



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
INSTITUTO DE CIENCIAS
CENTRO DE AGROECOLOGÍA
MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS

TESIS

**PRODUCCIÓN DE AMARANTO (*Amaranthus hypochondriacus*) CON
MANEJO REGENERATIVO 3M (MINERALES, MATERIA ORGÁNICA
Y MICROORGANISMOS) EN UN SUELO DE OAXACA, MÉXICO.**

PRESENTA

ING. ARMANDO FRANCISCO LARIOS BARRÓN

Para obtener el grado de
Maestro en Manejo Sostenible de Agroecosistemas

COMITÉ TUTORAL

DIRECTOR DE TESIS
DR. DIONICIO JUÁREZ RAMÓN

ASESORES
DR. JAIRO RESTREPO RIVERA
DR. JOSÉ CINCO PATRÓN IBARRA
DR. SAMUEL ALEJANDRO LOZANO MORALES



La presente tesis, titulada: "PRODUCCIÓN DE AMARANTO (*Amaranthus hypochondriacus*) CON MANEJO REGENERATIVO 3M (MINERALES, MATERIA ORGÁNICA Y MICROORGANISMOS) EN UN SUELO DE OAXACA, MÉXICO", realizada por el alumno Ing. Armando Francisco Larios Barrón, bajo la dirección del Comité Tutorial indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN
MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS

COMITÉ TUTORAL:

DIRECTOR: _____
Dr. Dionicio Juárez Ramón

ASESOR: _____
Dr. José Clavo Patrón Ibarra

ASESOR EXTERNO: _____
Dr. Jairo Restrepo Rivera

ASESOR EXTERNO: _____
Dr. Samuel Alejandro Lozano Morales

REVISOR EXTERNO: _____
Dr. Antonino Báez Rogelio

Puebla, Pue., Enero de 2021.

Posgrado en Manejo Sostenible de Agroecosistemas
Instituto de Ciencias (ICUAP)

Edificio VAL 1, Km 1.7 carretera a
San Baltazar Tetela, C.P. 72960,
San Pedro Zacachimalpa, Puebla
01 (222) 229 55 00 Ext. 1302
masagro@correo.buap.mx

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que estuvieron involucrados en la elaboración del proyecto y la redacción de la tesis. Al Dr. Dionicio Juárez, por su apoyo en el diseño y la instalación del experimento. Al Dr. Alejandro Lozano por su retroalimentación y su apoyo con el artículo. Al Dr. Jairo Restrepo, por su asesoría, tiempo y amable retroalimentación respecto a los fundamentos del tema y sus implicaciones, y en la interpretación de los cromatogramas. También, y de manera especial, al Dr. Cinco Patrón por su revisión precisa y retroalimentación cuidadosa del documento y la presentación. A mi revisor y maestro, el Dr. Antonino Báez. Gracias, porque sin su apoyo, este documento no estaría terminado.

A todos los que apoyaron en el experimento: Beatriz Espinosa, María del Refugio Berumen, Carla Martínez, “Ferdousi” y Suriel de la BUAP, y a Albeiro y su equipo de Quali.

A la asociación Alternativas y Procesos de Participación Social A.C., quienes brindaron opciones de sitios donde realizar el experimento, las plántulas y personal para realizar las labores de siembra, trasplante y cosecha.

A Guadalupe “Lupita” Luna y su esposo “Don Chano”, quienes prestaron un pedazo de su tierra, su casa, su comida, su ánimo y su amorosa atención durante las visitas.

A la Mtra. Marisol Hernández, por su apoyo, su paciencia y su tiempo en las prácticas del laboratorio de microbiología.

A la BUAP, por brindar los espacios y los recursos físicos, financieros y humanos necesarios para que la Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas sea una opción de estudios de posgrado en nuestro país.

Al CONACyT por brindar las facilidades de beca de manutención para realizar estos estudios y el resto de posgrados que apoyan y financian.

A mis padres y hermanos, sin cuyo apoyo no habría podido dedicarme totalmente a terminar este documento y graduarme.

A mi esposa, Lulú, quien me acompañó y apoyó desde antes de casarnos para cumplir esta meta.

A Dios, por poner todos los medios y condiciones para que pueda cumplir mi función en su obra.

DEDICATORIA

A todos los agricultores que cuidan su tierra con sensibilidad y respeto mientras producen alimentos para agradecidos y malagradecidos, y a todos aquellos que, a pesar de la imposición de los paradigmas modernos del manejo del suelo, se mantienen firmes en los principios que permiten el mejoramiento y mantenimiento de su salud y fertilidad.

A Michael Astera, por su dedicación al estudio de los minerales en el suelo y su relación con la salud humana hasta los últimos días de su vida, cuyo trabajo inspiró, en parte, esta tesis. D.E.P.

ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIA	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación.....	5
1.2. Planteamiento del problema.....	6
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. General.....	7
1.3.2. Particulares.....	7
1.4. Hipótesis.....	8
1.5. Revisión de literatura.....	9
1.5.1. Importancia del suelo en la agricultura.....	9
1.5.1.1. Salud y fertilidad de suelos.....	10
1.5.1.1.1. Funciones y procesos.....	13
1.5.1.1.2. Componentes.....	14
Minerales y Nutrientos.....	14
Materia orgánica, carbono del suelo y humus.....	18
Organismos del suelo.....	23
Macrofauna.....	23
Mesofauna.....	23
Microfauna.....	23
Microorganismos.....	24
1.5.1.2. Degradación de suelos agrícolas.....	26
1.5.2. Agricultura regenerativa.....	28
1.5.2.1. A. Orgánica Campesina y Cromatografía de Pfeiffer.....	30

	Página
1.5.2.2. Geoterapia.....	37
1.5.2.3. A. de los minerales balanceados y “El Suelo Ideal”.....	38
1.5.3. Amaranto.	40
1.5.3.1. Clasificación taxonómica.	40
1.5.3.2. Producción nacional	40
1.5.3.3. Requerimientos edafoclimáticos.....	41
1.5.3.4. Propiedades nutrimentales del amaranto.....	41
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
2.1. Área de estudio.....	42
2.2. Caracterización histórica del manejo.....	44
2.3. Diagnóstico inicial de la fertilidad del suelo.....	44
2.3.1. Muestreo del suelo de la parcela experimental.	44
2.3.2. Determinación de la fertilidad del suelo mediante las 3M.....	44
2.3.3. Determinación de la calidad del suelo.....	46
2.4. Caracterización de materiales.....	47
2.4.1. Composta, lombricomposta y estiércol.....	47
2.4.2. Abonos minerales.....	47
2.4.3. Otras enmiendas.....	48
2.5. Formulación del manejo regenerativo 3M.....	49
2.5.1. Minerales.....	49
2.5.2. Materia orgánica.....	50
2.5.3. Microorganismos.....	50
2.6. Diseño de tratamientos.....	50
2.6.1. Unidades experimentales.....	52
2.6.2. Variedad de amaranto usada.....	52
2.6.3. Diseño experimental.....	52
2.6.4. Variables agronómicas a evaluar en amaranto.....	52
2.6.5. Labores culturales.....	53
2.6.5.1. Siembra en charolas de germinación.	53
2.6.5.2. Preparación del terreno.....	53

	Página
2.6.5.3. Abonado.....	53
2.6.5.4. Trasplante.....	53
2.6.5.5. Desyerbe.....	54
2.6.5.6. Aplicaciones foliares.....	54
2.6.5.7. Cosecha.....	54
2.7. Impacto del manejo regenerativo 3M en la calidad del suelo.....	54
2.8. Impacto del manejo regenerativo 3M en la densidad de microorganismos.....	54
2.8.1. Técnica de muestreo.	55
2.8.2. Hongos en medio PDA.	55
2.8.3. Solubilizadores de fósforo en medio NBRIP.	55
2.8.4. Fijadores de nitrógeno en medio Rojo Congo.....	55
2.8.5. Bacterias en medio LB.	56
2.9. Análisis estadístico de los resultados.....	56
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
3.1. Historia del manejo del suelo en el sitio.	57
3.2. Parámetros iniciales de fertilidad del suelo	58
3.2.1. Parámetros químicos	58
3.2.2. Diagnóstico inicial de la salud del suelo.....	59
3.3 Caracterización cuantitativa y cualitativa de los abonos orgánicos y minerales .	63
3.2. Impacto del plan regenerativo 3M.....	68
3.2.1. Minerales.....	68
3.2.2. Materia orgánica.....	71
3.2.3. Microorganismos	72
3.3. Respuesta agronómica del manejo 3M en amaranto.....	72
3.3.1. Altura de planta.....	72
3.3.2. Diámetro del tallo.....	73
3.3.3. Biomasa aérea total.....	74
3.3.4. Rendimiento	76
3.4. Manejo regenerativo 3M en la calidad del suelo.....	78
3.5. Manejo regenerativo 3M en la densidad de microorganismos.....	82

	Página
4. CONCLUSIONES.....	85
5. RECOMENDACIONES.....	87
6. LITERATURA CITADA.....	88
7. ANEXOS.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Integración conceptual de los tópicos relacionados con la calidad del suelo.....	13
Figura 2. Ejemplo de 2 cromatogramas de suelos en estados opuestos de enfermedad (izquierda) y salud (derecha) con las zonas separadas y señaladas. Tomado de Restrepo y Pinheiro (2011) y modificado por Armando Larios.....	35
Figura 3. Escala del desarrollo radial en cromatogramas de suelos que indica, de menor a mayor, el espectro de degradación extrema a salud máxima (Restrepo y Pinheiro, 2011).....	37
Figura 4. Localización de Nochixtlán en la región de Mixteca de Oaxaca, México.....	43
Figura 5. Ubicación de la parcela experimental (polígono rojo) cerca de Santiago Tillo en el municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México.....	43
Figura 6. Comparación entre el cromatograma del suelo en la parcela de Santiago Tillo y el ejemplo de un suelo arcilloso pero con características ideales de salud.....	62
Figura 7. Cromatograma del abono VermiBUAP.....	65
Figura 8. Cromatograma del abono Ecoterra.....	67
Figura 9. Cromatograma del estiércol usado como abono en el sitio.....	68
Figura 10. Altura promedio de las plantas de amaranto 2 meses después de trasplante.....	73
Figura 11. Diámetro promedio del tallo de las plantas de amaranto.....	74
Figura 12. Tamo cosechado de los tratamientos.....	75
Figura 13. Rastrojo de amaranto producido con los tratamientos.....	75
Figura 14. Biomasa aérea promedio en toneladas ha ⁻¹ de plantas de amaranto.....	76
Figura 15. Rendimiento de grano de amaranto.....	77
Figura 16. Mosaico de cromatogramas de suelos tratados con VermiBUAP.....	80
Figura 17. Mosaico de cromatogramas de suelos del tratamiento testigo.....	80
Figura 18. Mosaico de cromatogramas de suelos del tratamiento 3M-suelo.....	81
Figura 19. Mosaico de cromatogramas de suelos del tratamiento 3M-foliales.....	81
Figura 20. Densidad promedio de microorganismos activos en cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4) en UFC g ⁻¹ de suelo en cuatro medios de cultivo: papa-agar-dextrosa (PDA) para hongos y levaduras, solubilizadores de P (SP), fijadores de nitrógeno en Rojo Congo (RC) y bacterias en caldo lysogénico (LB).....	84

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Rangos de interpretación de niveles de materia orgánica, adaptado por Armando Larios a partir de información provista por los laboratorios West Analítica y la fórmula obtenida por Florence y Mengel (2013).....	22
Cuadro 2. Cómputo ajustado de niveles ideales de nutrientes minerales a partir de diferentes niveles de CIC y SB de 85.9%, según las guías de Astera (2014).....	39
Cuadro 3. Resumen de normales climáticas de precipitación y temperaturas en la estación de Asunción Nochixtlán, Oaxaca, México, en el periodo 1981-2010 (SMN, 2010).....	42
Cuadro 4. Determinaciones y técnicas para medir la fertilidad y la calidad del suelo.....	45
Cuadro 5. Contenido de otras enmiendas minerales usadas.....	48
Cuadro 6. Enmiendas microbianas usadas en los tratamientos.....	49
Cuadro 7. Detalles de los tratamientos al suelo y su correspondiente aplicación foliar.....	50
Cuadro 8. Resultados de los análisis de suelo Mehlich III y Acetato de Amonio pH 8.5.....	58
Cuadro 9. Balance mineral siguiendo las guías de Astera (2014) integrando los resultados del análisis Mehlich 3 y Acetato de Amonio pH 8.5, su relación porcentual y su interpretación...	59
Cuadro 10. Descripción de las zonas de los cromatogramas en la Figura 6.	61
Cuadro 11. Contenido nutrimental de los abonos orgánicos VermiBUAP, composta Ecoterra, y el estiércol usado tradicionalmente en el sitio.....	63
Cuadro 12. Resultados de los análisis de los abonos minerales harina de roca de basalto y fosforita.	64
Cuadro 13. Cantidad de enmiendas a agregar al suelo en balances mínimo e ideal, asumiendo 100% de estabilización de carbono y 25% de liberación de N en la composta Ecoterra.....	69
Cuadro 14. Cantidades de estiércol necesarias para llevar la concentración de nutrientes minerales a niveles mínimos e ideales, según cálculo en el Cuadro 13.....	70
Cuadro 15. Estimación de la cantidad de abono necesaria para aumentar los niveles de materia orgánica a 6% con los abonos analizados.....	72

RESUMEN

Aunque el suelo es el recurso natural más importante para la humanidad, el manejo actual predominante ocasiona que se degrade a una tasa insostenible. Para contrarrestar este fenómeno es necesario desarrollar el concepto de Manejo Regenerativo, que puede definirse como la adopción integral de prácticas que permitan el mejoramiento y mantenimiento sostenible de la capacidad productiva del suelo. En el presente estudio se analiza una propuesta de Manejo Regenerativo para suelos degradados en la zona de Santiago Tillo, Oaxaca, México, teniendo como indicador al cultivo del amaranto *Amaranthus hypochondriacus*. Para evaluar el sitio se usaron las técnicas de Mehlich 3 y Acetato de Amonio pH 8.5 para la concentración de nutrientes minerales en el suelo, pérdida por ignición (LOI) para la medición de materia orgánica, y la Cromatografía Circular de Pfeiffer para evaluar la calidad del suelo. Se hizo un experimento con un diseño aleatorio con diferente número de repeticiones en donde se probaron tratamientos de 1 ton/ha de lombricomposta y 1 aplicación foliar de extracto de lombricomposta (T1), 3.3 ton/ha de composta enriquecida con minerales detectados como deficientes en el suelo, junto con bacterias fijadoras de nitrógeno, bacterias solubilizadoras de fósforo y hongos micorrízicos, y una reproducción de microorganismos nativos de un bosque cercano (T3), y 3.3 ton/ha de composta con los mismos microorganismos pero aplicando de forma foliar caldos minerales al mes de trasplante (T4), y un tratamiento testigo (T2). A los 60 días del trasplante se midieron en el suelo las densidades de hongos (PDA), solubilizadores de fósforo (NBRIP), fijadores de nitrógeno (RC), y bacterias “totales” (LB), mostrando el tratamiento T3 una mayor densidad en PDA, NBRIP y RC, y el T1 una ligera densidad superior a T3 en LB. En el amaranto se midieron las variables altura de planta, diámetro de tallo, rastrojo, tallo y rendimiento. También se obtuvieron cromatogramas del suelo de la rizósfera al final del experimento. Los valores de rendimiento y biomasa total del T3 fueron superiores al resto de los tratamientos (ANOVA $F(3, 18)=5.0675$, $p<0.05$, y ANOVA $F(3, 18)=5.1494$, $p<0.01$), superando en 20% al rendimiento promedio registrado en el predio, y en 40% al testigo. No hubo diferencia en los cromatogramas realizados al final con los del diagnóstico. Se concluye que un manejo que considera los 3 componentes de la fertilidad del suelo (Minerales, Materia Orgánica y Microorganismos) de manera balanceada produce un aumento en los rendimientos y la producción de biomasa, permitiendo recuperar la capacidad productiva de un suelo degradado de seguirse aplicando el manejo descrito.

ABSTRACT

Although soil is the most important natural resource for humanity, the prevailing current management causes it to degrade at an unsustainable rate. To counteract this phenomenon, it is necessary to develop the concept of Regenerative Management, which can be defined as the broad adoption of practices that allow the improvement and maintenance of the productive capacity of soils. In this study, a Regenerative Management proposal for degraded soils in the area of Santiago Tillo, Oaxaca, Mexico, is analyzed, having as an indicator the crop amaranth *Amaranthus hypochondriacus*. To evaluate the site, the techniques of Mehlich 3 and Ammonium Acetate pH 8.5 were used to measure the concentration of mineral nutrients in the soil, Loss-on-Ignition (LOI) for the measurement of organic matter, and Pfeiffer's Circular Chromatography to evaluate soil quality. An experiment was carried out with a random design with different number of repetitions with treatments of 1 ton ha⁻¹ of vermicompost and 1 foliar application of vermicompost extract (T1), 3.3 ton ha⁻¹ of compost enriched with minerals detected as deficient in the soil, together with nitrogen fixing bacteria, phosphorus solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi, and a reproduction of native microorganisms from a nearby forest (T3), and 3.3 ton ha⁻¹ of compost with the same microorganisms but applying mineral solutions in a foliar spray one month after transplant (T4), and a control treatment (T2). At 60 days after transplant, the densities of fungi (PDA), phosphorus solubilizers (NBRIP), nitrogen fixers (RC), and "total" bacteria (LB) were measured in the soil, with the T3 treatment showing a higher density in PDA, NBRIP and RC, and T1 a slightly higher density than T3 in LB. In amaranth, the variables plant height, stem diameter, stubble, husk and yield were measured. Chromatograms of the rhizosphere soil were also obtained at the end of the experiment. The yield and total biomass values of T3 were higher than the rest of the treatments (ANOVA F (3, 18) = 5.0675, p <0.05, and ANOVA F (3, 18) = 5.1494, p <0.01), exceeding in 20 % to the average yield registered in the property, and 40% to the control. There was no difference in the chromatograms performed at the end with those of the diagnosis. It is concluded that a management that considers the 3 components of soil fertility (Minerals, Organic Matter and Microorganisms) in a balanced way produces an increase in yields and biomass production, allowing it to recover the productive capacity of a degraded soil if it continues to be applied.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es irrefutablemente uno de los recursos naturales más importantes para el ser humano y todas las formas de vida en la tierra, junto con el agua y el aire de calidad adecuadas (Ashad y Martin, 2002). La humanidad depende del suelo para satisfacer sus necesidades básicas, como alimento, fibra, combustibles y materias primas para la industria, así como servicios ambientales de regulación del clima, reciclaje de nutrientes, producción de oxígeno, captación y filtración de agua, y resguardo de la biodiversidad. La relación más íntima y de mayor impacto entre la humanidad y el suelo es, sin duda, la agricultura. En el año 2000 se estimaba que la superficie dedicada a la producción de cultivos era de 3,500 millones de hectáreas para zonas de pastoreo, praderas y pasturas, y 1,500 millones de hectáreas dedicadas a cultivos para consumo humano directo, representando 24% y 11%, respectivamente, de la superficie no congelada de la tierra, sumando más de 5,200 millones de hectáreas en la actualidad (FAO, 2015).

De 2000 al 2010 se estima que, en promedio, 13 millones de hectáreas cada año fueron deforestadas para, en su mayoría, dar paso a pastizales y áreas agrícolas (FAO, 2015; Pimentel y Pimentel, 2003). Mientras tanto, 12 millones de hectáreas agrícolas y ganaderas fueron abandonadas cada año por dejar de ser productivas debido a procesos de degradación de suelos (FAO, 2016), 10 millones de éstas debido a procesos de erosión y 2 millones a la salinización e inundación (Edwards, 2001). Además de estas tierras abandonadas, otros 20 millones de hectáreas se vuelven improductivas hasta el punto de la inviabilidad económica, y entre 5 y 17.5 millones de hectáreas se incorporan a la urbanización y construcción de caminos (Edwards, 2001). Mientras que el fenómeno del abandono de las tierras se compensa con la apertura de nuevas zonas para producción de pastos y cultivos, evitando así entrar en un desabasto alimentario a nivel global, los límites físicos del planeta y la calidad y capacidad productiva de las tierras aún disponibles impiden que esta tendencia pueda seguir indefinidamente (Oldeman *et al.*, 1991). Si se cumplieran las estimaciones propuestas por Buringh (1989), entre los años 2023 y 2050 el suelo agrícola sería insuficiente para alimentar a la población humana. Aunque ésta y otras predicciones pueden ser criticadas razonablemente (Latham, 2020), es necesario un cambio radical en el enfoque de la agricultura hacia el mejoramiento de la calidad o salud de los suelos para evitar dicho desabasto en el futuro cercano (Sherwood y Uphoff, 2000; Goreau *et al.*, 2015; Lal, 2020).

En México, la superficie dedicada a la agricultura se estima en 26.9 millones de hectáreas, y 109.9 millones de hectáreas son dedicadas a la ganadería, dando un total de 136.8 millones de hectáreas dedicadas a la producción agropecuaria (SIAP, 2016), de las que se requiere un inventario actualizado y confiable de su estado de degradación (SEMARNAT, 2012). Por un lado, en 2002, SEMARNAT y CP registraron que el 44.9% del territorio (79 millones de hectáreas) mostraba signos de degradación, y que cerca del 68% de los suelos dedicados a actividades agrícolas, forestales y ganaderas presentaba algún grado de degradación; de estas tierras, la mitad correspondía a la degradación química, unas 34 millones de hectáreas, de la que domina con un 92% la disminución de la fertilidad, y completadas por estados de contaminación, salinización, alcalinización y eutrofización. Más adelante, en 2013, CONAFOR y UACH reportaron que únicamente 15.8 millones de hectáreas presentaban degradación química por un “ajuste a los niveles reportados”. Sin embargo, este mismo estudio reporta que un 63% de la superficie del territorio (111.5 millones de hectáreas) muestran signos de algún tipo y grado de degradación, siendo las principales causas las actividades agrícolas (asociadas directamente a la degradación química), el cambio de uso de suelo, la deforestación y el sobrepastoreo. De los estudios anteriores, podría interpretarse que cerca del 11% del territorio, cerca de 19 millones de hectáreas, fue degradado en tan sólo 11 años (1.7 M ha por año).

En particular, el estado de Oaxaca es uno de los estados con mayor proporción de suelos con posibilidad de ser degradados, teniendo estimaciones de 74.6% con erosión hídrica potencial (SEMARNAT y UACH, 2003). Según la SEMARNAT y el CP (2002), se estimaba que el 18.3% del estado (1.668 M ha) había sufrido erosión hídrica, 0.5% (43,800 ha) erosión eólica, 18.4% (1.678 M ha) degradación química, y 5.3% (483,000 ha) degradación física.

Debido a la necesidad de alimentar una población creciente y ajustarse a las exigencias del mercado de los alimentos, los agricultores tanto en México como en el resto del mundo, se han visto en la necesidad de producir más en la misma superficie de tierra, a menor costo, y con una calidad “estándar”. Para ayudar a superar estos retos, los gobiernos y la industria promovieron la modernización e intensificación de la agricultura mediante la adopción de herramientas tecnológicas como variedades “mejoradas” sembradas en monocultivos, maquinaria agrícola e

insumos como fertilizantes y plaguicidas (Sherwood y Uphoff, 2000; Restrepo y Pinheiro, 2011; Lehman *et al.*, 2015). Dichos insumos sustituirían artificialmente las funciones biológicas que controlaban las poblaciones de insectos herbívoros, el mantenimiento de la estructura del suelo y, de manera incompleta y equivocada, el ciclo de los nutrientes (Kibblewhite *et al.*, 2008). Lamentablemente, esta intensificación, habiendo logrado aumentar la rentabilidad y el rendimiento (al menos temporalmente), ha resultado en la degradación de la salud de los suelos agrícolas (Sherwood y Uphoff, 2000; Lehman *et al.*, 2015), que puede ser llevada en el extremo hasta los llamados desiertos creados por el hombre (Le Houérou, 2002), trayendo consecuencias ambientales y sociales significativas (Altieri, 1999; Goreau *et al.*, 2015).

La pérdida paulatina de la fertilidad, enmascarada por el inicial aumento de los rendimientos debido al uso de fertilizantes químicos, maquinaria y pesticidas, puede encadenar a los agricultores a la dependencia tecnológica, endeudamiento, y posterior bancarrota. Este fenómeno, además, amenaza el sostenimiento a largo plazo de la población humana, pues deja para las generaciones futuras un sustento alimentario enfermo y destruido, prometiendo hambre, pobreza e inestabilidad sociopolítica, acompañados de desastres naturales derivados de la destrucción de los ecosistemas y la alteración de los factores que regulan el clima (Lal en Goreau *et al.*, 2015). A nivel mundial, en las décadas recientes, la liberación del carbono concentrado en el humus y demás fracciones de la materia orgánica de los suelos agrícolas en degradación aporta al enriquecimiento de la atmósfera con CO₂, NO_x y CH₄ siendo una causa importante del cambio climático, en vez de ser un depósito de carbono (Lal, 2015). La Agricultura Regenerativa se muestra como una solución tanto para la degradación de suelos como para el cambio climático (Lal, 2020; Schreefel *et al.*, 2020), por lo que se vuelve urgente desarrollar y masificar esta propuesta.

Para contrarrestar el fenómeno de la degradación de suelos a nivel global, nacional y regional, es necesario desarrollar el concepto de *manejo regenerativo*, que puede definirse como la adopción integral de prácticas que permitan el mejoramiento y mantenimiento a corto, mediano y largo plazo de la capacidad productiva del suelo, la viabilidad de la calidad de vida que sostiene, y la conservación del ambiente y los recursos que lo componen (Kennedy y Smith, 1995). Contrario al manejo convencional dominante, donde el enfoque se fija en la rentabilidad

a corto plazo de un cultivo en particular, sin importar el impacto en las condiciones que permitan la perpetuación de la producción (fertilidad, estabilidad climática, salud de los trabajadores del campo y los consumidores, por mencionar algunos), en el manejo regenerativo se debe armonizar la rentabilidad con los impactos sociales y ecosistémicos de la agricultura. Sería importante resaltar que el manejo regenerativo debe estar enfocado más en los procesos que en los insumos de un sistema; es decir, que deben minimizarse los insumos iniciales o externos, y buscar maximizar los procesos que activen o alimenten el proceso de regeneración. Más allá de ser una propuesta científica, el manejo regenerativo debe responder a cuestiones apremiantes, como ser viable económicamente y socialmente aceptable, y ajustarse a condiciones como el cultivo o conjunto de cultivos locales, el clima y los materiales disponibles en cada región y comunidad.

En el presente estudio se analiza una propuesta de Manejo Regenerativo 3M para un suelo degradado en la localidad de Santiago Tillo, Oaxaca, México, en un predio seleccionado por su nivel de degradación y por pertenecer a un agricultor orgánico cooperante, teniendo como indicador al cultivo del amaranto *Amaranthus hypochondriacus*. Este cultivo es interesante por su rentabilidad y potencial para producir en condiciones ambientales adversas como sequía y suelos degradados, además de ser usado desde tiempos ancestrales y poseer características nutritivas valiosas (Ayala-Garay *et al.*, 2013; Romero-Romano *et al.*, 2017). Se realizó un experimento para comparar las diferentes respuestas entre 3 manejos regenerativos, uno usando lombricomposta de alta calidad y una aplicación líquida de un extracto de ésta (T1), otro aplicando minerales de forma balanceada que respondían a las deficiencias nutrimentales del suelo, especialmente microelementos, además de composta y microorganismos benéficos en forma sólida y líquida aplicados directamente al suelo en la zona de la rizósfera (T3), y otro similar al anterior, pero sin microelementos balanceados al suelo, sino aplicados en forma líquida sobre las hojas (T4). Para comparar con el estado actual del suelo, se tuvo un tratamiento testigo (T2) en donde no se hizo ninguna aplicación ni al suelo ni a las hojas, y se compararon los resultados con los rendimientos promedio históricos. Se logró demostrar que un manejo en que se integren los abonos orgánicos, los microorganismos benéficos, y los minerales balanceados según las necesidades particulares del suelo, puede aumentar la producción del amaranto.

1.1. Justificación

El siguiente trabajo es importante porque aporta guías para aumentar la probabilidad de éxito en el manejo regenerativo de suelos, eje central de la propuesta de la Agricultura Regenerativa (Lal, 2020; Schreefel *et al.*, 2020). Esta propuesta constituye la mejor opción para alimentar a una población creciente en un mundo con cada vez menor disponibilidad de suelos por habitante (Buringh, 1989; Edwards, 2001; FAO, 2015), además de ser una solución para mitigar y corregir el enriquecimiento de la atmósfera con gases de efecto invernadero al mismo tiempo que revierte la degradación de los suelos (Lal, 2015 y 2020; Goreau *et al.*, 2015), por lo que potenciar y fortalecer el desarrollo de este tipo de agricultura debe estar en el centro de todas las medidas futuras para enfrentar los retos del siglo XXI, mientras se conservan y regeneran los recursos necesarios para el bienestar de la humanidad (ONU, 2013), principalmente aquél que nos alimenta: el suelo fértil.

En el corto plazo, los beneficiarios son los agricultores actuales, en particular aquellos que han conocido el concepto 3M, pues conociendo las técnicas y herramientas necesarias para aumentar la productividad y la rentabilidad de su actividad económica, podrían tener una mejor calidad de vida. Indirectamente, los allegados a éstos pueden aprender al ver la demostración del potencial de esta propuesta, y de replicarla en sus propios predios, una mayor cantidad de hectáreas entraría a un proceso de regeneración. También, los consumidores de los productos resultados de esta práctica se verían beneficiados en una mejor calidad de alimentos. De masificarse, tanto los seres humanos como los otros organismos que habitan la tierra se verían beneficiados, pues estaríamos redescubriendo la manera de convivir armónicamente, compartiendo el bien común que sostiene a todos los ecosistemas en la tierra firme: el suelo sano. También podrían verse beneficiados los tomadores de decisiones en diferentes niveles gubernamentales, pues esta tesis plantea un método para regenerar suelos degradados, y hay varias crisis que se verían resueltas en mayor o menor medida con la regeneración de éstos.

1.2. Planteamiento del problema

La humanidad se encuentra en una crisis sistémica en que la reducción de la biocapacidad del planeta está a punto de colapsar. Síntomas de este complejo fenómeno son el cambio climático y la degradación ambiental, que han puesto en riesgo la estabilidad del planeta para ser un espacio adecuado para la vida en un futuro cercano. Al mismo tiempo, los combustibles fósiles, la misma “sangre” del sistema capitalista, han llegado a su pico y su oferta en cantidad y calidad. Sin estos recursos, la economía globalizada en que los productos alimenticios están en movimiento constante entre estados, países y continentes, simplemente no puede permanecer con los ritmos actuales (Heinberg, 2010; Turner, 2014; Reyes-Flores, 2020). En consecuencia, la autosuficiencia en la producción de alimentos, ya no sólo a nivel país, sino a nivel comunidad, se torna mucho más urgente y relevante si el objetivo es evitar el colapso y asegurar la supervivencia de la población humana.

Ante los problemas que constituyen dicha crisis, la Agricultura Regenerativa, y su correspondiente manejo regenerativo, propone la recuperación del suelo, el recurso natural que alimenta tanto al ser humano como a la gran diversidad de especies que habitamos el planeta (Schreefel *et al.*, 2020). Reparar el daño hecho a este recurso es la única opción viable para corregir el desbalance de CO₂ en la atmósfera y restaurar las condiciones climáticas (Goreau *et al.*, 2015; Lal, 2020), mientras se recuperan la eficiencia en los ciclos del agua y de los minerales en los ecosistemas (Savory, 2005; Savory y Duncan, 2016). Rehabilitando los suelos degradados también podría regenerarse el tejido social y se fortalecerían las comunidades y sus economías (Schreefel *et al.*, 2020). Sin embargo, este proceso es tan complejo como urgente, y su desarrollo conlleva la integración de múltiples disciplinas y herramientas (Sherwood y Uphoff, 2000).

Considerando que México tiene más del 60% de su territorio degradado (CONAFOR y UACH, 2013), y que en el estado de Oaxaca es de más del 74% (SEMARNAT y UACH, 2003), urgen alternativas para contrarrestar este proceso. Siendo el cultivo del amaranto una opción prometedora para mejorar la alimentación y la rentabilidad agrícola en condiciones de degradación de suelos y clima adverso (Ayala-Garay *et al.*, 2013), se plantea la siguiente pregunta: ¿es factible e importante desarrollar un sistema de manejo regenerativo de suelos que permita mejorar la producción de amaranto en suelos degradados de Oaxaca, México?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar en el cultivo de Amaranto (*Amaranthus hypocondriacus*) el método de manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) en un suelo degradado en la localidad de Santiago Tillo del municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México.

1.3.2. Objetivos particulares:

- Realizar un diagnóstico inicial de las condiciones de fertilidad y salud del suelo de la localidad de Santiago Tillo del municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México.
- Formular un plan de manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) con base en los resultados del diagnóstico del suelo de la localidad de Santiago Tillo del municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México.
- Realizar un experimento con el cultivo de amaranto *Amaranthus hypocondriacus* aplicando un manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) en la localidad de Santiago Tillo del municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México.
- Evaluar el impacto del manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) mediante la Cromatografía Circular de Pfeiffer y un conteo de microorganismos (hongos, solubilizadores de fósforo, fijadores de nitrógeno y bacterias).

1.4. Hipótesis

El diagnóstico inicial del suelo permite conocer las condiciones de fertilidad y salud del mismo.

La aplicación del manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) influye en la producción del cultivo de amaranto en la localidad de Santiago Tillo del municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México.

El manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) influye en la densidad poblacional de microorganismos (hongos, solubilizadores de fósforo, fijadores de nitrógeno y bacterias).

El manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) influye en la salud del suelo durante el cultivo de amaranto en la localidad de Santiago Tillo del municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México.

1.5. Revisión de literatura

1.5.1. Importancia del suelo en la agricultura

El suelo puede ser definido desde distintos puntos de vista. Desde la biología, los suelos pueden definirse como una comunidad compleja e interrelacionada de organismos, la cual ejerce una influencia, y es también, en parte, determinada por las propiedades físicas y químicas de este medio (Kennedy y Smith, 1995). Desde la geología, los suelos son cuerpos tridimensionales naturales que se forman en espacios de la superficie terrestre por complejos procesos físicos y bioquímicos, influenciados por los factores de clima, material parental, topografía, tiempo, y biología (Bockheim *et al.*, 2014; Brevik y Arnold, 2015), de la que recientemente se separa la intervención humana como el sexto factor de formación de suelos (Dudal, 2004). Desde la ecología, el suelo es el material natural orgánico y mineral no consolidado, que se forma en la superficie de la tierra, y provee el medio ambiente para los seres vivos, convirtiéndose en la “zona crítica” (Voroney, 2007) donde convergen la atmósfera, la litósfera, la biósfera y la hidrósfera, y confluyen los ciclos de la materia y los fenómenos de transferencia de energía (McGill, 2007). Para la agronomía, dependiendo del enfoque del manejo, puede definirse como un recurso natural importante, con limitaciones y potencial diverso, que el hombre puede usar para obtener alimentos y fibras (Duncan, 1969); también como el material “mineral” no consolidado en la superficie inmediata de la tierra que sirve como el medio natural para el crecimiento de las plantas (Fageria *et al.*, 1997), y que está compuesto ordenadamente por minerales, materia orgánica, aire, agua y organismos vivos (Hughes, 1983).

Tanto el ser humano como el resto de los organismos que habitan la superficie terrestre dependen del suelo para vivir. El suelo es el cimiento fundamental de los ecosistemas y los agroecosistemas, sin el cual no pueden existir ni prosperar las poblaciones vegetales ni animales en estados saludables y diversos. El nivel de salud de una comunidad está en función de la salud o fertilidad de los suelos que la sostienen, por lo que el mantenimiento de la fertilidad debe prevalecer sobre cualquier otra consideración (Collins, 1958). Alan Savory (2005) considera al suelo “vivo” y biológicamente activo como el requisito indispensable para un ciclo de los

minerales eficiente, que en interacción con un ciclo del agua eficiente, una diversidad biológica abundante y un flujo de energía maximizado, puede sustentar poblaciones de plantas, animales y humanos de manera saludable y económica. Para que sobreviva la civilización a los retos de la desertificación, la población creciente, el agotamiento de los recursos no-renovables que la sostienen, y un clima cambiante, es imprescindible un cambio de filosofía agrícola hacia el Manejo Holístico, que incluya métodos para cosechar agua en el paisaje y reclamar tierras degradadas (Savory y Duncan, 2016).

1.5.1.1. Salud, calidad y fertilidad de suelos

La salud del suelo (SS) puede definirse como “la capacidad de un suelo para mantener poblaciones saludables de plantas, animales y seres humanos” (Howard, 1943; Lal, 2020). Por su parte, la calidad del suelo suele definirse como “la capacidad de un suelo en específico para funcionar dentro de límites naturales o de manejo, de modo que sostenga la productividad de plantas y animales, mantenga o mejore la calidad del agua y el aire, y soporte la salud humana”, aunque abundan definiciones más o menos complejas (Arshad y Martin, 2002; Sokja *et al.*, 2003; Larkin, 2015; Muñoz-Rojas, 2018). Muchos autores intercambian los conceptos de salud y calidad de suelo, prefiriendo los agricultores el término de salud de suelo, y los científicos el de calidad de suelo (Sherwood y Uphoff, 2000; Larkin, 2015; Muñoz-Rojas, 2018). Estos conceptos, a pesar de sus críticas (Sokja *et al.*, 2003) han ganado aceptación entre las comunidades de científicos, agrónomos y agricultores conscientes de la problemática de la insostenibilidad del sistema agroalimentario actual. Para ambas propuestas se enlistan propiedades físicas, químicas y biológicas, siendo muy comunes en estos tópicos las relaciones con la materia orgánica y las comunidades microbianas. Sin embargo, son pocos los textos y artículos científicos, propuestas y métodos de manejo que integran el componente “mineral” a este concepto o uno previo equivalente; algunos ejemplos son: Hensel (1893); Albrech (1958); Sait, (2003); Restrepo y Pinheiro (2009); Restrepo y Pinheiro (2011); Astera (2014); Restrepo (2014); Goreau *et al.* (2015); Manning y Theodoro (2018); Theodoro *et al.* (2020). Con el propósito de que agricultores, profesionistas, científicos y políticos involucrados con la agricultura cuenten con respaldo de indicadores científicamente probados, recientemente se ha reconocido y estimulado la investigación con algunos métodos para medir indicadores de la

salud del suelo que relacionan y reconocen a los minerales como elementos importantes del concepto de SS, y propone métodos cuantitativos para medir y evaluar dicha relación, en particular el método de Mehlich 3 para suelos con $\text{pH} < 7.2$, Acetato de amonio, Olsen y DTPA para suelos con $\text{pH} > 7.2$ (SHI, 2018).

Fertilidad de suelo es el concepto más comúnmente manejado que estudia la capacidad de éste para sostener la vida. La fertilidad del suelo puede definirse como la “habilidad o capacidad de un suelo para soportar y mantener el crecimiento vegetal, derivada de las interacciones entre la matriz mineral, las plantas y los microbios para construir y descomponer la materia orgánica, y en consecuencia, la conservación y disponibilidad de los nutrientes” (FAO, 2015a). Por la interacción de los elementos y funciones mencionados, la fertilidad resulta en una propiedad emergente, que confiere una capacidad de carga y una vocación propia a cada suelo, y que es inevitablemente afectada si alguno o varios de sus componentes se ven deteriorados (Nicolodi y Gianello, 2015). Por ejemplo, la interacción de la materia orgánica y los minerales es de mutua dependencia, pues la construcción y acumulación de la primera requiere de la presencia de los segundos (Welch y Graham, 2012). Al mismo tiempo, la diversidad microbiológica es clave para el funcionamiento integrado de los ciclos de los nutrientes (minerales) y la descomposición, mineralización y humificación de la materia orgánica (Kennedy y Smith, 1995), procesos que requieren una diversidad de elementos químicos y condiciones adecuadas para dichos procesos. También se ha dicho que “mientras más diversificada sea la materia orgánica, más diversificada será la vida del suelo y mayor la diversidad de nutrientes movilizados” (Primavesi, 2009). De la información anterior pueden extraerse 3 componentes intrínsecamente fundamentales que determinan la calidad, salud y fertilidad del suelo: la materia orgánica, los minerales, y los microorganismos, abordados en este estudio como las 3 “M”s.

A pesar de las diferencias conceptuales y prácticas, en una actitud ecléctica, estos conceptos pueden integrarse dentro de la comprensión de los procesos de formación y evolución del suelo, o los procesos de degradación o deterioro en el sentido opuesto, derivando en la reducción de la calidad, o en el sentido del mantenimiento o mejoramiento, sus acepciones artificiales de “agradação” (*aggradation*) (Wienhold *et al.*, 2004), remediación, reclamación, restauración (Lal y Stewart, 1992; Goreau *et al.*, 2015), rehabilitación (Yirdraw *et al.*, 2017), o regeneración

(Rhodes, 2017; Lal, 2020). La calidad del suelo puede entenderse como un “espectro de indicadores” cuyos extremos mínimos explican la ausencia de capacidad de un suelo para sostener vida, y en el extremo máximo, la capacidad de mantener poblaciones abundantes y sanas de plantas, animales y seres humanos, limitadas en número sólo por otros factores como clima y disponibilidad de agua. Por su parte, la “salud del suelo” puede entenderse como un “fragmento de la calidad” del mismo, limitado a los rangos en los que dicho suelo es capaz de mantener y sostener indefinidamente la salud de las plantas, los animales y los seres humanos que viven de éste, es decir, que ni plantas ni animales ni humanos desarrollen patologías derivadas de lo que obtienen del suelo, y puedan realizar sus funciones de nutrición, reproducción y protección sin limitantes derivadas de éste.

El fragmento de la calidad no considerado dentro de salud de suelo, consideraría los grados en que los organismos que habiten dicho suelo no puedan desarrollarse, reproducirse y protegerse de parásitos o agentes abióticos de forma natural o autosuficiente. Algunos autores llaman a este fragmento del continuo de la calidad del suelo como “enfermedad de suelos” o *soil sickness* (Huang *et al.*, 2013; Cesarano *et al.*, 2017), término comúnmente relacionado con una degradación severa de la calidad del suelo (Huang *et al.*, 2013), pero que puede entenderse como un conjunto de condiciones adversas para el crecimiento y reproducción de las plantas que resultan en reducciones en el rendimiento y la salud de éstas, derivadas principalmente de un agotamiento o desbalance nutricional, un aumento en la población de parásitos y patógenos junto a un cambio en la comunidad microbiana, o una acumulación de compuestos fitotóxicos y autotóxicos durante la descomposición de los residuos del cultivo u otros detritos, o una interacción entre éstas (Cesarano *et al.*, 2017). Considerando lo anterior, puede deducirse que, asumiendo que no hubiera contaminantes en el suelo (pesticidas, metales pesados en exceso, sustancias alelopáticas, u otros), y que existiera una saludable comunidad microbiana (Cesarano *et al.*, 2017), así como suficientes reservas de materia orgánica que sustentara dicha comunidad (Lehman *et al.*, 2015; McKinley, 2019), la salud de las plantas, y por tanto, de animales y humanos que se alimentaran de éstas, estaría determinada por la disponibilidad y el balance de los nutrientes minerales que obtuvieran del suelo (Orellana y Pilatti, 1999; Primavesi, 2009; Chaboussou, 2010; Astera, 2014; Cesarano *et al.*, 2017).

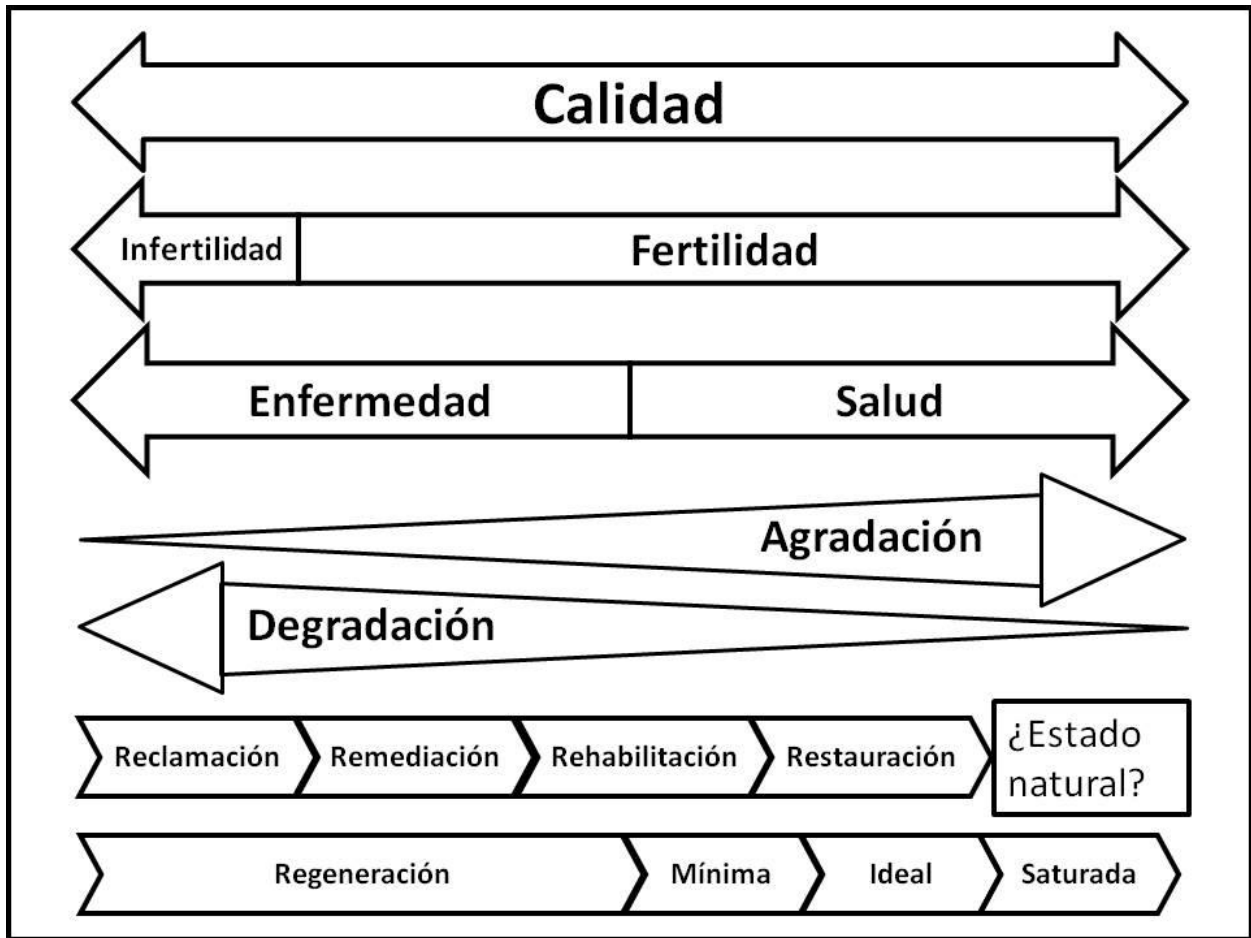


Figura 1. Integración conceptual de los tópicos relacionados con la calidad del suelo.

1.5.1.1.1. Funciones y procesos

El suelo tiene numerosas funciones ecológicas, en las que destacan la producción de biomasa (alimento, fibra, materiales de construcción, energía), el ciclaje de nutrientes, el filtrado y amortiguación de la lluvia y otros disturbios, el almacenamiento y provisión de agua; es hábitat y fuente de la biodiversidad, así como el soporte de edificios y medio de preservación de la herencia cultural y arqueológica humanas (Larkin, 2015; FAO, 2015a). El suelo es un complejo sistema donde ocurren procesos que sostienen los ecosistemas, como la intemperización y solubilización de los minerales en las rocas, la incorporación de éstos a la biomasa microbiana (asimilación) y vegetal (nutrición), la formación de humus y complejos organominerales que

conforman su estructura, la descomposición y mineralización de la materia orgánica, la retención de agua y nutrientes minerales, entre otros (FAO, 2015a). Un suelo sano es aquél en el que ocurren de forma armónica todos sus procesos y se expresan de forma óptima todas sus funciones, de modo que prosperen los organismos (microbios, plantas, animales y seres humanos) que dependan de éste. Para comprender mejor la complejidad del sistema suelo, es conveniente abordar por separado sus componentes principales.

1.5.1.1.2. Componentes

Minerales y Nutrientes

Los minerales son las sustancias naturales que conforman las rocas; son en su mayoría sólidos, inorgánicos y homogéneos, de fórmula y composición química propia (Zorzin, 2002). Los minerales son los componentes de las cenizas que quedan al calcinar las sustancias orgánicas, siendo parte fundamental de éstas (Gupta y Gupta, 2014). Los minerales se presentan en concentraciones cercanas al 3% en las plantas (Mengel y Kirkby, 2000), y pueden dividirse en dos grandes grupos: los esenciales y los no-esenciales, cuyos límites varían según los organismos, considerándose que los esenciales para la vida vegetal son entre 13 y 17 según el tipo de planta (Mengel y Kirkby, 2000; Vatansever *et al.*, 2016), y hasta 34 para la vida humana y animal (Strain *et al.*, 2019). Dentro de los no-esenciales, algunos son considerados benéficos y otros tóxicos (Vatansever *et al.*, 2016), aunque cualquiera de los esenciales o benéficos puede volverse tóxico si supera un nivel que desequilibre la homeostasis del organismo (Nielsen, 2000).

El agotamiento de nutrientes minerales es una forma importante de degradación en los suelos agrícolas (Dalal y Probert, 1997; Tan *et al.*, 2005; Lal, 2015; FAO, 2015a). Este proceso ocurre cuando los cultivos han extraído una alta proporción de los nutrientes disponibles en el suelo (Dalal y Probert, 1997), dejando un desbalance nutrimental que puede reducir los rendimientos (Lobell *et al.*, 2009) y amenazar la provisión sostenida de alimento y servicios ecosistémicos (FAO, 2015a). El uso de fertilizantes sintéticos altamente solubles es un factor importante en este empobrecimiento, ya que su uso en forma aislada, con el tiempo provoca un déficit en el

balance extracción-aplicación de nutrientes minerales en el suelo. Lo anterior puede deberse a que los fertilizantes más comúnmente aplicados contienen sólo 1, 2 o 3 elementos químicos, mayoritariamente N, P y K, en algunas ocasiones se aplican elementos como S, Ca y Mg, y todavía con menos frecuencia, Fe, Mn, Zn, Cu, B, mientras que las plantas extraen del suelo desde 35 (Restrepo, 2014), a 45 (Primavesi, 2003), o incluso los 90 elementos de ocurrencia natural en la naturaleza (Fageria *et al.*, 2009; Welch y Graham, 2012), de modo que los suelos manejados con estas tecnologías, continúan empobreciéndose en aquellos elementos ausentes en estos insumos agrícolas. Prueba de esto es que a pesar del incremento en la aplicación de fertilizantes nitrogenados, los rendimientos se han estancado o aún disminuido (Mulvaney *et al.*, 2009), así como el hecho de que los alimentos producidos en suelos manejados con métodos convencionales cuyos nutrientes (especialmente los secundarios y micronutrientes) se han reducido o agotado, los contienen en menor concentración (Thomas, 2000).

Este efecto de “dilución” ocurre al no aplicar al suelo todos y de manera balanceada los nutrientes necesarios para el crecimiento sano de los cultivos (Roberts y Tasistro, 2012). De modo similar, una tasa de aplicación de abonos orgánicos cuyo contenido mineral sea inferior a la tasa de extracción por los cultivos creará un agotamiento de aquellos nutrientes en déficit, aunque no en las proporciones y ritmos de los fertilizantes químicos, al ser los abonos orgánicos mucho más diversos en nutrientes minerales. De modo que un principio primordial para mantener la fertilidad de un suelo, consiste en devolverle a éste todos los nutrientes que le son arrebatados con las cosechas, las infiltraciones y la erosión (Collins, 1958; Dalal y Probert, 1997; Tan *et al.*, 2005)

Al existir un delicado dinamismo armónico entre la nutrición, la genética vegetal y el ambiente, es importante establecer un balance nutricional (mineral) para lograr una respuesta óptima de los cultivos (Huber y Haneklaus, 2007; Fageria *et al.*, 2007). Esto sugiere que la aplicación, aportación, fertilización o abonado igual, por lo menos, la extracción o remoción de todos los nutrientes minerales que contienen las cosechas para lograr una producción permanente o sostenible (Primavesi, 1984; Dalal y y Probert, 1997; Restrepo, 2014). Para lograr este objetivo, además del uso de abonos orgánicos como compostas o estiércoles, se puede considerar el uso de abonos minerales, llamados también harinas de roca o polvos de piedra, como yeso o sulfato

de calcio, calcita (roca caliza, cal suave, o carbonato de calcio), fosforita o apatita (fosfatos de calcio), dolomita (carbonato de calcio y magnesio), entre muchas otras (basaltos, granitos, serpentinito, feldespatos, olivino, magnesita, langbeinita, etc.), sales minerales de origen natural o sintético (cloruro o sulfato de potasio, de magnesio, de cobre, de manganeso, de zinc, ferroso, etc.; sal marina, borato de sodio, molibdato de sodio, cloruro o sulfato de cobalto, etc.), óxidos y silicatos, siempre y cuando no afecten negativamente la microbiología del suelo, ni se llegue a niveles de desbalance o toxicidad (Hensel, 1893; Restrepo, 2014; Albrecht, 1958; Van Straaten, 2002 y 2006; Astera, 2014; Campe, 2015).

Los elementos ausentes en los fertilizantes químicos comunes, que entran en las categorías de macroelementos secundarios (Si, Ca, Mg, S), microelementos (Cl, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo) y elementos traza (Co, Ni, I, Sn, elementos tierras raras, etc.), más que aportar biomasa o “rendimiento” como los macroelementos primarios (N, P y K), son necesarios para el crecimiento y desarrollo saludable de plantas, animales y seres humanos. Dicho desarrollo “saludable” en las plantas puede caracterizarse por una síntesis de proteínas completa (proteosíntesis) durante el periodo de crecimiento, floración y fructificación, y una adecuada y oportuna lisis de éstas (proteólisis) en los periodos de senescencia (Chaboussou, 2010). Esta armonía proteosíntesis/proteólisis está regulada por las hormonas, enzimas y coenzimas involucradas con procesos de crecimiento, reproducción y protección, como fotosíntesis, respiración, transpiración, transporte, producción de metabolitos secundarios, resistencia a estrés hídrico o térmico, entre otras. Dichas sustancias contienen o son influenciadas (activadas o inhibidas) por la presencia y disponibilidad de elementos como Cu, Zn, Fe, Mn, Mg, B, Mo, S, Ca, I, Cl (Restrepo, 2014), por lo que los procesos relacionados no son realizados de manera óptima, a modo de “cuellos de botella” en las rutas metabólicas, acumulándose aminoácidos libres y carbohidratos solubles en aquellos órganos donde son procesados. Esta acumulación es la condición previa que vuelve susceptibles y atractivas a las plantas para ser atacadas por sus parásitos, de modo que los cultivos que se han nutrido de manera desbalanceada se vuelven paulatinamente más susceptibles a plagas y enfermedades, pues existe una relación directa entre el estado nutricional de una planta y la forma y grado en que es atacada por sus parásitos (Primavesi, 1984, 2003 y 2009; Huber y Haneklaus, 2007; Datnoff *et al.*, 2007; Chaboussou, 2010; Bruulsema *et al.*, 2012; Restrepo, 2014), además de la mencionada reducción en la

concentración de elementos minerales en la cosecha. Aunado a lo descrito anteriormente, el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados ha generado contaminación atmosférica, emisión de gases de invernadero, eutrofización de cuerpos de agua (Mulvaney *et al.*, 2009; FAO, 2015a) y riesgos de salud humana (FAO, 2015a). Además, ha sido demostrado desde hace varias décadas que el uso de fertilizantes nitrogenados acelera la tasa de destrucción o “mineralización” del humus del suelo (Kononova, 1982; Mulvaney *et al.*, 2009), y con esto, el contenido de carbono y materia orgánica estable, degradando indirectamente las propiedades relacionadas con este componente.

Como un factor externo que incentiva indirectamente la reducción de la fertilidad desde el punto de vista mineral, el uso de pesticidas afecta la nutrición y, por lo tanto, la fisiología y bioquímica de las plantas, volviéndolas susceptibles al ataque de plagas y enfermedades (Chaboussou, 2010). Por ejemplo, el glifosato, el herbicida más usado en el mundo, se ha demostrado que reduce la absorción de nutrientes como Fe y Mn (Eker *et al.*, 2006), y puede incrementar la susceptibilidad de los cultivos a los patógenos (Johal y Huber, 2009; Fernández *et al.*, 2009). Por otro lado, los plaguicidas que contienen elementos clave para la nutrición (N, P, Cu, Mn, Na, Fe, Zn), pueden inducir deficiencias aparentes de otros elementos, generando desbalances que alteran la armonía nutricional de las plantas y, en consecuencia, aumentan su susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades (Primavesi, 2009; Chaboussou, 2010; Restrepo, 2014).

Métodos para el estudio de los minerales en el suelo

El método Mehlich 3 (Mehlich, 1984), además de extraer de forma simultánea los nutrientes minerales mencionados, por lo que su costo es muy accesible y los resultados se obtienen rápidamente (hasta 500 muestras por semana por técnico), ha sido comprobado de utilidad para la extracción de nutrientes macro, particularmente P, así como micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B), Mo (Renildes y Coelho, 2005) en una amplia gama de suelos, incluso con $\text{pH} > 7$ (Walton y Alle, 2004; Manjula *et al.*, 2005; Astera, 2014; Mylavarapu *et al.*, 2014), y para los cationes Ca, Mg, K y Na en suelos con $\text{pH} < 7.2$ (SHI, 2018).

Materia orgánica, carbono del suelo y humus

La materia orgánica (MO) es reconocida como un importante factor en el control de los servicios que aporta el suelo a nivel local y global (Manlay *et al.*, 2007; Smith y Collins, 2007), así como el indicador más importante de la salud del suelo (Lehman *et al.*, 2015). Su disminución, un fenómeno directamente relacionado con la pérdida de fertilidad (Fageria *et al.*, 1997; Lal, 2004; Smith y Collins, 2007; Moeskops *et al.*, 2012; FAO, 2015a; Lal, 2015; Lehman *et al.*, 2015), ocurre como resultado de una serie de procesos que evitan su mantenimiento y acumulación en el suelo, relacionados fundamentalmente con el ciclo del carbono. Uno de estos fenómenos es la aplicación desbalanceada de fertilizantes nitrogenados (Mulvaney *et al.*, 2009; Lal, 2015), que además de no aportar directamente carbono, aceleran la descomposición de la MO por aumentar la biodisponibilidad de nitrógeno, un elemento clave en la determinación de la velocidad de este proceso (Horwath, 2007). En interacción con lo anterior, la labranza excesiva también acelera la tasa de descomposición de la MO (Fageria *et al.*, 1997; Smith y Collins, 2007; Lal, 2015), aumentando la exposición de ésta al ataque microbiano, la oxidación y volatilización (Fageria *et al.*, 1997), así como la erosión y otras fuerzas disruptivas (Smith y Collins, 2007). Los procesos anteriores aunados a una remoción excesiva de los residuos de cosecha en la producción de cereales (Lal, 2015), principalmente en aquellos de doble propósito (Reyes-Muro *et al.*, 2013), o la producción insuficiente de biomasa en otros tipos de producción (Brock *et al.*, 2008), evitan que se acumule, fije, o secuestre el carbono en el suelo, elemento esencial de la MO.

Algunos factores relacionados con la velocidad de la pérdida o agotamiento de la materia orgánica en los suelos son el clima, el tipo de suelo, la intensidad (tipo y frecuencia) de labranza, y la cantidad y calidad de los fertilizantes y materiales orgánicos devueltos al suelo (Fageria *et al.*, 1997), por lo que cada agroecosistema tiene una tasa particular de acumulación, mantenimiento o pérdida de materia orgánica, llamado balance (Brock *et al.*, 2008). La pérdida de materia orgánica impacta negativamente la calidad y fertilidad del suelo, pudiendo incluso significar el colapso de un agroecosistema (Smith y Collins, 2007). Este proceso afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, pues la MO está directamente relacionada con la estructura (formación de agregados), y ésta con la oxigenación y la permeabilidad, siendo

también una reserva y fuente de nutrientes, así como el alimento y hábitat de la microbiología del suelo (Fageria *et al.*, 1997; Horwath, 2007; Whalen y Sampedro, 2010).

La materia orgánica (MO) se encuentra (en promedio) entre 0.4 - 10% en regiones templadas, 3 – 4% en regiones húmedas, 1 - 3% en semiáridas, y hasta menos de 0.2% en los desiertos (Smith y Collins, 2007). Es el agente principal de agregación del suelo, controlando las relaciones aire/agua, además de proveer resistencia a la erosión hídrica y eólica (Smith y Collins, 2007). Se ha estimado que la MO conforma las reservas edáficas de cerca del 95% del nitrógeno, 40% del fósforo, y 90% del azufre (Smith y Collins, 2007), 1.9 a 68.6% del Cu, 9.5 a 82% del Mn, 0.1 a 14.3% del Zn (Shuman en Stevenson y Cole, 1999), por lo que su descomposición y reciclaje puede proveer de la mayoría de los nutrientes requeridos para el crecimiento vegetal (Smith y Collins, 2007). La tasa y calidad de la descomposición de la MO, y con éstas, la liberación de nutrientes, están regulados por la temperatura, la humedad, la perturbación del suelo, y el tamaño y la actividad de la población microbiana, así como la calidad de la materia orgánica como sustrato para el crecimiento microbiano (Smith y Collins, 2007).

La materia orgánica, según Stevenson y Cole (1999) puede dividirse en fracciones:

- **Lecho, mantillo u hojarasca.** Es el material orgánico que está sobre la superficie. Es conocida su importancia para el reciclaje de los nutrientes y la “renovación” de los suelos. Se determina mediante la recolección de los materiales macro-orgánicos de una superficie en g/m^2 o t/ha.
- **Fracción ligera.** Son residuos de plantas y los productos parciales de su descomposición que están dentro del suelo, de las que los residuos de raíces son importantes; es principalmente el conjunto de detritos muy pequeños relativamente no degradados, derivados de la fragmentación física por invertebrados u otros actores. Es indicador de los cambios en la materia orgánica lábil provocados por la labranza, el cultivo y otros factores ambientales que afectan la actividad microbiana. Su descomposición es una fuente rápida de nutrientes para las plantas por tener una rápida tasa de reemplazo, pudiendo ser desde 2% hasta 30% de la materia orgánica según el ingreso (cantidad incorporada) y su tasa de descomposición, que depende de la temperatura, textura,

humedad y pH del suelo. Se divide en lábil, que se descompone en unos pocos meses, y *estable*, que tarda cerca de 5 años en descomponerse; también puede dividirse en compuestos solubles, polisacáridos, proteína y lignina. Su separación se hace con líquidos densos de 1.6 a 2 g/ml (generalmente tóxicos) y su composición por resonancia magnética nuclear de carbono o C-NMR.

- **Biomasa microbiana.** Son las células de microorganismos, de interés por su relación con el reciclaje de nutrientes (como degradadores de M.O. y fuente lábil de nutrientes) y la agregación del suelo. Puede ser hasta el 2% del carbono total del suelo, y constituye del 60 al 80% de la “fracción viva” de la materia orgánica. Algunos métodos para cuantificarla son los conteos microbianos y la medición de sus actividades metabólicas (consumo de O₂, actividad enzimática, producción de calor, contenido de ATP, producción de CO₂). De las estimaciones por conteos (número de células x densidad microbiana de 1.5 g/ml x volumen) reporta rangos de 340-3400 kg/ha para bacterias y 540-5400 kg/ha para hongos, o de 110 a 2240 kg/ha en la capa arable según distintos autores, cuyas diferencias indican la incertidumbre de las estimaciones. Su número varía según temperatura, humedad, pH y provisión energética (alimento).
- **Biomasa de fauna.** Son tejidos de invertebrados. Aunque de la mayoría de insectos y ácaros no se ha hecho mucha investigación, sí sobre las lombrices. La fauna se ve impactada por el manejo y las estaciones (temperatura y humedad). Es importante porque convierte el material macro o visible a micro (“la fracción ligera”) y su distribución en el perfil. Su investigación es complicada por su baja densidad y la complejidad de las redes tróficas.
- **Constituyentes subterráneos de plantas.** Son raíces vivas y muertas, y sus exudados. Su estudio es escaso por ser poco práctica su extracción o separación de la fracción mineral del suelo. Las raíces pueden comprender de 18 a 83% de la biomasa de las plantas herbáceas perennes, y hasta el 35% de las leñosas. Se estima que la planta puede aportar de un 20 a un 40% de sus fotosintatos a la reserva de C en el suelo mediante sus exudados y el sacrificio de raíces, pues la mayoría de las raíces pequeñas son descompuestas rápidamente e incorporadas a estas reservas, lo que es muy considerable.

- **Materiales orgánicos solubles en agua.** Investigados desde el punto de vista de nutrición y funciones ambientales, como la atenuación de toxicidades por quelatación, efectos acidificantes en cuerpos de agua, y transportadores de xenobióticos.
- **Humus estable.** Son restos humificados de plantas y animales, estabilizados por transformaciones químicas y microbiológicas o por asociación con compuestos inorgánicos. Las teorías más recientes del origen y la formación del humus apuntan a que este grupo polimorfo de sustancias carbónicas recalcitrantes son el resultado de la biosíntesis microbiana, subproductos de la descomposición parcial de polisacáridos, glicoproteínas y ácidos grasos de cadena larga producidos por los mismos microorganismos, y no a partir de sustancias vegetales como la lignina (Whalen y Sampedro, 2010).
- **Enzimas.** Son compuestos liberados por microorganismos y plantas a la solución del suelo para realizar reacciones bioquímicas (digestión, solubilización, descomposición, etc.). Aunque proporcionalmente son pequeñas, son de gran importancia porque todas las reacciones bioquímicas dependen de, o se relacionan con éstas. Su presencia y balance depende del origen y estado evolutivo del suelo, contenido de materia orgánica, composición y actividad microbiana, y la intensidad de los procesos biológicos, la cual fluctúa por condiciones bióticas y abióticas (aireación, temperatura, humedad, estructura, contenido de materia orgánica y manejo). Su medición es indirecta, es decir, a partir de la tasa de conversión de los materiales con que reaccionan. Algunas son ubicuas (ureasa, catalasa, fosfatasa, peptidasa, etc.) y otras aparecen sólo en circunstancias especiales. La deshidrogenasa se mide por su relación con la cantidad de materia orgánica potencialmente degradable y la biomasa microbiana, al ocurrir sólo en el interior de las células microbianas. La mayoría forman complejos con la arcilla y la materia orgánica, y pueden permanecer en el suelo aunque los organismos que las producen hayan muerto.

Métodos de medición de la materia orgánica

Por varias décadas, el método estándar para la medición de la cantidad de materia orgánica fue el de Walkley-Black (1934), que por sus requerimientos de entrenamiento, equipo especializado, y reactivos peligrosos, está siendo sustituido por el método de Pérdida por Ignición (LOI, por *Loss-On-Ignition*), con menor grado de error, mayor eficiencia en costo y trabajo, y mejor correlación con el carbono orgánico del suelo en varios escenarios (Hoskins, 2002; Campos, 2010; Roper *et al.*, 2019). También, este método es más barato en instrumentación y consumibles que el método de termocombustión o combustión seca, entre otras ventajas. Una desventaja es que no ha sido reconocido como un método para medir el carbono orgánico del suelo por el Instituto de Salud del Suelo, como sí ha sido el de combustión seca o *Dry Combustion* (SHI, 2018), aunque estos dos métodos tienen correlaciones fuertes, por lo que se puede recomendar su sustitución (Roper *et al.*, 2019). Sin embargo, este método debe ser ajustado si existiesen carbonatos en el suelo, entre otras variables (Hoskins, 2002; Wriarth *et al.*, 2008; Florence y Mengel, 2013).

Por el hecho de ser el LOI un método relativamente nuevo para medir la MO del suelo, conviene adecuar los valores estándar derivados del Walkley-Black (WB) a LOI para enmarcar los rangos previamente aceptados en la clasificación de contenidos de materia orgánica. Incluso algunos laboratorios hacen una conversión del LOI al WB en sus reportes de resultados para mantener la idea construida por décadas usando el método anterior (Hoskins, 2002). Por ejemplo, en el antiguo diagrama de distribución de los constituyentes del suelo (matriz mineral, materia orgánica, espacio poroso ocupado por agua y aire), el valor adecuado o “ideal” de MO se enseñaba el 5% con el método WB, que en el método LOI corresponde al 6%, por lo que en los discursos y las lecciones actuales referentes al tema, conviene indicar a qué método hace referencia un valor.

Cuadro 1. Rangos de interpretación de niveles de materia orgánica, adaptado por Armando Larios a partir de información provista por los laboratorios West Analítica y la fórmula obtenida por Florence y Mengel (2013).

	Muy Bajo	Bajo	Medio	Adecuado	Alto
WB*	0 - 1.3	1.4 - 3.0	3.1 - 5.0	5.1 - 7.4	> 7.5
LOI**	0 - 1.7	1.8 - 3.6	3.7 - 5.9	6.0 - 8.5	> 8.6

* Walkley-Black. ***Loss-on-Ignition*

Organismos del suelo

Macrofauna

La macrofauna del suelo, o *cryptozoa*, es una comunidad muy diversa que agrupa los organismos de más de 2 mm de longitud que viven en hábitats escondidos del suelo, como debajo de piedras, troncos y cortezas, y salen a alimentarse durante la noche. Incluye a los isópodos, los diplópodos, quilópodos, escorpiones, arañas, opiliones, isópteros, hormigas y lombrices. Las funciones ecológicas derivadas de sus hábitos detritívoros o predadores, mezclan y mueven grandes cantidades de suelo y residuos orgánicos, fragmentan los detritos ayudando a su descomposición, distribuyen poblaciones de microorganismos, y modifican la porosidad y el intercambio de fluidos en el suelo, contribuyendo a la formación de la estructura y las propiedades químicas y biológicas (Whalen y Sampedro, 2010).

Mesofauna

La mesofauna del suelo es un grupo de organismos de entre 150 μm a 10 mm de largo, la mayoría de ellos artrópodos; viven en la capa de los detritos, en las grietas y macroporos del suelo de 5 a 20 cm de profundidad. Abundan los colémbolos y los ácaros, y después otros grupos como tardígrados, rotíferos, proturos, dipluros, pseudoescorpiones, sínfilos, pauropodos y enquitréidos. Existen de todos los grupos tróficos. Las funciones ecológicas de este grupo varían según sus hábitos alimenticios, regulando las poblaciones de hongos y bacterias, liberando nutrientes a partir de estos organismos, fragmentando y redistribuyendo los detritos, diseminando esporas de microbios y contribuyendo a la formación de agregados (Whalen y Sampedro, 2010).

Microfauna

La microfauna incluye organismos eucarióticos de entre 2 y 1500 μm de largo que viven en las películas de agua del suelo. Son clasificados en protistas y nematodos. Los primeros eran antes conocidos como protozoarios, y su diversidad polifilética está aún resolviéndose, habiéndose

descrito 50,000 especies; pueden encontrarse de 10^4 a 10^7 protistas activos por gramo en suelos de bosque, y son abundantes en detritos, en estratos orgánicos, la rizósfera y en galerías de lombrices; pueden ser bacteriófagos, fungívoros, detritívoros y cytofróficos. Los nematodos son animales del filo Nematoda de amplia diversidad, que viven en los suelos templados en densidades de 10^7 a 10^8 individuos por m^2 , midiendo entre 150 y 500 μm ; pueden alimentarse de bacterias, hongos, protistas, rotíferos, tardígrados, pequeñas lombrices y otros nematodos, teniendo la capacidad de ser omnívoros, y un conjunto importante (20%) pueden ser fitoparasitarios. Las funciones de la microfauna consisten en la regulación de las poblaciones de hongos, bacterias y otros microorganismos; participar en el ciclaje de los nutrientes, siendo sus excretas incorporadas a la nutrición vegetal y microbiana; regular y estimular el crecimiento de hongos y bacterias por consumir los cadáveres y los individuos grandes de estos grupos; regular las poblaciones de plantas, insectos y animales mediante el parasitismo, y siendo parte de sus sistemas digestivos, entre otras (Whalen y Sampedro, 2010).

Microorganismos

Los microorganismos engloban cuatro grupos generales: bacterias, archaeas, hongos y algas, a los que puede agregarse un quinto, los virus. Las bacterias son organismos unicelulares que miden de 1 a 2 μm de largo y 0.5 a 1 μm de ancho, de formas diversas (cocos o esferas, bacilos o varas, y espirales), carecen de membrana nuclear, y pueden (junto con las archaeas) catalizar enzimáticamente todas las reacciones bioquímicas conocidas, habiendo grupos que obtienen energía a partir de sustancias orgánicas o minerales, siendo elementos clave de los procesos importantes en el suelo, como fijación de nitrógeno (*Azotobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium*) y solubilización de minerales (*Bacillus megaterium*, *B. musciliginosus*); un grupo especial de bacterias son las actinobacterias (antes actinomicetos), cuya actividad de descomposición de compuestos recalcitrantes (celulosa, hemicelulosa y lignina) produce la geosmina, la sustancia que da el característico olor a tierra húmeda, además de producir antibióticos naturales (*Streptomyces*), degradar hidrocarburos y pesticidas (*Rhodococcus*, *Nocardia*, *Gordonia*, *Mycobacterium* y *Dietzia*), e incluso fijar nitrógeno atmosférico (*Frankia*). Las archaeas son microorganismos unicelulares ubicuos, del mismo tamaño que las bacterias, que pueden representar hasta un 5% de las procariotas del suelo y son importantes oxidadoras de amonio,

reductoras de nitrato y productoras de metano. Los hongos, los microorganismos más diversos, son eucariotes aeróbicos obligados caracterizados por un cuerpo multinucleado llamado “micelio”, cuyas ramas o “hifas” de 2 a 10 μm de diámetro y desde milímetros hasta muchos metros; tienen metabolismos diversos, pudiendo ser descomponedores de azúcares (*Mucor*, *Rhizopus*), celulosa y lignina (*ascomycetes* y *basidiomycetes*), simbiontes (*Glomus*), fitopatógenos (*Fusarium*), coprófagos y carnívoros. Las algas son microorganismos fotosintéticos que viven en la superficie y los primeros cm del suelo; suelen presentarse en densidades de 10^5 a 10^6 células g^{-1} de suelo, pudiendo ser unicelulares o filamentosas, y siendo muy abundantes en suelos desnudos de desiertos y rocas, e incluso sobre hojas y troncos de árboles vivos, así como en suelos bien drenados y ricos en materia orgánica. Los virus son organismos acelulares que contienen un ácido nucleico (ADN o ARN) y una proteína protectora; varían en tamaño de 0.01 a 1 μm , y pueden parasitar de manera obligada o específica a todos los grupos superiores en tamaño, teniendo un rol importante en la regulación de sus poblaciones (Whalen y Sampedro, 2010).

Los microorganismos son los encargados, por un lado, de volver disponibles los nutrientes a partir de la materia orgánica en los procesos de descomposición y mineralización, así como de “solubilizar” o liberar los nutrientes minerales contenidos en las rocas (Stevenson y Cole, 1999b), para que puedan ser aprovechados en algún momento por las plantas. Un grupo especial de microorganismos tiene la función de estabilizar la materia orgánica en diversas formas de humus (Whalen y Sampedro, 2010). La interacción de estos dos grandes grupos de microbios es clave para la nutrición vegetal y la formación de los suelos.

La comunidad microbiana inherente a cada ecosistema es afectada en su diversidad por los disturbios ocasionados por el manejo, y estos daños afectan las funciones relacionadas, como la formación de humus, el flujo de los nutrientes y la construcción de la estructura (Kennedy y Smith, 1995; Plante, 2007). Las prácticas de manejo características de la intensificación agrícola, como el monocultivo, la mecanización, el uso de fertilizantes altamente solubles en forma de sales, y la aplicación de pesticidas, pueden reducir la complejidad de las redes tróficas en el suelo, reduciendo la presencia de grupos funcionales microbianos y alterando la estructura de la comunidad (Smith y Collins, 2007; Tsiafouli *et al.*, 2015; Lehman *et al.*, 2015), lo que

puede alterar el flujo de los nutrientes en los ciclos biogeoquímicos, y por lo tanto, la fertilidad del suelo. La contaminación con pesticidas también puede alterar las comunidades microbianas y sus funciones (Fageria *et al.*, 1997; Gliessman, 2002; Smith y Collins, 2007; Hussain *et al.*, 2009; Lehman *et al.*, 2015). Por otro lado, la labranza mecanizada de los suelos altera significativamente las comunidades microbianas (Kladivko, 2001; Degruene *et al.*, 2015), lo cual se ve devastadoramente acentuado en los suelos tropicales (Primavesi, 1984, 2003 y 2009; Restrepo y Pinheiro, 2011).

Las comunidades y poblaciones de microorganismos pueden ser estimuladas mediante técnicas de bioaumentación con inoculantes microbianos que contenga 1 o más especies de microorganismos benéficos con resultados prometedores (Alori *et al.*, 2017). Recientemente se ha masificado el uso de inoculantes que contengan comunidades diversas como los Microorganismos Eficientes o EM (Morochó y Leiva-Mora, 2019) y los Microorganismos de Montaña o MM, una forma artesanal de producir los EM, lo que está siendo foco de muchas investigaciones en sistemas agrícolas y de manejo de residuos orgánicos (Castro-Barquero *et al.*, 2015; Umaña *et al.*, 2017).

1.5.1.2. Degradación de suelos agrícolas

Aunque puede haber muchas definiciones de este fenómeno, la degradación de suelos para el presente estudio será definida como “el deterioro en las propiedades físicas, químicas y biológicas relacionadas con su habilidad para sostener sistemas agrícolas eficientes” (Fageria *et al.*, 1997), entendiendo por éstos aquellos que produzcan alimentos saludables a costos económicos y energéticos viables (Fageria *et al.*, 1997; Savory, 2005). En la actualidad se estima que alrededor del 52% de la superficie usada para la agricultura (unos 2,700 M ha) está de moderada a severamente degradada, y existen ya más de 2,000 millones de hectáreas desertizadas (FAO, 2014), de modo que cerca de 4,700 M ha tienen necesidad de algún grado de restauración o rehabilitación. Entre los procesos de degradación más importantes están la erosión acelerada por viento y agua, la disminución de las reservas de carbono en el suelo, la pérdida de biodiversidad, el minado o agotamiento de nutrientes, el desbalance mineral, la acidificación y la salinización (Kennedy y Smith, 1995; Lal, 2015; FAO, 2015). Estos procesos,

resultado del manejo agrícola dominante, provocan síntomas o efectos como la reducción de los rendimientos y la calidad de los productos agrícolas, la reducción de la eficiencia en el uso de agua y nutrientes, compactación y encostrado del suelo, y una mayor incidencia de malezas, plagas y enfermedades, así como la aparición de enfermedades en los animales de granja y los seres humanos que se alimentan de las cosechas (Albrecht, 1958; Primavesi, 2003 y 2009; Lal, 2015). Algunos experimentos de largo plazo han demostrado que los manejos “convencionales” con maquinaria y fertilizantes químicos llevan los rendimientos a cero en periodos tan cortos como 19 años para fertilizaciones con sólo N, y 32 años con fertilizaciones con N y P, así como deterioro en otros parámetros, como reducción de pH, agotamiento de Zn, reducción de la materia orgánica, entre otros (Prasad y Goswami, 1992). A nivel planetario, los efectos de la degradación de suelos se reflejan en el cambio climático, al ser los suelos agrícolas una fuente de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, NO_x), y no un depósito y reservorio, como naturalmente ocurriría en suelos saludables (Goreau *et al.*, 2015; Lal, 2015).

Aunque el fenómeno de la degradación de suelos está principalmente provocado por la erosión (Gliessman, 2002; FAO, 2015b; Lal, 2015), el resto de los componentes deben ser atendidos una vez que este proceso se controle; es decir, controlar la erosión no va a devolver los nutrientes perdidos en el suelo arrastrado, ni la materia orgánica o las comunidades microbianas que vivían en la capa de suelo perdida. Así, la condición del suelo después de haberse controlado la erosión (o cualquier otro proceso de degradación), indistintamente supone un estado de deterioro de la fertilidad, y este estado debe ser corregido con estrategias ajenas al control del primer proceso. Para lo anterior, es necesario conocer a fondo el estado actual y potencial del suelo estudiado, los procesos, factores y componentes que lo caracterizan, de modo que se pueda atender puntualmente, pero entendiendo de manera integral, el complejo de procesos y elementos que intervienen en el mejoramiento del estado o calidad del suelo en recuperación (Sherwood y Uphoff, 2000). Siendo la degradación de suelos la condición predominante, se requiere no el mantenimiento, sino el mejoramiento, y de ser posible, la maximización de su capacidad productiva o fertilidad, entendiendo esto como un proceso de “regeneración” de la fertilidad o la salud del suelo. Por lo tanto, sería necesario desarrollar un “manejo regenerativo” que podría definirse como “un conjunto de técnicas y prácticas que

estimulen los procesos de reparación de las funciones y la estructura biológica necesarios para la producción sustentable de alimentos”.

1.5.2. Agricultura regenerativa

Recientemente, después de evaluar 28 artículos de revistas arbitradas, Schreefel *et al.* (2020) definen la Agricultura Regenerativa (AR) como “una aproximación a la agricultura que usa la conservación del suelo como el punto de entrada para regenerar y contribuir sus múltiples servicios de provisión, regulación y soporte, con el objetivo no sólo de mejorar la dimensión ambiental, sino también la social y económica de la producción sustentable de alimentos”. Por medio de un análisis de convergencia, encontraron que el suelo concentra la totalidad de los temas en la dimensión ambiental, resaltando los objetivos de aumentar y mejorar la salud del suelo, mejorar el carbono del suelo, mejorar la calidad física del suelo y mejorar la biodiversidad del suelo. Otros objetivos ambientales mencionados son la regeneración del sistema planetario, aliviar el cambio climático, reducir externalidades ambientales (contaminación, daño ambiental), mejorar el ecosistema, optimizar el manejo de los recursos, mejorar la calidad y disponibilidad del agua, y mejorar el funcionamiento del ciclo de los nutrientes. Otros objetivos no convergentes son mejorar la salud humana y la prosperidad económica. Según los autores, las actividades esenciales de la AR incluyen minimizar los insumos externos, integrar animales y cultivos, minimizar la labranza, rotar los cultivos, usar estiércoles y compostas, sembrar cultivos perennes, entre otras.

Según Rattan Lal (2020), la AR engloba una amplia gama de prácticas enfocadas a la restauración y mantenimiento sostenible de la salud del suelo. No hay una receta única de AR que funcione para todos los contextos, sino que debe afinarse con las condiciones biofísicas y humanas de cada sitio y caso. La meta central de esta propuesta es recuperar la salud de los suelos, con la premisa de que “la salud del suelo, las plantas, los animales, los seres humanos, y el ambiente, son una e indivisible” haciendo eco de Albert Howard. De modo que los sistemas de AR reconcilian la necesidad de producir alimento para la humanidad con la necesidad de restaurar los ecosistemas, convirtiendo a la agricultura en una solución para los problemas ambientales. Algunos de los principios (y herramientas) mencionados por el autor son la

agricultura de conservación (cero labranza, acolchados de residuos, cultivos cobertera, rotaciones, manejo integrado de nutrientes, manejo integrado de plagas, sistemas de intensificación de arroz, fertirrigación por goteo), la integración de cultivos con árboles y ganado (pastoreo manejado, sistemas agrosilvopastoriles, agricultura con barbechos o *Ley Farming*, árboles forrajeros, cercos vivos), la restauración de la salud del suelo (neutralidad de la degradación de suelos, reforestación de colinas desnudas, restauración de humedales, programas de conservación de reservas), y la re-carbonación de la biósfera terrestre (secuestro de carbono en el suelo con “biochar” o carbón vegetal, y secuestro de carbono en biomasa). El autor deja en claro que la pregunta fundamental no es si sirve o no la AR, sino de qué manera puede lograrse que funcione en cada condición sitio-específica, considerando las dimensiones biofísicas, humanas y socioeconómicas particulares de cada caso. Concluye con la necesidad de saltar a la acción, comenzando con llevar a niveles legales y gubernamentales los conceptos y objetivos de la AR como la “Revolución Verde del siglo XXI”.

Por su parte, Rhodes (2017) hace hincapié en la diferencia de la agricultura “sustentable”, que busca “mantener” o conservar el estado de los ecosistemas en su estado actual, degradados o no, en contraste con la AR que busca, desde su núcleo, recuperar la salud de los suelos degradados como eje para restaurar y revitalizar la calidad del agua y la diversidad de los ecosistemas. Según el autor, las herramientas tecnológicas más usadas por la AR coinciden con las usadas en la agricultura orgánica, como labranza mínima, cultivos cobertera, abonos verdes, compostas, acolchados y rotación de cultivos, que mejoran la calidad del suelo con el aumento de la materia orgánica, mientras que evitan los insumos artificiales que dañen los organismos que lo habitan. Compara los movimientos de la Permacultura y el Manejo Holístico, y menciona el método *Keyline* y el arado Yeomans, la conservación de semillas, la agricultura orgánica regenerativa del Instituto Rodale, la iniciativa del “4 por 1000”, la cero labranza y la formación acelerada de suelos “biológicos”, como aproximaciones que pueden servir para masificar los propósitos de la AR: la mitigación y corrección del cambio climático y la restauración de la fertilidad de los suelos para alimentar a la población creciente.

Antes de la concepción actual de la agricultura regenerativa, los procesos guiados artificialmente para recuperar la fertilidad de los suelos degradados pueden estar relacionados

con conceptos como “restauración de la fertilidad” con sus derivados de reclamación, remediación, rehabilitación, entre otros similares (Lal y Stewart, 1992), cuyas aplicaciones y objetivos cambian según el contexto donde se apliquen. Por ejemplo, la rehabilitación de tierras busca recuperar los procesos ecosistémicos, la productividad y los servicios ambientales sin lograr necesariamente un retorno a las condiciones antes del disturbio que provocó la degradación (López-Barrera y Guevara, 2012; Yirdraw *et al.*, 2017).

1.5.2.1. Agricultura Orgánica Campesina y Cromatografía de Pfeiffer

La agricultura orgánica campesina (AOC) es una propuesta desarrollada por Jairo Restrepo Rivera y Sebastiao Pinheiro (Restrepo y Pinheiro, 2009; Restrepo, 2014) y enriquecida por allegados como Jesús Ignacio Simón Zamora (Simón-Zamora, 2016). Esta propuesta está inspirada en los principios del manejo ecológico de suelos (Primavesi, 1984), la remineralización con harinas de rocas (Hensel, 1893), la teoría de la Trofobiosis (Chaboussou, 2010), entre otros. Restrepo define la AOC como “un conjunto de principios y herramientas que permiten a los agricultores aprovechar de manera sustentable los recursos locales a su alcance”, y como “una forma de agricultura sana y saludable, que funciona más como una propuesta de transformación social que de transformación tecnológica”, pues el origen primordial de su propuesta es el respeto por toda la vida en el planeta y la salud de los seres humanos, y en particular, de los agricultores. Las herramientas más concretas que conforman esta propuesta se describen detalladamente en el Manual ABC de Agricultura Orgánica (Restrepo, 2014), en donde se describen métodos para fabricar y usar “bioinsumos” como: abonos orgánicos tipo bokashi, microorganismos de montaña (MM), biofertilizantes líquidos fermentados a base de estiércol de vaca, o a base de MM, llamados bioles; orina de vaca, caldos minerales diversos para el control de plagas y enfermedades, fabricación y uso de fosfitos, uso de leonarditas, entre otros. Una actualización de este manual, con adiciones como producción y aprovechamiento de biochar, quitosano y agua de mar en la agricultura ha sido recientemente publicada (Restrepo y Agredo, 2020). La eficacia del manejo propuesto en la AOC es comprobada a través de la cromatografía circular de Pfeiffer (Restrepo y Pinheiro, 2011) y los múltiples y abundantes casos de éxito reportados por los autores.

Durante la última década, Restrepo, Pinheiro y Simón-Zamora han promovido el concepto de “las 3 Ms”, también llamado “manejo 3M”, refiriéndose a “los minerales, la materia orgánica y los microorganismos” como los “pilares” de la salud del suelo. Esta concepción integra de forma ordenada el conocimiento y las tecnologías que proponen para el cambio del manejo hacia uno regenerativo y verdaderamente sustentable, entendiendo por sustentable a un proceso de producción ecológicamente amigable, respetuoso de la salud humana, y económicamente viable y justo. La propuesta ha avanzado a la re-conceptualización de la AOC como un tipo particular de AR, principalmente latinoamericano, aunque ya se ha extendido a países como España, Italia y Australia (Serle, 2013). El método basado en el concepto 3M ha demostrado ser capaz de mejorar o rehabilitar los suelos agrícolas mientras se produce de forma rentable y saludable, eliminando por completo la dependencia previa de los agricultores por los pesticidas y fertilizantes solubles en un corto tiempo. Siendo didáctico y de fácil asimilación, el concepto 3M ha ganado aceptación en grandes grupos de agricultores y agrónomos interesados en la agricultura regenerativa, sustentable u orgánica, lo que ha ayudado a diseminar las prácticas que mejoran la calidad de los suelos agrícolas, reduciendo costos de producción y aumentando la calidad de los cultivos producidos en miles de hectáreas.

Los principios del manejo 3M y la AOC son múltiples, pero resaltan los temas de formación de humus, nutrición diversificada de cultivos y personas, salud humana, salud integral de suelos y animales, biología de suelos, semillas criollas, la toxicidad y falta de necesidad de los pesticidas y la mayoría de los agroquímicos. Aunque el paradigma es radical, rescatan de los últimos el uso de aquellos que, al tener ocurrencia de un equivalente natural en los suelos, no dañan aparentemente a los organismos que lo habitan. Ejemplos de estos últimos son los sulfatos de potasio, magnesio, fierro, manganeso, zinc y cobre, y cloruros de calcio y cobalto. Más que en los anteriores, hacen especial énfasis en el uso de sales minerales y rocas molidas, harinas o polvos de roca (Campe, 2015), agrominerales (Van Straaten, 2002) y otras enmiendas aprobadas para su uso en agricultura orgánica, que generalmente se encuentran de forma abundante en la naturaleza, como borato de sodio, molibdato de sodio, azufre agrícola, yeso agrícola, basalto, granito, dolomita, calcita o carbonato de calcio. También promueven aquellos que puedan obtenerse artesanalmente, como la harina de hueso calcinado y su derivado de fosfitos a partir de huesos animales. Sin embargo, no reportan ni citan fuentes que muestren

critérios concretos para decidir las dosis de aplicación de estos materiales, sino que promueven la creatividad, el conocimiento local y la experimentación en campo como los caminos para encontrar las dosis óptimas de cada insumo para cada parcela y cultivo, y ofrecen guías en forma de rangos concretos y asequibles. Como ha sido declarado por Restrepo, las dosis de bioinsumos mencionadas tienen como premisa un estado saludable de los suelos donde se aplican, por lo que generalmente coinciden con dosis de mantenimiento y corrección sintomática. Esta aproximación frecuentemente conlleva tiempo para asimilar e implementar la amplia diversidad de herramientas que ofrecen, sobretodo en casos donde los suelos están gravemente degradados o que hay sistemas de manejo implementados y arraigados, así como compromisos económicos importantes.

Análisis cualitativo de suelos y abonos con la cromatografía de Pfeiffer

El análisis cualitativo por cromatografía en papel plano circular de corrido horizontal, recientemente conocida en el medio científico moderno como Cromatografía Circular de Pfeiffer (CCP) o *Pfeiffer's Circular Chromatography* (Kokornaczyk *et al.*, 2017), o *Biodynamic paper chromatography* (Kumar *et al.*, 2014), es una técnica desarrollada por Ehrenfried Pfeiffer desde la década de los 20's para evaluar la *calidad, fertilidad, salud y degradación* de suelos principalmente agrícolas (Pfeiffer, 1984; Voithl y Guggenberger, 1986; Bakker y Bakker-Misset, 2010; Restrepo y Pinheiro, 2011; Ford *et al.*, 2019; Graciano *et al.*, 2020). Desde su desarrollo y difusión se ha enriquecido y aprovechado para análisis cualitativos de materiales útiles para la práctica agrícola, como abonos orgánicos de alta calidad y el manejo del humus en el suelo (Pfeiffer, 1984; Diver, 2004; Restrepo y Pinheiro, 2011; Lübke *et al.*, 2012), humus en suelos de bosques (Laird, 1984), harinas de rocas, fosfitos, biofertilizantes, abonos orgánicos diversos, e incluso suelos tratados con herbicidas (Restrepo y Pinheiro, 2011), grado de maduración de lombricompostas (Kumar *et al.*, 2014), entre otros temas diversos. Es muy frecuente escuchar sobre esta técnica en círculos de agricultores biodinámicos en países anglohablantes, y recientemente, entre estudiantes y practicantes de la agricultura orgánica en Latinoamérica, Italia y España. Esta técnica ha sido propuesta como un indicador de la salud de bajo costo en Australia (Ford *et al.*, 2019) y en Brasil (Graciano *et al.*, 2020).

Para el análisis cromatográfico de suelos minerales (MO <5%), la técnica consiste en la disolución de una muestra de suelo con hidróxido de sodio o potasio al 1%, que al ser “corrida”

sobre un papel filtro previamente impregnado con nitrato de plata al 0.5%, revela una serie de anillos de formas y colores cuyo grosor e intensidad varían conforme la presencia y reacción del oxígeno y el azufre con los minerales y sustancias orgánicas nitrogenadas (proteínas, ácidos húmicos, enzimas, aminoácidos) presentes en el suelo. Estos anillos en su conjunto, conforman una figura conocida como “croma” o “cromatograma”, que presenta características que sugieren el estado de salud o degradación del suelo al momento de realizar el análisis (Pfeiffer, 1984; Restrepo y Pinheiro, 2011). La técnica es ligeramente modificada para el análisis de abonos orgánicos, así como para suelos muy ricos en materia orgánica humificada, ya sea aumentando la concentración del extractante (NaOH, KOH), y/o reduciendo la concentración de la muestra, y/o aumentando la intensidad de la agitación (Restrepo y Pinheiro, 2011). Para el caso particular de los estiércoles y las lombricompostas crudas o de mala calidad, los mismos autores recomiendan modificar la técnica de “corrido”, dejando que este proceso avance hasta los 2 cm de radio, y entonces retirar el cromatograma del extracto y pasarlo a otra caja petri con hidróxido de sodio al 1% para que ésta “empuje” hasta los 6 cm de radio la fracción de muestra recolectada en los primeros 2 cm. Para suelos muy ricos de origen volcánico, además de probar con la modificación anterior, recomiendan preparar soluciones con hidróxido de potasio al 1 y hasta 4%.

Modificaciones como las anteriores no fueron mencionadas ni aplicadas por Kumar *et al.* (2014), sino que aplicaron la técnica para análisis de suelos (5 g en 50 cc de NaOH 1%), presentando cromatogramas de muy mala calidad en su corrido o apertura de las zonas, estando carentes los colores, formas, bordes y detalles de anillos característicos en cromatogramas de abonos eficazmente realizados. Además, publican imágenes con una técnica para fotografiar los cromatogramas que no dejan ver detalle alguno, y arrojan descripciones pobres e imprecisas que no enriquecieron en nada sus conclusiones ni aportaron nada al desarrollo de la técnica, publicando un claro ejemplo de cómo no se realiza este análisis.

Aunque algunos autores afirman que no existen guías concretas para interpretar los cromatogramas (Ford *et al.*, 2019), Restrepo y Pinheiro (2011) ofrecen una guía descriptiva para dicha interpretación. En ésta, los anillos o “zonas” del cromatograma (Figura 2) son representativos de las propiedades que describen la calidad o salud del suelo analizado; las coloraciones indican ciertas condiciones, y las formas y tamaños de cada zona, también tienen

su interpretación particular para conocer la diversidad mineral, calidad de la materia orgánica, presencia y calidad del humus, actividad biológica y presencia de enzimas, entre otros indicadores. En breve, esta interpretación puede resumirse en:

- a) La zona central (ZC), llamada también de aireación y oxigenación, está relacionada con la estructura y propiedades relacionadas como drenaje y porosidad, con lo que coinciden Graciano *et al.* (2020), de modo que su ausencia o coloración indeseable (gris, ceniza o negro) indica condiciones de degradación como compactación, anoxia y anegamiento, sugiriendo pérdidas o degradación de la materia orgánica y sus correspondientes efectos benéficos en las propiedades físicas del suelo. La coloración de esta zona también indica la presencia y calidad del nitrógeno presente en el suelo, indicando la presencia de urea una coloración blanca intensa, o la presencia de una diversidad armónica de sustancias inorgánicas nitrogenadas cuando existe una coloración en distintos grados de crema, rosa y lila con bordes difuminados y ondulantes en cromatogramas con características deseables.
- b) La zona interna, también conocida como “zona mineral” (ZM), se dice relacionada con la fracción mineral del suelo y su diversidad, mostrando en ésta los colores característicos del material original que conforma los suelos, habiendo una consistencia de colores entre los suelos arcillosos (rojizos, grises, negros), arenosos (arena, rosados, lilas); en suelos con buenas características, colores amarillos, dorados, anaranjados, marrones y cafés en distintos tonos adornan como pinceladas o “huellas” que van formando el llamado “desarrollo radial” de esta zona.
- c) La siguiente zona, la intermedia es llamada también proteica (ZP) o “de la materia orgánica”, que puede estar desde ausente, escasa, no-integrada o momificada, activa o inactiva, lo que puede interpretarse a través de la presencia o ausencia de bordes, su diversidad, el tamaño y forma de los “dientes”, y la intensidad y diversidad del desarrollo radial en ésta; según los colores, la ubicación y los patrones radiales, puede inferirse la calidad de la fracción húmica, pues cada fracción del humus expresa una figura distinta en un cromatograma.
- d) Por último, la zona externa, también denominada “enzimática” (ZE), indica la actividad o inactividad de la microbiología en el suelo, directamente relacionada con la presencia de enzimas; las coloraciones pueden ir desde la blanca o “ausente” en suelos muy

deteriorados con baja materia orgánica, pasando por escasa en las coloraciones crema claro y gris, mejorando conforme cambian a color amarillo, dorado, anaranjado, incluso con adornos como explosiones, lunares o nubes de color café oscuro y negro, sugiriendo la presencia de huminas, biochar y humus permanente, o colores cafés más claros similares al ocre indican la presencia de ácidos húmicos. Esta zona es particularmente cambiante en la evolución del proceso de composteo.

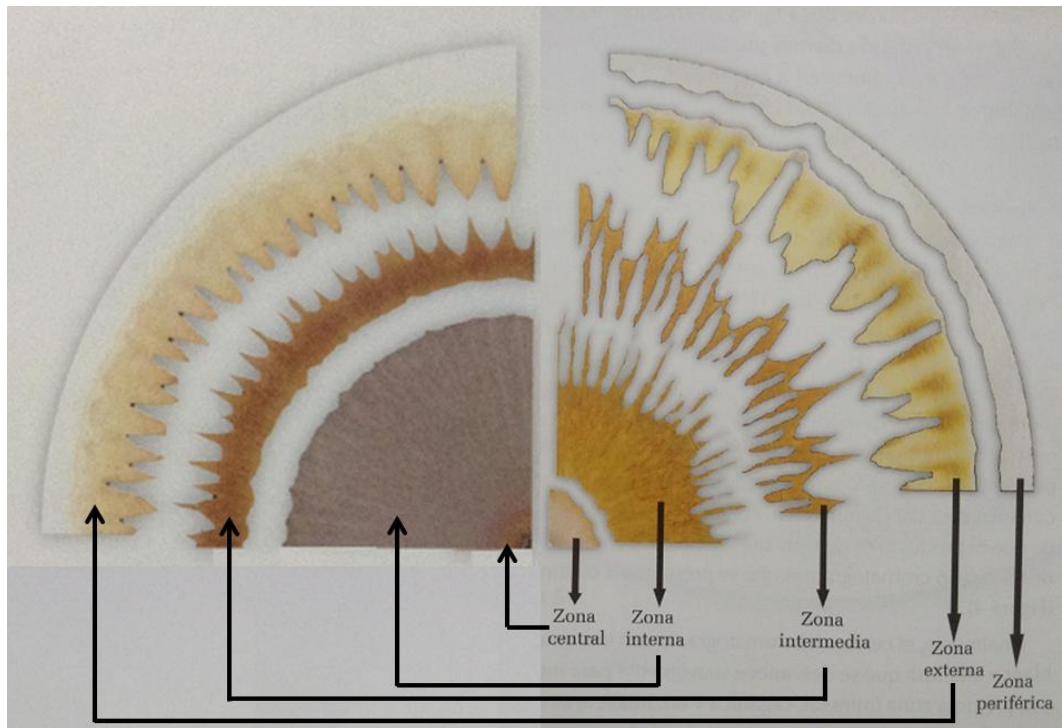


Figura 2. Ejemplo de 2 cromatogramas de suelos en estados opuestos de enfermedad (izquierda) y salud (derecha) con las zonas separadas y señaladas. Tomado de Restrepo y Pinheiro (2011) y modificado por Armando Larios.

En su rico contexto cognoscitivo y de amplia experiencia práctica en el manejo de suelos agrícolas, Restrepo y Pinheiro (2011), muestran registros cromatográficos del mejoramiento, reconstrucción o regeneración de la salud de tierras agrícolas degradadas, en tiempos tan cortos como 24 meses, mediante la integración de prácticas y tecnologías descritas en Restrepo (2014) y otras de uso común en agricultura orgánica como compostas, rotación y asociación de cultivos, acolchados naturales y cultivos cobertera, que integran en su propuesta de AOC. Ilustran y describen ejemplos de suelos con características desde extremadamente graves hasta

óptimas en las guías de interpretación, así como una rica galería de cromatogramas en un amplio espectro de estados de degradación y salud (Figura 3), publicando un verdadero manual práctico para la capacitación en la técnica y su interpretación, con un énfasis especial en los suelos y abonos en ambientes tropicales, que merecen diferentes criterios en su interpretación y prescripción en comparación con los de climas templados.

A pesar de que estos autores no ofrecen datos cuantitativos para ser integrados a análisis estadísticos, sus aportaciones a la agricultura regenerativa y el desarrollo de la técnica son extremadamente valiosas. Coinciden con Pfeiffer (1984) y Bakker y Bakker-Misset, (2010) en que los cromatogramas ofrecen información que no puede ni necesita ser medida por métodos cuantitativos, aunque algunas correlaciones con propiedades cuantitativas puedan buscarse (Kokornaczyk *et al.*, 2017; Graciano *et al.*, 2020), pudiendo resultar inconsistentes (Pfeiffer, 1984; Ford *et al.*, 2019; Ford *et al.*, 2021) o sumamente sólidas en el otro extremo (Graciano *et al.*, 2020). Este contraste resulta de diferentes grados de comprensión de los criterios de interpretación y la habilidad para practicar las técnicas para generar cromatogramas de calidad, la disponibilidad de casos representativos de cada estado, así como las variables o indicadores seleccionados. Un entendimiento pobre de la técnica y sus variables, y un entrenamiento poco desarrollado en la interpretación de los cromatogramas puede generar trabajos científicos que confundan a los interesados en usar la CCP para conocer la calidad de los suelos y los abonos orgánicos (Kumar *et al.*, 2014; Ford *et al.*, 2019; Ford *et al.*, 2021).

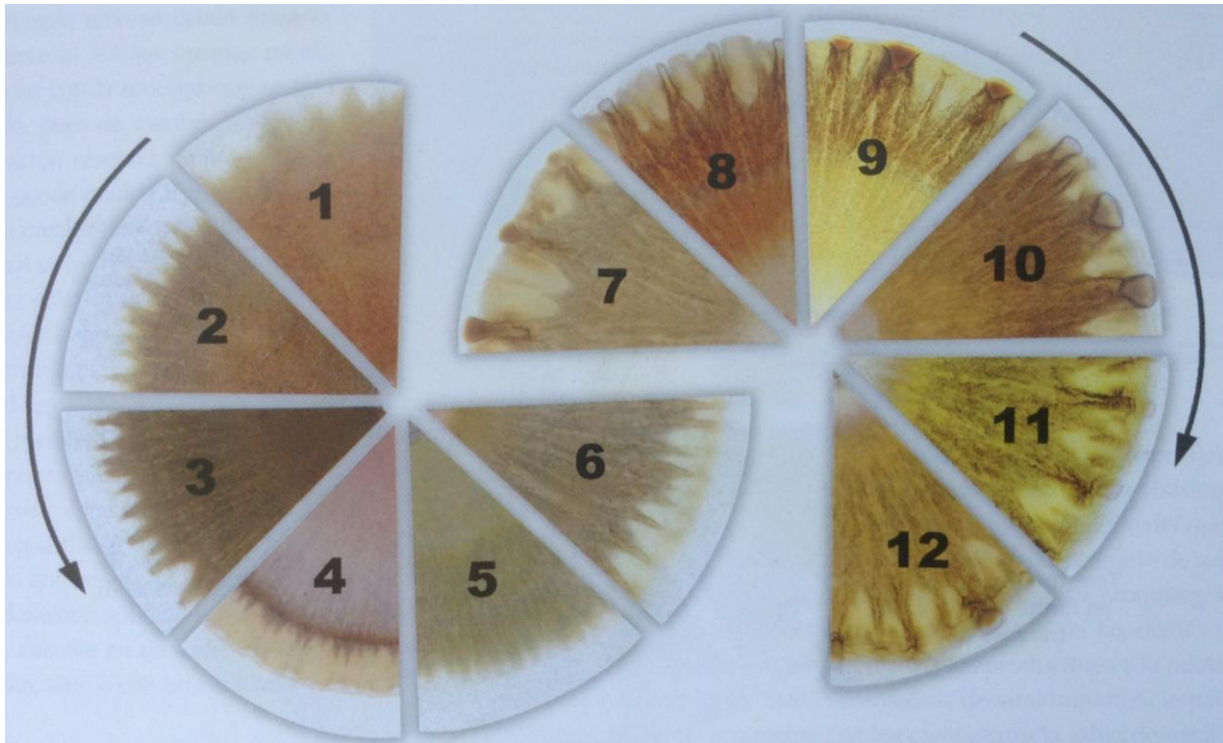


Figura 3. Escala del desarrollo radial en cromatogramas de suelos que indica, de menor a mayor, el espectro de degradación extrema a salud máxima. Tomado de Restrepo y Pinheiro (2011).

1.5.2.2. Geoterapia

Goreau *et al* (2015) engloban en el concepto “geoterapia” un conjunto de técnicas enfocadas en aumentar la capacidad de los suelos para secuestrar carbono, íntimamente unido al proceso de restauración de la fertilidad y su consecuente aumento en la fotosíntesis por unidad de superficie. Las propuestas descritas tienen como último propósito el efecto colateral de la reducción de los gases de efecto invernadero en la atmósfera para corregir el cambio climático en el menor tiempo posible. Algunas propuestas descritas son la remineralización de los suelos con rocas molidas, con particular énfasis en el basalto y el olivino; uso de minerales extraídos del agua de mar, (Ormus); producción, uso masivo, inoculación y enriquecimiento mineral de biochar; técnicas de pastoreo rotacional intensivo como el manejo holístico y la ganadería polifacética; siembra y aprovechamiento del pasto vetiver para producción de biocombustible, entre otros temas. Concluyen con un mensaje de urgencia de acción inmediata en que resaltan la

importancia del suelo como el único depósito capaz de capturar el carbono que está en exceso en la atmósfera, por lo que la solución a este desequilibrio tiene que incluir la restauración de los ecosistemas degradados e incluir esta meta en la agenda del cambio climático, por lo que la acción ciudadana informada es indispensable, independientemente del apoyo gubernamental.

1.5.2.3. El Suelo Ideal y la Agricultura de minerales balanceados.

El Suelo Ideal (ESI), escrito por Michael Astera (2014) propone un método conciso y práctico para balancear los nutrientes minerales en los suelos, desde el calcio hasta el boro, y menciona un rango entre 0.5 y 2 ppm para elementos traza como el molibdeno, selenio, cobalto, níquel, yodo, vanadio, etc. Basado en los estudios de Albrecht (1958) sobre el balance de los cationes primarios Ca, Mg, K y Na, y otros textos relacionados sobre el balance del resto de los minerales, el autor propone una serie de rangos en su “Tabla de El Suelo Ideal” basada en sus investigaciones y experiencias como agricultor y asesor agrícola. Tomando como criterio fundamental la Capacidad de Intercambio Catiónico Total que estima a partir de los niveles de Ca, Mg, K, Na, el pH y “otras bases”, el cálculo “balancea” los aniones P, S, Cl y B, y luego los microelementos Fe, Mn, Zn y Cu con los elementos correspondientes según interacciones de antagonismo y sinergismo (Cuadro 2), señalando concentraciones mínimas y máximas recomendadas, además de niveles de materia orgánica y pH ideales. Además recomienda enfáticamente la aplicación de harinas o polvos de rocas volcánicas o ígneas para incorporar elementos traza. Las variables dependientes que determinan los niveles propuestos son la ausencia de deficiencias, ausencia o escasez de plagas y enfermedades, y la alta y balanceada concentración de minerales en los alimentos, medida a partir de grados Brix y los sabores particularmente intensos de los productos cultivados en suelos balanceados con este método. Podría describirse el método de Astera como una técnica de “remineralización balanceada” de suelos con el fin de producir cultivos sanos (libres de plagas y enfermedades) y alimentos saludables y densos en minerales.

El carácter pragmático del texto se contrapone al lenguaje y formato científico, permitiendo ser accesible a agricultores y profesionistas relacionados, funcionando más como un manual y no un como un texto académico. Es amplio el potencial de aplicación del texto en la AR, pues

entrega un método claro para calcular los niveles deseados de los nutrientes Ca, Mg, K, Na, P, S, Fe, Mn, Zn, Cu y B, y el modo de corregirlos a partir de sustancias aprobadas para su uso en agricultura orgánica, como harinas de rocas específicas, sales minerales, y harinas de residuos animales y vegetales. Muchos de los niveles y las relaciones ideales entre los minerales corresponden con muchos de los publicados por otros autores (Twyman, 1946; Albrecht, 1958; Dwivedi *et al.*, 1975; Primavesi, 2009; Chaboussou, 2010; Sait, 2015). Sin embargo, el capítulo dedicado a la provisión de N no es muy completo, ofreciendo sólo una manera para calcular la Estimación de Liberación de N a partir de la MO del suelo en un ciclo determinado. Tampoco ofrece guías para aumentar de manera sistemática la MO o la microbiota del suelo, pero sí explica algunas estrategias para manejar los excesos de algunos nutrientes y aumentar la capacidad de intercambio catiónico en suelos muy pobres.

Cuadro 2. Cómputo ajustado de niveles ideales de nutrientes minerales a partir de diferentes niveles de CIC y SB de 85.9%, según las guías de Astera (2014).

CICT	Ca	Mg	K	Na	P	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B
-	67% SB	13% SB	4% SB	1.5% SB	= K	= P/2	= K/2	= Fe/2	= P/10	= Zn/2	= Ca/1000
6,3	840	101	101	22	101	50	50	25	10	5	0,8
7,5	1001	120	120	26	120	60	60	30	12	6	1,0
10	1334	160	160	35	160	80	80	40	16	8	1,3
15	2001	240	240	52	240	120	120	60	24	12	2,0
20	2668	320	321	69	321	160	160	80	32	16	2,7
25	3335	400	401	86	401	200	200	100	40	20	3,3
30	4002	480	481	104	481	240	240	120	48	24	4,0
35	4669	560	561	121	561	281	281	140	56	28	4,7
40	5336	640	641	138	641	321	321	160	64	32	5,3
45	6003	720	721	155	721	361	361	180	72	36	6,0

Otros autores han explorado el concepto de “suelo ideal” (Orellana y Pilatti, 1999; Pilatti y Orellana, 2000; Pilatti *et al.*, 2003) o similares como “fertilidad ideal del suelo” y “fertilidad saturada del suelo” (Janssen y Willigen, 2006a; Janssen y Willigen, 2006b). Sin embargo, ninguno de los anteriores ofrecen el mismo nivel de claridad que Astera, sino que perpetúan aproximaciones reduccionistas enfocadas a los nutrientes mayores N, P y K (Janssen y Willigen, 2006b) o se pierden en un exceso de variables sin hacer conexiones prácticas entre ellas ni aportar criterios para construir suelos ideales (Pilatti y Orellana, 2000). Otra crítica del

concepto de ESI fue redactada por Kopittke y Menzies (2007), pero se reduce a comparar las “saturaciones ideales” de los cationes primarios propuestas por Albrecht contra la aproximación de “niveles de suficiencia” para los nutrientes disponibles; también ponen en duda los efectos de dichas saturaciones en el pH y éste en la fijación de N, la saturación Ca/Mg en la compactación, consistencia o cohesión del suelo, así como niveles de saturación de Na en relación con el Ca, de modo que no atiende las principales aportaciones ni el potencial del método de Astera y los múltiples autores previos para mejorar la fertilidad de los suelos degradados por agotamiento mineral.

1.5.3. Amaranto.

1.5.3.1. Clasificación taxonómica.

El amaranto pertenece al género *Amaranthus*, de la familia Amaranthaceae, del orden Caryophyllales. El género comprende alrededor de 75 especies, generalmente anuales, distribuidas en regiones templadas y tropicales de todo el planeta. Las 3 principales especies domesticadas para producción de grano son *A. caudatus*, *A. cruentus*, y *A. hypochondriacus*. Estas especies tienen propiedades agronómicas favorables, pues prosperan en varias zonas ecológicas y muestran una mayor resistencia a diversos tipos de estrés biótico y abiótico (como sequía y salinidad), en comparación con otros cultivos alimenticios. Es un alimento importante en las dietas de pueblos latinoamericanos desde tiempos prehispánicos (Sosa-González, 2013; Adhikary *et al.*, 2020), y su consumo se ha extendido al sur de Asia (Adhikary *et al.*, 2020) y algunas partes de África (DAFF, 2010; Graham, 2010; Oworu *et al.*, 2010).

1.5.3.2. Producción nacional

En el año 2019 se reporta una producción nacional de 4,317 ton con un rendimiento promedio nacional de 1.519 ton/ha en una superficie cosechada de 2,842 ha, principalmente en los Estados de Puebla, Tlaxcala, Oaxaca y México (SIAP, 2019). Los rendimientos reportados varían desde 380 kg/ha hasta (Caltepec, Puebla) hasta 3,379 kg/ha (San Jerónimo Tecuanipan, Puebla) (SIAP, 2019). En Oaxaca se reporta un rendimiento promedio de 1,245 kg/ha. Otros

autores reportan rendimientos entre 1 y 4 ton/ha (Sosa-González, 2013), promedios entre 670 y 1340 kg/ha, con potenciales de 2,800 hasta 3,900 (O'Brien y Price, 1983), 2 a 4.5 ton/ha (Oworu *et al.*, 2010) e incluso 5000 kg/ha (Ramírez-Vázquez *et al.*, 2011).

1.5.3.3. Requerimientos edafoclimáticos

Aunque el amaranto como género se distribuye en una amplia gama de zonas climáticas, diferentes especies expresan rendimientos de grano significativamente diferentes (Graham, 2010). Por ejemplo, García-Pereyra (2004) confirmó que *A. hypochondriacus* tuvo mayores rendimientos en zonas templadas de Durango, mientras que *A. cruentus* produjo mejor en zonas cálidas y secas de Nuevo León. Esta especie se dice que puede prosperar incluso en zonas con precipitaciones tan bajas como 200 mm (Graham, 2010).

La extracción de N por parte del amaranto varía entre 128 kg/ton (Ruiz-Corral *et al.*, 2013) y 135 kg/ha, aunque su remoción es de sólo 24 kg/ton (O'Brien y Price, 1983). Por parte del fósforo, se reporta que remueve 5.8 kg/ton (O'Brien y Price, 1983) y extrae 22 kg/ton (Ramírez-Vázquez *et al.*, 2011). Por parte del potasio, se reporta que remueve 5 kg/ton (Putnam *et al.*, 1989), aunque se siguen estudiando las necesidades, densidades y dosis de respuesta adecuadas para este cultivo (Ruiz-Corral, 2013; Romero-Romano *et al.*, 2017).

1.5.3.4. Propiedades nutrimentales del amaranto

El amaranto es reconocido como un “superalimento” por la cantidad (15%) y la calidad de proteína que contiene, con un buen balance de aminoácidos y un contenido especialmente alto de lisina, deficiente en otros cultivos. Contiene también 65-75% de almidón, con una digestibilidad similar al trigo. *A. hypochondriacus* contiene además 3.6% de escualeno, un terpeno con propiedades nutraceuticas. Por no contener gluten, puede ser consumido por celíacos. Además contiene betalaína, un poderoso antioxidante (Adhikary *et al.*, 2020).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Para el presente trabajo de investigación se realizó un experimento en localidad de Santiago Tillo del municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México, ubicada en la región de la Mixteca. La parcela experimental se encuentra en las coordenadas 17°28'29.74''N, 97°19'23.31''O (Figuras 4 y 5), a una altitud de 2080 msnm. En el Cuadro 3 se resumen las normales climáticas de la zona, clasificado como templado semiseco (INEGI, 2005). Según el Mapa de Vegetación Potencial (CONABIO, 2012), el clima y el suelo de la zona podría sustentar bosques de pino y encino. El tipo de suelo, según el INEGI (2005), corresponde a un vertisol rojizo, que muestra las grietas características en la estación seca.

Cuadro 3. Resumen de normales climáticas de precipitación y temperaturas en la estación de Asunción Nochixtlán, Oaxaca, México, en el periodo 1981-2010 (SMN, 2010).

Precipitación	Temperatura
Anual promedio: 576 mm	Media: 16.1 °C
Máxima diaria: 75 mm	Mínima: 6.7 °C
Máxima mensual normal: 139.9 mm (septiembre)	Máxima: 25.6 °C
Máxima mensual registrada: 464 mm (mayo 2000)	Mínima mensual promedio: 2.5 °C en enero (2004)
	Mínima registrada: - 7.0 °C (1986)
	Máxima mensual promedio: 28.4 °C en mayo (2001)
	Máxima registrada: 41 °C (2001)



Figura 4. Localización de Nochixtlán en la región de Mixteca de Oaxaca, México.

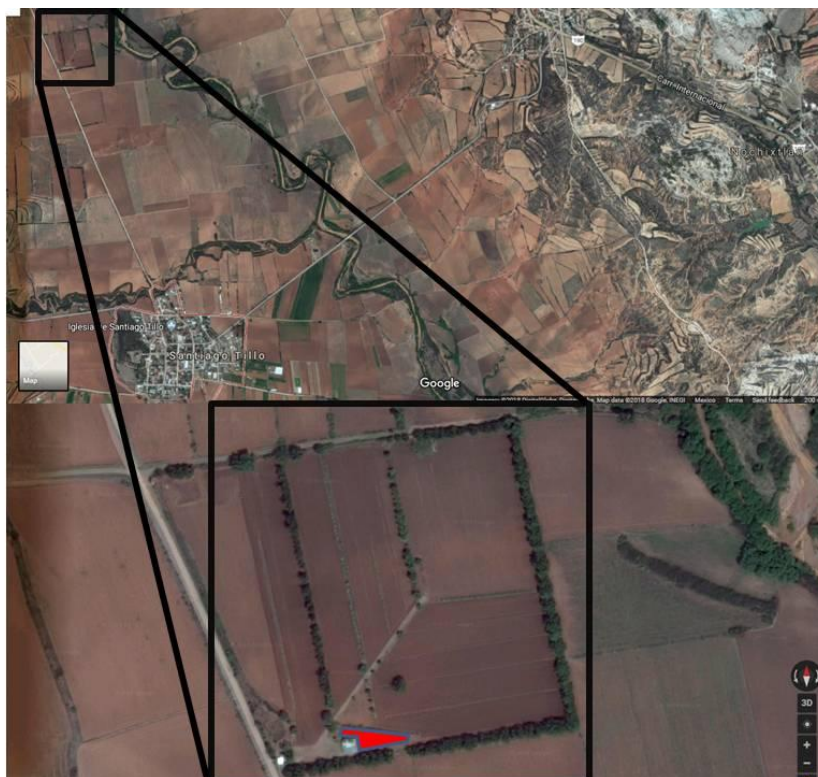


Figura 5. Ubicación de la parcela experimental (polígono rojo) cerca de Santiago Tillo en el municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México.

2.2. Caracterización histórica del manejo del suelo

Por medio de una entrevista no estructurada se obtuvieron datos clave sobre la historia del manejo del suelo por los dueños del predio. Estos datos incluyeron: a) método de limpieza y preparación, refiriéndose al modo en que se trabajaba el suelo antes de sembrar un cultivo, incluyendo la labranza y el manejo de la vegetación antes de esta labor; b) manejo de los nutrientes, refiriéndose al modo en que se restituían los nutrientes con abonos o fertilizantes; c) manejo de plagas y enfermedades, refiriéndose al modo en que se controlaban éstas; d) manejo de la cobertura del suelo entre y durante el ciclo de cultivo, refiriéndose al manejo de malezas o arvenses.

2.3. Diagnóstico inicial de la fertilidad del suelo

2.3.1. Muestreo del suelo de la parcela experimental.

En diciembre de 2016 se hizo la toma de muestras de suelo en el sitio donde se realizó el experimento, tanto la técnica estándar para el análisis en laboratorio para el diagnóstico de fertilidad, como la descrita por Restrepo y Pinheiro (2011) para el análisis de Cromatografía Circular de Pfeiffer. La anterior se resume en la toma de una muestra de un punto representativo del manejo actual del suelo, en el centro de una parcela trabajada el ciclo anterior. La muestra fue tomada de un hoyo de 15 a 20 cm de ancho y una profundidad de 15 a 20 cm, retirando previamente los residuos vegetales y los primeros 3 a 5 cm de la superficie; entonces se tomó una porción de unos 100 a 150 g de la pared del hoyo entre los 5 y 15 cm de profundidad con una cuchara de madera, depositando esta muestra en una bolsa de papel, posteriormente etiquetada y llevada al laboratorio.

2.3.2. Determinación de la fertilidad del suelo mediante la integración de las 3M

Se analizó el componente mineral con la integración de los métodos Mehlich 3 (Mehlich, 1984) y el análisis de Acetato de Amonio modificando el pH del extractante a 8.5 (Normandin *et al.*, 1998). El primer análisis, realizado por el laboratorio West Analítica (ANEXO 1), permite detectar la concentración en el suelo de aquellos elementos “esenciales” (B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S y Zn) para el crecimiento del cultivo que estén “potencialmente disponibles” para

las plantas y los microorganismos del suelo. El segundo análisis, realizado por el Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola Médica y Ambiental (ANEXO 2), ha demostrado los mejores resultados para extraer los cationes Ca, Mg, K y Na intercambiables en condiciones de pH mayor a 7.5 para estimar más asertivamente la capacidad de intercambio catiónico. Integrando estos análisis se realizó un balance mineral para identificar los nutrimentos en deficiencia (< nivel crítico) y desbalance, así como niveles óptimos (Astera, 2014) para poder establecer metas y dosis de remineralización a corto y largo plazo.

Para la materia orgánica se usó el método por combustión o Loss-On-Ignition (LOI) (Storer, 1984; Shulte y Hopkins, 1996), cuyos resultados son incluidos en el reporte del laboratorio West Analítica. En cuanto a la calidad de la materia orgánica del suelo, se usó el método de Cromatografía Circular de Pfeiffer y su posterior interpretación siguiendo las guías de Restrepo y Pinheiro (2011).

El componente microbiano no fue evaluado directamente durante el diagnóstico, sino sólo indirectamente a partir de la Cromatografía Circular de Pfeiffer. Un acercamiento más directo al estado de este componente durante el desarrollo del experimento corresponde al tratamiento testigo (T2) en la comparación de la densidad microbiana en medios de cultivo. Autores como Haynes (2008) y Buckley y Schmidt (2003), indican que, debido a la alta variabilidad de este componente en las temporadas del año, no conviene hacer comparaciones entre temporadas distintas, sino únicamente en muestras tomadas al mismo tiempo.

Cuadro 4. Determinaciones y técnicas usadas para medir la fertilidad y la calidad del suelo.

Componente	Indicador	Método
Minerales	Ca, Mg, Na, K, S, P, Fe, Mn, Zn, Cu, B	Mehlich 3 (Mehlich, 1984)
	Ca, Mg, Na, K; CIC	Acetato de Amonio pH8.5 (Normandin <i>et al.</i> , 1998)
Materia orgánica	% MO	Loss-on-Ignition (LOI) (Storer, 1984)
	Calidad	Cromatografía de Pfeiffer (Pfeiffer, 1984; Restrepo y Pinheiro, 2011)
Microorganismos	Desarrollo radial y presencia de zona enzimática Densidad de microorganismos	Cromatografía de Pfeiffer (Pfeiffer, 1984; Restrepo y Pinheiro, 2011)

	cultivables en medios PDA, NBRIP, RC y LB	Varios
Calidad del suelo	Integración entre las zonas de los cromatogramas, presencia y tamaño de zonas, diversidad e intensidad de colores, forma de bordes	Cromatografía de Pfeiffer (Pfeiffer, 1984; Restrepo y Pinheiro, 2011)

2.3.3. Determinación de la calidad del suelo

Para conocer el estado de la salud del suelo en el sitio con la técnica de Cromatografía Circular de Pfeiffer. La muestra tomada fue secada a la sombra en el laboratorio por 15 días y después procesada como indican Restrepo y Pinheiro (2011). En breve, la muestra fue pasada por un tamiz de 2 mm de diámetro, molida a grado de talco en mortero manual, pesada (5 g), y luego atacada con una solución de NaOH al 1%. Inmediatamente, ésta fue agitada formando círculos en ambos sentidos en 6 a 7 ciclos, siendo 1 ciclo equivalente a 6 a 7 vueltas en sentido de las manecillas del reloj y 6 a 7 vueltas en sentido inverso, dando un total de entre 42 a 49 vueltas. Después fue reposada por 15 minutos. Al terminar éstos, se agitó de nuevo con la misma técnica, y se dejó reposar entonces 1 hora. Al término de la anterior, se agitó de nuevo con la misma técnica, dejando reposar entonces por 6 horas. Al pasar éstas, sin agitar la solución, se tomó una muestra de 5 a 8 ml con una jeringa de la “nata” o el estrato más superficial de la solución. Esta muestra fue depositada en una caja petri de 5 cm sobrepuesta sobre otra de 10 cm, para luego ser pasada a través de un pabulo hecho de papel Whatman no. 4, a un papel circular de la misma clase de 150 mm, previamente perforado con un sacabocados de 2 mm, marcado con una aguja a los 4 y 6 cm, e impregnado con nitrato de plata al 0.5% hasta los 4 cm de diámetro, y secado en la oscuridad por 6.5 h. Cuando la muestra “corrió” hasta los 5.5 cm, se retiró el pabulo y se puso sobre papel bond blanco para quitar el exceso de agua.

Después, el papel fue expuesto a luz indirecta por 72 h para revelar la figura del “cromatograma”. Entonces se tomó una fotografía a contraluz en una cámara oscura hecha con una caja de cartón de 25 x 23 x 20 cm, a la que se le hicieron 2 orificios encontrados, el primero de 12 mm en un extremo, donde se coloca el lente de la cámara, y el segundo orificio, de 150 mm en el otro extremo; sobre este último se fija el cromatograma sobre una hoja de papel bond, y esta cara se apuntó hacia la luz del sol para tomar la fotografía. La cámara usada fue la

integrada en un iPad modelo MD528E/A. Para comprobar la efectividad del procedimiento, se repitió simultáneamente la misma técnica de análisis pero en una muestra tomada de un bosque cercano al sitio (Anexo 3). El resultado de este proceso es expuesto en la Figura 6, señalando la ubicación de las “zonas del cromatograma”, y donde se compara con el cromograma de un suelo también arcilloso, pero con características ideales de calidad y salud, con el fin de contrastar las características de las zonas en ambos cromatogramas, siguiendo las guías de interpretación de Restrepo y Pinheiro (2011).

2.4. Caracterización de materiales

2.4.1. Composta, lombricomposta y estiércol

Estos materiales fueron analizados en los laboratorios West Analítica con los métodos de USEPA (1986), Sparks (1996), y Peters *et al.* (2003). Para conocer su calidad por medio de la Cromatografía Circular de Pfeiffer, se siguieron las recomendaciones de Restrepo y Pinheiro (2011), para lo que se modificó la agitación de la muestra a 1 minuto en la primera, 2 minutos en la segunda, y 3 minutos en la tercera, además de modificar la relación muestra:solución de NaOH a 2.5 g con 100 ml; el resto de los detalles de la técnica son iguales a los del análisis de suelo.

2.4.2. Abonos minerales

La harina de roca de basalto fue analizada en el Servicio Geológico Mexicano Centro Experimental Chihuahua con el método de “plasma de masas” (ICP-MS), cuyos resultados fueron provistos por la empresa Fertiroka. La fosforita fue analizada en el laboratorio del Departamento de Explotación de Minas y Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, pero no se reporta el método usado: los resultados fueron provistos por la empresa Fosforita de México.

2.4.3. Otras enmiendas

Se usaron 2 tipos de enmiendas complementarias en el diseño de los tratamientos. Las enmiendas minerales eran productos comerciales cuya composición se enlista en el Cuadro 5, a excepción del Ormus, sin contenido conocido, el cual fue preparado en el laboratorio de Manejo Agroecológico de Suelos y Agua en el Ecocampus de la BUAP; para lo anterior, se mezcló 1 litro de agua de mar proveniente de Guaymas, Sonora, con una solución 10% NaOH hasta alcanzar un pH de 10.7, agitando continuamente, y esta solución fue reposada por 24 h para precipitar el ormus, y luego decantada, aforada a 1 litro con agua potable y agitada, repitiendo el anterior proceso 2 veces más (Carter, año no especificado). A excepción de los Microorganismos de Montaña, las enmiendas microbianas fueron provistas por la empresa Gaia Orgánicos, cuyas características principales se describen en el Cuadro 6. La reproducción de microorganismos nativos o MM fue hecha a partir de hojarasca en descomposición proveniente de un bosque cercano al sitio. Ésta fue limpiada de troncos y hojas verdes, y mezclada homogéneamente con salvado de trigo y melaza de caña, con una relación en peso de 1:2:0.1 respectivamente, y luego ensilada en un tambo de 120 l, cual fue cerrado herméticamente y reposado por 30 días antes de abrir (Restrepo, 2014).

Cuadro 5. Contenido de otras enmiendas minerales usadas.

Material	Contenido
Agroazufre	93% S
Sulfato ferroso heptahidratado	19% Fe + 11.5% S
Sulfato de zinc monohidratado	35% Zn + 17% S
Sulfato de cobre pentahidratado	25% Cu + 12.5% S
Bórax o borato de sodio decahidratado	10% B + 12% Na
Molibdato de sodio dihidratado	39% Mo + 19%Na
Ormus	Ver Carter (2015)

Cuadro 6. Enmiendas microbianas usadas en los tratamientos.

Material	Contenido
Microorganismos nativos o “MM”	Ver Anexo 4.
Moos. de montaña activados “MMa”	Ver Anexo 4.
Biomil Diazotrophic	1×10^8 UFC/g de <i>Rhizobium</i> y <i>Bradyrhizobium sp.</i>
Megaterium	3.5×10^{10} esporas/ml de <i>Bacillus</i> <i>megaterium</i>
Micorrizas	>40 propágulos/g de <i>Glomus</i> <i>intraradices</i> y <i>G. fasciculatum</i>
Super Magro	N 0.8%, P 0.4%, K 1.5%, Ca 1.4%, Mg 0.12%, trazas de Si, S y Mo. Tiamina, rivo flavina, ácido ascórbico, ácido fólico, hormonas, hongos, bacterias y levaduras.

2.5. Formulación del manejo regenerativo 3M

2.5.1. Minerales

A partir de los resultados de los análisis Mehlich 3 y Acetato de Amonio pH8.5 se realizó un balance mineral para identificar los niveles “deseados” de los nutrientes minerales. Se generó una escala de interpretación que sirviera para identificar los elementos en mayor deficiencia (“Adecuado”: > 75% del óptimo y menor del nivel tóxico; “Intermedio”: <75% y >50% del óptimo; “Deficiente”: <50% y >25% del óptimo; “Muy deficiente”: <25% del óptimo), y se seleccionaron los elementos en los rangos de “deficientes” y “muy deficientes” para ser aplicados. A partir de esta identificación se diseñaron 2 tratamientos: uno que contemplara la aplicación al suelo dosis económicas de enmiendas que contuvieran los elementos minerales deficientes (3M-suelo), y otro que aplicara sólo dosis recomendadas de los mayores (P en roca fosfórica y S en azufre agrícola), y los microelementos Fe, Mn, Zn, Cu y B sólo en forma foliar (3M-foliares), con el fin de comprobar la efectividad del balance mineral dentro de un manejo 3M. A ambos tratamientos 3M se les agregó la misma cantidad de molibdato de sodio al suelo (500 g/ha) para estimular la fijación de N, así como la misma cantidad de harina de roca de basalto (500 kg/ha), mezclados con el abono orgánico, de modo que los elementos traza no fueran diferentes entre estos 2 tratamientos. Para comprobar la diferencia de un manejo 3M con un manejo común en agricultura orgánica, se generó un tratamiento con lombricomposta al

suelo y su extracto líquido de forma foliar (VermiBUAP), con 1 ton/ha y 20 l/ha, respectivamente. Para comparar la diferencia entre estas formas de manejo contra la fertilidad actual del suelo se hizo un tratamiento “testigo” en el cual no se agregó ninguna enmienda ni abono al suelo o a las hojas.

2.5.2. Materia orgánica

En cuanto a la materia orgánica, se contó con 2 abonos orgánicos comerciales: una lombricomposta (VermiBUAP) hecha a partir de residuos de cocina y desechos de jardinería, y una mezcla 1:1 de composta y lombricomposta elaboradas a partir de estiércol de ganado lechero (Ecoterra). La dosis de la lombricomposta VermiBUAP se decidió por criterios económicos, pues consistió en el tratamiento de menor costo en abonado; la dosis de la mezcla Ecoterra se escogió como un equivalente a la remoción de 5.8 kg P/ton (Putnam *et al.*, 1989) en una meta de rendimiento de 2 ton/ha de amaranto, asumiendo 0.5% de concentración de fósforo disponible en la composta y una humedad de 30%. La dosis resultante de 3.3 ton/ha de composta es una dosis común de mantenimiento en producciones orgánicas (Restrepo, 2014).

2.5.3. Microorganismos

Para manejar los microorganismos del suelo se agregaron a los tratamientos 3M un conjunto de microorganismos nativos diversos en los MM, disueltos en la mezcla sólida de composta y minerales, y otros específicos conocidos por sus funciones como promotores del crecimiento de las plantas: bacterias diazotróficas (Biomil diazotropic), bacterias solubilizadoras de fósforo (Megaterium); hongos micorrízicos (Micorrizas). Estos fueron aplicados al momento del trasplante, humedeciendo previamente los cepellones de las plántulas en los líquidos de Biomil y Megaterium, y luego pasados por el polvo de Micorrizas, e inmediatamente trasplantados.

2.6. Diseño de tratamientos en la parcela experimental

Cuadro 7. Detalles de los tratamientos al suelo y su correspondiente aplicación foliar.

Tratamiento	Aplicación al suelo (preparación)	Aplicación foliar
T1: Manejo orgánico VermiBUAP	1 ton/ha de VermiBUAP	1 aplicación foliar de extracto al mes de trasplante, 20 l/ha

Continuación del Cuadro 7

T2: Testigo	NO se aplicó ninguna enmienda al suelo.	Sin aplicación foliar.
T3: 3M sólo al suelo	<p>Materia orgánica: 3.33 ton/ha de Ecoterra</p> <p>Minerales: 3000 kg/ha de roca fosfórica 100 kg/ha de azufre 10 kg/ha de bórax 25 kg/ha de sulfato ferroso 5 kg de sulfato de cobre 10 kg de sulfato de zinc 0.5 kg/ha de molibdato de sodio 500 kg/ha de harina de basalto</p> <p>Microorganismos: 50 kg/ha de Microorganismos de Montaña 1 dosis de Biomil 1 dosis de Micorrizas 1 dosis de Megaterium</p>	<p>SuperMagro 10 l/ha Megaterium 2 l/ha Biomil 1 l/ha MM activados 30 l/ha Ormus 3 l/ha Agua 54 l/ha Total mezcla: 100 l/ha</p>
T4: 3M-foliales	<p>Materia orgánica: 3.33 ton/ha de Ecoterra</p> <p>Minerales: 2500 kg/ha de roca fosfórica 25 kg/ha de agroazufre 500 g/ha de molibdato de sodio 500 kg/ha de harina de basalto</p> <p>Microorganismos: 50 kg/ha de Microorganismos de Montaña 1 dosis de Biomil 1 dosis de Micorrizas 1 dosis de Megaterium</p>	<p>Hidróxido de calcio 2 kg/ha Sulfato ferroso 2 kg/ha Sulfato de cobre 0.5 kg/ha Sulfato de zinc 0.6 kg/ha Bórax 0.6 kg/ha Ormus 3 l/ha SúperMagro 10 l/ha Megaterium 2 l/ha Biomil 1 l/ha MM activados 40 l/ha Agua 345.75 ml = 138.3 l/ha Total mezcla 200 l/ha</p>

2.6.1. Unidades experimentales

La medida de cada unidad experimental fue de 5 x 5 m, de los que se cosechó el equivalente a 10 m² (3.33 x 3.33 m), dejando 1 línea de plantas a cada lado de la unidad experimental para minimizar efectos de orilla o borde. Se manejó la misma densidad de siembra: 48 matas con 3 plantas/mata en cada unidad experimental, trasplantando 6 líneas a 80 cm entre líneas, y 8 matas a 60 cm entre matas en cada línea, dando un equivalente de 19,200 matas/ha y 57,600 plantas/ha.

2.6.2. Variedad de amaranto usada

La variedad de amaranto usada es conocida por los agricultores como variedad Quali, que es una selección hecha por la organización Alternativas por su buen desempeño en la región, cuyo origen se considera “criollo”.

2.6.3. Diseño experimental

En el sitio del experimento se marcaron 16 cuadros para obtener datos de 4 tratamientos con 4 repeticiones en un diseño aleatorio con igual número de repeticiones; sin embargo, al siniestrarse 2 repeticiones del mismo tratamiento, quedó como aleatorio con diferente número de repeticiones.

2.6.4. Variables agronómicas a evaluar en amaranto

2.6.4.1. Altura de planta.

El 25 de septiembre de 2017, 69 días después del trasplante, se hicieron mediciones de la altura de las plantas en los 10 m² o superficie útil de cada unidad experimental, lo que se hizo dejando una línea de plantas en cada lado (orilla). Para medir esta variable se usó una cinta de medir metálica desde la superficie del suelo hasta el ápice más alto de cada planta.

2.6.4.2. Diámetro del tallo

En la misma fecha que la altura de planta, se midió el diámetro del tallo de las plantas en la superficie útil de cada unidad experimental. La medición se hizo con un Vernier análogo de acero a los 10 cm de altura desde la superficie del suelo.

2.6.4.3. Producción de biomasa aérea: tallo, tamo y grano

Para la medición de la biomasa aérea se sumaron los pesos de los tallos, el tamo y el grano después de extraer impurezas (insectos y piedras). Debido a que muchas de las hojas se habían caído de las plantas, estas no se incluyeron en las mediciones.

2.6.4.4. Rendimiento

La fracción de grano vendible fue extraída y pesada después de “trillar” o separar el grano del tamo y otras impurezas. Este proceso se hizo con un mortero de madera con el que se comprimió y giró el conjunto de materiales en una cubeta plástica. Después se tamizó el material para separar pequeñas ramas y partículas grandes, y después se “sopló” el material tamizado sobre una lona plástica haciendo uso de un ventilador eléctrico a baja velocidad.

2.6.5. Labores culturales realizadas durante el experimento

2.6.5.1. Siembra en charolas de germinación. El 7 de junio de 2017 se hizo la siembra en charola de las que serían las plántulas para el experimento.

2.6.5.2. Preparación del terreno. El terreno fue preparado con dos pasadas de rastra el 11 de julio de 2017.

2.6.5.3. Abonado. El abonado del suelo fue hecho el mismo del trasplante, como se describe en los tratamientos para cada unidad experimental. Las mezclas de abono, minerales y MM se prepararon el día anterior en el laboratorio.

2.6.5.4. Trasplante. Todas las unidades experimentales fueron trasplantadas el 18 de julio de 2017. Los detalles de esta labor son descritos en los tratamientos.

2.6.5.5. Desyerbe. El desyerbe se hizo en 2 ocasiones: a las 2 semanas del trasplante (entre el 1 y el 4 de agosto), y entre el 16 y el 18 de agosto. Fue realizado de forma manual usando azadón y machete.

2.6.5.6. Aplicaciones foliares. El 21 de agosto de 2017 se hicieron las aplicaciones foliares. Los detalles son descritos en los tratamientos.

2.6.5.7. Cosecha. El corte de las plantas para iniciar el secado del grano se realizó el 7 de diciembre de 2017; después de 11 días de secado en campo, el 18 de diciembre, se hizo la separación de las panículas de los tallos y se pesaron éstos con una báscula digital para 20 kg. La fracción de grano con tamo se guardó en costales y se transportaron al sitio de trillado.

2.7. Impacto del manejo regenerativo 3M en la calidad del suelo

Para medir el impacto de los tratamientos en la calidad del suelo, se realizó un análisis usando la técnica de Cromatografía Circular de Pfeiffer sobre muestras tomadas a los 60 días del trasplante. Se tomó una muestra en cada unidad experimental de un volumen de suelo ubicado entre 7 y 13 cm de profundidad y entre 5 y 10 cm del tallo de una planta viva al centro de cada unidad experimental; dicho volumen fue depositado en una bolsa de papel, transportado al laboratorio, para ser secadas y analizadas como se describió en el punto 2.3.3. Las fotografías de los cromatogramas derivados del análisis de las muestras de cada repetición, fueron cortadas en el segmento de la zona de manejo que contiene la etiqueta de cada unidad experimental, conteniendo el código del tratamiento (T1 a T4) y su repetición correspondiente (R1 a R4). Cada arreglo o “mosaico” de cuatro cuartos de círculo corresponde a un tratamiento, y cada cuarto a una repetición.

2.8. Impacto del manejo regenerativo 3M en la densidad de microorganismos

Para medir el impacto de los tratamientos en el componente vivo del suelo, se seleccionaron 4 medios de cultivo para medir los efectos del manejo en la densidad de 4 grupos de microorganismos: hongos en medio PDA, solubilizadores de fósforo en medio NBRIP, fijadores

de nitrógeno en medio Rojo Congo, y bacterias en medio LB. Estas pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Ecología Microbiana de la BUAP. Este método es útil para investigar microorganismos que crecen bien en condiciones de laboratorio (Whalen y Sampedro, 2010), que para los objetivos de este estudio es suficiente.

2.8.1. Técnica de muestreo y siembra en medios de cultivo

Las muestras fueron tomadas el 25 de septiembre de 2017, de un volumen de suelo ubicado entre 7 y 13 cm de profundidad y entre 5 y 10 cm del tallo de una planta viva al centro de cada unidad experimental; dicho volumen fue depositado en una bolsa de papel, etiquetado, transportado al laboratorio, y refrigerado a 4 °C (Whalen y Sampedro, 2010) hasta el momento de su procesamiento el 30 de octubre de 2017. Durante éste, se hizo una muestra compuesta de cada tratamiento, y se tomaron 3 gramos de cada tratamiento para tener réplicas; cada gramo fue dispersado en 10 ml de agua destilada, agitado por un minuto en ambas direcciones con un agitador tipo vórtex para tubos de ensayo, y a partir de esta suspensión se hicieron las diluciones seriadas 10^0 , 10^{-1} , 10^{-2} , y 10^{-3} y se sembraron en los medios de cultivo descritos más adelante, previamente preparados y distribuidos en cajas Petri de 10 cm, solidificados y esterilizados. Cada caja petri fue dividida en 4 cuartos, 1 para cada dilución, y en cada una fueron distribuidos 50 µl de la dilución correspondiente. Después de su inoculación, los medios fueron incubados a 37 °C por 24 horas, cuando fueron hechos los conteos del número más probable de unidades formadoras de colonia.

2.8.2. Hongos en medio PDA.

16 g agar, 4 g de extracto de papa, 20 g de dextrosa, 25 mg de cloramphenicol.

2.8.3. Solubilizadores de fósforo en medio NBRIP.

MgCl₂·6H₂O 5 g/l, MgSO₄·H₂O 0.25 g/l, KCl 0.2 g/l, NH₄SO₄ 0.1 g/l, Ca₃(PO₄)₂ 5 g/l, glucosa 9 g, agar 16 g, azul de bromotimol 6 ml (12.5 microgramos/ml).

2.8.4. Fijadores de nitrógeno en medio Rojo Congo.

Ácido succínico 5 g/l, K_2HPO_4 10% 5 ml/l (0.5 g/l), $MgSO_4$ 10% 2 ml/l (0.2 g/l), NaCl 10% 1 ml (0.1 g/l), extracto de levadura 0.5 g/l, $FeCl_3$ 1% 1.5 ml (0.15 g/l), KOH 4.8 g/l, Rojo Congo 15 ml, antibiótico CRO (30) 750 microgramos/litro. Debe ajustarse el pH entre 6.8 y 7.

2.8.5. Bacterias en medio LB.

Bactotryptona 10 g/l, extracto de levadura 5 g/l, NaCl 10 g/l, agar 16 g/l.

2.9. Análisis estadístico de los resultados

Las variables agronómicas de diámetro del tallo, altura de planta, producción de biomasa y rendimiento fueron analizadas mediante ANOVA usando el programa Statistica 4.0. Los resultados de densidades de microorganismos en medios de cultivo, también con ANOVA pero haciendo uso del programa R.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Historia del manejo del suelo en el sitio de estudio.

Antes de 1975, el manejo del suelo puede definirse como “tradicional”. Consistía en la limpieza previa con un pastoreo para aprovechar rastrojos, un chapeo o corte con machete de los residuos vegetales erectos, y luego una labranza con arado de palo o metal tirado por una yunta. El abonado o manejo de nutrientes, era con estiércoles diversos, aunque predominantemente de ganado vacuno, recolectados en los establos cercanos y el acumulado durante el periodo de pastoreo; se hacían rotaciones tradicionales de frijol y maíz. El manejo de plagas y enfermedades no se hacía, pues según la experiencia de los agricultores del sitio, “no era necesario”; el manejo de la cobertura del suelo entre ciclos de cultivo consistía en dejar crecer la vegetación natural para después ser aprovechada como forraje; durante el ciclo de cultivo, se escardaba con yunta 2 a 3 semanas después de la siembra, luego, entre 4 y 6 semanas después de la siembra, con azadón y machete.

De 1975 a 1990, el manejo fue convertido al “convencional”, siendo la preparación con arado de disco y rastra, el manejo de nutrientes con urea y fosfato diamónico (18-46-0), el manejo de plagas y enfermedades con pesticidas diversos (no se tiene registros), y el manejo de la cobertura del suelo se hizo con herbicidas no selectivos antes y después del cultivo, dejando “descansar” el suelo, sin o con poca cobertura mientras no se cultivaba, principalmente en la temporada fría y seca de diciembre a mayo o junio, hasta que se estabilizaran las lluvias; durante el cultivo, las yerbas se manejaban con escardas montadas en tractor al inicio, y con yunta en etapas posteriores.

Desde 1990 en adelante, el cambio del manejo fue en sentido del “orgánico” pero con una fuerte influencia del tradicional y conservando la mecanización del convencional: la preparación se ha hecho con rastra, el abonado es con estiércol vacuno (Cuadro 11), con dosis de 1 litro m^{-2} , que equivale entre 4 y 5 toneladas por hectárea (MS), y aplicando lixiviado de lombriz producido artesanalmente en un módulo dentro del mismo terreno; el manejo de plagas y enfermedades no se realiza; el manejo de la cobertura vegetal radica en la incorporación de los rastrojos después de la cosecha, y dejar crecer las yerbas nativas mientras no se cultiva,

habiendo años en que no se siembran las parcelas y se permite que las yerbas nativas crezcan sin disturbio; durante el cultivo, se manejan las yerbas con azadón en dos eventos entre 2 y 6 semanas después de la siembra, pues las yuntas han casi desaparecido de la región. Se realizan rotaciones de frijol, maíz y amaranto. De este último cultivo, se registran rendimientos promedio de 0.8 ton/ha.

3.2. Parámetros iniciales de la fertilidad del suelo

3.2.1. Parámetros químicos

Cuadro 8. Resultados de los análisis de suelo experimental Mehlich III y Acetato de Amonio pH 8.5.

	Unidades	Mehlich III Concentración	AA pH 8.5	Mehlich III Saturación de bases	AA pH 8.5
MO	%	2.9			
pH		8.2			
CICT	meq/100g	54.4	12.6		
Nitrógeno	kg/ha*ciclo	84			
Azufre	ppm	8			
Fósforo	ppm	10			
Calcio	ppm	9412	1858	86,5%	73,7%
Magnesio	ppm	763	270	11,7%	17,9%
Potasio	ppm	346	299	1,6%	6,1%
Sodio	ppm	16	68	0,1%	2,3%
Boro	ppm	1.3			
Fierro	ppm	18			
Manganeso	ppm	101			
Cobre	ppm	1.4			
Zinc	ppm	0.9			

Cuadro 9. Balance mineral siguiendo las guías de Astera (2014) integrando los niveles encontrados en el suelo mediante los análisis Mehlich 3 para S, P, B, Fe, Mn, Cu y Zn, y el Acetato de Amonio pH 8.5 para Ca, Mg, K, Na, su relación porcentual y su interpretación***

Determinaciones	Unidades	Nivel	Nivel	NE/ND %	Interpretación
		encontrado (NE)	deseado (ND)		
CICT		12.6	-	-	
Azufre	ppm	8	197	4%	Muy deficiente
Fósforo	ppm	10	197	5%	Muy deficiente
Calcio	ppm	1858	1890	98%	Adecuado
Magnesio	ppm	270	272	99%	Adecuado
Potasio	ppm	299	197	152%	Adecuado
Sodio	ppm	68	67	102%	Adecuado
Boro	ppm	1.3	1.9	69%	Intermedio
Fierro	ppm	18	123	15%	Muy deficiente
Manganeso	ppm	101	61	164%	Adecuado
Cobre	ppm	1.4	10	14%	Muy deficiente
Zinc	ppm	0.9	20	5%	Muy deficiente

*** Interpretación de los resultados en relación con los niveles deseados.

Adecuado: > 75% del óptimo y menor del nivel tóxico

Intermedio: <75% y >50% del óptimo

Deficiente: <50% y >25% del óptimo

Muy deficiente: <25% del óptimo

3.2.2. Diagnóstico inicial de la calidad del suelo

Interpretación del cromatograma de Santiago Tillo (Figura 6, izquierda)

La figura del cromatograma, evaluado desde la escala de desarrollo radial (Figura 3), coincide con el grado 1 (ausencia de desarrollo radial), lo que indica un estado de degradación extremo, derivado de una actividad agrícola que no permitió las condiciones para la instalación de

actividad biológica. La ausencia de “zona central” (ZC) indica una falta de aireación y porosidad, síntomas de compactación y una destrucción total de la estructura, condiciones que han generado una alta densidad, y seguramente un mal drenaje en temporada húmeda. La “zona mineral” (ZM) monocromática sugiere poca diversidad mineral; coincide con el de un suelo rojo arcilloso totalmente mal manejado, con fertilidad y capacidad de nutrición muy baja y desbalanceada; la ausencia de “desarrollo radial” (DR) en esta zona sugiere una baja disponibilidad nutricional por una “biosolubilización” mineral ausente. La “zona proteica” (ZP) apenas perceptible indica una bajísima concentración de materia orgánica y una inexistencia de material humificado; la inexistencia de DR aún en esta zona es muy grave, indicando una comunidad microbiana extremadamente escasa y poco diversa en este suelo. La casi inexistencia de “zona enzimática” (ZE) indica la escasez de enzimas, confirmando la insignificante población y actividad microbianas. No existen rastros de humus de ningún tipo.

Interpretación del cromatograma con características ideales (Figura 6, derecha)

Evaluated desde la escala de desarrollo radial, el cromatograma ideal coincide con el nivel 12, por contener canales plumados y ciliados de diversos grosores que recorren e “integran” todas las zonas y terminan en dientes adornados con nubes oscuras, indicando un estado de salud “ideal”. La balanceada ZC (1/4 de la figura) es indicador de una estructura grumosa, excelente formación de agregados, habiendo excelente drenaje y retención de humedad, disponibilidad de oxígeno constante y abundante (ausencia de compactación); el color crema claro sugiere un ciclo del nitrógeno completo con abundancia óptima de este nutriente. La ZM de diversos colores (amarilla, naranja, dorada, rojiza) sugiere una fertilidad muy alta, con nutrición diversa y completa, presencia de suficiente arcilla (rojo), y la presencia de todos los grupos funcionales y quelatos requeridos para ésta; el desarrollo radial confirma la “biosolubilización” mineral constante, y las pinceladas de marrón y café muy oscuro derivan de la presencia abundante de humus en todas sus formas. La ZP de bordes internos lobulados y externos diversamente dentados sugieren la diversidad de pesos moleculares de sustancias orgánicas que se mineralizan y humifican armónicamente; su grosor balanceado de ¼ parte y su intensidad cromática sugieren su abundancia, y sus intensos y diversos colores marrones desde café claro a muy oscuro expresan su diversidad y abundante presencia de ácidos fúlvicos. La ZE es ejemplar, con una intensidad alta de colores dorados y amarillos entre los dientes de la ZP hasta

cremosos en borde más externo, sugiriendo una alta concentración de enzimas derivadas de la diversa, abundante y constante actividad microbiana; también están presentes los signos de ácidos húmicos, himatomelánicos, así como humus permanente o estable en las nubosidades de color café claro, oscuro, y negro, respectivamente.

Cuadro 10. Descripción de las zonas de los cromatogramas en la Figura 6.

Zona	Santiago Tillo	Ejemplo ideal
Central (1): ZC	(1) Ausente.	(1) Presente; proporción radial de $\frac{1}{4}$; color crema claro; borde lobulado.
Interna o Mineral (2): ZM	(2) Dominante con proporción radial superior a $\frac{4}{5}$. Color marrón-rojizo-óxido, uniforme (monocromática); desarrollo radial inexistente; borde liso.	(2) Presente; proporción radial de $\frac{1}{4}$; colores deseables diversos (amarillo, dorado, marrón, anaranjado, pinceladas de negro); desarrollo radial grueso y plumado; borde lobulado y denticulado.
Intermedia o Proteica (3): ZP	(3) Casi inexistente, proporción radial $< \frac{1}{10}$, color gris pardo (indeseable), muy tenue; desarrollo radial inexistente; borde liso difuminado.	(3) Presente, proporción radial $> \frac{1}{4}$, colores deseables (café claro a muy oscuro y negro, dorado); desarrollo radial grueso y plumado; borde definido, dentado con puntas aristadas y diversas en profundidad, algunas terminadas en explosión.
Externa o Enzimática (4): ZE	(4) Casi inexistente. Color crema muy claro a blanco, borde liso.	(4) Presente, proporción radial de $\frac{1}{4}$, color dorado intenso con lunares oscuros, borde difuminado y suavemente ondulado.

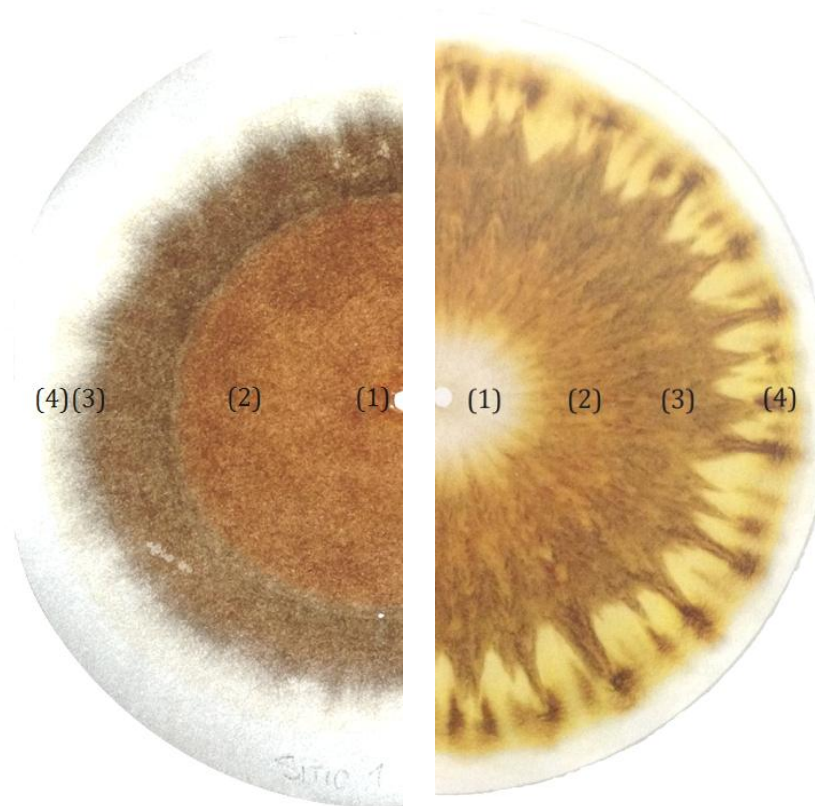


Figura 6. Comparación entre el cromatograma del suelo en la parcela de Santiago Tillo (izquierda) y el ejemplo de un suelo arcilloso pero con características ideales de salud (derecha; tomado de Restrepo y Pinheiro, 2011). (1) Zona Central, (2) Zona Interna, (3) Zona Intermedia, (4) Zona Externa.

3.2.3. Caracterización cuantitativa y cualitativa de los abonos orgánicos y minerales

Cuadro 11. Contenido nutrimental de los abonos orgánicos VermiBUAP, composta Ecoterra, y el estiércol usado tradicionalmente en el sitio.

Determinaciones	Unidades	VermiBUAP	Ecoterra	Estiércol
Nitrógeno	%	1,9	3,86	1,93
Fósforo	%	0,38	0,577	0,664
Potasio	%	0,822	1,99	1,07
Azufre	%	0,255	0,416	0,435
Magnesio	%	0,356	0,692	0,971
Calcio	%	3,66	2,09	5,31
Sodio	ppm	764	3870	887
Hierro	ppm	41100	6430	5770
Aluminio	ppm	7840	9210	5770
Manganeso	ppm	320	281	366
Cobre	ppm	52,1	28,7	27,8
Zinc	ppm	118	163	320
Boro	ppm	46,1	40,3	64,4
M.O.	%	31,1	34,2	62,9
C_orgT	%	18,5	19,7	36,7
pH	-	7,55	7,76	8,01
C.E.	mmhos/cm	7,03	11,7	3,02
Humedad	%	45,3	28,2	61,2
MS	%	54,7	71,8	38,8
C:N		9,7	5,1	19
C:P		48,6	34,1	55,2
C:S		72,5	47,3	84,3

Cuadro 12. Resultados de los análisis de los abonos minerales harina de roca de basalto y fosforita.

Elemento	Unidades	Basalto	Fosforita
Silicio	%	25	6,89
Calcio	%	5,6	22,67
Magnesio	%	2,47	0,132
Potasio	%	1,07	0,09
Sodio	%	2,8	0,067
Fósforo	%	0,19	12,6
Azufre	ppm	N.R.	N.R.
Fierro	%	6,5	1,89
Manganeso	ppm	1175	1011
Cobre	ppm	36	N.R.
Zinc	ppm	130	N.R.
Boro	ppm	N.R.	N.R.
Molibdeno	ppm	1	N.R.
Selenio	ppm	3	N.R.
Vanadio	ppm	197	N.R.
Cobalto	ppm	25	N.R.
Níquel	ppm	51	N.R.
Lantano	ppm	37	N.R.
Cerio	ppm	68	N.R.
Praseodimio	ppm	7,8	N.R.
Samario	ppm	5,5	N.R.
Europio	ppm	3,3	N.R.
Gadolinio	ppm	4,7	N.R.
Terbio	ppm	1,3	N.R.
Dysprosio	ppm	4,6	N.R.
Holmio	ppm	0,9	N.R.
Erbio	ppm	3,1	N.R.
Tulio	ppm	0,3	N.R.
Yterbio	ppm	2,3	N.R.

Interpretación del cromatograma del abono VermiBUAP

La posibilidad de realizar el análisis cromatográfico de la lombricomposta VermiBUAP (Figura 7) con la técnica descrita sugiere que es un abono orgánico en proceso de descomposición y en fase de maduración. Presenta un “desarrollo radial” (DR) en proceso de formación, truncado cerca de la zona central (ZC), lo que indica una disponibilidad mineral incompleta y muerte microbiana posiblemente por exposición al sol. La ZC de color rosado indica una baja concentración de nitratos y una mayor cantidad de amonio; el tamaño es intermedio, con

proporción radial de 1/5, mostrando que actualmente tiene aireación suficiente, aunque no ideal; el borde es ligeramente ondulado, sugiriendo una disponibilidad intermedia de N. El color marrón rojizo en la “zona mineral” (ZM) indica la presencia de arcillas y complejos organominerales; no hay mucha diversidad cromática, indicando baja diversidad nutricional; la coloración verdosa en el borde externo de la ZM sugiere la presencia de algunos sulfuros derivados de un periodo de anaerobiosis por exceso de humedad en algún momento del proceso de descomposición; el DR, aunque incompleto está presente y medianamente diverso, inicia delgado y se engruesa al acercarse a la “zona proteica” (ZP), indicando mineralización activa de la materia orgánica por la comunidad microbiana presente. La ZP es dominante ($>2/5$), indicando un desbalance en la elaboración y descomposición; los dientes son medianamente diversos en forma, pero de tamaño similar, indicando poca diversidad; el DR en esta zona es muy abundante, diverso en grosor, plumado y ciliado, indicando una intensa actividad biológica transformando la materia orgánica; la coloración marrón indica una descomposición incompleta de los materiales, muy común en la elaboración de lombricompostas. La “zona enzimática” (ZE) es angosta, pero presente, con colores crema, anaranjados y ocre que indican presencia y actividad enzimática durante el proceso de descomposición aún activo (Restrepo y Pinheiro, 2011).



Figura 7. Cromatograma del abono VermiBUAP.

Interpretación del cromatograma del abono Ecoterra

El abono Ecoterra es hecho a base de estiércol de ganado lechero de la región de Chipilo, Puebla. La mezcla analizada pertenecía a una mezcla con una proporción 50% composta y 50% vermicomposta; ambas tienen como materia prima estiércol recolectado de los establos lecheros. La lombricomposta es hecha con estados avanzados de descomposición de la composta. Al finalizar el proceso de descomposición, les son agregadas harinas de roca dolomítica y zeolita a ambos materiales. La posibilidad de realizar el análisis cromatográfico de la mezcla Ecoterra (Figura 8) con la técnica descrita en el método sugiere que es un abono en fase de maduración. Tiene un buen desarrollo radial (DR) pero incompleto, truncado entre 1/4 y 2/5 del croma, lo que indica una disponibilidad mineral incompleta. La ZC de color rosa oscuro que pasa a claro, indica escasa presencia de nitratos y una mayor cantidad de amonio; el tamaño es pequeño, con proporción radial de 1/10 indicando baja oxigenación o aireación; el borde es liso, sugiriendo una disponibilidad baja de N. El color rosado en la ZM indica la presencia de minerales que todavía no han sido colonizados ni solubilizados por la microbiota aún (Pfeiffer, 1984), también sugiere la ausencia de arcillas y complejos órgano-minerales, por lo que no habría buena retención de nutrientes; no hay mucha diversidad cromática, indicando baja disponibilidad y diversidad nutrimental; el DR presente, incompleto, medianamente diverso, indica un grado intermedio de mineralización activa de la materia orgánica por la microbiota presente. La ZP está balanceada a 1/4 del croma, los dientes son diversos en forma, pocas veces alcanzando el borde externo, de tamaño similar, indicando diversidad intermedia; el DR es muy abundante, diverso en grosor, plumado y ciliado, indicando una intensa actividad biológica; la coloración marrón castaño-rojizo a café indica una fermentación incompleta de los materiales, común en lombricompostas y compostas poco oxigenadas. La ZE es angosta, pero presente, con colores crema en el fondo, recurrente en abonos en fase de maduración; también presenta nubes anaranjadas y ocre que indican presencia de enzimas de descomposición; dichas nubes ocurren alrededor de algunos lunares de color café intenso que muestran la posible presencia de ácidos húmicos; en esta zona hay muy pocas manchas de color negro que indiquen materia orgánica cruda, por lo que puede darse por terminada la etapa de descomposición de la fracción lábil del abono (Restrepo y Pinheiro, 2011). Dichas características aparentemente contradictorias son características de las mezclas de abonos en diferente estado de descomposición y las mejoras

aparentes derivadas del proceso de mezclado, como corresponde en el presente abono. La zona mineral rosada es la evidencia de la práctica de enriquecer el abono con minerales o harinas de roca después de las fases iniciales e intermedias de descomposición (Pfeiffer, 1984).



Figura 8. Cromatograma del abono Ecoterra.

Interpretación del cromatograma del estiércol usado como abono en el sitio

En el cromatograma del estiércol usado en el terreno como abono para los cultivos (Figura 9) resaltan características importantes. Primero, el hecho de que no haya “abierto” el cromatograma hasta los 6 cm con la técnica descrita indica que no estaba suficientemente procesado, es decir, que contenía una alta proporción de materiales crudos. La ZC ocupa cerca de un $\frac{1}{4}$ de lo que debió medir el croma, lo que sugiere abundancia de N, aunque el color rosado indica que no está adecuadamente procesado, dominando el amonio, lo que confirma el aroma del material. La ZM casi no se aprecia, pero su color coincide con cromas de estiércoles que se recolectan, guardan y fermentan con exceso de humedad. La ZP es la más evidente y dominante del croma, mostrando los colores marrón castaño-rojizo a café típicos de estiércoles y abonos

crudos mal procesados y con falta de oxigenación; el DR indica una actividad intensa de descomposición. En la ZE, la coloración madera a cobre indica enzimas de descomposición, y luego las manchas o nubes de color café muy oscuro y negro en el borde externo coincide con cromas de abonos crudos con algunas señales de putrefacción por defectos en la recolección (Restrepo y Pinheiro, 2011).



Figura 9. Cromatograma del estiércol usado como abono en el sitio.

3.2. Impacto del plan regenerativo 3M

3.2.1. Minerales

El proceso de remineralización se llevó a cabo siguiendo los principios de “presencia” y “balance”. El de presencia fue atendido con la incorporación de harinas de roca de basalto por su contenido diverso de minerales (Cuadro 12), entre ellos, elementos macro, micro y traza; siguiendo este principio también se aplicó el molibdato de sodio, por sus efectos positivos tanto en la nutrición vegetal como en la estimulación de la fijación de nitrógeno. El principio de balance fue guiado por la metodología descrita por Astera (2014), la cual determina las

concentraciones “ideales” de los principales nutrientes. Estos niveles están determinados por la relación de saturación de bases, siendo el K el más determinante por depender directamente de su valor los niveles ideales de P, S y Fe; del P depende el Zn y de éste el Cu, y del Fe depende del Mn, de modo que los valores “ideales” de estos nutrientes pueden calcularse a partir de la saturación mínima de K al 2% y óptima al 5%, cuyo cálculo se resumen en el Cuadro 13. Conociendo estas cantidades, y asumiendo un 100% de disponibilidad de los nutrientes a partir de las enmiendas que los contengan, se pueden prorratear las aplicaciones y hacer un plan de remineralización para llevar el suelo al estado “ideal” (Astera, 2014). En particular para las rocas fosforita y basalto, la liberación de nutrientes es lenta, requiriendo varios años para su aprovechamiento (van Straaten, 2002 y 2006; Goreau *et al.*, 2015).

Cuadro 13. Cantidad de enmiendas a agregar al suelo en balances mínimo e ideal, asumiendo 100% de estabilización de carbono y 25% de liberación de N por ciclo en la composta Ecoterra.

Determinación	Actual	Deseado		Cantidad^a		Enmienda
		min. ppm	ideal ppm	min a	ideal a	
CICT meq/100g	12,6					
pH	8,2					
M.O. %	2,90	4,7	6	147	252	Ecoterra
Nitrógeno kg/ha*año	84	125	270	5,9	26,8	Ecoterra
Azufre ppm	8	98	246	194	511	Azufre
Fósforo ppm	10	98	246	1401	3741	Fosforita
Calcio ppm	1858	1966	1890	S	S	
Magnesio ppm	270	270	272	S	S	
Potasio ppm	299	98	246	S	S	
Sodio ppm	68	67	67	S	S	
Boro ppm	1,3	2,0	1,9	13	12	Bórax
Fierro ppm	18	33	123	148	1049	FeSO ₄ ·7H ₂ O
Manganeso ppm	101	16	61	E	E	MnSO ₄ ·H ₂ O
Cobre ppm	1,4	4,9	12,3	8	23	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Zinc ppm	0,9	9,8	24,6	19	51	ZnSO ₄ ·H ₂ O

^a: ton ha⁻¹ en Ecoterra, y kg ha⁻¹ en otras enmiendas. S = Suficiente. E = Exceso.

Las aplicaciones actuales de estiércol (4 a 5 ton MS/ha) son insuficientes para elevar los contenidos de P, S, Fe, B, Zn y Cu intercambiables a su correspondiente “nivel mínimo”, como

puede verse en el Cuadro 14. Del mismo modo, en cuanto a los niveles “ideales” o “deseados” calculados a partir de los lineamientos recomendados por Astera (2014), ninguno se acerca, y las aplicaciones no corresponderían a los requerimientos de los otros nutrientes, por lo que provocarían desbalances, lo que hace evidente la necesidad de un cálculo balanceado de la aplicación de nutrientes minerales integrando tanto a los abonos orgánicos como a las fuentes minerales en forma de harinas de roca y sales minerales, siendo estas últimas mucho más concentradas. El análisis de los resultados en los cuadros 13 y 14, así como los bajos rendimientos registrados en el predio, dejan en claro que el manejo “tradicional” en el que sólo se han aplicado dosis de abonado de mantenimiento a base de estiércol, sin considerar el estado actual de la fertilidad del suelo y los contenidos nutrimentales de los abonos, ha sido incapaz de recuperar la calidad “química” del suelo tratado. También puede observarse que de aplicarse altas dosis de abono para corregir una deficiencia como Zn, Cu o Fe, podrían provocar desbalances en otros nutrientes que ya estén de por sí en exceso (Ca, K, Mg, Mn).

Cuadro 14. Cantidades de estiércol necesarias para llevar la concentración de nutrientes minerales a niveles mínimos e ideales, según cálculo en el Cuadro 13.

Nutrimento	Estiércol ^a	Suelo ppm	Nivel en suelo		Dosis de estiércol	
			mínimo ppm	ideal ppm	mínimo kg/ha	ideal kg/ha
Fósforo	0,664	10	100	246	27108	71084
Potasio	1,07	299	100	246	-37196	-9907
Calcio	5,31	1858	1966	1890	4068	1205
Magnesio	0,971	270	270	272	0	412
Azufre	0,435	8	100	246	42299	109425
Sodio	887	68	67	67	-2255	-2255
Fierro	5770	18	33	123	5199	36395
Manganeso	366	101	16	61	-464481	-218579
Zinc	320	0,9	9,8	24,6	55625	148125
Cobre	27,8	1,4	4,9	12,3	251799	784173
Boro	64,4	1,3	2	1,9	21739	18634

Nota: las dosis negativas señalan que el nivel actual del suelo es superior al calculado.

^a Las concentraciones de nutrimentos están en kg/ha para P, K, Ca, Mg, y S. El resto en ppm.

3.2.2. Materia orgánica

La aplicación de abonos orgánicos no es la única forma de aumentar los niveles de materia orgánica o humus en el suelo, y tampoco la más económica. Son precisamente los materiales orgánicos producidos en el mismo suelo (hojas, tallos, raíces), con la participación de los macro y microorganismos encargados, en presencia y balance de los minerales involucrados (Ca, S, etc.), bajo condiciones adecuadas de oxigenación, humedad, sombra y temperatura, que pueden ser transformados, estabilizados, almacenados y humificados para reconstruir la fracción orgánica del suelo (Kononova, 1982; Primavesi, 1984; Stevenson y Cole, 1999; Lal, 2004 y 2015; Whalen y Sampedro, 2010). De requerirse la misma cantidad mencionada (62 ton/ha), deben considerarse algunas variables para estimar la cantidad de los materiales orgánicos a producir, como la fracción que es transformada en humus, la naturaleza de los materiales (lignina, celulosa, proteínas, relación C:N, etc.), entre otras. Figuras en la literatura sugieren una tasa o “coeficiente de humificación” del 25 al 50% de los materiales orgánicos originales (Kononova, 1982; Whalen y Sampedro, 2010), por lo que se requerirían entre 2 y 4 veces esa cantidad (124 a 248 ton/ha) sumando partes aéreas y subterráneas. Asumiendo que la biomasa de raíces (parte subterránea) es equivalente o muy similar a la biomasa aérea (Whalen y Sampedro, 2010), sobre la superficie deberían producirse entre 62 y 124 ton/ha de materiales orgánicos secos sobre la superficie, por lo que su masa con “humedad de campo” sería entre 10 y 20% mayor, dígase entre 68 y 150 ton/ha, o 6.8 y 15 kg/m². Una regresión lineal para estimar el número de ciclos requerido para alcanzar esta producción a partir de la producción de biomasa del amaranto (T2: 3.1 ton/ha y T3: 5.1 ton/ha) sugiere que serían necesarios entre 13.3 y 29.4 ciclos de amaranto con producciones como similares al T3, y de 21.9 a 48.4 ciclos con similares al testigo.

Teniendo 2.9% de MO (LOI) actualmente, y asumiendo un valor “ideal” de 6% (LOI), en los 15-20 cm de suelo superficiales (2,000,000 kg/ha), se requeriría aumentar la MO en 62,000 kg/ha. Si se tuviera como única fuente de materia orgánica los abonos usados (Cuadro 11), se requeriría aplicar cantidades superiores a 250 ton ha⁻¹ (Cuadro 15), lo cual es inviable económicamente en un ciclo productivo.

Cuadro 25. Estimación de la cantidad de abono necesaria para aumentar los niveles de materia orgánica a 6% con los abonos analizados.

Tipo de abono	MO	Cantidad		con
	(MS)	MS	MS	Humedad
	%	ton/ha	%	ton/ha
VermiBUAP	31,1	199,4	74,7	266,9
Ecoterra	34,2	181,3	71,8	252,5
Estiércol	62,9	98,6	38,8	254,0

3.2.3. Microorganismos

El proceso de “revitalización” para impactar en el componente microbiológico consistió en re-introducir microorganismos nativos de la región a partir de los MM reproducidos a partir de la hojarasca de un bosque cercano, así como los microorganismos específicos contenidos en los productos Biomil (fijadores de nitrógeno), Megaterium (solubilizadores de fósforo) y Micorrizas (biotransferente de fósforo y otros minerales). Indirectamente, el componente microbiológico también es mejorado por los abonos orgánicos usados. El impacto de éstos se revisa en la sección 3.5.

3.3. Respuesta agronómica del manejo 3M en amaranto

3.3.1. Altura de planta

La diferencia de alturas de planta (Figura 10) entre T1 y T4 puede ser debido al efecto de la localización de los abonos, ya que en los tratamientos T3 y T4, la mezcla de abonos se distribuyó en la hilera donde se trasplantarían las plántulas, y en el tratamiento T1, el abono se ubicó en el hoyo donde se ubicaría la plántula, por lo que el acceso a los nutrientes estaría más al alcance de la planta en este último. Otra explicación consiste en el factor de calidad del abono, pues estando más disponibles los nutrientes minerales en el abono VermiBUAP (Figura

7), la planta pudo aprovechar éstos mejor y crecer un poco más que en los otros tratamientos. Los mejores resultados en altura de la vermicomposta e inferiores en mezclas de composta y lombricomposta coinciden con los observados por Islam *et al.* (2016), quienes también encontraron mayor número de hojas y mayor peso por planta en amaranto abonado con vermicomposta en comparación con composta y mezcla composta-vermicomposta, aunque explican estas diferencias por reguladores del crecimiento producidos por los microorganismos presentes en la vermicomposta.

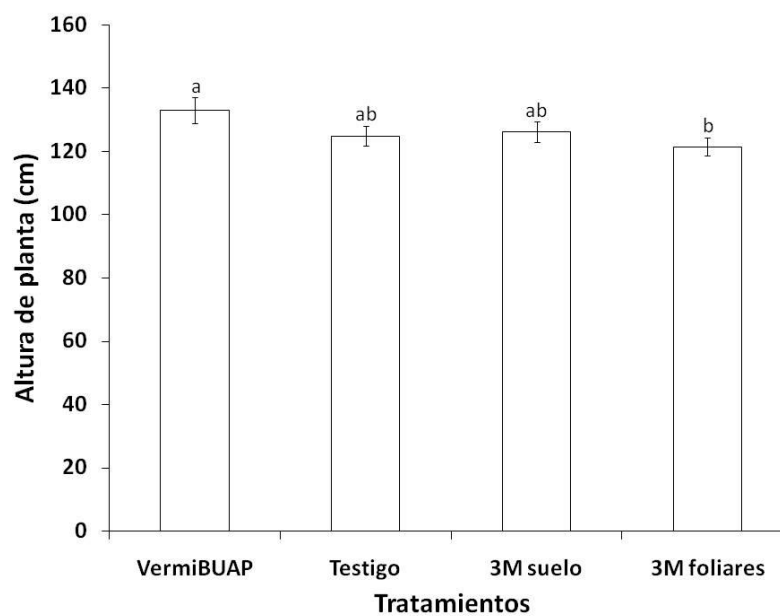


Figura 10. Altura promedio de las plantas de amaranto 2 meses después de trasplante

3.3.2. Diámetro del tallo

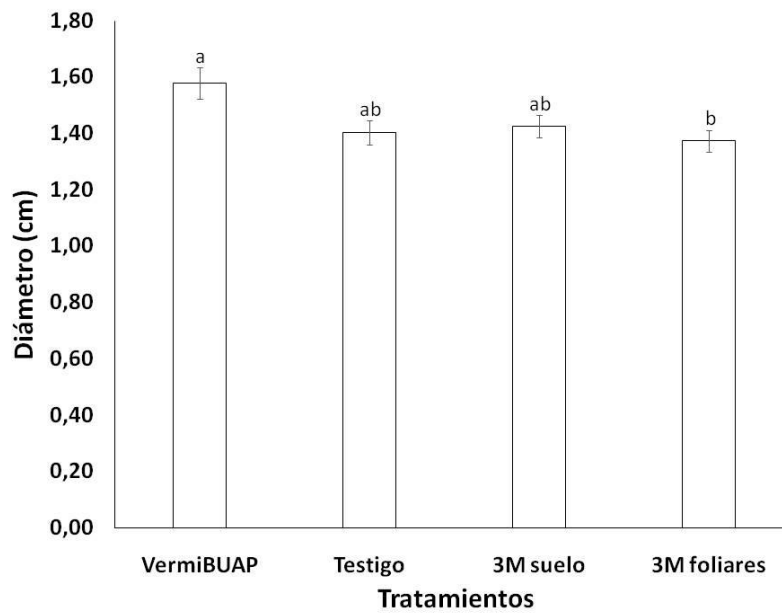


Figura 11. Diámetro promedio del tallo de las plantas de amaranto a 10 cm de la superficie del suelo

3.3.3. Biomasa aérea

La biomasa aérea es la suma de los órganos vegetales que se encuentran sobre la superficie del suelo, es decir, la suma de hojas, tallos, flores y frutos. De manera particular, se midieron los tallos o rastrojo, el tamo o cascarilla, y el grano; las hojas no fueron pesadas por haberse desprendido la mayoría de éstas de los tallos cosechados y haber en la superficie del suelo hojas que pertenecieran a otros tratamientos o a la zona no útil de cada unidad experimental.

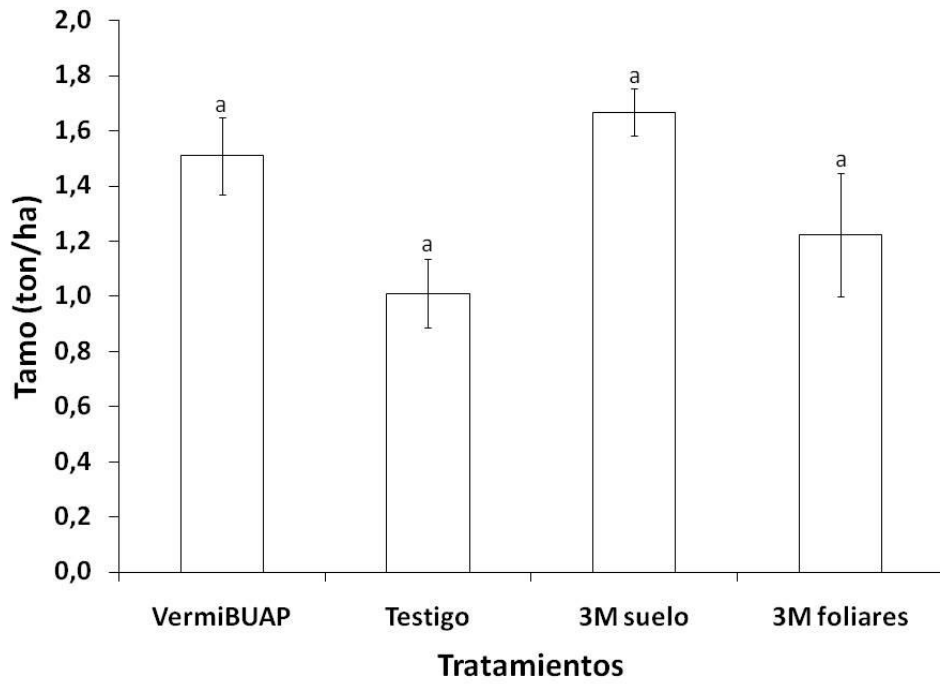


Figura 12. Tamo cosechado de los tratamientos.

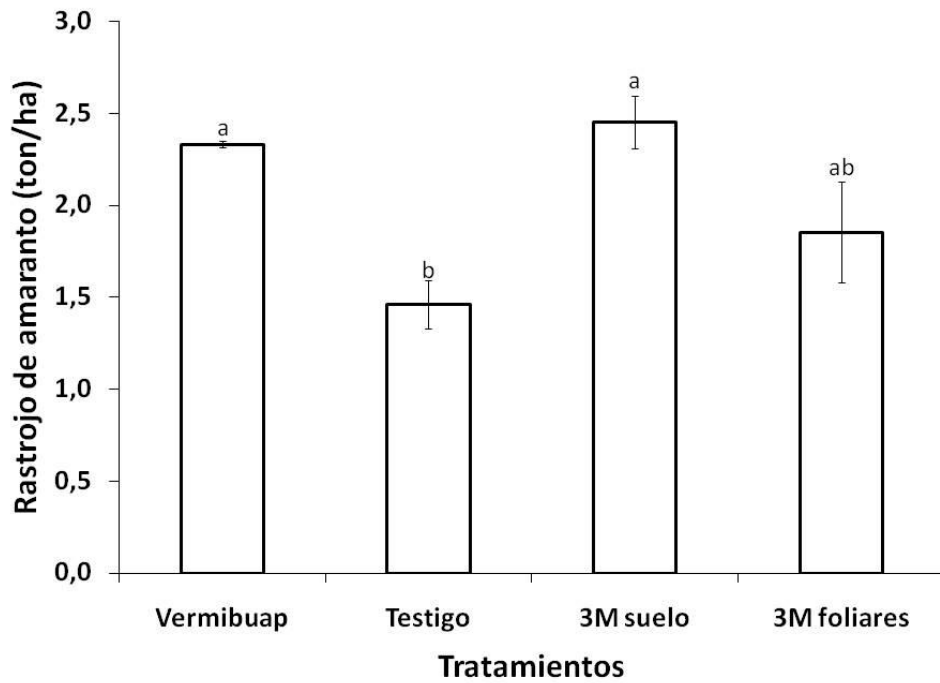


Figura 13. Rastrojo de amaranto producido con los tratamientos.

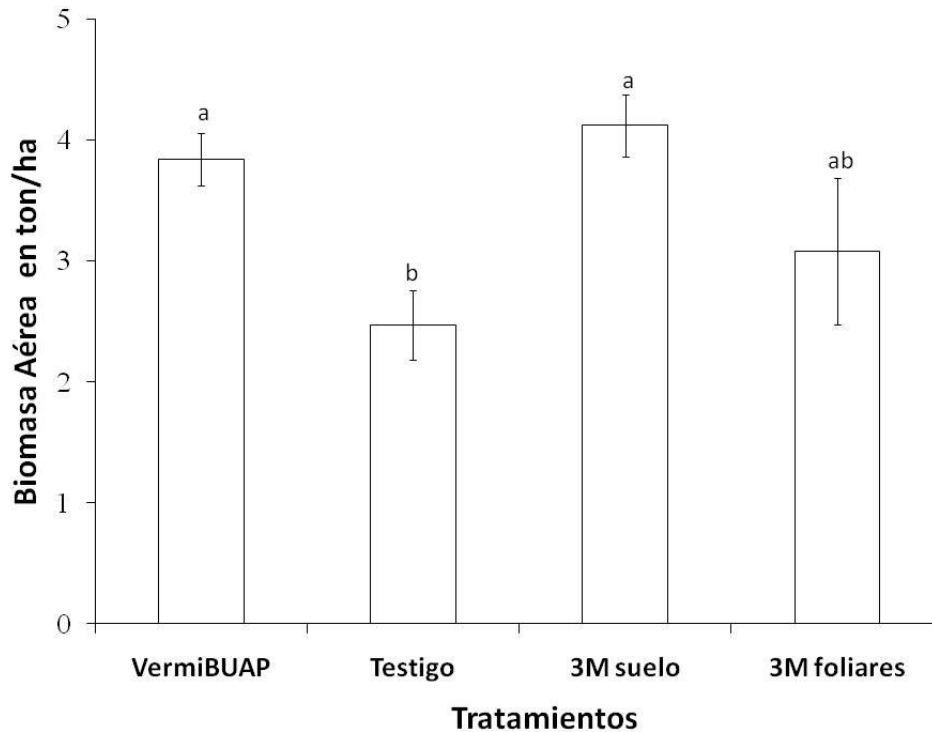


Figura 14. Biomasa aérea promedio en toneladas ha^{-1} de plantas de amaranto.

3.3.4. Rendimiento

Analizando los rendimientos (Figura 15), las principales diferencias entre los tratamientos T3 y T4, en el manejo T3 se incorporaron nutrientes minerales macro y micro al suelo, y recibió las aplicaciones líquidas complementarias en la rizósfera, lo que aumentó los rendimientos sobre el testigo y sobre el promedio registrado (Sección 3.1). En cambio, a pesar de que en el T4 se haya aplicado una cantidad considerable de elementos macro en la forma de azufre y roca fosfórica, e incluso elementos traza en la harina de roca de basalto y molibdato de sodio, pero no los microelementos Fe, Zn, B y Cu al suelo, una sola aplicación foliar de estos microelementos (junto con otros complementos) fue a penas suficiente para elevar el rendimiento a niveles similares al resultante del manejo practicado actualmente por los agricultores con estiércol y extracto de lombricomposta, y no ser estadísticamente diferente del testigo.

Otra explicación al aumento del rendimiento en T3 con respecto al resto, puede deberse a un efecto de sinergia con los abonos orgánicos y minerales aplicados al suelo durante su preparación. Efectos sinérgicos entre los abonos orgánicos, los minerales y la inoculación con microorganismos han sido reportados por Theodoro *et al.* (2010), sugiriendo que las combinaciones entre los materiales orgánicos y minerales, en interacción con bacterias fijadoras de nitrógeno y otros inoculantes, puede acelerar la provisión de nutrientes, y con esto, el aumento en los rendimientos. Un principio que puede explicar dicha sinergia es el del factor limitante, el cual explica que el rendimiento de los cultivos está limitado por el elemento o los elementos deficientes en su nutrición, que en este caso corresponden los elementos N (por la baja concentración de MO), P, S, Fe, Zn y Cu, según se identificó en el balance mineral (Cuadro 9), y que los elementos P, S, Fe y Cu pueden tener efectos sinérgicos con el N (Rietra *et al.*, 2017; Mengel y Kirkby, 2000), e incluso un sinergismo de Liebig entre el Cu y el N (Rietra *et al.*, 2017). Al ser los tratamientos T3 y T4 similares en la aplicación de los elementos N, P y S, la diferencia expresada en los resultados de rendimiento sugiere una correlación con los microelementos Fe, Zn, Cu y B aplicados al suelo en el T3.

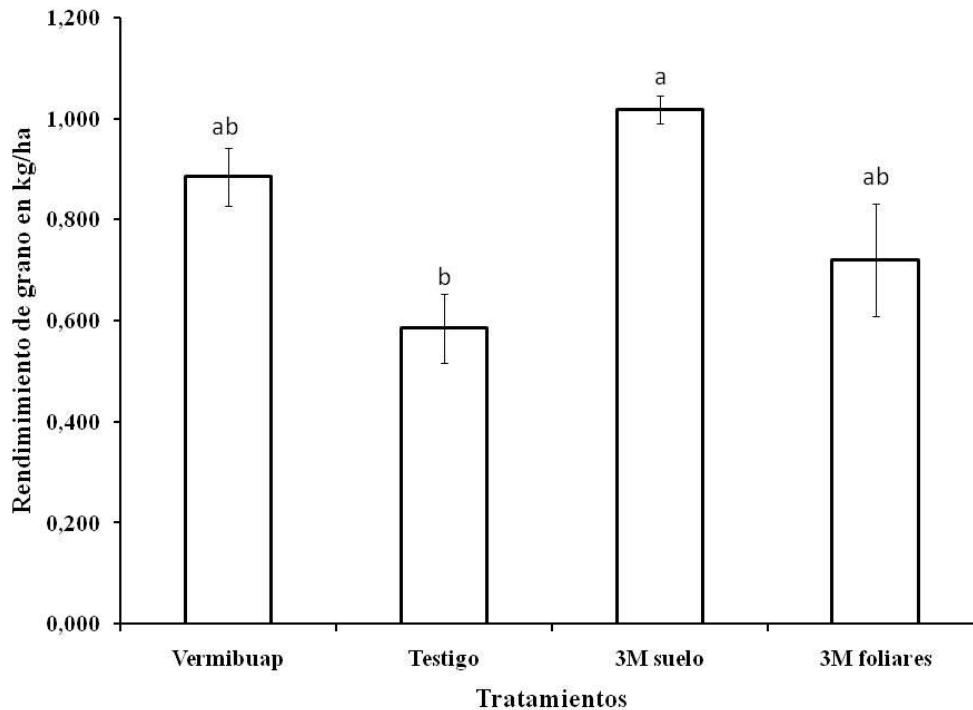


Figura 15. Rendimiento de grano de amaranto

La superioridad del rendimiento y la producción de biomasa del tratamiento T3 en comparación con el testigo podrían explicarse también por la sinergia entre los abonos orgánicos y los microorganismos benéficos aplicados. Esta explicación coincide con la conclusión de Biswas (2014), quien comprobó que el abonado con vermicomposta enriquecida con bacterias solubilizadoras de potasio y fósforo, así como fijadoras de nitrógeno, generaron un mayor crecimiento y peso en plantas de amaranto, en comparación con plantas abonadas sin bioinoculantes. Sin embargo, la comparación entre los resultados de los tratamientos T1 y T4 contradice este argumento, pues el T4 fue bioinoculado y el T1 no, lo que señala aún con mayor énfasis la importancia de la aplicación de minerales, y en particular, de los microelementos deficientes, como se hizo en el T3. Lo anterior, en cambio, podría explicarse más por efectos de calidad del abono (Pfeiffer, 1984; Diver, 2004; Oworu *et al.*, 2010; Lübke *et al.*, 2012), como puede observarse en los cromatogramas, y no tanto por las diferencias nutrimentales y la dosis de aplicación, pues la respuesta biológica fue superior en la vermicomposta a pesar de haberse aplicado una dosis inferior a 1/3 de la del abono Ecoterra, siendo éste superior tanto en contenidos de N, S, P y Zn, y superando la aplicación de B y Cu, mientras que el abonado con VermiBUAP sólo fue superior en Fe (señalando exclusivamente los nutrimentos en deficiencia).

3.4. Manejo regenerativo 3M en la calidad del suelo

Como puede observarse en las figuras 16, 17, 18 y 19, no hubo cambios significativos en las figuras de los cromatogramas con respecto al del diagnóstico y entre ellos. Todos muestran la ausencia de la zona central, uniformidad en los colores de la zona mineral, una zona proteica escasa, inactiva y uniforme, a excepción de la T1R3 que indica un aumento en la definición del borde de la zona proteica, quizás por contener la muestra una mayor concentración del abono orgánico VermiBUAP; del mismo modo, la zona externa en los tratamientos T2, T3 y T4 parece ausente, sugiriendo la escasez de actividad enzimática y formas estables de humus; pequeñas excepciones a este patrón se muestran en el croma de T1R3, y en pequeños puntos de T1R1 y T1R2, donde se nota una suave línea marrón en el extremo de la imagen (Figura 16), sugiriendo una presencia reducida de ácido húmico (Pfeiffer, 1984; Restrepo y Pinheiro, 2011),

seguramente por la causa explicada anteriormente. Los cromatogramas en todos los tratamientos son similares al cromatograma del diagnóstico en su apreciación general de calidad, pero diferentes en su zona proteica, sugiriendo que el grado de calidad del suelo no cambió por el manejo aplicado en los tratamientos del experimento realizado. Dicha diferencia entre los cromatogramas de los tratamientos con el del diagnóstico radica en una zona proteica más gruesa, intensa y oscura en los cromatogramas de todos los tratamientos, a diferencia de la delgada, sutil y clara del cromatograma del diagnóstico, sugiriendo que la calidad de los suelos en la parcela experimental era diferente en el suelo donde se hizo el diagnóstico; esta diferencia se debe a que al momento de hacer la toma de la muestra para el diagnóstico, no se había escogido la parcela donde se montaría el experimento.

Por la ausencia de diferencias entre los tratamientos puede deducirse que ningún tratamiento pudo revertir la compactación del suelo (ausencia de zona central), la escasez e inactividad de la materia orgánica (grosor estático, desarrollo radial ausente a débil, bordes lisos en zona proteica), la falta de diversidad mineral asimilable (zona interna monocromática sin desarrollo radial), ni la escasez de actividad microbiana (ausencia a extrema debilidad de desarrollo radial general y ausencia a débil presencia de zona enzimática). Esta ausencia de cambio manifiesta la gravedad del caso y el inmenso trabajo que requiere la rehabilitación de un suelo severamente degradado. También pone en evidencia que una aproximación cortoplacista es incapaz de devolver la salud a un suelo severamente degradado, por más bondades que los insumos usados contengan, dejando en claro que el manejo regenerativo debe estar bien diseñado estratégicamente y ser aplicado cuidadosa y disciplinadamente para lograr el objetivo de recuperar la salud del suelo tratado.

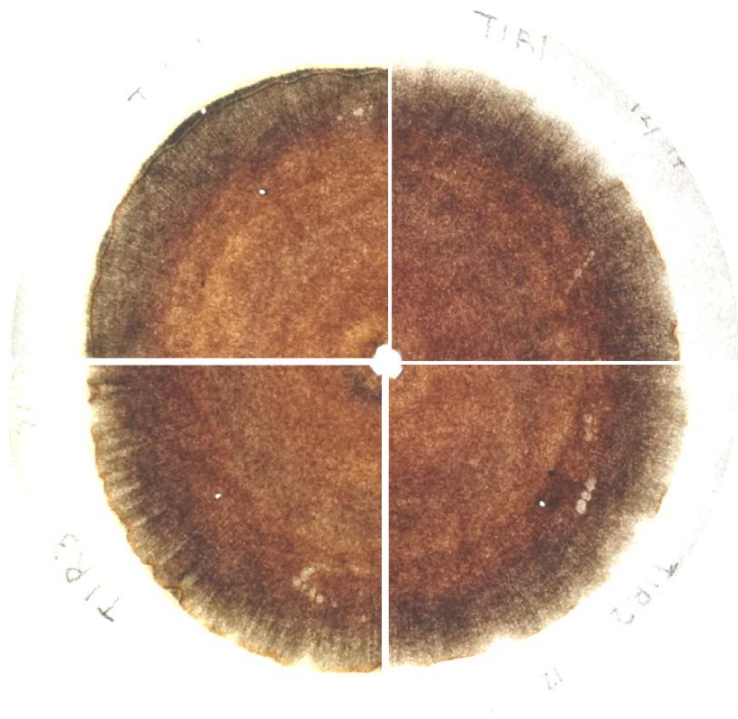


Figura 16. Mosaico de cromatogramas de suelos tratados con VermiBUAP.

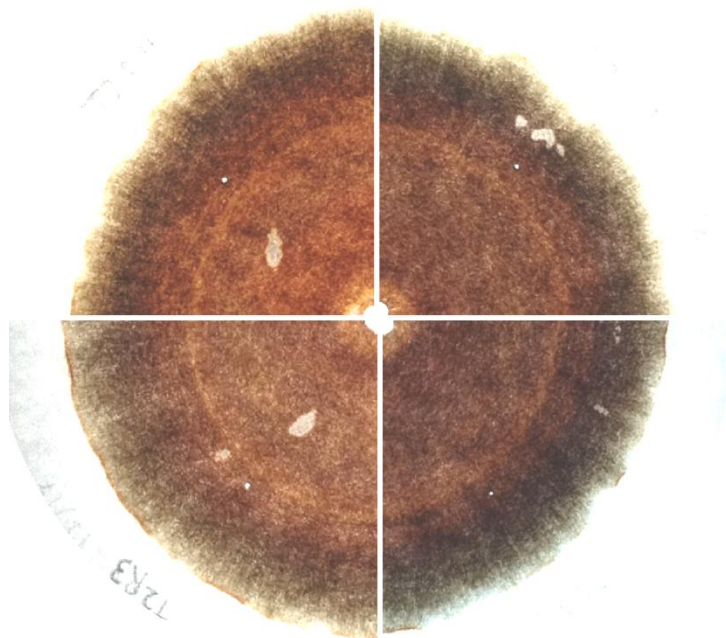


Figura 17. Mosaico de cromatogramas de suelos del tratamiento testigo.

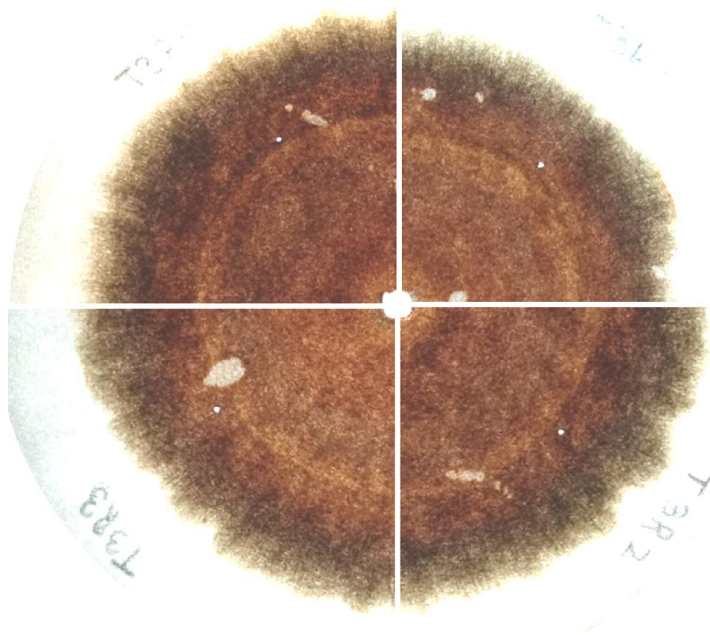


Figura 18. Mosaico de cromatogramas de suelos del tratamiento 3M-suelo.

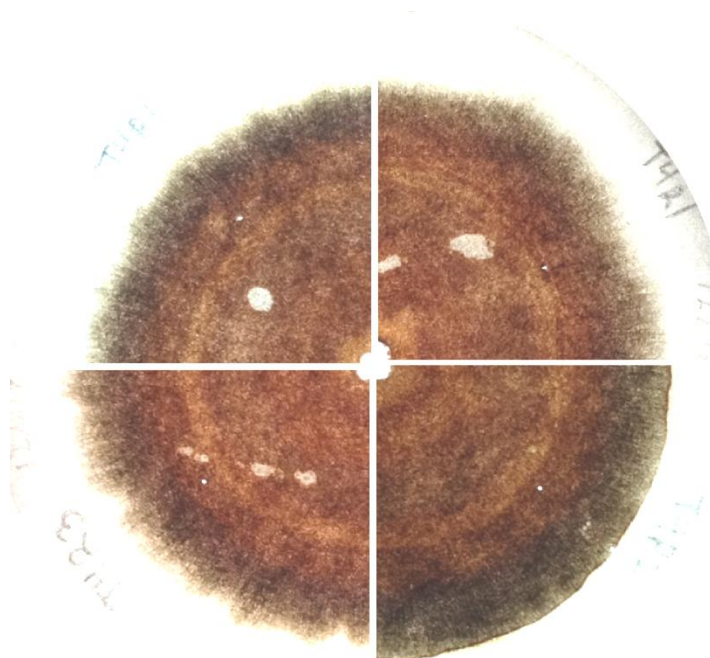


Figura 19. Mosaico de cromatogramas de suelos del tratamiento 3M-foliare.

3.5. Manejo regenerativo 3M en la densidad de microorganismos

Los microorganismos del suelo fueron los más rápidamente impactados por el manejo regenerativo 3M, como puede verse en la superioridad de la densidad de los organismos expresados en los medios de cultivo para solubilizadores de fósforo (NBRIP) y fijadores de nitrógeno (RC) en el tratamiento T3, y de forma similar en los tratamientos T3 y T4 para bacterias (LB), en comparación con los tratamientos T1 y T2 donde no se hicieron inoculaciones; aunque la diferencia fue menor, el tratamiento T3 fue superior también en la expresión de hongos y levaduras en PDA. Estos resultados coinciden con los de Castro-Barquero *et al.* (2015), quienes reportaron que inoculaciones con MM y MM con inoculantes de *Pseudomonas sp.*, *Azospirillum sp.* y *B. subtilis* incrementaron las poblaciones de hongos, bacterias y actinobacterias por encima del testigo e inoculaciones con una o dos especies. Igualmente, estos resultados coinciden con los de Vazquez *et al.* (2000), quienes encontraron aumentos en la población de hongos en suelos inoculados con *Trichoderma sp.* y *Glomus spp.*, así como aumentos en la población de bacterias donde se hicieron inoculaciones con *Azospirillum sp.* y *Pseudomonas sp.*

Por otro lado, coincidiendo con la opinión de Haynes (2008), el cambio en la comunidad microbiana del suelo pudo deberse a la mayor aplicación de los abonos orgánicos en T3 y T4 en comparación con el tratamiento T1 que recibió una menor dosis de abonado (1 ton/ha, 170 kg MO), sugiriendo un efecto de sinergia entre el abono (materiales orgánicos) e inoculantes. De manera particular, la diferencia entre los tratamientos T3 y T4 en PDA, NBRIP y RC, puede deberse a la re-inoculación dirigida a la rizósfera en el T3 con microorganismos nativos activados, *Bacillus megaterium* y la comunidad de bacterias diazotróficas contenidas en el producto Biomil. La superioridad en la producción de biomasa del T3 puede tener una correlación con el aumento en la densidad de estos grupos microbianos, como sugieren los resultados de Castro-Barquero *et al.* (2015) en cuanto al aumento de la biomasa.

La superioridad generalizada en la densidad microbiana producida por el tratamiento 3M al suelo (T3), por la relación entre las variables independientes, sugiere ser debido a la sinergia

entre el incremento en los niveles de los microelementos agregados al suelo y la bioaumentación dirigida a la base del tallo en la aplicación al mes del trasplante. Dicha sinergia es sugerida por la diferencia en la aplicación foliar menos concentrada de microelementos en el tratamiento 3M foliares (T4), el cual también recibió bioaumentación (como lo muestra su superioridad en la densidad en el cultivo LB) al momento del trasplante, junto con dosis elevadas de roca fosfórica y azufre, así como la misma dosis de roca basáltica y molibdato de sodio, pero no los microelementos Fe, Zn, Cu y B en este momento, lo que sugiere la sinergia entre las “3M”. El hecho de que el T4 también recibió una segunda reinoculación, no dirigida únicamente al suelo, sino dirigida a las hojas, y al suelo al final y de manera secundaria y, por ende, en menor concentración. Considerando esta similitud, es posible deducir que la diferencia entre estos 2 tratamientos radicó más en la aplicación de microelementos al momento del trasplante en el T3 que en la aplicación líquida posterior de microorganismos benéficos. Estos resultados sugieren que el tipo de minerales usados y el consecuente cambio en el balance mineral del suelo pueden alterar las comunidades microbianas en el suelo, coincidiendo con Carson *et al.* (2007).

Por otro lado, un resultado notable es que el tratamiento de lombricomposta (T1) no estimuló las poblaciones de hongos (PDA), solubilizadores de fósforo (NBRIP) ni fijadores de nitrógeno (RC) por encima del testigo (T2), y fue sólo similar a éste en la presencia de bacterias (LB). El efecto de reducción en la población de fijadores de nitrógeno es similar al encontrado por Fernandez *et al.* (2016), en que una aplicación de gallinaza peletizada inhibió la población de los simbiontes potenciales en el orden Rhizobiales y los integrantes de la familia Nitrosomonadaceae, lo que explican los autores como un efecto de la aplicación de nitrógeno soluble en el abono orgánico. En cambio, el aumento en la densidad de estos grupos microbianos en los tratamientos T3 y T4 puede estar directamente relacionado con la inoculación directa y la mayor aportación de alimento en la composta Ecoterra (810 kg MO/ha) en comparación con VermiBUAP (170 kg MO/ha).

Las relaciones bacteria:hongo (LB:PDA) sugieren que hay una mayor dominancia del primer phylum. Esto puede deberse a las condiciones de disturbio, escasez de alimento lignocelulósico, pH alto, exposición solar y largos periodos de sequía a las que ha sido sometido el suelo del

sitio por el manejo y el clima de la región, y en su conjunto, han reducido la cantidad y calidad de materiales orgánicos que permiten el crecimiento de la comunidad de hongos. Estos resultados coinciden con las observaciones de Pankhurst *et al.* (1996) en que los suelos en donde se depositan residuos ricos en lignina y celulosa permiten el crecimiento y establecimiento de la población de hongos, y aquellos en donde no hay suficiente material lignocelulósico, dominan las bacterias.

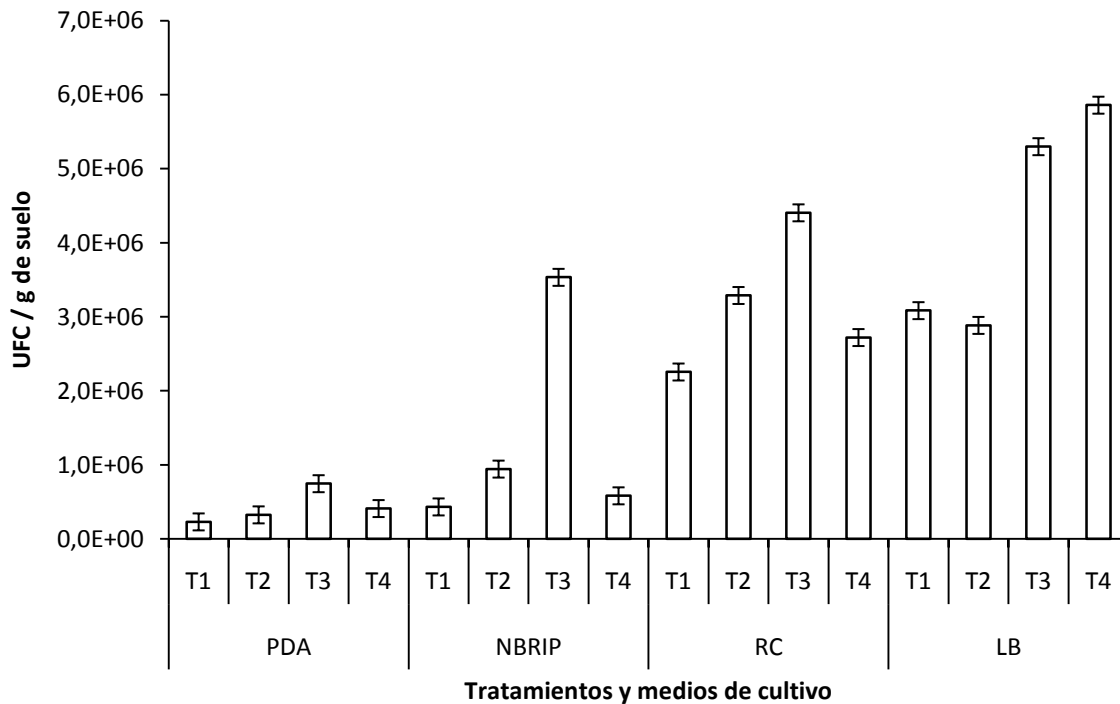


Figura 20. Densidad promedio de microorganismos activos en cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4) en UFC g⁻¹ de suelo en cuatro medios de cultivo: papa-agar-dextrosa (PDA) para hongos y levaduras, solubilizadores de P (SP), fijadores de nitrógeno en Rojo Congo (RC) y bacterias en caldo lysogénico (LB).

4. CONCLUSIONES

Considerando la información generada en la presente tesis, podemos concluir que:

1. El diagnóstico inicial del suelo permitió conocer sus condiciones de fertilidad y salud. La identificación de los nutrientes minerales en deficiencia y desbalance permitió tomar las decisiones clave para diseñar un manejo regenerativo 3M que resultó en el aumento de la producción del amaranto durante el experimento. Este aumento fue superior al testigo, al tratamiento tradicional, al tratamiento con lombricomposta, e incluso a uno que integraba los minerales, los microorganismos y los abonos orgánicos, pero no los microelementos deficientes desde el abonado previo a la siembra.
2. La aplicación del manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) influyó significativamente en la producción del cultivo de amaranto en la localidad de Santiago Tillo del municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México. Los resultados mostraron que el manejo regenerativo 3M-suelo representado en el T3, en que se aplicaban cantidades balanceadas de nutrientes minerales macro y micro, junto con microorganismos solubilizadores de fósforo y fijadores de nitrógeno, y abonos orgánicos al momento del trasplante, tuvo una producción significativamente superior tanto en biomasa como en grano en comparación con el resto de los tratamientos y rendimiento promedio en el sitio.
3. El manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) influyó en la densidad poblacional de microorganismos (hongos, solubilizadores de fósforo, fijadores de nitrógeno y bacterias). Fue el T3 significativamente superior al testigo y al tratamiento con lombricomposta en los 4 tipos de microorganismos cultivados. En comparación con el T4, que era también un tratamiento 3M pero sin la aplicación de microelementos al suelo, fue sólo inferior en el cultivo de bacterias, pero sí fue superior en hongos, solubilizadores de fósforo y fijadores de nitrógeno. Por lo tanto, se puede concluir que ambos tratamientos 3M estimularon la presencia de los 4 tipos de microorganismos estudiados.
4. El manejo regenerativo 3M (Minerales + Materia Orgánica + Microorganismos) no influyó significativamente en la calidad del suelo, pues no fue suficiente para recuperar la salud del suelo durante el periodo del cultivo de amaranto en la localidad de Santiago Tillo del municipio de Nochixtlán, Oaxaca, México, según las características

observables con el método de Cromatografía Circular de Pfeiffer. Esto no quiere decir que el manejo no haya mejorado el potencial productivo del suelo tratado, como demuestra el aumento en el rendimiento, sino solamente que los cambios no fueron observables por la técnica usada. Quizás una aplicación más extendida en el tiempo de esta clase de manejo, junto con otras prácticas que se enfoquen en acumular materia orgánica en el suelo capaz de sostener una comunidad microbiana abundante y diversa, sea necesaria para poder detectar las mejoras en la salud del suelo con la técnica de CCP.

Quizás la mayor aportación de este estudio puede resumirse en la siguiente aseveración: en un proceso de rehabilitación de suelos agrícolas degradados, un plan de manejo regenerativo que además de usar suficientes cantidades de abonos orgánicos de calidad y microorganismos benéficos diversos y específicos, realiza una remineralización balanceada y diversa que considera y atiende las deficiencias y desbalances nutrimentales presentes en el suelo, puede generar producciones superiores y más rentables desde el primer ciclo de cultivo. La integración de las 3M en el diseño de un manejo regenerativo puede estimular una repoblación más acelerada del suelo con microorganismos benéficos por la presencia de los materiales orgánicos de los abonos y los nutrientes minerales en sus respectivas enmiendas. La regeneración acelerada de la salud del suelo mediante el mejoramiento de su calidad hasta grados productivos aceptables no ha sido demostrada en este estudio, dejando muchas interrogantes y la necesidad de hacer más investigación sobre agricultura regenerativa y los sistemas necesarios para alcanzar sus objetivos. Sin embargo, sí se ha dado un paso en la comprensión de las interacciones entre los componentes del sistema suelo y sus efectos en la producción del amaranto, lo que resalta su importancia y la aplicabilidad del manejo regenerativo descrito, el cual debe probarse con otros cultivos en otros sistemas agrícolas para calibrarse y fortalecerse. Si “la nación que destruye su suelo se destruye a sí misma”, la que lo regenera se reconstruye.

5. RECOMENDACIONES

Por los buenos resultados del abono VermiBUAP representado en el T1, convendría poner a prueba una integración de éste con minerales (roca fosfórica, azufre, sulfatos, etc.) y microorganismos para evaluar su efecto sinérgico en el rendimiento y la producción de biomasa. De igual modo podrían aumentarse las dosis progresivamente para encontrar la curva de respuesta biológica de este abono y su combinación con otros materiales orgánicos (biochar, compostas, harinas de alfalfa o de restos animales, deshidratados de algas marinas, etc.), minerales (harinas de rocas, sales minerales y leonarditas) y microbianas (...).

Para comprobar la verdadera efectividad de los tratamientos descritos sería necesario extender la duración del experimento hasta haber cumplido con las cantidades definidas por los balances de minerales y materia orgánica, y monitorear los cambios en estos componentes y su expresión en los cromatogramas. También pueden agregarse tratamientos experimentales en los que se aplique en una sola ocasión las cantidades mencionadas en los resultados y su discusión de enmiendas orgánicas y minerales, así como una intensificación en la aplicación de enmiendas microbianas, principalmente de Microorganismos de Montaña. De lo último, en la forma de MM activados (1-5% MM, 2-5% melaza y fermentados por 2 a 7 días), las dosis al suelo pueden ser tan frecuentes como 1 vez por semana, y de hasta 100 l/ha del caldo microbiano. En aplicaciones líquidas foliares, las dosificaciones varían entre 10 y 30% de la mezcla, con frecuencias de hasta 1 vez por semana. De forma similar, se pueden aplicar bioles o biofertilizantes, a concentraciones entre 2 y 10% dependiendo del cultivo, con frecuencias entre 1 vez por semana y 1 vez cada 4 semanas.

Por último, los balances minerales pueden variar y pueden probarse los diferentes niveles como diferentes tratamientos. Es decir, si el nivel de un elemento clave como el potasio variase entre 2 concentraciones, los niveles de elementos que tengan relación con éste y con otros nutrientes pueden ser los que definan los tratamientos.

Este trabajo es sólo un paso más en el camino del desarrollo de la Agricultura Regenerativa.

6. LITERATURA CITADA

- Albrecht, W. 1958. *Soil fertility and animal health*. Fred Hahne Printing Company. University of Missouri. Estados Unidos. 175 p.
- Alori E.T., Dare M.O., Babalola O.O. 2017. *Microbial inoculants for soil quality and plant health*. In: Lichtfouse E. (eds) *Sustainable Agriculture Reviews*. Vol 22. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48006-0_9
- Altieri, M. 1999. *Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable*. Nordan-Comunidad. Paraguay. 325 p.
- Arshad, M.A. y Martin, S. 2002. *Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 88 (2002) 153-160.
- Astera, M. 2014. *The ideal soil: a handbook for the new agriculture*. Agricola y Soilminerals. Estados Unidos. 169 p.
- Bakker, J., y Bakker-Misset, A. 2010. *Chromatography: beelden van energie*. Mc-Ent management and publishing. Holanda. 96 p.
- Biswas, S. 2014. *Influence of microbial enriched vermicompost on the growth and nutrient content of Amaranthus cruentus L.* *Int. Journal of Scientific Research*. Vol. 3; Issue 9. No. 2277-8179.
- Bockheim, J. G., Gennadiyev, A. N., Hartemink, A.E., y Brevik, E. C. 2014. *Soil forming factors and soil taxonomy*. *Geoderma* (2014).
- Brevik, E.C., y Arnold, R.W. 2015. *Is the traditional pedologic definition of soil meaningful in the modern context?* *Soil Horizons* (2015). Soil Science Society of America.

- Brock, C., Hoyer, U., Leithold, G., y Hülsberger, K.J. 2008. *A new approach to humus balancing in organic farming*. 16th IFOAM Organic World Congress. Modena, Italia.
- Bruulsema, T. W., Heffer, P., Welch, R. M., Cakmak, I., y Moran, K. 2012. *Introduction/Executive Summary*. En: Bruulsema, T.W., Heffer, P., Welch, R.M., Cakmak, I. y Moran, K. 2012. *Fertilizing crops to improve human health: a scientific review*. IPNI & IFIA. Estados Unidos y Francia. Pp 1-9.
- Buckley, D.H. y Schmidt, T. M. 2003. *Diversity and dynamics of microbial communities in soils from agroecosystems*. Environmental Microbiology. 5(6), 441-452.
- Buringh, P. 1989. *Availability of agricultural land for crop and livestock production*. In D. Pimentel & C. W. Hall (Eds.), *Food and Natural Resources*. Academic Press. San Diego, CA, Estados Unidos. p. 69–83
- Campe, J. 2015. *Potential of remineralization as a global movement*. En: Goreau *et al.*, 2015. *Geotherapy: innovative methods for soil fertility restoration, carbon sequestration and reversing CO₂ increase*. CPC. Estados Unidos. 81 – 110 pp.
- Campos, A. 2010. *Analyzing the relation between Loss-on-Ignition and other methods of soil organic carbon determination in a tropical cloud forest (Mexico)*. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 41: 1454-1462. Taylor and Francis, LLC.
- Carter, B. año no especificado. *Ormus chemical production techniques*. Disponible en <http://www.subtleenergies.com/ormus/ormus/ormus2.htm>
- Carter, B. 2015. *Organic restoration minerals upgrade soil*. En: Goreau *et al.* *Geotherapy: innovative methods of soil fertility restoration, carbon sequestration and reversing CO₂ increase*. CPC. Estados Unidos. pp 503-521.

- Castro-Barquero, L., Murillo-Roos, M., Uribe-Lorío, L. y Mata-Chinchilla, R. 2015. *Inoculación al suelo con Pseudomonas fluorescens, Azospirillum oryzae, Bacillus subtilis y Microorganismos de Montaña (MM) y su efecto sobre un sistema de rotación soya-tomate bajo condiciones de invernadero*. Agronomía Costarricense 39 (3): 21-36.
- Cesarano, G., Zotti, M., Antignani, V., Marra, R., Scala, F., y Bonanomi, G. 2017. *Soil sickness and negative plant-soil feedback: a reappraisal of hypotheses*. Journal of Plant Pathology. 99 (3): 545-570. ETS Pisa. Italia. 26 p.
- Chaboussou, F. 2010. *Healthy crops: a new agricultural revolution*. Jon Carpenter for The Gaia Foundation. Inglaterra. 234 p.
- Collins, G. H. 1958. Fertilizantes comerciales, sus fuentes y uso. Salvat Editores. España. 710 pp.
- CONABIO. 2012. *Mapa de vegetación potencial*. De: Rzedowski, J. 1990. Vegetación potencial. Tomo II, sección IV, 8.2. Atlas Nacional de México (1990-1992). Instituto de Geografía, UNAM. México. Disponible en http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/otras/vpr4mgw; revisado el 13 de junio de 2018.
- CONAFOR y UACH. 2013. *Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe Final*. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Guadalajara, México. Disponible en <http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/fomento/documentos/degradacion-tierras-desertificacion2.pdf> el 12 de diciembre de 2016.
- Dalal, R.C. y Probert, M.E. 1997. *Soil nutrient depletion*. En: Clarke, A.L. y Wylie, P.B. *Sustainable crop production in the subtropics: an Australian perspective*. Brisbane: Queensland Department of Primary Industries. Pp. 42-63.

- DAFF. 2010. *Amaranthus production guidelines*. Department of Agriculture, Forestry and Fisheries. República de Sudáfrica. 24 p. Disponible en <http://www.nda.agric.za/docs/Brochures/Amaranthus.pdf>.
- Datnoff, L.E., Elmer, W. H., y Huber, D. M. 2007. *Mineral nutrition and plant disease*. American Phytopathological Society. Estados Unidos. 278 p.
- Degrune, F., Dufrêne, M., Colinet, G., Massart, S., Taminiou, B., Bodson, B., Hiel, M., Daube, G., Nezer, C., Vandenbol, M. 2015. *A novel sub-phylum method discriminates better the impact of crop management on soil microbial community*. *Agron. Sustain. Dev.* 35:1157–1166
- Diver, S. 2004. *Controlled microbial composting and humus management: Lübke compost*. Fayetteville, Estados Unidos. Consultado en <http://www.ibiblio.org/steved/Luebke/Luebke-compost2.html> el 8 de diciembre de 2016.
- Dudal, R. 2004. *The sixth factor of soil formation*. Institute for Land and Water Management. Leuven, Bélgica. International Conference on Soil Classification 2004. Petrozavodsk, Rusia.
- Dwivedi, R.S., Randhawa, N.S. y Bansal, R.L. 1975. *Phosphorus-zinc interaction I sites of immobilization of zinc in maize at a high level of phosphorus*. *Plant and Soil*. 43: 639-648.
- Edwards, C. A. 2001. *Agricultural systems: ecology*. Encyclopedia of life sciences. John Wiley and Sons, Ltd. 6 p.
- Eker, S., Ozturk, L, Yazici, A., Erenoglu, B., Roemheld, V., and Cakmak, I. 2006. *Foliar-applied glyphosate substantially reduced uptake and transport of iron and manganese in sunflower (Helianthus annuus L.) plants*. *J. Agric. Food Chem.* 54:10019-10025.

- Fageria, N.K., Baligar, V.C. y Jones, C.A. 1997. *Growth and mineral nutrition of field crops*. (2da edición). Marcel Dekker. Nueva York, EU. 624 pp.
- FAO. 2014. *Desertification, land degradation and drought: some global facts and figures*. UNCCD. Bonn, Alemania. Consultado en <http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/WDCD/DLDD%20Facts.pdf> el 12 de diciembre de 2012.
- FAO. 2015a. *Status of the world's soil resources: main report*. FAO, ITPS y GSP. Roma, Italia. 648 p. Consultado en <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf> el 12 de diciembre de 2016.
- FAO. 2015b. *Status of the world's soil resources: technical summary*. FAO, ITPS y GSP. Roma, Italia. 8p. Consultado en <http://www.fao.org/3/a-i5126e.pdf> el 12 de diciembre de 2016.
- FAO. 2016. *Land degradation neutrality: the target setting program*. UNCCD. Bonn, Alemania. Consultado en http://www2.unccd.int/sites/default/files/documents/20042016_LDN%20TS_ENG_0.pdf el 12 de diciembre de 2016.
- Fernandez, A. L., Sheaffer, C. C., Wyse, D. L., Staley, C., Gould, T. J., y Sadowsky, M. J. 2016. *Structure of bacterial communities in soil following cover crops and organic fertilizer incorporation*. Appl Microbiol Biotechnol. Springer. DOI 10.1007/s00253-016-7736-9
- Fernandez, M.R., Zentner, R.P., Basnyat, P., Gehl, D., Selles, F., and Huber, D.M. 2009. *Glyphosate associations with cereal diseases caused by Fusarium spp. in the Canadian Prairies*. European J. Agron. 31:133-143.
- Florence, R., y Mengel, D. 2013. *Evaluation of Walkley-Black, Loss-on-Ignition, and Dry Combustion for estimating Soil Organic Matter in Kansas*.

- Gispert, M., Emran, M., Pardini, G., Doni, S., y Ceccanti, B. 2013. *The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content, and aggregate stability*. *Geoderma* 202–203 (2013) 51–61
- Gliessman, S. R. 2002. *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. LITOCAT. Turrialba, Costa Rica. 379 p.
- Goreau, T.J., Larson, R.W., y Campe, J. 2015. *Geotherapy: innovative methods of soil fertility restoration, carbon sequestration, and reversing CO₂ increase*. CPC. Estados Unidos. 590 p.
- Graham, M.W. 2010. *Grain amaranth production and effects of soil amendments in Uganda*. Graduate Theses and Dissertations. Iowa State University. Estados Unidos. 196 p.
- Gupta, U.C. y Gupta, S.C. 2014. *Sources and deficiency diseases of mineral nutrients in human health and nutrition: a review*. *Pedosphere*. 24(1): 13-38. Elsevier. China. 26 p.
- Haynes, R. J. 2008. *Soil organic matter quality and the size and activity of the microbial biomass: their significance to the quality of agricultural soils*. En: Huang, Q., Huang, P.M., y Violante, A. (Eds). 2008. *Soil mineral-microbe-organic interactions: Theories and applications*. Springer. Alemania. 353 p.
- Heinberg, R. 2010. *Beyond the limits to growth*. En: Heinberg, R. y Lerch, D. *The Post Carbon reader: managing the 21st century's sustainability crises*. Post Carbon Institute. Healdsburg, CA. Estados Unidos.
- Hensel, J. 1983. *Panes de piedra*. En: Restrepo, J. 2014. *Manual práctico ABC de la agricultura orgánica, fosfitos y panes de piedra*. Juquira Candirú Satyagraha. Cali, Colombia. 303 - 371 pp.

- Horwath, 2007. *Carbon cycling and formation of soil organic matter*. En: Paul, E. A. 2007. *Soil Microbiology, GeoEcology and Biochemistry*. 3era edición. Elsevier. Estados Unidos y Reino Unido. 514 p.
- Hoskins, B. 2002. *Organic matter by Loss-on-Ignition*. University of Maine. Disponible en: <https://www.naptprogram.org/files/napt/publications/method-papers/2002-organic-matter-by-loss-on-ignition.pdf>
- Huang, L., Song, L., Xia, X., Mao, W., Z., Y. y Yu, J. 2013. *Plant-soil feedbacks and soil sickness: from mechanisms to application in agriculture*. J Chem Ecol (2013) 39: 232-242. Springer Science. China. 11 p.
- Huber, D. M., y Haneklaus, S. 2007. *Managing nutrition to control plant disease*. Landbauforschung Völkenrode. 4 (57): 313-322.
- Hussain, S., Siddique, T., Saleem, M., Arshad, M., y Khalid, A. 2009. *Impact of pesticides on soil microbial diversity, enzymes, and biochemical reactions*. Advances in Agronomy. Vol.102: 159 – 200.
- INEGI. 2005. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Asunción Nochixtlán*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. Disponible en: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/20/20006.pdf
- Islam, M.S., Hasan, M., Rahman, M.M, Uddin, M.N. y Kabir, M.H. 2016. *Comparison between vermicompost and conventional aerobic compost produced from municipal organic solid waste used in Amaranthus viridis production*. J. Environ. Sci. & Natural Resources. 9(2):43-49.

- Janssen, B.H. y Willigen, P. 2006a. *Ideal and saturated soil fertility as bench marks in nutrient management I. Outline of the framework*. Agriculture, Ecosystems and Environment. 116: 132-146.
- Janssen, B.H. y Willigen, P. 2006b. *Ideal and saturated soil fertility as bench marks in nutrient management II. Interpretation of chemical soil tests in relation to ideal and saturated soil fertility*. Agriculture, Ecosystems and Environment. 116: 147-155.
- Johal, G.R. y Huber, D.M. 2009. *Glyphosate effects on diseases of plants*. European J. Agron. 31:144-152.
- Katayama, A., Bhula, R., Burns, G.R., Carazo, E., Felsot, A., Hamilton, D., Harris, C., Kim, Y., Kleter, G., Koedel, W., Linders, J., Peijnenburg, J.G.M. W., Sabljic, A., Stephenson, R.G., Racke, D.K., Tanaka, K., Unsworth, J., y Wauchope, R.D. 2009. *Bioavailability of xenobiotics in the soil environment*. En: Whitacre, D.M. 2010. *Reviews of environmental contamination and toxicology*. Vol 203. Springer. Estados Unidos. 163 p.
- Kennedy, A.C., y Smith, K.L. 1995. *Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils*. Plant and Soil 170: 75 – 86.
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., y Swift, M. J. 2008. *Soil health in agricultural systems*. *Phil. Trans. R. Soc. B (2008) 363, 685–701*
- Kladivko, E.J. 2001. *Tillage systems and soil ecology*. Soil and Tillage Research. Vol 61. 61-76. Elsevier Science.
- Kögel-Knabner, I., Guggenberger, G., Kleber, M., Kandeler, E., Kalbitz, K., Scheu, S., Eusterhues, K., y Leinweber, P. 2008. *Organo-mineral associations in temperate soils: integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry*. J. Plant Nutr. Soil Sci. 2008, 171, 61–82.

- Kokornaczyk, M. O., Primavera, F., Luneia, R., Baumgartner, S., y Betti, L. 2017. *Analysis of soils by means of Pfeiffer's circular chromatography test and comparison to chemical analysis results*. Biological Agriculture and Horticulture, 33:3, 143-157, DOI: [10.1080/01448765.2016.1214889](https://doi.org/10.1080/01448765.2016.1214889)
- Kononova, M.M. 1982. *Materia orgánica del suelo*. Oikos-tau, s. a. España. 365 p.
- Kopittke, P.M. y Menzies, N.W. 2007. *A review of the use of basic cation saturation ratio and the "ideal" soil*. Soil Science Society of America Journal. 71(2): 259-265.
- Kumar, D. S., Kumar P. S., Rajendran, N.M., Kumar, V. U., y Anbuganapathi, G. 2014. *Evaluation of vermicompost maturity using scanning electron microscopy and paper chromatography analysis*. J. Agric. & Food Chem. 2014. 62, 2738-2741.
- Laird, R. M. 1984. *A chromatographic approach to the diagnosis of the humus quality and some implications for forest management*. Tesis de maestría. University of British Columbia. Canadá. 111 p.
- Lal, R. 2004. *Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security*. Science 304 (5677), 1623-1627. Consultado el 14 de noviembre de 2016 en <http://science.sciencemag.org/content/304/5677/1623>.
- Lal, R. 2015. *Restoring soil quality to mitigate soil degradation*. Sustainability. 7, 5875-5895. Consultado el 14 de noviembre de 2016 en <http://www.mdpi.com/2071-1050/7/5/5875/htm>.
- Lal, R. 2020. *Regenerative agriculture for food and climate*. Journal of soil and water conservation. Vol. 75. No. 5. 123A-124A.
- Lal, R. y Stewart, B.A. 1992. *Soil restoration*. Advances in Soil Science. Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-1-4612-2820-2

- Larkin, R.P. 2015. *Soil health paradigms and implications for disease management*. Annu. Rev. Phytopathol. 2015. 53:199–221
- Latham, J. R. 2020. *The myth of a food crisis*. Rethinking food and agriculture. Elsevier. 20 p.
- Le Houérou, H. N. 2002. *Man-made deserts: desertization processes and threats*. Arid Land Research and Management. 16:1 – 36, 2002.
- Lehman, R.M., Cambardella, C., Stott, D.E., Acosta-Martinez, V., Manter, D.K., Buyer, J. S., Maul, J.D., Smith, J.L., Collins, H.P., Halvorson, J.J., Kremer, R.J., Lundgren, J.G., Ducey, T.F., Jin, V.L., y Karlen, D.L. 2015. *Understanding and enhancing soil biological health: the solution for reversing soil degradation*. Sustainability, 7, 988-1027.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., y Field, C.B. 2009. *Crop yield gaps: their importance, magnitudes and causes*. Annual Review of Environment and Resources. 34:179-204.
- López-Barrera, F., y Guevara, S. 2012. *La restauración del paisaje y sus ecosistemas*. En: Fragoso, C., y Rojas, P. (Eds.). *Monitoreo ecológico de una cantera rehabilitada por cementos Holcim Apasco en Veracruz*. INECOL y Holcim Apasco. México. pp 25- 44.
- Lübke, U., Lübke, S., Lübke-Hildebrandt, A. y Hildebrandt, U. 2012. *Seminario humus-management y compostaje para agricultura y comunas*.
- Manjula, N., Scharf, P., Sun, Y., y Dunn, D. 2005. *Evaluating Mehlich III extractant for extracting available nutrients for Missouri soils using inductively coupled plasma spectrometry*. University of Missouri. Estados Unidos.
- Manlay, R. J., Feller, C., y Swift, M. J. 2007. *Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with fertility and sustainability of cropping systems*. Agriculture, Ecosystems and Environment 119 (2007) 217–233

- Manning, D.A.C. y Theodoro, S.H. 2018. *Enabling food security through use of local rocks and minerals*. The Extractive Industries and Society. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.002>
- McGill, W. B. 2007. *The physiology and biochemistry of soil organisms*. En: Paul, E. A. 2007. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. 3era edición. Elsevier. Estados Unidos y Reino Unido. 231-256 p.
- McKinley, V. L. 2019. *Effects of land use and restoration on soil microbial communities*. En: Hurst, C. J. *Understanding terrestrial microbial communities*. Advances in Environmental Microbiology. Springer Nature Switzerland.
- Mehlich, A. 1984. *Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant*. Communications in Soil Science and Plant Analysis. Vol. 15. Iss. 12. 1409 - 1416
- Mengel, K. y Kirkby, E.A. 2000. *Principios de nutrición vegetal*. 4ta Edición y 1era en español. Instituto Internacional de la Potasa Basilea/Suiza. Argentina. 596 p.
- Moeskops, B., Buchan, D., Van Beneden, S., Fievez, V., Sleutel, S., Gasper, M.S., D'Hose, T., y De Neve, S. 2012. *The impact of exogenous organic matter on SOM contents and microbial quality*. Pedobiologia 55(3):175–184.
- Morocho, M.T. y Leiva-Mora, M. 2019. *Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas*. Centro Agrícola 46(2): 93-103.
- Mulvaney, R. L., Khan, S.A., y Ellsworth, T.R. 2009. *Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: a global dilemma for sustainable cereal production*. J. Environ. Qual. 38:2295-2314

- Muñoz-Rojas, M. 2018. *Soil quality indicators: a critical tool in ecosystem restoration*. Current Opinion in Environmental Science and Health. DOI: 10.1016/j.coesh.2018.04.007
- Mylavarapu, R., Obreza, T., Morgan, K., Hochmuth, G., Nair, V., y Wright, A. 2014. *Extraction of soil nutrients using Mehlich-3 reagent for acid-mineral soils of Florida*. IFAS Extension. University of Florida.
- Nautiyal, C.S. 1999. *An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms*. FEMS Microbiology Letters 170 (1999) 265-270.
- Nielsen, F.H. 2000. *Evolutionary events culminating in specific minerals becoming essential for life*. European Journal of Nutrition. 39: 62-66.
- Normandin, V., Kotuby-Amacher, J., and Miller, R.O. 1998. *Modification of the ammonium acetate extractant for the determination of exchangeable cations in calcareous soils*. Communications In Soil Science And Plant Analysis Vol. 29 , Iss. 11-14, 1998.
- O'Brien, G.K., y Price, M. L. 1983. *Amaranth grain and vegetable types*. ECHO Technical Note. Florida, Estados Unidos. 15 p. Disponible en https://c.ymcdn.com/sites/echocommunity.site-ym.com/resource/collection/E66CDFDB-0A0D-4DDE-8AB1-74D9D8C3EDD4/Amaranth_Grain_&_Vegetable_Types_%5BOffice_Format%5D.pdf
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., Sombroek, W.G., 1991. *World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation*. UNEP/ISRIC GLASOD Project, Nairobi/Wageningen.
- ONU. 2013. *Wake up before it is too late: make agriculture truly sustainable now for food security in a changing climate*. United Nations Publication. Suiza. Disponible en http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/ditcted2012d3_en.pdf.

- Orellana, J.A. y Pilatti, M.A. 1999. *The ideal soil: I. An edaphic paradigm for sustainable agriculture*. Journal of Sustainable Agriculture. 15(1): 47-59.
- Oworu, O.O., Dada, O.A. y Majekodunmi, O.E. 2010. *Influence of compost on growth, nutrient uptake and dry matter partitioning of grain amaranths (Amaranthus hypochondriacus)*. Libyan Agriculture Research Center Journal International (6): 375-383.
- Pankhurst, C.E., Hawke, B.G., McDonal, H.J., Kirkby, C.A., Buckerfield, J.C., Michelsen, P., O'Brien, K.A., Gupta, V.V.S.R., y Doube, B.M. 1995. *Evaluation of biological properties as potential bioindicators of soil health*. Australian Journal of Experimental Agriculture. 35, 1015-28.
- Peters, J.B., Combs, S., Hoskins, B., Jarmen, J., Kovar, J, Watson, M., y Wolf, N. 2003. *Recommended methods of manure analysis*. Univ. de Wisconsin Extension Pub. 43769. University of Wisconsin Ext., Madison.
- Pimentel, D. y Pimentel, M. 2003. *World population, food, natural resources, and survival*. World Futures: The Journal of Paradigm Research. 59:3-4. P. 145-167.
- Pfeiffer, E. E. 1984. *Chromatography applied to quality testing*. Bio-Dynamic Literature. Wyoming, Estados Unidos. 972 p. (Kindle).
- Pilatti, M.A. y Orellana, J.A. 2000. *The ideal soil: II. Critical values of an "ideal soil" for Mollisols in the north of the pampean region (in Argentina)*. Journal of Sustainable Agriculture. 17(1): 89-112.
- Pilatti, M.A., Orellana, J.A. y Felli, O.M. 2003. *The ideal soil: III. Fitness of edaphic variables to achieve sustenance in agroecosystems*. Journal of Sustainable Agriculture. 22(2): 109-132.

- Plante, A. F. 2007. *Soil biogeochemical cycling of inorganic nutrients and metals*. En: Paul, E. A. 2007. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. 3era edición. Elsevier. Estados Unidos y Reino Unido. 389-429 p.
- Prasad, R. y Goswami, N. N. 1992. *Soil fertility restoration and management for sustainable agriculture in South Asia*. En: Lal, R. y Stewart, B.A. *Soil restoration*. Advances in Soil Science. Vol. 17. Springer Verlag. Nueva York, EU. Pp 37 – 78.
- Primavesi, A. 1984. *Manejo ecológico del suelo*. 5ta edición. Editorial El Ateneo. Buenos Aires, Lima, Río de Janeiro, Caracas, México, Barcelona, Madrid, Bogotá. 495 p.
- Primavesi, A. 2003. *Los bioindicadores del suelo, una herramienta de análisis en agricultura orgánica*. Fundación Universitaria Juan de Castellanos. Tunja, Colombia. 56 p.
- Primavesi, A. 2009. *El suelo tropical*. Movimiento de Trabajadores Rurales sin Tierra, Vía Campesina e Instituto Universitario Latinoamericano de Agroecología Paulo Freire. Venezuela y Brasil. 143 p.
- Putnam, D. H., Oplinger, E. S., Doll, J. D., y Schulte, E. M. 1989. *Amaranth*. Universidad de Wisconsin. Estados Unidos. Consultado en <http://corn.agronomy.wisc.edu/Crops/Amaranth.aspx> el 9 de diciembre de 2016.
- Redling, K. 2006. *Rare earth elements in agriculture with emphasis on animal husbandry*. Tesis doctoral. Universidad Ludwig-Maximilians de München. Alemania. 326 p.
- Renildes, L. F. y Coelho, H.A. 2005. *Molybdenum determination in Mehlich-1 and Mehlich-3 soil test extracts and molybdenum adsorption in Brazilian soils*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 36:17-18, 2367-2381.
- Restrepo, J. 2014. *Manual práctico ABC de la agricultura orgánica, fosfitos y panes de piedra*. Juquira Candirú Satyagraha. Cali, Colombia. 396 p.

- Restrepo, J., y Agredo, D. 2020. *Mierda a la carta: un nuevo ABC de la agricultura orgánica*. Jquirira Candirú Satyagraha. Cali, Colombia. 490 p.
- Restrepo, J. y Pinheiro, S. 2009. *Agricultura orgánica, harina de rocas y la salud del suelo al alcance de todos*. Jquirira Candirú Satyagraha. Cali, Colombia. 204 p.
- Restrepo, J. y Pinheiro, S. 2011. *Cromatografía: imágenes de vida y destrucción de suelo*. Jquirira Candirú Satyagraha. Cali, Colombia. 252 p.
- Reyes-Muro, L., Camacho-Villa, T. C., y Guevara-Hernández, F. (Cords.) 2013. *Rastrojos: manejo, uso y mercado en el centro y sur de México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico no. 7. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. 242 p.
- Rhodes, C. 2017. *The imperative for regenerative agriculture*. Science progress. 100(1), 80-129.
- Rietra, R.P.J.J., Heinen, M., Dimkpa, C.O., y Bindraban, P.S. 2017. *Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency*. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 48(16):1895-1920.
- Roberts, T. L., y Tasistro, A. S. 2012. *The role of plant nutrition in supporting food security*. En: Bruulsema, T.W., Heffer, P., Welch, R.M., Cakmak, I. y Moran, K. 2012. *Fertilizing crops to improve human health: a scientific review*. IPNI & IFIA. Estados Unidos y Francia. Pp 11-28.
- Romero-Romano, C.O., Ocampo, J., Sandoval, E., Navarro, H., Franco, O. y Calderón, F. 2017. *Fertilización orgánica mineral del cultivo del amaranto*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 8(8):1759-1771.

- Ruiz-Corral, J.A., G. Medina G., I. J. González A., H.E. Flores L., G. Ramírez O., C. Ortiz T., K.F. Byerly M. y R.A. Martínez P. 2013. *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Segunda Edición. INIFAP: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 564 p.
- Sait, G. 2003. *Nutrition rules!* Nutrition Matters. Soil Therapy Pty Ltd. Australia. Disponible en: www.nutri-tech.com.au
- Sait, G. 2015. *Six secrets to soil test success*. Nutrition Matters. Disponible en <https://blog.nutri-tech.com.au/six-secrets-to-soil-test-success-1/> y páginas siguientes.
- Salas, E. 2013. *Los microorganismos benéficos en la producción agrícola: detección y función*. LAMA, S.A. Presentación en San Isidro del General, Costa Rica.
- Savory, A. 2005. *Manejo holístico: un nuevo marco metodológico para la toma de decisiones*. SEMARNAT, INECOL, FMCN, FFMHRAC. México. 623 p.
- Savory, A. y Duncan, T. 2016. *Regenerating agriculture to sustain civilization*. En: Chabay, I., Frick, M., y Helgeson, J. (eds). 2016. *Land restoration: reclaiming landscapes for a sustainable future*. Academic Press. Elsevier. Pp 289 - 309.
- Schimel, J. *Soil microbiology, ecology and biochemistry for the 21st century*. En: Paul, E. A. 2007. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. 3era edición. Elsevier. Estados Unidos y Reino Unido. Pp 503-512.
- SEMARNAT. 2012. *Informe de la situación del medio ambiente en México. Capítulo 3: Suelos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 36 p. Disponible en http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf

- Serle, P. 2013. *Regenerative agriculture: a soil health focus*. Nuffield Australia – Sydney Myer Fund. Australia. 37 p.
- Shepard, M. 2013. *Restoration agriculture: real-world permaculture for farmers*. Acres USA. Austin, Texas, Estados Unidos. 330 p.
- Sherwood, S. y Uphoff, N. 2000. *Soil health: research, practice and policy for a more regenerative agriculture*. Applied Soil Ecology. 15 (2000) 85-97.
- Shulte, E.E., y Hopkins, B.G. 1996. *Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition*. En: *Soil organic matter: analysis and interpretation*. Soil Science Society of America. Special Publication no. 46. Estados Unidos. 21-31 p.
- SHI. 2018. *North American project to evaluate soil health measurements*. Soil Health Institute. Estados Unidos. Disponible en: <https://soilhealthinstitute.org/north-american-project-to-evaluate-soil-health-measurements/>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2016. *Atlas agroalimentario 2016*. 1era edición. SAGARPA-SIAP. México. 236 p.
- Simón-Zamora, J.I. 2016. *Manual de microbiótica en la remineralización de suelos en manos campesinas*. Gaia Orgánicos. Rápido-Print. Guadalajara, Jalisco, México. 102 p.
- Smith, J.L. y Collins, H.P. 2007. *Management of soil organisms and their processes in soils*. En: Paul, E. A. 2007. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. 3era edición. Elsevier. Estados Unidos y Reino Unido. 471-500 pp.
- SMN. 2010. *Normales climatológicas de la estación Asunción Nochixtlán, Oaxaca*. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=oax>.

- Sojka, R.E., Upchurch, D. R., y Borlaug, N.E. 2003. *Quality soil management or soil quality management: performance versus semantics*. Advances in Agronomy. Vol. 79. 68 p.
- Sosa-González, J. L. S. 2013. *El capital social grupal en la agregación de valor: caso productores de amaranto de los municipios de Cohuecan, Puebla, y Temoac, Morelos*. (Tesis de doctorado). Colegio de Postgraduados Campus Puebla. México. 219 p.
- Sparks. 1996. (Ed). *Methods of soil analysis. Part 3: Chemical methods*. Soil Science Society of America y American Society of Agronomy. Estados Unidos.
- Stevenson, F.J. y Cole, M.A. 1999a. *Soil organic matter quality and characterization*. En: Stevenson, F.J. y Cole, M.A. 1999. *Cycles of soil, Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. John Willey & Sons, Inc. USA. 427 p.
- Stevenson, F.J. y Cole, M.A. 1999b. *Micronutrients and toxic metals*. En: Stevenson, F.J. y Cole, M.A. 1999. *Cycles of soil, Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. John Willey & Sons, Inc. USA. 427 p.
- Storer, D.A. 1984. *A simple high sample volume ashing procedure for determination of soil organic matter*. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 15(7), 759–772.
- Strain, J.J., Yeates, A.J. y Cashman, K.D. 2019. *Minerals and trace elements*. (Ch.11.). En: Lanham-New, S.A., Hill, T.H., Gallager, A.M. y Vorster, H.H. 2019. *Introduction to human nutrition*. John Wiley & Sons. Pp. 280-337.
- Tan, Z.X., Lal, R., y Wiebe, K.D. 2005. *Global soil nutrient depletion and yield reduction*. Journal of Sustainable Agriculture. Vol. 26 (1). Haworth Press. Estados Unidos. 24 p.
- Tesfahunegn, G.B. 2014. *Soil quality assessment strategies for evaluating soil degradation in northern Ethiopia*. Applied and Environmental Soil Science. Vol. 2014. ID 646502. 14 p.

- Theodoro, S.H., Leonardo, O.H., and Almeida, E. de. (2010). *Mecanismos para disponibilização de nutrientes minerais a partir de processos biológicos*. Brasília: Embrapa, pp. 173–181.
- Thomas, D. 2000. A study on the mineral depletion of the foods available to us as a nation over the period 1940 to 1991. Ministry of Agriculture, Fisheries and Foods and the Royal Society of Chemistry. Inglaterra. Disponible en http://www.mineralresourcesint.co.uk/pdf/mineral_deplet.pdf
- Thorvaldsson, G., y Jónsdóttir, R. 2005. *Essential trace elements for plants, animals and humans*. Nordic Association of Agricultural Scientists. Seminar no. 3170. Reykjavík, Islandia. 92 p.
- Tsiafouli, M., Thébault, E., Sgardelis, S., de Ruiter, P., van der Putten, W.H., Birkhofer, K., Hemerik, L., de Vries, F.T., Bardgett, R., Brady, M., Bjørnlund, L., Jørgensen, H., Christensen, S., D’Hertefeldt, T., Hotes, S., Hol, W.H.G., Frouz, J., Liiri, M., Mortimer, S., Setälä, H., Tzanopoulos, J., Uteseny, K., Karoline, Pižl, V., Stary, J., Wolters, V. y Hedlund K. 2015. *Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe*. *Global Change Biology*. 21: 973-985.
- Turner, G. 2014. *Is global collapse imminent?* MSSI Research Paper No. 4. Melbourne Sustainable Society Institute. University of Melbourne.
- Twyman, E.S. 1946. *The iron-manganese balance and its effect on the growth and development of plants*. *The New Phytologist*. Department of Botany. University of Birmingham.
- Umaña, S., Rodríguez, K. y Rojas, C. 2017. *¿Funcionan realmente los microorganismos de montaña (MM) como estrategia de biofertilización? Un enfoque de ingeniería de sistemas*. *Revista de Ciencias Ambientales*. 51(2):133-144.

- USEPA. 1986. *Test methods for evaluating solid wastes: physical/chemical methods*. Vol. 1, partes 1 y 2. 3era edición. United States Environmental Protection Agency – Office of Solid Waste and Emergency Response.
- Van Straaten, P. 2002. *Rocks for crops: agrominerals of sub-saharan Africa*. ICRAF. Nairobi, Kenia. 338 p.
- Van Straaten, P. 2006. *Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities*. Anais da Academia Brasileira de Ciências (2006) 78 (4): 731 – 747.
- Vatansever, R., Ozigit, I.I., y Filiz, E. 2016. *Essential and beneficial trace elements in plants, and their transport in roots: a review*. Appl. Biochem. Biotechnol. Springer. 19 p.
- Vazquez, M.M., César, S., Azcón, R., y Barea, J.M. 2000. *Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and other microbial inoculants (Azospirillum, Pseudomonas, Trichoderma) and their effects on microbial population and enzyme activities in the rhizosphere of maize plants*. Applied Soil Ecology. 15(2000) 261-272.
- Voitl, H., y Guggenberger, E. 1986. *Der Chroma-Boden-Test: die Bodenqualitaet bestimmen, bewerten und verbessern: ein unentbehrlicher Ratgeber fuer Landwirte, Berufs- und Hobbygaertner*. Orac-Verlag. Wien. Alemania. 181 p.
- Voroney, R. P. 2007. *The soil habitat*. En: Paul, E. A. 2007. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. 3era edición. Elsevier. Estados Unidos y Reino Unido. 25-49 pp.
- Yadav, B.K. y Verma, A. 2012. *Phosphate Solubilization and Mobilization in Soil Through Microorganisms Under Arid Ecosystems*. En: Ali, M. (ed). 2012. *The functioning of ecosystems*. IntechOpen. Londres, Reino Unido. P. 93-108.
- Walton, K., y Alle, D. 2004. *Mehlich no. 3 soil test – the western Australian experience*. Chemistry Center (WA). Astralia. 5 p.

- Whalen, J. y Sampedro, L. 2010. *Decomposition (cap. 8)*. En: Whalen, J. y Sampedro, L. 2010. *Soil ecology and management*. (1era edición). CABI. Estados Unidos. 320 p.
- Welch, R.M. 2001. *Micronutrients, agriculture and nutrition; linkages for improved health and well being*. En: K. Singh, S. Mori, and R.M. Welch (eds.). *Perspectives on the Micronutrient Nutrition of Crops*. Jodhpur, India: Scientific Publishers (India), 247-289.
- Welch, R.M. y Graham, R.D. 1999. *A new paradigm for world agriculture: meeting human needs; productive, sustainable, nutritious*. *Field Crops Research*, 60 (1999), 1-10.
- Welch, R.M. y Graham, R.D. 2012. *Perspectives on enhancing the nutritional quality of food crops with trace elements*. En: Bruulsema, T.W., Heffer, P., Welch, R.M., Cakmak, I. y Moran, K. 2012. *Fertilizing crops to improve human health: a scientific review*. IPNI & IFIA. Estados Unidos y Francia. Pp 65-96.
- Wienhold, B.J., Andrews, S.S. y Karlen, D.L. 2004. *Soil quality: a review of the science and experiences in the USA*. *Environmental Geochemistry and Health*. 26:89-95. Kluwer Academic Publishers. Holanda. 7 p.
- Wright, A. L., Wang, Y., y Reddy, K.R. 2008. *Loss-on-Ignition method to assess soil organic carbon in calcareous Everglades wetlands*. *Communications in Plant Science and Soil Analysis*. 39: 19-20, 3074 – 3083.
- Yirdraw, E., Tigabu, M., y Mongue, A. 2017. *Rehabilitation of degraded dryland ecosystems – review*. *Silva Fennica* vol. 51. 1B article id 1673. 32 p.
- Zhou, J., He, Z., Van Nostrand, J.D., Wu, L., y Deng, Y. 2010. *Applying GeoChip analysis to disparate microbial communities*. *Microbe*. Vol 5. No. 2. 60-65

Zorzin, R. 2002. *Conocer los minerales: teoría y práctica para comprender y descubrir los secretos de la tierra*. Susaeta. Madrid, España. 126 p.

7. ANEXOS

Anexo 1. Resultados del laboratorio West Analítica



Laboratorios A-L de México, S.A. de C.V.

Esmeralda #2847 Col. Verde Valle C.P. 44550 Guadalajara, México
Tel: (33) 3121-7925 (33) 3123-1823 Sitio web: www.agroanalisis.com.mx
Servicios a clientes: eagular@allabs.com maikdana@allabs.com

ANALISIS DE SUELO

Compañía / Empresa Universidad Autonoma de Puebla	Agricultor Armando Larios Barron Predio Guadalupe Sanchez Granja ID: Recepción: 29/05/2017	Reporte 17-149-0503 Cuenta 70835 Fecha 01/06/2017 Pagina 2 of 2 A-L Agronomo Oscar Ruiz
--	--	--

Alt Campo ID:

Campo ID:

Firma

Numero Lab. 02418

Muestra Muestra 2

Determinaciones	Método	Resultados	CALIFICACION					Capacidad Int. catiónica		
			Muy Bajo	Bajo	Medio	Optimo	Muy Alto	%sat	meq	
pH Suelo	pH:1	8.2						54.4 meq/100g		
pH Tampón								Saturación Catiónica		
Materia orgánica	Comb.	2.9 % ENL 84						K	1.6	0.9
Fósforo (P)	M3	10 ppm						Ca	86.5	47.1
Potasio (K)	M3	346 ppm						Mg	11.7	6.4
Calcio (Ca)	M3	9412 ppm						H	0.0	0.0
Magnesio (Mg)	M3	763 ppm						Na	0.1	0.1
Azufre (S-SO4)	M3	8 ppm						K/Mg: 0.14		
Boro (B)	M3	1.3 ppm						Ca/Mg: 7.39		
Cobre (Cu)	M3	1.4 ppm								
Hierro (Fe)	M3	18 ppm								
Manganeso (Mn)	M3	101 ppm								
Zinc (Zn)	M3	0.9 ppm								
Sodio (Na)	M3	16 ppm								
Conductividad										
Nitrógeno-Nitrato										

Anexo 2. Resultados del análisis AA pH 8.5 del Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola Médica y Ambiental.



LABORATORIO NACIONAL DE BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA MÉDICA Y AMBIENTAL
 Camino a la Presa San José No. 2055, Lomas Cuarta Sección, Tel. 01 444 8342000 EXT. 72877291
<http://www.ipicyt.edu.mx/> , lanbama@ipicyt.edu.mx



INFORME DE RESULTADOS

1.- Número de Informe:	AF_013_SCA_2016
2.- Nombre del Cliente:	Armando Francisco Larios Barrón (Suelos Sanos)
3.- Dirección:	Zaragoza 112, Centro 78490, Villa de Zaragoza, San Luis Potosí México
4.- Norma y/o método de referencia:	Espectrofotómetro de Emisión Óptica-Plasma Acoplado Inductivamente ICP-OES .
5.- Descripción, condición e identificación del ítem ensayado	Se especifica en tabla de resultados
6.- Fecha de recepción del ítem ensayado	7 de Abril de 2017
7.- Fecha de ejecución del ensayo	17-19 de Abril de 2017
8.- Fecha de emisión del informe	19 de Abril de 2017
8.- Nombre o número de convenio	LAN-2016-000151
9.- Observaciones	Los elementos Ca, Mg, Na, K, se realizó una extracción con Acetato de amonio a solicitud del cliente.

115

ID DE LA MUESTRA		
ANALITO	UNIDADES	Prod- Lupita Hernandez, Oaxaca
Calcio	ppm	1940.0
Calcio **	ppm	1858.0
Magnesio	ppm	262.1
Magnesio**	ppm	269.7
Sodio	ppm	66.2
Sodio **	ppm	68.7
Potasio	ppm	287.5
Potasio **	ppm	299.3

Nota: Los elementos indicados con (**) se realizó una extracción con Acetato de amonio ajustando pH con NH₄OH

Anexo 3. Cromatograma del bosque cercano a la parcela experimental. Como puede observarse, en este cromatograma están presentes las zonas con sus formas y colores característicos de un suelo en mejor estado de salud que el de la parcela.



Anexo 4. Grupos y especies de microorganismos detectados en varios tipos de Microorganismos de Montaña o MM reportados por Salas (2013) en estudios hechos con PCR en tiempo real. Los MM activado, MM reactivado, Bio Magnesio y Bio Multimineral (llamados también “bioles) están en forma líquida; MM ensilado corresponde a los encontrados en el preparado sólido que tiene como inóculo la hojarasca de bosque, y el Pasto Ensilado corresponde a otro preparado en sólido en el que se usa el MM anterior pero se mezcla con pasto verde recién cortado, salvado de arroz y melaza.

	MM activado (pg /ml)	MM reactivado (pg /ml)	MM ensilado (pg /g)	Pasto ensilado (pg /g)	Bio Magnesio (pg /ml)	Bio Multimineral (pg /ml)
Hongos	5922	8760	7944	7950	3156	456
Basidiomycota	679	776	768	183	135	12
<i>Paecilomyces lilacinus</i>	36	46	46	0	16	0
<i>Trichoderma</i> spp.	456	541	578	133	96	14
<i>Aspergillus penicilloides</i>	854	687	641	0	14	0
<i>Mucor</i> spp.	651	468	561	87	16	0
Bacterias aerobias	4788	8538	5802	8124	5922	516
Actinomycetes	673	987	768	389	96	0
<i>Streptomyces</i>	498	569	687	561	129	65
Fijadores de nitrógeno	1368	1447	1267	738	348	632
Oxidadores de amonio	96	687	48	87	39	624
Desnitrificantes	67	245	87	43	89	435
β -Ptroteobacteria	479	579	679	654	98	62
α -Proteobacteria	510	679	984	756	88	68
Firmicutes	532	847	845	395	126	65
Acidobacteria	167	462	245	79	216	800
<i>Lactobacillus</i> spp.	535	987	675	689	36	5
<i>Burkorderia cepacea</i>	36	47	75	54	76	0
<i>Bacillus</i> spp.,	524	687	485	665	57	0
<i>Bacillus subtilis</i>	46	65	67	24	23	52