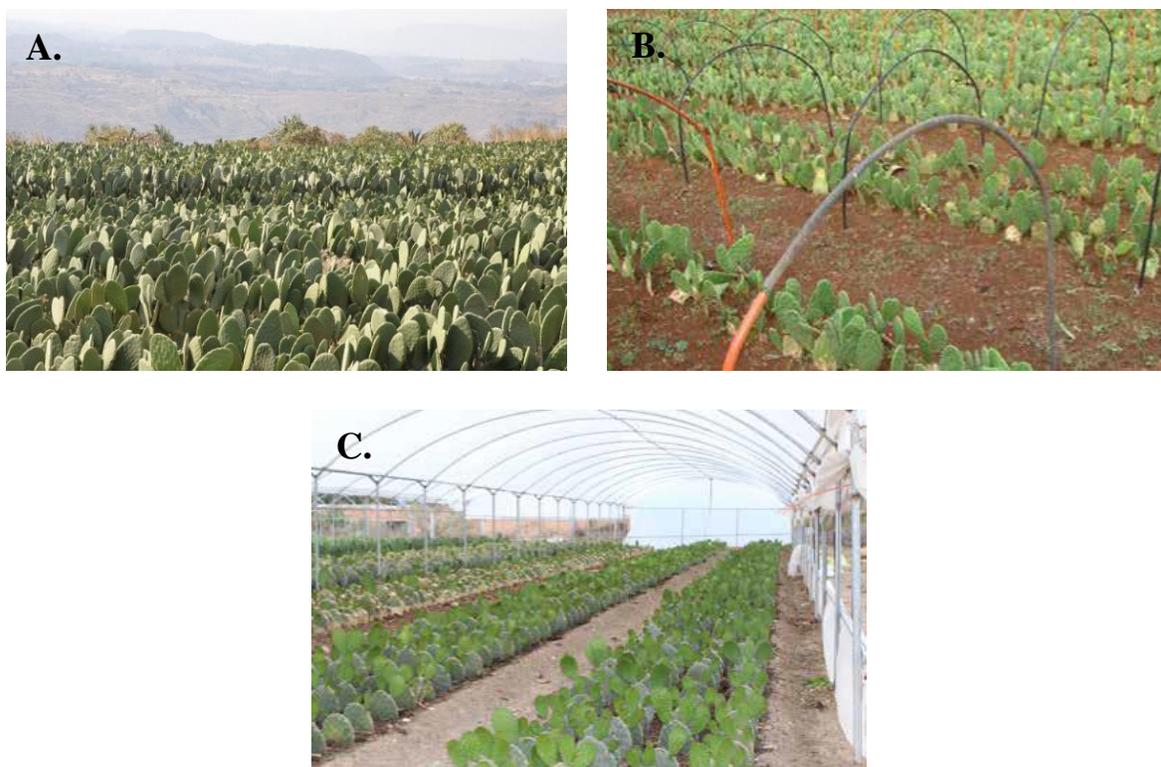


Figura 2. Sistemas de producción de nopal *Opuntia ficus-indica* en Milpa Alta, Cd. Mx. **A.** Producción tradicional a cielo abierto, **B.** Sistema de microtúneles y **C.** Sistema de invernadero (Imágenes obtenidas de Inglese et al., 2018).

1.4.1.7. Manejo agrícola

Cuidado del cultivo

Después de la siembra de los cladodios de nopal es necesario tener los cuidados en la poda y el control de malezas. En el primer caso se realizan podas para mantener una buena forma y orientación; podas de sanidad para eliminar pencas dañadas o enfermas; podas de rejuvenecimiento para eliminar o sustituir plantas viejas y podas de estimulación para promover el crecimiento de renuevos vegetativos. En el segundo caso se elimina las hierbas o malezas para permitir el desarrollo adecuado del nopal y evitar el crecimiento de plagas y desarrollo de enfermedades (INEGI, 2007).

Fertilización

Tradicionalmente, en el cultivo del nopal en Milpa Alta se utilizan fertilizantes orgánicos, como el estiércol de origen bovino y se realiza de tres formas:

- Aplicación de una capa de 10 a 40 cm de estiércol en todo el terreno. Se recomienda hacerlo para parcelas de temporal, ya que ayuda a conservar la humedad.
- Aplicación del estiércol a los lados de cada hilera de nopal. En este caso se tiene que realizar riego, ya que la humedad se conserva por menor tiempo.
- Aplicación del estiércol alrededor de cada planta.

El abono orgánico se aplica una o dos veces al año. La primera fertilización se hace antes de la temporada de lluvias, es decir, en el periodo seco-cálido que comprende los meses de marzo a mayo. La segunda fertilización se realiza después de la temporada de lluvias, es decir, en el periodo seco-frío, que comprende los meses de noviembre a enero. Sin bien, se reporta que en la región de Milpa Alta se realiza fertilización casi en su totalidad orgánica, la utilización de fertilizantes químicos también ha cobrado importancia (INEGI, 2007).

Riego

Dado que el sistema de producción más utilizado en la región de Milpa Alta es el sistema a cielo abierto, el tipo de riego que domina casi en un 99.4% es el de temporal, y el porcentaje restante recibe otro tipo de riego (INEGI, 2007).

Cosecha

La cosecha de nopal en Milpa Alta se realiza todos los meses del año y consiste en cortar los nuevos brotes cuando han alcanzado el tamaño adecuado que demanda el consumidor. El tamaño puede ser variable, con una longitud de 9 a 30 cm, aunque el tamaño regular es de 20 a 25 cm con un peso de 90 a 100 g (INEGI, 2007).

Control de enfermedades

Se conocen varias plagas y enfermedades típicas del cultivo de nopal, las cuales afectan el desarrollo de la planta, causan debilitamiento e incluso la muerte (Palomares-Pérez et al., 2015). En el Cuadro 2 se muestran las principales plagas y enfermedades asociadas al cultivo de nopal en la región de Milpa Alta.

Cuadro 2. Principales tipos de plagas y enfermedades asociadas al cultivo de nopal (INEGI, 2007).

Plaga	Daños	Control
<i>Metamasius spinolae</i> Gyllenhal (Picudo barrenador)	Dentro de la planta y durante su crecimiento se alimenta de las pencas o cladodios. Genera secreciones gomosas y provoca deformaciones y disminución de los brotes vegetativos. Las heridas pueden dar entrada a bacterias y hongos.	Se procura mantener libre de maleza la plantación. Se extraen las larvas o se cortan las pencas afectadas. Se recomienda no tener plantas de más de 10 años, ya que son más propensas al ataque de este insecto. Se quitan mecánicamente a las hembras mediante un barrido con un cepillo con cerdas firmes.
<i>Dactylopius coccus</i> (Grana-Cochinilla)	Las hembras hacen orificios en la planta lo que ocasiona debilitamiento y en ocasiones la muerte.	Se utilizan control biológico con sus depredadores naturales, por ejemplo: <i>Chilocorus cacti</i> , <i>Hyperaspis trifurcata</i> y <i>Laetilia</i> sp. Se utiliza control químico con insecticidas organofosforados como clorpirifos y dimetoato.
<i>Hesperolabops nigriceps</i> Reuter (Chinche roja y gris)	Succionan la savia del nopal, lo que provoca pústulas resacas y ásperas de diferentes tamaños, lo que ocasiona que disminuya la fotosíntesis y la aparición de nuevos brotes. Esta plaga es de gran importancia para la zona, ya que provoca pérdidas económicas.	Se mantiene libre de malezas la plantación. Se revisan las pencas y se eliminan aquellas con síntomas. Se utilizan productos a base de extractos vegetales, como: Contracar y Bug Clean.

Enfermedades	Daños	Control
<i>Pseudocercospora opuntiae</i> Ayala-Escobar, Braun & Crous (Mancha negra)	Aparición de manchas que atraviesan la penca y forman agujeros, los cuales provocan la pérdida de fuerza de la planta y la muerte.	Se realizan podas de ventilación y sanitarias. En las primeras apariciones de las manchas es recomendable quemar totalmente las plantas afectadas. Con poca incidencia, se recomienda realizar aplicaciones preventivas de productos a base de cobre. Con incidencia fuerte, se aplican productos a base de benomil + captan en dos ocasiones a intervalos de 20 días.
<i>Alternaria</i> sp. y <i>Ascotricha</i> sp. (Mal del oro)	Las pencas se vuelven amarillentas. Afecta principalmente a pencas maduras. Provocan una disminución en el número de brotes.	Se realizan podas y se destruyen las pencas afectadas. Se aplican productos a base de cobre, captan, mancozeb, clorotalonil, entre otros.
<i>Erwinia carotovora</i> subsp <i>carotovora</i> (Putridión suave)	Las pencas se vuelven suaves, viscosas y oscuras; con exudados rojo-amarillentos y con un olor desagradable.	Se realizan podas y destruir las pencas afectadas. Se aplican productos a base de cobre en el periodo de invierno primavera.

1.4.2. Características del cultivo de maíz

El maíz (*Zea mays*) es una planta de la familia de las gramíneas que se cultiva a lo largo del territorio nacional. Es considerado el cultivo más importante del país por su relevancia a nivel alimentario, político, económico y social. Es uno de los principales cultivos de temporal de la región agrícola de la Cd. Mx., en la que se siembran alrededor de 23 variedades de maíz y se producen 3 733 t al año. Su producción, que en su mayor parte es de pequeña escala y de autoconsumo, se centra al sur de la ciudad, en la que tan solo la alcaldía de Milpa Alta cuenta con 2 397 productores (GOB CDMX, 2016; SADER, 2020). En esta última se tiene registrado que para el año 2019 presentó una superficie sembrada de 1 328 ha y un volumen de producción de 1 278 t con un valor de aproximadamente 7.1 millones de pesos mexicanos (SIAP, 2019).

1.4.2.1. Tipo de fotosíntesis

El 90% de las plantas presentan fotosíntesis C₃, en el que el CO₂ atmosférico se fija directamente mediante el ciclo de Calvin a través de la enzima Rubisco. Pero existen plantas con fotosíntesis C₄ como el maíz, que han desarrollado adaptaciones anatómicas y bioquímicas que concentran el CO₂ internamente antes de ser fijado. La fotosíntesis C₄ se caracteriza porque la captación y fijación del CO₂ ocurren en células de la hoja espacialmente diferentes (y se diferencia de la fotosíntesis MAC, porque estas hacen una separación temporal). En la mayoría de las especies de C₄, la captación de CO₂ se da en las células del mesófilo, mientras que la fijación se da en células de la vaina. Esto permite una fijación eficiente del C en condiciones donde el CO₂ es limitante (Sage, 2004; Heyduk et al., 2019).

1.4.2.2. Requerimientos ambientales

Características edáficas y climáticas

El maíz se adapta a todo tipo de suelo, pero su desarrollo es mejor en suelos con texturas franco-limosas, franco-arcillosas y franco-arcillo-limosas, con pH entre 5.5 a 7.5, una profundidad de 1 m, con buen drenaje y ricos en materia orgánica (CONACYT, 2019). La temperatura óptima para su desarrollo es de 18 a 24 °C y requiere una precipitación media anual de 700 a 1 300 mm (SAGARPA, 2017; CONACYT, 2019).

1.4.2.3. Comunidad microbiana asociada al maíz

Las interacciones planta-microorganismo que ocurren en la rizósfera del maíz han sido ampliamente descritas debido a la importancia que tienen estos procesos en la adquisición de nutrientes y el crecimiento de la planta. Diversos estudios muestran que la rizósfera del maíz está colonizada preferentemente por los filos Proteobacteria, Bacteroidetes y Actinobacterias (Li et al., 2014b), y algunos de los géneros dominantes son *Massilia*, *Burkholderia*, *Ralstonia*, *Dyella*, *Chitinophaga* y *Sphingobium* (Li et al., 2014a).

Mehta et al. (2021) realizaron una revisión del microbioma (entendido como “el conjunto de microorganismos estrechamente relacionados con una especie de planta”) asociado al maíz y su relación con la adquisición de nutrientes, síntesis de hormonas y

bioprotección. En la endosfera predominan las Proteobacterias (Comamonadaceae, Rhizobiaceae), Bacteroidetes, Acidobacteria, Actinobacteria, Planctomycetes, Chloroflexi y Bradyrhizobiaceae. Algunos de los géneros dominantes son: *Agrobacterium*, *Rhizobium*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Pantoea*, *Pseudomonas* y *Bradyrhizobium*. En el caso de los hongos, los más dominantes son del filo Ascomycota y Basidiomycota. En los primeros dominan los géneros *Aspergillus*, *Penicillium*, *Clonostachys*, *Fusicolla*, *Geosmithia* y *Thelebolus*. En los segundos dominan los géneros *Russula*, *Wallemia*, *Cutaneotrichosporon*, *Rhodotorula*, *Trichosporon*, *Papiliotrema* y *Wallemi*, y de estos, la mayoría son de naturaleza endófito.

Por otro lado, se ha descrito que las etapas de crecimiento en el maíz son un factor que determina la composición de la comunidad microbiana en la rizósfera. Por ejemplo, Li et al. (2014a) encontraron que los géneros *Massilia*, *Flavobacterium*, *Arenimonas* y *Ohtaekwangia* fueron relativamente abundantes en las primeras etapas de crecimiento, mientras que las poblaciones de los géneros *Burkholderia*, *Ralstonia*, *Dyella*, *Chitinophaga*, *Sphingobium*, *Bradyrhizobium* y *Variovorax* fueron dominantes en etapas posteriores. Así mismo, Yang et al. (2017) determinaron y compararon la comunidad bacteriana en la rizósfera y el suelo no rizosférico. Encontraron que ambas compartían los filo de Acidobacteria, Proteobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes, Chloroflexi, Firmicutes y Gemmatimonadetes. A nivel de género, en la rizósfera se observaron cambios en las distintas etapas de crecimiento del maíz en los géneros *Burkholderia*, *Flavisolibacter* y *Pseudomonas*, y se encontraron bacterias promotoras del crecimiento como *Nonomuraea*, *Thiobacillus* y *Bradyrhizobium*, las cuales fueron más abundantes en la rizósfera que en el suelo no rizosférico. Este mismo patrón se ha observado en las comunidades fúngicas, por ejemplo, Gómez et al., (2003) encontraron que las rizósferas de plantas jóvenes de maíz parecían seleccionar el orden Pleosporales de Ascomycetes, mientras que en plantas senescentes las rizósferas se detectaron diferentes miembros de Ascomycetes y Basidiomycota.

1.4.2.4. Proceso de cultivo

Para la siembra del maíz primero se hace la preparación del terreno antes de la temporada de lluvias. Esta preparación consiste en la limpieza del terreno y en el rompimiento de terrones

hasta 25 cm de profundidad. La siembra se realiza de acuerdo con las condiciones de la región, pero generalmente se hace en dos periodos: primavera-verano (mayo a julio) y otoño-invierno (noviembre a enero). Esta se puede realizar de forma manual al depositar la semilla en los surcos, o con maquinaria, a una profundidad de 5 cm con una separación entre hileras de 60 a 80 cm y una separación entre plantas de 25 a 50 cm (SAGARPA, 2017; SIAP, 2018).

1.4.2.5. Manejo agrícola

El cultivo del maíz se realiza bajo distintos sistemas de manejo y no se tiene un registro específico de cómo es el manejo en la región de Villa Milpa Alta. Solamente se ha registrado que en algunas parcelas la fertilización es orgánica con uso de estiércol. A continuación, se describe el manejo generalizado en la Cd. Mx. (SEDEREC, s.f.).

Fertilización

Por lo general, los suelos donde se cultiva el maíz están limitados de los nutrientes necesarios para el crecimiento óptimo de la planta, por lo que es necesario la adición de fertilizantes. La fertilización generalmente se realiza según las características del suelo y de acuerdo con la etapa de crecimiento de la planta. En época de crecimiento vegetativo se recomienda usar fertilizantes ricos en N, P y K, mientras que durante la formación del grano la fertilización debe de ser mínima (GOB, 2019).

Riego y cosecha

El cultivo se realiza en condiciones de temporal, es decir, que la producción depende del comportamiento de las lluvias y de la capacidad del suelo para retener el agua (SADER, 2020). La cosecha habitualmente se hace de forma mecánica, aunque también se hace de forma manual. En la Cd. Mx. se cosecha entre los meses de agosto y diciembre (SEPI, 2016).

Control de enfermedades

Para el control de plagas y enfermedades del cultivo de maíz se emplean productos químicos comerciales, sin embargo, aunque su uso no está permitido en suelo de conservación como es el caso de la alcaldía de Milpa Alta, es un hecho que estos productos son utilizados

(SEDEREC, s.f.). Las plagas y enfermedades que están asociadas al cultivo de maíz se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Principales tipos de plagas y enfermedades asociadas al cultivo de maíz (SADER, 2020; ONUAA, s.f.).

Plaga	Daños	Control
<i>Phyllophaga</i> spp. (Gallina ciega)	En etapa larvaria es rizófaga, es decir, se alimenta de las raíces. En estado adulto consume el follaje de arbustos. El daño es la destrucción parcial o total del sistema radicular.	Realizar una labranza profunda y fertilizar adecuadamente. Se recomienda realizar muestreos antes de la siembra.
<i>Agriotes</i> spp. (Gusano de alambre)	Perforan los granos antes y durante la germinación, se alimentan del germen. En estado adulto el gusano se alimenta de las raíces.	Se recomienda el uso de algún plaguicida autorizado.
<i>Spodoptera frugiperda</i> (J.E. Smith) (Gusano cogollero)	Esta plaga causa daños en la planta, penetra el tallo y construye un túnel ascendente que causa la muerte de la planta.	Se recomienda la aplicación de plaguicidas.
Enfermedades	Daños	Control
<i>Fusarium</i> spp. y <i>Diplodia</i> spp. (Pudrición de la mazorca)	Los granos presentan cambios de coloración para posteriormente pudrirse.	Se recomienda evitar encharcamientos y sembrar variedades tolerantes a la enfermedad, además de realizar fertilizaciones adecuadas.
<i>Helminthosporium</i> spp. (Tizón de la hoja)	Hay un cambio de coloración de verde a café en las hojas. En el caso de infecciones severas las hojas pueden secarse completamente y morir prematuramente.	Se recomienda evitar encharcamientos y sembrar variedades tolerantes a la enfermedad, además de realizar fertilizaciones adecuadas.
<i>Cercospora zea maydis</i> (Mancha foliar)	Produce lesiones (rayas) que empiezan como manchas necróticas, regulares y alargadas.	El uso de variedades resistentes, la rotación de cultivos y la labranza convencional han sido recomendadas para minimizar la incidencia.
<i>Ustilago maydis</i> ("Huitlacoche")	Aparecen agallas en cualquier parte epigea de la planta. Si aparece temprano puede detener el crecimiento ocasionar la muerte de la planta.	Para prevenirla se sugiere sembrar variedades tolerantes, combatir los insectos masticadores y realizar rotación de cultivos.

2. JUSTIFICACIÓN

Aproximadamente, el 59% de la superficie de la Cd. Mx. es considerada como suelo de conservación (SC) (SEDEMA, 2016). De este, el 39% está destinado a uso agrícola y el sistema de producción más común se basa en el uso de agroquímicos y mecanización. Se ha registrado que el 49% de los productores usa fertilizantes químicos, 29% pesticidas, 36% utiliza tractores, y sólo el 21% aplica abonos orgánicos (Rendón-Trejo et al., 2017).

La alcaldía de Milpa Alta, ubicada al sur de la Cd. Mx., es la única alcaldía cuyo territorio se encuentra completamente en la categoría de SC y con una alta actividad agrícola, la cual ocupa hasta el 33% de su territorio. El 90% de su sistema de producción agrícola se realiza en parcelas de entre 0.25 a 1 ha, las cuales se encuentran bajo un régimen de agricultura de temporal, presentan un bajo nivel de tecnificación y destacan por la aplicación de prácticas de manejo más tradicionales que en el resto de la ciudad (Torres y Rodríguez, 2006; Bonilla, 2014). En la zona agrícola de Milpa Alta, dentro de su superficie sembrada dominan los cultivos anuales como el maíz (31.2%) y la avena (14.8%), y cultivos perennes de nopal (46.4%) (Cram et al., 2008; Losada, 2009). La fertilización es una práctica común y en su mayoría es orgánica (Torres y Rodríguez, 2005). La fuente de fertilizante más utilizada es el estiércol de ganado (39%), ovino (53%) y pollo (3%) (los cuales dependen en gran medida del subsidio de la alcaldía), mientras que un 5% es de fuentes inorgánicas (Tripe 17 NPK) (Losada, 2009; Bonilla, 2014; Rendón-Trejo et al., 2017).

Estas pequeñas unidades de producción agrícola deben ser visibilizadas y consideradas como agroecosistemas, ya que estos últimos se refieren a una multiplicidad de arreglos agroproductivos asociados al entorno ecológico, cultural, político y socioeconómico (Cotler y Cuevas, 2017). Sin embargo, en México es común que los suelos de los agroecosistemas experimenten problemas de degradación y pérdida de la fertilidad (hasta en 49% de las unidades de producción agrícola), directamente relacionadas con el tipo de manejo, y asociadas a la disminución de la MOS (Torres y Rodríguez, 2006).

En el caso de los cultivos anuales como el de maíz, generalmente se trabajan como sistemas convencionales, y gran parte del año los suelos de las parcelas quedan al desnudo, ya que la biomasa aérea es retirada y usada como alimento para ganado. Esto se traduce en

una pérdida constante de MOS, lo cual se refleja en la necesidad de aplicación de fertilizantes para mantener los rendimientos (Cotler et al., 2016). En el caso del nopal, que es un cultivo perenne, no se aplican técnicas agrícolas convencionales, por lo que la acumulación y permanencia de la MOS es diferente que la del maíz (Rendón-Trejo et al., 2017).

Cabe resaltar que el nivel de conocimiento con relación al estado de los agroecosistemas en Milpa alta es escaso, por lo que es importante llevar a cabo estudios como el que se presenta en esta tesis. La información generada podrá ser útil para implementar estrategias de manejo que mantengan las actividades productivas y las funciones del suelo en la región, ligadas estrechamente con el contenido de MOS.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el efecto del tipo de manejo agrícola sobre la dinámica del carbono edáfico y la actividad microbiana del suelo ante diferentes tipos de manejo en agroecosistemas tradicionales representativos de Villa Milpa Alta al sur de la Ciudad de México?

4. HIPÓTESIS

El tipo de manejo modificará el C edáfico, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana en los agroecosistemas. Sin embargo, en suelos con cultivo perenne de nopal, donde existe una baja perturbación física y una fertilización orgánica prolongada, en comparación con los suelos con cultivo anual de maíz, se espera:

- Mayor acumulación de materia orgánica y mayor concentración de nutrientes, así como una distribución diferente del C en las fracciones de la materia orgánica.
- Mayor actividad microbiana, reflejada en el incremento de la actividad enzimática y la mineralización e inmovilización de C.
- Que el estado metabólico de la comunidad microbiana sea más eficiente en cuanto al uso de recursos debido a la alta concentración de nutrientes.

5. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la respuesta del carbono edáfico y la actividad microbiana del suelo ante diferente tipo de manejo en agroecosistemas representativos en la región de Villa Milpa Alta como modelo de los agroecosistemas tradicionales del sur de la Cd. Mx.

Objetivos particulares

1. Caracterizar la dinámica ambiental y de producción agrícola de la última década de la alcaldía de Milpa Alta.
2. Cuantificar la concentración de C, N y P en el suelo de los agroecosistemas de nopal y maíz bajo distinto manejo agrícola.
3. Caracterizar la materia orgánica del suelo a partir de la distribución de C en sus distintas fracciones (particulada y asociada a minerales).
4. Determinar la actividad y el estado metabólico de la comunidad microbiana en el suelo de los agroecosistemas de nopal y maíz bajo distinto manejo agrícola.

6. METODOLOGÍA

6.1. Área de estudio

El sitio de estudio pertenece a la alcaldía de Milpa Alta ubicada al sur de la Cd. Mx. entre los paralelos 19° 03' y 19° 14' de latitud norte, y los meridianos 98° 57' y 99° 10' de longitud oeste. Colinda al norte con las alcaldías de Xochimilco y Tláhuac, al oeste con la alcaldía de Tlalpan, al este con el Estado de México y al sur con el estado de Morelos. Todo su territorio forma parte de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, abarca una superficie de 28 375 ha y es considerado como suelo de conservación. Este último caracterizado por su alta diversidad biológica, ecosistémica y por los servicios ambientales que provee (INEGI, s.f.).

Milpa Alta se encuentra a una altitud entre 2 200 y 3 600 msnm. Pertenece a la región hidrológica Pánuco (RH26) y Balsas (RH18), y específicamente a la Cuenca Río Moctezuma y Grande de Amacuzac. El ambiente geológico está caracterizado por poseer rocas volcánicas de composición basáltico-andesítica, como parte del Campo Volcánico Chichinautzin y particularmente, ha sido afectado por las erupciones del volcán Teuhtli. Los suelos dominantes de acuerdo al sistema de clasificación de la WRB son: Leptosol (45%), Andosol (28%) y Phaeozem (17%). Los rangos de temperaturas varían entre 6 a 16 °C, y las precipitaciones entre 700 y 1 600 mm. Presenta climas semifríos húmedos y subhúmedos en la zona centro-sur, y un clima templado húmedo y subhúmedo con lluvias en verano en la zona norte. El uso de suelo corresponde a uso agrícola (33%) y urbano (10%) (Bonilla, 2014), mientras que la vegetación dominante es de bosque (49%) y pastizal (8%), donde dominan especies de pino (*Pinus hartwegii* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. leillophyla* Schl. & Cham., *P. ayacahuite* Ehren, etc), oyamel (*Abies religiosa* Kunth Schltld. et Cham.), y asociaciones de pino-encino (*Quercus* spp.) (INEGI, s.f.; GDF, 2012; SEDEMA, 2015).

6.2. Tipos de manejo y parcelas de estudio

Las parcelas de estudio se ubican al norte de la alcaldía de Milpa Alta, específicamente en los alrededores del pueblo denominado Villa Milpa Alta, el cual se encuentra a una altitud de 2 500 y 2 600 msnm, presenta un clima templado subhúmedo C(w1) con mayor precipitación de junio a septiembre y temperatura media mínima de 10°C para los meses de enero y diciembre, y máxima de 18°C para el mes de mayo. En esta zona dominan los cultivos

perennes de nopal y cultivos anuales de maíz, los cuales se desarrollan casi en su totalidad sobre suelos del grupo Phaeozem (Figura 3) (INEGI, 2017).

En campo se identificó la existencia de dos tipos de manejo para el cultivo de nopal y un tipo de manejo para el cultivo de maíz (Cuadro 4 y Figura 4). En el caso del maíz, las parcelas inicialmente eran parcelas de nopal y tienen entre 15 a 20 años sin este cultivo, y con el cultivo intermitente de maíz inicialmente y de forma continua en años recientes. El manejo consiste en parcelas de temporal con arado manual o con tracción animal, con fertilización orgánica anual con estiércol (caballo/borrego) de aproximadamente 1.0 t ha^{-1} , con un control mecánico/manual de arvenses y con un control preventivo/manual/orgánico de plagas. Este manejo se identificó como maíz orgánico (MORG).

En el caso de las parcelas de nopal que tienen una edad de entre 10 a 20 años, se identificaron dos tipos de manejo: el nopal orgánico (NORG) y el nopal con control químico (NCQ). Ambos presentan un manejo que consiste en parcelas de temporal sin perturbación física del suelo. Presentan una fertilización orgánica anual con adición de estiércol (vaca o caballo) en cantidades que varían de 14 a 24 t, distribuidas entre 1 000 y 1 300 m a lo largo de los pasillos, y que equivale a utilizar entre 46 a 80 t ha^{-1} de estiércol. Valores semejantes que también fueron reportados por Santiago-Lorenzo et al. (2016). Aunada a esta, hay una fertilización a partir de la adición de los residuos triturados de poda de nopal. Estos sistemas solamente se diferencian en el control de arvenses, en NORG se utiliza un control mecánico/manual y no se han utilizado agroquímicos por más de 5 años, mientras que, en NCQ se utiliza un control químico, en el que fueron adicionados anualmente distintos tipos de agroquímicos con ingredientes activos de glifosato (Secamax y Faena) y atrazina (Gesaprim).

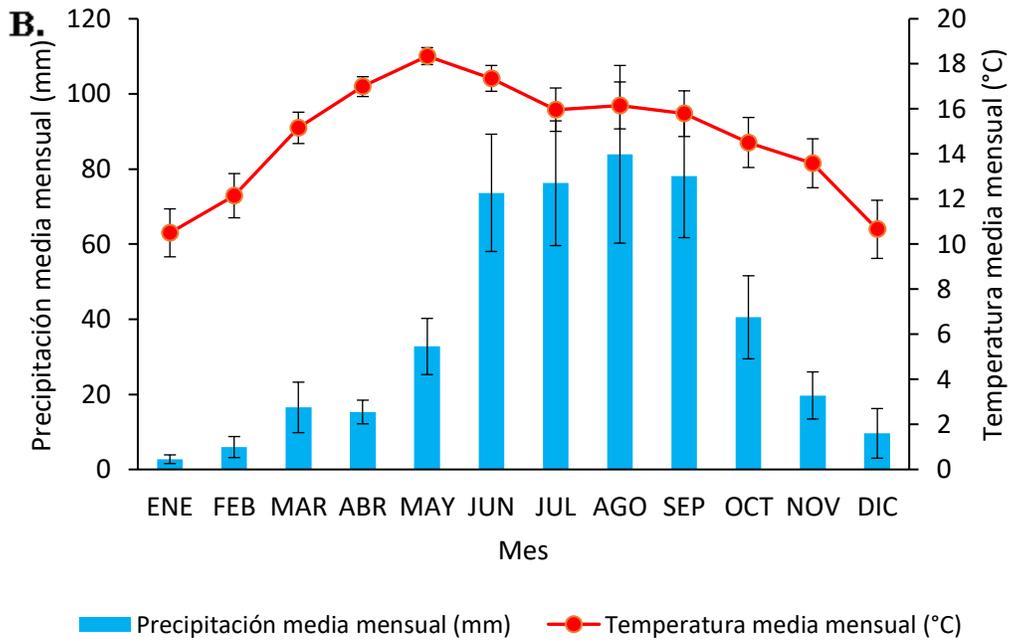
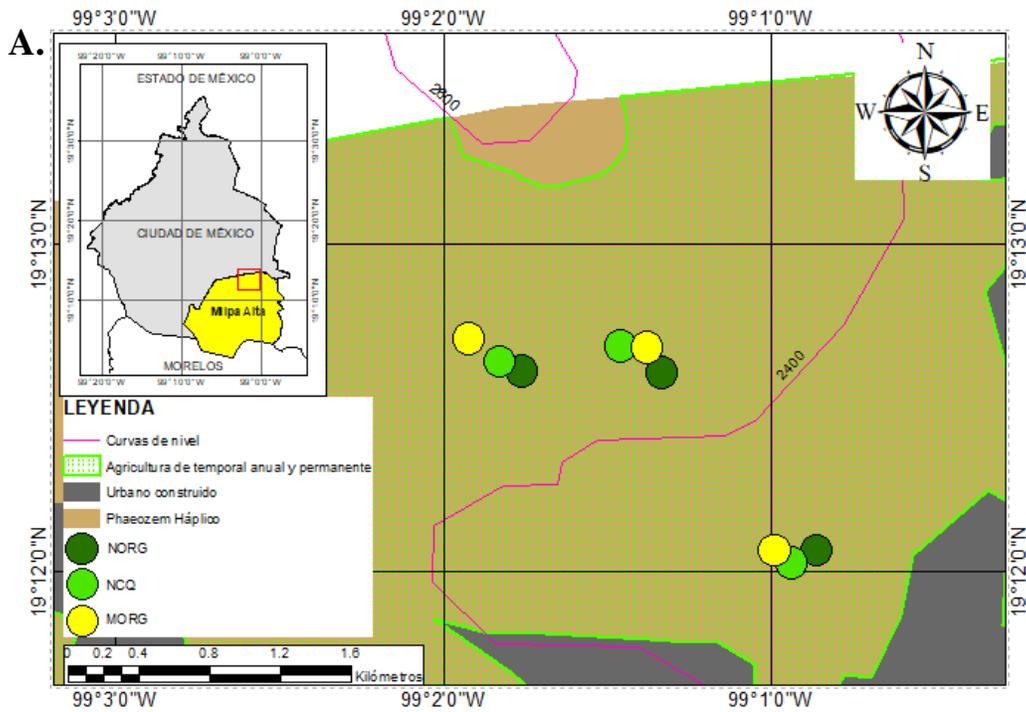


Figura 3. A. Mapa de la ubicación de las parcelas seleccionadas, así como el tipo y uso de suelo de la zona de estudio ubicada en la alcaldía Milpa Alta, Cd. Mx. **B.** Gráfica de temperatura y precipitación media mensual promedio para el periodo de 2010–2019 de la alcaldía Milpa Alta, Cd. Mx. NORG=nopal orgánico, NCQ=nopal con control químico, MORG=maíz orgánico, ENE=enero, FEB=febrero, MAR=marzo, ABR=abril, MAY=mayo, JUN=junio, JUL=julio, AGO=agosto, SEP=septiembre, OCT=octubre, NOV=noviembre y DIC=diciembre.

Cuadro 4. Tipos y características de los manejos agrícolas identificados en Villa Milpa Alta, Cd. Mx. Nopal orgánico (NORG), nopal orgánico con control químico (NCQ) y maíz orgánico (MORG).

Características	Manejo		
	NORG	NCQ	MORG
Labranza	NO	NO	Manual/tracción animal
Riego	Temporal	Temporal	Temporal
Fertilización	Orgánica anual (Estiércol de vaca/caballo) + residuos nopal	Orgánica anual (Estiércol de vaca/caballo) + residuos nopal	Orgánica anual (Estiércol borrego/caballo)
Control de arvenses	Mecánico/Manual	Químico anual	Mecánico/Manual
Control de plagas	Manual/químico	Manual/químico	Preventivo/Manual/Repelentes Orgánicos



Figura 4. Parcelas de estudio ubicadas en Villa Milpa Alta, Cd. Mx. **A.** Nopal orgánico (NORG), **B.** Nopal orgánico con control químico (NCQ) y **C.** Maíz orgánico (MORG).

6.3. Diseño experimental

Con la finalidad de comparar los cultivos más representativos de Villa Milpa Alta, el diseño experimental consistió en seleccionar tres parcelas bajo cada tipo de manejo identificado en la región. Cada una de las parcelas fungió como una réplica real, para lo cual tenían que cumplir con ser espacialmente independientes, y esta independencia se definió con una distancia entre ellas superior a los 600 m. Aunado a esto, para estandarizar las condiciones y disminuir el error asociado a las diferencias ambientales, las parcelas seleccionadas tuvieron una superficie de entre 0.25 a 0.5 ha y se ubicaron en el mismo grupo de suelo y tipo de clima (Figura 3A).

6.4. Diseño de muestreo y colecta de muestras

El muestreo se realizó del 11 al 13 de septiembre del 2021 y consistió en formar un cuadrado de 10×10 m en el centro de cada parcela. Posteriormente, el cuadrado se subdividió en cuatro partes y se tomaron cinco muestras de suelo a 15 cm de profundidad en el centro de cada cuadrado y en el centro del cuadrado más grande (Figura 5). A partir de estas muestras se formó una muestra compuesta por parcela, de tal manera que al final se obtuvieron nueve muestras compuestas, tres para cada tipo de manejo. Estas muestras fueron transportadas en bolsas negras y almacenadas en oscuridad a 4°C hasta su análisis físico, químico y de actividad microbiana en laboratorio. Al mismo tiempo se tomaron muestras inalteradas de volumen constante (100 cm^3) para la determinación de la densidad aparente.

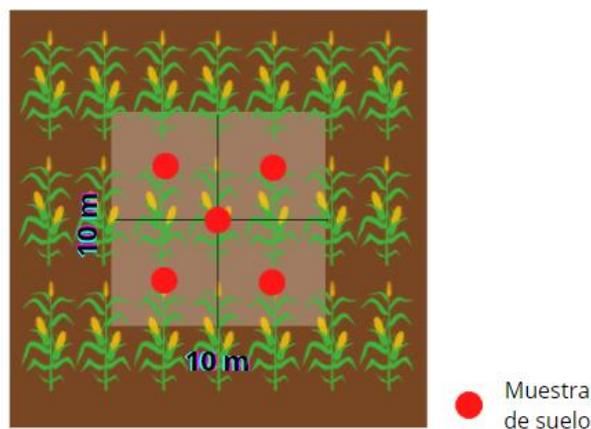


Figura 5. Esquema de muestreo para las parcelas de los tres tipos de manejo: NORG, NCQ y MORG, ubicadas en Villa Milpa Alta, Cd. Mx.

6.5. Caracterización de la dinámica agrícola

6.5.1. Análisis de la actividad agrícola

La dinámica de la actividad agrícola de la alcaldía de Milpa Alta se determinó a partir de consultar las bases de datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) para la Cd. Mx. en el periodo de 2010 a 2019, y de los cuales se extrajo la información existente sobre la actividad agrícola en dicho periodo. La información seleccionada fue: ciclo agrícola (año), tipo de cultivo, superficie sembrada del cultivo (ha), superficie cosechada del cultivo (ha), volumen de producción (t) y valor de la producción (pesos nacionales). De los datos anteriores se obtuvo el rendimiento de cada cultivo (Ecuación 1) y un índice para obtener la relación entre la superficie cosechada y la superficie sembrada (Ecuación 2) para cada año, donde un valor de 1 equivale a la cosecha total de la superficie sembrada, y valores <1 indican una superficie menor cosechada con respecto a la sembrada.

$$\text{Rendimiento (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Volumen de producción (t)}}{\text{Superficie cosechada (ha)}} \dots \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Índice}_{\text{cosechada/sembrada}} = \frac{\text{Superficie cosechada (ha)}}{\text{Superficie sembrada (ha)}} \dots \text{Ecuación 2}$$

Para determinar la relación entre el rendimiento de cada cultivo y las condiciones climáticas, se solicitaron los datos de precipitación y temperatura a la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA, la cual proporcionó los datos mensuales de precipitación (con unidades en mm) de la estación climatológica ubicada en la alcaldía de Milpa Alta, así como los datos mensuales de temperatura (en °C) de la estación climatológica más cercana a la Alcaldía de Milpa Alta, dicha estación está ubicada en San Lucas, Chalco, Estado de México. Con estos datos se obtuvo el índice de aridez de Lang (Ecuación 3).

$$\text{Índice de aridez de Lang} = \frac{\text{Precipitación total anual}}{\text{Temperatura media anual}} \dots \text{Ecuación 3}$$

6.5.2. Encuestas dirigidas a los productores

Se realizaron encuestas a los propietarios de las parcelas con el objetivo de caracterizar de manera general el tipo de manejo de cada cultivo. En las encuestas se abordaron diversos

temas de anejo como el tipo de fertilización, cantidad y periodo de fertilización, control de plagas, uso de residuos agrícolas, destino principal de la producción, rendimiento en la última década y problemáticas ambientales, sociales y económicas asociadas al mantenimiento del cultivo (ver ANEXO).

6.6. Caracterización en laboratorio

6.6.1. Caracterización física y química

Textura

La textura se determinó con el método de la pipeta, el cual cuantifica las partículas minerales del suelo en forma gravimétrica (Flores y Alcalá, 2010). Para esto se pesaron en 20 g de suelo, previamente secado y tamizado con malla de 2 mm (#10), en vasos de precipitados de 500 ml. Como tratamiento previo se eliminó la materia orgánica con la adición de 5 ml H₂O₂ al 30% cada 24 h hasta dejar de observar efervescencia, lo cual ocurrió hasta después de cinco días. Al finalizar, se adicionó 5 ml hexametáfosfato (HMF), se taparon y agitaron durante un día.

Para obtener la fracción de arenas las muestras se tamizaron en húmedo con agua destilada a través de un tamiz con luz de malla de 53 µm (#270) y se recolectó el residuo. Las arenas se lavaron a chorro de agua destilada y se pasaron a una cápsula de porcelana (pesada y secada a 105°C) para ser secadas en una estufa durante 24 h y a 105° C y determinar su peso. Para la determinación de limos (5–20 µm) y arcillas (< 2 µm) el residuo recuperado de la fracción arenas se colocó en una probeta de 1 L y se aforó.

La muestra se dejó en reposo varias horas para después ser agitada vigorosamente durante 1 min con un agitador manual. Después de agitar la muestra, esta se dejó reposar durante 3 h 58 min 47 s, tiempo calculado con base en el tiempo de caída de las partículas. Posterior a ese tiempo, se introdujo lentamente una pipeta volumétrica de 25 ml a una profundidad de 5 cm y se dejó llenar en un tiempo aproximado de 12 s. El volumen obtenido en la pipeta se colocó en una charola de aluminio de peso conocido para ser secada durante 24 h y a 105° C y obtener su peso seco.

Finalmente, el peso de las arenas se obtuvo del peso directo del tamizado con malla #270. El peso de las arcillas se obtuvo de multiplicar el peso obtenido de secar el volumen de la pipeta volumétrica de 25 ml y de multiplicarlo por 40 (es decir, su equivalencia a 1L) (Ecuación 4). El peso de los limos se determinó a partir de la diferencia entre el peso total y el peso de las arenas más el peso de las arcillas (Ecuación 5). Para obtener el porcentaje de cada fracción se multiplicó el peso de la fracción por 100 y se dividió entre el peso inicial (Ecuación 6–8).

$$\text{Peso}_{\text{Arcillas}} = (\text{Peso}_{\text{seco pipeta 25 ml}})(40) \dots \text{Ecuación 4}$$

$$\text{Peso}_{\text{Limos}} = \text{Peso}_{\text{total}} - (\text{Peso}_{\text{Arenas}} + \text{Peso}_{\text{Arcillas}}) \dots \text{Ecuación 5}$$

$$\% \text{ Arenas} = \frac{(\text{Peso}_{\text{Arena}})(100)}{\text{Peso}_{\text{inicial}}} \dots \text{Ecuación 6}$$

$$\% \text{ Limos} = \frac{(\text{Peso}_{\text{Limos}})(100)}{\text{Peso}_{\text{inicial}}} \dots \text{Ecuación 7}$$

$$\% \text{ Arcillas} = \frac{(\text{Peso}_{\text{Arcillas}})(100)}{\text{Peso}_{\text{inicial}}} \dots \text{Ecuación 8}$$

Densidad aparente

La determinación de la densidad aparente fue por el método del cilindro de volumen conocido (Flores y Alcalá, 2010). Para ello, se introdujo verticalmente en el suelo una barrena con un cilindro de acero. Posteriormente, el cilindro fue retirado y sellado con papel aluminio para ser pesado en laboratorio. La muestra se secó en una estufa a 105° C durante 72 horas y los valores de densidad aparente (ρ_{ap} , g cm⁻³) se obtuvieron a partir de las siguientes ecuaciones:

$$V_M = \frac{D^2\pi}{4} h \dots \text{Ecuación 9}$$

$$\rho_{\text{ap}} = \frac{P_{\text{ss}}}{V_M} \dots \text{Ecuación 10}$$

Donde V_M es el volumen de la muestra, D es el diámetro del cilindro, h es la altura del cilindro y P_{ss} es el peso de suelo seco.

Humedad gravimétrica

Se pesaron 100 g de suelo en charolas de aluminio y se colocaron en una estufa a 105 °C durante 72 h hasta obtener un peso constante. Primero se calculó el porcentaje de suelo seco según la Ecuación 11 y posteriormente, a partir de una resta, se calculó el porcentaje de humedad (Ecuación 12) (Flores y Alcalá, 2010). A partir del porcentaje de suelo seco se obtuvo el factor de corrección de humedad (Ecuación 13), el cual utilizó para corregir los valores de concentración de nutrientes, actividad enzimática y mineralización de C.

$$\% \text{ Suelo seco} = \frac{(\text{Peso}_{\text{seco}})(100)}{\text{Peso}_{\text{Húmedo}}} \dots \text{Ecuación 11}$$

$$\% \text{ Humedad} = 100\% - \% \text{ Suelo seco} \dots \text{Ecuación 12}$$

$$\text{Factor de corrección de humedad} = \frac{\% \text{ Suelo seco}}{100} \dots \text{Ecuación 13}$$

pH

El pH se midió en agua en una relación 1:10 p/v, es decir, se pesaron 5 g de suelo y se adicionaron 50 ml de agua. Posteriormente, las muestras se agitaron a 140 rpm durante 30 min y el pH se midió en agitación constante con un potenciómetro OrionVersa Star Pro, marca Thermo Scientific.

Fraccionamiento de materia orgánica del suelo

Se pesaron 10 g de suelo fresco en tubos Falcon de 50 ml, a los cuales se adicionó 35 ml de metatungstato de sodio con densidad de 1.8 g ml⁻¹. Después se procedió a agitar lentamente y de manera manual 10 veces. Posterior a la agitación, los tubos se centrifugaron a 6000 rpm por 1 hora a 6 °C. El sobrenadante se decantó en un vaso de nalgen y se filtró por sistema millipore (con filtros de 0.45 µm) para recuperar y reutilizar el metatungstato de sodio. Una vez filtrada la muestra se realizaron cuatro lavados con agua desionizada y se colocó en cápsulas de porcelana para ser secada en un horno a 70 °C por 72 h. Esta fracción corresponde a la Materia Orgánica Particulada Libre (MOPL). Posteriormente, para obtener la Materia Orgánica Particulada Ocluida (MOPO) se adicionó nuevamente 35 ml de metatungstato a

cada muestra y se agitó por 16 h a 120 rpm. Se repitió el mismo procedimiento que en el caso de la MOPL.

Para obtener la Materia Orgánica Asociada a Minerales Gruesa (MOAMG) y fina (MOAMF) se realizaron cuatro lavados al suelo decantado en los tubos Falcon. Estos lavados consistieron en adicionar 35 ml de agua desionizada, agitar durante 30 min a 120 rpm y centrifugar a 6000 rpm por 30 min, para finalmente decantar y guardar el sobrenadante (debido a que aún contiene metatungstato de sodio). Una vez realizados los lavados, la muestra se tamizó en húmedo con un tamiz de 20 μm (No. 635), de tal manera que la MOAMG corresponde a aquella $>20 \mu\text{m}$ y la MOAMF corresponde a toda aquella $<20 \mu\text{m}$. Cada fracción se colocó en una cápsula de porcelana y se secó en un horno a 70 °C por 72 h. Una vez secas todas las fracciones, se pesaron y molieron para su posterior análisis. La metodología fue modificada de Mani et al. (2018).

Carbono total (CT), carbono inorgánico total (Cinorg), carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT)

Se molieron 10 g de suelo seco de cada una de las muestras en un molino de esferas MM 400 marca Restch por 30 segundos a 30 golpes segundo. La concentración de CT (mg g^{-1}) se determinó en un analizador coulométrico UIC CM5300 por el método de combustión seca y detección del CO_2 liberado (Huffman, 1977). El Cinorg se determinó con el módulo de acidificación del mismo equipo, y el procedimiento consistió en colocar menos de 0.1 g de muestra en tubo de acidificación y adicionar 9 ml de H_2SO_4 2N. Posteriormente, el COT se obtuvo a partir de la diferencia entre el CT y el Cinorg.

La determinación de N y P totales (mg g^{-1}) se tomaron 5 g de suelo seco molido y se realizó una digestión ácida a 360°C con la adición de 7 ml de H_2SO_4 concentrado, 3 ml de H_2O_2 al 30% y 1 g de mezcla digestora (K_2SO_4 y CuSO_4 como catalizador). Posteriormente, las muestras digeridas fueron filtradas por Whatmann #1 y a partir del filtrado se cuantificó colorimétricamente el NT y su concentración fue medida por el método semi-Kjeldahl (Bremner, 1996), mientras que el PT se determinó con el método colorimétrico a 660 nm de molibdato después de la reducción con ácido ascórbico (Murphy y Riley, 1962). Ambos nutrientes se determinaron en un autoanalizador AA3 marca Seal y con los datos obtenidos se calcularon las relaciones estequiométricas C:N, C:P y N:P.

6.6.2. Caracterización biológica

Ácidos grasos de célula completa (WCFA)

La determinación de la estructura de la comunidad microbiana fue con la técnica de cuantificación de ácidos grasos de célula completa conocida como WCFA (*whole cell fatty acid*, por sus siglas en inglés). Esta técnica se basa en la cuantificación de ácidos grasos que se localizan de manera diferencial en las células cada grupo microbiano, por lo que permite evaluar su abundancia (Zelles et al., 1999). Para ello, las muestras fueron secadas, liofilizadas y molidas para el análisis. Posteriormente, se tomó 1 g de muestra y se extrajeron los lípidos de acuerdo con Sasser (1990). Para la identificación de los ácidos grasos se inyectó 1 µl del extracto en un cromatógrafo de gases GC-FID Agilent 7890B y se utilizó como material de referencia un mix de calibración FAME C8:C20, 1300-C. Finalmente, los datos fueron depurados y se obtuvo la concentración en nmol por gramo de ácido graso (nmol g⁻¹) asociados a cada grupo microbiano (Tabla 1). A partir de estas, se construyeron los cocientes Hongo:Bacteria (H:B), Bacterias G⁻:Bacterias G⁺ (G⁻:G⁺), hongos micorrícicos arbusculares:Hongos saprobios (HMA:Hsap). Para el cociente H:B se utilizó la suma total de hongos y bacterias, mientras que para el cociente HMA:Hsap se utilizó la biomasa de los HMA y los hongos saprobios, respectivamente. Los análisis fueron realizados por el Laboratorio Nacional de Innovación Ecotecnológica para la Sustentabilidad (LANIES) del IIES, UNAM Campus Morelia.

Tabla 1. Ácidos grasos asociados a distintos grupos microbianos.

Grupo microbiano	Ácidos grasos
Bacterias gram negativas (G ⁻)	10:0 3OH; 12:0 2OH; 12:0 3OH; 16:0 2OH; 16:0 3OH
Bacterias gram positivas (G ⁺)	15:0 iso; 15:0 anteiso; 16:0 iso; 17:0 iso; 17:0 anteiso
Hongos saprobios (Hsap)	18:2 w6; 9c/18:0 ante
Hongos micorrícicos arbusculares (HMA)	16:1 w5c

Mineralización potencial de C

Dentro de frascos herméticos se colocaron 100 g de cada uno de los tratamientos en tubos de cloruro de polivinilo (PVC) de 5 cm de diámetro y adaptados con una malla en uno de los extremos. Posteriormente, los tratamientos fueron llevados a capacidad de campo por

capilaridad y se incubaron a 25°C en oscuridad durante 15 días. En cada frasco se colocó un vial de vidrio con 10 ml de una solución alcalina de NaOH 0.5 N (a la que se denomina trampa de CO₂) y en cada corte se extrajo la trampa y se adicionó 5 ml de BaCl₂ 1N para precipitar el CO₂ en forma de Na₂CO₃. La determinación de la captura de CO₂ se hizo a través de titulaciones del NaOH extraído con el uso de HCl 0.5 N y fenolftaleína al 1% como indicador (Chávez-Vergara et al., 2015). Por último, la concentración de C en forma de CO₂ en $\mu\text{gC g}_{\text{suelo}}^{-1}$ se determinó con la Ecuación 14.

$$\left[\frac{\left(\frac{(\text{HCl}_{\text{Blanco}} - \text{HCl}_{\text{gastado}})(N_{\text{NaOH}})}{2 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3} \right) (MA_C)}{g_{\text{suelo}}} \right] 1,000,000 = \frac{\mu\text{gC}}{g_{\text{suelo}}} \dots \text{Ecuación 14}$$

Donde: N es la normalidad del NaOH y MA_C es la masa atómica del carbono.

Carbono en biomasa microbiana (Cmic)

El Cmic se midió mediante el método de fumigación y extracción de Vance et al. (1987) y modificado por Chávez-Vergara et al. (2016). Esto consistió en pesar 10 g de suelo por duplicado de cada tratamiento en vasos de precipitados y se colocaron en desecadores. La mitad de las muestras fueron fumigadas al vacío con cloroformo (CHCl₃) durante 30 min y las restantes se usaron como control. Las muestras fumigadas y no fumigadas fueron incubadas en oscuridad a 25°C durante 24 h. Para la extracción se adicionó 40 ml de K₂SO₄ 0.5 N y se agitaron por 30 min. Finalmente, la muestra se filtró con papel Whatman No. 42.

La determinación del Cmic se realizó en un analizador coulométrico UIC CM5300 y su concentración final de Cmic ($\mu\text{g g}^{-1}$) se determinó a partir de la diferencia de la concentración de las muestras fumigadas menos las no fumigadas y divididas entre el coeficiente de extracción 0.45 para el C (Joergensen y Mueller, 1996).

Actividad enzimática

Enzimas β -glucosidasa (BG), fosfatasa (FOS), polifenol oxidasa (POX), N-acetil glucosaminidasa (NAG), leucina aminopeptidasa (LAP) y lipasa (LIP)

La actividad enzimática se determinó como en los métodos descritos por Chávez-Vergara et al. (2015; 2016) mediante mediciones colorimétricas de liberación de p-nitrofenol (pNP) en el caso de la BG, FOS, NAG, LAP y LIP; y de la reducción de tirosina en el caso de la POX.

La preparación de la muestra consistió en colocar 2 g de suelo de cada tratamiento en tubos Falcon de 50 ml y se adicionó 30 ml de una solución de Buffer Universal Modificado (MUB) a un pH de 8.35 para los tratamientos de nopal y 7.06 para el tratamiento de maíz. Los tubos se agitaron durante 15 min a 120 rpm. Posteriormente, se tomaron tres alícuotas de 0.67 ml del extracto y se colocaron en tubos Eppendorf junto con 0.67 ml del sustrato de cada enzima (pNP-glucopiranosido para BG, pNP-fosfato para FOS, ABTS para POX, 4-Nitrofenil N-acetil-β-D-glucosaminidasa para NAG, L-Leucina-pnitroanilida para LAP y pNP-nitrofenil butirato para LIP). Simultáneamente, se preparó el control de muestra y el control de sustrato; el primero se hizo en tubos Eppendorf con 0.67 ml del extracto y 0.67 ml del MUB, y el segundo con 0.67 ml del sustrato de la enzima y con 0.67 ml del MUB.

Todos los tubos Eppendorf se cerraron e incubaron horizontalmente a 25°C durante 2 h en una incubadora LSI 3016R marca LABTECH. Posterior a la incubación, los tubos se centrifugaron a 10 000 rpm durante 2 min y se transfirió una alícuota de 0.75 ml del sobrenadante a tubos Falcon de 15 ml, a los cuales se adicionó 0.075 ml de NaOH 1N y 3 ml de agua desionizada para detener la reacción. Este procedimiento se siguió para BG, FOS, NAG, LAP y LIP, mientras que para POX se realizó la lectura inmediatamente después de la centrifugación. Finalmente, los tubos Falcon de 15 ml se agitaron en un vórtex durante unos segundos y se procedió a realizar la lectura de la absorbancia en un espectrofotómetro SP-V-1000 DLAB ajustado a una longitud de onda (λ) 410 nm para BG, FOS, NAG, LAP y LIP, mientras que para la POX la lectura se hizo a 460 nm. La concentración de pNP detectado fue corregida restando los valores de absorbancia de los controles de muestra y sustratos combinados. Los resultados se reportaron en unidades de $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$.

Enzima deshidrogenasa (DHG)

El método para la determinación de deshidrogenasa se basa en la estimación de la tasa de reducción de cloruro de trifeniltetrazolio (TTC) a trifenilformazán (TPF) posterior a la incubación. Para esto se pesó 1 g de suelo en tubos Falcon negros de 15 ml para impedir el

paso de la luz, para luego adicionar 1 ml de una solución de TTC para suelos arcillo francos ricos en materia orgánica. Simultáneamente, se prepararon los controles de muestra con 1 g de suelo y con la adición de 1 ml de Buffer-Tris ajustado a un pH de 7.4 y 7.6 con HCl para el tratamiento de nopal y maíz respectivamente (Chávez-Vergara et al., 2018).

Los tubos se incubaron en agitación a 25°C durante 24 h, para posteriormente adicionar 8 ml de acetona y agitarse durante 2 h a 200 rpm. Luego, los tubos se centrifugaron a 6 000 rpm por 10 min y se filtraron por papel filtro del #1. Finalmente, lectura de la absorbancia se realizó con un espectrofotómetro SP-V-1000 DLAB ajustado a 560 nm y la absorbancia neta se obtuvo se restar la absorbancia de la muestra menos la del control de muestra. La concentración de enzima fue expresada en $\mu\text{g TPF g}^{-1}\text{d}^{-1}$.

Coefficiente metabólico ($q\text{CO}_2$) y actividad enzimática específica (AEE)

El $q\text{CO}_2$ y la AEE se calcularon a partir de la concentración de cada una de las enzimas, la concentración de biomasa microbiana y la producción de C- CO_2 de cada tratamiento (Raiesi y Beheshti, 2014). El $q\text{CO}_2$ y la AEE se determinaron con las ecuaciones siguientes:

$$q\text{CO}_2 = \frac{A}{B} \dots \text{Ecuación 15}$$

$$\text{AEE} = \frac{D}{B} \dots \text{Ecuación 16}$$

Donde: A es la mineralización de C expresada en $\mu\text{gC g}^{-1}$; B es el valor de biomasa microbiana (C_{mic}) expresado en $\mu\text{gC g}^{-1}$ y D es cualquier enzima (BG, FOS, PFO y DHG) (Chávez-Vergara et al., 2018).

6.6.3. Caracterización mineralógica del nopal

Difracción de rayos X

Se realizó la difracción de rayos X de la biomasa aérea del nopal. Para esto, las muestras de nopal se secaron y se homogeneizaron mediante un mortero de ágata y se tamizaron a malla 200 ($<45 \mu\text{m}$). Las muestras se colocaron en un portamuestras de aluminio de doble carga y la medición se realizó en el intervalo angular 2θ de 4° a 80° en escaneo por pasos con un “step scan” de 0.003° (2θ) y un tiempo de integración de 40 s por paso. Posteriormente, la identificación se realizó con el software HIGHScore v4.5 y las bases de datos del ICDD

(*International Center for Diffraction DATA*) y ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*). Los difractogramas se obtuvieron en un Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de níquel, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D en el Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Geología, UNAM.

6.7. Análisis estadísticos

6.7.1. Caracterización de la dinámica agrícola

Se realizó una correlación de Pearson para determinar si existían relaciones positivas o negativas entre las variables climáticas (temperatura, precipitación y aridez) y el rendimiento de cada cultivo en el periodo de 2010–2019.

6.7.2. Datos de laboratorio

En todos los datos de laboratorio se realizaron pruebas de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilk) y de homocedasticidad (Prueba de Levene). En caso de que alguna variable no presentara homocedasticidad y normalidad se realizó una transformación de los datos a logaritmo natural (Ln) y en el caso de datos porcentuales se realizaron transformaciones a arcoseno (Finney, 1989). Posteriormente, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de una vía para determinar si existían diferencias significativas entre el tipo de manejo. En caso de presentar diferencias se realizó un análisis post-hoc Duncan, y debido al número de réplicas el valor de p para considerar significativa las diferencias fue de $p < 0.1$.

Así mismo, con todo el conjunto de variables se realizaron dos análisis de componentes principales (ACP): uno con las variables absolutas y otro con las variables funcionales en forma de cocientes. Esto para obtener un nuevo conjunto de variables (componentes) a partir de las variables originales, que nos explicaran en su mayor parte la varianza en el conjunto de datos.

Por otro lado, se evaluó el efecto de múltiples variables sobre la mineralización de C. Para esto, se realizaron análisis de regresión múltiple por pasos “hacia adelante” en el que se tomaron como variables predictoras para un primer análisis, las variables absolutas CT, NT, PT, NO_3^- , BG, POX, Cmic, G^- , G^+ y Hongos, y para un segundo análisis se incluyeron las variables funcionales C:N, AEE BG, AEE POX, AEE LIP y H:B.

Finalmente, para evaluar la influencia de la estructura microbiana sobre las variables dinámicas se realizó un análisis de redundancia (ARD). En este se consideró como matriz predictora (x) al conjunto de datos de estructura de la comunidad microbiana (G^- , G^+ , HMA y Hsap) y se tomó como matriz de respuesta (y) las variables dinámicas de todo el conjunto de datos, que fueron la actividad de las enzimas BG, POX, LIP, NAG, LAP, FOS y DHG, así como el Cmic y los NO_3^- .

Todos los análisis se realizaron en el programa Statistica 10 StatSoft y R Studio 4.0.2.

7. RESULTADOS

7.1. Caracterización de la dinámica agrícola en Milpa Alta

7.1.1. Superficie sembrada

La superficie sembrada en la alcaldía de Milpa Alta disminuyó 3 396 ha del año 2010 al 2019, y esta fue mayor en los periodos de 2011 al 2012 y del 2013 al 2014 con una disminución del 13.4% y 20% respectivamente, y solamente se registró un aumento del 3.2% en el periodo del 2014 al 2015 (Tabla 2).

Tabla 2. Número de hectáreas destinadas a uso agrícola en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México y su cambio con respecto al año anterior en hectáreas y su representación en porcentaje. NA=No aplica (SIAP, 2010–2019).

Año	Superficie sembrada (ha)	Cambio en la superficie sembrada con respecto al año anterior (ha)	Equivalente en porcentaje de cambio en la superficie sembrada respecto al año anterior (%)
2010	9 432	NA	NA
2011	9 298	-134	-1.4
2012	8 053	-1 246	-13.4
2013	7 957	-96	-1.2
2014	6 365	-1 591	-20
2015	6 570	+205	+3.2
2016	6 463	-107	-1.6
2017	6 376	-88	-1.4
2018	6 262	-112	-1.8
2019	6 036	-226	-3.6

De toda la superficie sembrada, los cultivos dominantes fueron el nopal, el maíz de grano y la avena forrajera, los cuales se mantuvieron en un porcentaje relativamente constante a lo largo del periodo, a excepción del maíz en el que se observó una disminución de entre un 6% y 12% con respecto al año 2010. Por otro lado, los cultivos con menor área sembrada fueron la manzana, el frijol, la zanahoria y la papa. Sin embargo, esta última alcanzó en 2019 un 5% de representatividad (Figura 6).

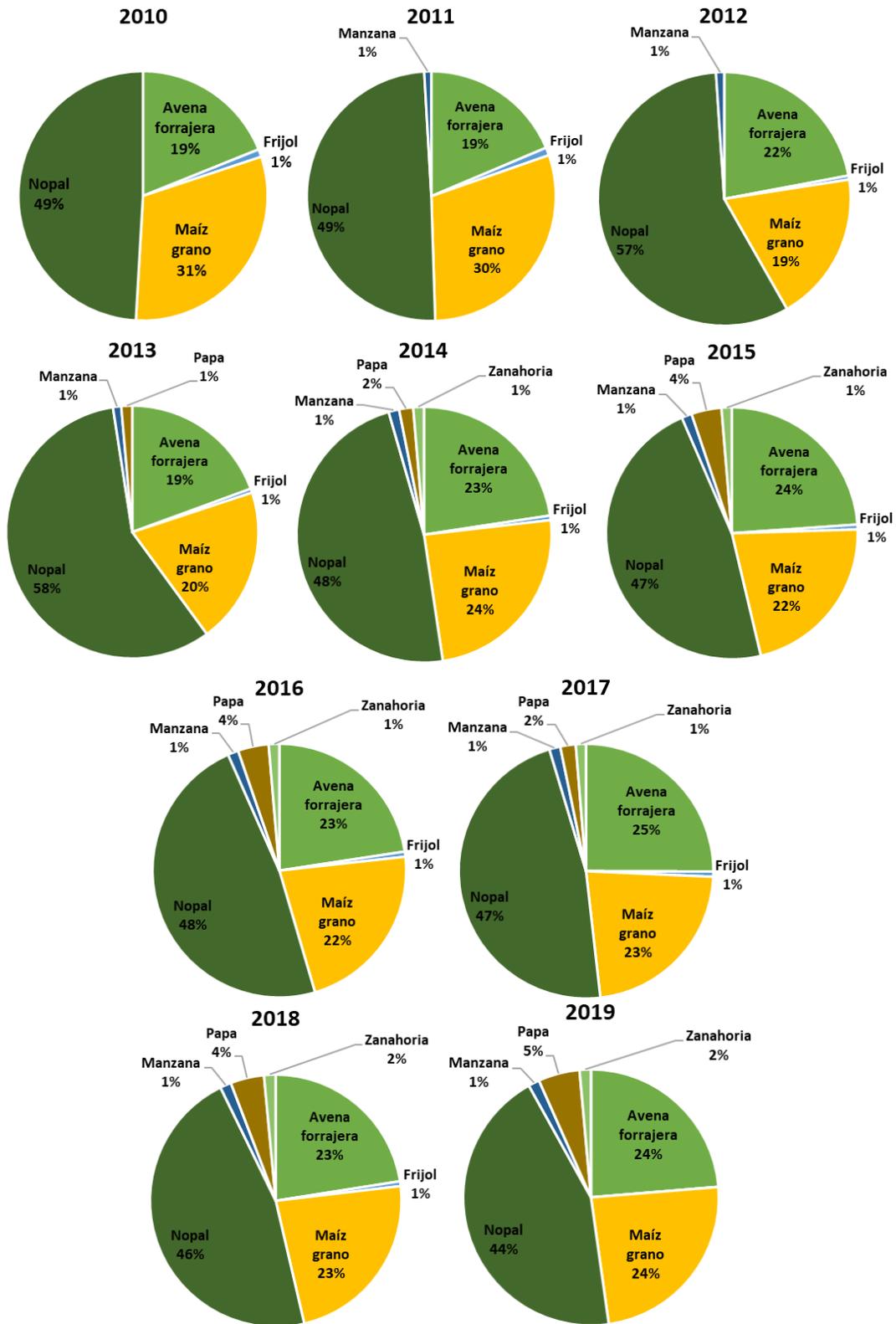


Figura 6. Porcentaje de la superficie sembrada de los principales cultivos en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México (SIAP, 2010–2019).

7.1.2. Índice de superficie cosechada/sembrada

Se observó que, para cada tipo de cultivo en el periodo analizado, los valores del índice fueron de 1, lo que significa que se cosechó en su totalidad la superficie sembrada. Las únicas excepciones fueron la avena en el año 2015, con un valor de 0.9, y la manzana en 2011 y 2012 con valores de 0.7 y 0.9 respectivamente, lo que significa que se cosecharon menos hectáreas con respecto a las sembradas (Tabla 3)

Tabla 3. Cociente de la superficie cosechada respecto a la superficie sembrada para los principales cultivos en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. NA=No aplica (SIAP, 2010–2019).

Cultivo	Año									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Avena forrajera	1	1	1	1	1	0.9	1	1	1	1
Frijol	1	1	1	1	1	1	1	1	1	NA
Maíz grano	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nopal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Manzana	NA	0.7	0.9	1	1	1	1	1	1	1
Papa	NA	NA	NA	1	1	1	1	1	1	1
Zanahoria	NA	NA	NA	NA	1	1	1	1	1	1

7.1.3. Volumen de la producción

Los nopales tuvieron mayor volumen de producción con respecto a los otros cultivos, pero su porcentaje pasó de ser del 97% en el 2011 al 87% en 2019, equivalente a pasar de 341 000 a 224 000 t, respectivamente. Por otro lado, a partir del año 2013, el cultivo de avena forrajera que antes de ese año representaba un 2% (7 500 t) del total del volumen de producción comenzó a tener mayor representatividad hasta alcanzar un 9% (22 000 t) en 2019 (Figura 7 y Tabla 4).

Tabla 4. Volumen de producción en miles de toneladas para los principales cultivos en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. NA=No aplica (SIAP, 2010–2019).

Cultivo	Año									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Avena forrajera	7.5	8.1	8.2	26.3	23.5	22.2	21.8	24.8	23.0	21.9
Maíz grano	4.8	2.5	1.7	1.7	1.9	1.7	1.9	1.6	1.8	1.3
Nopal	294	341	337	270	293	250	200	200	200	224
Manzana	NA	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5
Papa	NA	NA	NA	3.4	1.5	4.6	3.5	1.8	4.8	7.2
Zanahoria	NA	NA	NA	NA	0.8	0.8	0.9	1.1	1.3	1.3

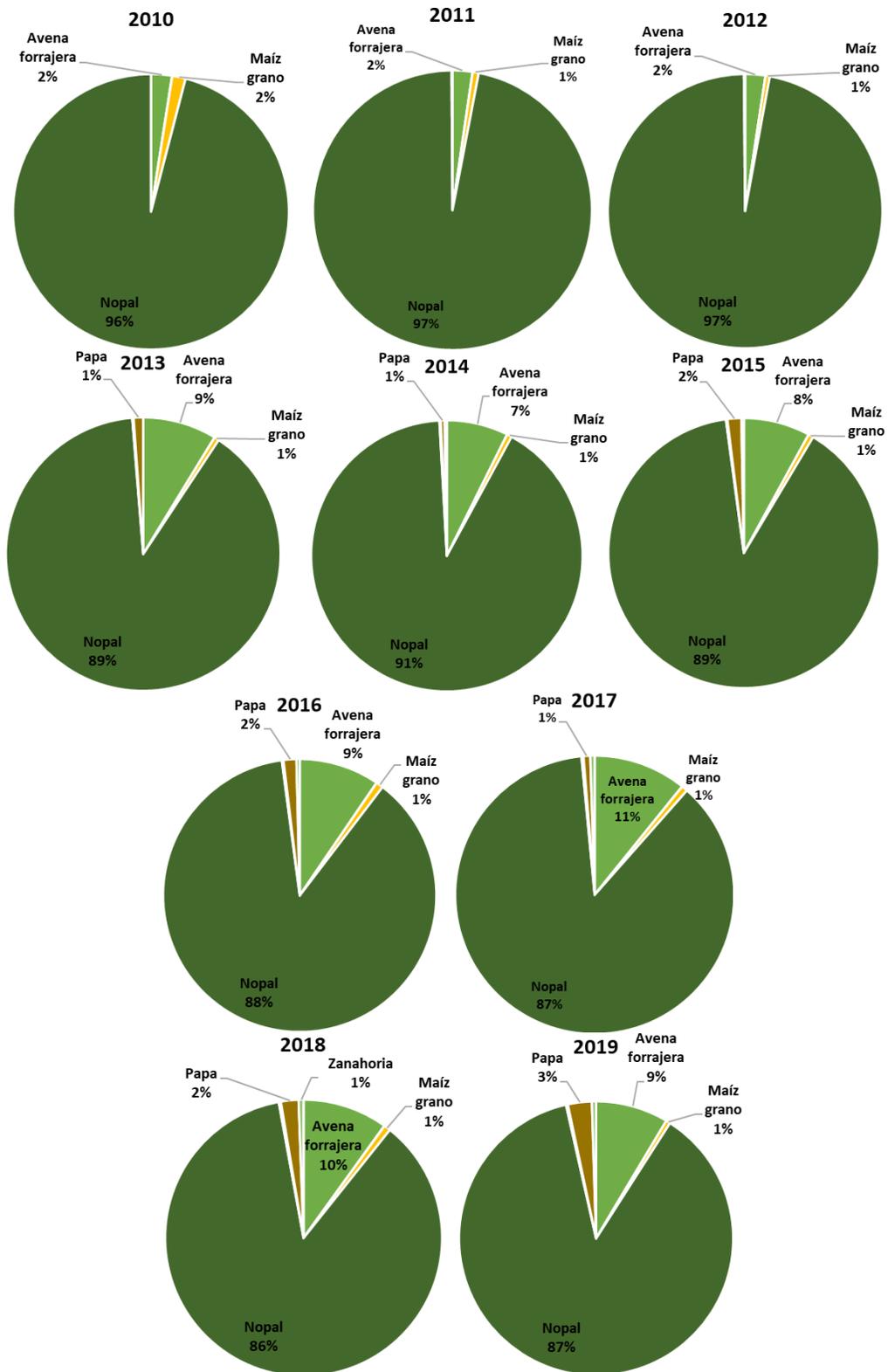


Figura 7. Porcentaje del volumen de la producción en toneladas para los principales cultivos en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México (SIAP, 2010–2019).

7.1.4. Valor de la producción

Los nopales representaron mayor porcentaje de valor de producción con respecto a los demás cultivos. Sus valores variaron entre un mínimo de 86% para el 2015 y un máximo de 96% para el 2010 (Figura 8), equivalente a 465 y 881 millones de pesos, respectivamente (Tabla 5). En el caso del maíz, el porcentaje se mantuvo entre 1% y 2%, equivalente a entre 7 y 19 millones de pesos. Para la avena el porcentaje varió entre el 2% y 5%, que equivale a entre 15 y 38 millones de pesos. Por otro lado, a partir del año 2014 otros cultivos como la manzana, zanahoria y papa comienzan a tener una ligera representatividad (Figura 8 y Tabla 5).

Tabla 5. Valor de la producción en millones de pesos mexicanos para los cultivos más representativos de la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. NA=No aplica (SIAP, 2010–2019).

Cultivo	Año									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Avena forrajera	15	16	22	12	13	17	19	22	21	28
Frijol	1.5	1.1	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.7	0.7	NA
Maíz grano	19.2	13.4	9.5	8.7	9.8	8.9	9.4	8.0	8.6	7.1
Nopal	881	595	640	863	610	463	769	399	571	748
Manzana	NA	2.7	4.8	5.4	5.8	5.7	5.4	6.4	6.8	7.4
Papa	NA	NA	NA	20.5	11.1	39.1	29.7	15.1	40.8	62.6
Zanahoria	NA	NA	NA	NA	4.1	6.2	6.1	6.4	5.2	7.1

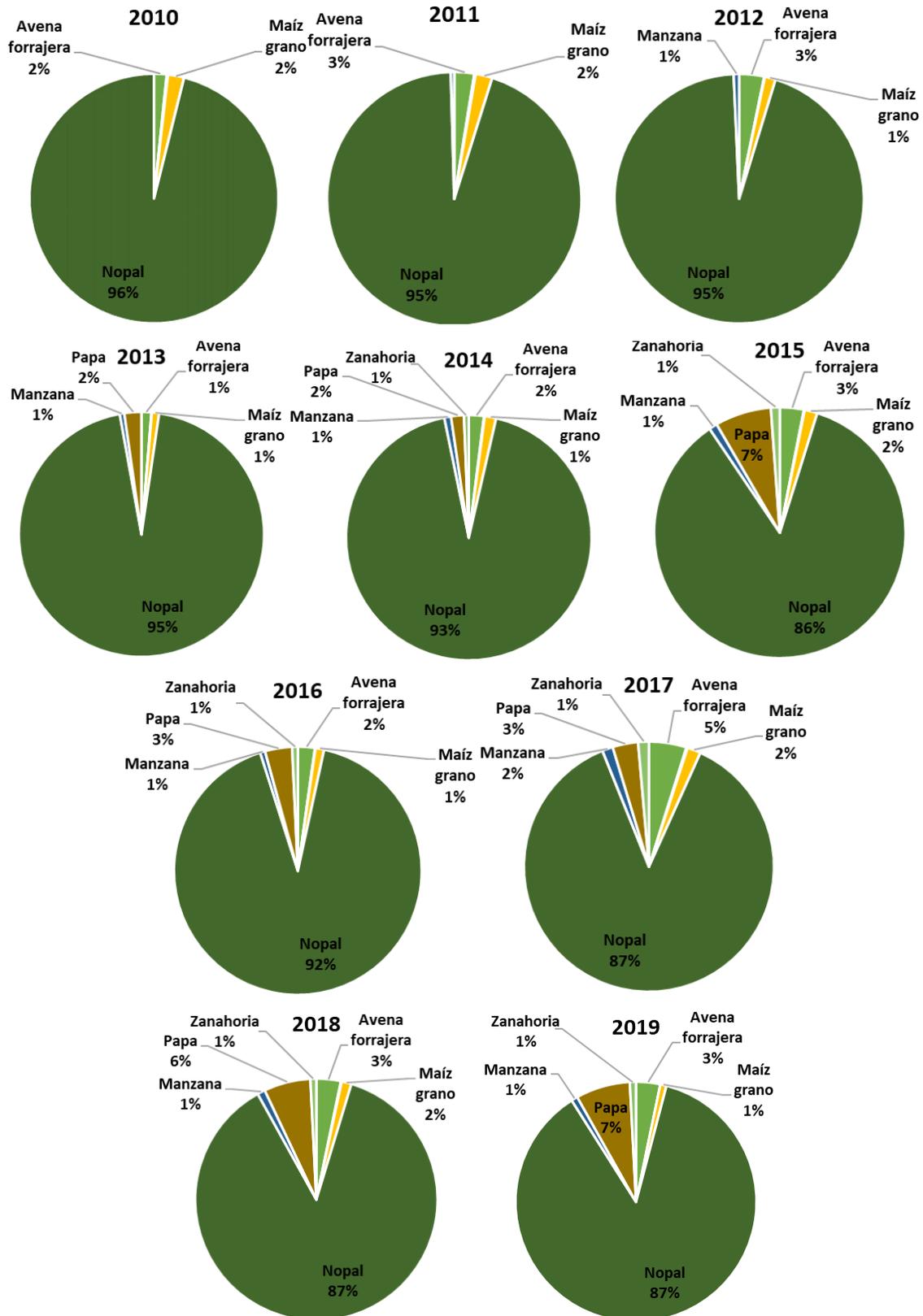


Figura 8. Porcentaje del valor de la producción en pesos de los principales cultivos para la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México (SIAP, 2010–2019).

7.1.5. Rendimiento por hectárea

El cultivo de nopal presentó los valores más altos de rendimiento y fue mayor en 2014 y 2019 con valores de 103 t ha⁻¹ y 92 t ha⁻¹, respectivamente (Figura 9A). En el caso del maíz, tuvo un máximo de rendimiento de 1.8 t ha⁻¹ en 2010 y en los siguientes años se mantuvo con valores entre 1 y 1.5 t ha⁻¹ (Figura 9B). Por otro lado, no hubo un patrón claro que mostrara una relación entre los valores de rendimiento con la temperatura y precipitación media anual (Figura 9). Esto se confirmó con la correlación de Pearson (Tabla 6) e indicó que las condiciones ambientales no explican el rendimiento observado a lo largo del periodo 2010–2019.

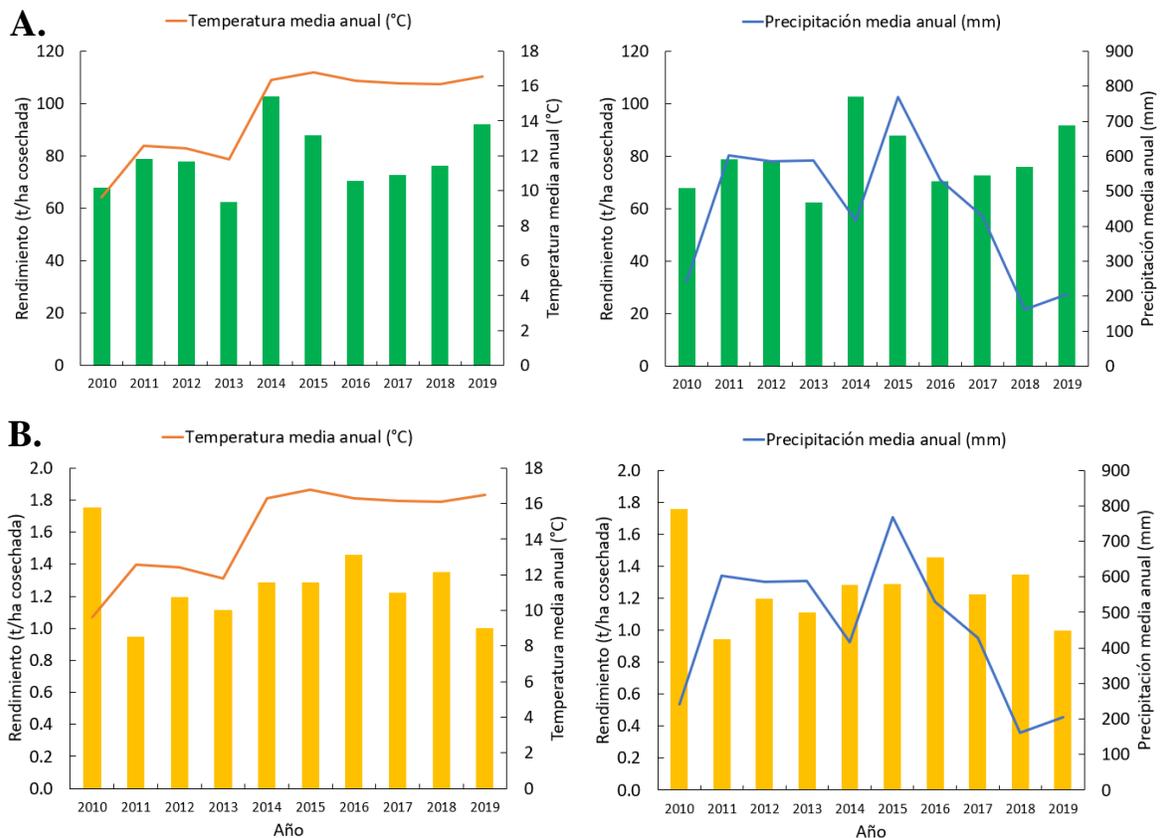


Figura 9. Rendimiento para los cultivos de **A.** nopal y **B.** maíz y su relación con la temperatura y precipitación media anual en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México (SIAP, 2010–2019).

Tabla 6. Resultados de la correlación de Pearson entre las condiciones climáticas y el rendimiento de los cultivos de nopal y maíz para el periodo de 2010–2019 de la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Se muestran los valores de r obtenidos.

	Precipitación	Temperatura	Aridez	Rendimiento nopal	Rendimiento maíz
Precipitación	1				
Temperatura	-0.02	1			
Aridez	0.93	-0.36	1		
Rendimiento nopal	-0.08	0.57	-0.27	1	
Rendimiento maíz	-0.37	-0.23	-0.37	-0.28	1

7.1.6. Encuestas

Se observó que el riego depende totalmente de la precipitación en la región. La fertilización se realiza anualmente, y se utiliza estiércol de vaca y caballo en NORG y NCQ, además de la integración de los residuos de nopal al suelo; mientras que en MORG se utilizan residuos agrícolas y estiércol de caballo y borrego. La dosis de fertilización para NORG y NCQ es de aproximadamente 14 a 24 t distribuidas entre 1 000 y 1 300 m a lo largo de los pasillos, y en MORG es de aproximadamente de 1 t ha⁻¹. El control de arvenses fue diferente, en NORG y MORG no se utilizan agroquímicos y el control es mecánico/manual, mientras que en NCQ se utilizan anualmente agroquímicos como Secamax, Faena y Gesaprim, que tienen como ingredientes activos glifosato y atrazina (ANEXO 1).

Dos de las seis parcelas de nopal están a cargo solamente de hombres, mientras que el resto está a cargo tanto de hombres como de mujeres (Figura 10A). Toda la producción de nopal tiene como fin el comercio, mientras que la producción de maíz es utilizada con fines de autoconsumo o mixto (Figura 10B). Por otro lado, un tercio de los productores percibieron que la producción se ha mantenido igual en los últimos diez años; otro tercio menciona que ha aumentado como consecuencia de la pandemia por la COVID-19 (ya que esta permitió mantener en mejores condiciones sus parcelas) y de la incorporación de materia orgánica al suelo (Figura 10C).

Los productores de nopal mencionaron que las problemáticas asociadas al cultivo son el abandono de las parcelas por la alta demanda de tiempo que se requiere para su mantenimiento, y más aún hay pocas personas involucradas en esta actividad. En el caso del

de maíz las problemáticas son: lluvias tardías y ráfagas de viento que ocasionan daños al cultivo, dificultad de acceso a las parcelas que complica el transporte de la cosecha, y por último, la colindancia con parcelas de nopal que utilizan agroquímicos y que los productores piensan que esto podría tener efectos negativos en su cultivo (ANEXO 1).

Finalmente, todos los productores se mostraron de acuerdo en la realización de estudios en sus parcelas, y mencionaron que están interesados en conocer el estado y salud del suelo porque esto es esencial para tener alternativas y mejoras en las prácticas de cultivo, además de que les gustaría que se realizaran estudios sobre concentración de nutrientes, microbiología, plagas y diversidad de plantas presentes en sus parcelas (Figura 10D).

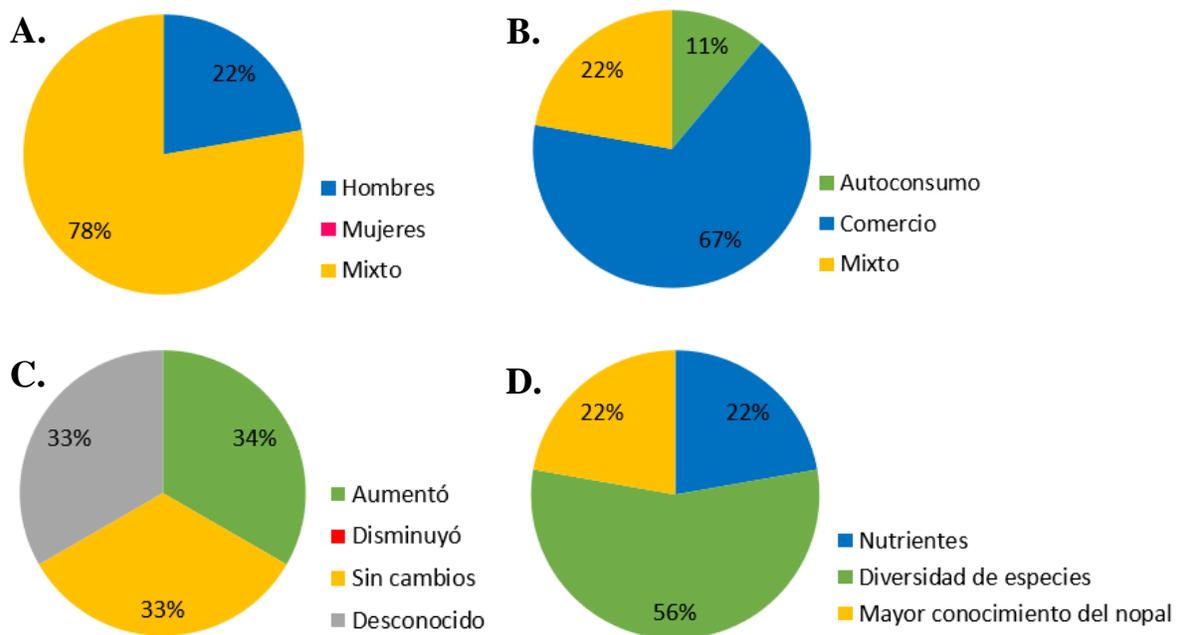


Figura 10. Gráficas de pastel de las encuestas realizadas a los productores de nopal y maíz en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** ¿Quién está a cargo de la producción?, **B.** Destino de la producción, **C.** Cambios en la producción en la última década y **D.** Intereses de los productores.

7.2. Caracterización física y química del suelo

7.2.1. Parámetros físicos y químicos del suelo

En los suelos con cultivo de nopal bajo los dos tipos de manejo (NORG y NCQ) no se observó diferencias en las propiedades físicas y químicas del suelo, pero ambos manejos de nopal

fueron diferentes del cultivo de maíz (MORG), cuyo suelo tuvo pH neutro, baja conductividad eléctrica e hidráulica, pero mayor densidad aparente (1.18 g cm^{-3}). Los suelos con cultivo de nopal tuvieron pH alcalinos (>8), mayor humedad ($>35\%$), mayor conductividad eléctrica e hidráulica (7 y 2.3 veces mayor que MORG, respectivamente), mientras que la densidad aparente fue menor, con valores de 0.75 g cm^{-3} (Tabla 7).

Tabla 7. Medias (\pm error estándar) de los parámetros físicos y químicos analizados en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con $p < 0.1$.

Parámetros	Manejo			F (<i>p</i> -valor)
	NORG	NCQ	MORG	
Humedad (%)	37.1 (7.01)	35.2 (6.10)	20.0 (1.46)	2.86 (0.13)
pH (1:10 p/v)	8.33 (0.18) ^a	8.37 (0.09) ^a	7.05 (0.18) ^b	22.9 (<0.01)
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	227 (110) ^a	151 (45.0) ^a	19.7 (5.93) ^b	11.7 (<0.01)
Densidad aparente (g cm^{-3})	0.76 (0.14) ^b	0.74 (0.08) ^b	1.18 (0.05) ^a	6.31 (0.03)
Conductividad hidráulica, K (mm min^{-1})	0.44 (0.11) ^a	0.49 (0.02) ^a	0.19 (0.06) ^b	4.83 (0.06)
Arenas (%)	47.6 (12.4)	63.7 (7.91)	64.9 (4.94)	1.14 (0.38)
Limos (%)	41.1 (11.3)	25.6 (8.56)	23.6 (3.76)	1.29 (0.34)
Arcillas (%)	11.3 (1.05)	10.7 (1.12)	11.5 (1.19)	0.16 (0.85)

7.2.2. Concentración de nutrientes en el suelo

Carbono total (CT), carbono orgánico total (COT) y carbono inorgánico (Cinorg)

La concentración de C total fue considerablemente mayor en los suelos con cultivo de nopal en ambos manejos, y fue 5.8 veces mayor que en el suelo de MORG. De todo este CT, la mayor parte fue COT y aproximadamente un 2% fue Cinorg (Figura 11 y Tabla 8).

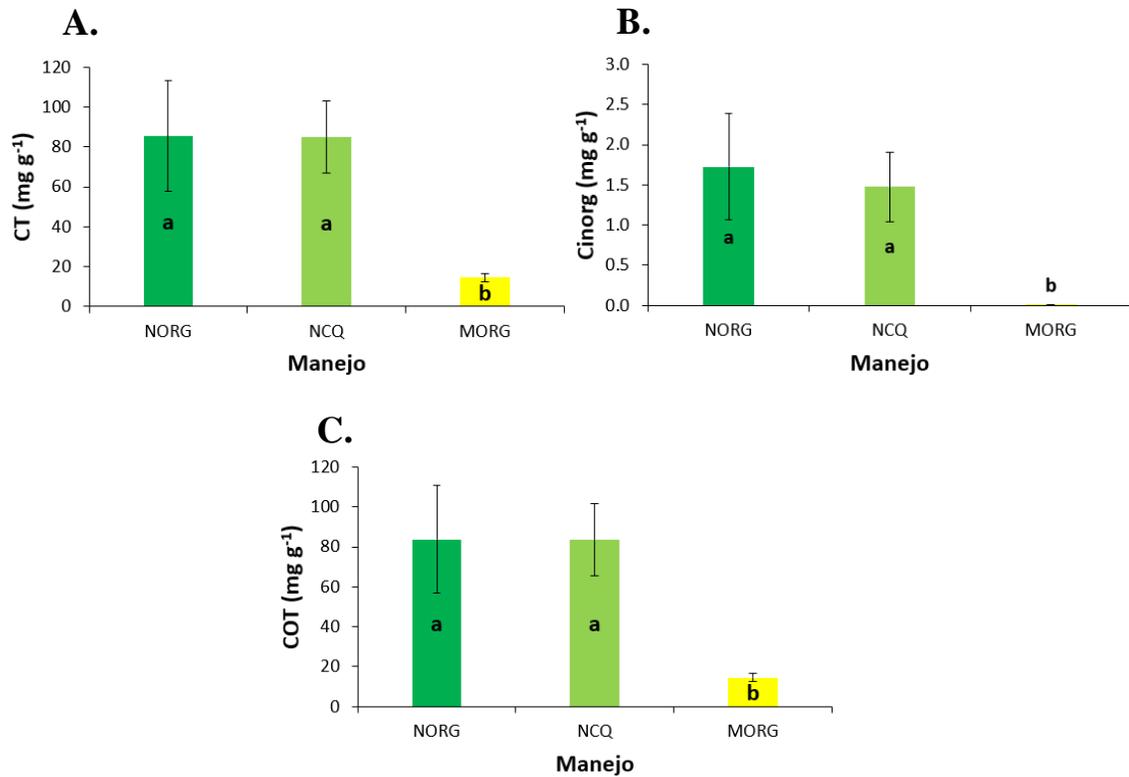


Figura 11. Media (\pm error estándar) de **A.** carbono total (CT), **B.** carbono inorgánico total (Cinorg) y **C.** carbono orgánico total (COT) en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

Fósforo total (PT), nitrógeno total (NT) y nitrógeno disponible (nitratos, NO_3^-)

La concentración de PT y NT fue respectivamente 2.5 y 5.7 veces mayor en los suelos con cultivo de nopal, en comparación con los suelos de MORG. En el caso del nitrógeno disponible en forma de nitratos, los valores fueron mayores en los suelos con cultivos de nopal y en el caso de MORG fueron cercanos a cero (Figura 12 y Tabla 8).

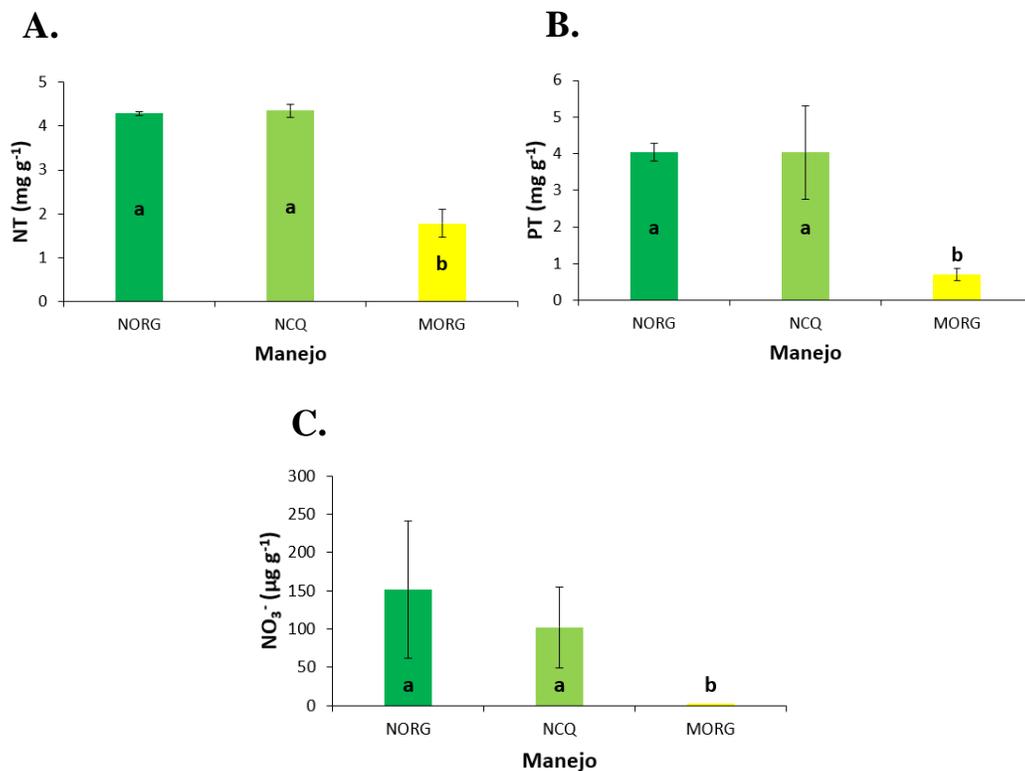


Figura 12. Media (\pm error estándar) de **A.** nitrógeno total (NT), **B.** fósforo total (PT) y **C.** nitrógeno disponible en forma de nitratos (NO₃⁻) en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

7.2.3. Contenido de nutrientes totales

Se observó mayor contenido de COT, Cinorg, NT y PT en el suelo de los cultivos de nopal, y estos fueron considerablemente mayores que en el suelo de MORG (Figura 13 y Tabla 8).

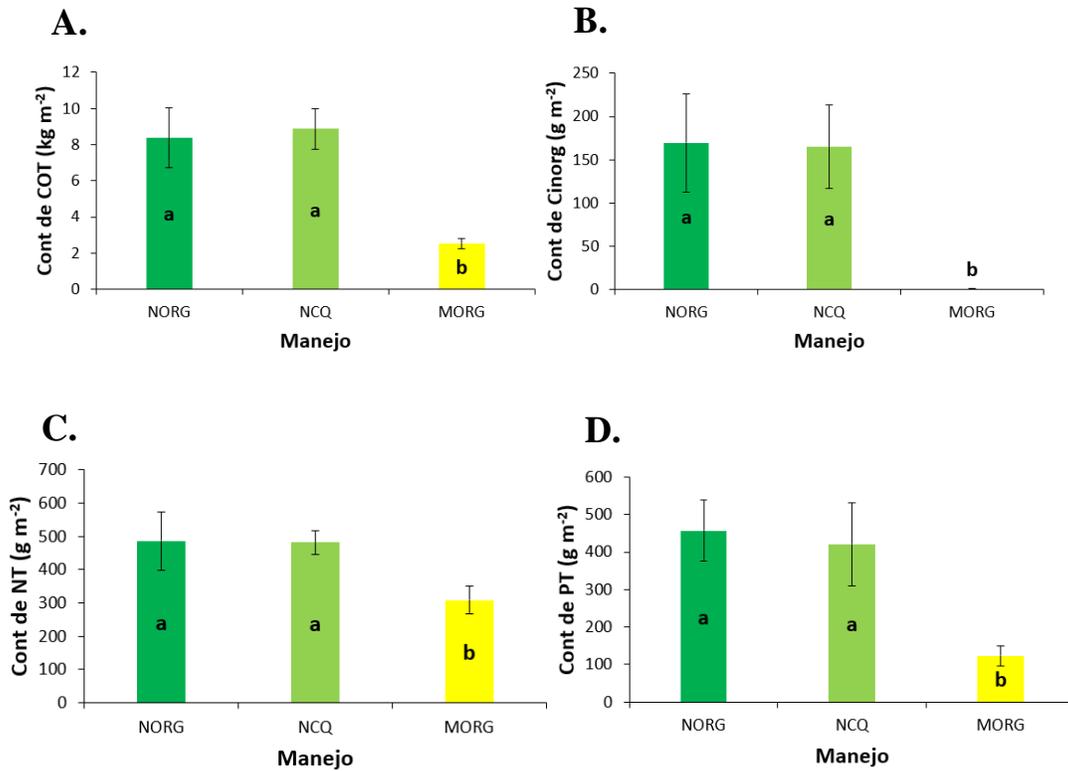


Figura 13. Media (\pm error estándar) de **A.** contenido de carbono orgánico total (Cont COT), **B.** contenido de carbono inorgánico total (Cont Cinorg), **C.** contenido de nitrógeno (Cont NT) y **D.** contenido de fósforo (Cont PT) en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

7.2.4. Cocientes de nutrientes totales

Los cocientes de nutrientes no presentaron diferencias entre los tipos de manejo. Sin embargo, se observó que el cociente C:N fue mayor en los suelos con cultivos de nopal en comparación con MORG, mientras que el cociente N:P fue mayor en este último cultivo. Por otro lado, el cociente C:P presentó valores similares en los tres tipos de manejo (Figura 14 y Tabla 8).

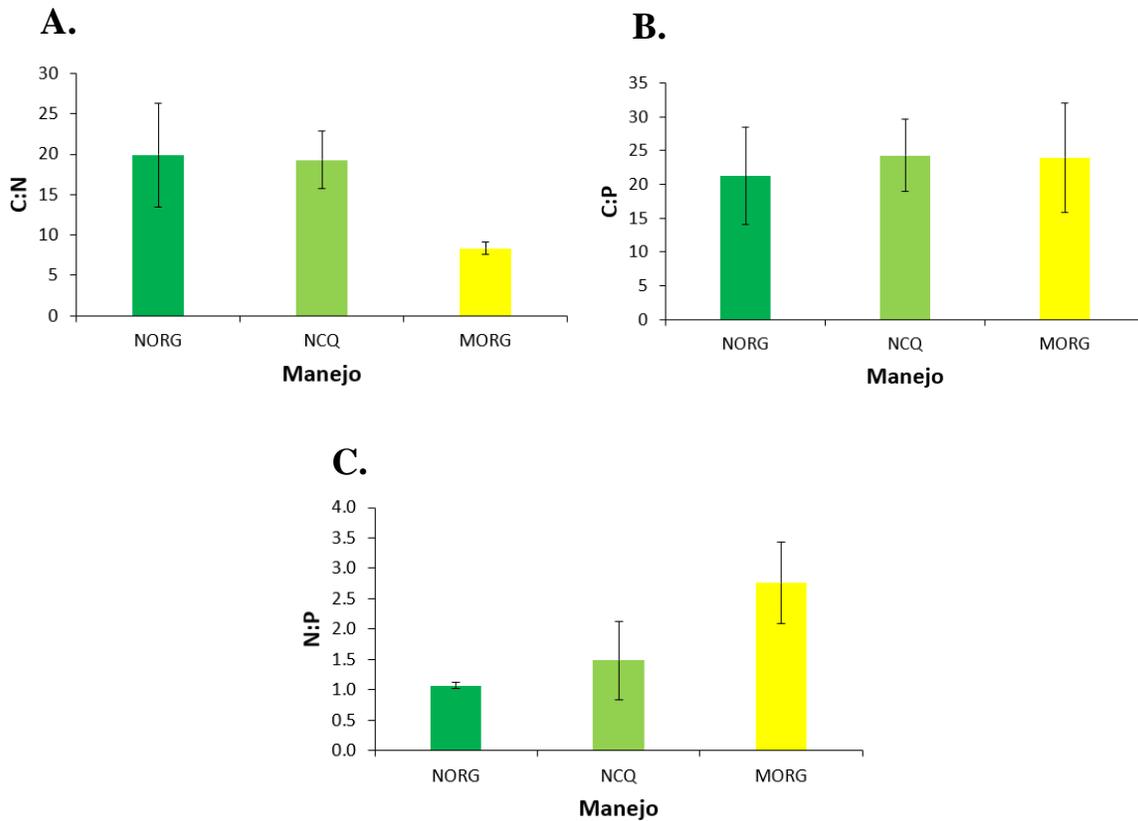


Figura 14. Media (\pm error estándar) de los cocientes **A.** C:N, **B.** C:P y **C.** N:P en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

7.2.5. Fraccionamiento de materia orgánica del suelo

El 50% del COT contenido en suelos con cultivos de nopal se distribuyó en las fracciones asociadas a minerales (MOAMG y MOAMF) y el porcentaje restante en las fracciones particuladas (MOPL y MOPO). En el suelo de MORG el 80% del COT se distribuyó en las fracciones asociadas a minerales y el resto en las fracciones particuladas (Figura 15).

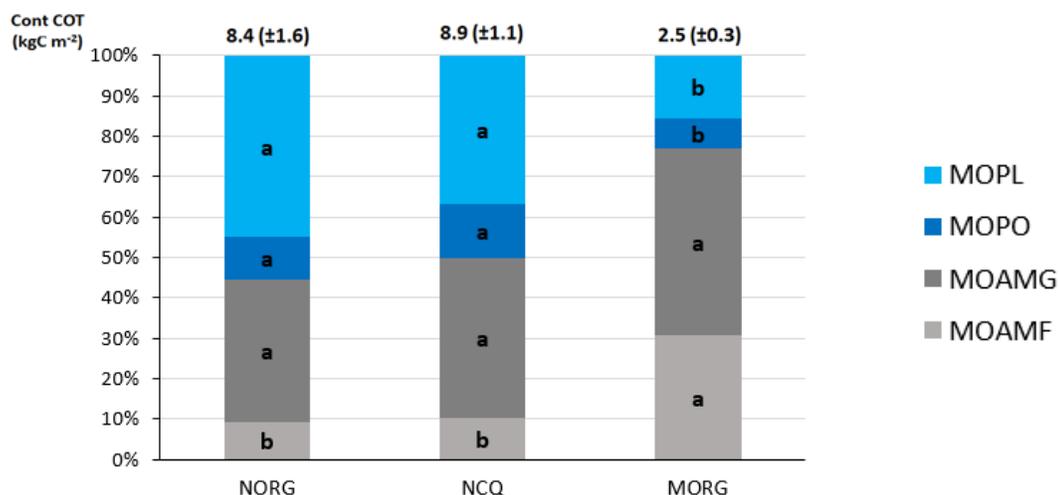


Figura 15. Distribución del contenido de COT en las fracciones de materia orgánica en las muestras de suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. MOPL: materia orgánica particulada libre, MOPO: materia orgánica particulada ocluida, MOAMG: materia orgánica asociada a minerales gruesa (>20µm), MOAMF: materia orgánica asociada a minerales fina (<20µm). Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas (p<0.1) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

Tabla 8. Medias (± error estándar) de la concentración de nutrientes totales en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas representan diferencias significativas (p<0.1) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con p<0.05.

Parámetro	Manejo			F (p-valor)
	NORG	NCQ	MORG	
Nutriente				
CT (mg g ⁻¹)	85.5 (27.6) ^a	84.9 (18.1) ^a	14.6 (2.13) ^b	4.55 (0.06)
Cinorg (mg g ⁻¹)	1.73 (0.67) ^a	1.48 (0.43) ^a	0.005 (0.005) ^b	31.3 (<0.01)
COT (mg g ⁻¹)	83.8 (26.9) ^a	83.5 (18.2) ^a	14.6 (2.13) ^b	4.48 (0.06)
NT (mg g ⁻¹)	4.29 (0.03) ^a	4.35 (0.15) ^a	1.77 (0.32) ^b	26.8 (<0.01)
PT (mg g ⁻¹)	4.03 (0.24) ^a	4.03 (1.27) ^a	0.70 (0.16) ^b	12.2 (<0.01)
NO ₃ ⁻ (µg g ⁻¹)	151 (89.5) ^a	102 (52.8) ^a	3.39 (3.39) ^b	6.98 (0.03)
Contenido				
Contenido CT (kg m ⁻²)	8.54 (1.69) ^a	9.03 (1.09) ^a	2.54 (0.28) ^b	9.48 (0.01)
Contenido de COT (kg m ⁻²)	8.37 (1.64) ^a	8.87 (1.10) ^a	2.54 (0.28) ^b	9.33 (0.01)
Contenido de Cinorg (g m ⁻²)	169 (56.5) ^a	165 (48.3) ^a	0.8 (0.8) ^b	5.01 (0.05)
Contenido NT (g m ⁻²)	486 (87.6)	481 (36.4)	308 (41.2)	2.88 (0.13)
Contenido PT (g m ⁻²)	457 (80.6) ^a	420 (110) ^a	123 (26.6) ^b	5.16 (0.05)
Cocientes				
C:N	19.9 (6.41)	19.3 (3.55)	8.35 (0.79)	2.33 (0.18)
C:P	21.2 (7.23)	24.3 (5.34)	23.9 (8.04)	0.06 (0.94)
N:P	1.07 (0.05)	1.48 (0.64)	2.76 (0.66)	2.72 (0.14)

7.3. Estructura, actividad y estado metabólico de la comunidad microbiana

7.3.1. Estructura de la comunidad microbiana

En el suelo de NORG se registró mayor concentración total de ácidos grasos, seguido del suelo en NCQ y MORG, los cuales no fueron diferentes entre sí. En cuanto a los grupos microbianos, para los tres tipos de manejo no hubo diferencia en la biomasa de los HMA, pero sí la hubo en los demás grupos microbianos. Específicamente, en los suelos con cultivos de nopal bajos los dos tipos de manejo se presentó la misma dominancia de bacterias G^- , pero en NORG la dominancia de hongos totales y de bacterias G^+ fue mayor en comparación con NCQ y MORG, los cuales, presentaron valores similares de concentración de ácidos grasos asociados a estos grupos microbianos. Por otro lado, se observó que el cociente H:B fue similar en los suelos con cultivo de nopal, y estos fueron menores que en MORG. El cociente $G^-:G^+$ fue semejante y mayor en los suelos con cultivo de nopal en comparación con MORG, mientras que el cociente HMA:Hsap fue mayor en NCQ y MORG en comparación con NORG (Figura 16B y Tabla 9).

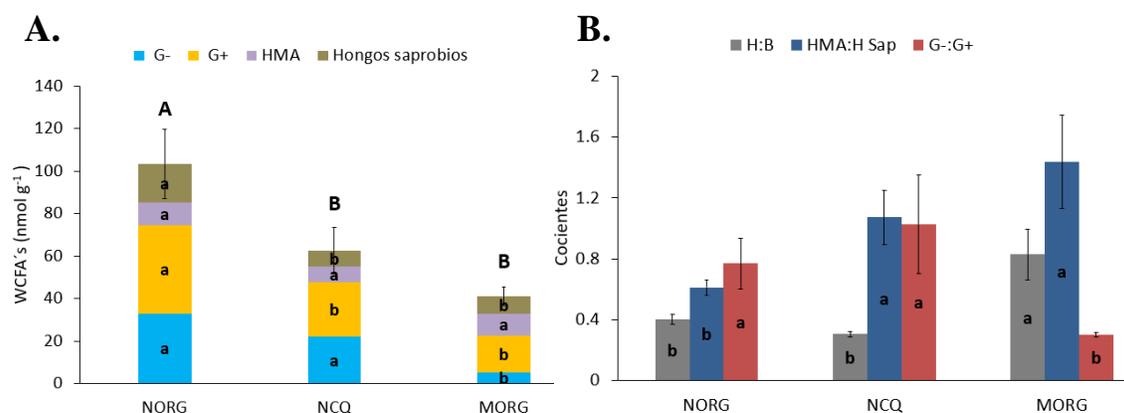


Figura 16. Media (\pm error estándar) de **A.** concentración total y por grupo microbiano de ácidos grasos y **B.** cocientes entre grupos microbianos en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras mayúsculas representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre los ácidos grasos totales y letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre los tipos de manejo para cada grupo microbiano. G^- =bacterias gram negativas, G^+ =bacterias gram positivas, HMA=hongos micorrícicos arbusculares, Hsap=hongos saprobios, H:B=cociente hongos sobre bacterias, $G^-:G^+$ =cociente bacterias gram negativas sobre gram positivas, HMA:Hsap= cociente HMA sobre hongos saprobios, NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

Tabla 9. Medias (\pm error estándar) de la concentración de ácidos grasos para la caracterización de la estructura microbiana del suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NORG=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con $p < 0.1$.

Parámetro	Manejo			F (p-valor)
	NORG	NCQ	MORG	
Grupo microbiano total (nmol g⁻¹)				
Microorganismos totales	103 (16.3) ^a	62.5 (10.9) ^b	41.0 (4.38) ^c	7.40 (0.02)
Bacterias totales (B)	74.3 (13.4) ^a	47.7 (7.80) ^b	22.6 (2.28) ^c	8.12 (0.02)
Hongos totales (H)	28.9 (2.84) ^a	14.9 (3.11) ^b	18.4 (3.29) ^b	5.59 (0.04)
Grupo microbiano (nmol g⁻¹)				
Bacterias gran negativas (G ⁻)	32.9 (9.83) ^a	21.9 (1.08) ^a	5.23 (0.65) ^b	24.6 (<0.01)
Bacterias gran positivas (G ⁺)	41.3 (3.77) ^a	25.7 (6.89) ^b	17.3 (1.64) ^b	6.90 (0.03)
Hongos micorrícicos arbusculares (HMA)	11.0 (1.64)	7.35 (1.13)	10.3 (1.17)	2.16 (0.20)
Hongos saprobios (Hsap)	17.9 (1.20) ^a	7.5 (1.98) ^b	8.10 (2.13) ^b	10.3 (0.01)
Cocientes				
G:G ⁺	0.77 (0.17) ^a	1.03 (0.32) ^a	0.30 (0.01) ^b	8.21 (0.02)
HMA:Hsap	0.61 (0.05) ^b	1.1 (0.18) ^a	1.44 (0.30) ^a	7.38 (0.02)
H:B	0.40 (0.03) ^b	0.31 (0.02) ^b	0.83 (0.16) ^a	15.1 (<0.01)

7.3.2. Inmovilización de C en biomasa microbiana, mineralización de C y coeficiente metabólico (qCO₂)

En los suelos con cultivo de nopal la inmovilización de C en biomasa microbiana fue un orden de magnitud mayor que en los suelos de MORG. La mineralización de C presentó la misma tendencia, mientras que el qCO₂ fue mayor en los suelos de MORG comparación con los de nopal bajos ambos tipos de manejo (Figura 17 y Tabla 10).

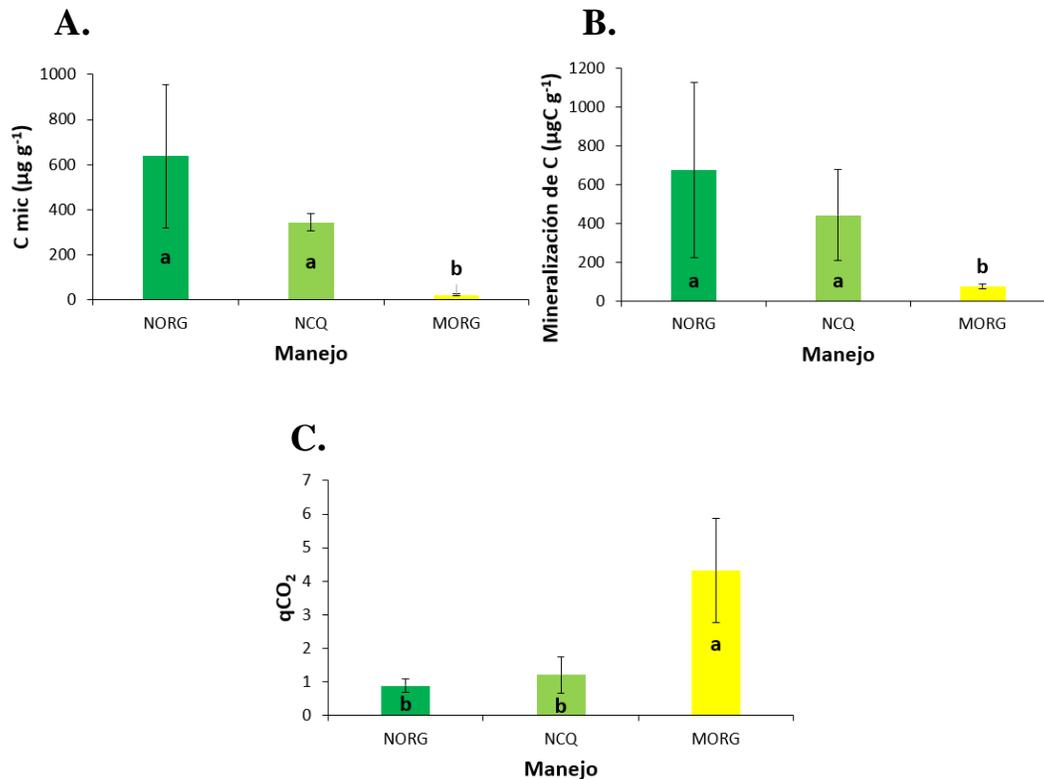


Figura 17. Media (\pm error estándar) de **A.** C en biomasa microbiana, **B.** mineralización de C y **C.** coeficiente metabólico ($q\text{CO}_2$) en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

7.3.3. Actividad enzimática y actividad enzimática específica (AEE)

Enzimas asociadas a la despolimerización del C

La actividad de las enzimas asociadas al metabolismo del C no fue diferente entre los suelos con cultivo de nopal bajo diferente manejo, y en general fue mayor en comparación con los suelos de MORG. La BG (Figura 18A) tuvo mayor actividad en NORG y menor en NCQ, pero no hubo diferencias significativas. La actividad de la LIP (Figura 18B) fue 6 veces mayor en los suelos con cultivo de nopal en comparación con los suelos de MORG. Para la POX (Figura 18C) no se registraron diferencias significativas entre los tipos de manejo. Por otro lado, la actividad enzimática específica (AEE) no fue diferente entre los suelos con cultivo de nopal, y en general fue mayor en los suelos de MORG (Figura 18).

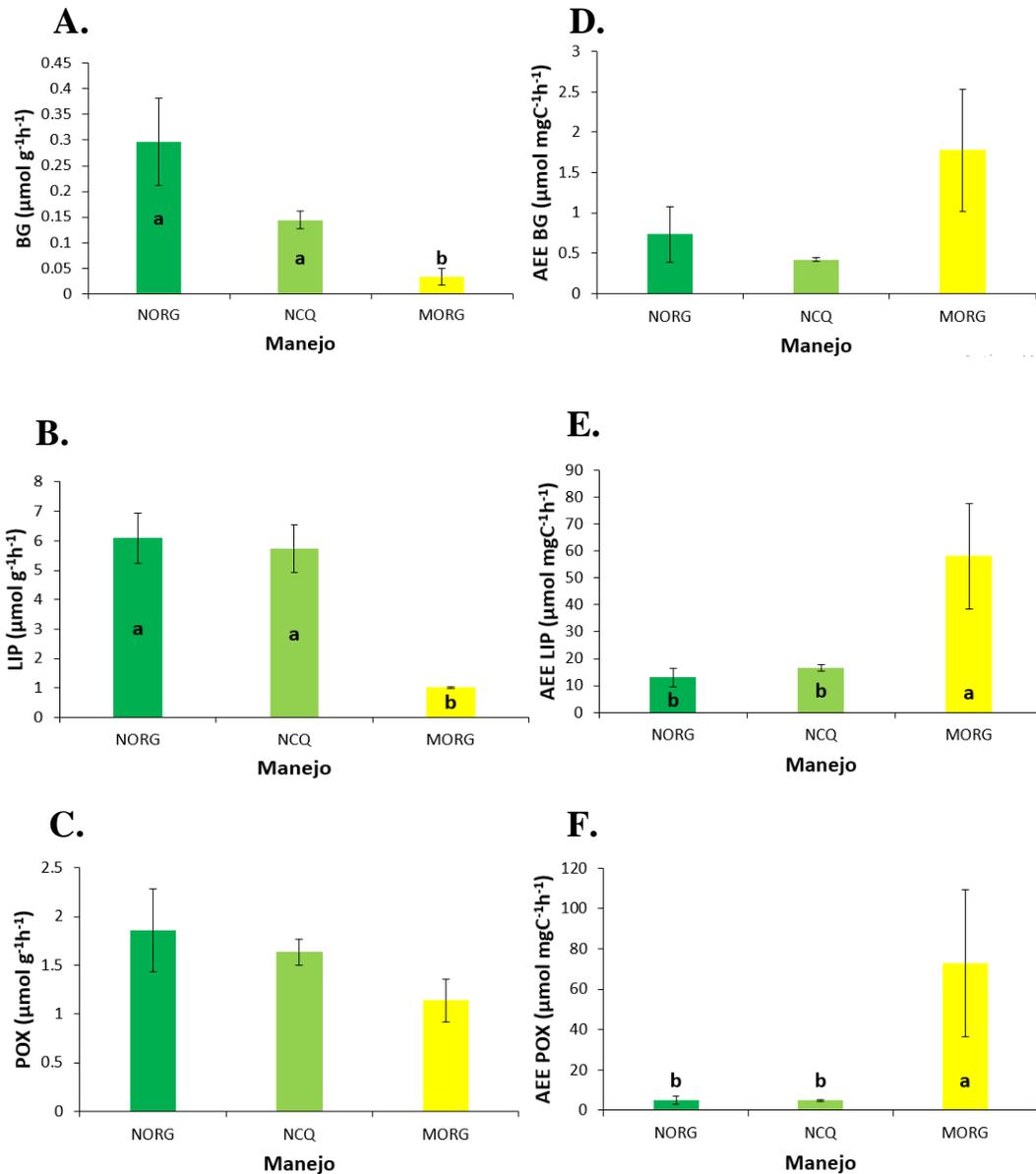


Figura 18. Media (\pm error estándar) de la actividad enzimática y actividad enzimática específica (AEE) en el suelo asociada al C y para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** β -glucosidasa (BG), **B.** lipasa (LIP), **C.** polifenol oxidasa (POX), **D.** AEE BG, **E.** AEE LIP y **F.** AEE POX. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

Enzimas asociadas a la despolimerización del N

Se observaron diferencias en las enzimas asociadas al N entre los tipos de manejo. En el caso de la NAG (Figura 19A), se observó mayor actividad en NCQ, la cual fue 3 y 5 veces mayor

en comparación con NORG y MORG, respectivamente. La LAP (Figura 19B) registró la misma tendencia, es decir, NCQ presentó mayor actividad y fue 2.3 veces mayor y diferente de MORG. La AEE NAG (Figura 19C) fue mayor en MORG, seguida de NCQ y NORG, y todas fueron diferentes entre sí. La AEE LAP (Figura 19D) en MORG presentó valores 2.3 veces mayores que los cultivos de nopal bajos ambos tipos de manejo.

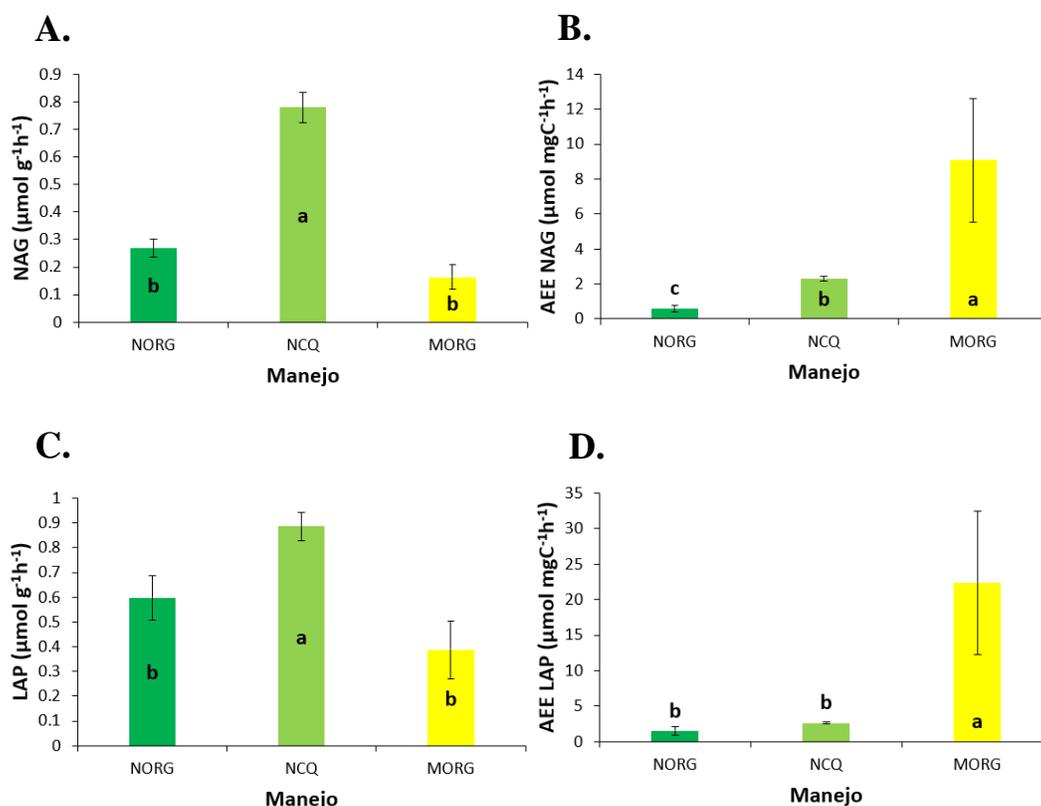


Figura 19. Media (\pm error estándar) de la actividad enzimática y actividad enzimática específica (AEE) en el suelo asociada al N y para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** N-acetil glucosaminidasa (NAG) y **B.** leucina amino peptidasa (LAP) y su respectiva actividad enzimática específica (AEE), **C.** AEE NAG, **D.** AEE LAP. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

Enzima asociada a la mineralización del P

Se observó mayor actividad de la FOS en los suelos con cultivo de nopal en comparación con MORG, sin embargo, las diferencias no fueron significativas (Figura 20A). Por otro lado, se registró que la AEE FOS en MORG fue 10 veces mayor en comparación con NORG y NCQ (Figura 20B).

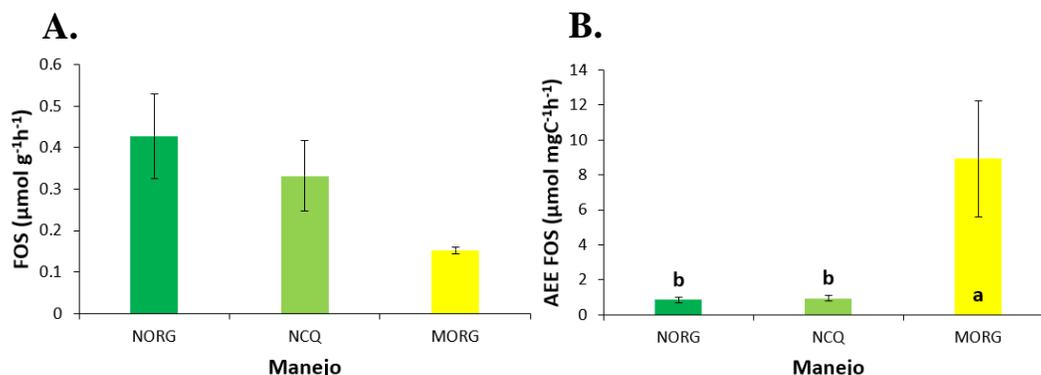


Figura 20. Media (\pm error estándar) de la actividad enzimática y actividad enzimática específica (AEE) en el suelo asociada al P y para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** fosfomonoesterasa (FOS) y **B.** AEE FOS. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre los tratamientos. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

Enzima asociada a la actividad metabólica general

La enzima DHG fue 6 veces mayor en los suelos con cultivos de nopal que en el suelo de MORG (Figura 21A). Por otro lado, la AEE DHG fue mayor y diferente en MORG en comparación NORG y NCQ (Figura 21B).

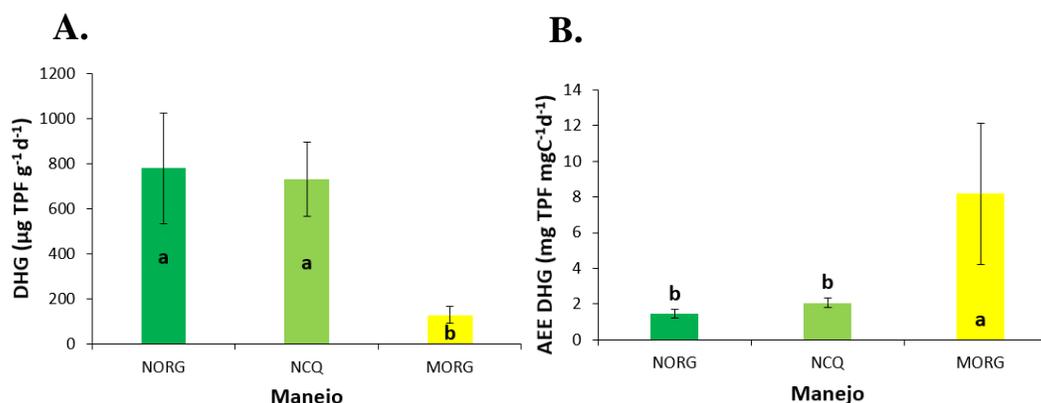


Figura 21. Media (\pm error estándar) de la actividad enzimática y actividad enzimática específica (AEE) en el suelo asociada a la actividad metabólica general y para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. **A.** deshidrogenasa (DHG) y **B.** AEE DHG. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre los tratamientos. NORG=cultivo de nopal orgánico, NCQ=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico.

Tabla 10. Medias (\pm error estándar) de la actividad microbiana en el suelo para cada tipo de manejo en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Letras minúsculas representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre el tipo de manejo. NORG=cultivo de nopal orgánico, NORG=cultivo de nopal orgánico con control químico y MORG=cultivo de maíz orgánico. BG= β -glucosidasa, POX=policfenol oxidasa, LIP=lipasa, NAG=n-acetil glucosaminidasa, FOS=fosfomonoesterasa, DHG=deshidrogenasa, AEE=actividad enzimática específica, Cmic= C en biomasa microbiana, qCO_2 =coeficiente metabólico. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con $p < 0.1$.

Parámetro	Manejo			F (<i>p</i> -valor)
	NORG	NCQ	MORG	
Actividad enzimática				
BG ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	0.29 (0.08) ^a	0.14 (0.02) ^a	0.03 (0.01) ^b	12.9 (<0.01)
POX ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	1.85 (0.42)	1.63 (0.13)	1.13 (0.22)	1.63 (0.27)
LIP ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	6.01 (0.87) ^a	5.74 (0.81) ^a	1.01 (0.02) ^b	17.1 (<0.01)
NAG ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	0.27 (0.03) ^b	0.79 (0.05) ^a	0.16 (0.04) ^b	52.0 (<0.01)
LAP ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	0.60 (0.11) ^a	0.89 (0.02) ^a	0.39 (0.06) ^b	7.62 (0.02)
FOS ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	0.43 (0.10)	0.33 (0.08)	0.15 (0.01)	3.27 (0.11)
DHG ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{d}^{-1}$)	780 (246) ^a	730 (164) ^a	128 (36.6) ^b	4.41 (0.06)
Actividad enzimática específica (AEE)				
AEE BG ($\mu\text{mol mgC}^{-1} \text{h}^{-1}$)	0.73 (0.34)	0.42 (0.02)	1.78 (0.76)	1.38 (0.32)
AEE POX ($\mu\text{mol mgC}^{-1} \text{h}^{-1}$)	4.93 (2.06) ^b	4.82 (0.33) ^b	72.8 (36.4) ^a	9.23 (0.01)
AEE LIP ($\mu\text{mol mgC}^{-1} \text{h}^{-1}$)	13.0 (3.52) ^b	16.7 (1.19) ^b	58.0 (19.5) ^a	8.07 (0.02)
AEE NAG ($\mu\text{mol mgC}^{-1} \text{h}^{-1}$)	0.60 (0.19) ^c	2.30 (0.13) ^b	9.07 (3.52) ^a	16.0 (<0.01)
AEE LAP ($\mu\text{mol mgC}^{-1} \text{h}^{-1}$)	1.50 (0.58) ^b	2.61 (0.14) ^b	22.3 (10.1) ^a	9.89 (0.01)
AEE FOS ($\mu\text{mol mgC}^{-1} \text{h}^{-1}$)	0.84 (0.18) ^b	0.93 (0.15) ^b	8.92 (3.30) ^a	23.9 (<0.01)
AEE DHG ($\text{mg TPF mgC}^{-1} \text{d}^{-1}$)	1.44 (0.22) ^b	2.06 (0.26) ^b	8.19 (3.95) ^a	3.72 (0.09)
Inmovilización y mineralización de C				
Cmic ($\mu\text{g g}^{-1}$)	636 (316) ^a	344 (39.3) ^a	21.2 (5.8) ^b	29.3 (<0.01)
Mineralización C ($\mu\text{gC g}^{-1}$)	673 (450) ^a	441 (235) ^a	73.6 (12.0) ^b	3.7 (0.09)
qCO_2	0.87 (0.20) ^b	1.2 (0.55) ^b	4.31 (1.55) ^a	4.88 (0.05)

7.4. Caracterización mineralógica del nopal

Difracción de rayos X

Los difractogramas obtenidos por difracción de rayos X de la biomasa aérea de nopal arrojaron la identificación de tres distintas formas de oxalato de calcio hidratados (Figura 22).

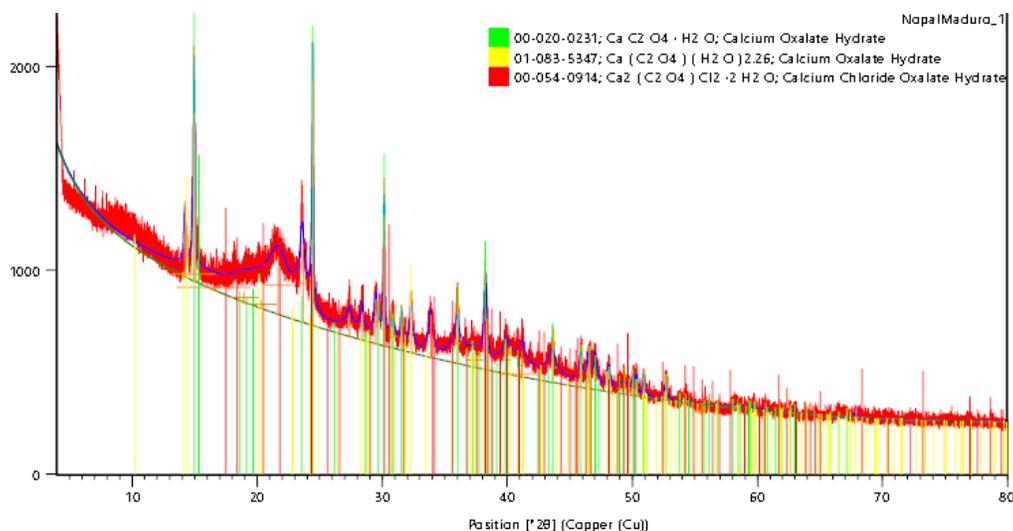


Figura 22. Difractogramas de la biomasa aérea de nopal maduro, obtenido de las parcelas NORG, Milpa Alta, Cd. Mx., México. Cada color representa las distintas formas de oxalato de Ca.

7.5. Análisis de componentes principales (ACP)

Se realizaron dos ACP, uno para las variables absolutas y otro para las variables funcionales en forma de cocientes. El componente 1 del primer ACP explicó el 67.7% de la varianza y las variables que tuvieron mayor contribución dentro de este fueron CE, DA, CT, NT, PT, Cinorg, Cmic, Min C, BG, LIP, FOS, DHG, MOPL y MOAMF. El componente 2 explicó el 10.8% de la varianza y las variables con mayor contribución fueron HMA y Hsap (Figura 23). En el segundo ACP la componente 1 explicó el 66.3% de la varianza y las variables que explicaron la varianza fueron el Cont CT, Cont P, H:B, G⁻:G⁺ y la AEE de todas las enzimas. El componente 2 explicó el 12.2% de la varianza y la variable que explicó la varianza fue el cociente C:P (Figura 23B)

Por otro lado, si se proyectan en el plano los casos (parcelas), se observó que en ambos ACPs hubo un agrupamiento por tipo de manejo y en el que los cultivos de nopal no fueron diferentes entre sí para el componente 1 en ambos conjuntos de variables (ANOVA de variables absolutas: $F = 28.9$ y $p < 0.01$; ANOVA de variables cocientes: $F = 28.4$ y $p < 0.01$) y además ambos fueron diferentes de MORG (Figura 23B y 22D).

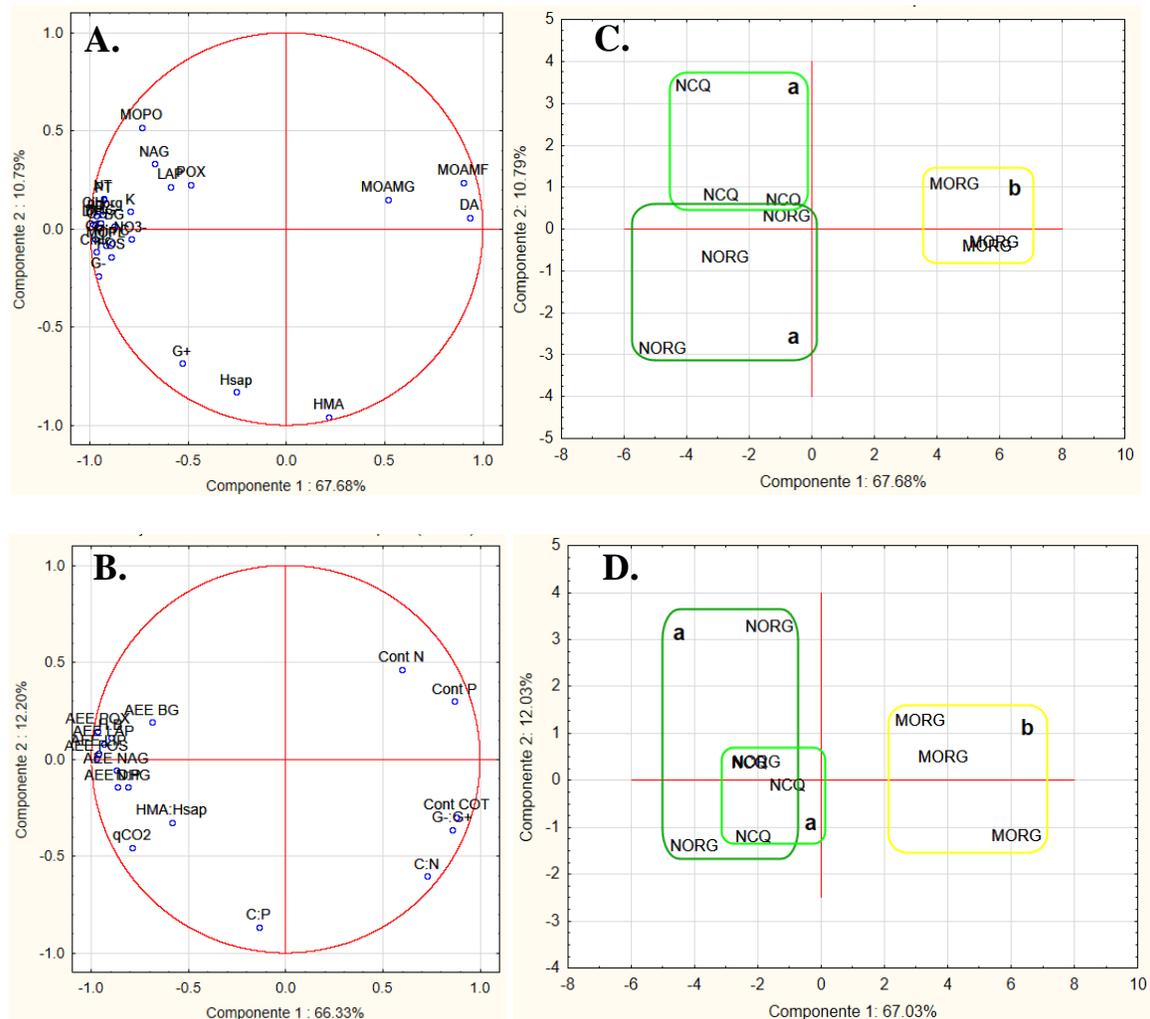


Figura 23. Análisis de componentes principales de las variables obtenidas de los análisis de suelo de parcelas en la Alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. Proyección de las variables en el componente 1 y 2 para **A.** variables absolutas y **B.** variables funcionales. Proyección de los casos (parcelas) en el componente 1 y 2 para **C.** variables absolutas y **D.** variables funcionales. Letras minúsculas diferentes en C y D representan diferencias significativas ($p < 0.1$) entre los casos para el componente 1. En color verde oscuro se agrupan las parcelas de NORG (nopal orgánico), en color verde claro las parcelas de NCQ (nopal orgánico con control químico) y en color amarillo las parcelas de MORG (maíz orgánico).

7.6. Análisis de regresión múltiple por pasos

A partir de los análisis de regresión múltiple por pasos se obtuvo un modelo para cada grupo de datos analizados (variables absolutas y funcionales) para la mineralización de C. El análisis con variables absolutas indicó que el Cmic y BG tuvieron un efecto positivo en la mineralización de C; mientras que las bacterias G^+ tuvieron un efecto negativo, y fue el Cmic el que tuvo un mayor peso relativo según los valores de β estandarizada. Para las variables

funcionales solo tuvo efecto positivo el cociente C:N. Finalmente, el coeficiente de determinación (R^2) fue mayor en las variables absolutas en comparación con las funcionales (Tabla 11).

Tabla 11. Análisis de regresión lineal múltiple por pasos de la mineralización de C. Valores en rojo denotan resultados estadísticamente significativos con $p < 0.1$. Min C= mineralización de C, CT=carbono total, NT=nitrógeno total, PT= fósforo total, BG= β -glucosidasa, POX=polifenol oxidasa, LIP=lipasa, Cmic= C en biomasa microbiana, AEE=actividad enzimática específica, G⁻=bacterias gram negativas, G⁺=bacterias gram positivas, Hsap=hongos saprobios, H:B=cociente hongos sobre bacterias y C:N=cociente carbono sobre nitrógeno.

Variable dependiente	VARIABLES INCLUIDAS	VARIABLES SIGNIFICATIVAS	COEFICIENTE β ESTANDARIZADO	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN R^2 (p-valor)
VARIABLES ABSOLUTAS				
Min C	pH, CT, NT, PT, BG, POX, Cmic, G ⁻ , G ⁺ y Hsap	Cmic G ⁺ BG	1.33 -0.67 0.27	0.99 (<0.001)
VARIABLES FUNCIONALES				
Min C	C:N, AEE BG, AEE POX, AEE LIP, H:B	C:N	0.84	0.71 (0.004)

7.7. Análisis de redundancia (ARD)

El ARD se considera una extensión de la regresión múltiple, ya que modela el efecto de una matriz explicativa o predictora (X) en una matriz de respuesta (Y). En este caso, se tomó como matriz predictora al conjunto de datos de estructura de la comunidad microbiana (G⁻, G⁺, HMA y Hsap), y se tomó como matriz de respuesta las variables dinámicas de todo el conjunto de datos, que fueron la actividad de las enzimas BG, POX, LIP, NAG, LAP, FOS y DHG, así como el Cmic y los NO₃⁻.

El ARD fue significativo ($F=3.6$, $p=0.017$) y 78.2 % de la varianza total fue varianza constreñida, es decir, que el 78.2% de la variabilidad de las variables biogeoquímicas dinámicas fue explicada por la estructura de la microbiana. De manera específica, para la varianza constreñida, el eje 1 explicó el 74.7% de esta y el eje 2 explicó el 14.2%. Por otro lado, se observó que las bacterias G⁻ se relacionaron con la actividad de las enzimas DHG y FOS, además del Cmic y los NO₃⁻, mientras que las bacterias G⁺ se relacionaron con la actividad de las enzimas BG, POX, LIP, NAG y LAP (Figura 24).

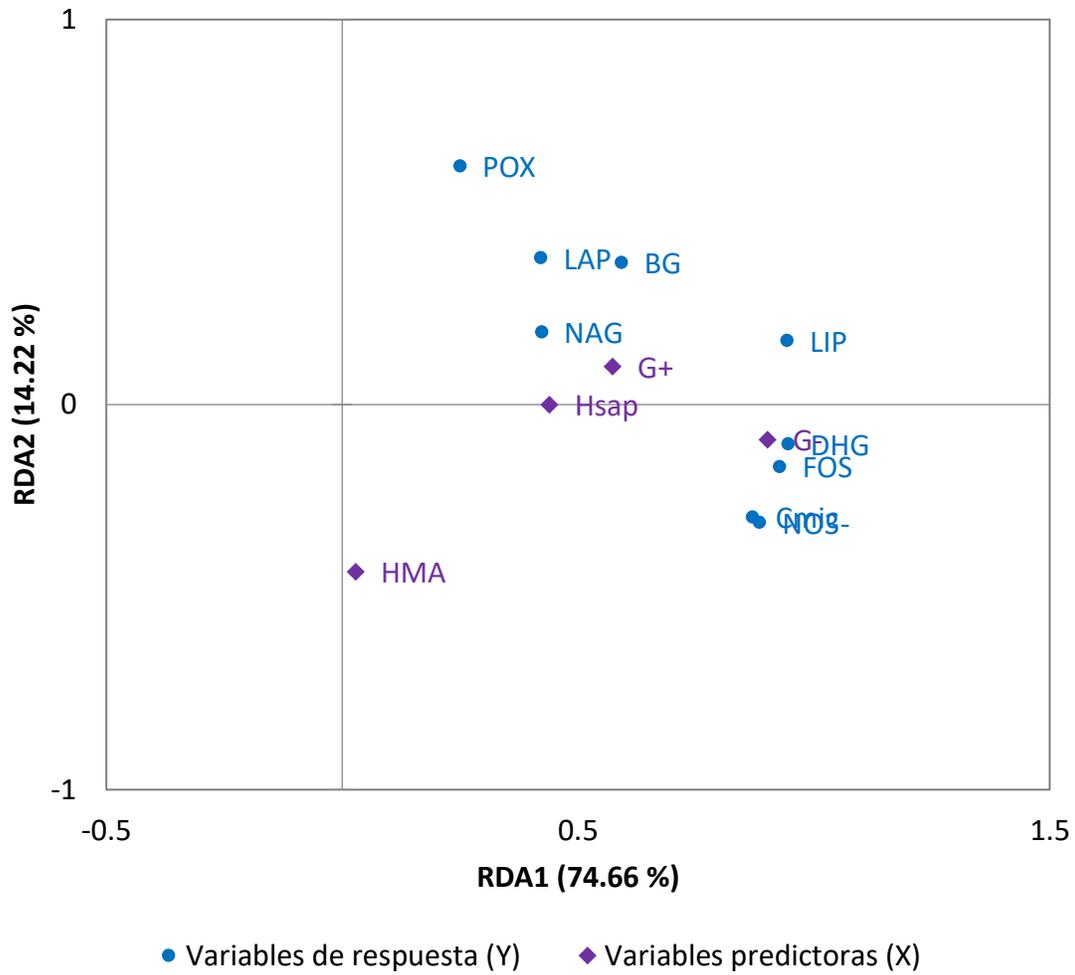


Figura 24. Análisis de redundancia de los datos de estructura microbiana (variables predictoras) vs variables dinámicas de actividad enzimática, Cmic y NO₃⁻ (variables de respuesta). G⁺=bacterias gram positivas, G⁻=bacterias gram negativas, HMA= hongos micorrícicos arbusculares, Hsap=hongos saprobios, BG= β-glucosidasa, POX=polifenol oxidada, LIP=lipasa, NAG= N-acetil glucosaminidasa, LAP= leucin aminopeptidasa, FOS=fosfatasa y DHG=deshidrogenasa.

8. DISCUSIÓN

8.1. Importancia del análisis de la dinámica agrícola de Milpa Alta

Durante el periodo de análisis (2010–2019) se ha mantenido la dominancia del cultivo de nopal, maíz de grano y avena forrajera (Figura 8), cultivos que son considerados los más representativos de la región, debido a su importancia sociocultural y económica. Sin embargo, se ha observado una disminución gradual en la superficie sembrada de cada uno de estos cultivos. Específicamente, la superficie disminuyó del 2010 al 2019 en 1 895 ha para el nopal, 1 405 ha para el maíz y 361 ha para la avena (Tabla 2). Esta disminución puede estar asociada a diversos factores, tales como: el aumento en la siembra de otras especies vegetales (manzana, papa, zanahoria, entre otros), a procesos de urbanización que conllevan a cambios en las actividades productivas de la región y, finalmente, a la disminución en la rentabilidad del cultivo, relacionada a cuestiones ambientales, económicas y sociales (Bonilla, 2009, 2014; Lopez et al., 2017).

El volumen y valor de la producción disminuyeron gradualmente como consecuencia de la reducción en la superficie sembrada de los cultivos (Tabla 4 y Tabla 5). En el caso del nopal lo anterior cobra relevancia, ya que su producción forma parte de las tradiciones socioculturales de la región. Además, representa una fuente de ingreso económico para los productores, debido a que tiene una gran variedad de uso, ya sea como alimento, en la fabricación de productos medicinales, cosméticos, como forraje para ganado, en la producción de biocombustible e incluso para exportación (SADER, 2021). Aunado a esto, la Cd. Mx. es el segundo estado más importante en cuanto a la producción de nopal a nivel nacional, y más del 90% de esta producción proviene de la alcaldía de Milpa Alta (Rendón-Trejo et al., 2017; SADER, 2019; 2021).

El cultivo de nopal presentó los valores más altos de rendimiento, los cuales fluctuaron en un intervalo de 62 a 103 t ha⁻¹ y generalmente fueron superiores a la media nacional que es de 71 t ha⁻¹. El maíz presentó valores que fluctuaron entre 1 y 1.8 t ha⁻¹, los cuales están por debajo de la media nacional registrada en 3.2 t ha⁻¹ (Figura 9) (Montesillo-Cedillo, 2016; SADER, 2022). Este rendimiento es considerado producción a pequeña escala y en su totalidad se comercia localmente o es utilizado para autoconsumo. La disminución

en la superficie sembrada y en el rendimiento son factores que indican la existencia de problemas asociados a la producción de maíz. Esto es crítico debido a que este cultivo es fundamental en la seguridad alimentaria en el país y en particular para la Cd. Mx. Por otro lado, para ambos cultivos no hay un patrón claro entre los valores de rendimiento con la temperatura y precipitación media anual, lo cual fue confirmado con una correlación de Pearson (Tabla 6), en la que no se registraron correlaciones significativas entre los parámetros analizados. Lo anterior indica que las condiciones ambientales podrían no explicar el rendimiento observado a lo largo del periodo 2010–2019 y, que esto probablemente responde a cuestiones de manejo.

Con la ayuda de las encuestas (Ver ANEXO 1) se logró identificar y caracterizar el manejo de los agroecosistemas de nopal y maíz más representativos de la región de Villa Milpa Alta. En esta región, los agroecosistemas de nopal mantienen una fertilización con estiércol. Esto incrementa la MO en el suelo, y se ha observado que aumenta el contenido nutrimental de los cladodios, posible razón que ha sustentado esta práctica durante décadas (Murillo-Amador et al., 2005; Santiago-Lorenzo et al., 2016). Aunado a esto, el control de arvenses se realiza de forma manual, mecánica y con el uso de agroquímicos. El uso de agroquímicos responde a cuestiones económicas para la compra de los herbicidas y su cantidad depende de las hectáreas de cultivo. El control mecánico depende de si el productor cuenta con un motocultor, cuyo precio va de 16 000 hasta 30 000 pesos mexicanos, posible razón que imposibilita su amplio uso y por la que aún se mantiene el control manual de arvenses. Ambas están reportadas en Villa Milpa Alta, así como en el Estado de México y el estado de Morelos (Aguilar-Carpio et al., 2016; Márquez-Berber et al., 2012).

Por su parte, los agroecosistemas de maíz en Villa Milpa Alta presentaron una fertilización considerablemente menor y un control manual de arvenses. Estas características son contrastantes con el manejo y producción en otras regiones de Milpa Alta, como Santa Ana Tlacotenco (De León González et al., 2018) y en el resto del país, donde es más común un manejo convencional con uso de maquinaria, fertilizantes minerales y herbicidas (Ibarrola-Rivas et al., 2020).

Por las razones anteriores, el entendimiento de la dinámica agrícola en la alcaldía de Milpa Alta a partir del análisis de datos y de la realización de encuestas es fundamental, ya

que brinda información sobre cómo la producción ha cambiado durante la última década, y a qué factores podrían estar asociados estos cambios y de cómo estos son percibidos por los productores. Toda esta investigación puede ser utilizada en la toma de decisiones por parte de los productores y el sector gubernamental con el objetivo de establecer estrategias en conjunto para mantener o mejorar la producción agrícola de la región estudiada.

8.2. Modificación de las propiedades edáficas como consecuencia del manejo agrícola

8.2.1. Propiedades físicas y químicas del suelo

El cultivo de nopal bajo los dos tipos de manejo no presentó diferencias en las propiedades físicas y químicas del suelo, pero ambos manejos fueron diferentes del suelo con cultivo de maíz (Tabla 7). Estas diferencias podrían estar asociadas al tipo de manejo de cada sistema, que se resumen en la perturbación física y poca fertilización en los agroecosistemas de maíz, y baja perturbación física y fertilización orgánica prolongada en los agroecosistemas de nopal.

La labranza es una práctica que tiene por objetivo disminuir la compactación y aumentar la porosidad del suelo para mejorar el crecimiento de las plantas. Sin embargo, esta práctica es efectiva de manera inmediata, pero a largo plazo promueve la pérdida de agregación y por ende de estructura del suelo, propiedades que definen el grado de compactación del suelo e infiltración de agua. La densidad aparente y la conductividad hidráulica son parámetros que permiten evaluar esta compactación e infiltración, respectivamente (Badalíková, 2010; ONUAA, 2022). En este caso, los agroecosistemas de maíz que presentan una constante perturbación del suelo por labranza fueron los que presentaron mayor densidad aparente (1.18 g cm^{-3}) y menor conductividad hidráulica (0.19 mm min^{-1}). Estos valores por sí solo no indican graves problemas de compactación, pero sí indican que hay menor porosidad y mayor compactación en comparación con los suelos de los agroecosistemas de nopal. Estos últimos presentaron una densidad aparente menor (0.75 g cm^{-3}) y mayor conductividad hidráulica ($0.44 - 0.49 \text{ mm min}^{-1}$), atribuido a la baja perturbación física y al mayor contenido de MO que promueve la formación y mantenimiento de la estructura del suelo.

En las propiedades químicas, los suelos de los agroecosistemas de nopal presentaron pH alcalinos (>8) y mayor conductividad eléctrica (siete veces mayor que MORG). Se ha

reportado que la fertilización orgánica prolongada aumenta la concentración de iones como el Ca^{2+} (Zhang et al., 2009; Wan et al., 2021), los cuales que pueden formar sales como el carbonato de Ca (CaCO_3) y esto puede aumentar el pH y la conductividad eléctrica del suelo. Así mismo, esta práctica aumenta la concentración de nutrientes en el suelo como el N y P, debido a que proporciona una entrada constante de MO al sistema (Kaur et al., 2008; Lima et al., 2009; Ludwig et al., 2010; Tian et al., 2017). En este caso, los agroecosistemas de nopal, bajo los dos tipos de manejo, presentaron mayor concentración y contenido de N y P totales en el suelo, en comparación con los agroecosistemas de maíz, en los que la fertilización es considerablemente menor.

Por otro lado, las concentraciones de nutrientes en el suelo de NCQ fueron prácticamente iguales a NORG (Tabla 8), contrario a lo reportado en algunos artículos donde se menciona que el uso de pesticidas puede disminuir la disponibilidad de N y P en el suelo (Malik et al., 2017; Mandal et al., 2020; Meena et al., 2020). Esto probablemente indica que el uso de herbicidas en NCQ no tiene un efecto considerable, o que el efecto de la adición de estiércol es mayor y está enmascarando al uso de herbicidas. Sin embargo, se requiere de más estudios para confirmar estas hipótesis.

8.2.2. Cambios en el C edáfico

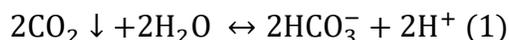
Almacenamiento de C (orgánico e inorgánico)

La fertilización orgánica prolongada y la baja o nula perturbación física del suelo son dos prácticas ampliamente reportadas que aumentan el almacenamiento del C edáfico (Crews y Rumsey, 2017). En este caso, los agroecosistemas de nopal, que mantienen estas dos prácticas, fueron los que presentaron mayor concentración (Figura 11) y contenido de C total en el suelo (Figura 13). Esto era de esperarse ya que ambos son fertilizados anualmente con estiércol, enmienda orgánica que se caracteriza por incorporar altas cantidades de C al suelo (Triberti et al., 2008; Zhongqi et al., 2016; Zavatarro et al., 2017). Por otro lado, los agroecosistemas de maíz presentaron bajas concentraciones de C total en el suelo. Esto se debe a que la fertilización que se realiza es comparablemente menor que en los agroecosistemas de nopal, además de que podría ser consecuencia de la continua labranza que se ha mantenido durante la historia de cultivo de este suelo, y que ha ocasionado una

constante pérdida de C a través del proceso de mineralización y una disminución en los procesos de estabilización física del C (Varvel y Wilhem, 2010).

Debido a los pH alcalinos que presentaron los suelos de los agroecosistemas de nopal en los dos tipos de manejo, se determinó la concentración de Cinorg en el suelo, el cual se encuentra en forma de bicarbonatos y carbonatos. Sin embargo, si bien se puede deducir que se tratan de carbonatos secundarios (debido a que en la región no hay material parental calcáreo que origine carbonatos primarios), es difícil entender su origen en este tipo de agroecosistemas. A continuación, se describen las dos posibles rutas de formación de estos carbonatos: la ruta abiótica, que se refiere a los carbonatos pedogenéticos, y la ruta biótica, que involucra el metabolismo de plantas y microorganismos en el suelo (Figura 25).

Los carbonatos pedogenéticos se forman en los suelos a través de reacciones de disolución y precipitación. Existen varias rutas por las cuáles se pueden formar, una de ellas es la que se da a partir de la presencia de CO₂, agua y cationes de Ca²⁺ como se muestra en las siguientes reacciones de disolución y precipitación (Zamanian et al., 2016, An et al., 2019):



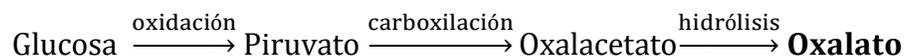
El agua y el CO₂ son elementos presentes en los agroecosistemas de nopal, mientras que el Ca²⁺ puede provenir de la fertilización con estiércol (Zhang et al., 2009; Wan et al., 2021) y de las concentraciones propias del suelo producto del intemperismo de las rocas, por lo que esta podría ser una posible ruta de formación de carbonatos en estos sistemas. Sin embargo, la precipitación de carbonatos toma lugar cuando disminuye el contenido de agua y la concentración de CO₂ (denominada como presión parcial del CO₂ o pCO₂) (Andrews y Schlesinger, 2001), procesos no dominantes en los agroecosistemas de nopal, ya que estos presentan un porcentaje de humedad de 35–37% y alta producción de CO₂ debido a la actividad microbiana. No obstante, no se descarta la ruta, ya que esta podría ser más dominante en temporada de secas, que según los datos climáticos de la región es de noviembre a abril.

Por otro lado, la presencia de Cinorg en estos sistemas puede deberse a la formación de carbonatos biogénicos a partir de un proceso denominado biomineralización. La biomineralización es el proceso por el cual los organismos forman minerales. La ocurrencia de este fenómeno se ha registrado en distintas familias de plantas como las cactáceas y tiene como principal función la regulación de los niveles de Ca, la desintoxicación de metales o ácido oxálico, contrarrestar el estrés hídrico, salino o térmico, y la protección contra herbivoría y patógenos (He et al., 2014).

Particularmente, en la especie *O. ficus-indica*, especie que se cultiva en los agroecosistemas de nopal estudiados, se han identificado diversas estructuras cristalinas en los cladodios, tales como cloruro de potasio (KCl), peroxidifosfato de potasio ($K_4P_2O_8$), óxido de magnesio (MgO), carbonato de calcio ($CaCO_3$), bicarbonato de calcio y de magnesio ($CaMg(CO_3)_2$) y oxalato de calcio monohidratado ($Ca(C_2O_4) \cdot (H_2O)$) (Contreras-Padilla et al., 2015). En este caso, solamente fue confirmada la presencia de oxalatos de Ca con la difracción de rayos X determinada en los cladodios de nopal (Figura 22).

Los oxalatos de Ca en el suelo pueden disociarse y ser una fuente importante de Ca^{2+} y promover la precipitación de $CaCO_3$. Estos oxalatos de Ca se forman a partir del ácido oxálico, compuesto orgánico altamente sintetizado por las plantas. Se ha observado que su formación no está ligada directamente con la fotosíntesis, sino que se sintetiza a partir del C fijado durante la fotosíntesis (He et al., 2014). Hay varias vías potenciales para la biosíntesis del ácido oxálico en las plantas y son: 1) *oxidación de glicolato y glioxilato*, sustratos formados como producto de la fotorespiración, 2) *ácido L-ascórbico*, cofactor de enzimas implicadas en la fotosíntesis, pero no se ha identificado las enzimas responsables de esta vía, y 3) *oxidación de oxalacetatos*, proceso descrito en pocas especies de plantas. En este sentido la vía más probable podría ser la 1); sin embargo, la fotorespiración es un proceso que domina en plantas C_3 , pero que está inhibido en plantas C_4 y MAC como los nopales. En contraparte, la ruta 2) del ácido ascórbico, tiene el potencial de ser un buen sustrato para la formación de ácido oxálico por su gran abundancia en las plantas. Se han realizado estudios de radiomarcaje de C y el ácido ascórbico dio lugar al ácido oxálico, y este a su vez se utilizó en la formación de cristales de oxalatos de Ca (Franceschi y Nakata, 2005).

Se considera que la integración de los cladodios de nopal al suelo representa una fuente de CaCO_3 en el suelo y además la disolución de los oxalatos de Ca permite la liberación de Ca^{2+} , el cual puede reaccionar nuevamente con iones bicarbonato y precipitar en forma de CaCO_3 . Esta última ruta también puede ser promovida por el metabolismo de hongos y bacterias. Los hongos son capaces de secretar al medio iones oxalato ($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$) como subproductos de su metabolismo a partir de las siguientes reacciones:



Posteriormente, los iones oxalatos liberados pueden reaccionar en el medio y formar oxalatos de Ca, los cuales pueden ser utilizados como una fuente de C por diversos grupos de bacterias, como las bacterias oxalatróficas especializadas en este proceso. Estas bacterias obtienen energía a partir de la oxidación de los oxalatos de Ca en glioxilato y formiato, procesos en los que se obtienen como subproductos iones HCO_3^- , los cuales son liberados a la solución del suelo y en presencia de Ca^{2+} pueden formar CaCO_3 (Verrecchia et al., 2006) (Figura 25).

Estos procesos en conjunto pueden haber ocasionado el aumento de pH en estos sistemas. Y es justamente este pH alcalino el que ha permitido la estabilización del Cinorg, por lo que el mantenimiento del pH puede ser crucial en estos sistemas para impedir su pérdida en el suelo. Finalmente, aunque el Cinorg en estos sistemas representó aproximadamente el 2 % del C total del suelo, esto abre una nueva pregunta acerca de cómo el manejo agrícola, específicamente la fertilización con estiércol y la reintegración de los cladodios al suelo pueden promover la formación y mantenimiento de formas inorgánicas de C. Sin embargo, aún no está completamente claro su potencial como una forma de secuestro de C y más aún ha sido poco estudiado en agroecosistemas (Monger et al., 2015).

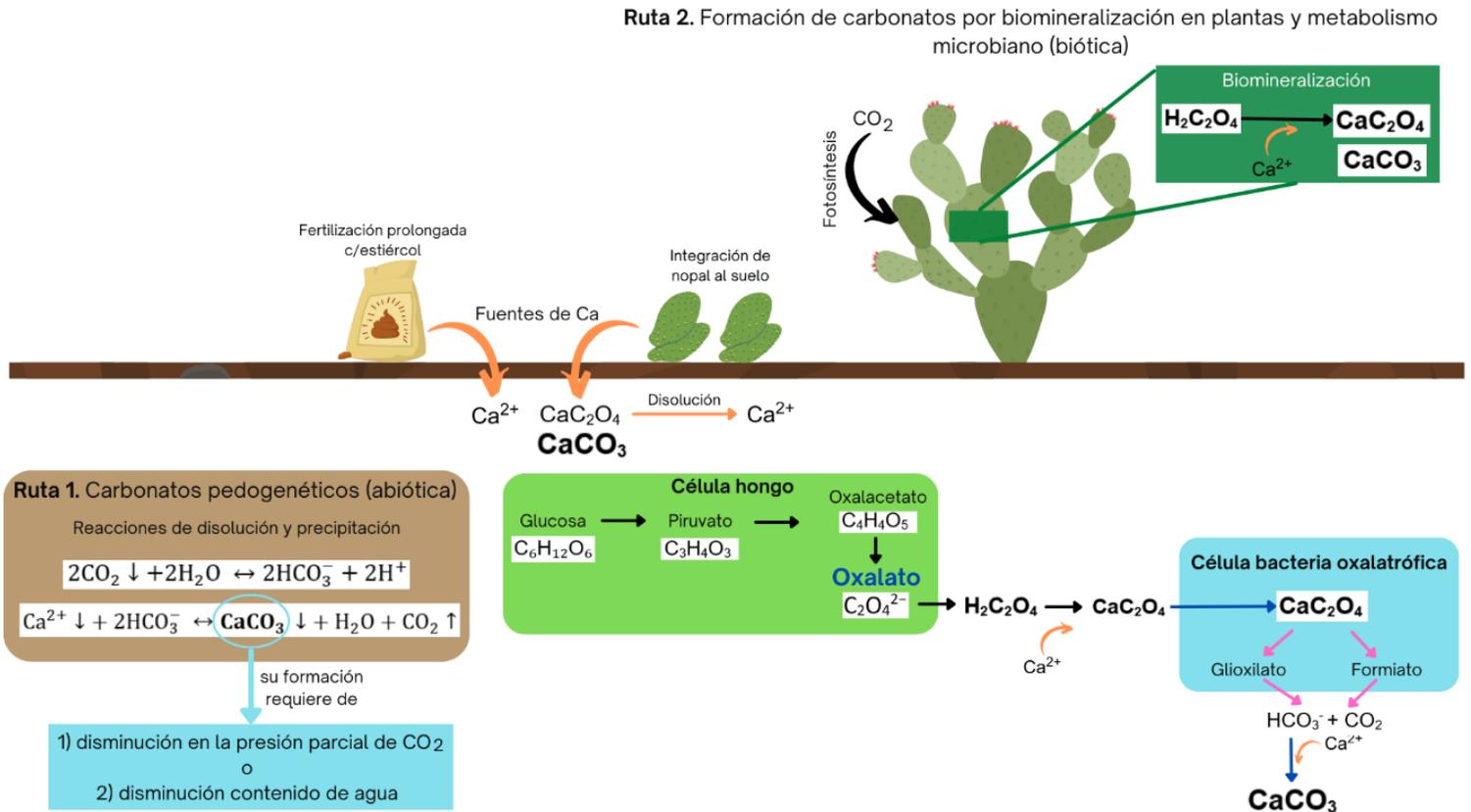


Figura 25. Modelo de las rutas principales de formación de C inorgánico en el suelo en los agroecosistemas de nopal. H^+ =ion hidrógeno, CO_2 =dióxido de carbono, H_2O =agua, Ca^{2+} ion calcio, $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ =ion oxalato, $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ =ácido oxálico, CaC_2O_4 =oxalatos de calcio, HCO_3^- =ion bicarbonato, CaCO_3 =bicarbonato de calcio.

Fracciones de materia orgánica del suelo

Se obtuvieron cuatro fracciones de MOS en cada tipo de manejo: i) materia orgánica particulada libre (MOPL), ii) materia orgánica particulada ocluida (MOPO), iii) materia orgánica asociada a minerales gruesa $>20\mu\text{m}$ (MOAMG) y iv) materia orgánica asociada a minerales fina $<20\mu\text{m}$ (MOAMF). Cada una de ellas presenta teóricamente una protección diferente ante el ataque microbiano: sin protección para MOPL, protección baja para MOPO y protección alta para MOAMG y MOAMF (Lavallee et al., 2020). Posteriormente, se utilizó el contenido de COT para calcular su distribución en cada una de las fracciones.

Los agroecosistemas de nopal bajo los dos tipos de manejo presentaron la misma distribución de C, es decir, 50% del C se distribuyó en las fracciones particuladas y el resto en la fracción asociada a minerales (Figura 15). Esta distribución está asociada al tipo de

manejo que presentan estos agroecosistemas. Se sabe que la fertilización con estiércol tiende a aumentar la MO, así como sus respectivas fracciones, principalmente la fracción particulada al ser esta un componente importante en el estiércol (Cookson et al., 2005; Gong et al., 2009). Ahora, si bien esta fracción necesita de mayor inversión de energía para su descomposición por parte de la comunidad microbiana (debido a su mayor tamaño), también es la fracción que es más susceptible a pérdida, debido a que no presenta mecanismos de protección (Lavalley et al., 2020). Esto implica que los agroecosistemas de nopal podrían ser vulnerables ante la pérdida de las fracciones particuladas, bajo escenarios en los que se impulse su descomposición, por ejemplo, aumentos en la temperatura que incentiven el metabolismo microbiano (von Lützow y Kögel-Knabner, 2009).

En el caso del agroecosistema de maíz, las fracciones particuladas representaron el 20% del COT contenido en el suelo. Esto probablemente asociado a la perturbación física a la que están sujetos estos sistemas. Se ha observado que la MOPL disminuye rápidamente en el suelo, debido a que es más susceptible a cambios por el manejo agrícola (Liu et al., 2006); mientras que, la constante perturbación promueve la pérdida de MOPO atribuida al rompimiento de los agregados del suelo y a la exposición de la fracción a procesos de mineralización (Plaza et al., 2013; Crew y Rumsey, 2017). Por otro lado, se resalta que hace 20 años los agroecosistemas de maíz fueron agroecosistemas de nopal, y si estos tuvieron el mismo manejo que los sistemas actuales, los agroecosistemas de maíz podrían ser un reflejo de las consecuencias de la transformación de un sistema donde se cultiva nopal a un sistema donde se cultiva maíz.

De manera general, se puede observar que el manejo es un factor que modifica las fracciones de la MOS, así como la distribución del C en las mismas. El estudio del cambio de estas fracciones puede ayudar a comprender mejor la dinámica de la MOS y del C, con lo que se podrían generar modelos de respuesta ante cambios ambientales y de manejo (Rocci et al., 2021).

Relaciones estequiométricas

Con los datos de las concentraciones totales de C, N y P, se obtuvieron las relaciones estequiométricas C:N, C:P y N:P, las cuales son utilizadas como indicadores funcionales de

la demanda y consumo de un elemento con respecto a otro, y permiten comprender la asignación de recursos de la comunidad microbiana en condiciones limitantes de nutrientes (Zechmeister-Boltenstern et al., 2015; Fanin et al., 2016).

Los cocientes de nutrientes no presentaron diferencias significativas entre los distintos tipos de manejos (Figura 14). Sin embargo, se observó que el cociente C:N fue mayor en los agroecosistemas de nopal en comparación con los de maíz. Valores altos en este cociente generalmente se asocian con mayor acumulación de MO, que ocasiona que exista mayor proporción de C con respecto al N (Coonan et al., 2020) y que concuerda con la entrada constante de C al sistema debido a la fertilización con estiércol. Por otro lado, el cociente C:P presentó valores similares en los tres tipos de manejo, lo que indica que las concentraciones de C y P mantienen una proporcionalidad en estos sistemas a pesar de que en el agroecosistema de maíz hay menor concentración de C y P. Finalmente, el cociente N:P fue mayor en el cultivo de maíz debido a que en este sistema hay menor concentración de P con respecto al N y ocasiona que el cociente aumente, estos cocientes pueden ser consecuencia de la fertilización en menor cantidad que se realiza en este sistema.

8.2.3. Cambios en la estructura, actividad y eficiencia de la comunidad microbiana del suelo

Estructura de la comunidad microbiana

La adición de estiércol modifica la composición de la comunidad microbiana debido a la entrada de MO que provee de nutrientes y mantiene el crecimiento y abundancia de los microorganismos (Zhang et al., 2012; Tian et al., 2017). En el suelo de NORG se observó mayor biomasa en comparación con NCQ y MORG de bacterias G^- , bacterias G^+ y hongos (Figura 16A), estos dos últimos grupos generalmente asociados a la utilización de compuestos de mayor complejidad (Xu et al., 2015; Fanin et al., 2019). Esto se apoya en el estudio de Zhong et al. (2010) en el que se presentó el mismo comportamiento en los tratamientos con adición de estiércol.

Los suelos de NCQ y MORG presentaron una biomasa de grupos microbianos similar y menor en comparación con NORG. En el caso de MORG se atribuye a la menor entrada de MO al sistema, mientras que en NCQ se atribuye al uso de agroquímicos, los cuales modifican la composición de la comunidad microbiana y su impacto se ve reflejado en la disminución de hongos y bacterias (Bünemann et al., 2006; Meena et al., 2020). Esto fue

reportado por Chávez-Ortíz et al. (2022), trabajo en el que se evaluó el impacto del uso de glifosato en la abundancia relativa de grupos microbianos en cultivos de nopal. Ellos observaron menor abundancia de hongos y bacterias G⁻ en la parcela con adición de glifosato en comparación con la parcela control. Sin embargo, no se ha ahondado en la identidad taxonómica de los grupos microbianos que son afectados por el manejo con este herbicida lo cual abre una nueva pregunta para investigaciones futuras.

Por otro lado, el uso de herbicidas, específicamente de aquellos con ingredientes activos como el glifosato (como es el caso de NCQ), disminuyen la micorrización de raíces por HMA en un 40%, proceso que se relaciona con en el establecimiento de interacciones mutualistas para mejorar la obtención de nutrientes (Meena et al., 2020). Sin embargo, en este caso no se observaron disminuciones de la biomasa de HMA en NCQ con respecto a los otros manejos (Figura 16A). Este resultado podría ser consecuencia de la fertilización con estiércol, la cual se ha registrado que promueve el crecimiento de los HMA (Gryndler et al., 2006; Qin et al., 2015), y podría estar amortiguando el efecto del pesticida.

Finalmente, en lo suelos de los agroecosistemas de nopal bajo los dos tipos de manejo hubo mayor proporción de bacterias con respecto a los hongos (Figura 16B). La fertilización con estiércol puede modificar la comunidad bacteriana al incorporar al suelo nutrientes y bacterias exógenas, factores que pueden enriquecer de bacterias el suelo de los agroecosistemas de nopal (Wang et al., 2021; Yang et al., 2022). Otro factor que determina la actividad de las comunidades microbianas es el pH. Por ejemplo, Rousk et al. (2010) y Wang et al. (2019) encontraron correlaciones positivas entre la abundancia y riqueza de bacterias conforme aumentaba el pH. Característica que coincide con los agroecosistemas de nopal que presentaron pH alcalinos. Los resultados anteriores podrían ser complementados con la determinación de la composición taxonómica y funcional que está presente en cada sistema, lo cual sería crítico para analizar las implicaciones que tiene el manejo sobre la comunidad microbiana y la dinámica de la MOS (McGuire y Treseder, 2010).

Despolimerización de nutrientes, inmovilización y mineralización de C

Una de las funciones de los microorganismos, esencial en el mantenimiento de la fertilidad y productividad de los agroecosistemas, es el ciclaje de nutrientes a través de la descomposición de la MOS. Este proceso biogeoquímico requiere de la síntesis intracelular

de enzimas que funcionan como catalizadores en reacciones de hidrólisis y oxidación relacionadas con la despolimerización de compuestos orgánicos en el ambiente extracelular (Shukla y Varma, 2010; Paul, 2014). La síntesis de enzimas es sensible a cambios en las condiciones físicas y químicas del medio, como el pH, humedad, temperatura, concentración de C, N y P (Sinsabaugh et al., 2008; Blagodatskaya et al., 2016; Puissant et al., 2019), las cuales son modificadas con prácticas agrícolas como la fertilización orgánica (Liu et al., 2020).

La adición de estiércol es una práctica que aumenta la MO y, por ende, la concentración de nutrientes, los cuales, a partir de su despolimerización por la acción de exoenzimas suplen de energía a la comunidad microbiana (Triberti et al., 2008; Zavatarro et al., 2017). En este caso, se observó que la actividad de las enzimas asociadas a la despolimerización de C no fue diferente en los agroecosistemas de nopal y fue mayor en comparación con el agroecosistema de maíz (Figura 18A, 18B y 18C). Lo anterior se atribuye a que en los agroecosistemas de nopal hay mayor concentración de C orgánico con una composición química diversa como consecuencia de la fertilización con estiércol y de la integración de los residuos de nopal al suelo, enriquecidos de carbohidratos, proteínas y lípidos (INEGI, 2007; Maki-Díaz et al., 2015; Inglese et al., 2018).

Por otro lado, en NCQ se observó mayor actividad de enzimas asociadas a la hidrólisis de quitina y péptidos (NAG y LAP, respectivamente) (Figura 19A y 19B). Esta actividad fue 3 y 5 veces mayor que en NORG y MORG, y podría estar asociada a dos cuestiones: i) que en NCQ hay mayor necesidad de síntesis de enzimas para la despolimerización del N, o ii) a que la disminución de la biomasa de hongos y bacterias en NCQ tiene un impacto en la síntesis de las enzimas asociadas a la despolimerización del N y en la utilización de las paredes celulares de estos como fuente de N (Gow et al., 2017). Aunado a esto, los pesticidas también pueden promover o inhibir la actividad de varias enzimas dentro de las denominadas hidrolasas, tales como las ya mencionadas (Mandal et al., 2020).

La alta actividad de la enzima DHG en los agroecosistemas de nopal en comparación con los de maíz (Figura 21A), puede atribuirse a la mayor concentración de nutrientes presentes en estos sistemas que promueven la actividad general de los microorganismos. Por otro lado, se observó la misma tendencia (aunque no significativa) para la enzima FOS

(Figura 20A), y se asocia a que en los cultivos de nopal hay mayor concentración de P, que se ve reflejado en aumentos en la actividad de la enzima.

La mineralización es el paso final en el proceso de descomposición y se refiere a la transformación de los compuestos orgánicos a compuestos inorgánicos como el CO₂ (Chapin et al., 2011). La inmovilización de C en células microbianas es el resultado de la asimilación de todo aquel C que no ha sido utilizado para la obtención de energía o para la secreción extracelular de enzimas (Stevenson y Cole, 1999). En los agroecosistemas de nopal, la fertilización orgánica funciona como una entrada de C al sistema que promueve ambos procesos (Figura 17A y 17B) (Guo et al., 2019). Estos aumentos podrían estar asociados a la composición química del estiércol. En esta enmienda, más del 25% de su masa es C orgánico, constituido de una gran variedad compuestos como la celulosa y hemicelulosa con un grado de descomposición. Este proceso de digestión previo en los animales ocasiona que el C orgánico sea más lábil y fácilmente utilizable por la comunidad microbiana (Zhongqi et al., 2016; Mahajan y Varma, 2022).

En el caso del aumento de la mineralización, este fenómeno está descrito como *priming effect*, y se refiere al aumento en la tasa de descomposición de la MOS después de la entrada de MO fácilmente mineralizable, y que a menudo se ve reflejada en aumentos en la actividad microbiana, debido a la liberación de nutrientes durante la descomposición (Fontaine et al., 2003). Este fenómeno es considerado una fuente de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera y representa un problema ambiental a escala global (Chadwick et al., 2011). En este sentido, sería adecuado evaluar con balances de C si estos agroecosistemas de nopal funcionan como un emisor de GEI. En contraparte, en el agroecosistema de maíz los procesos de inmovilización y mineralización de C están reducidos y se asocia a que, en este sistema, la comunidad microbiana probablemente se encuentra en condiciones más estresantes con respecto a la disponibilidad de C, el cual solamente es utilizado para mantener su actividad metabólica básica y no tanto para aumentar su biomasa.

A partir de los análisis de regresión múltiple se obtuvo que el Cmic y la BG tuvieron un efecto positivo en la mineralización de C. Esto se explica porque la BG despolimeriza compuestos de cadena corta y pone disponible el C para su inmovilización dentro de la

biomasa de los microorganismos. En contraparte, las bacterias G^+ presentaron un efecto negativo en la mineralización de C, lo que significa que a mayor abundancia de este tipo de bacterias decrece la mineralización (Tabla 11). Esto podría estar asociado a que las bacterias G^+ utilizan el C proveniente de la MO de mayor complejidad molecular (Fanin et al., 2019). Finalmente, para las variables funcionales solo tuvo efecto positivo el cociente C:N, es decir, que a mayor relación C:N aumenta la mineralización de C.

Eficiencia metabólica de la comunidad microbiana: actividad enzimática específica y coeficiente metabólico

La síntesis de enzimas, así como la mineralización de C son procesos que requieren de la inversión de energía metabólica para su realización (Kutřlek y Nielsen, 2015). Por ejemplo, la síntesis de exoenzimas se realiza solamente cuando es necesario para los microorganismos (Caldwell, 2005; Shukla y Varma, 2010). Por esta razón, y para entender esta eficiencia metabólica por parte de la comunidad microbiana se utilizan indicadores como la actividad enzimática específica (AEE) (Raiesi y Beheshti, 2014) y el coeficiente metabólico (qCO_2) (Wardle y Ghani, 1995), los cuales se obtienen de ponderar la actividad enzimática y la mineralización de C con respecto a la biomasa microbiana. Estos indicadores se interpretan como una medida de la energía necesaria para mantener la actividad metabólica (refiriéndose a la producción de CO_2 y a la síntesis de enzimas) con relación a la energía necesaria para la síntesis de biomasa. Específicamente, valores altos indican poca eficiencia en el uso de energía y viceversa, y esta eficiencia disminuye a medida que aumenta el estrés en el medio (Yan et al., 2003; Raiesi y Beheshti, 2014; Chávez-Vergara et al., 2016).

Así, la AEE de todas las enzimas, así como el qCO_2 presentaron valores considerablemente mayores en el agroecosistema de maíz en comparación con los agroecosistemas de nopal bajo ambos tipos de manejo (Tabla 10). Lo que indica que la comunidad microbiana en este agroecosistema, invierte más energía en el mantenimiento de su actividad metabólica básica, con respecto a su crecimiento en forma de biomasa. Estos valores indican que estos sistemas presentan condiciones comparablemente más desfavorables que los agroecosistemas de nopal, atribuido a la menor disponibilidad de nutrientes producto del tipo de manejo que presentan estos sistemas (menor fertilización, así como mayor perturbación física que promueve pérdidas de MOS). Sin embargo, los datos

sugieren que estos sistemas podrían no encontrarse en condiciones de elevado estrés, ya que aún son productivos.

8.2.4. Modelo general

En síntesis, se observó que la fertilización, la labranza y el uso de agroquímicos modificaron las propiedades edáficas del suelo. Específicamente, en los cultivos de nopal se detectaron mejores condiciones físicas, pero un pH elevado, mayor concentración de nutrientes, actividad biológica y eficiencia metabólica. Todo lo anterior asociado a la fertilización orgánica con estiércol y a la baja perturbación física que presentan estos agroecosistemas. El agroecosistema de maíz mostró condiciones menos favorables, ya que presentó menor concentración de nutrientes, menor abundancia de grupos microbianos y menor actividad enzimática y eficiencia metabólica. Esto asociado a la constante perturbación física del suelo y a la reducida entrada de MO al sistema. En la distribución de C, se observó que el C se distribuye un 50% en la fracción asociada a minerales en los agroecosistemas de nopal mientras que en los de maíz es de 80% (Figura 26).

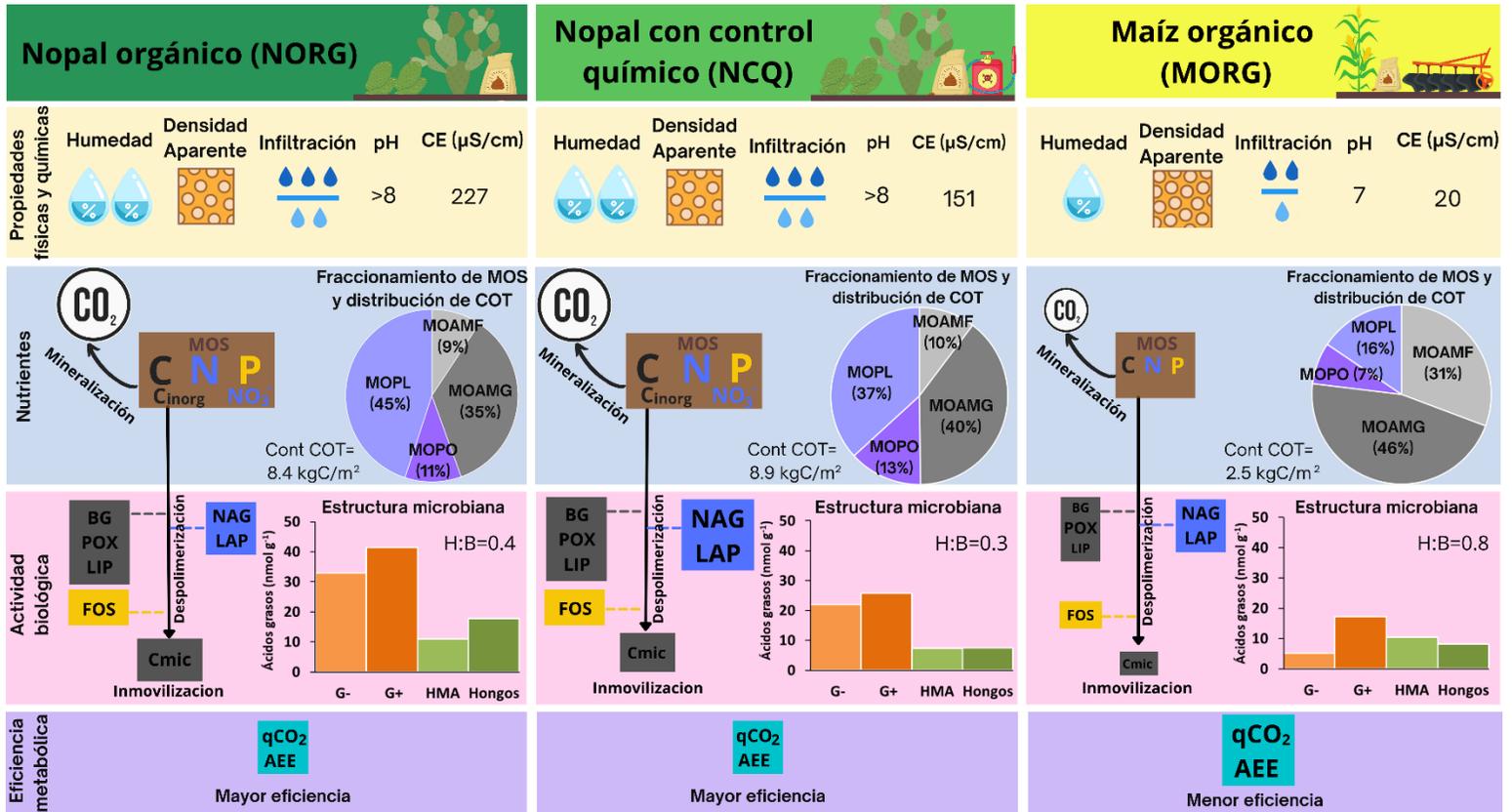


Figura 26. Modelo general del estado edáfico en los tres tipos de manejo estudiados y ubicados en la alcaldía de Milpa Alta, Cd. Mx., México. En el modelo se muestra de lado izquierdo cuatro apartados: 1) *Propiedades físicas y químicas*, 2) *Nutrientes*, representados con letras y color, carbono (C) (gris oscuro), nitrógeno (N) (azul) y fósforo (P) (amarillo); además se muestra la distribución de COT en cada una de las fracciones obtenidas en el fraccionamiento de MOS, 3) *Actividad biológica*, representada con la actividad enzimática asociada a la despolimerización de cada nutriente y se muestra la concentración de ácidos grasos para cada grupo microbiano, y 4) *Indicadores de eficiencia metabólica*, representados por el coeficiente metabólico (qCO₂) y la actividad enzimática específica (AEE). El tamaño de letra y de las cajas indica mayor o menor valor de cada uno de los parámetros evaluados. Abreviaturas: CE= conductividad eléctrica, MOS=materia orgánica del suelo, Cinorg=C inorgánico, COT=C orgánico total, NO₃=nitratos, MOPL=materia orgánica particulada libre, MOPO=materia orgánica particulada ocluida, MOAMG=materia orgánica particulada asociada a minerales gruesa (>20 μm), MOAMF=materia orgánica particulada asociada a minerales fina (<20 μm), BG=β-glucosidasa, LIP=lipasa, POX=polifenol oxidasa, NAG=N-acetil glucosaminidasa, LAP= Leucina amino peptidasa, FOS=fosfatasa, G=bacterias gram negativas, G+=bacterias gram positivas, HMA=hongos micorrízicos arbusculares, H:B=cociente hongos sobre bacterias y Cmic=C en biomasa microbiana.

9. CONCLUSIONES

La dinámica agrícola de la alcaldía de Milpa Alta durante el periodo 2010–2019, ha mantenido la dominancia de los cultivos de nopal, maíz y avena. Sin embargo, en estos tres cultivos se observó una reducción gradual de la superficie sembrada y en consecuencia del volumen y valor de la producción. A pesar de esto, durante el periodo analizado no se presentaron disminuciones en la superficie cosechada, y en el caso del cultivo de nopal, el rendimiento fue superior al de la media nacional, mientras que en el caso del maíz el rendimiento presentó valores por debajo de la media nacional. Este rendimiento no se correlacionó con las condiciones climáticas de la región, por lo que podría estar más asociado a cuestiones de manejo.

Con base en los análisis de laboratorio se concluye que el tipo de manejo en los agroecosistemas modifica considerablemente las propiedades edáficas. La baja perturbación física y fertilización constante en los agroecosistemas de nopal:

- Disminuye la densidad aparente, aumenta la humedad, la conductividad eléctrica e hidráulica y la concentración de N y P.
- Modifica el C edáfico al promover el aumento del C orgánico, mientras que la presencia de formas inorgánicas de C requiere de más estudios para corroborar las hipótesis propuestas en la discusión.
- Ocasiona cambios en el contenido y distribución de C orgánico, ya que este se distribuye 50% en las fracciones particuladas y el resto en la fracción asociada a minerales.
- Promueve la actividad enzimática y el aumento en la abundancia de bacterias y hongos saprobios.
- Promueve mayor eficiencia metabólica, observada en valores bajos de qCO_2 y AEE.

Sin embargo, el uso de agroquímicos parece tener un impacto, ya que en NCQ se observó mayor actividad de enzimas asociadas a la despolimerización de N, además de menor abundancia de bacterias y hongos saprobios en comparación con NORG.

En el agroecosistema de maíz, si bien el contenido de C orgánico fue tres veces menor que en los agroecosistemas de nopal, 80% de este C se distribuyó en las fracciones asociadas

a minerales. Aunado a esto, presentó mayor densidad aparente, menor conductividad eléctrica e hidráulica, menor concentración de nutrientes, menor actividad biológica y eficiencia metabólica. Estas condiciones son comparablemente menos favorables que las de los agroecosistemas de nopal, pero no se puede afirmar que sean condiciones que no permitan el mantenimiento del sistema.

Los resultados obtenidos permiten cuestionarse sobre si los agroecosistemas de maíz podrían ser una representación futura de las consecuencias del cambio de cultivo de nopal a maíz, y de su respectivo manejo. Además, da una idea de los posibles cambios físicos, químicos y biológicos que esto puede ocasionar. También se cuestiona el posible origen y procesos de formación que tienen los carbonatos en los agroecosistemas de nopal, y qué papel podrían desempeñar en temas de estabilización de C y cambio climático, temas poco explorados en esta región y en estos agroecosistemas.

Por las razones anteriores, el entendimiento de la dinámica agrícola, en conjunto con la caracterización del estado de los agroecosistemas de la región de Villa Milpa Alta es importante, ya que brinda información de cómo la producción ha cambiado durante la última década y de cómo el tipo de manejo impacta las propiedades del suelo. Además, toda esta información puede ser utilizada como herramienta para la toma de decisiones por parte de los productores, con el objetivo de establecer estrategias para mantener o mejorar la producción agrícola de la región y poder ampliar el entendimiento de la dinámica de C en agroecosistemas periurbanos de la Cd. Mx.

10. LITERATURA CITADA

- Asenso E, Hu L, Issaka F, Tian K, Zhang L, Zhang L, Zeng J, Zhu YF, Li J (2019) Four tillage method assessments on soil organic carbon, total nitrogen, biological activities, and maize grain yield in Southern China. *Food and Energy Security* 8:e176. <https://doi.org/10.1002/fes3.176>
- Aguilar-Carpio C, Rangel-Estrada SE, Sánchez-Mendoza SM, Pérez-Ramírez A (2016) Control químico de maleza en nopal verdura [*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller]. *Acta Agrícola y Pecuaria* 2:12–16. https://www.researchgate.net/publication/309132389_Control_quimico_de_maleza_en_nopal_verdura_Opuntia_ficus-indica_L_Miller
- An H, Wu X, Zhang Y, Tang Z (2019) Effects of land-use change on soil inorganic carbon: A meta-analysis. *Geoderma* 353:273–282. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.07.008>
- Andrews JA, Schlesinger WH (2001) Soil CO₂ dynamics, acidification, and chemical weathering in a temperate forest with experimental CO₂ enrichment. *Global Biogeochemistry Cycles* 15:149–162. <https://doi.org/10.1029/2000GB001278>
- Badalíková B (2010) Influence of soil tillage on soil compaction. In: Dedousis AP, Bartzanas T (ed) *Soil engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 19–30. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03681-1_2
- Bai Z, Caspari T, Gonzalez MR, Batjes NH, Mäder P, Bünemann EK, de Goede R, Brussaard L, Xu M, Ferreira CSS, Reintam E, Fan H, Mihelič R, Glavan M, Tóth Z (2018) Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture Ecosystems and Environment* 265:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>
- Balík J, Kulháněk M, Černý J, Sedlár O, Suran P (2020) Soil organic matter degradation in long-term maize cultivation and insufficient organic fertilization. *Plants* 9:1217–1232. <https://doi.org/10.3390/plants9091217>

- Bezerra JDP, Santos MGS, Svedese VM, Lima DMM, Fernandes MJS, Paiva LM (2012) Richness of endophytic fungi isolated from *Opuntia ficus-indica* Mill. (Cactaceae) and preliminary screening for enzyme production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 28:1989–1995. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-1001-2>
- Blagodatskaya E, Blagodatsky S, Khomyakov N, Myachina O, Kuzyakov Y (2016) Temperature sensitivity and enzymatic mechanisms of soil organic matter decomposition along an altitudinal gradient on Mount Kilimanjaro. *Scientific Reports* 6:1–11. <https://doi.org/10.1038/srep22240>
- Bonilla R (2014) Urbanización rural y economía agrícola de sobrevivencia en la Delegación Milpa Alta. *Argumentos* 27:195–215. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952014000100008&lng=es&nrm=iso
- Bremner JM (1996) Nitrogen-total. In: Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME (ed) *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., USA, pp 1085–1121. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>
- Bronick CJ, Lal R (2005) Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124:3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Bünemann EK, Schwenke GD, Van Zwieten L (2006) Impact of agricultural inputs on soil organisms-a review. *Soil Research* 44:379–406. <https://doi.org/10.1071/SR05125>
- Caldwell BA (2005) Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review. *Pedobiologia* 49:637–644. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.003>
- Chadwick D, Sommer S, Thorman R, Fanguero D, Cardenas L, Amon B, Misselbrook T (2011) Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology* 166:514–531. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.036>

- Chapin FS, Matson PA, Vitousek PM (2011) Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>
- Chávez-Ortíz P, Tapia-Torres Y, Larsen J, García-Oliva F (2022) Glyphosate-based herbicides alter soil carbon and phosphorus dynamics and microbial activity. Applied Soil Ecology 169:104256. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104256>
- Chávez-Vergara BM, Merino A, Vázquez-Marrufo G, García-Oliva F (2014) Organic matter dynamics and microbial activity during decomposition of forest floor under two native neotropical oak species in a temperate deciduous forest in Mexico. Geoderma 235:133–145. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.005>
- Chávez-Vergara BM, González-Rodríguez A, Etchevers JD, Oyama K, García-Oliva F (2015) Foliar nutrient resorption constrains soil nutrient transformations under two native oak species in a temperate deciduous forest in Mexico. European Journal of Forest Research, 134:803–817. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0891-1>
- Chávez-Vergara BM, Rosales-Castillo A, Merino A, Vázquez-Marrufo G, Oyama K, García-Oliva F (2016) Quercus species control nutrients dynamics by determining the composition and activity of the forest floor fungal community. Soil Biology and Biochemistry 98:186–195. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.015>
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (2019) Maíz. <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/index.php/maiz>
- Contreras-Padilla M, Rivera-Muñoz EM, Gutiérrez-Cortez E, Del López AR, Rodríguez-García ME (2015) Characterization of crystalline structures in *Opuntia ficus-indica*. Journal of Biological Physics 41:99–112. <https://doi.org/10.1007/s10867-014-9368-6>
- Cookson WR, Abaye DA, Marschner P, Murphy DV, Stockdale EA, Goulding KW (2005) The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure. Soil Biology and Biochemistry 37:1726–1737. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.02.007>
- Coonan EC, Kirkby CA, Kirkegaard JA, Amidy MR, Strong CL, Richardson AE (2020) Microorganisms and nutrient stoichiometry as mediators of soil organic matter

- dynamics. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 117:273–298. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10076-8>
- Cotler H, Martínez M, Etchevers JD (2016) Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y políticas públicas. Terra Latinoamericana 34:125–138. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/81/87>
- Cotler H, Cuevas M (2017) Estrategias para la conservación de suelos en agroecosistemas de México. Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P., México. https://www.centrogeo.org.mx/stories/archivos/users/hcotler/Cotler_y_Cuevas-Estrategias-de-conservacion-de-suelos-en-agroecosistemas-de-mexico.pdf
- Cram S, Cotler H, Morales LM, Sommer I, Carmona E (2008) Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. Investigaciones Geográficas 66:81–104. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-46112008000200006&lng=es&nrm=iso
- Crews TE, Rumsey BE (2017) What agriculture can learn from native ecosystems in building soil organic matter: A review. Sustainability 9:578–595. <https://doi.org/10.3390/su9040578>
- da Silva MF, Fernandes MM, Fernandes C, da Silva AM, Ferraudo AS, Coelho AP (2021) Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. Soil & Tillage Research 209:104924. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104924>
- de León-González F, Fuentes-Ponce MH, Bautista-Cruz A, Leyva-Pablo T, Castillo-Juárez H, Rodríguez-Sánchez LM (2018) Cactus crop as an option to reduce soil C–CO₂ emissions in soils with declining fertility. Agronomy for Sustainable Development 38:1–10. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0481-3>
- Drennan PM, Nobel PS (1998) Root growth dependence on soil temperature for *Opuntia ficus-indica*: influences of air temperature and a doubled CO₂ concentration. Functional Ecology 12:959–964. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1998.00276.x>

- Fanin N, Moorhead D, Bertrand I (2016) Eco-enzymatic stoichiometry and enzymatic vectors reveal differential C, N, P dynamics in decaying litter along a land-use gradient. *Biogeochemistry* 129:21–36. <https://doi.org/10.1007/s10533-016-0217-5>
- Fanin N, Kardol P, Farrell M, Nilsson MC, Gundale MJ, Wardle DA (2019) The ratio of Gram-positive to Gram-negative bacterial PLFA markers as an indicator of carbon availability in organic soils. *Soil Biology and Biochemistry* 128:111–114. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.10.010>
- Finney DJ (1989) Was this in your statistics textbook? V. Transformation of data. In: Ribeiro R (ed) *Experimental Agriculture*. Cambridge University Press, UK pp 165–175. <https://doi.org/10.1017/S0014479700016665>
- Flores L, Alcalá J (2010) Manual de laboratorio de física de suelo. Departamento de Edafología. Instituto de Geología, UNAM. <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L (2003) The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry* 35:837–843. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8)
- Franceschi VR, Nakata PA (2005) Calcium oxalate in plants: formation and function. *Annual Review of Plant Biology* 56:41–71. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144106>
- Galicia L, Gamboa-Cáceres AM, Cram S, Chávez-Vergara B, Peña-Ramírez V, Saynes V, Siebe C (2016) Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34:1-29. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100001
- Gargouri M, Karray F, Chebaane A, Mhiri N, Partida-Martínez LP, Sayadi S, Mliki A (2021) Increasing aridity shapes beta diversity and the network dynamics of the belowground

- fungal microbiome associated with *Opuntia ficus-indica*. Science of the Total Environment 773:145008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145008>
- Gobierno del Distrito Federal (2012) Atlas geográfico del suelo de conservación del Distrito Federal. pp 96. http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/Atlas_Version_final.pdf
- Gobierno de la CDMX (2016) El maíz en la Ciudad de México. <https://www.archivo.cdmx.gob.mx/vive-cdmx/post/el-maiz-en-la-cdmx>
- Gomes NC, Fagbola O, Costa R, Rumjanek NG, Buchner A, Mendona-Hagler L, Smalla K (2003) Dynamics of fungal communities in bulk and maize rhizosphere soil in the tropics. Applied and environmental microbiology 69:3758–3766. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.7.3758-3766.2003>
- Gong W, Yan X, Wang J, Hu T, Gong Y (2009) Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat–maize cropping system in northern China. Geoderma 149:318–324. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.010>
- Gow NA, Latge JP, Munro CA (2017) The fungal cell wall: structure, biosynthesis, and function. Microbiology spectrum 5:1–25. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0035-2016>
- Gryndler M, Larsen J, Hršelová H, Řezáčová V, Gryndlerová H, Kubát J (2006) Organic and mineral fertilization, respectively, increase and decrease the development of external mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi in a long-term field experiment. Mycorrhiza 16:159–166. <https://doi.org/10.1007/s00572-005-0027-4>
- Guo Z, Han J, Li J, Xu Y, Wang X (2019) Effects of long-term fertilization on soil organic carbon mineralization and microbial community structure. PLoS One 14:1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211163>
- Hart RD (1985) Conceptos básicos sobre agroecosistemas (No. 1). Bib. Orton IICA/CATIE. <https://books.google.com.co/books?id=MXQOAQAIAAJ&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>

- He H, Veneklaas EJ, Kuo J, Lambers H (2014) Physiological and ecological significance of biomineralization in plants. *Trends in Plant Science* 19:166–174. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.11.002>
- Heyduk K, Moreno-Villena JJ, Gilman IS, Christin PA, Edwards EJ (2019) The genetics of convergent evolution: insights from plant photosynthesis. *Nature Reviews Genetics* 20:485–493. <https://doi.org/10.1038/s41576-019-0107-5>
- Huffman Jr EW (1977) Performance of a new automatic carbon dioxide coulometer. *Microchemical Journal* 22:567–573. [https://doi.org/10.1016/0026-265X\(77\)90128-X](https://doi.org/10.1016/0026-265X(77)90128-X)
- Ibarrola-Rivas MJ, Castillo G, González J (2020) Social, economic and production aspects of maize systems in Mexico. *Investigaciones geográficas* 102:1–18. <https://doi.org/10.14350/ig.60009>
- Inglese P, Mondragon C, Nefzaoui A, Saenz C, Taguchi M, Makkar H, Louhaichi M (2018) *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal*. FAO, Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (s.f.) Prontuario de información geográfica delegacional de los Estados Unidos Mexicanos, Milpa Alta. http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/09/09009.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2007) Censo agropecuario 2007. Características principales del cultivo de nopal en el Distrito Federal Caso Milpa Alta. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/agricola/nopal_df/CulnopDF.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017) Anuario Estadístico de la Ciudad de México 2017. México. pp. 29–38. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094683.pdf

- Joergensen RG, Mueller T (1996) The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the kEN value. *Soil Biology and Biochemistry* 28: 33–37. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00101-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00101-8)
- Karray F, Gargouri M, Chebaane A, Mhiri N, Mliki A, Sayadi S (2020) Climatic aridity gradient modulates the diversity of the rhizosphere and endosphere bacterial microbiomes of *Opuntia ficus-indica*. *Frontiers in microbiology* 11:16–22. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01622>
- Kaur T, Brar BS, Dhillon NS (2008) Soil organic matter dynamics as affected by long-term use of organic and inorganic fertilizers under maize–wheat cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 81:59–69. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9152-0>
- Krull ES, Skjemstad JO, Baldock JA (2004) Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting, Canberra, Australia.
- Kutílek M, Nielsen DR (2015) *Soil: The Skin of the Planet Earth*. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9789-4>
- Lal R (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123:1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lal R, Negassa W, Lorenz K (2015) Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 15:79–86. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.09.002>
- Lal R (2018) Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global change biology* 24:3285–3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>
- Larsen J, Mansfeld-Giese K, Bødker L (2000) Quantification of *Aphanomyces euteiches* in pea roots using specific fatty acids. *Mycological Research* 104:858–864. <https://doi.org/10.1017/S0953756299002075>
- Lavallee JM, Soong JL, Cotrufo MF (2020) Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology* 26:261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>

- Lehmann J, Kleber M (2015) The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528:60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Li X, Rui J, Mao Y, Yannarell A, Mackie R (2014a) Dynamics of the bacterial community structure in the rhizosphere of a maize cultivar. *Soil Biology and Biochemistry* 68: 392–401. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.017>
- Li X, Rui J, Xiong J, Li J, He Z, Zhou J, Mackie R (2014b) Functional potential of soil microbial communities in the maize rhizosphere. *PloS one* 9:e112609. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112609>
- Liang Q, Chen H, Gong Y, Fan M, Yang H, Lal R, Kuzyakov Y (2012) Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92:21–33. <https://doi.org/10.1007/s10705-011-9469-6>
- Lima DL, Santos SM, Scherer HW, Schneider RJ, Duarte AC, Santos EB, Esteves VI (2009) Effects of organic and inorganic amendments on soil organic matter properties. *Geoderma* 150:38–45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.009>
- Littrell J, Xu S, Omondi E, Saha D, Le, J, Jagadamma S (2021) Long-term organic management combined with conservation tillage enhanced soil organic carbon accumulation and aggregation. *Soil Science Society of America Journal* 85:1–14. <https://doi.org/10.1002/saj2.20259>
- Liu X, Herbert SJ, Hashem, AM, Zhang X, Ding G (2006) Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation-a review. *Plant Soil and Environment* 52:531–543. <https://doi.org/10.17221/3544-PSE>
- Liu S, Wang J, Pu S, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y, Razavi BS (2020) Impact of manure on soil biochemical properties: A global synthesis. *Science of the Total Environment* 745: 141003. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141003>
- Lopez JM, Heider K, Scheffran J (2017) Frontiers of urbanization: identifying and explaining urbanization hot spots in the south of Mexico City using human and remote sensing. *Applied Geography* 79:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.12.001>

- Lorenz K, Lal R (2018) Carbon sequestration in agricultural ecosystems. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92318-5>
- Losada H, Cortés J, Rivera J, Vieyra J, Grande D (2009) Society, agriculture or forest to preserve environment in the peri-urban space in Milpa Alta at the South of Mexico City. Livestock Research for Rural Development. <http://www.lrrd.org/lrrd21/2/losa21025.htm>
- Ludwig B, Geisseler D, Michel K, Joergensen R G, Schulz E, Merbach I, Liu X (2011) Effects of fertilization and soil management on crop yields and carbon stabilization in soils. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 31:361–72. <https://doi.org/10.1051/agro/2010030>
- Magdoff F, Weil RR (2004) Soil organic matter management strategies. In: Magdoff F, Weil RR (ed) *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press, Florida, pp 45–65. <https://doi.org/10.1201/9780203496374.ch2>
- Mahajan S, Varma A (2022). *Animal Manure: Agricultural and Biotechnological Applications*. Springer Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-97291-2>
- Maki-Díaz G, Peña-Valdivia CB, García-Nava R, Arévalo-Galarza M L, Calderón-Zavala G, Anaya-Rosales S (2015) Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia* 49:31–51. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000100003&lng=es&nrm=iso
- Malik Z, Ahmad M, Abassi GH, Dawood M, Hussain A, Jamil M (2017) Agrochemicals and soil microbes: interaction for soil health. In: Hasmi MZ, Kumar V, Varma A (ed) *Xenobiotics in the soil environment: monitoring, toxicity and management*. Springer, Cham, pp 139–152. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47744-2_11
- Mandal A, Sarkar B, Mandal S, Vithanage M, Patra AK, Manna MC (2020) Impact of agrochemicals on soil health. In: Prasad MNV (ed) *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation*. Butterworth-Heinemann, Oxford, pp 161–187. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00007-6>

- Mani S, Merino A, García-Oliva F, Riotte J, Sukumar R (2018) Soil properties and organic matter quality in relation to climate and vegetation in southern Indian tropical ecosystems. *Soil Research* 56:80–90. <https://doi.org/10.1071/SR16262>
- Márquez–Berber SR, Torcuato–Calderón C, Almaguer–Vargas G, Colinas–León MT, Gardezi AK (2012) Cactus pear (*Opuntia albicarpa* and *O. megacantha*) production system in Axapusco, Estado de México. Problems and alternatives. *Revista Chapingo. Serie horticultura* 18:81–93. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2012000100006&lng=es&nrm=iso
- McGuire KL, Treseder KK (2010) Microbial communities and their relevance for ecosystem models: decomposition as a case study. *Soil Biology and Biochemistry* 42:529–535. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.016>
- McLauchlan K (2006) The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: a review. *Ecosystems* 9:1364–1382. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0135-1>
- Meena RS, Kumar S, Datta R, Lal R, Vijayakumar V, Brtnicky M, Marfo TD (2020) Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review. *Land* 9:34–55. <https://doi.org/10.3390/land9020034>
- Mehta S, Singh B, Patra A, Tripathi A, Easwaran M, Choudhary JR, Aggarwal SK (2021) Maize microbiome: current insights for the sustainable agriculture. In: Solanki M, Kashyap P, Ansari R, Kumari B (ed) *Microbiomes and plant health: Panoply and Their Applications*. Academic Press, Amsterdam pp 267–297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819715-8.00009-4>
- Mei N, Zhang X, Wang X, Peng C, Gao H, Zhu P, Gu Y (2021) Effects of 40 years applications of inorganic and organic fertilization on soil bacterial community in a maize agroecosystem in northeast China. *European Journal of Agronomy* 130:126332 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126332>

- Milne RM, Haynes RJ (2004) Soil organic matter, microbial properties, and aggregate stability under annual and perennial pastures. *Biology and Fertility of Soils* 39:172–178. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0698-y>
- Miner GL, Delgado JA, Ippolito JA, Stewart CE, Manter DK, Del Grosso SJ, D'Adamo RE (2020) Assessing manure and inorganic nitrogen fertilization impacts on soil health, crop productivity, and crop quality in a continuous maize agroecosystem. *Journal of Soil and Water Conservation* 75:481–498. <https://doi.org/10.2489/jswc.2020.00148>
- Mondal S, Chakraborty D (2022) Global meta-analysis suggests that no-tillage favorably changes soil structure and porosity. *Geoderma* 405:115443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443>
- Monger HC, Kraimer RA, Khresat SE, Cole DR, Wang X, Wang J (2015) Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater. *Geology* 43:375–378. <https://doi.org/10.1130/G36449.1>
- Montesillo-Cedillo JM (2016) Rendimiento por hectárea del maíz grano en México: distritos de riego vs temporal. *Economía Informa* 398:60–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2016.04.005>
- Murillo-Amador B, Flores-Hernández A, García-Hernández JL, Valdez-Cepeda RD, Ávila-Serrano NY, Troyo-Diéguez ETD, Ruiz-Espinoza FH (2005) Soil amendment with organic products increases the production of prickly pear cactus as a green vegetable (nopalitos). *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 7:97-109. https://www.researchgate.net/publication/240631678_Soil_Amendment_With_Organic_Products_Increases_the_Production_of_Prickly_Pear_Cactus_as_a_Green_Vegetable_Nopalitos/stats
- Murphy JA, Riley JP (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta* 27:31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Nivelle E, Verzeaux J, Habbib H, Kuzyakov Y, Decocq G, Roger D, Tetu T (2016) Functional response of soil microbial communities to tillage, cover crops and nitrogen

- fertilization. Applied Soil Ecology 108:147–155. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.08.004>
- Nobel PS, De la Barrera E (2003) Tolerances and acclimation to low and high temperatures for cladodes, fruits and roots of a widely cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. New Phytologist 157:271–279. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00675.x>
- Ondrasek G, Begić HB, Zovko M, Filipović L, Meriño-Gergichevich C, Savić R, Rengel Z (2019) Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. Science of the Total Environment 658:1559–1573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.243>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (s.f.) Enfermedades del maíz. <http://www.fao.org/3/x7650s/x7650s10.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020) RECSOIL: RECSOIL: Recarbonización de suelos agrícolas a nivel mundial. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/recarbonizacion-de-los-suelos-globales/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2022) Propiedades Físicas del Suelo. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/#:~:text=Una%20densidad%20aparente%20alta%20indica,el%20crecimiento%20de%20las%20plantas>
- Osorio-Córdoba J, Pelayo-Zaldívar C, Verde-Calvo JR, Ponce-Valadez M, Díaz de León-Sánchez F, Bosquez-Molina E, Rodríguez-Huezo ME (2011) Conservación de nopal verdura 'Milpa Alta' (*Opuntia ficus-indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada. Revista mexicana de ingeniería química 10:93–104. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000100010&lng=es&nrm=iso
- Paiva PM, de Souza IF, Costa MC, Santos AD, Coel LC (2016) *Opuntia* sp. cactus: biological characteristics, cultivation and applications. Advances in Research 7:1–14. <https://doi.org/10.9734/AIR/2016/26125>

- Palomares-Pérez M, Rodríguez-Vélez B, Ayala-Zermeño MÁ (2015) Nematodos asociados al nopal *Opuntia ficus-indica* L. (Miller) en Milpa Alta, Ciudad de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 6:2205–2209. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i11.799>
- Plaza C, Courtier-Murias D, Fernández JM, Polo A, Simpson AJ (2013) Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: a central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* 57:124–134. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.07.026>
- Puissant J, Jones B, Goodall T, Mang D, Bland A, Gweon HS, Malik A, Jones DL, Clark IL, Hirsch PR, Griffiths R (2019) The pH optimum of soil exoenzymes adapt to long term changes in soil pH. *Soil Biology and Biochemistry* 138:107601. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107601>
- Qin H, Lu K, Strong PJ, Xu Q, Wu Q, Xu Z, Xu J, Wang H (2015) Long-term fertilizer application effects on the soil, root arbuscular mycorrhizal fungi and community composition in rotation agriculture. *Applied Soil Ecology* 89:35–43. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.01.008>
- Raiesi F, Beheshti A (2014) Soil specific enzyme activity shows more clearly soil responses to paddy rice cultivation than absolute enzyme activity in primary forests of northwest Iran. *Applied Soil Ecology* 75:63–70. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.10.012>
- Rendón-Trejo A, Pomar-Fernández S, Solís-Tepexpa S (2017) El crecimiento y su relevancia en la comunidad de Milpa Alta. El caso de la producción de nopal. In: Lisocka-Jaegermann B, Piotrowska-Kretkiewicz Z, Ząbecki K, Warszawski U (ed.) *La vulnerabilidad socioeconómica y ambiental en el contexto local y regional*. Universidad de Varsovia, Polonia, pp 251–262. <http://wgsr.uw.edu.pl/wgsr/wp-content/uploads/2018/03/polmex.pdf>
- Rocci KS, Lavalley JM, Stewart CE, Cotrufo MF (2021) Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated

- and particulate organic matter: A meta-analysis. *Science of The Total Environment* 793:148569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148569>
- Rousk J, Bååth E, Brookes PC, Lauber CL, Lozupone C, Caporaso JG, Knight R, Fierer N (2010) Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *The ISME journal* 4:1340–1351. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.58>
- Sage RF (2004) The evolution of C4 photosynthesis. *New phytologist* 161:341–370. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.00974.x>
- Santiago-Lorenzo M, López-Jiménez A, Saucedo-Veloz C, Cortés-Flores JI, Jaén-Contreras D, Suárez-Espinosa J (2016) Nutritional composition of tender cactus stems produced under mineral and organic fertilization. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39:403–407. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802016000400403&lng=es&nrm=iso
- Sasser M (1990) Identification of bacteria through fatty acid analysis: In: Klement Z, Rudolph K, Sands DC (ed) *Methods in Phytobacteriology*. Akademiai Kiado, Budapest, pp 199–203. <https://doi.org/10.1002/jobm.3620310214>
- Sayed OH (2001) Crassulacean acid metabolism 1975–2000, a check list. *Photosynthetica* 39:339–352. <https://doi.org/10.1023/A:1020292623960>
- Scalisi A, Morandi B, Inglese P, Bianco RL (2016) Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. *Environmental and Experimental Botany* 122:158–167. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.10.003>
- Schmidt MW, Torn MS, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens IA, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning DA, Nannipieri P, Rasse DP, Weiner S, Trumbore SE (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478:49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2019) El cultivo de nopal verdura en la Ciudad de México. <https://www.gob.mx/agricultura/cdmx/articulos/el-cultivo-de-nopal-verdura-en-la-ciudad-de-mexico?idiom=es>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2020). Maíz de grano de la Ciudad de México.

<https://www.gob.mx/agricultura/cdmx/articulos/maiz-grano-en-la-ciudad-de-mexico?idiom=es>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2020) ¿Cuáles son las plagas que afectan al

maíz? <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cuales-son-las-plagas-que-afectan-al-maiz>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2021) Nopales, la verdura de la ciudad.

<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/los-nopales-son-la-riqueza-de-mexico>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2021) La Ciudad de México, segunda entidad del país en la producción de nopales.

<https://www.gob.mx/agricultura/cdmx/articulos/la-ciudad-de-mexico-segunda-entidad-del-pais-en-la-produccion-de-nopales?idiom=es>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2022) Crece en México el consumo y producción de nopal: Agricultura.

<https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-en-mexico-el-consumo-y-produccion-de-nopal-agricultura>

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2017) Maíz de grano blanco y amarillo mexicano.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256429/B_sico-Ma_z_Grano_Blanco_y_Amarillo.pdf

Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad para las Comunidades (s.f.) CDMX, guardiana del maíz nativo.

<https://www.sepi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/cdmx-guardiana-del-maiz-nativo.pdf>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2010–2019) Datos abiertos.

<http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2018) Fecha de Siembras y Cosechas en México.

<https://www.gob.mx/siap/articulos/fecha-de-siembras-y-cosechas-en-mexico?idiom=es>

- Secretaría del Medio Ambiente (2015) Delegación Milpa Alta. http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/climatechange/images/biblioteca_cc/PACDel_Milpa_Alta.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente (2016) Suelo de conservación. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Libro_Suelo_de_Conservacion.pdf
- Secretaría de Pueblos y Barrios Originarios y Comunidades Indígenas Residentes (2016) La cosecha de maíz en la CDMX principalmente es para el autoconsumo. <https://www.sepi.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/la-cosecha-de-maiz-en-la-cdmx-principalmente-es-para-el-autoconsumo>
- Shukla G, Varma A (2010) Soil enzymology. Springer, New York <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3>
- Siebe C, Jahn R (1996) Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, México.
- Sinsabaugh RL, Lauber CL, Weintraub MN, Ahmed B, Allison SD, Crenshaw C, Zeglin LH (2008). Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. Ecology Letters 11:1252–1264. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x>
- Stevenson FJ, Cole MA (2nd) (1999) Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. John Wiley & Sons, USA. <https://doi.org/10.1097/00010694-200002000-00010>
- Tian J, Lou Y, Gao Y, Fang H, Liu S, Xu M, Kuzyakov Y (2017) Response of soil organic matter fractions and composition of microbial community to long-term organic and mineral fertilization. Biology and Fertility of Soils 53:523–532. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1189-x>
- Torres LP, Rodríguez SL (2006) Dinámica agroambiental en áreas periurbanas de México: Los casos de Guadalajara y Distrito Federal. Investigaciones Geográficas 60:62–82. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112006000200005&lng=es&nrm=iso

- Triberti L, Nastri A, Giordani G, Comellini F, Baldoni G, Toderi G (2008) Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland? *European Journal of Agronomy* 29:13–20. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.009>
- Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19:703–707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
- Varvel GE, Wilhelm WW (2010) Long-term soil organic carbon as affected by tillage and cropping systems. *Soil Science Society of America Journal* 74:915–921. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0362>
- Verrecchia EP, Braissant O, Cailleau G (2006) The oxalate–carbonate pathway in soil carbon storage: the role of fungi and oxalotrophic bacteria. In: Gadd GM (ed.) *Fungi in Biogeochemical Cycles*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 289–310. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511550522.013>
- von Lützow M, Kögel-Knabner I (2009) Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition—what do we know? *Biology and Fertility of Soils* 46:1–15. <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0413-8>
- Wan D, Ma M, Peng N, Luo X, Chen W, Cai P, Wu L, Pan H, Chen J, Yu G, Huang Q (2021) Effects of long-term fertilization on calcium-associated soil organic carbon: Implications for C sequestration in agricultural soils. *Science of The Total Environment* 772:145037. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145037>
- Wang CY, Zhou X, Guo D, Zhao JH, Yan L, Feng GZ, Gao Q, Yu H, Zhao LP (2019) Soil pH is the primary factor driving the distribution and function of microorganisms in farmland soils in northeastern China. *Annals of Microbiology* 69:1461–1473. <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01529-9>
- Wang H, He X, Zhang Z, Li M, Zhang Q, Zhu H, Xu S, Yang P (2021) Eight years of manure fertilization favor copiotrophic traits in paddy soil microbiomes. *European Journal of Soil Biology* 106:103352. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2021.103352>

- Wardle DA, Ghani A (1995) A critique of the microbial metabolic quotient (qCO_2) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biology and Biochemistry* 27:1601–1610. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00093-T](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00093-T)
- Xu Z, Yu G, Zhang X, Ge J, He N, Wang Q, Wang D (2015) The variations in soil microbial communities, enzyme activities and their relationships with soil organic matter decomposition along the northern slope of Changbai Mountain. *Applied Soil Ecology* 86:19–29. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.09.015>
- Yan T, Yang L, Campbell CD (2003) Microbial biomass and metabolic quotient of soils under different land use in the Three Gorges Reservoir area. *Geoderma* 115:129–138. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00082-X)
- Yang Y, Wang N, Guo X, Zhang Y, Ye B (2017) Comparative analysis of bacterial community structure in the rhizosphere of maize by high-throughput pyrosequencing. *PLoS One* 12:e0178425. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178425>
- Yang Y, Li G, Min K, Liu T, Li C, Xu J, Hu F, Li H (2022) The potential role of fertilizer-derived exogenous bacteria on soil bacterial community assemblage and network formation. *Chemosphere* 287:132338. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132338>
- Zamanian K, Pustovoytov K, Kuzyakov Y (2016) Pedogenic carbonates: Forms and formation processes. *Earth-Science Reviews* 157:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.03.003>
- Zavattaro L, Bechini L, Grignani C, Van Evert FK, Mallast J, Spiegel H, Ten Berge HF (2017) Agronomic effects of bovine manure: A review of long-term European field experiments. *European Journal of Agronomy* 90:127–138. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.010>
- Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger KM, Mooshammer M, Peñuelas J, Richter A, Sardans J, Wanek W (2015) The application of ecological stoichiometry to plant–microbial–soil organic matter transformations. *Ecological Monographs* 85:133–155. <https://doi.org/10.1890/14-0777.1>

-
- Zelles, L. (1999). Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: a review. *Biology and Fertility of Soils*, 29(2), 111–129.
- Zhang HM, Bo-Ren WANG, Ming-Gang XU, Ting-Lu FAN (2009) Crop yield and soil responses to long-term fertilization on a red soil in southern China. *Pedosphere*, 19:199–207. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(09\)60109-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(09)60109-0)
- Zhang QC, Shamsi IH, Xu DT, Wang GH, Lin XY, Jilani G, Chaudhry AN (2012) Chemical fertilizer and organic manure inputs in soil exhibit a vice versa pattern of microbial community structure. *Applied Soil Ecology* 57:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.02.012>
- Zhongqi HE, Pagliari PH, Waldrip HM (2016) Applied and environmental chemistry of animal manure: A review. *Pedosphere* 26:779–816. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60087-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60087-X)

11. ANEXO 1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO INSTITUTO DE GEOLOGÍA

ENCUESTA DIRIGIDA A PRODUCTORES



Datos generales del entrevistado

Nombre: _____ Fecha: _____

Edad: _____ Sexo: H M Teléfono (opcional): _____

Características generales de la parcela

Ubicación de la parcela: _____

Tipo de cultivo: a) Nopal b) Maíz c) Mixto (cuáles): _____

Tamaño aproximado de la parcela (m² o Ha): _____

¿Cuánto tiempo tiene sembrando el cultivo?

a) un ciclo b) dos ciclos c) >3 años d) 6 a 10 años f) >20 años

Preguntas

Preparación de la tierra

1. ¿Cómo prepara la tierra antes de sembrar?

a) Uso de maquinaria (cuál): _____ b) Manual c) Otro: _____

Riego

2. ¿Qué tipo de riego utilizas?

a) Temporal (temporada de lluvias) b) Automático c) Goteo d) Otro: _____

Fertilización

3. ¿Realiza algún tipo de fertilización? (Si su respuesta es SI, pase a la 4, si es NO pase a la 8).

a) SI b) NO

4. ¿Qué tipo de fertilización es? (Si es orgánica pase a la 5, si es inorgánica pase a la 6)

a) Orgánica b) Inorgánica c) Mixta (especifique): _____

5. ¿Qué tipo de fertilizante orgánico utiliza?

a) Composta b) Estiércol de: _____ c) Mixto: _____ c) Otro: _____

6. ¿Qué fertilizante inorgánico utiliza?

a) Triple 16 b) NPK c) Urea c) Mixto: _____ d) Otro: _____

7. ¿En qué forma, cantidad y frecuencia se adiciona el fertilizante?

Control de plagas y hierba

8. ¿Cómo lidia con el crecimiento de hierba?

a) Control manual b) Control químico (especifique): _____ c) No realiza control

9. ¿Qué tipo de control de plagas y enfermedades utiliza?

a) Control preventivo b) Control químico c) Control biológico

10. Si es control preventivo, ¿qué actividades y en qué temporada las realiza?

11. Si es control químico, ¿qué productos utiliza y en qué cantidad y frecuencia?

12. Si es control biológico, ¿qué tipo de control biológico utiliza?

13. ¿Por cuánto tiempo ha mantenido este tipo de control? _____

Uso de residuos

14. ¿Los residuos agrícolas son utilizados para algún fin?

- a) Incorporación al suelo b) Forraje c) Otro: _____ d) No se usan

Producción

15. ¿Quién está a cargo del cultivo?

- a) Hombres b) Mujeres c) Mixto

16. ¿Cuál es el destino principal de la producción?

- a) Comercio b) Autoconsumo c) Tradición d) Otro: _____

17. ¿Cómo ha sido el rendimiento de la producción en los últimos diez años o desde que lo cultiva?

- a) Se ha mantenido igual b) Ha disminuido c) Ha aumentado

18. ¿Si aumentó o disminuyó a qué factor(es) lo asocia? _____

Problemáticas

19. ¿Cuáles son las principales problemáticas (ambientales, sociales o económicas) asociadas al mantenimiento del cultivo?

Desarrollo de estudios

20. ¿Permitiría la realización de estudios en su parcela para conocer el estado en el que se encuentra el suelo?

- SI NO

¿Por qué?

21. ¿Qué otros análisis le gustaría que se realizaran?

GRACIAS POR SU TIEMPO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE GEOLOGÍA



ENCUESTA DIRIGIDA A PRODUCTORES

Datos generales del entrevistado

Nombre: Juan Carlos Loza Surodo Fecha: 11 Sep. 2021
 Edad: 47 Sexo: M F Teléfono (opcional): 55-1812-27-48

Características generales de la parcela

Ubicación de la parcela: Paraje Pochigüia huac
 Tipo de cultivo: a) Nopal b) Maíz c) Mixto (cuáles): _____
 Tamaño aproximado de la parcela (m² o Ha): 4,000 m²
 ¿Cuánto tiempo tiene sembrando el cultivo?
 a) un ciclo b) dos ciclos c) >3 años d) 6 a 10 años e) >20 años

Preguntas

Preparación de la tierra

1. ¿Cómo prepara la tierra antes de sembrar?
 a) Uso de maquinaria (cuál): _____ b) Manual c) Otro: Arido/Trazón animal

Riego

2. ¿Qué tipo de riego utilizas?
 a) Temporal (temporada de lluvias) b) Automático c) Goteo d) Otro: _____

Fertilización

3. ¿Realiza algún tipo de fertilización? (Si su respuesta es SI, pase a la 4, si es NO pase a la 8).
 a) SI b) NO
 4. ¿Qué tipo de fertilización es? (Si es orgánica pase a la 5, si es inorgánica pase a la 6)
 a) Orgánica b) Inorgánica c) Mixta (especifique): _____
 5. ¿Qué tipo de fertilizante orgánico utiliza?
 a) Composta b) Estiércol de Caballo/Purro c) Mixto: _____ d) Otro: _____
 6. ¿Qué fertilizante inorgánico utiliza?
 a) Triple 16 b) NPK c) Urea d) Mixto: _____ e) Otro: _____
 7. ¿En qué forma, cantidad y frecuencia se adiciona el fertilizante?
Esparcir, 400-500 kg, anual

Control de plagas y hierba

8. ¿Como lidia con el crecimiento de hierba?
 a) Control manual b) Control químico (especifique): _____ c) No realiza control



9. ¿Qué tipo de control de plagas y enfermedades utiliza?

- a) Control preventivo b) Control químico c) Control biológico

10. Si es control preventivo, ¿qué actividades y en qué temporada las realiza?

Desmalezado manual y mecánico. Inicio de siembra

11. Si es control químico, ¿qué productos utiliza y en qué cantidad y frecuencia?

12. Si es control biológico, ¿qué tipo de control biológico utiliza?

13. ¿Por cuánto tiempo ha mantenido este tipo de control? *Más de 10 años*

Uso de residuos

14. ¿Los residuos agrícolas son utilizados para algún fin?

- a) Incorporación al suelo b) Forraje c) Otro: _____ d) No se usan

Producción

15. ¿Quién está a cargo del cultivo?

- a) Hombres b) Mujeres c) Mixto

16. ¿Cuál es el destino principal de la producción?

- a) Comercio b) Autoconsumo c) Tradición d) Otro: _____

17. ¿Cómo ha sido el rendimiento de la producción en los últimos diez años o desde que lo cultiva?

- a) Se ha mantenido igual b) Ha disminuido c) Ha aumentado

18. ¿Si aumentó o disminuyó a qué factor(es) lo asocia? _____

Problemáticas

19. ¿Cuáles son las principales problemáticas (ambientales, sociales o económicas) asociadas al mantenimiento del cultivo?

Dificultad de acceso a parcela (camino de herradura y vereda), para cultivar, sacar cosecha y forraje. Celudancia y neoplasias de fungos y químicos.

Desarrollo de estudios

20. ¿Permitiría la realización de estudios en su parcela para conocer el estado en el que se encuentra el suelo? SI NO

¿Por qué?

Porque se requiere conocer el estado y salud del suelo para tener alternativas y mejoras en las prácticas de cultivo

21. ¿Qué otros análisis le gustarían que se realizaran?

Conocer diversidad de plantas y animales existentes en la parcela

GRACIAS POR SU TIEMPO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE GEOLOGÍA



ENCUESTA DIRIGIDA A PRODUCTORES

Datos generales del entrevistado

Nombre: Ernesto Carlos Reyes Alvarado Fecha: 12-09-2021
 Edad: 42 Sexo: M Teléfono (opcional): 55-2109 7593

Características generales de la parcela

Ubicación de la parcela: Villa Milpa Alta Barrio Santa Cruz
 Tipo de cultivo: a) Nopal Maíz e) Mixto (cuáles): _____
 Tamaño aproximado de la parcela (m² o Ha): 500m²
 ¿Cuánto tiempo tiene sembrando el cultivo?
 a) un ciclo dos ciclos c) >3 años d) 6 a 10 años f) >20 años

Preguntas

Preparación de la tierra

1. ¿Cómo prepara la tierra antes de sembrar?
 a) Uso de maquinaria (cuál): _____ Manual c) Otro: _____

Riego

2. ¿Qué tipo de riego utilizas?
 Temporal (temporada de lluvias) b) Automático c) Goteo d) Otro: _____

Fertilización

3. ¿Realiza algún tipo de fertilización? (Si su respuesta es SI, pase a la 4, si es NO pase a la 8).
 a) SI NO
 4. ¿Qué tipo de fertilización es? (Si es orgánica pase a la 5, si es inorgánica pase a la 6)
 a) Orgánica b) Inorgánica c) Mixta (especifique): _____
 5. ¿Qué tipo de fertilizante orgánico utiliza?
 a) Composta b) Estiércol de: _____ c) Mixto: _____ d) Otro: _____
 6. ¿Qué fertilizante inorgánico utiliza?
 a) Triple 16 b) NPK c) Urea c) Mixto: _____ d) Otro: _____
 7. ¿En qué forma, cantidad y frecuencia se adiciona el fertilizante?

Control de plagas y hierba

8. ¿Cómo lidia con el crecimiento de hierba?
 Control manual b) Control químico (especifique): _____ c) No realiza control

9. ¿Qué tipo de control de plagas y enfermedades utiliza?
- a) Control preventivo b) Control químico c) Control biológico

10. Si es control preventivo, ¿qué actividades y en qué temporada las realiza?

Aplicación de repelentes químicos a los 20 y 60 días de la siembra.

11. Si es control químico, ¿qué productos utiliza y en qué cantidad y frecuencia?

12. Si es control biológico, ¿qué tipo de control biológico utiliza?

13. ¿Por cuánto tiempo ha mantenido este tipo de control? *2 años*

Uso de residuos

14. ¿Los residuos agrícolas son utilizados para algún fin?

- a) Incorporación al suelo b) Forraje c) Otro: _____ d) No se usan

Producción

15. ¿Quién está a cargo del cultivo?

- a) Hombres b) Mujeres c) Mixto

16. ¿Cuál es el destino principal de la producción?

- a) Comercio b) Autoconsumo c) Tradición d) Otro: _____

17. ¿Cómo ha sido el rendimiento de la producción en los últimos diez años o desde que lo cultiva?

- a) Se ha mantenido igual b) Ha disminuido c) Ha aumentado

18. ¿Si aumentó o disminuyó a qué factor(es) lo asocia? *reincorporación de la materia orgánica.*

Problemáticas

19. ¿Cuáles son las principales problemáticas (ambientales, sociales o económicas) asociadas al mantenimiento del cultivo?

Lluvias tardías y ráfagas de viento

Desarrollo de estudios

20. ¿Permitiría la realización de estudios en su parcela para conocer el estado en el que se encuentra el suelo? SÍ NO

¿Por qué?

21. ¿Qué otros análisis le gustaría que se realizaran?

Concentración de nutrientes y microbiología.

GRACIAS POR SU TIEMPO

Parcela Orgánica e Inorgánica



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE GEOLOGÍA



ENCUESTA DIRIGIDA A PRODUCTORES

Datos generales del entrevistado

Nombre: Andrés Herrosillo Gómez Fecha: 11 Sept.
 Edad: 62 Sexo: M F Teléfono (opcional): _____

Características generales de la parcela

Ubicación de la parcela: Pochiquiluzc
 Tipo de cultivo: a) Nopal b) Maíz c) Mixto (cuáles): _____
 Tamaño aproximado de la parcela (m² o Ha): 5000
 ¿Cuánto tiempo tiene sembrando el cultivo?
 a) un ciclo b) dos ciclos c) >3 años d) 6 a 10 años f) >20 años

Preguntas

Preparación de la tierra

1. ¿Cómo prepara la tierra antes de sembrar?
 a) Uso de maquinaria (cuál): _____ b) Manual c) Otro: _____

Riego

2. ¿Qué tipo de riego utilizas?
 a) Temporal (temporada de lluvias) b) Automático c) Goteo d) Otro: _____

Fertilización

3. ¿Realiza algún tipo de fertilización? (Si su respuesta es SI, pase a la 4, si es NO pase a la 8).
 a) SI b) NO
 4. ¿Qué tipo de fertilización es? (Si es orgánica pase a la 5, si es inorgánica pase a la 6)
 a) Orgánica b) Inorgánica c) Mixta (especifique): _____
 5. ¿Qué tipo de fertilizante orgánico utiliza?
 a) Composta b) Estiércol de: Vaca c) Mixto: _____ d) Otro: _____
 6. ¿Qué fertilizante inorgánico utiliza?
 a) Triple 16 b) NPK c) Urea d) Mixto: _____ e) Otro: _____
 7. ¿En qué forma, cantidad y frecuencia se adiciona el fertilizante?
Una vez a la semana

Control de plagas y hierba

8. ¿Cómo lidia con el crecimiento de hierba?
 a) Control manual b) Control químico (especifique): _____ c) No realiza control

9. ¿Qué tipo de control de plagas y enfermedades utiliza?

- a) Control preventivo b) Control químico c) Control biológico

10. Si es control preventivo, ¿qué actividades y en qué temporada las realiza?

11. Si es control químico, ¿qué productos utiliza y en qué cantidad y frecuencia?

12. Si es control biológico, ¿qué tipo de control biológico utiliza?

13. ¿Por cuánto tiempo ha mantenido este tipo de control? 5 años

Uso de residuos

14. ¿Los residuos agrícolas son utilizados para algún fin?

- a) Incorporación al suelo b) Forraje c) Otro: _____ d) No se usan

Producción

15. ¿Quién está a cargo del cultivo?

- a) Hombres b) Mujeres c) Mixto

16. ¿Cuál es el destino principal de la producción?

- a) Comercio b) Autoconsumo c) Tradición d) Otro: _____

17. ¿Cómo ha sido el rendimiento de la producción en los últimos diez años o desde que lo cultiva?

- a) Se ha mantenido igual b) Ha disminuido c) Ha aumentado

18. ¿Si aumentó o disminuyó a qué factor(es) lo asocia? _____

Problemáticas

19. ¿Cuáles son las principales problemáticas (ambientales, sociales o económicas) asociadas al mantenimiento del cultivo?

Desarrollo de estudios

20. ¿Permitiría la realización de estudios en su parcela para conocer el estado en el que se encuentra el suelo? SI NO

¿Por qué?

Conocer el estado del suelo

21. ¿Qué otros análisis le gustaría que se realizaran?

pH y N

GRACIAS POR SU TIEMPO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE GEOLOGÍA



ENCUESTA DIRIGIDA A PRODUCTORES

Datos generales del entrevistado

Nombre: Misaim Gómez Pérez Fecha: 14 de Septiembre de 2021

Edad: 33 Sexo: M Teléfono (opcional): 55 34 28 45 56

Características generales de la parcela

Ubicación de la parcela: Alcaldía Milpa Alta, barrio de Santa Martha

Tipo de cultivo: Nopal b) Maíz c) Mixto (cuáles): _____

Tamaño aproximado de la parcela (m² o Ha): 8500 m²

¿Cuánto tiempo tiene sembrando el cultivo?

a) un ciclo b) dos ciclos c) >3 años d) 6 a 10 años >20 años

Preguntas

Preparación de la tierra

1. ¿Cómo prepara la tierra antes de sembrar?

a) Uso de maquinaria (cuál): Tractor b) Manual c) Otro: _____

Riego

2. ¿Qué tipo de riego utilizas?

Temporal (temporada de lluvias) b) Automático c) Goteo d) Otro: _____

Fertilización

3. ¿Realiza algún tipo de fertilización? (Si su respuesta es SI, pase a la 4, si es NO pase a la 8)

SI b) NO

4. ¿Qué tipo de fertilización es? (Si es orgánica pase a la 5, si es inorgánica pase a la 6)

Orgánica Inorgánica Mixta (especifique) Estiércol de caballo, y Fertilizante triple 17 e urea

5. ¿Qué tipo de fertilizante orgánico utiliza?

a) Composta Estiércol de: caballo c) Mixto: _____ e) Otro: _____

6. ¿Qué fertilizante inorgánico utiliza?

a) Triple 16 b) NPK Urea c) Mixto: _____ Otro: triple 17

7. ¿En qué forma, cantidad y frecuencia se adiciona el fertilizante?

Todos los años se fertiliza.

Control de plagas y hierba

8. ¿Cómo lidia con el crecimiento de hierba?

Control manual Control químico (especifique): Secaman, Faena, Gesuprim Conbi y Gesuprim simple No realiza control

* Varia la aplicación dependiendo de muchos factores, también está el moticultor

9. ¿Que tipo de control de plagas y enfermedades utiliza?
 Control preventivo Control químico Control biológico

10. Si es control preventivo, ¿qué actividades y en que temporada las realiza?

En caso de la cochinilla se limpia con un cepillo de cerdas naturales y en la
mancha negra, usamos cellos
(Meses Abril y mayo)

11. Si es control químico, ¿qué productos utiliza y en qué cantidad y frecuencia?

El control es con Compas etiqueta amarilla

12. Si es control biológico, ¿qué tipo de control biológico utiliza?

13. ¿Por cuánto tiempo ha mantenido este tipo de control? una vez al año.

Uso de residuos

14. ¿Los residuos agrícolas son utilizados para algún fin?

Incorporación al suelo Forraje Otro: _____ No se usan

Producción

15. ¿Quién está a cargo del cultivo?

a) Hombres b) Mujeres Mixto

16. ¿Cuál es el destino principal de la producción?

Comercio b) Autoconsumo c) Tradición d) Otro: _____

17. ¿Cómo ha sido el rendimiento de la producción en los últimos diez años o desde que lo cultiva?

a) Se ha mantenido igual b) Ha disminuido Ha aumentado

18. ¿Si aumentó o disminuyó a qué factor(es) lo asocia? La pandemia

Problemáticas

19. ¿Cuáles son las principales problemáticas (ambientales, sociales o económicas) asociadas al mantenimiento del cultivo?

El abandono de las parcelas.

Desarrollo de estudios

20. ¿Permitiría la realización de estudios en su parcela para conocer el estado en el que se encuentra el suelo? NO

¿Por qué?

Para ayudar a Nadia y poder ver su investigación final.

21. ¿Qué otros análisis le gustarían que se realizaran?

Las condiciones que tiene el nopal en esta región.

GRACIAS POR SU TIEMPO