



Universidad Nacional
Abierta y a Distancia

Sello Editorial

RELACIONES AGROAMBIENTALES EN SISTEMAS PRODUCTIVOS RURALES

Óscar Eduardo Sanclemente Reyes
Milton César Ararat Orozco
Julián Eduardo Mejía Ballesteros
Leonardo Álvarez Ríos
Julio César Montoya Rendón
Ángela María Arango Arias
Luis Felipe Arteaga Aguilera
Mauricio García Arboleda
Pablo Iván Gallo Valdés

Grupo de Investigación
Producción Sostenible



RELACIONES AGROAMBIENTALES EN SISTEMAS PRODUCTIVOS RURALES

Autores:

Óscar Eduardo Sanclemente Reyes

Milton César Ararat Orozco

Julián Eduardo Mejía Ballesteros

Leonardo Álvarez Ríos

Julio César Montoya Rendón

Ángela María Arango Arias

Luis Felipe Arteaga Aguilera

Mauricio García Arboleda

Pablo Iván Gallo Valdés

Grupo de Investigación: Producción Sostenible

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD

Jaime Alberto Leal Afanador

Rector

Constanza Abadía García

Vicerrectora académica y de investigación

Leonardo Yunda Perlaza

Vicerrector de medios y mediaciones pedagógicas

Édgar Guillermo Rodríguez Díaz

Vicerrector de servicios a aspirantes, estudiantes y egresados

Julialba Ángel Osorio

Vicerrectora de inclusión social para el desarrollo regional y la proyección comunitaria

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres

Vicerrector de relaciones intersistémicas e internacionales

Myriam Leonor Torres

Decana Escuela de Ciencias de la Salud

Clara Esperanza Pedraza Goyeneche

Decana Escuela de Ciencias de la Educación

Alba Luz Serrano Rubiano

Decana Escuela de Ciencias Jurídicas y Políticas

Martha Viviana Vargas Galindo

Decana Escuela de Ciencias Sociales, Artes y Humanidades

Claudio Camilo González Clavijo

Decano Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Jordano Salamanca Bastidas

Decano Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Sandra Rocío Mondragón

Decana Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios

Relaciones agroambientales en sistemas productivos rurales

Óscar Eduardo Sanclemente Reyes, Milton César Ararat Orozco, Julián Eduardo Mejía Ballesteros, Leonardo Álvarez Ríos, Julio César Montoya Rendón, Ángela María Arango Arias, Luis Felipe Arteaga Aguilera, Mauricio García Arboleda, Pablo Iván Gallo Valdés

Grupo de Investigación: Producción Sostenible

304.2
S194

Sanclemente Reyes, Oscar Eduardo
Relaciones agroambientales en sistemas productivos rurales / Oscar Eduardo Sanclemente Reyes, Milton César Ararat Orozco, Julián Eduardo Mejía Ballesteros ... [et al.] -- [1.a. ed.]. Bogotá: Sello Editorial UNAD/2021. (Grupo de investigación: Producción sostenible – Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente -ECAPMA)

ISBN: 978-958-651-803-1

e-ISBN: 978-958-651-804-8

1. Sistemas de producción 2. Investigación ambiental 3. Agricultura 4. Medio ambiente I Sanclemente Reyes, Oscar Eduardo II. Ararat Orozco, Milton César III. Mejía Ballesteros, Julián Eduardo IV. Álvarez Ríos, Leonardo V. Montoya Rendón, Julio César VI. Arango Arias, Ángela María VII. Arteaga Aguilera, Luis Felipe VIII. García Arboleda, Mauricio IX. Gallo Valdés, Pablo Iván.

ISBN:

e-ISBN:

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

©Editorial

Sello Editorial UNAD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Calle 14 sur No. 14-23

Bogotá, D.C.

Junio de 2021

Corrección de textos: Marcela Guevara

Diseño de Portada: Paula Cubillos Gómez

Diagramación: Paula Cubillos Gómez

Impresión: Hipertexto - Netizen

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons - Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional.

https://co.creativecommons.org/?page_id=13.



RESEÑA DEL LIBRO

El grupo de investigación Producción Sostenible adscrito a la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, desde su creación en 2008, ha propendido por generar investigación formativa relacionada con el estudio de las externalidades ocasionadas por la agricultura convencional en el país y la evaluación de tecnologías agroambientales más amigables con el entorno.

Como externalidades se distinguen aquellos aspectos ambientales no deseados en los sistemas de producción agropecuarios que en últimas afectan su sostenibilidad; por ejemplo, la pérdida de la agrobiodiversidad por simplificación del germoplasma, la degradación del suelo por uso excesivo de maquinaria y aplicación de fertilizantes sintéticos, la contaminación del agua y el aire por solubilidad de moléculas empleadas en el manejo de arvenses, plagas y enfermedades, entre otros, que limitan su reproducibilidad en el tiempo, reducen los beneficios económicos obtenidos por los productores y, en últimas, ocasionan su desertión del sector.

No se trata solo de analizar cómo las prácticas de agricultura convencional afectan estos sistemas de producción, sino también de evaluar alternativas de manejo que reduzcan estos impactos, basadas en la simulación de procesos que ocurren naturalmente en los ecosistemas. Entre estos procesos se destacan el aprovechamiento de la energía solar para generación de biomasa, sobre todo por ser Colombia un país de trópico, el incremento de la diversidad en sistemas de cultivo aprovechando las relaciones sinérgicas entre las especies, el manejo a favor de los agroecosistemas de los ciclos biogeoquímicos de elementos como el carbono, nitrógeno, fósforo y potasio, el incentivo de los organismos del suelo como transformadores de materia orgánica, la estabilización y habilitación de residuos como abonos y sustratos orgánicos mediante procesos de compostaje y el aprovechamiento de materiales vegetales fibrosos para elaboración de materiales de construcción con el fin de ser incorporados en la infraestructura rural.

Por esta razón el presente libro se titula Relaciones agroambientales en sistemas productivos rurales. Los capítulos 1 y 2 se enfocan en el tema de relaciones agroambientales y se titulan respectivamente: “Composición de microorganismos funcionales del suelo en algunos sistemas de cultivo de zona plana del Valle del Cauca” y “Relación de

uso del suelo agropecuario con el proceso de eutrofización por algas y presencia de caracoles en sistema de potabilización del corregimiento El Vínculo (Bugá-Valle del Cauca)”. Estos capítulos derivan de resultados de investigación que vislumbran cómo algunas prácticas de manejo agropecuario generan desbalances de la microfauna del suelo que afectan los servicios ecológicos que estos organismos prestan, así como la conexión entre la aplicación excesiva de fertilizantes en zona alta con la aparición de organismos vectores de enfermedades en cuerpos de agua de la parte baja de una cuenca hidrográfica del centro del Valle del Cauca.

Los capítulos 3 y 4 se enfocan en el estudio de los meso-organismos del suelo, que hacen parte de los llamados “ingenieros del agroecosistema” por ser actores fundamentales en procesos de transformación de la materia orgánica, la formación de estructura del suelo, el ciclaje de nutrientes y servir de indicadores de salud y calidad de los agroecosistemas. El capítulo 3, “La mesoofauna del suelo como indicadora de la salud del agroecosistema”, se presenta como una revisión bibliográfica de los principales grupos de meso-organismos del suelo, su función ecológica y los factores que afectan sus poblaciones y diversidad. El capítulo 4, “Los colémbolos como actores de la transformación de la materia orgánica en agroecosistemas cafeteros”, presenta resultados de investigación relacionados con la abundancia y función de estos organismos del suelo en sistemas de manejo convencional, orgánico y mixto de café en el departamento del Tolima.

Los capítulos 5 y 6 presentan algunas alternativas tecnológicas de bajo costo para el manejo de la fertilidad de los sistemas de cultivo mediante empleo de recursos locales. El capítulo 5, “Tecnologías agroambientales precursoras de materia orgánica del suelo en cultivos industriales del Valle del Cauca (Colombia)”, presenta algunos resultados de investigación de docentes y tesis del grupo Producción Sostenible relacionados con los beneficios del uso de coberturas vegetales, abonos verdes y acolchados orgánicos en cultivos de maíz, soya y caña de azúcar. El capítulo 6, “El compostaje como herramienta para el aprovechamiento de residuos y la gestión de la materia orgánica del suelo” presenta una revisión de parámetros técnicos para tener en cuenta en la elaboración de un buen compost, así como las potencialidades del uso de diferentes residuos orgánicos e insumos en el proceso.

Finalmente, el capítulo 7, “Aprovechamiento de fibras vegetales y residuos agroindustriales como componentes de compuestos a base de cemento”, presenta una revisión de cómo algunos materiales fibrosos que abundan en sistemas de cultivo pueden potencialmente emplearse en la elaboración de materiales para construcción que resulten más económicos y ambientalmente amigables.

La redacción del libro se basa en el lenguaje técnico-científico y pretende abarcar un gran número de lectores que incluyen agricultores, estudiantes de las ciencias agropecuarias y ambientales, tomadores de decisiones en el sector agropecuario y la comunidad académica en general, con miras de aportar al desarrollo de masa crítica y servir de referencia para otras investigaciones enfocadas al desarrollo de una agricultura más limpia y la producción sostenible de alimentos.

RESEÑA DE LOS AUTORES

Óscar Eduardo Sanclemente Reyes

Doctor en Agroecología. Magíster en Ciencias Agrarias, énfasis en suelos. Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Líder del grupo de investigación Producción Sostenible. Docente Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD, Palmira-Colombia. Contacto: oscar.sanclemente@unad.edu.co

Milton César Ararat Orozco

Doctor en Ciencias Agrarias, línea de investigación suelos y aguas. Magíster en Ciencias Agrarias, énfasis en suelos. Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Investigador del grupo de investigación Producción Sostenible. Docente Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD, Palmira-Colombia. Contacto: milton.ararat@unad.edu.co

Julián Eduardo Mejía Ballesteros

Doctor en Ingeniería y Ciencias de los Materiales. Magíster en Ciencias, Universidade de São Paulo, Brasil. Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Investigador del grupo de investigación Producción Sostenible. Docente Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD, Palmira-Colombia. Contacto: julian.mejia@unad.edu.co

Leonardo Álvarez Ríos

Doctor en Ciencias Agrarias, línea de investigación protección de cultivos. Magíster en Ciencias Agrarias, énfasis en protección de cultivos. Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Investigador del grupo de investigación Producción Sostenible. Docente Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD, Palmira-Colombia. Contacto: leonardo.alvarez@unad.edu.co

Julio César Montoya Rendón

Máster Business Administrator, UNAD Florida. Especialista en Pedagogía para el Desarrollo del Aprendizaje Autónomo, Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD. Administrador de Empresas, Universidad Santiago de Cali. Investigador del grupo de investigación Producción Sostenible. Docente Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD, Palmira-Colombia. Contacto: julio.montoya@unad.edu.co

Ángela María Arango Arias

Ingeniera Ambiental, Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD. Investigadora del grupo de investigación Producción Sostenible. Funcionaria Alcaldía Municipal Guadalupe de Buga. Contacto: sagrifome@guadalaradebuga-valle.gov.co

Luis Felipe Arteaga Aguilera

Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD. Investigador del grupo de investigación Producción Sostenible. Área de Calidad en CRISTAR S.A.S. Buga-Colombia. Contacto: lfarteaga4@misena.edu.co

Mauricio García Arboleda

Doctor en Agroecología, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Magíster en Desarrollo Sustentable, Universidad Nacional de Lanús-Argentina. Ingeniero Agrónomo, Universidad del Tolima. Investigador del grupo de investigación Producción Sostenible. Docente investigador Universidad de Cundinamarca- Colombia. Contacto: mauriciogarcia@ucundinamarca.edu.co

Pablo Iván Gallo Valdés

Especialista en Agroecología. Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Investigador del grupo de investigación Producción Sostenible. Investigación y desarrollo en productos biológicos PERKINS LTDA, Palmira, Colombia. Contacto: pigallog@unal.edu.co

CONTENIDO

Capítulo 1

Composición de microorganismos funcionales del suelo en algunos sistemas de cultivo de zona plana del Valle del Cauca	23
1.1 Introducción	24
1.2 Metodología	27
1.2.1 Localización	27
1.2.2 Recopilación de información cualitativa relacionada con prácticas de manejo del agroecosistema	27
1.2.3 Toma de muestras de suelo rizosférico	28
1.2.4 Análisis microbiológicos en laboratorio	28
1.2.5 Preparación de los medios de cultivo requerido para cada grupo de microorganismo para evaluar	29
1.2.6 Procedimientos de laboratorio	29
1.2.7 Estimación de las unidades formadoras de colonias (UFC) para cada grupo de microorganismo funcional	32
1.2.8 Estimación de arvenses	33
1.2.9 Análisis de la información	33
1.3 Resultados y discusión	33
1.3.1 Información cualitativa relacionada con prácticas de manejo del agroecosistema	33
1.4 Conclusiones	41
1.5 Referencias	42

Capítulo 2

Relación de uso del suelo agropecuario con el proceso de eutrofización por algas y presencia de caracoles en sistema de potabilización del corregimiento El Vínculo (Bugá - Valle del Cauca)	47
2.1 Introducción	48
2.2 Materiales y métodos	50
2.2.1 Localización	50
2.2.2 Caracterización de propiedades fisicoquímicas del agua de la PTAP	52
2.2.2.1 Determinación del contenido de nutrientes	51
2.2.2.2 Determinación de las concentraciones de amonio, nitritos y nitratos	51

2.2.2.3	Determinación de la reacción del agua (pH), conductividad y sólidos disueltos	52
2.2.2.4	Determinación de la dureza por contenidos de CaCO ₃ y CaO	52
2.2.2.5	Estimación del contenido de algas y caracoles en los tanques de agua potable	53
2.2.2.6	Diálogo de saberes con actores sociales del sitio de estudio	54
2.3	Resultados y discusión	54
2.3.1	Caracterización fisicoquímica del agua en la PTAP	54
2.3.2	Identificación taxonómica y contenidos de algas y caracoles en los tanques de potabilización	57
2.3.3	Diálogo de saberes con actores sociales del sitio de estudio	60
2.4	Discusión general	62
2.5	Conclusiones	64
2.6	Referencias	66

Capítulo 3

La mesoafauna del suelo como indicadora de salud del agroecosistema

3.1	Introducción	72
3.2	Mesofauna del suelo	73
3.3	Conclusiones	80
3.4	Referencias	81

Capítulo 4

Los colémbolos como actores de la transformación de la materia orgánica en agroecosistemas cafeteros

4.1	Introducción	88
4.2	Metodología de la investigación	89
4.2.1	Localización de la investigación	89
4.2.2	Estructura del ensayo	89
4.2.3	Colecta de muestra para caracterización de poblaciones de colémbolos	92
4.2.4	Análisis de suelos	96
4.3	Resultados y discusión	96
4.3.1	Caracterización de colémbolos	96
4.3.2	Análisis químico-físico de muestras de suelo	98

4.4	Conclusiones	101
4.5	Referencias	102

Capítulo 5

Tecnologías agroambientales precursoras de materia orgánica del suelo en cultivos industriales del Valle del Cauca (Colombia)		105
5.1	Introducción	106
5.2	Materia orgánica del suelo: componente fundamental para la sostenibilidad agroecosistémica	108
5.3	Los cultivos industriales de caña de azúcar, maíz y soya en el departamento del Valle del Cauca	112
5.3.1	El cultivo de caña de azúcar <i>Saccharum officinarum</i> L.	112
5.3.2	El cultivo de maíz <i>Zea mays</i> L.	113
5.3.3	El cultivo de soya <i>Glycine max</i> L.	114
5.4	Tecnologías de corte agroecológico para reciclaje de nutrientes y mejoramiento de la MOS	117
5.4.1	Intercultivos	117
5.4.2	Abonos verdes	120
5.4.3	Cultivos de cobertura y acolchados orgánicos	121
5.4.4	Rotación de cultivos	122
5.5	Estudios de caso con uso de algunas tecnologías agroambientales en cultivos industriales del Valle del Cauca (Colombia)	124
5.5.1	Caña de azúcar orgánica	124
5.5.2	Cultivo de maíz en zona de ladera	128
5.5.3	Intercultivo maíz-soya en zona plana	131
5.6	Conclusiones	134
5.7	Referencias	135

Capítulo 6

El compostaje como herramienta para el aprovechamiento de residuos y la gestión de la materia orgánica del suelo		143
6.1	Introducción	144
6.2	Historia del compostaje	145
6.3	Consideraciones generales	147
6.4	Aspectos técnicos del compostaje	148
6.5	Parámetros de seguimiento del compostaje	152
6.6	Parámetros de la naturaleza del sustrato	154

6.7	Microbiología del compostaje	157
6.8	Bioquímica del compostaje	159
6.9	Aceleradores del compostaje	160
6.10	Sistemas de compostaje	160
6.11	Caracterización del compost	162
6.12	Procedimiento para la producción compostaje	163
6.13	Conclusiones	164
6.14	Referencias	165

Capítulo 7

Aprovechamiento de fibras vegetales y residuos agroindustriales como componentes de compuestos a base de cemento		167
7.1	Introducción	168
7.2	Fibras vegetales	170
7.3	Aplicabilidad de fibras celulósicas en compuestos de cemento	173
7.4	Limitaciones del uso de fibras celulósicas	174
7.5	Alternativas para potenciar el uso de fibras vegetales	176
7.6	Aprovechamiento de residuos agroindustriales en compuestos de cemento	182
7.7	Referencias	189

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1 Diluciones seriadas de Winogradsky para análisis microbiológico de suelos	30
Tabla 1.2 Diseño de inoculación de diluciones en cajas de Petri según grupo de microorganismo (MO) funcional del suelo	31
Tabla 1.3 Propiedades del suelo y prácticas culturales para el manejo del agroecosistema en los sitios de muestreo	34
Tabla 1.4 Estimación de poblaciones de microorganismos funcionales del suelo en los tres sitios de muestreo	38

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Caracterización de parámetros físicos y químicos del agua durante diciembre de 2016 (época seca) y abril de 2017 (época lluviosa) en la bocatoma durante los procesos de tratamiento y en el efluente de la planta de tratamiento de agua potable del corregimiento El Vínculo (Buga-Valle del Cauca)	55
Tabla 2.2 Contenidos de caracoles y algas dulceacuícolas en durante los procesos de purificación del agua de la PTAP del corregimiento El Vínculo (Buga-Valle del Cauca)	59

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Principales organismos que conforman la mesofauna del suelo	72
Tabla 3.2 Metales pesados en el suelo	77

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Listado especies de colémbolos y población por cada especie, finca tipo 1 (convencional – San Felipe)	97
Tabla 4.2 Listado especies de colémbolos y población por cada especie, finca tipo 2 (orgánica – San Luis)	97
Tabla 4.3 Listado especies de colémbolos y población por cada especie, finca tipo 3 (mixta – La Granja)	98
Tabla 4.4 Contenidos de materia orgánica y elementos mayores en las fincas tipo 1 (convencional), tipo 2 (orgánica) y tipo 3 (mixta)	99

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1 Datos de materia seca, rendimiento de caña y producción de azúcar. Hacienda Lucernita, municipio de Bugalagrande-Valle del Cauca (Colombia). Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$) 127

Tabla 5.2 Variación de contenidos de C y N en el suelo (0-20 cm), pérdida de suelo por erosión y rendimiento de grano seco de maíz. Corregimiento de Ayacucho, municipio de Palmira (Colombia). Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$) 129

Tabla 5.3 Porcentaje de colonización, longitudes de micelio externo y micelio activo de hongos micorrízicos arbusculares HMA asociados al cultivo de maíz, vereda El Mesón, municipio de Palmira (Colombia). Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$) 130

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1. Composición media de los vegetales 149

Tabla 6.2. Relación carbono-nitrógeno y porcentaje de nitrógeno en base seca de algunos residuos 156

Tabla 6.3 Sucesiones microbiales del compostaje 158

CAPÍTULO 7

Tabla 7.1. Formulación de las formulaciones evaluadas 178

Tabla 7.2. Propiedades físicoquímicas determinadas para las fibras celulósicas de eucalipto y pino tratadas y sin tratamiento 181

Tabla 7.3. Composición de las formulaciones evaluadas 185

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Diluciones seriadas preparadas en cámara de flujo laminar, laboratorio microbiológico de la empresa Hongos de Colombia Fungicol S.A.S. del municipio de Palmira 30

Figura 1.2 Sistemas de cultivo evaluados. Hacienda El Cairo: a) Caña de azúcar, b) Guadual y c) Barbecho. Hacienda El Refugio: d) Maíz, e) Tomate, f) Agroforestal y g) Guadual. Hacienda Canta Claro: h) Caña de azúcar, i) Pasturas y j) Guadual 37

Figura 1.3 Algunos microorganismos del suelo observados en la investigación: a) Caja de Petri con colonias bacterianas, dilución 1×10^{-6} ; b) Caja de Petri con colonias bacterianas solubilizadoras de P en medio Pikovskaya; c) Caja de Petri con cultivo puro de la bacteria *Pseudomonas fluorescens*- solubilizadora de P; d) observación al microscopio de *Azospirillum* sp.- bacteria asimbiótica fijadora de N₂; e) Caja de Petri con crecimiento del hongo *Trichoderma* sp.; f) observación al microscopio del hongo *Curvularia* sp.; g) observación al microscopio de conidióforo del hongo *Cladosporium* sp.; h) observación al microscopio de conidias del hongo *Fusarium* sp. 40

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Caracoles presentes en la PTAP del corregimiento El Vínculo (Buga-Valle del Cauca): a) *M. tuberculata* y b) *L. columella*. Las imágenes fueron tomadas en las canaletas que conducen en los filtros lentos de arena descendentes 57

Figura 2.2 Algas presentes en la PTAP del corregimiento El Vínculo (Buga-Valle del Cauca): a) *H. reticulatum* vista al microscopio óptico (40X) y b) Biomasa de algas acumulada en tanques de potabilización del agua 58

Figura 2.3 Reunión con los funcionarios en instalaciones de planta potabilizadora, Buga-Valle del Cauca 61

Figura 2.4 A) Consenso grupal de los integrantes y B) Dibujo de los participantes del diseño de la PTAP 62

Figura 2.5 Esquematación del proceso de eutrofización en la PTAP 63

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Mesofauna del suelo 73

Figura 3.2 Ácaros del suelo 79

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Diagrama general de investigación	89
Figura 4.2 Arreglo sistema tipo 1 (convencional)	90
Figura 4.3 Arreglo sistema tipo 2 (orgánica)	91
Figura 4.4 Arreglo sistema tipo 3 (mixta)	92
Figura 4.5 Toma de muestra	93
Figura 4.6 Rotulado de muestra y estructura de embudo Berlesse	93
Figura 4.7 Preparación de la solución alcohólica para el embudo Berlesse	94
Figura 4.8 Ensamble del aditamento de solución alcohólica de embudo	94
Figura 4.9 Contenedor de muestra de embudo Berlesse y aplicación de muestra	95
Figura 4.10 Adecuación de muestra y bombillo de embudo Berlesse	95
Figura 4.11 Familia Entomobryidae	96
Figura 4.12 Familia Isotomidae	97
Figura 4.13 Contenidos de materia orgánica y elementos mayores en las fincas tipo 1 (convencional), orgánica (tipo 2) y mixta (tipo 3)	100

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 Red de interacciones entre algunas propiedades del suelo Typic Haplustalfs	110
Figura 5.2 Diferentes procesos metabólicos de cooperación en el intercultivo leguminosa-gramínea en los cuales se integran los ciclos de C, N y P, entre otros	119
Figura 5.3 Ilustración temporal de los procesos de reciclaje de nutrientes en la rotación de sistemas de cultivo dentro del agroecosistema	123
Figura 5.4 Peso seco (g) de turrículos (coprolitos) de lombrices nativas en las suertes 201B, 211A, 213 y 215 de la hacienda El Alisal, municipio de El Cerrito-Valle del Cauca. Las letras en las barras indican diferencias estadísticamente significativas mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)	125
Figura 5.5 Contenidos de N-NH ₄ , N-NO ₃ y N- inorgánico (mg.kg ⁻¹) en las parcelas experimentales. Suerte 201D de la hacienda El Alisal, municipio de El Cerrito-Valle del Cauca. Las letras en las barras indican diferencias estadísticamente significativas mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)	126
Figura 5.6. Rendimiento de grano seco de maíz y soya (t.ha ⁻¹), Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia, Candelaria-Valle del Cauca. Las letras en las barras indican diferencias estadísticamente significativas mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)	133

CAPÍTULO 6

Figura 6.1. Hitos históricos del manejo de residuos orgánicos	146
Figura 6.2. Origen de los residuos sólidos	148
Figura 6.3. Restricciones y procesos de habilitación de los residuos	151

Figura 6.4. Curva de temperatura y pH durante el proceso de compostaje	153
Figura 6.5. Sistemas de compostaje	161

CAPÍTULO 7

Figura 7.1. Representación esquemática de la pared celular de fibras celulósicas	171
Figura 7.2. Propiedades mecánicas evaluadas en los compuestos cementantes reforzados con fibras tratadas y no tratadas, antes y después del proceso de envejecimiento acelerado	179
Figura 7.3. Microscopia electrónica de barradura para fibras de pino sin tratamiento (a) y hornificadas (b)	182
Figura 7.4. Resultados de la resistencia a flexión y compresión para las formulaciones evaluadas con y sin substitución parcial a 7 y 60 días	186
Figura 7.5. Resultados del ensayo de Fratini para determinar la capacidad puzolánica de las formulaciones en estudio. CP: cemento, CAL: calcita, CCA: ceniza de cáscara de arroz, RCA: residuo de carbón activado.	188

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Requisitos específicos fertilizantes y abonos orgánicos. Norma técnica colombiana 5167 de ICONTEC	196
Anexo 2. Requisitos específicos fertilizantes o abonos orgánico-minerales. Norma técnica colombiana 5167 de ICONTEC	197
Anexo 3. Requisitos específicos enmiendas orgánico-húmicas y orgánico no húmicas. Norma técnica colombiana 5167 de ICONTEC	198

PREFACIO

La matriz natural original de nuestro territorio nacional ha sido objeto de diferentes transformaciones resultantes del accionar del hombre a lo largo de las sucesivas etapas de desarrollo, con propuestas productivas en variados ambientes y como producto de las interacciones de nuestras poblaciones indígenas con la influencia foránea y los enfoques de políticas sectoriales.

Los paisajes se ven frecuentemente como fragmentos de hábitat natural rodeados por un “mar” de agricultura. Sin embargo, la teoría ecológica reciente muestra que la naturaleza de estos fragmentos no es tan importante para la conservación como lo es la naturaleza de la matriz agrícola que los rodea (Perfecto et al., 2009).

La pertinencia de las diferentes propuestas de intervención es motivo de análisis desde diferentes sectores de la sociedad, pero la destrucción de la cobertura a nivel de las variadas e importantes formaciones vegetales a lo largo de nuestra geografía es en algunas regiones preocupante. Por ello, es fundamental que la academia y los grupos de investigación realicen esfuerzos científicos y tecnológicos, mediante la ciencia básica y aplicada, a partir de una lectura adecuada a las particularidades del territorio y orientada a la recuperación, manejo y conservación de los componentes y actores de los agroecosistemas en el marco de los diferentes atributos que conllevan a un manejo sustentable del territorio.

Vislumbrar las interacciones agroecosistémicas y lograr identificar los diferentes patrones de comportamiento a diferentes escalas y naturaleza permite interpretar el estado de salud o equilibrio dinámico de los sistemas productivos rurales para generar rutas de intervención técnica en el marco de la sustentabilidad. La función adecuada de actores de biodiversidad a nivel de los componentes de la estructura de los sistemas productivos permite ensamblar e interconectar metabolismos agroecosistémicos asociados a multitud de emergencias funcionales expresadas en la generación de estabildades, sinergias, resiliencias y adaptabilidad, entre otros atributos propios de agroecosistemas en alta armonía.

Por lo anterior, el aprovechamiento de los recursos locales mediante la activación de la funcionalidad *in situ* representa una de las rutas que se deben explorar con el fin de recuperar el accionar de actores endémicos adaptados a las condiciones locales y con

la memoria ecosistémica del territorio, direccionando su actividad a los componentes suelo, agua, biodiversidad asociada y especie de cultivos bajo la administración adecuada del componente antrópico.



CAPÍTULO

COMPOSICIÓN DE MICROORGANISMOS FUNCIONALES DEL SUELO, EN ALGUNOS SISTEMAS DE CULTIVO DE ZONA PLANA DEL VALLE DEL CAUCA



Oscar Eduardo Sanclemente Reyes
Milton César Ararat Orozco
Pablo Iván Gallo Valdés
Mauricio García Arboleda

1.1 INTRODUCCIÓN

En la última década, ha crecido la alerta mundial en torno a la degradación de recursos naturales por acción antrópica y su relación con el cambio climático global. Se estima que cerca del 33 % de los suelos agrícolas del mundo presentan procesos degradativos entre los que se destacan la erosión, la salinización, la compactación, la remoción masal, la acidificación, la polución química y el agotamiento de nutrientes (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO, 2015). Por su parte, el dato nacional no es alentador. Estudios del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en 2015 en colaboración con universidades del país registraron que cerca del 40 % de los suelos del país presentan algún grado de erosión (IDEAM y UDCA, 2015); esta problemática se concentra en la zona andina y los valles geográficos de los ríos Cauca y Magdalena, donde se dispone mayoritariamente la actividad agrícola. De igual forma, el 17 % del territorio evidencia una desertificación que podría incrementarse en 15 % en los próximos años (Correa, 2015).

En suelos agrícolas, la degradación del suelo se debe principalmente a factores ligados a la mecanización, el uso de sistemas de riego ineficientes, el cultivo en zonas de ladera sobre suelo desnudo y la aplicación de insumos de síntesis química. La degradación física y química del suelo está directamente relacionada con su degradación biológica. Buena parte de los estudios relacionados con degradación biológica del suelo se enfocan en la estimación de la abundancia y diversidad de grupos de macroinvertebrados, entre los que destacan lombrices y colémbolos, llamados también “ingenieros del agroecosistema” (Feijoo et al., 2004; Rendón et al., 2011; Cabrera, 2012). Sin embargo, son pocos los estudios que registran datos de poblaciones de microorganismos funcionales del suelo bajo diversos sistemas de cultivo. Entre estos microorganismos resaltan los descomponedores de materia orgánica, solubilizadores de fosfatos, fijadores de nitrógeno, hongos micorrízicos, sideróforos y actinomicetos, entre otros.

Se llama suelo fértil a aquel que contiene una reserva idónea de elementos nutritivos para el cultivo y cuenta con poblaciones microbianas asociadas al suelo que garantizan la liberación de nutrientes que aseguran el desarrollo vegetal adecuado. La diversidad microbiana cumple funciones determinantes como habilitar compuestos orgánicos e inorgánicos que se incorporan al suelo, proceso vital que garantiza la nutrición vegetal pues su capacidad de transformación lleva los elementos nutricionales hasta las formas químicas para que puedan ser asimilados a través de sus raíces.

El horizonte del suelo de 0 a 20 cm es la zona más dinámica pues ahí ocurren la mayoría de los procesos microbianos, lo que contribuye al desarrollo de diversas funciones ecológicas como la fijación asimbiótica y simbiótica de nitrógeno atmosférico (Sosa et al., 2014), la habilitación de la materia orgánica hasta las formas químicas asimilables por las plantas (mineralización), la solubilización de compuestos inorgánicos como los fosfatos (Sanclemente et al., 2017), la participación de la dinámica de ciclos biogeoquímicos, la promoción del crecimiento de las plantas (fitohormonas), la asimilación de nutrientes por simbiosis radical en las plantas y la protección a las plantas mediante interacciones antagónicas, así como el mejoramiento de las propiedades físico-químicas del suelo.

Otros organismos microscópicos son las algas fotosintéticas, que fijan al suelo entre 25 y 50 $\text{kgN}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Además, incorporan hidratos de carbono, que estimulan la actividad microbiana. Por su parte, la rizósfera es una zona de interacción única y dinámica entre las raíces de plantas y los microorganismos del suelo. En ella se desarrollan procesos de transformación en equilibrio de los nutrientes del suelo para hacerlos disponibles a las plantas, además de mitigar la contaminación ambiental y mejorar la producción de cultivos. Es por ello que en la actualidad crece significativamente el interés por el uso de los microorganismos del suelo en el sector agrícola, tanto para el control biológico de plagas y enfermedades, como para biofertilizantes y bioestimulantes.



Sin embargo, algunos autores registran alteraciones de estas poblaciones de microorganismos funcionales del suelo como efecto de la aplicación de moléculas de síntesis química en sistemas de cultivo y con ello la pérdida parcial o total de los servicios ecológicos que prestan (Sanclemente et al., 2018; Montenegro et al., 2019).

Sin embargo, algunos autores registran alteraciones de estas poblaciones de microorganismos funcionales del suelo como efecto de la aplicación de moléculas de síntesis química en sistemas de cultivo y con ello la pérdida parcial o total de los servicios ecológicos que prestan (Sanclemente et al., 2018; Montenegro et al., 2019). Por ello, se hace necesario ampliar la investigación encaminada a caracterizar estas poblaciones microbianas en diversos sistemas de cultivo bajo diferentes prácticas, con el fin de identificar manejos agronómicos más sostenibles y amigables con el ambiente.

El departamento del Valle del Cauca en su zona plana se caracteriza por la gran extensión del monocultivo industrial de caña de azúcar con variedades mejoradas y de altos rendimientos. Incluso, algunas suertes se encuentran cultivadas con caña de azúcar desde hace más de un siglo, dando cuenta del estado de las propiedades del suelo y sus poblaciones microbianas como efecto de prácticas agronómicas marcadas en este sistema de cultivo. Por su parte, existen (aunque en menor extensión) otros sistemas de monocultivo de frutas y hortalizas, sistemas agroforestales y pasturas para engorde de ganado en la zona plana del departamento. La agricultura campesina se establece mayoritariamente en las laderas, a pequeña escala y con sistemas de cultivo diversificados bajo prácticas agronómicas convencionales y otras de corte agroecológico (Giraldo et al., 2018).

La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar las poblaciones de algunos microorganismos funcionales del suelo en sistemas de cultivo de zona plana del departamento del Valle del Cauca. Para ello se tomaron muestras en tres zonas del departamento (dos en el municipio de Palmira y una en el municipio de Guacarí), con representatividad de sistemas de cultivo industrial de caña de azúcar, hortalizas, maíz, musáceas, agroforestal y pasturas, así como presencia de relictos de bosque seco y franjas de conservación de guaduales, como referentes del sistema natural. Los datos empleados en esta caracterización corresponden a tres trabajos de investigación de culminación de grado de estudiantes de Agronomía e Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), enmarcados en el proyecto macro titulado “Incidencia de prácticas culturales de productores agrícolas de zona plana del Valle del Cauca sobre la composición de microorganismos del suelo”.

La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar las poblaciones de algunos microorganismos funcionales del suelo en sistemas de cultivo de zona plana del departamento del Valle del Cauca.

1.2 METODOLOGÍA

1.2.1 LOCALIZACIÓN

La caracterización de microorganismos funcionales se realizó en zona plana del departamento del Valle del Cauca (Colombia), en tres sitios representativos de la producción agrícola. Sitio de muestreo 1: Finca El Cairo-corregimiento de Guabitas (Guacarí-Colombia). 3° 45' 34" N; 76° 18' 53" W y altitud 1030 m s. n. m. Sitio de muestreo 2: Finca El Refugio-corregimiento El Bolo (Palmira-Colombia). 3° 27' 45" N; 76° 19' 56" W y altitud 977 m s. n. m. Sitio de muestreo 3: Finca Canta Claro-corregimiento Agua Clara (Palmira-Colombia). 3° 30' 22" N; 76° 14' 20" W y altitud 1040 m s. n. m.

1.2.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN CUALITATIVA RELACIONADA CON PRÁCTICAS DE MANEJO DEL AGROECOSISTEMA

El tamaño y la composición del microbiota del suelo dependen de la vegetación dominante y en particular de las plantas que se encuentren en el sitio de análisis. Aún se desconoce el nivel de interacción de los microorganismos con las plantas y si estas tienen capacidad de control sobre dichas poblaciones rizosféricas. Se sabe que hay una gran variación de microorganismos asociados a una especie de planta desempeñando múltiples funciones que está por conocerse.

Se ha atribuido a los exudados radicales y a otros compuestos específicos derivados de las plantas condiciones para estimular o inhibir selectivamente algunos grupos de microorganismos. Esta capacidad de las plantas sería el factor clave para determinar la selección de poblaciones microbianas con las que interactúa, para recibir beneficios ecológicos como protección contra enfermedades y plagas, además del aporte nutricional, entre otros beneficios.

Es por ello fundamental realizar enfoque diferencial en la toma de muestras rizosféricas dependiendo de las especies plantadas y el tipo de manejo que se le realiza al agroecosistema. En esta investigación, en el sitio de muestreo 1 se evaluó suelo rizosférico en sistemas de cultivo industrial de caña de azúcar (más de 30 años), barbecho (15 años) y gradual (más de 30 años). En el sitio de muestreo 2 se evaluó suelo rizosférico de cultivo de tomate (3 años), maíz (2 años), y sistema agroforestal conformado por algarrobo, musáceas, yuca (15 años) y gradual (más de 30 años). En el sitio de

muestreo 3 se evaluó suelo rizosférico de sistema de cultivo industrial de caña de azúcar (más de 20 años), pasturas para ganadería (25 años) y guadual (más de 40 años).

Para recopilación de información relacionada con las prácticas en los sistemas de cultivo y otros aspectos de los agroecosistemas estudiados se realizaron entrevistas a los propietarios de las haciendas y al personal de apoyo de labores productivas. Se les solicitó información básica del análisis de suelos, y descripción de cada uno de los sistemas de cultivo establecido en términos de área de siembra, breve recuento histórico del lote, tipo de variedades o híbridos sembrados, tipo de siembra (monocultivos y/o policultivos), forma de preparación del suelo, manejo de fertilización del cultivo, control de arvenses, tipo de manejo de plagas y enfermedades, sistema de irrigación y tipo de cosecha. En los tres sitios se contó con un área de guadual que sirvió como sistema referente al tener muy baja o nula intervención antrópica. En todos los sitios se intentó obtener información relacionada con la edad del guadual.

1.2.3 TOMA DE MUESTRAS DE SUELO RIZOSFÉRICO

Durante diciembre de 2017 (sitio 1), febrero de 2018 (sitio 2) y marzo de 2018 (sitio 3) se tomaron muestras en zigzag (entre 15 y 20 submuestras /hectárea) de suelo rizosférico a una profundidad entre 20 y 30 cm mediante uso de palín. En los monocultivos se descartaron los bordes. Las submuestras se homogeneizaron en un balde plástico del cual se tomó 1 kg de suelo aproximadamente, que se empacó en bolsa plástica negra. Teniendo en cuenta el uso del suelo con labores agrícolas, para el caso de los sistemas de cultivo de caña de azúcar, maíz y tomate, el momento del muestreo se determinó en los primeros estados de desarrollo después de algunas labores como el control de arvenses con productos de síntesis química. Las muestras se rotularon con la información técnica (nombre de la finca, ubicación, cultivo actual o para establecer, profundidad, labores realizadas en los cultivos y nombre del solicitante). Posteriormente, las muestras se conservaron en frío (4 °C) y se llevaron al laboratorio microbiológico de la empresa Hongos de Colombia Fungicol S.A.S. del municipio de Palmira.

1.2.4 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS EN LABORATORIO

Los análisis microbiológicos de suelos rizosféricos se realizaron bajo dos criterios: cuantitativos (recuento total) o cualitativos (aislamiento, purificación e identificación). Se procedió de acuerdo con el protocolo de diluciones de Winogradsky. Inicialmente, se registró la muestra con la información técnica requerida por el laboratorio. Se codificó la muestra y se envió al analista del laboratorio. En el cuarto de muestras del laboratorio, sobre un mesón con papel absorbente (periódico), la muestra se extendió para secarla. A la muestra seca se le pasó un rodillo para homogenizarla y luego se separaron los agregados más finos empleando un tamiz de 2 mm de abertura de la malla.

1.2.5 PREPARACIÓN DE LOS MEDIOS DE CULTIVO REQUERIDO PARA CADA GRUPO DE MICROORGANISMO PARA EVALUAR

Para bacterias de vida libre se empleó el medio de cultivo ESGA (extracto de suelo - glucosa - agar). Para hongos del suelo se utilizó el mismo medio de cultivo ESGA (papa dextrosa agar) pero acidificado con ácido láctico al 25 %. El medio para bacterias asimbióticas fijadoras de nitrógeno atmosférico fue el ASHBY. Para bacterias solubilizadoras de fósforo “P” se empleó el medio PVK Pikovskaya modificado. Igualmente se prepararon las diluciones de Winogradsky, que consisten en diluir una serie de sales que le dan al agua (DE) condiciones parecidas al suelo, a fin de minimizar las posibles alteraciones que puedan sufrir las poblaciones microbianas dispuestas en dicha solución una vez se realicen las diluciones seriadas.

1.2.6 PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

Una vez preparados los medios de cultivo y demás equipamiento requerido para el análisis microbiológico se inició la preparación de la muestra de suelo. En la cámara de flujo laminar se dispusieron las herramientas, insumos desinfectantes y cajas de Petri en la cantidad requerida para dispensar los medios de cultivo e inocular la dilución respectiva de la muestra de suelo. Los medios de cultivo se llevaron a baño de María para hasta lograr una temperatura cercana a los 40 °C. Los demás instrumentos fueron esterilizados en autoclave.

De acuerdo con el protocolo de diluciones de Winogradsky (Brown y Smith, 2014), se procedió a realizar las diluciones seriadas de la muestra de suelo. De la muestra tamizada se pesaron 20 g de suelo seco en la balanza de precisión y se adicionaron en un vaso dispensor (desinfectado previamente con alcohol al 70 % y enjuagado con agua de ionizada), aforándose la mezcla a 200 ml con agua deionizada previamente refrigerada; esta corresponde a la dilución 10^{-1} . Se agitó el dispensor durante cinco minutos; posteriormente se continuó la preparación del resto de las diluciones hasta 10^{-9} en cámara deflujo laminar (figura 1.1).

FIGURA 1.1 Diluciones seriadas preparadas en cámara de flujo laminar laboratorio microbiológico de la empresa Hongos de Colombia Fungicol S.A.S. del municipio de Palmira



Fuente: Los autores (2019)

En las diluciones seriadas de Winogradsky se empleó una pipeta con punta estéril por cada transferencia de la dilución más concentrada a la menor concentrada. De la dilución madre 10^{-1} se tomó el volumen de 2 ml para obtener la disolución siguiente empleando 18 ml de agua deionizada (tabla 1.1).

TABLA 1.1 Diluciones seriadas de Winogradsky para análisis microbiológico de suelos

Dilución precedente	Alícuota de dilución precedente	Adición de agua deionizada	Dilución obtenida
10^{-1}	2 ml	18 ml	10^{-2}
10^{-2}	2 ml	18 ml	10^{-3}
10^{-3}	2 ml	18 ml	10^{-4}
10^{-4}	2 ml	18 ml	10^{-5}
10^{-5}	2 ml	18 ml	10^{-6}
10^{-6}	2 ml	18 ml	10^{-7}
10^{-7}	2 ml	18 ml	10^{-8}
10^{-8}	2 ml	18 ml	10^{-9}

Fuente: Adaptado de la metodología de Winogradsky

El diseño de inoculación de la muestra diluida en las cajas de Petri se realizó de acuerdo con la tabla 1.2. Se realizaron tres repeticiones por cada dilución, para un total de 54 cajas de Petri para los cuatro grupos de microorganismos evaluados. Las cajas de Petri fueron rotuladas indicando la dilución, el grupo de microorganismo funcional y el medio de cultivo. Dentro de la cámara de flujo laminar se realizó la inoculación; para ello, se empleó una micropipeta automática estéril de 1 ml. Luego de agitar los tubos con cada dilución, se inició inoculando las cajas de Petri correspondientes a 10^{-9} y se continuó con la misma micropipeta hasta terminar en la dilución 10^{-3} , según correspondiera al grupo de microorganismo.

TABLA 1.2 *Diseño de inoculación de diluciones en cajas de Petri según grupo de microorganismo (MO) funcional del suelo*

Grupo de MO	Dilución	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Bacterias totales de vida libre				X	X	X	X	X	X
Hongos totales del suelo				X	X	X	X		
Bacterias fijadoras de N_2				X	X	X	X		
Bacterias solubilizadoras de fosfatos			X	X	X	X			

Fuente: Los autores

Una vez terminada la fase de inoculación se agruparon las cajas rotuladas con cada grupo de microorganismo para adicionarle el respectivo medio de cultivo. Para el caso de bacterias totales, se adicionó una película de 8 ml del medio ESGA a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, distribuyéndolo homogéneamente con el inóculo adicionado. Para hongos, al medio ESGA se le adicionaron cinco gotas de ácido láctico al 25 %, con el fin de ajustar el pH a cerca de 5,5 y evitar el desarrollo de bacterias. Terminada la fase de inoculación y vaciado del medio de cultivo, las cajas se dejaron en reposo dentro de la cámara hasta su enfriamiento y solidificación. Una vez solidificadas las cajas, se llevaron a incubación a temperatura de $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los siguientes periodos de incubación: bacterias totales entre 24 y 48 horas, bacterias solubilizadoras de fosfatos 48 a 72 horas, bacterias fijadoras de nitrógeno entre 96 y 144 horas y hongos totales 72 a 96 horas.

1.2.7 ESTIMACIÓN DE LAS UNIDADES FORMADORAS DE COLONIAS (UFC) PARA CADA GRUPO DE MICROORGANISMO FUNCIONAL

La estimación de unidades formadoras de colonias se realizó mediante promedio ponderado de las poblaciones microbianas en cada grupo definido. Para la cuantificación se tuvieron en cuenta para cada grupo funcional los siguientes rangos de poblaciones: bacterias totales (entre 0 y 100 unidades formadoras de colonias) y hongos (entre 0 y 30 unidades formadoras de colonias); las unidades experimentales que superaron este rango se descartaron. Para los grupos funcionales de bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fosfatos no se aplicó esta selección ya que sus poblaciones son muy inferiores.

Cumplido el tiempo de incubación se procedió a realizar el recuento de las poblaciones desarrolladas en cada medio de cultivo inoculado. Para ello, se dispusieron las cajas de Petri sobre una mesa y se agruparon por microorganismo funcional y dilución. El recuento se realizó con el dispositivo cuenta colonias (digital). El cálculo numérico de las unidades formadoras de colonia se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ufc/g.s.s} = 10^4 * [(T * P * 10^0) + (T * P * 10^1) + (T * P * 10^n) / N]$$

Donde:

Ufc/g.s.s: Unidades formadoras de colonias por gramo de suelo seco.

10^4 : Factor común para las diluciones de los grupos bacterias, hongos y fijadoras asimbióticas de N_2 . Para solubilizadores de fosfatos el factor fue de 10^3 .

T = Total de colonias contadas en la dilución 10^n .

P = Promedio de colonias contadas en la dilución 10^n .

N = Número total de las colonias en todas las diluciones.

El exponente negativo (-) es para las diluciones; para la cuantificación este cambió a positivo (+) ej. 10^4 .

1.2.8 ESTIMACIÓN DE ARVENSES

Con el fin de asociar los resultados microbiológicos del suelo con las coberturas vegetales, se realizó un aforo y caracterización de algunas arvenses presentes en los sistemas evaluados. Al azar se determinó un sitio dentro de cada parcela para contar las arvenses que se encontraban presentes en el aforador de madera de 1 m² de acuerdo con la metodología del cuadrante de 0.5 m X 0.5 m determinado para sistemas de cultivos tropicales según Ararat et al. (2014).

1.2.9 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para los datos obtenidos a partir del conteo de microorganismos edáficos se realizaron análisis de estadística descriptiva para establecer los promedios de las unidades formadoras de colonias asociadas a cada agroecosistema.

1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.3.1 INFORMACIÓN CUALITATIVA RELACIONADA CON PRÁCTICAS DE MANEJO DEL AGROECOSISTEMA

Se describieron las condiciones ambientales de la zona de estudio a través del reconocimiento del terreno (propiedades del suelo) y prácticas culturales asociadas al manejo del agroecosistema en los sitios de muestreo con miras de establecer su relación con el tamaño de poblaciones de microorganismos funcionales del suelo (tabla 1.3). Se evidenció manejo del suelo por mecanización en todos los sitios antes de la siembra.

TABLA 1.3 *Propiedades del suelo y prácticas culturales para el manejo del agroecosistema en los sitios de muestreo*

Sitio	Propiedades del suelo	Manejo del agroecosistema
<p>Finca El Cairo, corregimiento Guabitas, municipio de Guacarí</p>	<p>Materia orgánica: 3.2 % pH: 7,1 Textura: franco arcillosa y arcillosa</p>	<p>Sistema de cultivo de caña de azúcar Área sembrada de 0.91 ha. Históricamente el lote se encontraba sembrado con árboles frutales (mango, guama, guayaba y limón). Desde hace una década el terreno se siembra con caña de azúcar (variedad CC 85-92) en monocultivo. Se realiza cosecha de las cañas una vez al año en los meses de octubre y noviembre. El manejo del cultivo incluye la adecuación del suelo mecanizada y subsolado, la aplicación de fertilizantes de síntesis química (urea, KCl, sulfato di amónico) y vinazas como subproducto de la destilería de alcohol carburante. Se hace manejo de arvenses con herbicidas ametrina y glifosato. El riego se realiza por gravedad. Se realizan quemas controladas y posterior cosecha manual.</p> <p>Sistema gradual Área establecida de 290 m². De acuerdo con residentes el gradual se encuentra desde hace más de cuarenta años. La intervención es prácticamente nula; se extrae la guadua esporádicamente como material de construcción.</p> <p>Sistema barbecho Área establecida de 575 m². No se conoce de establecimiento de cultivos comerciales o de pan coger en los últimos cincuenta años. El manejo realizado es de podas y quemas periódicas.</p>
<p>Finca El Refugio, corregimiento El Bolo, municipio de Palmira</p>	<p>Materia orgánica: 2.5 % pH: 6,8 Textura: franco arcillosa</p>	<p>Sistema de cultivo de maíz Área sembrada de 6400 m². Variedad ICA 305. El lote estuvo en barbecho y desde hace cinco años se siembra semestralmente con monocultivo de maíz. Antes de la siembra se realiza un pase de rastra con tractor. Se realiza fertilización de síntesis química con NPK 15-15-15. Se hace control de arvenses en las calles con glifosato. Se realiza riego por aspersión en épocas secas. La cosecha se hace de forma manual.</p>

Finca El Refugio, corregimiento El Bolo, municipio de Palmira

Materia orgánica: 2.5 %
pH: 6,8
Textura: franco arcillosa

Sistema de cultivo de tomate

Área sembrada de 3200 m². Variedad larga vida. El lote estuvo en barbecho y desde hace tres años se siembra semestralmente con monocultivo de tomate. Antes de la siembra se realiza un pase de rastra con tractor. Se realiza germinación de la semilla en bandejas y a los 25 días se planta en el campo. Antes del trasplante se aplica herbicida S-metolacoloro. Se realiza fertilización de síntesis química con NPK 15-15-15, sulfato de calcio y magnesio. Se hace control de arvenses con herbicida posemergente tipo glifosato en las calles. Se emplea el riego por goteo en épocas secas. Se aplican fungicidas cobrethane, ridomil, benomyl y galben para el control de Fusarium spp., Rhizoctonia spp. y Phytophthora spp. Para control de plagas se emplean los insecticidas malatión y carbofurán. La cosecha se hace de forma manual.

Sistema agroforestal

Área sembrada de 6600 m². Se establecieron Leucaena Leucocephala, heliconias y algarrobo en policultivos bajo arreglos agroforestales, sirviendo de lindero el algarrobo y leucaena. Este sistema se estableció hace 10 años y se encuentra en etapa productiva. No se realiza aplicación de agroquímicos. Se han establecido arvenses nobles en forma de cultivos de cobertura. La cosecha de heliconias se realiza de forma manual.

Sistema gradual

Área establecida de 1200 m². De acuerdo con residentes, el gradual se encuentra establecido desde hace más de cincuenta años. Este actúa como vegetación de soporte de la ribera de la quebrada Bolito. La intervención es prácticamente nula; se extrae la guadua esporádicamente y se emplea como material de construcción.

Finca Canta Claro, corregimiento de Aguaclara, municipio de Palmira

Materia orgánica: 3.5 %
pH: 5,5
Textura: franco arcillo arenosa

Sistema de cultivo de caña de azúcar

Área sembrada de 79.25 ha. Históricamente el lote se encontraba en pasturas para ganado de engorde. Desde hace 15 años el terreno se siembra con caña de azúcar (variedades CC 85-92 y CC 84-75) en monocultivo. El manejo del cultivo incluye la adecuación del suelo mecanizada y subsolado, la aplicación de fertilizantes de síntesis química (urea, KCl) y vinazas como subproducto de la destilería de alcohol carburante. Se hace manejo de arvenses con herbicidas sifurán, amina y glifosato. El riego se realiza por ventanas. No se realizan quemas. Se realiza cosecha de las cañas de manera permanente y de forma mecanizada.

Sistema de pasturas

Área sembrada de 51.5 ha. Los pastos establecidos son raigrás (*Lolium sp.*), elefante (*Pennisetum purpureum*) y estrella (*Cynodon plectostachyus*). Se cuenta con ganado doble propósito. Los pastos se fertilizan semestralmente con urea y fosfato di amónico. Se emplea riego por aspersión en épocas secas.

Sistema gradual

Área establecida de 450 m². De acuerdo con residentes, el gradual se encuentra establecido en ese sitio desde hace más de cuarenta años. El gradual actúa como vegetación de soporte y barrera viva sirviendo de corredor biológico de aves, reptiles y mamíferos. La intervención es prácticamente nula; se extrae la guadua esporádicamente como material de construcción.

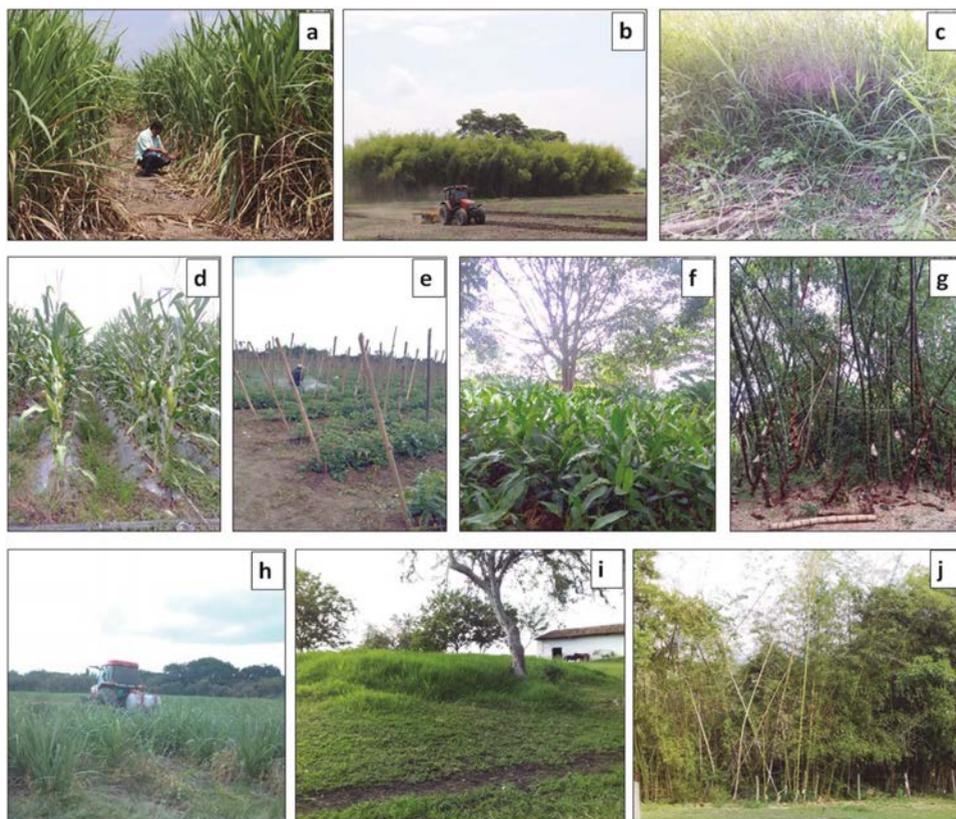
Fuente: Los autores a partir de resultados de las encuestas a propietarios y personal de apoyo

Frente a las expectativas del paisaje y las respectivas condiciones ambientales de cada zona de muestreo, se estimaron cualitativamente algunos sistemas con la respectiva cobertura dominante de arvenses, como por ejemplo en el sistema de pasturas con mayor abundancia de pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) y el sistema de barbecho con especies de hoja angosta (*Panicum máximum*, *Cynodon dactilon* y *Cyperus rotundus*) y algunas de hoja ancha, principalmente la leguminosa *Arachis pintoi* (figura

1.2, recuadros c, i). Estas identificaciones coinciden con lo reportado por Ararat et al. (2014), donde se definió la mayor cobertura del suelo con especies de barbecho y cuya biomasa podría considerarse como estrategia de protección sobre el suelo.

Para el caso de los sistemas agrícolas se evidenció mayor área descubierta del suelo por labores de preparación (calles para riego por gravedad en caña de azúcar, maíz y tomate), el cual presentó dominancia de especies de arvenses de hoja ancha como por ejemplo la “verdolaga” (*Portulaca oleracea*) y hoja angosta como la denominada “caminadora” *Rottboellia exaltata* (L.). Según Mortimer (1990), la preadaptación de estas poblaciones suele conceptualizarse con el término de “maleza” y esperan el momento oportuno dentro del sistema de producción causando rápidos cambios de la abundancia relativa, lo que implica un manejo que generalmente se hace a través de control convencional con el uso de herbicidas postemergentes de síntesis química.

FIGURA 1.2 *Sistemas de cultivo evaluados. Hacienda El Cairo: a) Caña de azúcar, b) Guadual y c) Barbecho. Hacienda El Refugio: d) Maíz, e) Tomate, f) Agroforestal y g) Guadual. Hacienda Canta Claro: h) Caña de azúcar, i) Pasturas y j) Guadual*



Fuente: Los autores (2019)

Considerando aspectos botánicos y ecológicos, la cobertura sobre el suelo en el sistema de guadual estuvo caracterizada por hojarasca seca de esta misma especie, lo que podría generar un proceso de descomposición de la materia orgánica de un material más homogéneo comparado con los otros sistemas evaluados. En este caso, según Quideau et al. (2005), la descomposición de estos residuos naturales incluye la fragmentación física por organismos macro invertebrados epigeos, degradación química por enzimas producidas por bacterias y/o hongos y la lixiviación de compuestos orgánicos e inorgánicos solubles que pueden quedar disponibles para contribuir a la nutrición de las plantas; estos procesos naturales están relacionados con servicios ecosistémicos de abastecimiento según los planteamientos de Monsalve et al. (2019) con respecto a las acciones de microorganismos en el suelo.

TABLA 1.4 Estimación de poblaciones de microorganismos funcionales del suelo en los tres sitios de muestreo

Sitio	Agroecosistema	Bacterias totales del suelo (UFCb.g ⁻¹ suelo seco)	Bacterias fijadoras de N ₂ de vida libre (UFCb.g ⁻¹ suelo seco)	Bacterias solubilizadoras de fosfatos (UFCb.g ⁻¹ suelo seco)	Hongos totales del suelo (UFCf.g ⁻¹ suelo seco)
Hacienda El Cairo, corregimiento Guabitas, municipio de Guacarí	Monocultivo de caña de azúcar	7.57 x 10 ⁸	7.53 x 10 ⁵	7.80 x 10 ⁴	1.48 x 10 ⁵
	Barbecho	3.03 x 10 ⁹	8.74 x 10 ⁵	3.39 x 10 ⁴	1.43 x 10 ⁶
	Guadual	1.56 x 10 ⁹	1.53 x 10 ⁵	1.24 x 10 ⁵	1.34 x 10 ⁶
Hacienda El Refugio, corregimiento El Bolo, municipio de Palmira	Monocultivo de maíz	4.50 x 10 ⁶	2.30 x 10 ⁴	1.80 x 10 ¹	1.70 x 10 ⁵
	Monocultivo de tomate	1.10 x 10 ⁷	2.10 x 10 ⁴	1.50 x 10 ¹	1.01 x 10 ⁴
	Sistema agroforestal	3.30 x 10 ⁶	1.50 x 10 ⁵	2.01 x 10 ¹	1.50 x 10 ⁵
	Guadual	1.10 x 10 ⁶	7.90 x 10 ⁵	1.33 x 10 ²	4.80 x 10 ⁴
Hacienda Canta Claro, corregimiento de Aguacalara, municipio de Palmira	Monocultivo de caña de azúcar	5.50 x 10 ⁸	N/A	7.40 x 10 ³	N/A
	Pasturas	3.34 x 10 ⁸	N/A	2.31 x 10 ⁴	N/A
	Guadual	1.24 x 10 ⁸	N/A	6.18 x 10 ⁴	N/A

Fuente: Los autores a partir de resultados en laboratorio Hongos de Colombia Fungicol S.A.S.

Los suelos de los sistemas evaluados presentaron una tendencia diferencial entre las fincas con respecto a las UFC de microorganismos como lo muestra la tabla 1.4; se re-

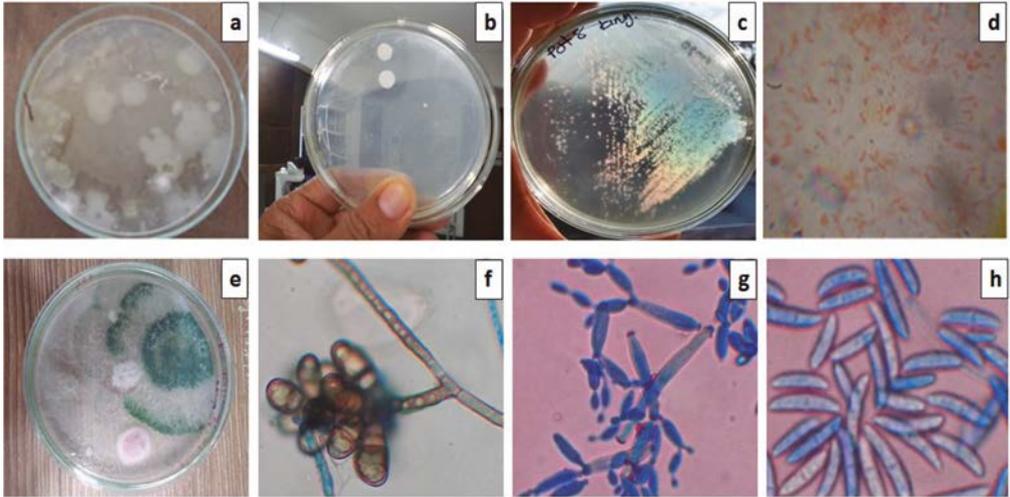
salta en la hacienda El Cairo (municipio de Guacarí) las altas poblaciones de bacterias totales del suelo en el sistema barbecho con $3,03 \times 10^9$ seguido por sistema gradual con $1,56 \times 10^9$ UFC y por último el sistema de monocultivo de caña de azúcar con $7,57 \times 10^8$ UFC. Esto se debe a que la actividad y biomasa de microorganismos en el barbecho y el gradual pueden estar influenciadas por la estabilidad de las coberturas, además de las condiciones de sombra y humedad existentes, lo que permite una mejor adaptación de estas poblaciones bacterianas, a diferencia de los sistemas de caña que están expuestos a cambios inducidos por labores agrícolas que perturban la estabilidad, como lo explica Águila et al. (2016).

Para el caso de las fincas evaluadas en el municipio de Palmira (El Refugio y Canta Claro), la situación fue contraria con respecto a poblaciones de bacterias totales, identificando los sistemas de cultivo (tomate, maíz y caña de azúcar) con las mayores UFC de bacterias totales del suelo y el sistema gradual con las menores cantidades. Según Rubio (2011), esta situación contrastante explicaría que las poblaciones microbianas pueden responder a los diferentes sistemas de manejo como resultado de las labores de cultivo y, en consecuencia, la comunidad microbiana puede reajustarse de acuerdo con las relaciones de competencia.

En cuanto a las bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN), el sistema maíz y el sistema tomate presentaron los más bajos valores de UFC en la finca El Refugio (Palmira); en la finca El Cairo (Guacarí) reportó el valor más alto el sistema barbecho. Dado que este sistema estuvo dominado por especies de cobertura como *Arachis pintoii*, según Valles et al. (2008), esta condición puede estar favorecida por la porosidad en la profundidad y la biomasa de estas raíces, siendo definitivamente el factor más importante para explicar la actividad microbiana no solamente en bacterias simbióticas sino también en microorganismos fijadores de N_2 de vida libre que facilitan la respectiva mineralización de este elemento, lo cual puede entenderse por el aporte de hojarasca del resto de las especies en la superficie del suelo. En el caso de sitios con *A. pintoii*, se puede encontrar un gran volumen de raíces primarias y secundarias a la profundidad de 5-10 cm.

Para el caso de bacterias solubilizadoras de fosfatos (BSF) en las tres localidades, se obtuvo una tendencia de mayor cantidad de estas poblaciones en el sistema gradual; esto probablemente se deba a la presencia de gran cantidad de microorganismos capaces de solubilizar el fósforo en este sistema, como el caso del género *Pseudomonas fluorescens* (figura 1.3, recuadro c), un género que se caracteriza potencialmente por solubilizar fosfatos del suelo, según Patiño y Sanclemente (2014).

FIGURA 1.3 Algunos microorganismos del suelo observados en la investigación: a) Caja de Petri con colonias bacterianas, dilución 1×10^{-6} ; b) Caja de Petri con colonias bacterianas solubilizadoras de P en medio Pikovskaya; c) Caja de Petri con cultivo puro de la bacteria *Pseudomonas fluorescens*- solubilizadora de P; d) observación al microscopio de *Azospirillum sp.*- bacteria asimbiótica fijadora de N_2 ; e) Caja de Petri con crecimiento del hongo *Trichoderma sp.*, f) observación al microscopio del hongo *Curvularia sp.*, g) observación al microscopio de conidióforo del hongo *Cladosporium sp.*, h) observación al microscopio de conidias del hongo *Fusarium sp.*



Fuente: Los autores (2019)

Por otra parte, y dada la importancia de los hongos totales del suelo (HTS), se puede destacar la funcionalidad saprofita de ciertas especies como es el caso de *Cladosporium sp* (figura 1.3, recuadro g), que reporta las mayores UFC en el sistema barbecho con 1.48×10^5 seguido del sistema agroforestal con 1.50×10^5 , lo que constituye una relación de los aportes de carbono de estos ambientes con la constante cobertura vegetal y material orgánico en descomposición proveniente de las arvenses, según Ararat et al. (2014). Es probable que los valores de HTS en los sistemas de caña, maíz y tomate estén influenciados por la presencia de *Fusarium sp.* (figura 1.3, recuadro h), los cuales causan problemas fitosanitarios en especies agrícolas como lo reporta De la Torre (2015).

1.4 CONCLUSIONES

Este tipo de evaluaciones de microorganismos del suelo en diferentes sistemas y localidades y su relación con ciertas condiciones físicas y químicas implica no solo el análisis de las UFC hongos y bacterias benéficas, sino también de los tipos de coberturas que permitan estimar la funcionalidad de estos y la proyección del uso y manejo del suelo para la sostenibilidad, en este caso resaltando gramíneas y leguminosas en sistema barbecho.

En esta investigación se evidenció la incidencia de las prácticas de cultivo en la composición de poblaciones microbianas del suelo con funciones ecológicas específicas como el ciclaje de nutrientes y la descomposición de residuos orgánicos. Esta información permite aportar elementos para que los productores logren conciliar sus itinerarios de cultivo con la conservación del microbiota del suelo y con ello los servicios ecológicos que proveen.

En esta investigación se evidenció la incidencia de las prácticas de cultivo en la composición de poblaciones microbianas del suelo con funciones ecológicas específicas como el ciclaje de nutrientes y la descomposición de residuos orgánicos. Esta información permite aportar elementos para que los productores logren conciliar sus itinerarios de cultivo con la conservación del microbiota del suelo y con ello los servicios ecológicos que proveen.

1.5 REFERENCIAS

Águila, E., Marrero, Y., Hernández, P. y Ruiz, Y. (2016). Efecto del uso del suelo sobre su calidad en áreas de la Finca “Baños de Marrero”. *Centro Agrícola*, 43(2), 14-22.

Ararat, M., Sinisterra, C. y Hernández, C. (2014). Valoraciones agronómicas y de rendimiento en la cosecha de “papa china” (*Colocasia esculenta* L.) en el trópico húmedo colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(2), 169 - 180. <https://doi.org/10.22490/21456453.1335>

Brown A. y Smith H. (2014). *Benson’s Microbiological Applications, Laboratory Manual in General Microbiology, Short version*, McGraw-Hill Education.

Cabrera, G. (2012). La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. *Revista Pastos y Forrajes*, 35(4), 349-363.

Correa, D. (2015). *Indicadores de riesgo de desertificación en zonas del Valle del Cauca (Colombia)* (tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.

De la Torre, M., Sánchez D., Galeana E. y Plasencia J. (2014). Fumonisinias –Síntesis y función en la interacción *Fusarium verticillioides*-maíz. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), 77-91. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v17n1/v17n1a6.pdf>

Feijoo, A., Quintero, H., Fragoso, C. y Moreno, A. (2004). Patrón de distribución y listado de especies de las lombrices de tierra (Annelida, Oligochaeta) en Colombia. *Acta Zoológica Mexicana*, 20(2), 197-220. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372004000200013

Giraldo, R., Nieto, L., Quiceno, A. y Sanclemente, O. (2018). Evaluación de sostenibilidad en agroecosistemas campesinos del corregimiento de San Isidoro, Pradera, Valle del Cauca, Colombia. En E. Arnés, y M. Astier (Coords.), *Sostenibilidad de sistemas de manejo de recursos naturales en países andinos* (pp. 125-150). UNESCO y CIGA Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México –UNAM. https://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/MESMIS.pdf

IDEAM y UDCA. (2015). *Síntesis. Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia 2015*. IDEAM - MADS. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023646/Sintesis.pdf>

Monsalve, L., Valencia, F., Guzmán, A., Duque, C., Pérez, D., Valderrama, C., Moraes, J. y Polanco, M. (2019). Capítulo 2: Servicio ecosistémico de abastecimiento: alimentos. *Libros Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 34-56. <https://doi.org/10.22490/9789586516358.02>

Montenegro, S., Barrera, S., Chiriví, J., Pulido, S., Sepúlveda, Y., Vinasco, M. y Palomino, M. (2019). Capítulo 9. Prevención de la erosión y conservación de la fertilidad del suelo. *Libros Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 172-187. <https://doi.org/10.22490/9789586516358.09>

Mortimer, A. (1990). The Biology of Weeds. En R. Hance y K. Holly (Eds.), *Weed Control Handbook: Principles* (pp 1-42). Blackwell Scientific Publications.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/jicode/>

Patiño C. y Sanclemente O. (2014). Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Revista Entramado*, 10(2), pp. 288-297. <http://www.scielo.org.co/pdf/entra/v10n2/v10n2a18.pdf>

Perfecto, I., Vandermeer, J. y Wright, A. (2009). *Nature's Matrix: Linking Agriculture, Conservation and Food Sovereignty*. Routledge.

Quideau, S., Graham, R., Oh, S., Hendrix, P. y Wasylishen, R. (2005). Leaf litter decomposition in a chaparral ecosystem, Southern California. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(11), 1988-1998. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.01.031>

Rendón, S., Artunduaga, F., Ramírez, R., Quiroz, J. y Leiva, E. (2011). Los Macroinvertebrados como Indicadores de la Calidad del Suelo en Cultivos de Mora, Pasto y Aguacate. *Revista Facultad Nacional de Agronomía- Medellín*, 64(1), 5793-5802. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179922364005>

Rubio, L. (2011). *Influencia de los sistemas agrícolas convencional y tradicional sobre indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo Pardo Mullido Carbonatado*. (tesis de pregrado). Universidad Central Marta Abreu, Santa Clara, Cuba.

Sanclemente, O., Yacumal, V. y Patiño, C. (2017). Solubilización de fosfatos por bacterias nativas aisladas en tres agroecosistemas del Valle del Cauca (Colombia). *Temas Agrarios*, 22(2), 61-69. <https://doi.org/10.21897/rta.v22i2.945>

Sanclemente, Ó., Sánchez, M. y Prager, M. (2018). Prácticas agroecológicas, micorrización y productividad del intercultivo maíz - soya (*Zea mays* L. - *Glycine max* L.). *Idesia*, 36(2), 217-224. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005000301>

Sosa, B., Sánchez, M. y Sanclemente, Ó. (2014). Influencia de abonos verdes sobre la dinámica del nitrógeno en un Typic Haplustert del Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 63(4), 343-351. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n4.38528>

Valles, B., Cadisch, G. y Castillo, E. (2008). Mineralización de nitrógeno en suelos de pasturas con *Arachis pintoi*. *Técnica Pecuaria en México*, 46(1), 91-105.



CAPÍTULO

RELACIÓN DE USO DEL SUELO AGROPECUARIO CON EL PROCESO DE EUTROFIZACIÓN POR ALGAS Y PRESENCIA DE CARACOLES EN SISTEMA DE POTABILIZACIÓN DEL CORREGIMIENTO EL VÍNCULO (BUGA-VALLE DEL CAUCA)



Luis Felipe Arteaga Aguilera
Ángela María Arango Arias
Óscar Eduardo Sanclemente Reyes
Milton Cesar Ararat Orozco
Mauricio García Arboleda

2.1 INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación Producción Sostenible del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) tiene como líneas de investigación: desarrollo rural, biotecnología, biología del suelo, gestión ambiental y sostenibilidad. A través de diferentes proyectos, el grupo estudia algunas problemáticas de la comunidad y genera soluciones acordes a las condiciones del contexto local. Una de estas problemáticas está relacionada con la contaminación de fuentes hídricas y sistemas de abastecimiento de agua potable deficientes, sobre todo en la zona rural donde el tratamiento es poco tecnificado, lo que reduce notablemente su calidad para consumo humano.

La planta de potabilización del corregimiento El Vínculo, municipio de Buga (Valle del Cauca), abastece del preciado líquido a 570 personas y tiene una capacidad instalada para tratar hasta $453 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$. En el año 2015 la PTAP comenzó a mostrar una problemática relacionada con la eutrofización por algas de los estanques de sedimentación y, seguido de ello, la aparición de dos especies de caracoles dulceacuícolas. Esta problemática generó alertas en los funcionarios de la planta, que comenzaron a realizar un manejo por limpieza periódica de los sedimentadores; sin embargo, este no fue efectivo debido a la alta tasa reproductiva de algas y caracoles y a los costos operativos que implicaban la suspensión del tratamiento para estas labores de mantenimiento.

Mediante el proyecto de investigación titulado “Manejo integral de caracoles dulceacuícolas en la planta de abastecimiento de agua potable del corregimiento El Vínculo (Buga-Valle del Cauca)” desarrollado por el grupo de investigación Producción Sostenible en 2016 se formularon inicialmente algunas hipótesis explicativas del problema de eutrofización en la PTA, relacionadas con el exceso de nutrientes en el afluente y los altos tiempos de retención del agua en los sedimentadores. De acuerdo con Flórez y Porras (2012), el exceso de nutrientes en solución incrementa las poblaciones de algas que metabólicamente los aprovechan durante el proceso fotosintético. En ecosistemas acuáticos tropicales, nutrientes como amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), fosfato (PO_4^-) y otros incrementan las poblaciones de algas azul-verdosas, lo que genera un ambiente eutrofizado con bajos contenidos de oxígeno disuelto y poco favorable para la vida aeróbica (Abella y Martínez, 2012; Claros, 2012; Zouiten, 2012). Otras alteraciones relacionadas con la eutrofización por algas son la bioacumulación de sustancias tóxicas, la aparición de diferentes especies en el ecosistema (especies invasoras) y la proliferación de patógenos y vectores (Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina, 2010).

Seguido de la formulación de hipótesis de investigación, se propuso como objetivo la caracterización del proceso de eutrofización por algas y caracoles dulceacuícolas en la PTAP, que incluyera la evaluación de variables físico-químicas del agua, la identificación taxonómica de las algas y caracoles presentes, así como el diálogo de saberes con actores sociales de la comunidad, funcionarios de la planta y de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Lo anterior con motivo de identificar otras actividades antrópicas relacionadas con el manejo de la cuenca hidrográfica el río Sonsito, afluente que abastece de agua la planta. De acuerdo con Vázquez et al. (2012), los usos del suelo para ganadería y agricultura convencional implican generalmente labranza y aplicación de agroquímicos que ocasionan aspectos ambientales como la erosión laminar y la salinización del suelo y, en últimas, contribuyen a la eutrofización de ecosistemas acuáticos.

De acuerdo con Vázquez et al. (2012), los usos del suelo para ganadería y agricultura convencional implican generalmente labranza y aplicación de agroquímicos que ocasionan aspectos ambientales como la erosión laminar y la salinización del suelo y, en últimas, contribuyen a la eutrofización de ecosistemas acuáticos.

En la adición de dosis altas de fertilizantes nitrogenados y fosforados se generan excesos que no alcanzan a ser retenidos por el suelo o absorbidos por las plantas y en muchas ocasiones generan problemas de contaminación de recursos hídricos por percolación o arrastre de escorrentía, lo que origina alteraciones en la biología de los ecosistemas acuáticos y ambientes eutrofizados (Ruda et al., 2004; Peña et al., 2005; Eugercios et al., 2017). Inclusive en sistemas artificiales eutrofizados, como el caso de estudio de la presente investigación, pueden proliferar algunos organismos vectores de parásitos y/o enfermedades transmisibles a los seres humanos, según la

Organización Mundial de la Salud (2017). La situación puede agravarse cuando la comunidad se expone directamente al contacto con estos organismos, incrementándose los riesgos a la salud.

Los resultados obtenidos en la presente investigación indicaron la presencia en la PTAP de dos especies de moluscos: *Melanoides tuberculata* y *Lymnaea columella*, ligados al alga *Hydrodictyon Reticulatum* que les sirve de alimento y hábitat reproductivo. Según la literatura, *M. tuberculata* es portadora del parásito *Schistosoma* sp. causante de la enfermedad esquistosomiasis (Sri-aroon et al., 2005) y *L. columella* hospedero de la *Fasciola hepática* que genera la enfermedad llamada fascioliasis (Salazar et al., 2006). A pesar de que en la comunidad del corregimiento El Vínculo no hubo reportes sobre este tipo de afectaciones a la salud de la población durante el periodo de aparición de los caracoles, es conveniente advertir sobre los riesgos que conlleva consumir agua potable en contacto con los moluscos, máxime cuando estas especies tienen una alta tasa reproductiva (Gillespie y Clague, 2009; Pointer et al., 2007), pudiendo propagarse aguas arriba y afectar a otros pobladores.

El conocimiento de las causas y posibles riesgos de la presencia de estas especies, así como el diálogo de saberes con los funcionarios de la PTAP y autoridad ambiental CVC a partir de la caracterización realizada, permitieron generar acciones de manejo integral de la problemática como el control químico de caracoles y algas por clorinación fraccionada en tanques de sedimentación y compromisos concertados con productores agrícolas de la cuenca del río Sonsito para su conversión a prácticas más amigables con el ambiente a fin de reducir la carga de nutrientes en el agua y evitar nuevos eventos similares. Estas acciones hicieron parte de la gestión de las empresas y funcionarios involucrados en el acompañamiento de la investigación aunque no se desarrollaron en este escrito.

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 LOCALIZACIÓN

La presente investigación se realizó en la planta de potabilización de agua (PTAP) del corregimiento El Vínculo en Buga -Valle del Cauca. (3° 48' 56,76" N; 76° 18' 22,33" O y 979 m s. n. m.). La fase de caracterización de las propiedades fisicoquímicas del agua se realizó entre los meses de diciembre de 2016 (época seca) y abril de 2017 (época lluviosa). Los sitios de muestreo fueron la bocatoma del río Sonsito (afluente), los tanques y filtros del proceso en la planta y el efluente. Las muestras se tomaron a una

profundidad de 30 cm en puntos concéntricos descartando los bordes (Instituto Nacional de Salud, 2011). Las muestras fueron almacenadas en frascos de vidrio color ámbar, debidamente etiquetados, fueron transportados en frío (aprox. 4 °C) para su respectivo análisis fisicoquímico en el laboratorio de química analítica de la UNAD en el municipio de Palmira-Valle del Cauca.

2.2.2 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL AGUA DE LA PTAP

2.2.2.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE NUTRIENTES

En laboratorio se realizó análisis de los contenidos de nutrientes disueltos (nitratos, nitritos, amonio y carbonatos), sólidos disueltos totales, potencial de hidrógeno, dureza y conductividad eléctrica de iones en las muestras de agua tomadas en diferentes puntos de la planta potabilizadora como se describe a continuación.

2.2.2.2 DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE AMONIO, NITRITOS Y NITRATOS

Se emplearon los kits visocolor ECO Ammonium 3 y Quatofix Nitrat-Nitrit, con test por determinación colorimétrica de los iones de amonio, nitratos/nitritos. Los niveles de estos nutrientes son indicadores importantes de la calidad del agua, teniendo relación con el ciclo del nitrógeno. El amonio es un indicador de posible contaminación del agua por materia orgánica y descomposición por agentes bacterianos. El amonio y el nitrato son nutrientes altamente solubles que comúnmente aparecen en ecosistemas acuáticos como consecuencia de la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la parte alta y media de la cuenca hidrográfica. Los niveles excesivos de estos compuestos en cuerpos de agua pueden generar procesos de eutrofización del sistema por algas.

Para la determinación del amonio se empleó la reacción con cloro en medio alcalino y su formación de monocloramina mediante método colorimétrico por indicadores. Se completaron contenedores de 5 ml con la muestra de agua utilizando pipeta. Luego se colocó el contenedor de medida en la posición A del indicador (kit visocolor ECO) y posteriormente se adicionaron los reactivos indicadores en el recipiente B. Se adicionaron 10 gotas del reactivo colorimétrico NH_4^{-1} , se tapó el contenedor y se mezcló; luego se añadió una cuchara medidora rasa del indicador NH_4^{-2} , se cerró el recipiente y se agitó hasta que se disolvió el polvo. Se dejó reaccionar durante cinco minutos. Seguidamente se añadieron cuatro gotas del indicador NH_4^{-3} , agitando el recipiente. Después de siete minutos se abrió el recipiente y se vertió el contenido en la Pos. B

del comparador para hacer finalmente lectura en la tabla comparadora. Los valores intermedios en mg.L^{-1} se interpolaron.

La determinación de nitratos y nitritos se realizó mediante bandas reactivas kit Quato-fix Nitrat-Nitrit. Inicialmente se sumergieron las bandas con ambas almohadillas por 1 s en la muestra de agua, luego se mezcló un poco el recipiente y se esperó un minuto para que se generara la reacción comparando la parte reactiva con la escala de colores y valores de concentración en mg.L^{-1} .

2.2.2.3 DETERMINACIÓN DE LA REACCIÓN DEL AGUA (PH), CONDUCTIVIDAD Y SÓLIDOS DISUELTOS

En la mediación de la calidad de aguas potables, el pH es un parámetro que da cuenta de la presencia de iones en solución, pudiendo ser algunos de estos perjudiciales para la salud de los consumidores. La determinación de la reacción del agua (pH) y su conductividad eléctrica, se realizó mediante equipo pH-metro multiparámetro. Con este mismo equipo se determinaron los sólidos disueltos en el agua TDS (total solidos disueltos) por sonda de detección. Para ello, se emplearon muestras de 100 ml de agua, sumergiendo la sonda del equipo para su posterior lectura en dataloger. La conductividad eléctrica se expresó en μS (micro siemens). El contenido de sólidos disueltos se expresó en mg.L^{-1} .

2.2.2.4 DETERMINACIÓN DE LA DUREZA POR CONTENIDOS DE CaCO_3 Y CaO

Se empleó el kit visocolor ECO Dureza. La dureza se expresó según tabla de conversión en mg.L^{-1} de CaCO_3 y CaO . Estos compuestos son indicadores del ciclaje del calcio en el ecosistema y son importantes fuentes de este elemento para la formación de concha en los caracoles. Inicialmente se virtieron 5 ml de muestra en el contenedor de prueba, luego se añadieron dos gotas del reactivo GH-1 del kit y se mezcló invirtiendo el recipiente. La prueba de agua coloreó verde indicando que no había formadores de dureza. Posterior a esto se mantuvo perfectamente vertical el frasco cuentagotas del reactivo GH-2 del kit. Se añadió gota a gota, y se realizó agitación; luego se contaron las gotas, (una gota, aprox. 0,05 ml, corresponde a un grado de dureza total $^{\circ}\text{d}$ según la tabla comparativa del kit).

2.2.2.5 ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE ALGAS Y CARACOLES EN LOS TANQUES DE AGUA POTABLE

Para estimar el contenido de algas se recolectaron muestras de agua de los tanques de sedimentación en recipientes de 10 l, con dos réplicas en los filtros lentos de arena descendentes. Luego se tamizó la muestra (tamiz Ø: 1 mm) para separar la biomasa, que fue llevada a proceso de secado (60 °C durante 24 horas) en horno. Se evaluó el peso seco y húmedo de las muestras, y se estimó la concentración en mg.L^{-1} como la razón entre la materia seca y el volumen de la muestra. Seguidamente se realizó relación entre la materia seca y el volumen del recipiente muestral (10 l) como se ilustra en la Ecuación 2.1.

[Ec. 2.1] *Contenido de algas en los tanques (mg.L^{-1}) = materia seca (mg) / volumen del tanque (L)*

Para estimar el contenido de caracoles dulceacuícolas en la planta y su variación en el tiempo, se hizo el conteo en los meses de diciembre de 2016 y abril de 2017 en las canaletas de evacuación de los tanques de sedimentación donde se evidenciaba mayor cantidad de moluscos. Para estimar su densidad, se estimó el área transversal de la canaleta (dm^2) como ancho (2,8 dm) por alto (0,7 dm). La densidad se determinó con la ecuación 2.2.

[Ec. 2.2] *Densidad (caracoles. dm^{-2}) = número de individuos / área transversal canal (dm^2)*

Posterior a la estimación del contenido de algas y caracoles presentes, se procedió a su identificación taxonómica. Se consultó a expertos de la Universidad del Valle del departamento de biología: el malacólogo Jaime Ricardo Cantera¹ y el ficólogo Enrique Javier Peña², quienes realizaron la identificación taxonómica mediante características morfológicas de las especies. Adicionalmente, se realizó investigación bibliográfica para establecer valores de referencia en cuanto a riesgo/eutrofización de las especies en el agua para tratar.

1. Docente de la Universidad del Valle (Cali- Colombia).

2. Docente de la Universidad del Valle (Cali- Colombia).

2.2.2.6 DIÁLOGO DE SABERES CON ACTORES SOCIALES DEL SITIO DE ESTUDIO

Se realizó consulta con la autoridad ambiental departamental, CVC, mediante entrevista al funcionario Édgar Alfonso Largacha González³, responsable de la zona, a quien se le indagó sobre las características de la cuenca hidrográfica del río Sonsito, usos del suelo y problemáticas ambientales.

En la planta de potabilización se tuvo el apoyo de cuatro funcionarios con quienes se dialogó acerca de la génesis de la problemática por aparición de algas y caracoles. Así mismo, se socializaron los resultados obtenidos en la investigación, en la oficina administrativa (ASUACOVl)⁴ de la planta ubicada en la vía panamericana callejón Telecom del corregimiento El Vínculo (Bugá-Valle del Cauca). Inicialmente, se expuso la problemática asociada al crecimiento de las algas y la aparición de los caracoles con el propósito de que los asistentes conocieran las causas y consecuencias sobre del agua eutrofizada y las enfermedades transmitidas por los moluscos.

La socialización tuvo tres etapas. La primera consistió en realizar la encuesta con cinco preguntas relacionadas con el tema (ex- ante); esto con el propósito de estimar el nivel de información de los asistentes sobre la problemática en cuestión. En la segunda se volvió a realizar la encuesta (ex- post) para evaluar el impacto que causó la socialización durante el diálogo a los asistentes, despejando las dudas de la situación de la planta. Finalmente, la tercera etapa consistió en la realización de dibujo por parte de los participantes (cartografía social) con el fin de ilustrar y plasmar los conocimientos aprehendidos en la reunión.

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA EN LA PTAP

Los resultados de caracterización físico-química de las muestras en la PTAP indicaron leve reactividad del agua, como se pudo observar con la fluctuación del pH entre 7,9 y 8,2; esto la clasificó como ligeramente alcalina (tabla 2.1). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2006), valores de pH mayores de ocho indican la presen-

3. Funcionario de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), zona centro.

4. ASUACOVl: Asociación de suscriptores de acueducto y alcantarillo del corregimiento El Vínculo.

cia de solutos disueltos, pudiendo algunos ser contaminantes. Así mismo, las aguas alcalinas requieren mayores contenidos de cloro para la desinfección por causa de la descomposición de sus moléculas activas, siendo necesario incrementar la dosis de clorinación hasta en 20 % (5 mg.L-1 a pH <8 y 6 mg.L-1 a pH >8).

La conductividad eléctrica es un parámetro que indica la presencia de iones en solución. Los valores conductividad eléctrica en la PTAP fueron inferiores a los límites establecidos por la normatividad vigente, fluctuando entre 187,8 y 272,6 μS en la época seca y entre 153,5 y 185,3 μS en la época lluviosa. Del mismo modo, se observó un descenso de este parámetro en el efluente en la segunda época de muestreo. Lo anterior indica remoción de los iones en el tratamiento y/o aprovechamiento por organismos presentes.

TABLA 2.1 Caracterización de parámetros físicos y químicos del agua durante diciembre de 2016 (época seca) y abril de 2017 (época lluviosa) en la bocatoma durante los procesos de tratamiento y en el efluente de la lanta de tratamiento de agua potable del corregimiento El Vínculo (Buga-Valle del Cauca)

Parámetro	Unidad	-----Época Seca-----			-----Época lluviosa-----			Límite máximo por normatividad
		Bocatoma	Procesos	Efluente	Bocatoma	Procesos	Efluente	
pH	--	7.9	8.2	8.0	8.0	8.1	8.0	6.5 a 8.0 *
Conductividad eléctrica	μS	272.6	191.2	187.8	185.3	141.9	153.5	1000 **
Sólidos disueltos totales	mg/L	300	600	300	900	1300	300	1000 *
Amonio (NH_4^+)	mg/L	0	0.16	0.10	0.20	0.10	0.06	35 *
Nitratos (NO_3^-)	mg/L	10	10	10	10	11.6	10	10 **
Nitritos (NO_2^-)	mg/L	0.3	0,3	0.3	0.1	0	0	0.10 **
Óxido de Calcio (CaO)	mg/L	40	40	40	40	40	40	60 **
Carbonato de Calcio (CaCO_3)	mg/L	71	71	71	71	71	71	200 *

* Organización Mundial de la Salud OMS (2006). Apéndice 1. Guías para la calidad del agua potable. Volumen 1. Tercera edición.
 ** Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). Resolución 2115 de 2007.

Fuente: Los autores (2017)

El contenido de sólidos disueltos totales presentó niveles aceptables durante la época seca, fluctuando entre 300 y 600 mg.L^{-1} . Se pudo observar un incremento sustancial en el contenido de sólidos disueltos del agua durante el proceso de tratamiento, lo que pudo deberse a factores bióticos. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2006), estos sólidos totales se componen de sales y restos de materia orgánica que

se disuelven e incluso microfauna. Durante la época lluviosa se registró incremento notable de los sólidos disueltos en el proceso de tratamiento con 1300 mg.L^{-1} , sobrepasando en 30 % los límites de la norma. La mayor carga de sólidos en esta época de muestreo pudo también relacionarse con material fino de arrastre producto de procesos erosivos en la cuenca del río Sonsito que abastece la PTAP.

En el caso de los nutrientes ligados al ciclo del nitrógeno, se registraron bajas concentraciones de amonio que fluctuaron entre 0 y $0,20 \text{ mg.L}^{-1}$ durante los muestreos en los sitios. Por su parte, los contenidos de nitratos fueron altos durante los muestreos, llegando a sobrepasar los límites normativos durante el proceso para la época lluviosa con $11,6 \text{ mg.L}^{-1}$. A pesar de que estos niveles generan alertas, algunos estudios en plantas de potabilización han reportado concentraciones de nitratos en agua de hasta 15 mg.L^{-1} , lo que supera el límite normativo en 50 % (Dechruksa et al., 2007). Según Cárdenas y Sánchez (2013), la alta presencia de nitratos en solución puede deberse a procesos oxidativos como la nitrificación en los cuerpos de agua o al vertimiento de sales solubles como los fertilizantes nitrogenados.

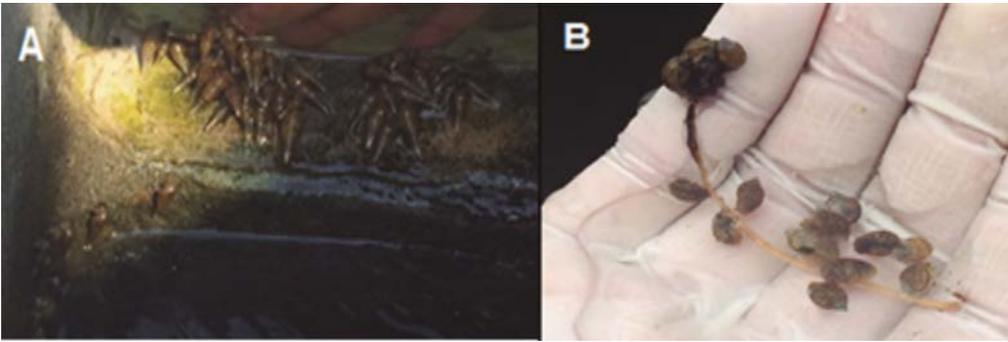
Otro nutriente en estado intermedio de oxidación entre amonio y nitrato es el nitrito. El contenido de nitritos disueltos en el agua de la PTAP fue alto en la época seca pues registró valores de $0,3 \text{ mg.L}^{-1}$, tres veces el límite permisible por la norma. De acuerdo con Metcalf y Eddy (1998), la presencia de nitritos en el agua es un indicador de contaminación de carácter fecal reciente. Valores de concentración de nitritos entre $0,1$ y $0,9 \text{ mg.L}^{-1}$ como los registrados en el presente estudio pueden llegar a ser tóxicos dependiendo del pH del agua (Erikson, 1985). Por su parte, otros investigadores indican que concentraciones elevadas de nitritos en agua para consumo humano pueden reaccionar en el organismo con aminas y amidas, formando nitrosaminas de alto potencial tóxico e incluso cancerígeno (Sasson, 1993; Gil et al., 2013).

La dureza, medida como la concentración de óxido de calcio y carbonato de calcio en el agua, registró valores constantes de 40 y 71 mg.L^{-1} respectivamente, durante los muestreos. Las aguas con concentraciones inferiores a 100 mg.L^{-1} de estos compuestos se consideran aguas blandas. Según la Organización Mundial de la Salud (2006), tiene una capacidad de amortiguación baja y pueden ser más corrosivas en tuberías. La presencia carbonatos de calcio y óxidos de calcio en el agua se debe principalmente a la hidrólisis de la calcita como mineral del subsuelo y/o a la aplicación de cales agrícolas. Aparentemente, la concentración de calcio en el agua fue baja, lo que contribuyó a la presencia de caracoles que requieren metabolizar el elemento para construcción de conchas.

2.3.2 IDENTIFICACIÓN TAXONÓMICA Y CONTENIDOS DE ALGAS Y CARACOLES EN LOS TANQUES DE POTABILIZACIÓN

Los expertos consultados, clasificaron dos especies de caracoles *Melanooides tuberculata* y *Lymnaea columella* (figura 2.1). De igual forma, se identificó una especie de alga *Hydrodictyon reticulatum* (figura 2.2) como responsable de la eutrofización en los tanques de potabilización.

FIGURA 2.1 Caracoles presentes en la PTAP del corregimiento El Vínculo (Buga-Valle del Cauca): a) *M. tuberculata* y b) *L. columella*. Las imágenes fueron tomadas en las canaletas que conducen en los filtros lentos de arena descendentes



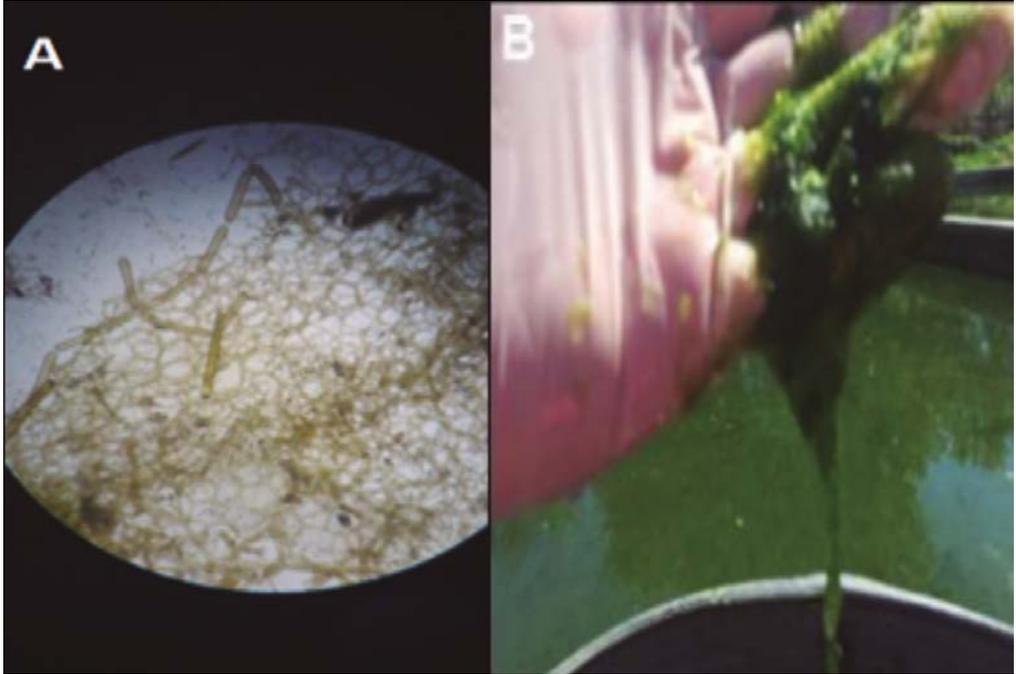
Fuente: Los autores (2017)

De acuerdo con Olivares y Gálvez (2008), *M. tuberculata* presenta tamaño de concha medio de forma cónica y alargada, semejante a un tubérculo. La parte externa de la concha es de color café claro, contiene líneas espirales y nódulos con intervalos regulares. Su reproducción es ovovivípara y por partenogénesis, lo que permite su alta tasa de crecimiento poblacional (García y Carrasco, 2014). Se alimenta de vegetación y de algas, que además le sirven de hábitat. En sistemas acuáticos logran establecerse bien a condiciones de pH entre 7,0 y 8,4 y de oxígeno disuelto entre 6,0 y 9,0 mgL⁻¹ (Pérez et al., 2001). Esta especie ha sido reportada como vector de *Schistosoma* sp., trematodo que ocasiona la esquistosomiasis en humanos (Sri-aroon et al., 2005; Gillespie y Clague, 2009).

Por su parte, *L. columella* es de menor tamaño y presenta una concha ovalada con espirales cruzados de color grisáceo. Es hermafrodita, lo que le permite autofecundarse, siendo la tasa de reproducción mayor en climas cálidos. Los embriones se desarrollan completamente dentro del huevo (Giraldo y Álvarez, 2013; Prepelitchi, 2009). Esta

especie puede habitar en sedimentos, consumir algas y zooplancton presentes en los bordes de ecosistemas acuáticos. Se ha reportado como vector del trematodo *Fasciola hepática* que causa la enfermedad fasciolosis hepática o duela del hígado, que es una zoonosis que afecta a vacunos, ovinos y caprinos, entre otros (Salazar et al., 2006).

FIGURA 2.2 Algas presentes en la PTAP del corregimiento El Vínculo (Buga-Valle del Cauca): a) *H. reticulatum* vista al microscopio Óptico (40X) y b) Biomasa de algas acumulada en tanques de potabilización del agua



Fuente: A: Peña (2017) y B: Los autores (2017)

H. reticulatum pertenece a la familia Hydrodictyaceae. Se organiza en forma de colonias con células interconectadas e incrustadas que alcanzan 0,5 m de longitud y redes de 10 -15 mm de diámetro que son visibles en grandes colonias; aprovechan los nutrientes solubles como fuente de química, en especial los nitratos y fosfatos para su proceso reproductivo ya que estos proveen elementos necesarios para la formación de ácido nucleicos y la división celular. En zonas tropicales, la alta radiación e incremento de las temperaturas en ecosistemas acuáticos favorecen su crecimiento, llegando a eutrofizarlos (John et. al, 2002). Según la OMS (2006) la presencia de algas en plantas de agua potable fuera de dificultar la coagulación y filtración puede generar toxinas y cambios en el sabor del agua limitando su calidad.

Los contenidos de caracoles y algas en la PTAP se presentan en la tabla 2.2. De acuerdo con revisión literaria, se lograron establecer niveles de referencia para del riesgo/eutrofización de las especies evaluadas en la investigación mediante su densidad poblacional en ecosistemas acuáticos. Cabe resaltar que aunque la PTAP no es un ecosistema natural, en esta investigación se asumen estos valores de referencia para poder hacer un comparativo y poder resaltar el riesgo potencial a la salud de la presencia de estas especies en el agua a tratar.

TABLA 2.2. *Contenidos de caracoles y algas dulceacuícolas en durante los procesos de purificación del agua de la PTAP del Corregimiento El Vínculo (Buga- Valla del Cauca)*

Especie	Unidad	Contenido	Niveles de riesgo / eutrofización
Melanoides tuberculata	individuos.dm ⁻²	36	27 (Dundee y Paine, 1977 citados por Letelier et al., 2007).
Lymnaea columella	individuos.dm ⁻²	24	25 (Giraldo y Álvarez, 2013).
Hydrodictyon reticulatum	mg.L ⁻¹	280	0.8 (Ruibal et al., 2005). 0.5 (OPS y CEPIS, 2006).

Fuente: Los autores (2017)

Para el caso de las dos especies de caracoles dulceacuícolas, a pesar de que en esta investigación no se realizaron estudios microbiológicos para establecer si eran portadores de trematodos patógenos como los descritos anteriormente, se pudieron comparar los contenidos en la PTAP con valores de referencia de patogenicidad humana o animal y, riesgo ecológico publicados por investigadores expertos. Se puede observar que los contenidos de *M. tuberculata* sobrepasan estos valores críticos en 33 %, pudiendo por ejemplo ser indicio de la presencia de *Schistosoma* sp. y otros patógenos asociados, que llegarían a las casas de los consumidores finales del agua vía red de distribución, afectando su salud. Lo anterior, ya que las dosis de clorinación al final del proceso en la planta se consideran bajas (1 mg.L⁻¹) con respecto a las requeridas para controlar este tipo de trematodos, que según la OPS debe ser de al menos 2 mg.L⁻¹. En el caso de *L. columella* su presencia en la PTAP estuvo en el límite de poblaciones de riesgo con 24 individuos. dm⁻² pudiendo generar afectación del ganado bovino presente en la zona de estudio aguas arriba.

El contenido del alga *H. reticulatum* como se puede evidenciar, fue extremadamente alta con relación al valor de riesgo. De acuerdo con Pérez et al., (2001) la biomasa algal puede servir de alimento y hábitat para los caracoles dulceacuícolas, permitiendo su crecimiento exponencial al no haber enemigos naturales aparentes en el sistema.

Otro aspecto negativo de la presencia del alga, son los daños y cortocircuitos en el proceso de tratamiento ligados al taponamiento de filtros que generan altos costos de mantenimiento, al igual que la reducción en la calidad del agua potable entregada a los consumidores debido a la segregación de toxinas y otros metabolitos que pueden afectar su sabor (Organización Mundial de la Salud, 2006).

2.3.3 DIÁLOGO DE SABERES CON ACTORES SOCIALES DEL SITIO DE ESTUDIO

Participó el ingeniero ambiental Édgar Alfonso Largacha González quien realizó descripción del uso del suelo y las principales actividades productivas realizadas en la cuenca del río Sonsito, afluente de la PTAP. El uso actual del suelo es de predominio agropecuario, destacándose la producción de cultivos a pequeña escala (tomate, pimentón, medicinales y aromáticas) y la ganadería extensiva. Tanto en cultivos y pasturas se aplican fertilizantes de síntesis química para incrementar la productividad vegetal; en el caso de cultivos se aplican diversos insecticidas y fungicidas para el control de plagas y enfermedades. El estiércol se acumula y no se estabiliza, ese residuo fresco se dispone directamente al suelo ocasionando un exceso de nutrientes y el aporte microorganismos, entre ellos algunos patógenos. Estas acciones estarían generando un desbalance de nutrientes y aportando otras sustancias nocivas al ecosistema, pudiendo ser arrastrados con la escorrentía y llegar al cauce principal de la cuenca.

De otro lado, se tuvo la participación de operarios de la PTAP con quienes se realizó cualificación y socialización de resultados del estudio, así como construcción de cartografía social. Inicialmente se les aplicó encuesta de presaberes, donde se les preguntó sobre la problemática ligada a sobrepoblación del alga *H. reticulatum* y los caracoles *M. tuberculata* y *L. columella* en la PTAP. Se lograron evidenciar algunas falencias conceptuales relacionadas con el conocimiento de los parámetros de calidad del agua que están definidos por la normatividad vigente. Otra falencia se identificó en el desconocimiento de la mayoría de los participantes sobre los riesgos de salud por la presencia de caracoles en la PTAP.

La cualificación consistió en conceptualización relacionada con el fenómeno de eutrofización, las medidas para el manejo de algas y caracoles y, por último, sobre usos del suelo y actividades agropecuarias realizadas en la cuenca del río Sonsito (figura 2.3), contando con la información suministrada por parte de la CVC. Al finalizar la sesión, se hizo una encuesta para observar el impacto de la cualificación, que evidenció apropiación social de los participantes sobre los conocimientos compartidos durante el diálogo participativo. Los funcionarios de la PTAP mostraron interés y disponibilidad para realizar un manejo adecuado de la problemática y generar monitoreo constante.

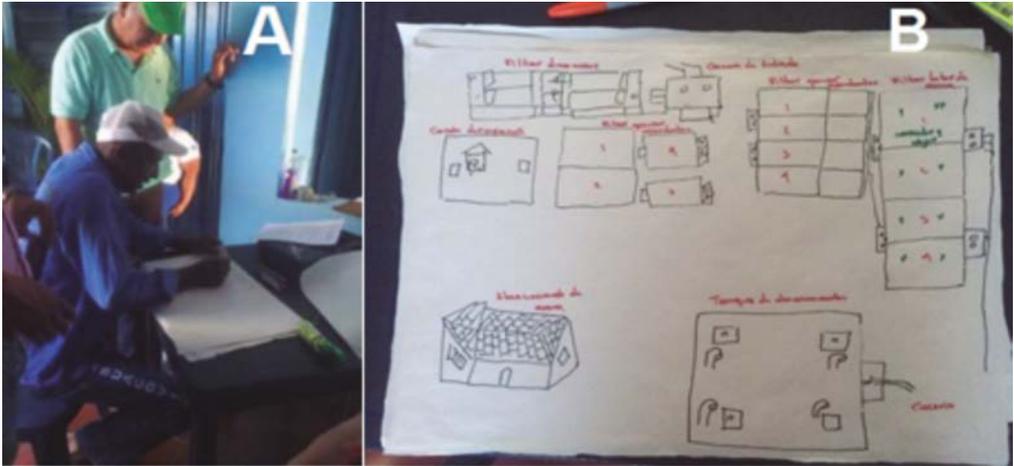
FIGURA 2.3 Reunión con los funcionarios en instalaciones de Planta Potabiladora, Buga-Valle del Cauca



Fuente: Los autores (2017)

La cartografía social permitió la participación colectiva de los funcionarios, que evidenció comprensión y reflexión en torno a la problemática. Este tipo de trabajos permite que los actores interpreten su realidad a nivel investigativo y de manera subjetiva, identifiquen su entorno y lo que acontece en él mediante diálogo de saberes (Barragán y Amador, 2014; Barragán, 2016). En esta investigación, los participantes realizaron ilustración de la PTAP identificando sus diferentes procesos y las problemáticas relacionadas con la presencia de algas (figura 2.4). Esta actividad lúdica permitió a los funcionarios describir las instalaciones de la PTAP y resaltar físicamente los filtros descendentes donde hay prevalencia de algas y aparición de caracoles que a diario observan. Para ellos, esta condición representa un evento y no una problemática frecuente.

FIGURA 2.4 A) Consenso grupal de los integrantes y B) Dibujo de los participantes del diseño de la PTAP

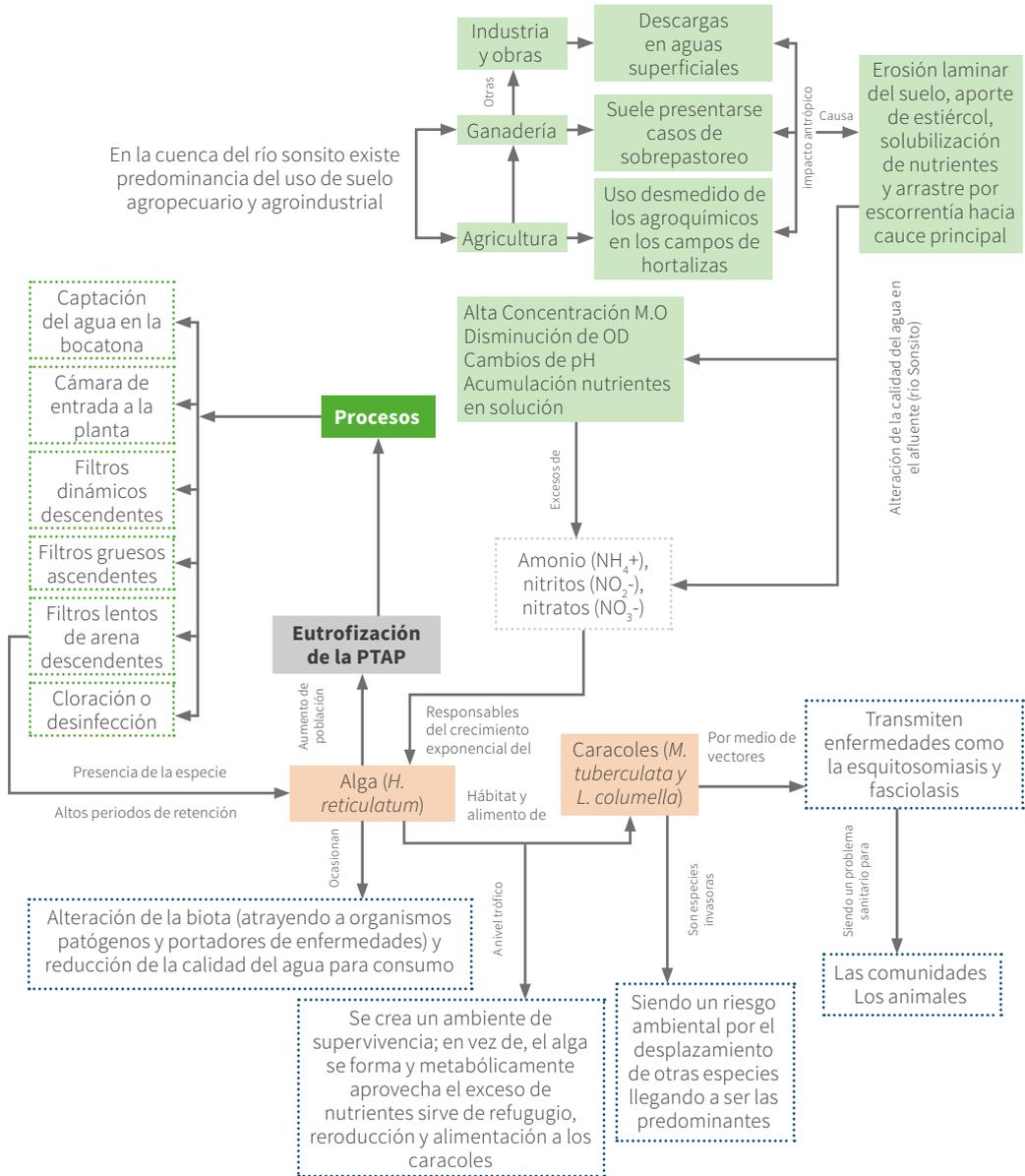


Fuente: Los autores (2017)

2.4 DISCUSIÓN GENERAL

En el esquema (figura 2.5) se ilustra el proceso de eutrofización y demás impactos ambientales relacionados con la PTAP. Se resaltan en color rojo la presencia de *M. tuberculosis* y *L. columella* y las algas *H. reticulatum* como organismos que aumentan sus poblaciones ocasionando eutrofización en tanques de sedimentación y filtros lentos de la PTAP. Este fenómeno se relaciona con altas concentraciones de nutrientes en el agua del afluente (en especial nitratos y nitritos), así como el tiempo prolongado de retención del agua que se va a tratar en los diferentes procesos. La alteración del pH se debió al amonio registrado, que pudo transformarse en nitritos y nitratos por acción bacteriana y favorecer así su asimilación por las algas.

FIGURA 2.5 Esquematación del proceso de eutrofización en la PTAP



Fuente: Los autores

Los sólidos disueltos en el agua son indicadores de materia orgánica en solución, pudiendo esta ser aportada por actividades como la ganadería y agricultura en el sector, así como vertimientos de aguas residuales domésticas y agroindustriales aguas arriba.

Lo anterior fue confirmado con la autoridad ambiental CVC y se relaciona con los diferentes usos del suelo y las problemáticas presentes en la cuenca del río Sonsito.

El manejo realizado tanto para el control de algas y caracoles en la PTAP fue el incremento en la concentración dentro del proceso de cloración (hasta 2 mg.L^{-1}) como lo recomienda la OPS; se pudo evidenciar en el corto plazo disminución significativa tanto en la población de caracoles como en la producción biomásica de algas en los tanques y filtros lentos. Sin embargo, se recomienda explorar otras alternativas que se enfoquen no tanto en el control del problema sino en atacar sus causas, en este caso relacionadas con el exceso de nutrientes y materia orgánica en el afluente.

En este aspecto, las prácticas agrícolas sostenibles o agroecológicas se constituyen en alternativas viables y más sustentables cuyo principio radica en minimizar la dependencia de insumos externos como los agroquímicos y, en cambio, generar un proceso de transición que inicia con la sustitución de insumos por sustancias orgánicas que no afecten el ambiente. Se destacan el uso de abonos orgánicos aprovechando la transformación de estiércoles bovinos, los abonos verdes provenientes de leguminosas que fijan el N_2 atmosférico y lo aportan al suelo y la aplicación de hongos micorrízicos para fomentar simbiosis rizosférica en las plantas cultivadas y así maximizar la absorción de agua y nutrientes del suelo. Para el caso del manejo de la erosión del suelo es conveniente fomentar sistemas silvopastoriles donde se integren pasturas y árboles que amarren el suelo y reduzcan su desprendimiento y arrastre; también emplear coberturas vegetales en sistemas de cultivos que eviten la salpicadura de las partículas sólidas por acción de las gotas de lluvia. De esta manera, se lograría mejorar la condición productiva de los agricultores y, al tiempo, la calidad de vida de la población que se abastece del agua tratada en la planta.

2.5 CONCLUSIONES

El proceso de eutrofización por algas y caracoles se debió a diversas condiciones favorables para su metabolismo como prolongados periodos de retención del agua y al alto contenido de nutrientes presentes en el afluente, en especial nitratos y nitritos. Esta condición del afluente se relaciona con el manejo inadecuado de sistemas agropecuarios en la cuenca hidrográfica, destacándose la aplicación excesiva de agroinsumos de síntesis química y la ganadería extensiva sin manejo adecuado de estiércoles. La presencia de estos caracoles en la PTAP podría generar un riesgo para la salud por ser vectores de parásitos que generan enfermedades como la esquistosomiasis en hu-

manos y la fasciolosis hepática o duela del hígado en el ganado bovino, por lo que es fundamental su manejo y control integral.

La cualificación y socialización aportaron al diálogo constructivo colectivo entre investigadores, funcionarios, miembros de la comunidad y entidades gubernamentales, permitiendo comprender y avanzar sobre los diferentes aspectos relacionados con la problemática de eutrofización por caracoles y algas en la PTAP. Este tipo de trabajos permiten aportar a una solución más integral que pueda atender las causas del problema, por lo que es más efectiva que el control ambiental.

Aunque la clorinación en el sistema es una solución que disminuye considerablemente las poblaciones de algas y caracoles, se recomienda indagar sobre otras acciones relacionadas con las causas de la problemática estudiada como son el uso de prácticas agroecológicas en los sistemas productivos agropecuarios de la cuenca hidrográfica del río Sonsito, que incrementen su sostenibilidad y sean más amigables con el ambiente.

Se recomendó el monitoreo de estas y otras especies invasoras, que permitan registrar sus poblaciones, dinámicas ecosistémicas y su relación con parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua.



Se recomendó el monitoreo de estas y otras especies invasoras, que permitan registrar sus poblaciones, dinámicas ecosistémicas y su relación con parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua.

2.6 REFERENCIAS

Abella, J. y Martínez, M. (2012). Contribución de un afluente tributario a la eutrofización del lago de tota (Boyacá, Colombia). *Revista Colombiana de Química*, 41(2), 243-261. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=309028756006>

Álvarez, L. (2005). *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/31357>

Barragán, D. y Amador, J. (2014). La cartografía social-pedagógica: Una oportunidad para producir conocimiento y re-pensar la educación. *Itinerario educativo*, 28(64), 127-141. <http://revistas.usb.edu.co/index.php/Itinerario/article/view/1422/1215>

Barragán, D. (2016). Cartografía social pedagógica: entre teoría y metodología. *Revista Colombiana de Educación*, (70), 247-285. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcde/n70/n70a12.pdf>

Cárdenas, G. y Sánchez, I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Revista Universidad y Salud*, 15(1), 72-88. <http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v15n1/v15n1a07.pdf>

Claros, J. (2012). *Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17653/tesisUPV3951.pdf?sequence=1>

Dechruksa, W., Krailas, D., Ukong, S., Inkapatanakul, W. y Koonchornboon, T. (2007). Trematode Infections of the Freshwater Snail Family Thiaridae in the Khek River, Thailand. *The Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, 38(6), 1016-1028. https://www.researchgate.net/publication/5238316_Trematode_infections_of_the_freshwater_snail_family_Thiaridae_in_the_Khek_River_Thailand

Dundee, D. S. y A. Paine. (1977). Ecology of the snail *Melanoides tuberculata* (Müller), intermediate hosts of the human liver fluke (*Opisthorchis sinensis*) in New Orleans, Louisiana. *Nautilus*, (91), 17-20. <https://www.cabi.org/isc/abstract/20067204778>

Erikson, R. (1985). An evaluation of mathematical models for the effects of pH and temperature on ammonia toxicity to aquatic organisms. *Water Research*, 19(8), 1047-1058. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90375-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90375-6)

Eugercios, A., Álvarez, M. y Montero, E. (2017). Impactos del nitrógeno agrícola en los ecosistemas acuáticos. Ecosistemas. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 26(1), 37-44. [http://digital.csic.es/bitstream/10261/152343/1/Ecosistemas%2026\(1\)%2037-44%20\(2017\).pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/152343/1/Ecosistemas%2026(1)%2037-44%20(2017).pdf)

Flórez, I. y Porras, M. (2012). *Estudio del proceso de potabilización de la planta de agua potable planta Puriblock II del municipio del Socorro, Santander* (tesis de posgrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. <https://aguaspeeligrosasblog.files.wordpress.com/2016/10/calculo-de-contaminacion-de-una-planta-de-acueducto.pdf>

García, E. y Carrasco, M. (2014). Moluscos dulceacuícolas introducidos e invasoras. *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, pp. 337-345.

Gil, J., Belloso, G., Vizcaino, C., Maza, I., Sánchez, M., Bolívar, C. y Martínez, P. (2013). Evaluación de la calidad microbiológica y niveles de nitratos y nitritos en las aguas del río Guarapiche, estado Monagas, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 13(1), 154-163. <http://www.bioline.org.br/pdf?cg13020>

Gillespie, R. y Clague, D. (2009). *Encyclopedia of Islands*. University of California Press.

Giraldo, E. y Álvarez, L. (2013). Registro de plantas hospederas de caracoles Lymnaeidae (Mollusca: Gastropoda), vectores de Fasciola hepática (Linnaeus, 1758), en humedales de la región central andina colombiana. *Revista Veterinaria y Zootecnia*, 7(2), 63-74. <http://vip.ucaldas.edu.co/vetzootec/downloads/v7n2a05.pdf>

Instituto Nacional de Salud. (2011). *Manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de laboratorio*. Editorial Botanical-Online SL. <https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin%20SIVI-CAP/2011%20Manual%20toma%20de%20muestras%20agua.pdf>

John, D., Whitton, B. y Brooks, A. (2002). *The Freshwater Algal Flora of the British Isles. An Identification Guide to Freshwater and Terrestrial Algae*. Cambridge University Press.

Letelier, S., Ramos, A. y Huaquín, L. (2007). Moluscos dulceacuícolas exóticos en Chile. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, (78), 9-13. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3678017>

Metcalf y Eddy. (1998). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw Hill.

Olivares, L. y Gálvez, O. (2008). Registro de la especie exótica *Melanoides tuberculata* (Müller, 1774) en la región de Tarapacá (Gastropoda, Prosobranchia, Thiaridae). *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural*, (57), 153-158. https://www.researchgate.net/publication/299437717_REGISTRO_DE_LA_ESPECIE_EXOTICA_MELANOIDES_TUBERCULATA_MULLER_1774_EN_LA_REGION_DE_TARAPACA_GASTROPODA_PROSOBRANCHIA_THIARIDAE

Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. OMS. http://who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf?ua=1

Organización Mundial de la Salud. (2017). *Esquistosomiasis*. OMS. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs115/es/>

Organización Panamericana de la Salud y Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Medio Ambiente. (2006). Capítulo 7. Instructivo de puesta en marcha y operación normal. En *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada* (pp. 285-314). CEPIS.

Peña, E., Palacios, M. y Ospina, N. (2005). *Algas como indicadores de Contaminación*. Universidad del Valle

Pérez, R., Saldaña, A., Vicente, V. y Badillo, A. (2001). Hábitat y presencia de *Thiara* (*Melanoides*) *tuberculata* (Müller, 1774) (Gastropoda: Prosobranchia: Thiaridae), en la presa de Apizaquito, Tlaxcala. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 50(1), 15-23. <http://repositorio.fcien.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11154/143175/50VH%C3%A1bitatPresencia.pdf?sequence=1>

Pointer, J., Coustau, C., Rondelaud, D. y Theron, A. (2007). *Pseudosuccinea columella* (Say 1817) (Gastropoda, Lymnaeidae), snail host of *Fasciola hepatica*: first record for France in the wild. *Parasitology Research*, 101(5), 1389-1392. https://www.researchgate.net/publication/6178240_Pseudosuccinea_columella_Say_1817_Gastropoda_Lymnaeidae_snail_host_of_Fasciola_hepatica_First_record_for_France_in_the_wild

Prepelitchi, L. (2009). *Ecoepidemiología de Fasciola hepática (Trematoda, Digenea) en el norte de la provincia de Corrientes destacando aspectos ecológicos de Lymnaea columella (Pulmonata, Lymnaeidae) y su rol como hospedador intermediario* (tesis doctoral). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_4546_Prepelitchi.pdf

Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina. (2010). *Contaminación y eutrofización del agua. Impactos del modelo de agricultura industrial*. Editorial RAP- AL. <http://www.rapaluruaguay.org/agrotoxicos/Uruguay/Eutrofizacion.pdf>

Resolución 2115 de 2007 [Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. 22 de junio de 2007. http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf

Ruda, E., Mongiello, A. y Acosta, A. (2004). *Contaminación y salud del suelo*. Ediciones UNL.

Ruibal, A., Rodríguez, M., Ruiz, M., Bustamante, M. y Angelaccio, C. (2005). *Cooperación sectorial privado-estatal en el abordaje de la problemática de desarrollos masivos de algas tóxicas. Taller Internacional sobre Enfoques Regionales para el Desarrollo y Gestión de Embalses en la Cuenca del Plata*. <https://www.ina.gov.ar/pdf/Cirsa-Limnologia-10%20AlgasII.pdf>

Salazar, L., Estrada, V. y Velásquez, L. (2006). Effect of the exposure to *Fasciola hepatica* (Trematoda: Digenea) on life history traits of *Lymnaea cousini* and *Lymnaea columella* (Gastropoda: Lymnaeidae). *Experimental Parasitology*, 1(114), 77-83

Sasson, A. (1993). *La alimentación del hombre del mañana*. UNESCO. Reverté. S.A.

Sri-aroon, P., Butraporn, P., Limsomboon, J., Kerdpuech, Y., Kaewpoolsri, M. y Kiatsiri, S. (2005). Freshwater mollusks of medical importance in kalasin province, Northeast Thailand. *Revista de Medicina Tropical y Salud Pública del Sudeste Asiático*, 36(3), 653-657. https://www.tm.mahidol.ac.th/seameo/2005_36_3/19-3447.pdf

Vásquez, G., Herrera, L., Cantera, J., Galvis, A., Cardona, D. y Hurtado, I. (2012). Metodología para determinar niveles de eutrofización en ecosistemas acuáticos. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, (24), 112-128. <http://www.ojs.asociacioncolombianadecienciasbiologicas.org/index.php/accb/article/download/81/81>.

Zouiten, H. (2012). *Análisis mediante modelo avanzando de procesos de eutrofización en lagunas litorales: aplicación a masas de agua atlánticas y mediterráneas (tesis doctoral)*. Universidad de Cantabria, Santander, España. <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/96870/TesisHZ.pdf?sequence=1>



CAPÍTULO

LA MESOFAUNA DEL SUELO COMO INDICADORA DE SALUD DEL AGROECOSISTEMA



Leonardo Álvarez Ríos

3.1 INTRODUCCIÓN

El suelo es el hábitat de diferentes organismos dentro de los cuales podemos hallar macroorganismos, meso organismos y microorganismos; estos cumplen diferentes funciones relacionadas a las múltiples interacciones que componen la dinámica del suelo. La mesofauna, los meso invertebrados o meso organismos del suelo, se presenta como invertebrados que oscilan entre los 100 μm y 2 mm y se convierten en un elemento clave en la productividad de los suelos. La composición de la mesofauna abarca diferentes meso organismos o meso invertebrados que se pueden presentar con mayor frecuencia como ácaros, colémbolos, proturos, dipluros, sinfilidos, etc. (tabla 3.1) (Gruss et al., 2018, Álvarez y Mesa, 2017, Wu y Wang, 2019).

TABLA 3.1 Principales organismos que conforman la mesofauna del suelo

Organismo	Grupo taxonómico
Colémbolos	Collembola
Ácaros	Acari
Proturos	Protura
Dipluros	Diplura
Sinfilidos	Symphyla
Paupodos	Paupoda

Fuente: Basado en Pereira et al. (2012); Socarrás (2013); Álvarez y Mesa (2017) y Melo et al., (2020)

Los factores climáticos son determinantes en la dinámica de la población de la mesofauna del suelo; los cambios de temperatura, la frecuencia de la precipitación e incluso la intervención antrópica promueven cambios en la abundancia de la mesofauna; esto conlleva a que la dinámica del suelo presente variaciones en función del incremento o disminución de la población de meso invertebrados, lo que resulta como un bioindicador en los cambios de la dinámica de los suelos (Socarrás, 2013; Wu y Wang, 2019).

La presencia y abundancia de los meso invertebrados del suelo puede usarse como indicador del tipo de suelo, su calidad, las características del mismo y la estabilidad de agroecosistemas, lo que evidencia la correlación existente entre el uso del suelo y el impacto en la población de la mesofauna (George et al., 2017; Cassani et al., 2020).

3.2 MESOFAUNA DEL SUELO

FIGURA 3.1 *Mesofauna del suelo*



Fuente: Leonardo Álvarez Ríos (2019)

La intervención mecánica constante del suelo en los procesos de habilitación del mismo, con fines de brindar una adecuada fuente de estructura y disponibilidad a los cultivos, es una labor que limita la abundancia de la mesofauna; el aumento de la porosidad del suelo es un factor determinante en la presencia y abundancia de la mesofauna; la porosidad del suelo permite y promueve el establecimiento y crecimiento de microorganismos del suelo, dentro de los cuales los hongos y las bacterias se convierten en piezas clave ya que estos son fuente alimenticia disponible para la mesofauna del suelo y participan activamente de procesos de descomposición de la materia orgánica (Neher y Barbercheck, 1999; Lee, 1991; Niswati et al., 2019).

El uso del suelo es determinante en la dinámica de la población de la mesofauna. La siembra directa evidencia que al pasar de los años las poblaciones mantienen un equilibrio, lo que puede explicar que dado el manejo del suelo, el sistema de siembra directa tiene como resultado la presencia de restos de cosecha que permanecen en el suelo y se convierten en fuente alimenticia de los organismos que lo habitan, brindando un aporte constante de materia orgánica que es aprovechada por la mesofauna y, en consecuencia, es aprovechable para el cultivo por su proceso de habilitación, realizado por los diferentes organismos del suelo; de igual manera, la siembra directa evidencia la permanencia de cobertura vegetal, que causa un efecto de protección al evitar los cambios bruscos de temperatura y al mismo tiempo estabiliza la humedad con relativa consistencia, generando un microclima benéfico a las diferentes poblaciones de la mesofauna presente (Andren y Lagerlöf, 1983; Arbea y Blasco, 2001; Nicosia et al., 2019).

Los grupos taxonómicos como colémbolos y ácaros mesostigmata son altamente sensibles al cambio y las perturbaciones ocasionados al suelo, lo cual brinda una herramienta clave que puede ser implementada en planes de monitoreo de la población de la mesofauna, teniendo en cuenta grupos específicos como los previamente mencionados, con el fin de obtener información asociada a la calidad del suelo; todo lo anterior relacionado con áreas específicas (George et al., 2017; Cassani et al., 2020).

La intervención y manejo del suelo es una práctica que influye directamente en el comportamiento de la población de los organismos que componen la mesofauna. En pasturas que fueron cosechadas una vez al año en Polonia se presentó un número mayor de ácaros y colémbolos, que son organismos que componen la mesofauna en el orden del 85 %; los resultados evidencian la relación que existe entre las diferentes labores, como lo es el ejemplo de la cosecha del pasto, que de realizarse hasta dos veces al año; no correlaciona disminuciones significativas en la mesofauna del suelo, pero puede tener variaciones significativas del orden de 10 a 2624 individuos por m² si se incrementa el número de cosechas al año, teniendo en cuenta que los factores climáticos influyen directamente en la población y época de cosechas (Gruss et al., 2018). El manejo tradicional del suelo genera impactos directos en la mesofauna del suelo; es por ello que el manejo convencional asociado a las prácticas agroecológicas evidencian un comportamiento diferencial de la biota del suelo a causa de las variantes de manejo que se presentan en la agroecología del suelo.

El manejo obtenido con las prácticas agroecológicas evidencia el aumento de las poblaciones de la mesofauna, principalmente asociado a los colémbolos y ácaros, los cuales se asocian con factores de fertilidad y estabilidad del suelo. El aumento de las poblaciones se relaciona con la incorporación continua de materia orgánica como fuente de nutrición para los cultivos; entre estas, se presenta el estiércol de aves que se correlaciona con el aumento de la población de organismos nitrificadores, los cuales se encuentran frecuentemente al disponer de fuentes alimenticias ricas en nitrógeno. Las labores de manejo de suelos, inmersas en el componente agroecológico, contemplan la incorporación de materia orgánica de origen animal; así mismo, el uso racional de la habilitación física del suelo facilita y beneficia la dinámica de las poblaciones de meso organismos al presentarse los remanentes de las cosechas, que aportan la viabilidad y disponibilidad de nutrientes, aparte de mejorar la calidad física del suelo. Las coberturas se presentan como una práctica frecuente dentro del manejo agroecológico de los cultivos, generando microclimas que benefician las poblaciones de meso invertebrados y brindando nichos específicos que pueden ser aprovechados como refugio, fuente de alimentación y de reproducción (Bardgett, 2005; Salazar y De Luca, 2015; Marín et al., 2015; Socarrás e Izquierdo, 2016).

La presencia y abundancia de meso invertebrados se puede correlacionar con su ocurrencia en función del entorno donde estos se encuentren; así, áreas poco intervenidas antrópicamente como bosques secundarios se presentan como fuente inicial de comparación con otros sistemas de explotación agraria, como el sistema silvopastoril y los pastizales; la mesofauna presente en bosques secundarios se puede expresar como alta y diversa en relación con los sistemas de pastizales; estos se encuentran con una limitada fuente de alimento para los organismos, además de ser más susceptibles a los cambios climáticos por su carencia limitada de cobertura, que permite

brindar protección, sin contar la estrecha relación que se presenta con la intervención de vertebrados mayores. Por el contrario, el sistema silvopastoril enmarca el componente de cobertura adicional que muestra un efecto positivo al encontrarse valores de diversidad y abundancia similares a los evidenciados en áreas de bosques secundarios (Socarrás, 2018).

Por el contrario, el sistema silvopastoril enmarca el componente de cobertura adicional que muestra un efecto positivo al encontrarse valores de diversidad y abundancia similares a los evidenciados en áreas de bosques secundarios (Socarrás, 2018).

Determinados grupos taxonómicos componentes de la mesofauna se convierten en indicadores específicos de la calidad del suelo; los colémbolos pueden dar a conocer la calidad adecuada del suelo, lo que evidencia un proceso de recuperación del mismo; en su proceso de alimentación basada en detritos aporta directamente en los procesos de habilitación y disponibilidad de la materia orgánica. De igual manera, los psocópteros se presentan como iniciadores en el proceso de colonización de áreas que previamente hayan sufrido problemas directos de perturbación (Siddiky et al., 2012; Socarrás e Izquierdo, 2014).

Algunos metales (tabla 3.2) que, dada su característica, procedencia, emanación (fábricas adyacentes a terrenos de cultivo), abundancia y disponibilidad en el suelo, se pueden considerar como pesados son: zinc (Zn), plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd) y manganeso (Mn). Suelos con altas trazas de metales pesados fueron identificados y correlacionados con el fin de establecer la dinámica de población de mesofauna presente en ellos en relación con las fuentes contaminantes, evidenciando que las poblaciones de ácaros y colémbolos sufrieron efectos adversos según el grado de contaminantes presentes en el suelo; los ácaros muestran una mayor sensibilidad a altas concentraciones de metales pesados presentando cambios en la composición de la abundancia de la población, así como la diversidad de especies dentro de los diferentes sitios muestreados, decreciendo en función del aumento de la concentración de metales pesados, llegando a presentarse especies específicas en áreas con bajos ni-

veles de contaminación, al igual que especies determinadas en áreas más contaminadas. En el caso de los colémbolos, el comportamiento es similar con la leve diferencia de que al ser organismos con mayor grado de movilidad y menor contacto con el suelo en relación con los ácaros, los resultados de sensibilidad a metales pesados fue ligeramente inferior al de los obtenidos por el grupo taxonómico de los ácaros (Fountain y Hopkin, 2004; Santamaría et al., 2012).

TABLA 3.2 Metales pesados en el suelo

Elemento	Símbolo químico
Cromo	Cr
Manganeso	Mn
Zinc	Zn
Cadmio	Cd
Plomo	Pb
Níquel	Ni
Cobalto	Co

Fuente: Fountain, y Hopkin (2004); Santamaria et al., (2012); Mahecha et al. (2017) y Martínez et al., (2017)

La acumulación de metales pesados se puede asociar estrechamente al hábito alimenticio y comportamiento de los meso organismos; la acumulación de metales pesados en los organismos puede exceder la concentración del elemento en el suelo; la precipitación se correlaciona con la acumulación de metales en las mesofauna; áreas con mayores precipitaciones evidencian mayor acumulación de metales por los meso organismos. De este modo, áreas específicas con niveles considerables de cadmio, níquel, cobre y zinc pueden acumularse en los organismos en mayor cantidad, en zonas húmedas; en el caso de la acumulación de plomo, no presenta diferencias asociadas a la humedad de la zona de estudio; es decir, es independiente de la humedad disponible; la acumulación de metales se hace más evidente en el caso de los meso organismos depredadores ya que estos muestran niveles de acumulación superiores de cadmio, níquel, cobre, plomo y zinc, en relación con los que se puedan presentar organismos saprófagos (Rozen et al., 2004; Hedde et al., 2012; Chrzan, 2017).

La aplicación de productos de síntesis química para el control de plagas en los cultivos agrícolas es una práctica frecuente en la agricultura; la mesofauna, al ser un componente del suelo, se encuentra expuesta a la interacción con dichos productos químicos;

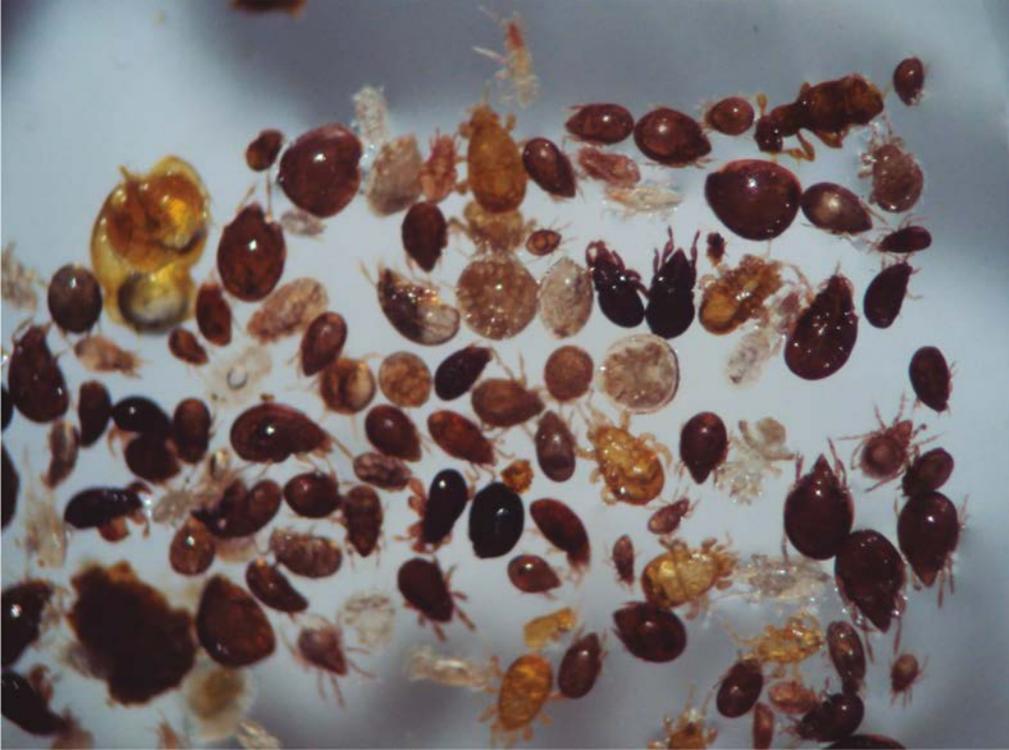
por esto, meso invertebrados como colémbolos y ácaros, de los últimos, los oribatidos, presentan mayor sensibilidad y evidencian acumulación de insecticidas como los plaguicidas organoclorados, que pueden ascender a organismos superiores por orden en la cadena trófica (Lupi et al., 2019). La contaminación del suelo por derrames de petróleo se presenta como una limitante de importancia para el suelo; dependiendo el grado de contaminación se pueden encontrar organismos que indiquen el grado de contaminación, como lo es el caso de los colémbolos de la familia Hypogastruridae, la cual se puede encontrar presente en suelos contaminados con petróleo (García et al., 2018).

La susceptibilidad asociada a los diferentes cambios en el entorno adyacente al nicho biológico donde se encuentra la población de meso invertebrados es evidente y se reportó para niveles de alta exposición a radioactividad, donde los individuos expuestos a la radiación presentaron patrones marcados relacionados con su abundancia y diversidad, en comparación con individuos testigo ubicados en áreas diferenciales; la composición de los meso invertebrados se ve afectada en la estructura de su población y en la viabilidad de la misma; grupos específicos son ausentes en áreas específicas expuestas a la radiación alrededor de 50 % menos que las áreas diferenciales; los hábitos alimenticios son una relación clave debido a que los saprófagos evidenciaron mayor acumulación de radiactividad dado su comportamiento alimenticio; las células defensivas evidencian cambios significativos en la producción de las mismas ya que el aumento fue significativo en los individuos expuestos a la radiación (Maksimova, 2002). Los resultados evidencian que los meso invertebrados experimentan el efecto de la radiación, específicamente los grupos que se encuentran confinados y son poco móviles, debido a que su capacidad de desplazamiento es limitada; en el caso de meso invertebrados depredadores, su comportamiento difiere ya que estos debido a su hábito alimenticio poseen la capacidad de exploración, asociada a la consecución de su presa, la cual pueden buscar en áreas más extensas y complejas, lo que conlleva a que los resultados en su abundancia y diversidad, en relación con individuos saprófagos, difiera significativamente (Krivolutskii, 1994; Kolesnikova et al., 2005).

Los ácaros y los colémbolos representan más del 80 % de la mesofauna del suelo y de estos los ácaros conforman alrededor del 82 %, lo que los convierte en un componente clave y abundante dentro de la mesofauna. Los ácaros se presentan como un componente bioindicador, el cual relaciona los cambios climáticos, antropogénicos y el estado de los diferentes agroecosistemas. La acarofauna presente en el suelo posee una diversidad abundante al igual que sus hábitos alimenticios, pudiendo consumir tejidos de plantas, materia en descomposición, microorganismos o siendo depredadores, etc. De igual forma, pueden aportar nutrientes de manera indirecta al realizar su proceso de alimentación, así como depredar y alimentarse de organismos que pueden afectar

el desarrollo adecuado fisiológico de las plantas (figura 3.2) (Seastedt y Crossley, 1980; Walter y Proctor, 1999; Cassagne et al., 2006; Álvarez y Mesa, 2017).

FIGURA 3.2 *Ácaros del suelo*



Fuente: Leonardo Álvarez Ríos (2020)

En área de reserva natural se desarrolló la comparación dentro del mismo entorno pero con diferenciación de estratos, de los ácaros Prostigmata asociados a especies vegetales, presentes en las dos áreas diferenciales de la reserva natural de Yotoco en Colombia, encontrando que existen diferencias significativas entre áreas de la misma reserva; esto debido a que los valores de abundancia y riqueza de especies dieron como resultado valores diferenciales para los estratos evaluados, lo que permite correlacionar los factores bióticos y abióticos que impactan la dinámica y presencia de meso organismos (Álvarez y Mesa, 2017).

La relación en función de la densidad de individuos se puede utilizar como un elemento indicador asociado a la calidad biológica del suelo como consecuencia de diferentes prácticas agropecuarias implementadas; así, la relación de ciertos grupos taxonómicos, como lo es el caso de los ácaros, y relaciones específicas como oribatidos y

astigmata, presentan una estrecha relación debido a que la mayor abundancia de oribatidos se entiende como indicador de fertilidad y estabilidad del suelo por su naturaleza de alimentación y habilitación de materia orgánica; en cambio, los astigmata se interpretan como la ocurrencia de perturbaciones en el medio edáfico; por lo tanto, obtener una relación de oribatidos y astigmata cercana o igual a uno es un indicador de perturbaciones existentes en el suelo. De igual manera, la relación de ácaros astigmata y mesostigmata evidencian comportamientos similares ya que el aumento de ácaros astigmata se convierte en indicador de perturbaciones; se debe esperar entonces que el resultado de la reacción astigmata y mesostigmata sea menor que uno (Flores et al., 2008; Socarrás, 2013; Socarrás e Izquierdo, 2014).

3.3 CONCLUSIONES

El suelo se presenta como componente fundamental y estructural para el establecimiento de diferentes especies vegetales en campo; dichas especies se relacionan estrechamente con condiciones agroclimáticas específicas, lo que permite un establecimiento y asociación con diferentes organismos, de los cuales la mesofauna del suelo se convierte en un elemento clave e indicador del suelo, en relación con su dinámica y calidad.

Los cambios que impactan directamente el suelo, tales como factores climáticos o antrópicos, son determinantes en la dinámica de la mesofauna del suelo; por ello el comportamiento de las poblaciones de los meso invertebrados se correlaciona directamente con los cambios presentes en el suelo.

Grupos taxonómicos específicos como los colémbolos y los ácaros son mayormente sensibles a cambios o perturbaciones en su medio edáfico; de allí el comportamiento de su población. También la presencia o ausencia de especies de dichos grupos taxonómicos indican alteraciones presentes en su área de acción circundante.

Dado el nivel de susceptibilidad presente en los organismos que conforman la mesofauna del suelo, estos se convierten en una herramienta útil al momento de evaluar y correlacionar los diferentes cambios que pueda presentar el suelo, asociados con el acondicionamiento del suelo, la aplicación de enmiendas, las condiciones climáticas, los asentamientos antrópicos, la cría de especies pecuarias, la industria aledaña, la aplicación de productos de síntesis química, la contaminación por derrames, la acumulación de productos tóxicos, etc.

3.4 REFERENCIAS

Álvarez, L. y Mesa, N. (2017). Mite diversity suborder Prostigmata associated with the plant rhizosphere soil of the Yotoco Nature Reserve, Valle del Cauca-Colombia. *Acta Agronómica*, 66(2), 193-199.

Andren, O. y Lagerlöf, J. (1983). Soil fauna (microarthropods, enchytraeids, nematods) in Swedish agricultural cropping systems. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 33(1), 33-52.

Arbea, J. y Blasco, J. (2001). Ecología de los Colémbolos (Hexapoda, Collembola) en los Monegros (Zaragoza, España). *Aracnet*, 7(28), 35-48.

Bardgett, R. (2005). *The Biology of Soil. A community and Ecosystem Approach*. Oxford University Press.

Cassagne, N., Gauquelin, T., Bal, M. y Gers, C. (2006). Endemic Collembola, privileged bioindicators of forest management. *Pedobiologia*, 50(2), 127-134.

Cassani, M., Sabatté, M., Arzac, A. y Massobrio, M. (2020). Mesofauna as an indicator of agroecosystem stability: degree of artificialization effect on land uses in Azul district, Argentina. *SN Applied Sciences*, 2(3).

Chrzan, A. (2017). The impact of heavy metals on the soil fauna of selected habitats in Niepołomice forest. *Polish Journal of Soil Science*, 50(2), 291-300.

Flores, L., Escoto, J., Flores, F. y Hernández, A. (2008). Estudio de la biodiversidad de artrópodos en suelos de alfalfa y maíz con aplicación de biosólidos. *Investigación y Ciencia*, 16(40), 11-18.

Fountain, M. y Hopkin, S. (2004). A Comparative Study of the Effects of Metal Contamination on Collembola in the Field and in the Laboratory. *Ecotoxicology*, 13(6), 573-587.

García, D., Castillo, I., Martínez, F., Gómez, A., Rodríguez, J., Hernández, B., Contreras, S. y Barois, I. (2018). Macrofauna and mesofauna from soil contaminated by oil extraction. *Geoderma*, 332, 180-189.

George, P., Keith, A., Creer, S., Barrett, G., Lebron, I., Emmett, B. y Jones, D. (2017). Evaluation of mesofauna communities as soil quality indicators in a national-level monitoring programme. *Soil Biology and Biochemistry*, 115, 537-546.

Gruss, I., Pastuszko, K., Twardowski, J., y Hurej, M. (2018). Effects of different management practices of organic uphill grasslands on the abundance and diversity of soil mesofauna. *Journal of Plant Protection Research*, 58(4), 372-380.

Hedde, M., van Oort, F., y Lamy, I., (2012). Functional traits of soil invertebrates as indicators for exposure to soil disturbance. *Environmental Pollution*, 164, 59-65,

Kolesnikova, A., Taskaeva, A., Krivolutskii, D. y Taskaev, A. (2005). Condition of the Soil Fauna near the Epicenter of an Underground Nuclear Explosion in the Northern Urals. *Russian Journal of Ecology*, 36(3), 150-157.

Krivolutskii, D. (1994). *Pochvennaya fauna v ekologicheskom kontrole (Soil Fauna in Ecological Monitoring)*. Nauka.

Lee, K. (1991). The Role of Soil Fauna in Nutrient Cycling. En G. Veeresh, D. Rajagopal y C. Viraktamath (Eds.), *Advances in Management and Conservation of Soil Fauna* (pp. 465-472). Oxford and IBH Publishing CO.

Lupi, L., Bedmar, F., Wunderlin, D. y Miglioranza, K. (2019). Levels of organochlorine pesticides in soils, mesofauna and streamwater from an agricultural watershed in Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 78(18).

Mahecha, J., Trujillo, J. y Torres, M. (2017). Análisis de estudios en metales pesados en zonas agrícolas de Colombia. *Orinoquia*, 21(1), 83-93.

Maksimova, S. (2002). Complex estimation of the effect of long-term radioactive contamination on soil mesofauna after Chernobyl accident. *Radioprotection*, 37(C1), 127-132.

Marín, E., Sánchez, M., Sierra, A. y Peñaranda, M. (2015). Poblaciones de ácaros, co-lémbolos y otra mesofauna en un Inceptisol bajo diferentes manejos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 68(1), 7411-7422.

Martínez, Z., González, M., Paterina, J. y Cantero, M. (2017). Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El Alacrán, Colombia. *Temas agrarios*, 22(2), 21-31.

Melo, C., da Silva, J., de Assis, J., Ferreira, J., Ferreira, J. y Porto, E. (2020). Levantamento da mesofauna do solo em área de preservação permanente da Vila Bananeiras, Arapiraca/AL. *Diversitas Journal*, 5(2), 824-832.

Neher, D. y Barbercheck, M. (1999). Diversity and function of soil mesofauna. En W. Collins y C. Qualset (Eds.), *Biodiversity in Agroecosystems* (pp. 27-47). CRC Press LLC..

Nicosia, S., Falco, L., Huerta, R., Sandler, R. y Coviella, C. (2019). Estructura de la comunidad de la mesofauna edáfica en dos suelos con distinta intensidad de uso. *Ciencia del Suelo*, 38(1), 72-80.

Niswati, A., Pangaribuan, Y., Lumbanraja, J. y Arif, M. (2019). Abundance and diversity of soil mesofauna under tillage system in maize plantation at Ultisols soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 393(1), 1-8.

Pereira, R., Albanez, J. y Mamédio, I. (2012). Diversidade da meso e macrofauna edáfica em diferentes sistemas de manejo de uso do solo em Cruz das Almas-BA. *Magistra*, 24, 63-76.

Rožen, A., Sobczyk, Ł., Kapusta, P. y Niklińska, M., (2004). Heavy metal concentrations in Enchytraeidae (Oligochaeta) in the Niepołomice Forest. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 57(1), 81-88.

Salazar, A. y De Luca, L. (2015). Micro y Mesobiota en suelos con manejo agroecológico y convencional. *Memorias del V Congreso Latinoamericano de Agroecología, La Plata, Argentina*.

Santamaría, J., Moraza, M., Elustondo, D., Baquero, E., Jordana, R., Lasheras, E., Bermejo, R. y Ariño, A. (2012). Diversity of Acari and Collembola along a pollution gradient in soils of a pre-Pyrenean forest ecosystem. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(6), 1159-1169.

Seastedt, T. y Crossley, D. (1980). Effects of microarthropods on the seasonal dynamics of nutrients in forest litter. *Soil Biology and Biochemistry*, 12(4), 337-342.

Siddiky, M., Kohler, J., Cosme, M. y Rillig, M. (2012). Soil biota effects on soil structure: interactions between arbuscular mycorrhizal fungal mycelium and collembola. *Soil Biology and Biochemistry*, 50, 33-39.

Socarrás, A. (2013). Soil mesofauna: biological indicator of soil quality. *Pastos y Forrajes*, 36(1), 14-21.

Socarrás, A. (2018). Diversidad de la mesofauna edáfica en tres usos del suelo en la provincia Mayabeque, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 41(2), 123-130.

Socarrás, A. e Izquierdo, I. (2014). Evaluación de sistemas agroecológicos mediante indicadores biológicos de la calidad del suelo: mesofauna edáfica. *Pastos y Forrajes*, 37(1), 47-54.

Socarrás, A. e Izquierdo, I. (2016). Variación de los componentes de la mesofauna edáfica en una finca con manejo agroecológico. *Pastos y Forrajes*, 39(1), 41-48.

Walter, D. y Proctor, H. (1999). *Mites: Ecology, Evolution & Behaviour: Life at a Mixroscale*. University of NSW Press & CABI Publishing.

Wu, P. y Wang, C. (2019). Differences in spatiotemporal dynamics between soil macrofauna and mesofauna communities in forest ecosystems: The significance for soil fauna diversity monitoring. *Geoderma*, 337, 266-272.



CAPÍTULO

LOS COLÉMBOLOS COMO ACTORES DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGROECOSISTEMAS CAFETEROS



Mauricio García Arboleda
Óscar Eduardo Sanclemente Reyes

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente documento se fundamenta en la evaluación de tres diseños de producción de café con manejos agronómicos distintos y diferente estructura de agrobiodiversidad mediante la caracterización y cuantificación de las poblaciones de insectos de la clase Collémbola (Phylum Hexápoda, familias Entomobryidea e Isotomidae) y la función desempeñada por estos en los tres sistemas de manejo agronómico del cultivo de café, generando elementos de análisis desde la funcionalidad de estos organismos como aporte a la sustentabilidad de los agroecosistemas; todo ello con base en que la agroecología provee el conocimiento y metodología necesarios para desarrollar una agricultura que sea ambientalmente adecuada, altamente productiva y económicamente viable (Gliessman, 2002) y que, además, los organismos del suelo son una parte integral de los ecosistemas agrícolas. La presencia de una variedad de organismos del suelo es esencial para el mantenimiento de suelos productivos saludables. Una reducción excesiva de la biodiversidad del suelo, especialmente la pérdida de especies con características y funciones únicas, puede tener efectos catastróficos, lo que lleva a largo plazo a la degradación del suelo y la pérdida de capacidad productiva agrícola (Ruiz, Lavelle, & Jiménez 2008).

El orden Collembola junto con el orden Acari son los actores con mayor distribución en el medio edáfico al ser comparados en materia poblacional con cualquier otro insecto. Los colémbolos son insectos que no presentan metamorfosis, no tienen alas y su abdomen y antenas tienen seis segmentos o menos. Los colémbolos en la funcionalidad agroecosistémica son actores importantes en la formación del suelo porque descomponen materiales orgánicos, lo que genera más disponibilidad de alimentos y mayor porosidad de la capa superficial del suelo. Estos insectos se ven muy afectados por la disminución de la humedad de los suelos, razón por la cual pareciera que su actuar estuviera dirigido a mejorar condiciones de suelo que influyen en la retención de humedad de estos a través de la gestión de los residuos orgánicos.

De otra parte, la diversidad de artrópodos se correlaciona con la diversidad vegetal en agroecosistemas. En general, una mayor diversidad de plantas implica una mayor diversidad de herbívoros y esto, a su vez, determina una mayor diversidad de depredadores y parásitos, lo que resulta en cadenas tróficas complejas. Una biodiversidad total mayor puede asegurar la optimización de procesos ecológicos claves y el funcionamiento de los agroecosistemas (Nicholls, 2008, p. 180).

4.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.2.1 LOCALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

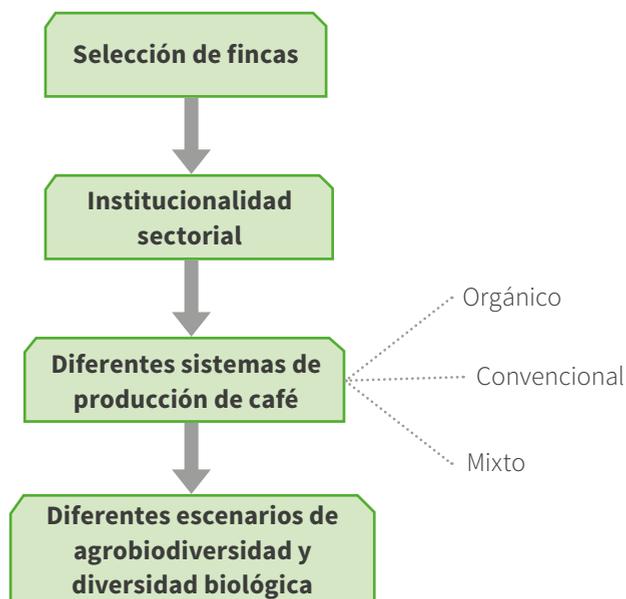
La localización de la investigación es la vereda La Marcada, municipio del Líbano del departamento del Tolima, con coordenadas 04° 55' 10" latitud norte y 75° 10' 15" longitud oeste.

Los suelos del estudio presentan un contenido pedológico *Melanudans* correspondientes a la unidad Líbano caracterizados por material parental de cenizas volcánicas. Estos suelos muestran un contenido de materia orgánica alto, baja fertilidad en cuanto a contenidos de bases intercambiables y muy pobre presencia de fósforo soluble (García, 2016).

4.2.2 ESTRUCTURA DEL ENSAYO

Se realizó la selección de las fincas según los criterios establecidos en la figura 4.1.

FIGURA 4.1 Diagrama general de investigación

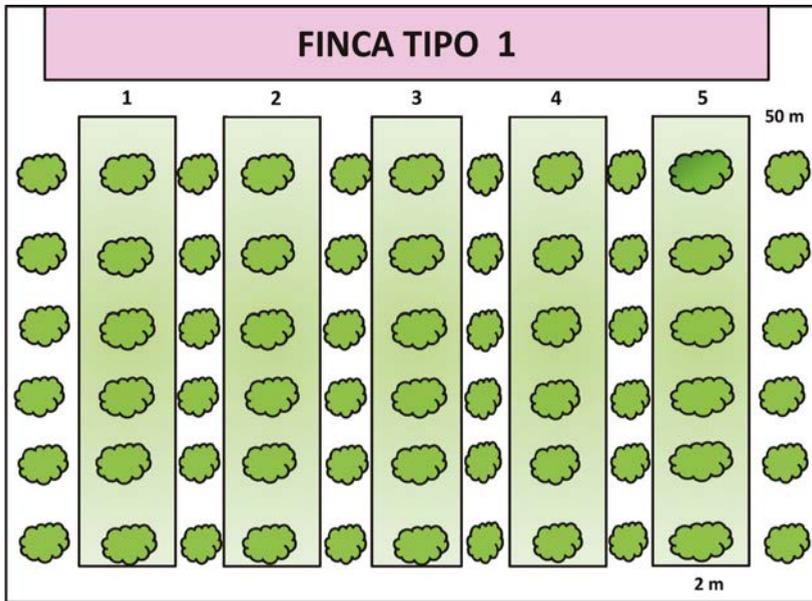


Fuente: Los autores

En la evaluación de la zona cafetera del Líbano en la vereda La Marcada se priorizó una zona donde se presentaban diferentes manejos agronómicos de café con una relativa homogeneidad en cuanto a pendiente y fincas ubicadas en un determinado rango de altitud (a. s. n. m), en los cuales se compartió la información con los dueños del predio para realizar la investigación y programar el plan de trabajo.

Finca tipo 1 (San Felipe). Con manejo agronómico convencional, con arreglo estructural monocultivo de café (sin especies asociadas al café), utilización de insumos químicos de síntesis como fertilizantes altamente solubles e insecticidas, herbicidas y fungicidas plaguicidas de síntesis química (figura 4.2).

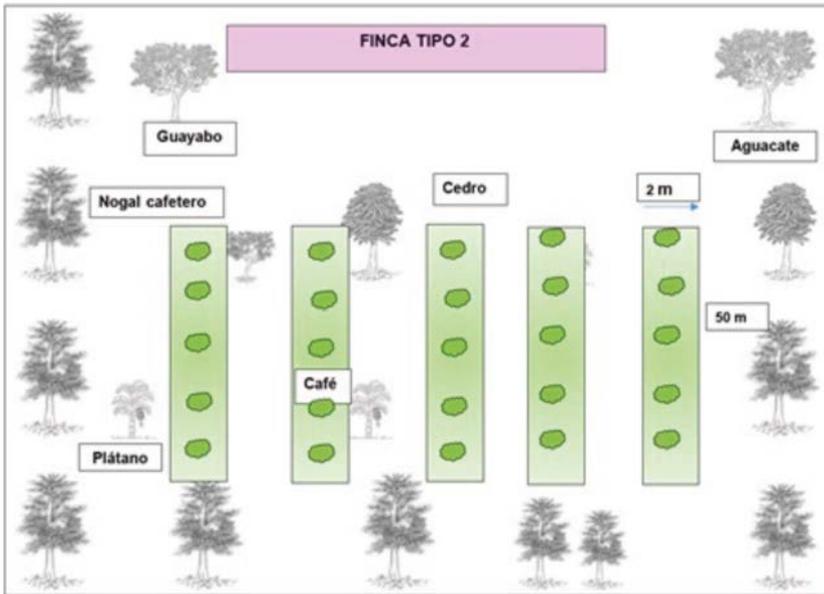
FIGURA 4.2 Arreglo sistema tipo 1 (convencional)



Fuente: García (2016)

Finca tipo 2 (San Luis). Con manejo orgánico que lleva cerca de 25 años en procesos de producción certificados bajo el marco normativo nacional e internacional en producción orgánica; su estructura se basa en arreglos de policultivo y/o asociaciones de café, la administración de agroecosistemas en el marco de la ecología y la utilización de diferentes insumos de origen natural como compost, derivados de rocas, caldos trofobióticos, inoculantes microbiales, hongos antagonistas, microorganismos entomopatógenos y arreglos alelopáticos, entre otros. Por lo anterior, este sistema en su diseño tiene varias especies vegetales asociadas al cultivo del café (figura 4.3).

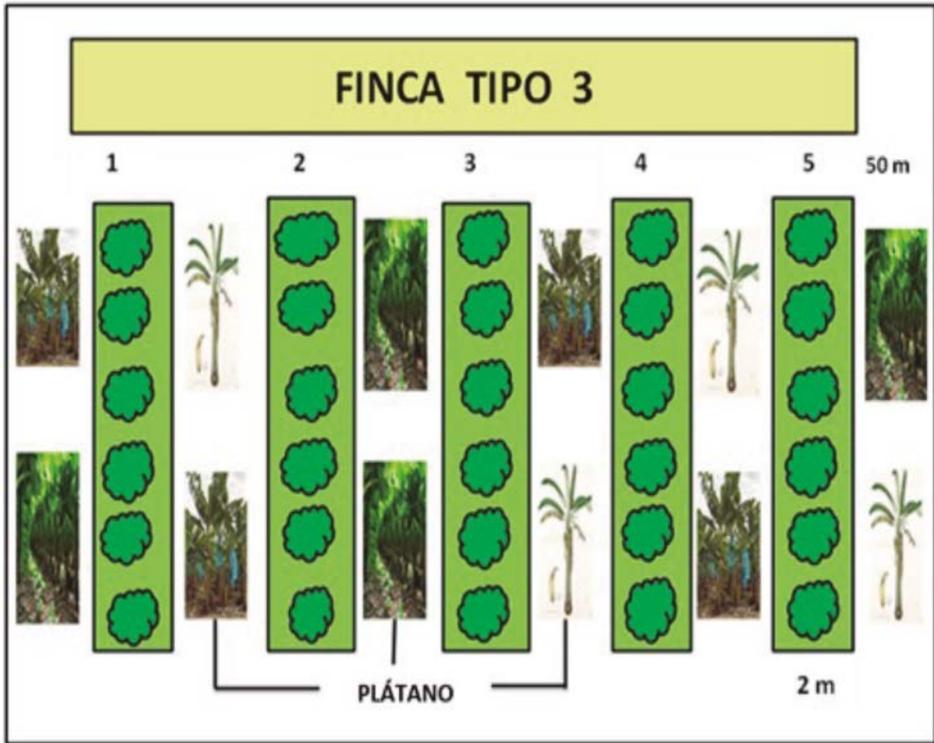
FIGURA 4.3 Arreglo sistema tipo 2 (orgánica)



Fuente: García (2016)

Finca tipo 3 (La Granja). Con manejo mixto; denominada así por tener prácticas de la finca convencional y la orgánica. Su estructura está basada en el cultivo de café con barreras de plátano, la utilización racional de insumos químicos de síntesis (insecticidas, fertilizantes) y el manejo mecánico de arvenses. Este diseño agroecosistémico involucra varias especies en asocio con el café (figura 4.4). Para cada finca tipo se diseñaron e implementaron al azar cinco (5) transectos de cincuenta (50) metros de largo por dos (2) metros de ancho con una distancia aproximada de veinte (20) metros entre los transectos.

FIGURA 4.4 Arreglo sistema tipo 3 (mixta)



Fuente: García

4.2.3 COLECTA DE MUESTRA PARA CARACTERIZACIÓN DE POBLACIONES DE COLÉMBOLOS

Se colectaron muestras aleatoriamente en cada uno de los quince (15) transectos establecidos en las fincas tipo; es decir, cinco (5) transectos por finca (Álvarez et al., 2004). En cada transecto se tomaron al azar tres tratamientos de un metro cuadrado de área, donde se colectó un 1 kg de suelo a una profundidad de 0 a 10 cm en donde estaban presentes los colémbolos (figura 4.5).

FIGURA 4.5 *Toma de muestra*



Fuente: Los autores

A continuación, se realizó el empaqueo y rotulado de las muestras y se llevaron al laboratorio de Entomología de la Universidad del Tolima, donde mediante la metodología del embudo Berlesse se realizó la respectiva caracterización de los artrópodos (figura 4.6).

FIGURA 4.6 *Rotulado de muestra y estructura de embudo Berlesse*



Fuente: Los autores

Inicialmente, se realizó la debida preparación de la solución alcohólica de etílico al 70 % en los frascos de la estructura del embudo (figura 4.7).

FIGURA 4.7 Preparación de la solución alcohólica para el embudo Berlesse



Fuente: Los autores

En cada embudo se realizó la respectiva adecuación de los frascos con solución de alcohol, que se constituyeron en las trampas de la migración de los artrópodos de las muestras de suelo (figura 4.8).

FIGURA 4.8 Ensamble del aditamento de solución alcohólica de embudo Berlesse



Fuente: Los autores

Las muestras de suelo se depositaron en cada una de las bandejas que tienen los embudos, diseñadas con una malla en la parte baja para permitir la migración de los artrópodos a través del perfil de dicha muestra (figura 4.9).

FIGURA 4.9 *Contenedor de muestra de embudo Berlesse y aplicación de muestra*



Fuente: Los autores

A continuación, se disgregó cada muestra manualmente en cada contenedor de los embudos y adicionalmente se colocaron los bombillos en la tapa del embudo, cuya función era la de calentar la muestra de suelo y además influir en las poblaciones de artrópodos de manera que las obligara a migrar hacia la parte baja de la muestra de suelo buscando la oscuridad y una menor temperatura del suelo. Cada embudo fue debidamente rotulado según las muestras colectadas para las fincas convencional, orgánica y mixta (figura 4.10).

FIGURA 4.10 *Adecuación de muestra y bombillo de embudo Berlesse*



Fuente: Los autores

Después de observar por varios días se procedió a separar todos los frascos, debidamente rotulados, y se llevaron al área de estereoscopios; allí se realizó la observación y debida comparación con las claves de clasificación para finalmente establecer la caracterización de cada una de las especies colectadas en los recipientes. Esta información fue debidamente sistematizada y estableció la familia y las poblaciones por cada familia para llegar a totalizar el número de colémbolos por cada finca tipo en el total de transectos.

4.2.4 ANÁLISIS DE SUELOS

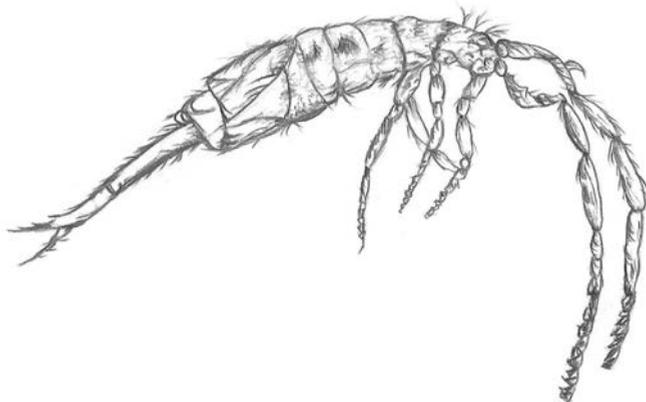
Paralelamente a la toma de la muestra para caracterización de colémbolos se realizó la toma de muestra para análisis de suelos, la cual se realizó bajo los parámetros de una muestra de suelo convencional. Las muestras se empacaron y rotularon con la información de cada finca tipo, la cual era producto de la sumatoria de submuestras en cada uno de los cinco (5) transectos.

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

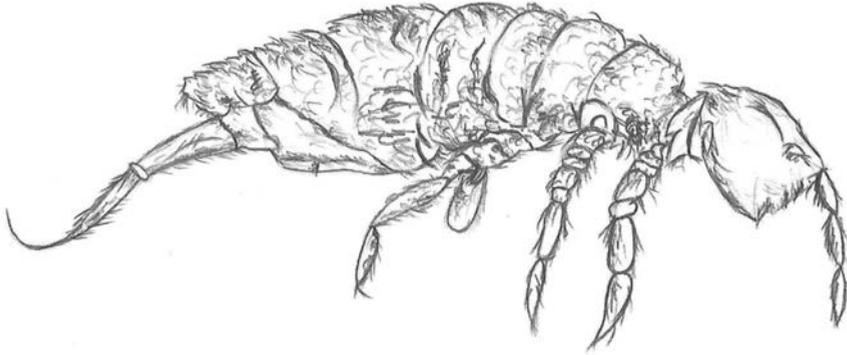
4.3.1 CARACTERIZACIÓN DE COLÉMBOLOS

A continuación se presentan las tablas de poblaciones de colémbolos encontradas en los sistemas evaluados; las familias más importantes son la Entomobryidae e Isotomidae por función agroecosistémica en torno a la materia orgánica (figuras 4.11 y 4.12).

FIGURA 4.11 *Familia Entomobryidae*



Fuente: Los autores

FIGURA 4.12 Familia Isotomidae

Fuente: Los autores

TABLA 4.1 Listado especies de colémbolos y población por cada especie, finca tipo 1 (convencional – San Felipe)

Phyllum	Clase	Orden	Familia	n
HEXAPODA	Collembola	Entombryidae	Entomobryidae	87
HEXAPODA	Collembola	Isotomidae	Isotomidae	16
HEXAPODA	Collembola	Poduridae	Poduridae	11
HEXAPODA	Collembola	Sminthuridae	Sminthuridae	2
HEXAPODA	Collembola	NI	Collembola	1
TOTALES				117

Fuente: Los autores

La finca convencional registra cinco (5) especies de colémbolos con una población total de 117 unidades en donde predominan las familias Entomobryidae e Isotomidae con 87 y 16 unidades respectivamente (tabla 4.1).

TABLA 4.2 Listado especies de colémbolos y población por cada especie, finca Tipo 2 (orgánica – San Luis)

Phyllum	Clase	Orden	Familia	n	n
HEXAPODA	Collembola	Entombryidae	Entomobryidae	9	153
HEXAPODA	Collembola	Isotomidae	Isotomidae	10	138
TOTALES					291

Fuente: Los autores

La finca orgánica registra dos (2) especies de colémbolos con una población total de 291 unidades en donde predominan las familias Entomobryidae e Isotomidae con 153 y 138 unidades respectivamente (tabla 4.2).

TABLA 4.3 Listado especies de colémbolos y población por cada especie, finca tipo 3 (mixta – La Granja)

Phyllum	Clase	Orden	Familia	n
HEXAPODA	Collembola	Entombryidae	Entomobryidae	119
HEXAPODA	Collembola	Isotomidae	Isotomidae	92
HEXAPODA	Collembola	Poduridae	Poduridae	18
TOTALES				229

Fuente: Los autores

La finca mixta registra tres (3) especies de colémbolos con una población total de 229 unidades en donde predominan las familias Entomobryidae e Isotomidae con 119 y 92 unidades respectivamente (tabla 4.3)

4.3.2 ANÁLISIS QUÍMICO-FÍSICO DE MUESTRAS DE SUELO

Con el fin de poder relacionar las características físicas y químicas del suelo de la fincas convencional, orgánica y mixta con las poblaciones de colémbolos, se realizó el análisis de suelo completo, que involucra textura, contenidos de elementos mayores, elementos menores, capacidad de intercambio catiónico y la variable más observada para este estudio, que es el contenido de materia orgánica. Para el caso del presente estudio, por la naturaleza del accionar de los colémbolos, se presentan los resultados de los contenidos de materia orgánica y los elementos mayores, que están relacionados con la estructura agroecosistémica y el manejo agronómico de cada finca tipo (tabla 4.4).

En este sentido, el manejo de la finca convencional ha tenido aplicaciones de fertilizantes convencionales como la 17-6-18-2 en cantidades para el último año de 100 gr /planta año, que corresponden a una dosis de 1,5 t.ha⁻¹.año⁻¹. De otra parte, para el manejo de arvenses utilizan el herbicida Round Up.

La finca orgánica ha tenido aplicaciones de compostaje en cantidades de 1 a 2 kg.planta⁻¹, cerca de 3 a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹. Adicionalmente, se manejan minerales derivados de

roca tanto por aplicación edáfica como por aplicación foliar. Para el manejo de arvenses se utiliza guadaña o machete y se dejan como cobertura viva las arvenses nobles.

Por último, la finca mixta ha tenido aplicaciones de fertilizante similar a la convencional, pero su manejo de arvenses es de tipo mecánico y el arreglo del sistema involucra plátano en barreras.

TABLA 4.4 *Contenidos de materia orgánica y elementos mayores en las fincas tipo 1 (convencional), tipo 2 (orgánica) y tipo 3 (mixta)*

	Finca concencional Tipo 1 (San Felipe)	Finca orgánica Tipo 2 (San Luis)	Finca mixta Tipo 3 (La Granja)
Materia orgánica (%)	4,25	18,5	11,4
Elementos			
Fosforo (mg/kg)	10,82	17,34	18,48
Potasio (cmol/kg)	0,94	0,48	1,06
Calcio (cmol/kg)	3,15	1,13	2,91
Magnesio (cmol/kg)	0,45	0,26	0,4

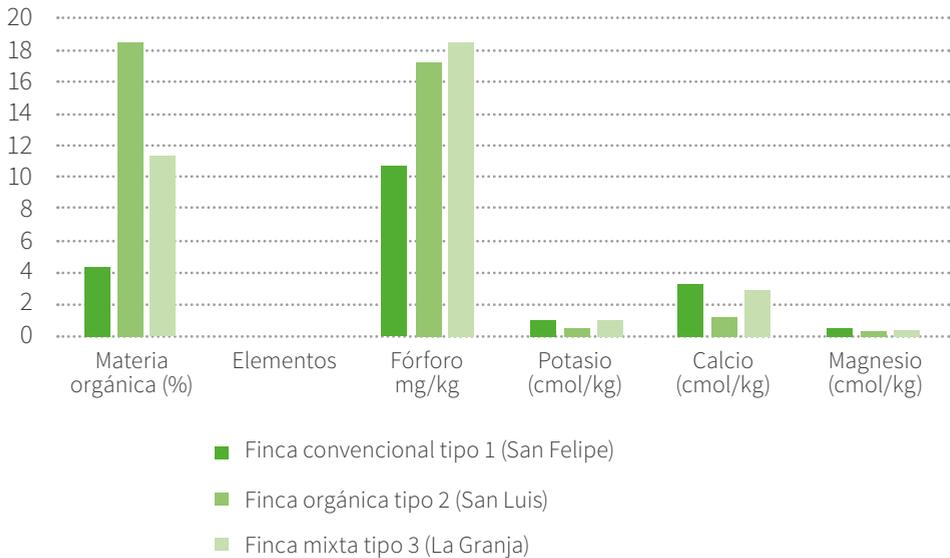
Fuente: Los autores

Según el rol de los colémbolos en la descomposición de la materia orgánica se puede apreciar que la finca orgánica, con una mayor población de colémbolos por unidad de volumen de suelo, presenta una diferencia significativa en cuanto a las familias de Entomobryidae e Isotomidae (153 y 138 individuos respectivamente) con la finca mixta (119 y 92 respectivamente) y la finca convencional (87 y 16 respectivamente).

Así, la finca orgánica expresa una mayor cantidad de materia orgánica (18,5 %) frente a la finca mixta (11,4 %) y la convencional (4,25 %). Se aprecia cómo el manejo agronómico influye positivamente en las poblaciones de colémbolos y ello influye en la funcionalidad de concentración de la materia orgánica; además la estructura del sistema productivo pues la finca orgánica cuenta con una entrada adicional de materia orgánica producto del deshoje de los árboles presentes en el diseño. De otra parte, el manejo de las arvenses influye en el manejo adecuado de las concentraciones de ácidos húmicos en la finca orgánica y la mixta pues este se resume en guadañas que dejan una cubierta orgánica que incrementa paulatinamente los contenidos de materia orgánica del suelo frente al manejo convencional de la finca convencional, que se realiza con glifosato, un insumo altamente disgregante de los agregados del

suelo, de tal forma que los ácidos húmicos y fúlvicos quedan expuestos fácilmente a la acción de erosión por acción de la lluvia, lo que genera una disminución paulatina de la materia orgánica (figura 4.13).

FIGURA 4.13 *Contenidos de materia orgánica y elementos mayores en las fincas tipo 1 (convencional), orgánica (tipo 2) y mixta (tipo 3)*



Fuente: Los autores

Lo anterior demuestra la alta interacción entre los colémbolos como componente de la biodiversidad funcional del agroecosistema y la dinámica de la materia orgánica en el rol de transformación de macromoléculas lignocelulíticas y de residuo diversidad hacia formas más mineralizadas y en busca de la relación C/N acordes con las dinámicas propias de la naturaleza.

Es de anotar que el diseño agroecológico influye notoriamente en las poblaciones de colémbolos debido a que el gradiente de diversidad de especies vegetales además de activar una mayor cantidad de cadenas tróficas genera una mayor estabilidad de la humedad del suelo, aspecto que es crucial puesto que es el factor más importante en la dinámica de los colémbolos debido a su baja tolerancia a la desecación. Por esta razón, la finca orgánica presenta ventajas importantes en la generación de un sinnúmero de nichos para los colémbolos al tener en su diseño muchos actores vegetales de biodiversidad (mulch de hojarasca, arvenses nobles y mulch de guadañada) que coadyuvan al mantenimiento de un rango más estable de humedad del suelo.

4.4 CONCLUSIONES

La alta interacción entre los colémbolos como componente de la biodiversidad funcional del agroecosistema se ve favorecida en diseños con mayor ciclaje de la materia orgánica en el rol de transformación de macromoléculas lignocelulíticas y de residuo diversidad, hacia formas más mineralizadas y en busca de la relación C/N acordes con las dinámicas propias de la naturaleza puesto que la alta relación carbono/nitrógeno es un aspecto que influye notoriamente en la dinámica de descomposición de los residuos (Sanclemente, García y Valencia, 2011). El compostaje se maneja como técnica de habilitación de los residuos que imita la descomposición que sufren estos en la naturaleza (Valverde, Encinales, Vargas y García, 2020) con la ayuda de la macro y microfauna; dentro de estos los colémbolos realizan una función muy importante.

El diseño agroecológico influye notoriamente en las poblaciones de colémbolos debido a que el gradiente de diversidad de especies vegetales además de activar una mayor cantidad de cadenas tróficas genera una mayor estabilidad de la humedad del suelo, aspecto que es crucial porque es el factor más importante en la dinámica de los colémbolos debido a su baja tolerancia a la desecación. Como expresan García y Barrera (2019), los patrones de manejo antrópico de cada una de las fincas tipo influye en las poblaciones de artrópodos producto de la naturaleza de los insumos utilizados en la producción.

Por esta razón, la finca orgánica presenta ventajas importantes en la generación de un sinnúmero de nichos para los colémbolos al tener en su diseño muchos actores vegetales de biodiversidad (mulch de hojarasca, arvenses nobles y mulch de guadañada) que coadyuvan al mantenimiento de un rango más estable de humedad del suelo y unos niveles de materia orgánica acordes con la matriz territorial.

El conocimiento local es fundamental en la administración territorial de predios en los cuales las prácticas de manejo adecuadas redundan en el mejoramiento de los contenidos de los niveles de materia orgánica, lo cual está relacionado directamente con las altas poblaciones de individuos de colémbolos asociadas.

4.5 REFERENCIAS

Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., Umaña, A. y Villareal, H. (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

García, M. (2016). *Análisis exergético a sistemas de producción de café y su relación con la sustentabilidad* (tesis doctoral). Universidad Nacional, Palmira, Colombia.

García, M. y Barrera, N. (2019). Diversidad de artrópodos en tres sistemas de manejo agronómico de café en el municipio de Líbano, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 10(2), 37-50.

Gliessman, S. (2002). *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Catie.

Nicholls, C. (2008). *Control biológico de insectos: un enfoque agroecológico (Vol 2)*. Universidad de Antioquia.

Ruiz, N., Lavelle, P. y Jiménez, J. (2008). *Soil Macrofauna Field Manual*. Food And Agriculture Organization Of The United Nations.

Sanclemente, O., García, M. y Valencia, F. (2011). Efecto del uso de melaza y microorganismos eficientes sobre la tasa de descomposición de la hoja de caña (*Saccharum officinarum*). *Revista Investigación Agraria y Ambiental*, 2(2), 13-19.

Valverde Granja, A., Encinales, J., Vargas, G. y García, M. (2020). *Alternativas sostenibles para sistemas productivos de limón*. Ediciones Unibagué.



CAPÍTULO

TECNOLOGÍAS AGROAMBIENTALES PRECURSORAS DE MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO EN CULTIVOS INDUSTRIALES DEL VALLE DEL CAUCA (COLOMBIA)



Óscar Eduardo Sanclemente Reyes
Mauricio García Arboleda
Milton César Ararat Orozco
Julio César Montoya Rendón

5.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los retos más importantes que afronta la humanidad es su adaptación a los efectos que impone el cambio climático global. Estos efectos van desde incrementos de la temperatura ambiente con consecuente alteración del ciclo hidrológico hasta reducción de la capacidad productiva de alimentos por escasez de recursos naturales como agua y suelo, lo que ocasiona desplazamientos, hambrunas e incluso pérdidas humanas.

Diversos estudios afirman que el cambio climático global está siendo causado por desbalance de los ciclos biogeoquímicos, especialmente del carbono y nitrógeno (Galloway et al., 2004; Rockström et al., 2009; Davidson et al., 2012). Gran parte del carbono secuestrado por la corteza terrestre durante millones de años está siendo emitido a la atmósfera por medio de productos de combustión, y peor aún, está llegando a los ecosistemas en forma pura como los crudos del petróleo o transformado en cientos de productos derivados poco biodegradables, generando acumulación y contaminación.

Los principales gases de efecto invernadero (fenómeno causante del cambio climático global) son el dióxido de carbono CO_2 , metano CH_4 y óxido nitroso N_2O . Estas sustancias son emitidas como producto de diversas actividades humanas, entre las que se destacan el sector transporte, minero-energético, industrial y agropecuario. En la mayoría de los casos, la producción de estas sustancias es mediada por el oxígeno que abunda en la atmósfera, lo que facilita reacciones de óxido-reducción con productos, en el caso del carbono como el CO_2 por combustión o respiración aeróbica en la mayoría de las formas de vida. De otro lado, el carbono orgánico secuestrado en el suelo y la biomasa pueden sufrir transformación por agentes microbianos en ambientes anaeróbicos, convirtiéndose en CH_4 , que al igual que el CO_2 se emite a la atmósfera y se mezcla con sus gases componentes.

A pesar de que la mayoría de estas emisiones se dan en el planeta naturalmente, su producción ha venido siendo incrementada paulatinamente en el último siglo por una población creciente. Estos excesos de carbono no han logrado ser capturados e incorporados en la matriz natural y, por el contrario, están siendo concentrados en la exosfera, conformando una barrera densa que impide el retorno de los rayos solares que se reflejan en superficie hacia el espacio exterior, como ocurre normalmente en un invernadero.

De otro lado, se estima que anualmente se fijan en el suelo cerca de 250 millones de toneladas de nitrógeno proveniente de la atmósfera a través de la acción de microor-

ganismos de vida libre y asociados con las raíces de algunas plantas. Este nitrógeno abastece los requerimientos nutricionales de la vida que alberga el suelo en todas sus manifestaciones ya que entra a formar parte de moléculas orgánicas como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e intercambiadores energéticos. Sin embargo, la creciente demanda de este elemento en la agricultura ha generado la necesidad de sintetizarlo por vía industrial, llegando a incorporar casi 40 millones de toneladas anualmente y ocasionando un desbalance global (Davidson et al., 2012). Gran parte de este nitrógeno no alcanza a ser utilizado por el metabolismo de las plantas y en cambio se volatiliza en formas nocivas como el N_2O (tercer gas de efecto invernadero después del CO_2 y CH_4).

A pesar de que el uso de sustancias químicas en la agricultura trasciende al carbono y al nitrógeno, estos dos elementos han venido captando gran atención por parte de los investigadores ya que, como se mencionó anteriormente, intervienen directamente en las causas de cambio climático.

Adicionalmente, estos elementos son claves en procesos naturales como la respiración, la fotosíntesis y la fijación de N_2 , considerados como los más importantes en la naturaleza.

Por tal motivo, la sustentabilidad de los sistemas agrícolas dependerá en gran medida de cómo se potencien estos procesos naturales a favor de la conservación del suelo y el manejo de los cultivos, maximizando el uso de recursos y aprovechando la energía solar como fuente inagotable. La conservación del suelo está ligada estrechamente

a la materia orgánica componente, que a través de sus propiedades le confiere resiliencia, fertilidad, estabilidad, salud y productividad. Biomasa significa captura de carbono, que inicia con el proceso fotosintético y posteriormente es reciclada por los organismos del suelo que la transforman en humus o materia orgánica estable del suelo (MOS).

Es bien reconocida la función de la MOS como componente que integra y regula sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Juega un papel crucial en agroecosistemas sostenibles al participar de atributos emergentes como salud, resiliencia, fertilidad y autorregulación. Estos atributos pueden ser potenciados mediante prácticas tecnológicas de cultivo y la integración del componente animal en los agroecosistemas, factores que incentivan procesos de reciclaje de nutrientes, regulación hídrica, reducción de erosión e incremento de la fitosanidad, entre otros.

El objetivo de este capítulo es presentar algunas experiencias en tecnologías agroambientales en el departamento del Valle del Cauca (Colombia), que favorecen el ciclaje de materia orgánica del suelo en cultivos industriales como maíz, soya y caña de azúcar. Se destacan el uso de coberturas vegetales, abonos verdes y mulching, complementadas con el uso de fertilización órgano-mineral. Los resultados presentados son producto de ensayos realizados por miembros del grupo de investigación Producción Sostenible de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) en colaboración con otros investigadores y entidades regionales.

5.2 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO: COMPONENTE FUNDAMENTAL PARA LA SOSTENIBILIDAD AGROECOSISTÉMICA

De acuerdo con Sánchez et al. (2012), el suelo es un sistema vivo que participa activamente en la sostenibilidad de los agroecosistemas. Se considera vivo porque presenta patrones de organización cerrados que forman su estructura, presenta interacciones con el entorno en términos de materia y energía, contiene redes metabólicas que aseguran el automantenimiento y es un sistema cognitivo, expresado en la capacidad de aprendizaje de los organismos constituyentes para adaptarse ante perturbaciones externas.

De los constituyentes sólidos del suelo, la materia orgánica es el componente que más representa su carácter vivo. Labrador (2012) clasifica la materia orgánica del suelo como viva y no viva. La viva está constituida por el sistema de raíces, macro y microorganismos. La no viva la constituye la fase inestable: biomoléculas, restos de vegetales,

animales y biota edáfica con paso transitorio por el suelo debido a su alta susceptibilidad de transformación y la fase estable (o humus): constituida por moléculas mayormente transformadas como la humina, ácidos húmicos, fúlvicos e himatomelánicos. A esta última fase de la materia orgánica no viva la llamaremos MOS.

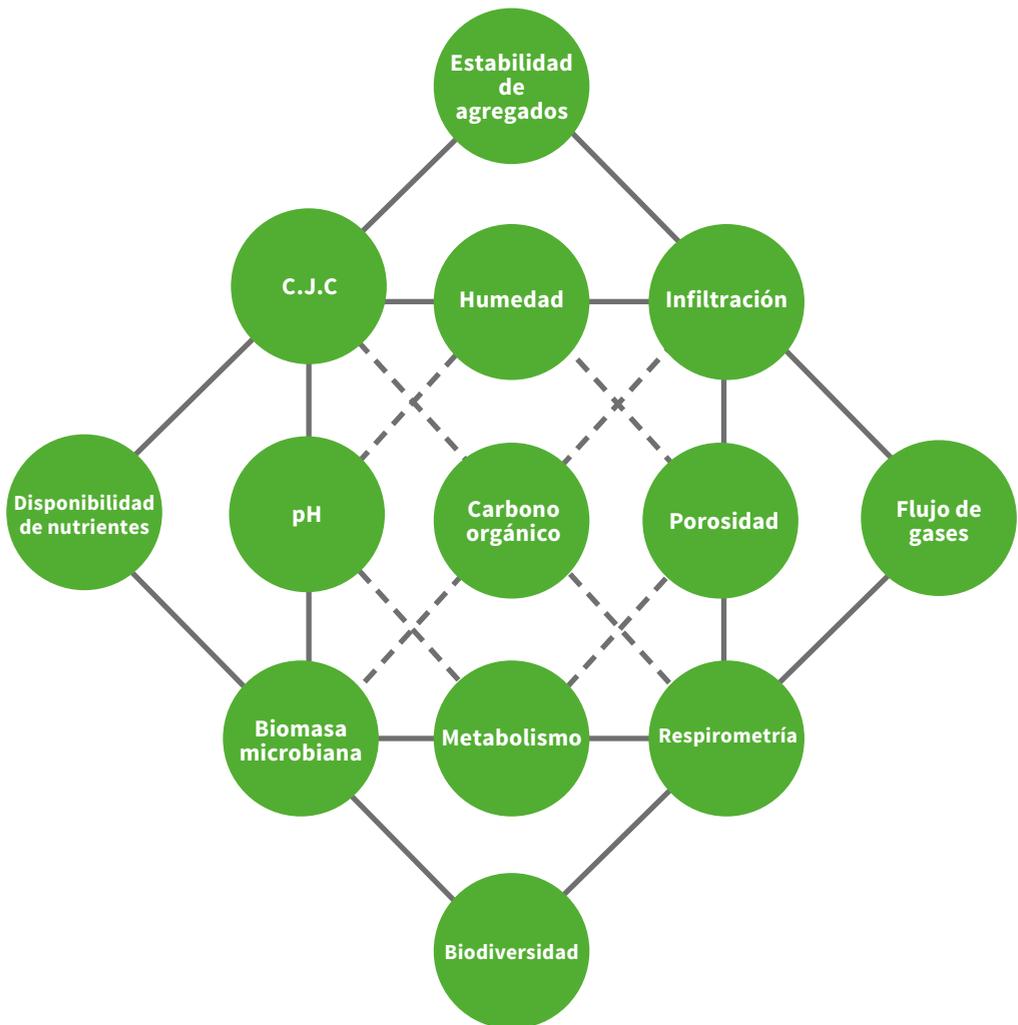
En agroecosistemas, la acumulación o pérdida de la MOS es producto del clima, de la acción de la biodiversidad arriba y abajo, de prácticas de manejo del suelo y de factores adversos como la erosión. Aunque la MOS está constituida por cientos de moléculas orgánicas, en su mayoría compuestos aromáticos, el carbono orgánico CO es su principal elemento constituyente con cerca del 68 %. De ahí que las pruebas de laboratorio para evaluar contenidos de MOS contemplen la estimación previa del CO y posteriormente la multiplicación de este valor por 1,724 o factor de van Benmelen (Martínez et al., 2008 citados por Labrador, 2012). La mineralización del CO libera CO₂ que difunde por los poros del suelo hacia la atmósfera, siendo aprovechado por plantas y otros organismos autótrofos. Sin embargo, aquellas moléculas de alto peso y baja tasa de biodegradación son acumuladas mediante el proceso de humificación, enriqueciendo las MOS.

La MOS se considera nodo integrador de las demás propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. A nivel físico, la MOS incrementa la retención de humedad gracias a su alta porosidad y capacidad de imbibición, posibilita la formación de agregados estables al agua reduciendo sus pérdidas por erosión y regula la temperatura del suelo. A nivel químico, la MOS le aporta al suelo carácter de tampón pues regula cambios bruscos de pH, forma complejos órgano-minerales que ayudan a su estructura e incrementa la capacidad de intercambio catiónico por su carácter coloidal; los ácidos húmicos presentes generan alta adsorción de nutrientes y los ácidos fúlvicos permiten la movilidad de estos hacia las raíces de las plantas por su poder quelante. Finalmente, la MOS es precursora y producto de la actividad biológica del suelo a través de procesos de ciclaje de residuos orgánicos que inicia en la descomposición y posteriormente mineralización y humificación. En estos procesos actúan diversos grupos de organismos entre los que destacan lombrices, termitas, hormigas, coleópteros, colémbolos, ácaros, dermápteros, hongos y bacterias. Los productos metabólicos de estos organismos son aprovechados por otros como fuente de nutrientes o microhábitat, generando una red invisible de interacciones.

Mientras Sanclemente (2009) evaluaba la incidencia de cultivos de cobertura y abonos verdes sobre la pérdida de suelo y el aporte de nutrientes al cultivo de maíz en zona de ladera del municipio de Palmira, registró una red de interacciones entre algunas propiedades del suelo, tomado como nodo central el CO (figura 5.1). Esta red se obtuvo mediante análisis de correlación Pearson ($p < 0.1$) de los datos, donde las líneas

continuas indican alta relación entre las variables y las punteadas de media a baja relación. En esta investigación, el aporte biomásico de la leguminosa *Mucuna pruriens* como mulch al suelo generó un efecto priming que dinamizó la actividad biológica del suelo, incrementó la retención de humedad en los primeros centímetros, redujo la erosión en cerca del 30 % comparada con el suelo desnudo y aportó nutrientes (N, P y otros) favoreciendo su absorción por el cultivo de maíz en rotación, que obtuvo rendimientos de 6.5 t.ha⁻¹.

FIGURA 5.1 Red de interacciones entre algunas propiedades del suelo *Typic Haplustalfs*.



Fuente: Sanclemente (2009)

Existen otras propiedades emergentes del suelo que surgen de la interacción entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Se destacan como propiedades emergentes la fertilidad, la resiliencia, la salud, y la autorregulación, que en cierta medida son indicadores de sostenibilidad del agroecosistema. La fertilidad del suelo hace referencia a su capacidad de suministrar agua y nutrientes a las plantas y demás organismos del suelo, siendo fundamental el ciclaje de residuos orgánicos por acción biológica (Sánchez et al., 2007). La resiliencia es la capacidad del suelo de volver a su estado de equilibrio previo luego de sufrir una perturbación externa, como por ejemplo la disturbación ocasionada por mecanización agrícola, inundaciones en épocas de lluvia, erosión y contaminación por agroquímicos, hidrocarburos, metales pesados, etc. (Sánchez et al., 2007). La salud del suelo antes definida como ausencia de organismos patógenos, hoy se entiende como la capacidad de suministrar servicios ecológicos con alto nivel de inocuidad y bienestar (Altieri y Nicholls, 2007; Döring et al., 2012; Álvarez et al., 2014). La autorregulación se define como la capacidad del suelo de mantener su equilibrio normal a partir de sus factores de formación, siendo importante la estabilidad estructural, mineralogía, porosidad, reacción y actividad biológica.

La sostenibilidad de los agroecosistemas dependerá en gran medida de diversos factores como son el socioecológico, las propiedades emergentes del suelo, el grado de heterogeneidad (policultivos, diversidad funcional, integración animal y otros) que genera sinergias, el uso eficiente del agua, el aprovechamiento de energía solar como fuente inagotable, la salud animal y vegetal, su autonomía y reproducibilidad temporo-espacial. Nicholls et al. (2015) señalan la importancia de generar procesos de conversión y rediseño de sistemas agrícolas bajo el enfoque agroecológico, con miras de lograr la sostenibilidad agroecosistémica. Esta conversión inicia con la ruptura de la naturaleza del monocultivo y adopción de prácticas que incentiven la diversificación agroecológica para promover sinergias, ciclaje de materia orgánica, activación biológica, conservar el suelo y el agua, balancear poblaciones de organismos plagas y enemigos naturales y así mantener la salud, productividad y autosostenimiento del agroecosistema.

En el proceso de transición entre sistemas de producción convencionales de altos insumos hacia aquellos con manejo de base agroecológica se destacan algunas prácticas como la rotación de cultivos, cultivos de cobertura, abonos verdes provenientes de leguminosas para fijación de N_2 , elaboración y aplicación de compostaje y lombricompostaje a partir de residuo-diversidad del agroecosistema (Lotter, 2003; Prager et al., 2012; Nicholls et al., 2015; Sanclemente y Ararat, 2017). Nótese la importancia de estas prácticas sobre la gestión de la MOS como componente fundamental de la sostenibilidad agroecosistémica.

5.3 LOS CULTIVOS INDUSTRIALES DE CAÑA DE AZÚCAR, MAÍZ Y SOYA EN EL DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA

5.3.1 EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR *SACCHARUM OFFICINARUM L.*

De acuerdo con la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia (2012), la caña de azúcar fue traída a Cali por Sebastián de Belalcázar, quien la cultivó en Yumbo en su estancia durante el periodo colonial. Posteriormente, el cultivo de caña se extendió por el occidente y centro del departamento del Valle del Cauca para abastecer trapiches de producción de panela, azúcar y mieles; este proceso duró varias décadas. A mediados del siglo XX, se inició la modernización del sector; en 1930 ya había tres ingenios en el departamento: Manuelita, Providencia y Río Paila. La alta rentabilidad económica de la actividad azucarera y la exportación de sus productos generó crecimiento paulatino del sector, que se expandió incluso a otros departamentos vecinos y en la actualidad cuenta con 22 ingenios, así como un área total sembrada cercana a 230 000 ha en los departamentos de Valle del Cauca, Nariño, Cauca y Risaralda.

La modernización del cultivo de caña de azúcar trajo consigo la mecanización agrícola para manejo de suelos y otras labores culturales que hoy día prevalecen. Del mismo modo, se creó la necesidad de generar procesos investigativos tendientes a describir los tipos de suelos, las condiciones agroclimáticas del departamento, el desarrollo de equipos e implementos, los itinerarios de cultivo y de nuevas variedades más productivas adaptadas a condiciones agroecológicas específicas y la labor desarrollada en la actualidad por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (CENICAÑA) y la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (TECNICAÑA).

El cultivo industrial de caña de azúcar en la mayor parte de las suertes plantadas se lleva a cabo en monocultivos extensos con manejo convencional caracterizado por labranza mecanizada, aplicación de herbicidas pre y pos emergentes, fertilización de síntesis química que puede ser complementada por aplicación de subproductos de fábrica como la vinaza y la cachaza, aplicación de plaguicidas y fungicidas (aunque en algunos casos se hace control biológico), aplicación de madurantes siendo el Round up (glifosato) el más común y, finalmente, un proceso de cosecha mixto manual-mecanizado.

Todas estas labores culturales sumadas al factor genético de nuevas variedades adaptadas a ambientes específicos han incrementado en los últimos años la productividad del cultivo en toneladas de caña por hectárea (TCH), siendo fácil en algunos sitios obtener 230 t.ha⁻¹. Sin embargo, algunos investigadores reportan distintas externalidades ambientales como consecuencia de este modelo intensivo de producción como son la compactación, la salinización y la pérdida de la MOS, así como la contaminación de fuentes hídricas, lo que afecta la sostenibilidad del sistema (Dávalos, 2007; Zúñiga et al., 2011; Pérez et al., 2011; Cuero, 2012). A pesar de que algunas suertes se destinan actualmente al cultivo de cañas orgánicas para satisfacer el mercado internacional, son todavía muy pocas comparadas con el área total sembrada.

5.3.2 EL CULTIVO DE MAÍZ *ZEA MAYS* L.

El cultivo de maíz en Colombia ha sido históricamente importante, incluso desde épocas prehispánicas. Las condiciones geográficas, la radiación solar, la diversidad de climas, los tipos de suelos y demás factores socioecológicos presentes en el país hacen que sea óptimo para la siembra de este cereal (Salgar, 2004). Se estima que existen cerca de 23 razas de maíz en todo el territorio nacional y un sinnúmero de accesiones, siendo Colombia un importante centro de conservación. En la actualidad, el cultivo se siembra bajo dos tipologías: maíz tecnificado y maíz tradicional. El maíz tecnificado se caracteriza por monocultivos extensos que se siembran en suelos con alta fertilidad y acceso a agua de riego, empleando además labranza mecanizada y aplicación de diversidad de agroquímicos. Por su parte, el maíz tradicional es sembrado por pequeños productores en zonas de baja a mediana fertilidad, incluso en laderas, con baja o nula aplicación de insumos, siendo típico en estos sistemas las rotaciones o intercultivos con otras plantas de interés económico (Sanclemente, 2013).

A pesar de que Colombia alberga gran diversidad de maíces y presenta condiciones óptimas para la siembra, actualmente se importa cerca de 90 % del maíz de consumo nacional. La mayor parte del maíz importado se destina a elaboración de alimentos concentrados. Las importaciones han crecido cerca de 23 % durante los últimos cinco años como efecto del Tratado de Libre Comercio (TLC) con los Estados Unidos y actualmente llegan a 4 000 000 de toneladas por año (Viveros, 2017). El maíz a bajo costo de los Estados Unidos no paga aranceles, con lo que el productor nacional no puede ser competitivo ya que obtiene una baja relación beneficio/costo de la actividad.

En Colombia el departamento con mayor área sembrada de maíz tecnificado entre amarillo y blanco es Tolima con 29 000 ha, seguido de Córdoba con 21 000 ha y Meta con 20 000 ha. En el departamento del Valle del Cauca se siembran tecnificadamente cerca de 10 000 ha por semestre logrando los mejores rendimientos nacionales con

8.2 t.ha⁻¹ de grano seco (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2015). Sin embargo, a pesar de la alta productividad en el departamento, los altos costos de producción, en especial de compra de insumos, hacen que se genere un margen bajo de utilidad. En 2013 se invertían \$900 000 en fertilizantes (20 % del total de costos) por hectárea y se percibía una utilidad neta en cosecha de \$125 000, lo que resulta en una actividad poco rentable comparada con la siembra de caña de azúcar (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2013).

Esta condición de margen bajo de utilidad para el productor nacional requiere de políticas gubernamentales que protejan la producción nacional, siendo una alternativa los subsidios de productividad y el apoyo a la comercialización. Se cita como ejemplo la Resolución 439 de 2017 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), que otorga a productores de los departamentos del Valle del Cauca, Meta y Tolima un apoyo a la comercialización de maíz blanco de \$91 000 a \$104 000 por tonelada vendida a un industrial o establecimiento de comercio nacional. A pesar de que este tipo de políticas alivian un poco al productor nacional, sería conveniente explorar algunas tecnologías de cultivo que favorezcan el reciclaje de nutrientes y procesos como la humificación, al tiempo que permitan reducir costos de producción, siendo alternativas los intercultivos, los abonos verdes y los acolchados orgánicos con leguminosas (Sanclemente y Ararat, 2017).

5.3.3 EL CULTIVO DE SOYA *GLYCINE MAX L.*

La soya es la leguminosa cultivada más importante del mundo debido a su área sembrada, sus bondades nutricionales y su contenido de aceites, que la convierten en materia prima para diversidad de productos (Ridner, 2006). Es originaria de China, donde en 3000 a. C. ya era considerada semilla sagrada junto con el arroz, el trigo, la cebada y el millo. Sin embargo, su difusión mundial como cultivo de interés económico para elaboración de materias primas fue relativamente reciente (finales del siglo XIX). Actualmente, se estima que se siembran cerca de 92 000 000 de ha a nivel mundial semestralmente, con una producción de 207 000 000 de toneladas métricas por año (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2006). Los principales productores de soya en el mundo son Estados Unidos, Brasil, China y Argentina, que representan cerca del 83 % de la producción mundial (Ridner, 2006; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2006).

En Colombia la siembra de soya como cultivo de interés económico inició a mediados del siglo XX en el centro del departamento del Valle del Cauca, ligada al funcionamiento de la industria Grasas S.A. en el municipio de Guadalajara de Buga (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2006). Durante las décadas siguientes el

cultivo tuvo una expansión importante en el país, sobre todo en los valles geográficos de los ríos Cauca y Magdalena. A inicios de los años 80, la soya se expandió a los llanos orientales por algunas ventajas competitivas como la distribución del régimen de lluvias, menores costos de producción y cercanía a la capital del país para comercialización. La mayor parte de la producción de soya se destinó a la elaboración de alimentos concentrados para nutrición animal, yendo a la par con el crecimiento de los sectores avícola, porcícola y piscícola en el país.

Al igual que el caso del maíz, en la actualidad se importa la mayor parte de la soya que requiere el mercado nacional, en forma de torta de soya, óptima para la elaboración de alimentos concentrados. De acuerdo con la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (2017), la importación de torta de soya principalmente desde Estados Unidos en 2016, fue de 521 000 toneladas. Así mismo, se muestra una tendencia anual de crecimiento de importación del 11 %. Este incremento histórico ha coincidido con la reducción del área sembrada de soya en el país. De acuerdo con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (2006) para el año 1987 se sembraban en Colombia 65 000 ha; en 1990 el área se incrementó a 116 000 ha, siendo el pico máximo; no obstante, desde esa época se tiene un decrecimiento sostenido que ha llegado a 34 000 ha en 2004.



En la actualidad se importa la mayor parte de la soya que requiere el mercado nacional, en forma de torta de soya, óptima para la elaboración de alimentos concentrados. De acuerdo con la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (2017), la importación de torta de soya principalmente desde Estados Unidos en 2016, fue de 521 000 toneladas

Los datos actuales indican que los departamentos con mayor área sembrada son Meta con cerca de 13 000 ha y Valle del Cauca con 3000 ha (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2015). A pesar de que el rendimiento es mayor en Valle del Cauca, con $2,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ comparado con Meta, donde se obtiene $2,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2006), se privilegia la siembra en este último departamento al ser declarado parte de la nueva zona de expansión agrícola del país. Incluso los proyectos más ambiciosos en la parte agronómica del cultivo se tienen en la altillanura colombiana. Se destaca el desarrollo de nuevas variedades adaptadas a las condiciones climáticas de la altillanura, alto potencial de rendimiento y ciclos a madurez fisiológica de 100 días. Otro proyecto más ambicioso es el desarrollo de soya modificada genéticamente por *Agrobacterium tumefaciens* a partir de transformación de materiales nacionales (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2017).



Desde hace unas décadas el departamento del Valle del Cauca dejó de ser un productor importante de soya. En la actualidad, la mayoría de la soya se siembra al norte del departamento por empresas productoras de semillas.

Desde hace unas décadas el departamento del Valle del Cauca dejó de ser un productor importante de soya. En la actualidad, la mayoría de la soya se siembra al norte del departamento por empresas productoras de semillas. La baja relación beneficio/costo para el productor hacen que la actividad sea poco atractiva comparada con el costo de oportunidad ofrecido por el monocultivo de caña de azúcar. Para el año 2013, se invertían \$360 000 por hectárea de soya sembrada en compra de fertilizantes, lo que representa cerca del 38 % de los costos totales de producción; el productor percibía una utilidad neta de \$25 000, factor que desestimuló la actividad (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2013).

En algunas ocasiones, el uso de paquetes tecnológicos y el desconocimiento de procesos ecológico-productivos del cultivo como la fijación de N_2 atmosférico, la ausencia de rotaciones con otros cultivos y la aplicación excesiva de herbicidas, entre otros, han generado que la producción de soya en el país sea poco rentable. Esto, unido con las desventajas competitivas que tienen los productores nacionales con la torta de soya que llega a menor costo al país como producto del TLC con Estados Unidos. De aquí la importancia de fomentar tecnologías de cultivo que favorezcan procesos ecológicos, aporten a la formación de MOS, rompan los ciclos reproductivos de arvenses en el suelo y, en últimas, reduzcan los costos de producción del cultivo a fin de mejorar su rentabilidad.

5.4 TECNOLOGÍAS DE CORTE AGROECOLÓGICO PARA RECICLAJE DE NUTRIENTES Y MEJORAMIENTO DE LA MOS

5.4.1 INTERCULTIVOS

Los intercultivos, también llamados cultivos intercalados, se definen como arreglos vegetales entre dos o más especies que comparten las escalas temporal y espacial en un sistema agrícola (Sanclemente y Ararat, 2017). En estos arreglos es fundamental comprender los nichos ecológicos de las especies que se van a plantar, sus ciclos fenológicos, interacciones biológicas, tipos de raíces y dosel, así como aspectos alelopáticos (Sanclemente y Ararat, 2017; Sarandón y Flores, 2014). Lo anterior con el fin de potencializar sinergias, mejorar la sanidad vegetal e incrementar la productividad por unidad de área.

El conocimiento de intercultivos surge de la agricultura tradicional, donde los productores campesinos empíricamente han combinado especies en las parcelas productivas según sus necesidades y la oferta ambiental del entorno geográfico. En Latinoamérica se destaca el uso de frijol común, maíz, calabaza, nabos forrajeros, yuca y otras especies comestibles que sembradas en intercultivo maximizan el uso equivalente de la tierra (UET), reducen el uso de insumos externos, conservan el suelo e incrementan la productividad de la finca (Gliessman, 2001; Sanclemente y Ararat, 2017). Entiéndase UET como el área necesaria en monocultivo para lograr igual productividad que el policultivo.

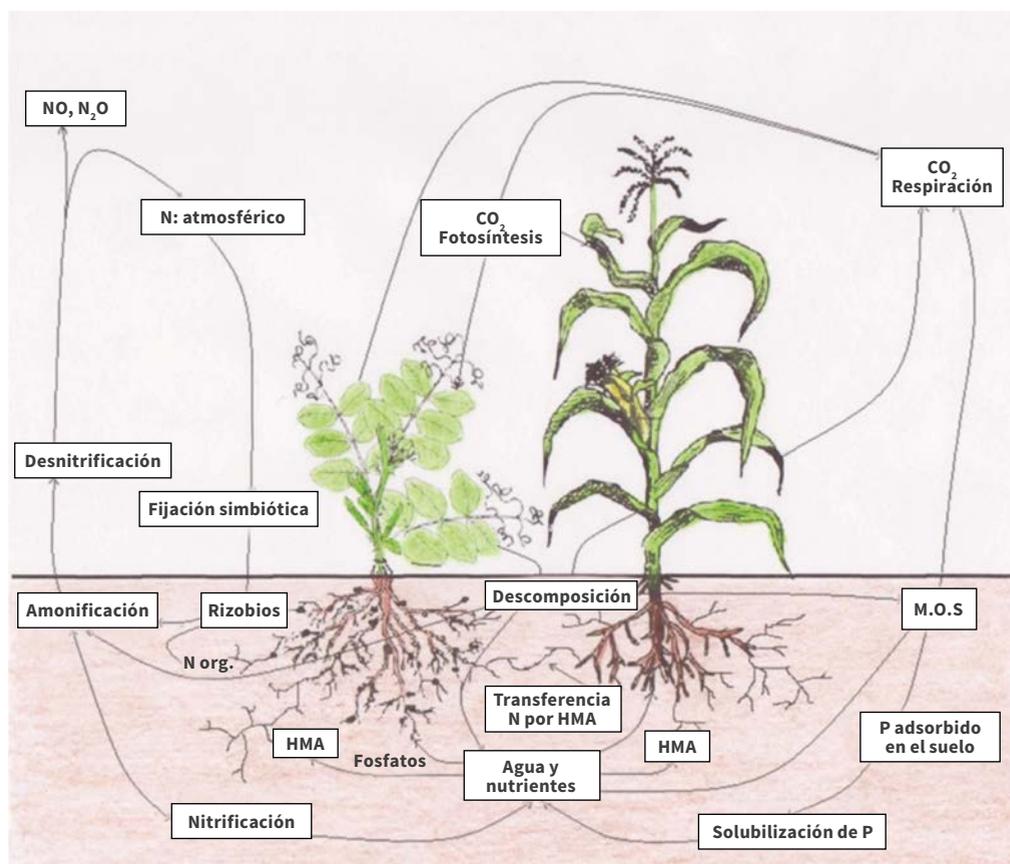


El éxito de estos sistemas de producción ha generado el interés de algunos investigadores en Colombia desde hace varias décadas.

Mientras Francis et al. (1978) evaluaban el UET en intercultivos de maíz-fríjol común en una zona plana del departamento del Valle del Cauca (Colombia), reportaron valores de 1,5 ha necesarias en maíz de monocultivo para igualar la productividad lograda en el sistema intercalado. En este estudio se registró baja incidencia del insecto plaga *Spodoptera frugiperda* Smith. en parcelas con intercultivo comparada con el monocultivo de maíz.

Este incremento de la productividad en los cultivos intercalados obedece a las diversas interacciones que se generan arriba y abajo del suelo. Se destacan el reciclaje de nutrientes como el C, N y P, mediado en gran parte por simbiosis rizosféricas (figura 5.2). En intercultivos que incluyen leguminosas es frecuente la simbiosis tripartita entre hongos micorrícicos arbusculares HMA (raíces del cultivo) rizobios nativos del suelo (Meghvansi et al., 2008; Juge et al., 2012). De esta manera se acoplan los ciclos del P y N; incluso se cree que existen conexiones entre micelios de HMA que colonizan las raíces de las dos especies, donde el N en forma amoniacal es transferido de la leguminosa a la gramínea favoreciendo su nutrición (Bethlenfalvay et al., 1991).

FIGURA 5.2 *Diferentes procesos metabólicos de cooperación en el intercultivo leguminosa-gramínea, en los cuales se integran los ciclos de C, N y P, entre otros*



Fuente: Sanclemente (2013)

5.4.2 ABONOS VERDES

Los abonos verdes AV son plantas que siembra el productor asociadas o en rotación con cultivos de interés económico para cosechar su biomasa e incorporarla en los primeros centímetros del suelo y así favorecer su fertilidad e incrementar la MOS en el tiempo (Da Costa et al., 1993; Prager et al., 2012). Como un objetivo de los AV es mejorar la fertilidad vía ciclaje de nutrientes, generalmente se emplean leguminosas por su capacidad de fijación de N_2 atmosférico en asocio con rizobios del suelo. En el trópico, es común el uso del frijol terciopelo *Mucuna pruriens*, frijol caupí *Vigna unguiculata*, *Crotalaria Crotalaria juncea*, frijol de puerco *Cannavalia ensiformis*, y frijol guandul *Cajanus cajan* (Prager et al., 2012; Sanclemente et al., 2013). Estas especies se caracterizan además por su rusticidad, alta capacidad adaptativa y rápido crecimiento.

Algunas experiencias con AV evidenciaron que al incorporar la biomasa de leguminosas en zonas cálidas se incrementa la tasa de mineralización con consecuente pérdida de nutrientes como el N vía volatilización (Prager et al., 2012; Sanclemente, 2013). Esto se debe a la baja relación C/N de los tejidos vegetales de leguminosas, siendo necesario incorporarlos en mezclas con residuos de gramíneas o crucíferas, con miras de incrementar los tiempos de permanencia en el suelo, mejorar el ciclaje de nutrientes y favorecer la formación de MOS. El momento oportuno de incorporación de leguminosas al suelo es su etapa fenológica de prefloración ya que es cuando la planta ha realizado la mayor fijación de N_2 y absorbido en mayor proporción otros nutrientes del suelo, siendo esto conveniente para el ciclaje de nutrientes (Sanclemente, 2013).

Una vez los AV se incorporan al suelo, los tejidos vegetales pierden rápidamente humedad y se inicia el proceso de descomposición. En este proceso juega un papel importante la microbiota del suelo, entre la que destacan lombrices, dermápteros, coleópteros, colémbolos, ácaros e himenópteros, así como microorganismos descomponedores entre los que se encuentran diversos hongos y bacterias. Posterior a la descomposición, inicia el proceso de mineralización de nutrientes, que consiste en la transformación de moléculas orgánicas en inorgánicas; estas últimas podrán quedar inmovilizadas por la biomasa microbiana del suelo, adsorbidas por la fracción coloidal y/o liberadas a la solución para ser tomadas por el sistema radical de las plantas de interés económico.

En el proceso de mineralización, el N orgánico presente en proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos de las leguminosas incorporadas es inicialmente transformado en amonio (NH_4) por acción de bacterias amonificantes (Sánchez et al., 2012). El NH_4 puede absorberse directamente por las plantas o transformarse en nitratos por acción de bacterias aeróbicas. Allí, el amonio se transforma en nitritos y nitratos en los que son

importantes algunas bacterias de los géneros *Nitrosomonas* sp., que transforman el amonio en nitrito (NO_2) y *Nitrobacter* sp., que transforman el NO_2 en nitrato (NO_3); este último logra ser metabolizado por plantas y otros organismos del suelo (Koops et al., 2003; Figueroa et al., 2012).

El uso de mezclas entre leguminosas y gramíneas como AV es conveniente para el proceso de mineralización de los residuos ya que se reducen drásticamente las pérdidas de NH_4 por volatilización (Sanclemente, 2013). De igual manera, la incorporación de AV al suelo no debe realizarse en suelos anegados por lluvias o recientemente irrigados porque el ambiente anaeróbico favorece la desnitrificación, reduciendo el N- inorgánico obtenido mediante mineralización de residuos. El principal producto de la desnitrificación del N- inorgánico es el óxido nitroso (N_2O), que es altamente volátil y contribuyente del calentamiento global al considerarse gas de efecto invernadero GEI (Robertson y Groffman, 2007; Sánchez et al., 2007; Cerón y Aristizabal, 2012). Algunos géneros bacterianos como *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Agrobacterium* sp. y *Favibacterium* sp. se han reportado desnitrificantes (Benavides et al., 2006; Orlando et al., 2012).

Otra ventaja de la mezcla de residuos como AV ligada al incremento de la relación C/N es el favorecimiento del proceso de humificación. El C orgánico que integra moléculas de lignina, polifenoles, hemicelulosa y taninos presentes en ramas y raíces de los residuos es de difícil mineralización a CO_2 por acción microbiana (Wang et al., 2004; Sánchez, 2007), siendo humificado lentamente en el suelo e incrementando la MOS (Horwath, 2007).

5.4.3 CULTIVOS DE COBERTURA Y ACOLCHADOS ORGÁNICOS

Los cultivos de cobertura los constituyen plantas que cubren el suelo en forma temporal o permanente con el fin de protegerlo y reducir los procesos erosivos (Centro Internacional de Información sobre Cultivos de Cobertura, 2003). Al igual que los intercultivos, los cultivos de cobertura se planifican de acuerdo con el tipo de cultivo de interés económico teniendo en cuenta el nicho ecológico de raíces de las especies para reducir competencia por nutrientes así como interferencia aérea por espacio y luz solar. Lo ideal es emplear especies con alta capacidad adaptativa al medio, rápido crecimiento y baja demanda de nutrientes ya que en la mayoría de los casos las coberturas son establecidas en suelos de baja fertilidad, siendo una alternativa tecnológica sostenible para zonas de ladera (Sánchez et al., 2007; Prager et al., 2012; Vélez y Sánchez, 2014).

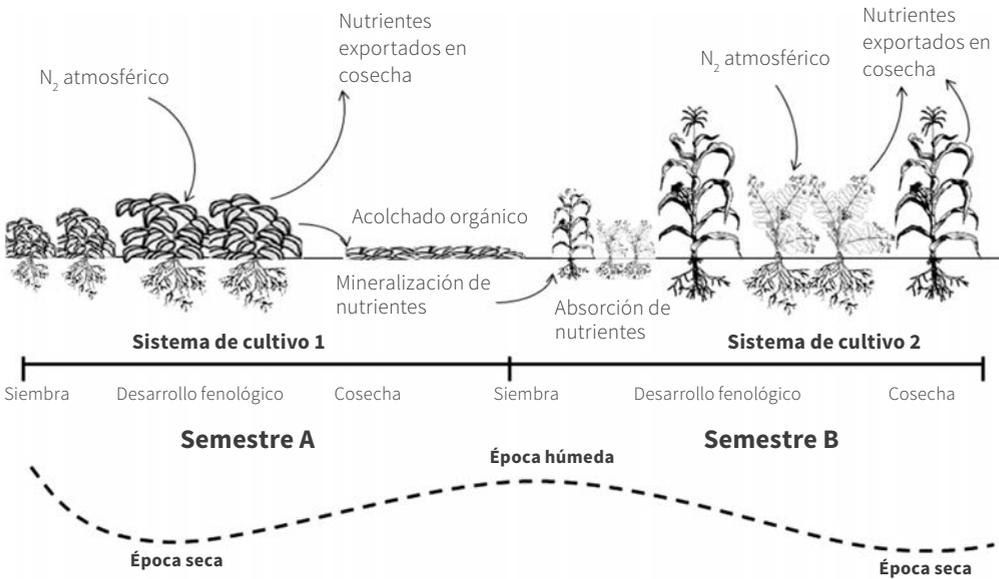
Otro beneficio obtenido con el uso de coberturas vegetales es el de mantener la humedad del suelo, siendo esto favorable en zonas tropicales donde la evapotranspiración es mayor a la precipitación anual. Esta bondad de las coberturas las perfila como tecnología factible para afrontar los efectos del cambio climático. Del mismo modo, el establecimiento de las coberturas reduce notablemente la germinación de arvenses, aporta a la salud del cultivo y en algunos casos se usa para forraje o alimentación humana (Centro Internacional de Información sobre Cultivos de Cobertura, 2003).

Por su parte, los acolchados orgánicos o “mulching” son residuos vegetales, en su mayoría hojarasca, que cubren parcial o totalmente el suelo permitiendo interceptar las gotas de lluvia, regular la liberación de nutrientes mediante imbibición, retener humedad y al tiempo reducir la evapotranspiración (Prager et al., 2012; Sanclemente, 2013). Algunas tecnologías de cultivo incorporan estos principios como el caso de los cultivos en callejones o *alley cropping*, que consiste en sembrar algunos surcos con especies de alta producción de follaje para favorecer sistemas de cultivo de interés económico mediante su poda periódica y formación de acolchados orgánicos. En el trópico se siembran en callejones algunas especies perennes como *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Flemingia macrophylla*, *Tephrosia vogelii*, *Calliandra houstoniana*, *Cratylia argentea*, *Tithonia diversifolia* (Navia, 2006; Salmi et al., 2013; Wolz y DeLucia, 2018).

5.4.4 ROTACIÓN DE CULTIVOS

La rotación de cultivos consiste en renovar periódicamente la siembra dentro del mismo espacio del agroecosistema con distintas especies vegetales de corta duración a fin de mejorar la fertilidad del suelo, romper los ciclos de algunas plagas y enfermedades, diversificar la producción y, en algunas zonas, aprovechar la distribución pluviométrica con base en las necesidades hídricas de los cultivos en sus diferentes etapas fenológicas (Altieri y Nicholls, 2007). En la mayoría de los casos, el cultivo en rotación aprovecha los nutrientes que aportan los residuos de cosecha del semestre anterior, reduciendo notablemente el uso de fertilizantes y aplicación de herbicidas preemergentes (figura 5.3).

FIGURA 5.3 Ilustración temporal de los procesos de reciclaje de nutrientes en la rotación de sistemas de cultivo dentro del agroecosistema



Fuente: Los autores (2018)

La agricultura tradicional a través de la práctica empírica en distintas partes del mundo ha logrado identificar y establecer diferentes especies vegetales que se siembran en rotación para reducir la dependencia de recursos externos y mantener la biodiversidad en el sistema (Altieri y Liebman, 1986; Francis, 1989; Ferguson et al., 2009; Sanclemente, 2009). En América Latina el caso cubano es ejemplar. Mientras Funes (2009) evaluaba durante seis años fincas integradas con 25 % del área sembrada en cultivos y 75 % con ganadería en el oeste de la Habana (Cuba), registró los mejores resultados de productividad y eficiencia energética en rotaciones de cultivos: maíz/fríjoles, maíz/maní y maíz/fríjoles/yuca. Del mismo modo, las leguminosas de mayor capacidad de fijación empleadas en rotación y/o abonos verdes fueron canavalia *Cannavalia ensiformis*, fríjol mungo *Vigna radiata* y fríjol terciopelo *Mucuna pruriens*.

Otro ejemplo de sistemas tradicionales es la milpa en Centroamérica, que consiste en arreglos agroforestales que involucran rotaciones periódicas de cultivos semestrales entre los que destacan el maíz, el fríjol y la calabaza para ciclar nutrientes, sostener poblaciones activas de reguladores biológicos, mantener la humedad, interferir la acción de arvenses y mejorar la productividad (Ferguson et al., 2009). De esta manera los agricultores diversifican los productos de las fincas y pueden lograr mejores precios de los productos en el mercado.

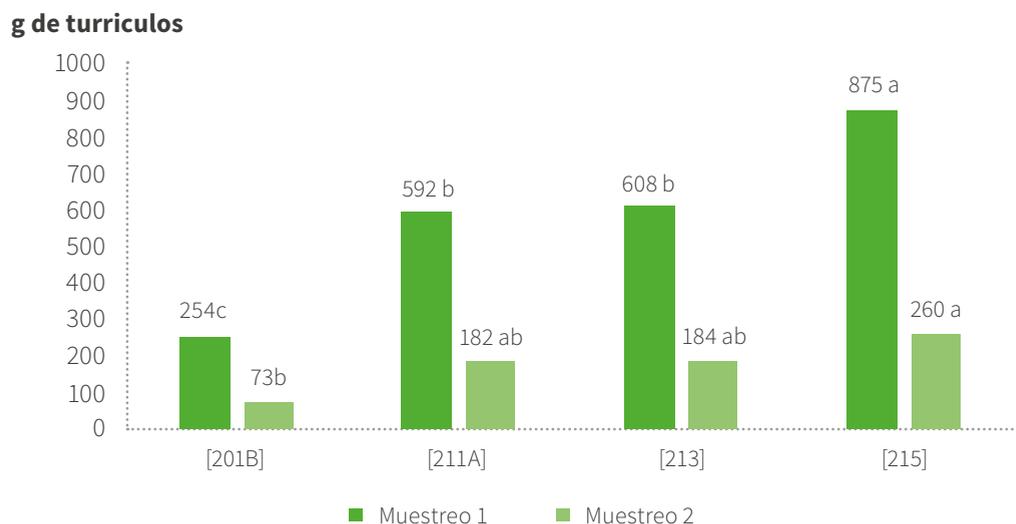
5.5 ESTUDIOS DE CASO CON USO DE ALGUNAS TECNOLOGÍAS AGROAMBIENTALES EN CULTIVOS INDUSTRIALES DEL VALLE DEL CAUCA (COLOMBIA)

5.5.1 CAÑA DE AZÚCAR ORGÁNICA

Caicedo (2011) evaluó el efecto de algunas prácticas agroambientales en el cultivo de caña de azúcar orgánica sobre la actividad de lombrices nativas mediante producción de turrículos (coprolitos). El estudio se desarrolló en la hacienda El Alisal del Ingenio Providencia S.A. (3° 37' 36,7" N; 76° 19' 51,7" W) ubicada en el municipio de El Cerrito (Valle del Cauca), con precipitación promedio anual de 925 mm, temperatura promedio de 24 °C y 990 m s. n. m. Los suelos predominantes fueron de órdenes Mollisol y Vertisol. Se seleccionaron cuatro suertes (211A, 201B, 213 y 215), todas con siembra de intercultivo caña de azúcar variedad Cenicaña 8592 y frijol caupí *Vigna unguiculata*, que se incorporó a los 45 días como abono verde. Las suertes tuvieron fertilización orgánica diferenciada: en 211A y 201B se aplicó vinaza enriquecida con microorganismos; en 213 y 215 se hizo el mismo manejo pero con aplicación adicional de lodos de vinaza. En todas las suertes se aplicó compost de gallinaza. Para tomar las muestras de los turrículos se establecieron cinco parcelas de 3 m² por suerte, para un total de veinte parcelas y 60 m² de área experimental de muestreo. Se realizaron dos réplicas de muestreos separados por 15 días entre ellos. Los turrículos muestreados por parcela se secaron en estufa a 105 °C por 24 horas y se determinó su peso seco. En el primer muestreo se registró peso seco de turrículos de 875 g en la suerte 215, significativamente ($p < 0.05$) mayor a las demás (figura 5.4).

En todas las suertes se aplicó compost de gallinaza. Para tomar las muestras de los turrículos se establecieron cinco parcelas de 3 m² por suerte, para un total de veinte parcelas y 60 m² de área experimental de muestreo.

FIGURA 5.4 Peso seco (g) de turrículos (coprolitos) de lombrices nativas en las suertes 201B, 211A, 213 y 215 de la hacienda El Alisal, municipio de El Cerrito-Valle del Cauca. Las letras en las barras indican diferencias estadísticamente significativas mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)



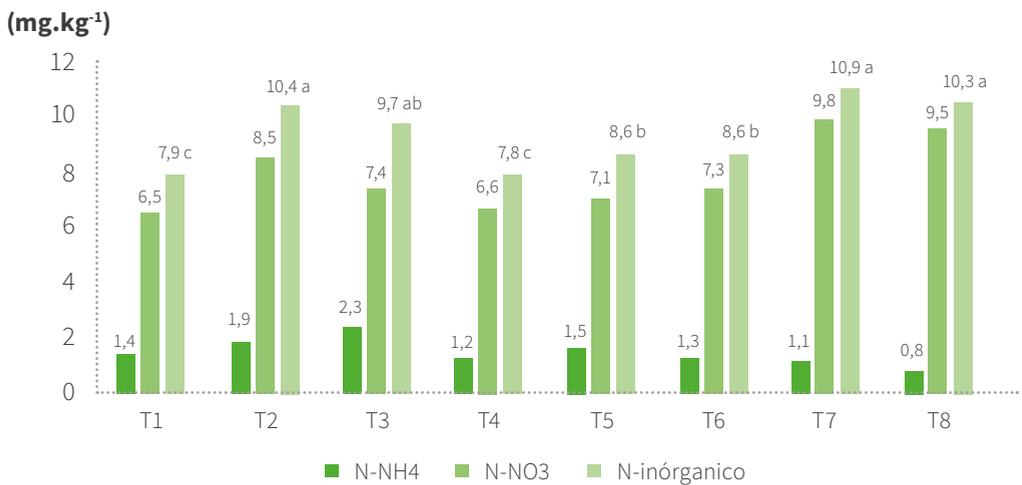
Fuente: Caicedo (2011)

Esta tendencia se mantuvo a los 15 días cuando la suerte 215 alcanzó una producción de 260 g de turrículos. Del mismo modo, se observó menor producción en la suerte 201B que fue significativamente ($p < 0.05$) inferior a las demás. La alta producción de turrículos en la suerte 215 fue indicadora de la actividad biológica de las lombrices nativas del suelo, que logran degradar diferentes materiales orgánicos que son aplicados en superficie, incluso algunos derivados de la producción industrial del alcohol carburante como el caso de los lodos de vinaza. Otro factor que pudo incidir en la suerte 215 fue su alto contenido de humedad en superficie, debido al mayor contenido de materia orgánica del suelo y arcillas, que combinado con el aporte biomásico de hojarasca de caña y abono verde generó un microhábitat favorable para el desarrollo de las lombrices. Lo anterior aporta a la producción de humus estable del suelo y a la sostenibilidad del sistema de cultivo.

Gutiérrez y Gómez (2015) evaluaron el aporte nitrogenado al suelo del frijol caupí *Vigna unguiculata* con y sin inóculo de *Rhizobium* sp. (Rb), sembrado en intercultivo con caña de azúcar Var. Cenicaña 8592. El ensayo se realizó en la Hacienda El Alisal del Ingenio Providencia S.A. (3° 37' 19" N; 76° 19' 43" W) ubicada en el municipio de El Cerrito (Valle del Cauca), con precipitación promedio anual de 925 mm, temperatura promedio de 24 °C

y 990 m s. n. m. Se seleccionó la suerte 201D con suelo predominante *Pachic Haplustoll*, pendiente del 3 %, textura franco arcillosa y pH 7,5. En diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones se emplearon los tratamientos: (T1) Rb en dosis comercial + 6 m³.ha⁻¹ de vinaza, (T2) 6 m³.ha⁻¹ de vinaza, (T3) Rb en dosis comercial + 10 t.ha⁻¹ de compost, (T4) 10 t.ha⁻¹ de compost, (T5) Rb en dosis comercial + 6 m³.ha⁻¹ de vinaza + 10 t.ha⁻¹ de compost, (T6) 6 m³.ha⁻¹ de vinaza + 10 t.ha⁻¹ de compost, (T7) Rb en dosis comercial y (T8) testigo (intercultivo sin inóculo ni fertilización). Para evaluar el N-inorgánico se tomaron muestras de suelo 0-30 cm a las que se les determinaron los contenidos de amonio (NH₄) y nitrato (NO₃) por el método Kjeldahl (figura 5.5).

FIGURA 5.5 Contenidos de N-NH₄, N-NO₃ y N- inorgánico (mg.kg⁻¹) en las parcelas experimentales. Suerte 201D de la hacienda El Alisal, municipio de El Cerrito-Valle del Cauca. Las letras en las barras indican diferencias estadísticamente significativas mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)



Fuente: Gutiérrez y Gómez (2015)

Los tratamientos T2, T7 y T8 obtuvieron contenidos de N-inorgánico significativamente altos ($p < 0.05$) con respecto a los demás. La aplicación del inóculo de *Rhizobium* sp. en T7 logró los valores más altos de concentración de NO₃ en el suelo, indicando procesos avanzados de mineralización de la materia orgánica, lo que pudo deberse no solo a procesos simbióticos entre la cepa y el frijol caupí sino a su actividad de vida libre en el suelo, como lo registran otros investigadores (Hirsch, 1996; Delgado et al., 2007; Pérez y Lodeiro, 2013). Por su parte, la aplicación de vinaza en el T2 logró mejorar la disponibilidad de N-inorgánico; sin embargo, cuando fue aplicada en mezcla con *Rhizobium* sp. generó efectos negativos en la actividad de la cepa, posiblemente por

su carácter ácido. El testigo (T8), donde no hubo aplicación de cepa ni fertilización adicional, presentó altos contenidos de N-inorgánico, lo que indicó la actividad nitrificante de los organismos nativos del suelo. Finalmente, el uso de compost de gallinaza redujo la disponibilidad de N-inorgánico en el suelo posiblemente por su alta relación C/N y su aporte microbiano, factores que inciden en la inmovilización del nutriente como lo describen otros investigadores (Sanclemente y Prager, 2009; Sanclemente, 2013). La comprensión de estos procesos en intercultivos frijol-caña de azúcar y el uso de inoculantes posibilitan el mejoramiento de tecnologías de cultivos orgánicos como alternativas ambientalmente sustentables.

Sanclemente, Ararat y De la cruz (2015) evaluaron la contribución del abono verde *Vigna unguiculata* L. a la producción sostenible de caña de azúcar *Saccharum officinarum* L. variedad CC 85-92, en un vertisol del Valle del Cauca (Colombia). El ensayo se realizó en la Hacienda Lucernita del Ingenio Riopaila Castilla S.A. (4° 14' 35" N; 76° 09' 12" W) ubicada en el municipio de Bugalagrande (Valle del Cauca), con precipitación promedio anual de 1008 mm, temperatura promedio de 24 °C y 931 m s. n. m. El suelo de textura arcillosa con presencia de cuñas, pendiente del 4 %, pH 7,4 y 1,7 % de MO. En diseño experimental de bloques completos al azar con cinco repeticiones se emplearon los tratamientos: (T1) control (monocultivo de caña de azúcar), (T2) intercultivo de surcos 1x1 frijol caupí-caña de azúcar, (T3) intercultivo de surcos 2x1 frijol caupí-caña de azúcar, (T4) intercultivo de surcos 1x1 frijol caupí-caña de azúcar más inóculo de *Rhizobium* sp. y (T5) intercultivo de surcos 2x1 frijol caupí-caña de azúcar más inóculo de *Rhizobium* sp. Los tratamientos se asignaron aleatoriamente en parcelas de 31 m². Se evaluó la materia seca de arvenses por el método del cuadrante, el rendimiento en biomasa de caña de azúcar por hectárea y la producción final de azúcar en fábrica (tabla 5.1).

TABLA 5.1 Datos de materia seca, rendimiento de caña y producción de azúcar. Hacienda Lucernita, municipio de Bugalagrande-Valle del Cauca (Colombia). Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)

Tratamiento	Materia seca de arvenses* (t.ha ⁻¹)	Rendimiento** (t.ha ⁻¹)	Producción de azúcar*** (t.ha ⁻¹)
T1	12.7 a	107.3 ab	12.9ab
T2	4.1 b	131.1 a	15.5 a
T3	1.2 c	93.3 b	11.1 b
T4	2.8 b	123.7 a	15.3 a
T5	1.6 c	102.7 ab	12.5 ab

*Evaluación durante el mes 2. **Evaluación durante el mes 11. *** Evaluación durante el mes 13.

Fuente: Sanclemente, Ararat y De la cruz (2015)

Se registró alta producción de azúcar en T2 y T4 donde se sembró intercultivo en surcos 1x1, con 15,5 y 15,3 t.ha⁻¹ respectivamente. El uso de inóculo de *Rhizobium* sp. no generó efectos aparentes sobre productividad de azúcar o producción de biomasa de arvenses. Esto indicó que *V. unguiculata* pudo realizar simbiosis con bacterias nativas de suelo, con mayor potencial en cuanto a especificidad para el proceso de fijación biológica de N₂ (Villanueva y Quintana, 2012). Por su parte el intercultivo 2X1 logró reducir significativamente (entre 87 % y 90 %) la presencia de arvenses acompañantes en el agroecosistema, pero con reducción en la producción de azúcar. Estos resultados permitieron identificar prácticas de cultivo que favorecen la relación beneficio/costo de la actividad económica del cultivo de caña de azúcar y al tiempo reducen ostensiblemente la aplicación de herbicidas y fertilizantes sintéticos con los beneficios ambientales que ello conlleva (Sanclemente et al., 2017).

5.5.2 CULTIVO DE MAÍZ EN ZONA DE LADERA

Sanclemente (2009) evaluó el efecto del cultivo de cobertura *Mucuna pruriens* Var. Utilis sobre algunas propiedades del suelo y la productividad de maíz en zona de ladera del municipio de Palmira-Valle del Cauca (Colombia). El ensayo se realizó en el corregimiento de Ayacucho-La Buitrera (3° 28' 30" N; 76° 11' 42" W) con 1350 m s. n. m., 1230 mm de precipitación media anual, 23 oC de temperatura y 70 % de humedad relativa. El suelo clasificado como *Typic Haplustalfs* con pendiente de 30 %, textura franco arenosa, pH 6,8 y 2,6 % de MO. Durante el primer semestre del año se estableció la cobertura de *M. pruriens* con siembra de 70 kg de semilla.ha⁻¹; posteriormente se cortó la biomasa en estado fenológico de prefloración (80 dds). En diseño experimental de bloques completos al azar y tres réplicas se establecieron tratamientos previos a la rotación con maíz: (T1) testigo-suelo desnudo, (T2) abono verde (AV) de *M. pruriens*, (T3) AV de *M. pruriens* + 5 t.ha⁻¹ de compost, (T4) AV de *M. pruriens* + 250 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 10-30-10, (T5) AV de *M. pruriens* + 2.5 t.ha⁻¹ de compost + 125 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 10-30-10, (T6) acolchado orgánico (AO) de *M. pruriens*, y (T7) AO de *M. pruriens* + 2.5 t.ha⁻¹ de compost + 125 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 10-30-10. En parcelas experimentales de 20 m² se sembró maíz Var. ICA V-305 a razón 40 000 plantas.ha⁻¹. Se evaluó la variación de los contenidos de C y N del suelo (0-20 cm) antes y después de los tratamientos, se estimaron las pérdidas de suelo por erosión laminar y el rendimiento de grano seco de maíz (tabla 5.2).

TABLA 5.2 Variación de contenidos de C y N en el suelo (0-20 cm), pérdida de suelo por erosión y rendimiento de grano seco de maíz. Corregimiento de Ayacucho, municipio de Palmira (Colombia). Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Tratamiento	Variación* del C del suelo (mg.kg ⁻¹)	Variación* del N del suelo (mg.kg ⁻¹)	Pérdida de suelo (t.ha ⁻¹)	Rendimiento (t.ha ⁻¹)
T1	-40 c	-510 b	10.9 a	4.1 b
T2	-30 bc	-5 ab	10.4 a	4.8 ab
T3	14 a	612 a	10.0 a	6.5 a
T4	-12 abc	139 ab	7.3 a	5.4 ab
T5	3 a	603 a	9.8 a	7.0 a
T6	-3 ab	-35 ab	8.2 a	6.5 a
T7	3 a	522 a	7.6 a	6.8 a

*Variación= Contenido después- Contenido antes de los tratamientos.

Fuente: Sanclemente (2009)

El T1 (suelo desnudo) registró la mayor reducción en los contenidos de C y N del suelo 0-20 cm después del ensayo, así como mayor pérdida por erosión laminar, lo que finalmente se tradujo en menor rendimiento de maíz en grano seco. En general, el uso de *M. pruriens* como AV generó disturbación del suelo y ocasionó mayor desprendimiento de partículas en superficie y erosión laminar con excepción del T4, donde se aplicó fertilizante de síntesis química que redujo las pérdidas en cerca del 30 % con respecto al T1 por efecto de la alta producción de biomasa de maíz y posible interceptación de gotas de lluvia, evitando salpicaduras. El uso de compost en el AV (T3) incrementó los contenidos de C y N del suelo, logrando alto rendimiento de grano seco de maíz con 6.5 t.ha⁻¹. El T5, donde se complementó el AV con fertilización órgano- sintética, logró por un lado incrementar C y N en el suelo y, por el otro, el mayor rendimiento de grano seco con 7.0 t.ha⁻¹.

Por su parte, el uso de la práctica de AO favoreció la protección del suelo al generar una barrera protectora que impidió desprendimiento masivo de partículas y arrastre por la pendiente. Sin embargo, a diferencia del AV el AO se descompone más lentamente por menor superficie de contacto con los organismos del suelo, factor que incidió sobre reducción de contenidos de C y N en los primeros centímetros. Algunos autores indican que el AO durante los primeros días genera imbibición de nutrientes del suelo e impide que estos estén disponibles en solución (Blanchart et al., 2006; Navia, 2006). Sin embargo, esto no afectó el rendimiento del maíz, que logró valores significativamente

altos en T6 y T7 con 6,5 y 6,8 t.ha⁻¹, respectivamente. El entendimiento de los procesos ligados a prácticas agroecológicas de cultivo como los AV y AO de leguminosas permiten identificar itinerarios acordes con las condiciones socioeconómicas y ambientales de los pequeños productores de maíz de zona de ladera.

Vélez (2012) evaluó el efecto de abonos verdes sobre la micorrización y el rendimiento en grano seco de maíz en zona de ladera del municipio de Palmira (Colombia). El ensayo se realizó en la Vereda El Mesón (3° 30' 1,4" N y 76° 11' 0,2" W) con 1713 m s. n. m., 1396 mm de precipitación media anual, 20 oC de temperatura y 74.4 % de humedad relativa. El suelo clasificado como *Humic Dystrudepts* con pendiente de 30 %, textura arcillo limosa, pH 5,6 y 7.4 % de MO. En diseño experimental de bloques completos al azar y tres réplicas se establecieron los tratamientos en el cultivo de maíz -Var ICA V-354: (T1) testigo: suelo sin ningún tipo de fertilización, (T2) fertilización sintética NPK 10-30-10 en dosis de 4 g.planta⁻¹, (T3) abono verde (AV) compuesto de *Canavalia ensiformis* L. y *Axonopus scoparius* F. en dosis de 11,2 kg.parcela⁻¹, (T4) fertilización orgánica con compost en dosis de 6 kg.parcela⁻¹, y (T5) abono verde (AV) compuesto de *Canavalia ensiformis* L. y *Axonopus scoparius* F. en dosis de 17.2 kg.parcela⁻¹ + compost en dosis de 6 kg.parcela⁻¹. La densidad de siembra de maíz fue de 50 000 plantas.ha⁻¹. Noventa días después de la siembra se evaluó el porcentaje de colonización por arbusculos de hongos micorrícicos arbusculares HMA en maíz, la longitud del micelio externo de HMA y su fracción vital. En cosecha, se evaluó el rendimiento de grano seco de maíz (14 % de humedad) como lo muestra la tabla 5.3.

TABLA 5.3 Porcentaje de colonización, longitudes de micelio externo y micelio activo de hongos micorrícicos arbusculares HMA asociados al cultivo de maíz. Vereda El Mesón, municipio de Palmira (Colombia). Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos mediante prueba de Duncan ($p < 0.05$)

Tratamiento	Colonización por arbusculos (%)	Longitud micelio externo de HMA (m.gss ⁻¹)	Longitud micelio externo activo de HMA (m.gss ⁻¹)	Rendimiento grano seco maíz (t.ha ⁻¹)
T1	3.7 b	4.2 c	2.1 bc	0.35 c
T2	0.8 c	2.1 d	0.3 c	1.95 a
T3	5.0 b	6.8 b	3.9 ab	0.70 bc
T4	3.9 b	7.1 b	2.5 b	0.40 c
T5	8.2 a	11.7 a	5.9 a	1.10 b

Fuente: Vélez (2012)

El T1 donde se sembró maíz sin ningún tipo de adición de AV o fertilizante registró baja colonización de HMA en maíz, como también reducida longitud de micelio externo y activo, lo que se tradujo finalmente en bajo rendimiento de grano seco. Esto se debió a la baja fertilidad del suelo, que condicionó la absorción de nutrientes por parte de la planta de manera directa o mediante asociación micorrícica. En inceptisoles, como el del estudio de caso, uno de los elementos con baja disponibilidad en el suelo es el P, siendo en muchas ocasiones necesario incorporarlo al sistema mediante fertilización, en lo posible mineral (roca fosfórica), ya que adicionalmente por su condición de cales pueden favorecer el incremento del pH del suelo.

Por su parte, el T2, donde se adicionó fertilizante de síntesis al maíz, redujo notablemente la colonización de HMA en maíz y su actividad sobre absorción de P desde la solución del suelo. Algunos investigadores han registrado descensos notables de la actividad simbiótica micorrícica en diferentes cultivos con motivo de la aplicación de fertilizantes sintéticos y consecuente disponibilidad de nutrientes (Kabir et al., 1998; Gryndler et al., 2006). Sin embargo, en este estudio la baja actividad de HMA en maíz no limitó el rendimiento de grano seco que logró en el T2 $1.95 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, significativamente mayor a los demás tratamientos.

El uso de AV complementado con fertilización orgánica en el T5 obtuvo la mayor actividad de HMA en maíz en términos del porcentaje de colonización, longitud de micelio externo y activo. La adición de compost a los restos vegetales de *C. ensiformis* L. y *A. scoparius* F. tuvo un efecto aparente sobre la mineralización de compuestos orgánicos con posterior disponibilidad de nutrientes en el suelo que fueron absorbidos por la planta de maíz en asocio con HMA nativos. Algunos autores registran incrementos en la actividad microbiana del suelo con la adición de abonos orgánicos, con consecuente liberación de nutrientes (Gryndler et al., 2006; Navia, 2006; Sánchez et al., 2010). La absorción de nutrientes esenciales como N y P en maíz se tradujo al final en rendimiento de grano seco con $1.1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Estos resultados muestran las bondades de la mezcla de AV complementada con fertilización orgánica sobre el aporte de nutrientes y activación de simbiosis rizosférica en suelos de baja fertilidad, siendo alternativas sustentables.

5.5.3 INTERCULTIVO MAÍZ- SOYA EN ZONA PLANA

Sanclémente (2013) evaluó el efecto del AV *M. pruriens* Var. Utilis en mezcla con residuos frescos de maíz sobre el rendimiento en grano del intercultivo maíz-soya en el municipio de Candelaria-Valle del Cauca (Colombia). El ensayo se realizó en el Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia ($3^{\circ} 24' 12'' \text{ N}$; $76^{\circ} 26' 15'' \text{ W}$) con 990 m s. n. m., 1030 mm de precipitación media anual, 26 °C de temperatura y 75 % de

humedad relativa. El suelo clasificado como *Typic Haplustert*, textura franco arcillosa, pH 7,2 y 2,0 % de MO. Durante el mes de agosto de 2011 se estableció el intercultivo M. pruriens- maíz en surcos 1X1 y se cosechó maíz choclo a 90 dds. En enero de 2012 se emplearon los residuos vegetales como AV y AO. En parcelas alledañas se emplearon los residuos vegetales del barbecho (BA) predominante de la zona Rottboelia cochinchinensis (Lour.). En diseño experimental de bloques y arreglo en parcelas divididas y tres repeticiones se establecieron tratamientos previos a la rotación con intercultivo maíz-soya. En parcelas principales se emplearon los residuos vegetales y en subparcelas se usó fertilización adicional. (T1) AV mezcla M. pruriens y maíz + 3.4 t.ha⁻¹ de compost, (T2) AV mezcla M. pruriens y maíz + 334 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 15-15-15, (T3) AV mezcla M. pruriens y maíz sin fertilización adicional, (T4) AO mezcla M. pruriens y maíz + 3.4 t.ha⁻¹ de compost, (T5) AO mezcla M. pruriens y maíz + 334 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 15-15-15, (T6) AO mezcla M. pruriens y maíz sin fertilización adicional, (T7) BA de R. cochinchinensis + 3.4 t.ha⁻¹ de compost, (T8) BA de R. cochinchinensis + 334 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 15-15-15, y (T9) BA de R. cochinchinensis sin fertilización adicional.

En parcelas experimentales de 20 m² se sembró el intercultivo maíz Var. ICA V-305 a razón de 60 000 plantas.ha⁻¹ en surcos 1X1 con soya Var. ICA P-34 a razón de 200 000 plantas.ha⁻¹. Se evaluó el rendimiento de grano seco (14 % de humedad) de maíz y soya a 180 dds (figura 5.6). No se registraron diferencias significativas en el rendimiento de maíz para los tratamientos evaluados, posiblemente por la alta variabilidad espacial del suelo en el ensayo y la alta distancia de siembra entre surcos del maíz. Sin embargo, se pudo observar que el T8 (BA+NPK 15-15-15) obtuvo los valores más altos de rendimiento del cereal con 5,70 t.ha⁻¹ siendo 38 % superior al T9 (BA sin fertilizar), que registró los valores más bajos con 4,12 t.ha⁻¹. El uso de fertilizante de síntesis adicional en el BA logró incrementar el rendimiento de maíz; no obstante, esto no ocurrió con su adición en el AV y AO. Los valores de rendimiento en grano de maíz fueron inferiores al promedio local de 8,2 t.ha⁻¹ (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2015).

El uso de fertilizante de síntesis adicional en el BA logró incrementar el rendimiento de maíz; no obstante, esto no ocurrió con su adición en el AV y AO.

FIGURA 5.6. Rendimiento de grano seco de maíz y soya ($t \cdot ha^{-1}$), Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia. Candelaria - Valle del Cauca. Las letras en las barras indican diferencias estadísticamente significativas, mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)



Fuente: Sanclemente (2013)

En el caso de soya, se registraron diferencias significativas para la variable rendimiento de grano entre tratamientos. El T6 (AO sin fertilizar) obtuvo los valores más altos con $2,47 t \cdot ha^{-1}$, cerca de 2,1 veces el rendimiento del T9, donde se empleó el BA. Estos resultados indican el efecto del aporte de residuos de calidad al suelo como ocurrió con la mezcla de *M. pruriens* y maíz, comparados con el barbecho *R. cochinchinensis*. El uso de fertilización adicional en el AO incidió negativamente en el rendimiento de grano, posiblemente por afectación de la simbiosis con rizobios nativos para la fijación de N_2 , que se ve limitada por la disponibilidad de N inorgánico en el suelo (Salviaggiotti et al., 2008; Lau et al., 2012). Los valores de rendimiento de grano seco de T4 y T6 fueron cercanos al promedio regional con $2,5 t \cdot ha^{-1}$ (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2015). El T6 obtuvo los valores más altos de rendimiento combinado de granos de maíz y soya con $7,82 t \cdot ha^{-1}$. Estos resultados muestran las bondades del uso de tecnologías como los AO provenientes de mezclas leguminosas-gramíneas sobre la fertilidad del suelo y aporte al rendimiento combinado de intercultivos en rotación como maíz- soya.

5.6 CONCLUSIONES

La materia orgánica estable MOS es un componente fundamental de la fase sólida del suelo. La MOS aporta a la fertilidad química, física y biológica del suelo, siendo indicadora además de otras propiedades emergentes como la salud, resiliencia y sustentabilidad del agroecosistema. Las tecnologías agroambientales descritas en este capítulo emplean la energía solar para producción biomásica, al tiempo que potencian interacciones biológicas en el agroecosistema, favoreciendo la gestión de la MOS mediante el reciclaje de carbono y nutrientes vía procesos como la mineralización y la humificación. En estas tecnologías se destaca el uso de leguminosas con alta capacidad adaptativa como precursoras de la MOS cuando se emplean como cultivos de cobertura, abonos verdes o acolchados orgánicos, en sistemas de cultivos industriales como el caso de maíz, soya y caña de azúcar. De esta manera se favorece la economía del cultivo y se reducen impactos ambientales que implican el uso de sustancias de síntesis química, lo que aporta al desarrollo del sector agropecuario y su sostenibilidad.



Las tecnologías agroambientales descritas en este capítulo emplean la energía solar para producción biomásica, al tiempo que potencian interacciones biológicas en el agroecosistema, favoreciendo la gestión de la MOS mediante el reciclaje de carbono y nutrientes vía procesos como la mineralización y la humificación.

5.7 REFERENCIAS

Altieri, M. y Liebman, M. (1986). Insect, Weed and Plant Disease Management in Multiple Cropping Systems. En C. Francis (Ed.), *Multiple Cropping Systems* (pp. 183-218). Macmillan.

Altieri, M. y Nicholls, C. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Revista Ecosistemas*, 16(1), 3-12.

Álvarez, L., Polanco, D. y Ríos, L. (2014). Reflexiones acerca de los aspectos epistemológicos de la agroecología. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 11(74), 55-74. <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.CRD11-74.raea>

Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia. (2012). Historia del sector azucarero. *Sector Industrial de la Caña*. <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=8>

Benavides, J., Quintero, G. y Ostos, O. (2006). Aislamiento y caracterización de diez cepas bacterianas desnitrificantes a partir de un suelo agrícola contaminado con abonos nitrogenados proveniente de una finca productora de cebolla en la Laguna de Tota, Boyacá, Colombia. *Revista Nova*, 4(6), 50-54.

Bethlenfalvay, G., Reyes, M., Camel, S. y Ferrera, R. (1991). Nutrient transfer between the root zones of soybean and maize plants connected by a common mycorrhizal mycelium. *Physiologia Plantarum*, 82(3), 425-432.

Blanchart, E., Villenave, C., Vierratoux, A., Barthès, B., Girardin, C., Azontonde, A. y Feller, C. (2006). Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal Soil Biology*, 42(1), 136-144.

Caicedo, J. (2011). *Evaluación de la actividad biológica mediante el indicador de túriculos de lombriz en cultivos de caña de azúcar orgánico bajo la aplicación de vinaza y lodos de vinaza*. (Ingenio Providencia, El Cerrito - Valle del Cauca) (tesis de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Palmira, Colombia.

Centro Internacional de Información sobre Cultivos de Cobertura. (2003). *Catálogo de Abonos verdes/cultivos de cobertura (CCAV), empleados por pequeños productores de los trópicos*. CIDICCO.

Cerón, L. y Aristizábal, F. (2012). *Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. (2006). *Soya (Glycine max L. Merrill). Alternativa para los sistemas de producción en la Orinoquía colombiana*. CORPOICA.

Cuero, R. (2012). Hacia un sistema complementario de producción más limpia en suelos degradados por salinidad. *Ambiente y Sostenibilidad*, (2), 59-68.

Da Costa, M., Calegari, A., Mondardo, A., Bulisani, E., do Prado, L., Alcântara, P., Miyasaka, S. y Amado, T. (1993). *Adubação verde no sul do Brasil*. AS-PTA.

Dávalos, E. (2007). La caña de azúcar: ¿una amarga externalidad? *Desarrollo y Sociedad*, (59), 117-164.

Davidson, E., David, M., Galloway, J., Goodale, C., Haeuber, R., Harrison, J., Howarth, R., Jaynes, D., Lowrance, R., Nolan, B., Peel, J., Pinder, R., Porter, E., Snyder, C., Townsend, A. y Ward, M. (2012). Exceso de Nitrógeno en el Medio Ambiente de EUA: Tendencias, Riesgos y Soluciones. Sociedad de Ecología de América. *Tópicos en Ecología*, (15), 1-18.

Delgado, M., Casella, S. y Bedmar, E. (2007). Denitrification in Rhizobia-Legume Symbiosis. En H. Bothe, S. Ferguson y W. Newton (Eds.), *Biology of the Nitrogen Cycle* (pp. 83-91). Elsevier.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2013). *Cuenta satélite piloto de la agroindustria (CSPA): Maíz, sorgo, soya y su primer nivel de transformación 2005-2009*. DANE.

Döring, T., Pautasso, M., Finckh, M. y Wolfe, M. (2012). Concepts of plant health – reviewing and challenging the foundations of plant protection. *Plant Pathology*, 61(1), 1-15.

Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas. (2015). Área, Producción y Rendimiento de Cereales y Leguminosas 2015 A. *Indicadores cerealistas*. FENALCE.

Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas. (2017). Coyuntura cerealista y de leguminosas. *Revista El Cerealista*, (121), 34-54.

Ferguson, B., Morales, H., González, A., Íñiguez, F., Martínez, M., McAfee, K., Nigh, R., Perfecto, I., Philpott, S., Soto, L., Vandermeer, J., Vidal, R., Ávila, L., Bernardino, H. y Realpozo, R. (2009). Bosques, Agricultura y Sociedad: Cultivando Nuevas Alianzas. En M. Altieri (Ed.), *Vertientes del Pensamiento Agroecológico: Fundamentos y Aplicaciones* (pp. 183-205). Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología.

Figuroa, A., Álvarez, J., Forero, A., Salamanca, C. y Pinzón, L. (2012). Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos. *Revista Temas Agrarios*, 17(1), 32-43.

Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2), 32-41.

Francis, C., Flor, C. y Prager, M. (1978). Effects of Bean Association on Yields and Yield Components of Maize. *Crop Science Society of America*, 18(5), 760-764.

Francis, C. (1989). Biological efficiency in multiple-cropping Systems. En N. Brady (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 42, pp.1-42.). Academic Press.

Funes, F. (2009). *Agricultura con futuro: La alternativa agroecológica para Cuba*. Estación Experimental "Indio Hatuey".

Galloway, J., Dentener, F., Capone, D., Boyer, E., Howarth, R., Seitzinger, S., Asner, G., Cleveland, C., Green, P., Holland, E., Karl, D., Michaels, A., Porter, J., Townsend, A. y Vorosmarty, C. (2004). Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, (70), 153-226.

Gliessman S (2001) *Agroecología. Processos Ecologicos em Agricultura Sustentável*. Editora da Universidade.

Gryndler, M., Larsen, H., Hřselová, V., Řezáčová, H., Gryndlerová, H. and Kubát, J. (2006). Organic and mineral fertilization, respectively, increase and decrease the development of external mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi in a long-term field experiment. *Mycorrhiza*, 16(3), 159-166.

Gutiérrez, J. y Gómez, W. (2015). *Respuesta fisiológica del frijol caupí *Vigna unguiculata* L., utilizado como abono verde en cultivo asociado con caña de azúcar *Saccharum**

officinarum L., en suelos Pachic Haplustolls del municipio El Cerrito- Valle del Cauca (tesis de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Palmira, Colombia.

Hirsch, P.R. (1996). Population dynamics of indigenous and genetically modified rhizobia in the field. *New Phytologist*, 133(1), 159-171.

Horwath, W. (2007). Carbon Cycling and Formation of Soil Organic Matter. En E. Paul, *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. Elsevier

Juge, C., Prevost, D., Bertrand, A., Bipfubusa, M., and Chalifour, F. P. (2012). Growth and biochemical responses of soybean to double and triple microbial associations with Bradyrhizobium, Azospirillum and arbuscular mycorrhizae. *Applied Soil Ecology*, 61, 147-157.

Kabir, Z., O'halloran, I., Fyles, J., Hamel, C. (1998). Dynamics of the mycorrhizal symbiosis of corn (*Zea mays* L.): effects of host physiology, tillage practice and fertilization on spatial distribution of extra-radical mycorrhizal hyphae in the field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 68(1-2), 151-163.

Koops, H., Purkhold, U., Pommerening, A., Timmermann, G. y Wagner, M. (2003). The Lithoautotrophic Ammonia-Oxidizing Bacteria. M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. Schleifer y E. Stackebrandt (Eds.), *The Prokaryotes* (pp. 778-811). Springer.

Labrador, J. (2012). Avances en el conocimiento de la dinámica de la materia orgánica dentro de un contexto agroecológico. *Agroecología*, 7(1), 91-108.

Lau, J., Bowling, E., Gentry, L., Glasser, P., Monarch, E., Olesen, W., Waxmonsky, J. y Young R. (2012). Direct and interactive effects of light and nutrients on the legume-rhizobia mutualism. *Acta Oecologica*, 39, 80-86.

Lotter, D. (2003). Organic agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 21(4), 59-128.

Martínez, E., Fuentes, J. y Acevedo, E. (2008). Soil organic carbón and soil properties. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68-96.

Meghvansi, M. K., Prasad, K., Harwani, D., and Mahn, A. (2008). Response of soybean cultivars toward inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi and Bradyrhizobium japonicum in the alluvial soil. *European Journal of Soil Biology*, 44(3), 316-323.

Navia, J. (2006). *Impacto de aportes superficiales de biomasa vegetal de diferente calidad sobre poblaciones de nematodos, hongos formadores de micorriza arbúscular*

(HMA) y rizobios en un suelo agrícola de Santander de Quilichao (Departamento del Cauca) (tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Palmira. Colombia.

Nicholls, C., Altieri, M. y Vázquez, L. (2015). Agroecología: Principios para la conversión y el rediseño de sistemas agrícolas. *Revista Agroecología*, 10(1), 61-72.

Orlando, J., Carú, M., Pommerenke, B. y Braker, G. (2012). Diversity and Activity of Denitrifiers of Chilean Arid Soil Ecosystems. *Frontiers in Microbiology*, 3, 1-9.

Pérez, M., Peña, M. y Álvarez, P. (2011). Agro-industria cañera y uso del agua: Análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia. *Revista Ambiente & Sociedade*, 14(2), 153- 178.

Pérez, J. y Lodeiro, A. (2013). Two effects of combined nitrogen on the adhesion of *Rhizobium etli* to bean roots. *Symbiosis*, 59, 157-163. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13199-013-0229-z#page-1>

Prager, M., Sanclemente, Ó., Sánchez, M., Gallego, J. y Ángel, D. (2012). Abonos verdes: Tecnología para el manejo agroecológico de los cultivos. *Agroecología*, 7(1), 53-62.

Resolución 439 de 2017 [Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural]. Apoyo a la comercialización de maíz blanco cosechado en el segundo semestre de 2017 de los departamentos de Tolima, Meta y Valle del Cauca. 20 de diciembre de 2017.

Ridner, E. (2006). *Soja, propiedades nutricionales y su impacto en la salud*. Grupo Q S.A.: Sociedad Argentina de Nutrición.

Robertson, G. y Groffman, P. (2007). Nitrogen Transformations. En E. Paul, *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (pp. 341-364). Elsevier.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F., Lambin, E., Lenton, T., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C., Hughes, T., Van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R., Fabry, V., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. y Foley, J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Journal Ecology and Society*, 14(2), 32-41.

Salmi, A., Guerra, J., Abboud, A. y Gonçalves, M. (2013). Avaliação agronômica da rebrota, dinâmica de decomposição e liberação de nutrientes de flemingia (*Flemingia macrophylla* (Willd.) Kuntze ex Merr.). *Revista Ceres*, 60(5), 735-743.

Salgar, L. (2004). El cultivo de maíz en Colombia. *Revista Semillas*, (22/23), 2-7.

Salvagiotti, F., Cassman, K.G, Specht, J.E., Walters, D.T., Weiss, A., & Dobermann, A. (2008). Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 108(1), 1-13.

Sánchez, M., Gómez, E., Muñoz, J., Barrios, E., Prager, M., Bravo, N., Mabrouk, E., Pérez, J., Azakawa, N., Marmolejo, F., Cadavid, L., Quintero, R., Miranda, J., Mier, C., Torres, R., Trinidad, J., Zapata, C., Tofiño, R., Benjumea, C., Díaz, G., Trujillo, L., Bonilla, F., Espinosa, J., Rodríguez, H., García, H., Triana, W., Carlosama, C. y Vargas, N. (2007). *Las endomicorizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

Sánchez, M., Posada, R., Velásquez, D. y Narváez, M. (2010). *Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

Sánchez, M., Prager, M., Naranjo, R. y Sanclemente Ó. (2012). El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. *Agroecología*, 7(1), 19-34.

Sanclemente, Ó. y Prager, M. (2009). Efecto del cultivo de cobertura y abono verde: *Mucuna pruriens*, en las algunas propiedades biológicas de un suelo Typic haplustalfs, cultivado con maíz dulce (*Zea mays* L.) en la zona de ladera del Municipio de Palmira Valle del Cauca, Colombia. *Revista Brasileira de Agroecología*, 4(2), 4133-4138.

Sanclemente, Ó. (2009). *Efecto del cultivo de cobertura: Mucuna pruriens, en algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo Typic haplustalfs, cultivado con maíz (Zea mays L.) en zona de ladera del municipio de Palmira, Valle (Colombia)* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.

Sanclemente, Ó. (2013). *Efecto de Mucuna pruriens asociada a una gramínea, sobre la actividad simbiótica rizosférica y la movilización de N y P, en un sistema de cultivo: maíz (Zea mays L.) y soya (Glycine max L.)* (tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Palmira. Colombia.

Sanclemente, Ó., Prager, M. y Beltrán, L. (2013). Aporte de Nitrógeno al suelo por *Mucuna pruriens* y su efecto sobre el rendimiento de maíz dulce (*Zea mays* L.). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 149-155. <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/978/961>

Sanclemente, Ó, Ararat, M. y De la Cruz, C. (2015). Contribución de *Vigna unguiculata* L. a la sustentabilidad de sistemas de cultivo de caña de azúcar. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 47-55.

Sanclemente, Ó. y Ararat, M. (2017). Consideraciones tecnológicas para el manejo agronómico sostenible de maíz en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/1770/2003>

Sanclemente, Ó, Yacumal, V. y Patiño, C. (2017). Solubilización de fosfatos por bacterias nativas aisladas en tres agroecosistemas del Valle del Cauca (Colombia). *Revista Temas Agrarios*, 22(2), 62-70. <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/945>

Sarandón, S. y Flores, C. (2014). *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables*. Editorial de la Universidad de La Plata.

Vélez, F. (2012). *Efecto de abonos verdes en la agregación y micorrización en el cultivo de maíz (Zea mays L.) en un suelo de ladera de Palmira (Colombia)* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.

Vélez, F. y Sánchez, M. (2014). Dinámica de los hongos de Micorriza Arbuscular (MA) en un Humic Dystrudepts sembrado con maíz *Zea mays* L. y Abonos Verdes (AV). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 69-79. <https://doi.org/10.22490/21456453.915>

Villanueva, E. y Quintana, A. (2012). Aislamiento y selección de bacterias nativas de rizobios fijadores de nitrógeno, a partir de nódulos radiculares de *Phaseolus vulgaris*. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Biológicas*, 32(1), 24-30.

Viveros (2017). Cinco años del TLC de Colombia con Estados Unidos: Balance sector maicero. *Revista El Cerealista*, (121), 13-15.

Wang, W., Dalal, R. y Moody, P. (2004). Soil carbon sequestration and density distribution in a Vertosol under different farming practices. *Australian Journal of Soil Research*, 42(8), 875-882.

Wolz, K. y DeLucia, E. (2018). Alley cropping: Global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 61-68.

Zúñiga, O., Osorio, J., Cuero, R. y Peña, J. (2011). Evaluación de Tecnologías para la Recuperación de Suelos Degradados por Salinidad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín Medellín*, 64(1), 5769-5779.



CAPÍTULO

EL COMPOSTAJE COMO HERRAMIENTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS Y LA GESTIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO



Mauricio García Arboleda
Óscar Eduardo Sanclemente Reyes

6.1 INTRODUCCIÓN

El compostaje es una práctica que acompaña al hombre desde los inicios de las civilizaciones y ha venido refinándose de acuerdo con las diferentes actuaciones en el territorio. En este sentido, los materiales orgánicos excedentes de los diferentes procesos realizados por el hombre, en el marco del compostaje, han pasado de ser simples residuos a convertirse en verdaderos recursos.

En la actualidad existe una verdadera ciencia en torno al compostaje, en donde los materiales orgánicos utilizados han sido estudiados en su composición y con base en esto se gestiona la producción. Con la utilización de diferentes residuos de la agricultura, industria y derivados urbanos se realiza la gestión de habilitación en recursos para la agricultura y mejoramiento de los suelos a través del proceso de compostaje.

Esta técnica implica la mezcla adecuada de residuos con el fin de partir de un sustrato con características adecuadas en proporción de carbono/nitrógeno, carbono/fósforo y porcentaje de humedad, entre otros, de tal forma que se adecue a los requerimientos de poblaciones de microorganismos que mediante diferentes sucesiones poblacionales generen unas etapas térmicas necesarias para la disociación de contaminantes químicos, la selección de patógenos y la transformación gradual de macromoléculas a los primeros rudimentos de ácidos húmicos y fúlvicos como esencia de la materia orgánica estabilizada en un periodo de tiempo adecuado para la maduración.



La selección de patógenos y la transformación gradual de macromoléculas a los primeros rudimentos de ácidos húmicos y fúlvicos como esencia de la materia orgánica estabilizada en un periodo de tiempo adecuado para la maduración.

6.2 HISTORIA DEL COMPOSTAJE

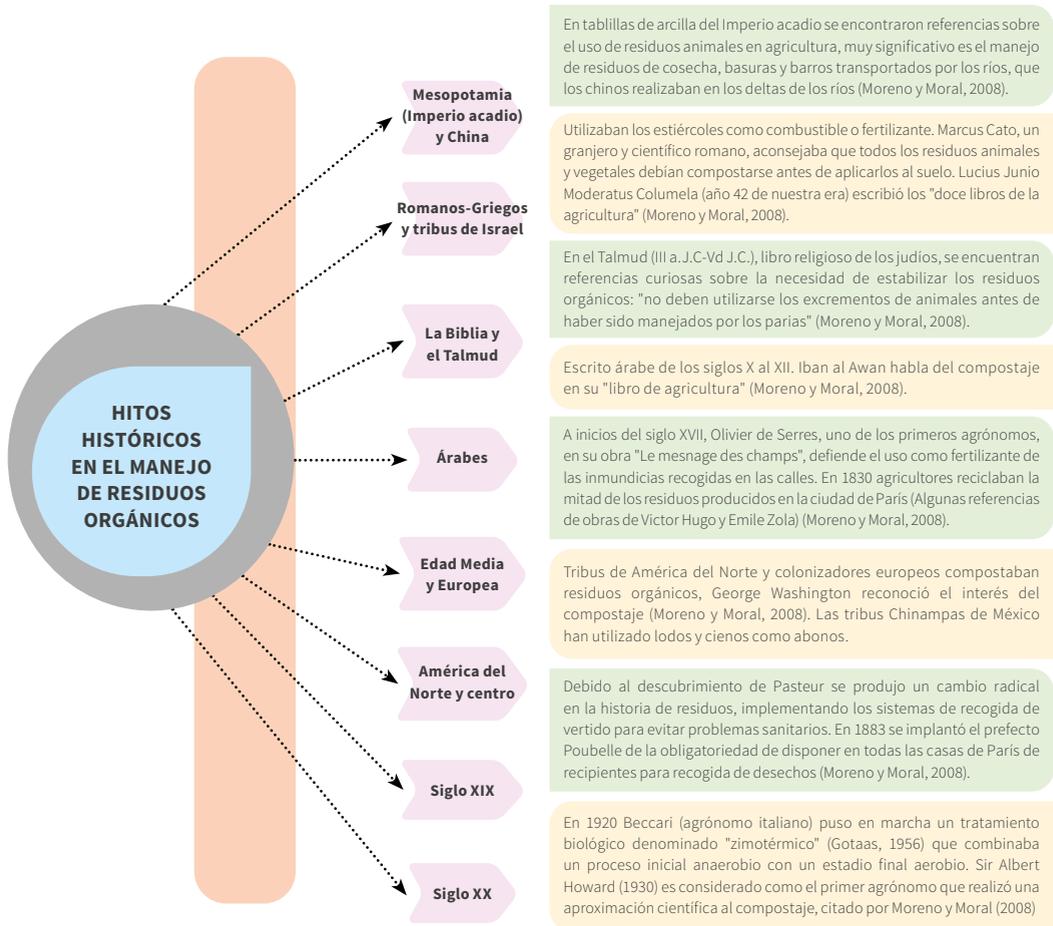
Los residuos han estado ligados a la historia de la humanidad y ambos han presentado grandes cambios después del siglo XIX. El compostaje ha venido evolucionando cíclicamente desde una concepción artística en la antigüedad hacia un estatus científico como respuesta a la sociedad moderna.

Los primeros indicios del compostaje pueden aparecer a partir de la agricultura en el tránsito del hombre nómada al sedentario, sin poder precisar una época o sociedad específica. Inicialmente, los residuos eran abandonados por motivo de desplazamiento de las sociedades nómadas y posteriormente se comenzó con alguna práctica como enterrada, quema, alimentación animal o disposición en procesos de precompostaje en las primeras expresiones sedentarias, en donde posiblemente los residuos orgánicos se constituyeron en herramienta para el manejo de los suelos en las civilizaciones antiguas.

Los primeros indicios del compostaje pueden aparecer a partir de la agricultura en el tránsito del hombre nómada al sedentario, sin poder precisar una época o sociedad específica.

El aumento del interés en Occidente en el compostaje se originó probablemente por una larga visita a principios del siglo del profesor F. H. King del departamento de agricultura de los EEUU a China, Japón y Korea, durante la cual registró cuidadosamente sus observaciones (Dalzell et al., 1991). El libro que recopila esta experiencia de King fue leído por Sir Albert Howard, que ensayó en la India las observaciones sobre el compostaje de King en China (figura 6.1).

FIGURA 6.1 *Hitos históricos del manejo de residuos orgánicos*



Fuente: Adaptado de otros autores

Como se expresó anteriormente, el agrónomo Albert Howard es considerado uno de los padres del compost, mediante la mezcla de paja, residuos vegetales, estiércol animal y su respectiva y correcta maduración para obtener un abono de excelente calidad. Mediante observación en campo, este hijo de un agricultor inglés basó su trabajo científico en botánica y compostaje, los cuales consigna en su obra Testamento agrícola para una agricultura natural, producto de sus trabajos en el estado de Indora (India) realizados desde 1873 hasta 1947. Howard llegó a concluir que imitando la naturaleza podría diseñar los compost y de esta forma realizar una fertilización adecuada de los campos. Esto lo logró mediante el análisis de la descomposición de la materia orgánica en selvas de la India, identificando al humus como nutriente esencial para las plantas.

El movimiento en torno a las enseñanzas de Albert Horward ha desembocado en la creación, en los países sajones, de los movimientos y las prácticas de la agricultura orgánica, el equivalente de la agricultura ecológica en nuestro país (Bueno, 1999).

6.3 CONSIDERACIONES GENERALES

Para introducirnos en el mundo de compostaje es necesario conceptualizar los diferentes elementos que se manejan en la temática. Por lo tanto, se muestran a continuación algunos de ellos:

Residuo: se entiende como una sustancia u objeto de cualquier naturaleza cuyo poseedor no tiene intención u obligación de usarla y está interesado en desecharla.

Residuos urbanos o municipales: sustancias u objetos residuales generados en casas familiares, zonas comerciales, oficinas y empresas de servicios (exceptuando los calificados como residuos peligrosos) que proceden de zonas verdes, manejo y limpieza de zonas verdes, escombros de construcciones urbanas, maquinaria, vehículos y enseres abandonados.

Residuos biodegradables: materiales o sustancias residuales que, por su naturaleza o condiciones de disposición, pueden tener una descomposición aerobia o anaerobia. Ejemplo: residuos de podas de jardines y zonas verdes en general, residuos alimenticios, residuos de estiércoles animales, cartón y papelería.

Reutilización: utilización de un material o producto para la misma función que fue construido o producido originariamente.

Reciclado: clasificación y reutilización de los residuos en diferentes sistemas productivos de la sociedad para usos iguales a su diseño inicial o para otros fines como el compostaje, materiales metales, cartón y plásticos.

Valorización: mecanismos y procedimientos desarrollados para vislumbrar o aprovechar la potencialidad de los recursos inmersos en los residuos sin afectar la salud y el medio ambiente.

Existen variados tipos de residuos originados en los diferentes contextos de la sociedad que pueden ser potencialmente empleados en el proceso de compostaje (figura

6.2). Su uso dependerá de las características físicas y químicas, así como grado de disponibilidad.

FIGURA 6.2 Origen de los residuos sólidos



Fuente: Los autores

6.4 ASPECTOS TÉCNICOS DEL COMPOSTAJE

Como pudimos apreciar en la historia del compostaje a nivel mundial, el hombre ha venido generando una serie de lecturas de los acontecimientos en torno a los residuos en su entorno, que lo han llevado poco a poco a articular diferentes iniciativas para el manejo de los estos. En esta aproximación a dicho manejo se encuentran prácticas eminentemente empíricas, otras un poco más tecnificadas y otras altamente refinadas.

Bioquímica de los residuos: los materiales orgánicos, como se pudo apreciar en la figura 6.2, tienen diferentes orígenes y combinaciones de carbohidratos, proteínas, hemicelulosas, celulosa, lignina y minerales en amplios rangos de concentración (tabla 6.1). Los contenidos en el material vegetal dependerán de la edad de la planta, el tipo de material y medio ambiente.

TABLA 6.1 *Composición media de los vegetales*

Biomolécula	% Materia seca	Humus
Celulosa	20 - 50	2 - 10
Hemicelulosa	10 - 28	2 - 20
Lignina	10 - 30	35 - 55
Materias animadas	1 - 15	15 - 45
Diversos: grasas, taninos, ceras	1 - 8	1 - 8

Fuente: Adaptado de Gómez (2000)

A medida que las plantas envejecen tienden a retornar diferentes minerales de su constitución al suelo y los compuestos de bajo peso molecular se convierten en compuestos poliméricos de alto peso molecular tales como las hemicelulosas, la celulosa y la lignina. La composición de los desechos animales dependerá del tipo de animal y su alimentación (Dalzell et al., 1991). El proceso de compostaje es esencialmente una reorganización de la fracción de carbono de la materia orgánica.

Los compuestos orgánicos como azúcares, de forma simple y fácilmente soluble en agua, son rápidamente absorbidos por microorganismos, por lo que se suministra energía y se elaboran polímeros a partir de ellos. Otras moléculas de rápida descomposición son los compuestos nitrogenados a partir de proteínas y aminoácidos. Otras sustancias como celulosa o hemicelulosa tienen grandes moléculas, por lo tanto deben ser atacadas por enzimas antes de que puedan ser usadas y su grado de descomponibilidad es menor que el de las moléculas anteriores, por lo que dura más tiempo su descomposición.

La lignina es una macromolécula que se encuentra en ramas, raíces y tallos de árboles y se constituye en la mayor precursora de moléculas húmicas; de otra parte, su grado de descomponibilidad es mayor que los dos tipos de grupo de moléculas anteriores. Es fundamental expresar que la gestión de un compost en el suelo es mucho mejor en la medida que proceda de la descomposición de un mayor número de residuos (mayor

residuo-diversidad); por tanto, este aspecto debe tenerse en cuenta a la hora del diseño de la producción del compost.

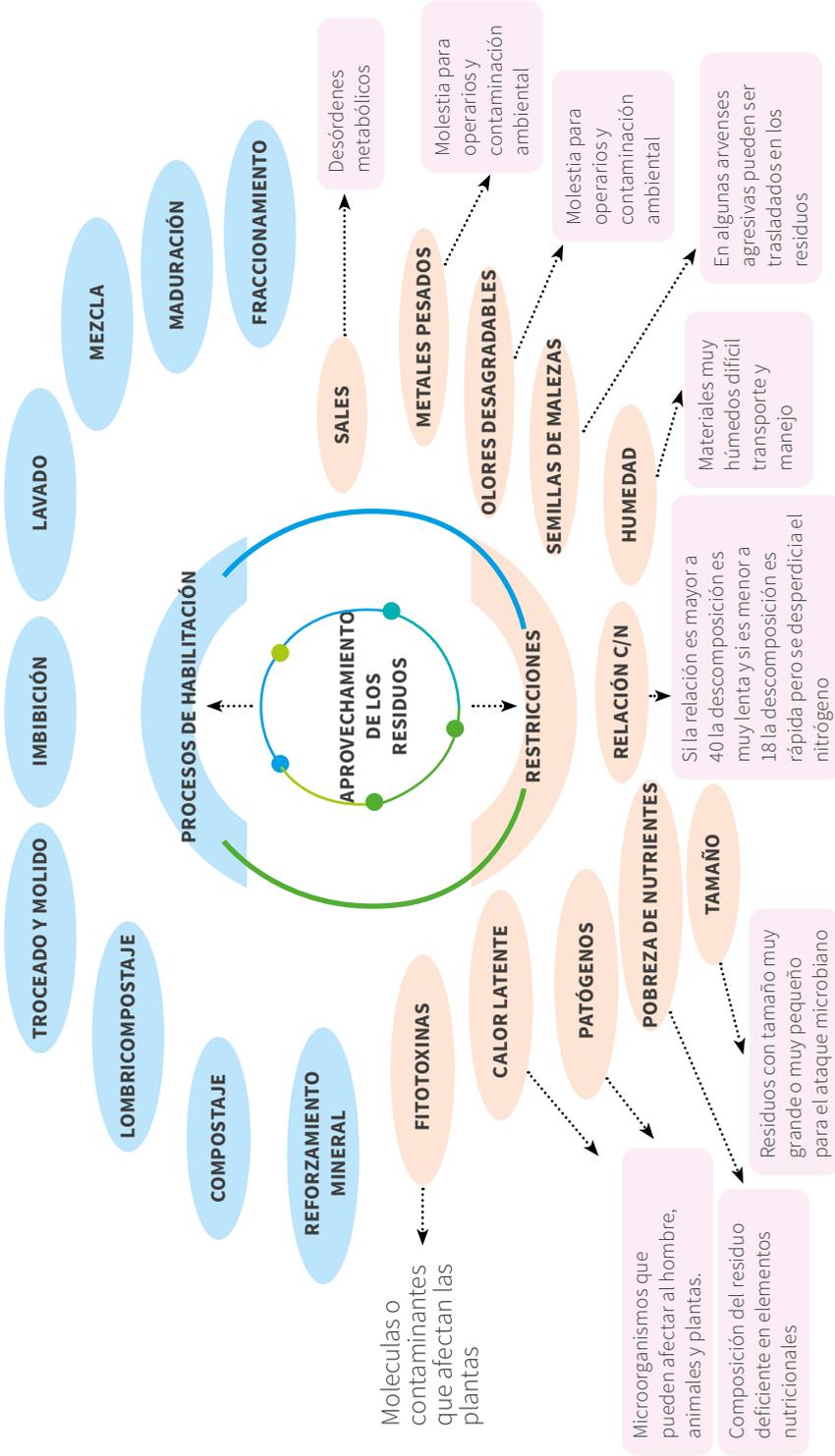
Para continuar con este marco conceptual es importante definir lo que es compostaje en su sentido estricto:

Compostaje: es un proceso aeróbico (biooxidativo) producto del accionar de variedad y cantidad de poblaciones de microorganismos en el interior de mezclas de materiales orgánicos sólidos con humedad adecuada, que requiere técnicamente un calentamiento denominado etapa termofílica debido a la dinámica microbial y la generación de toxinas naturales, lo cual genera agua, minerales y dióxido de carbono y la consecuente habilitación y estabilización de la materia orgánica de la matriz del sustrato para su ser usada en la agricultura (Gómez, 2000). Es una técnica de habilitación de los residuos, que imita la descomposición que sufren estos en la naturaleza (Valverde et al., 2020).

De acuerdo con lo anterior, en el compostaje se integra una dinámica microbial en función de diferentes residuos bajo un ambiente determinado en donde fluctúan la humedad, la temperatura y el pH, entre otros. Por tal razón, es importante establecer los diferentes factores químicos y físicos que se tienen en cuenta en el desarrollo de un proceso de compostaje.

Los residuos de diferente naturaleza relacionados en la figura 6.2 presentan diversas restricciones para su uso como insumos en la agricultura, razón por la cual la sociedad agropecuaria ha desarrollado un proceso para su adecuada habilitación (Gómez, 2000). Dentro de estos, el compostaje se constituye en una de las alternativas principales para dicha habilitación de residuos mediante su adecuada gestión, teniendo en cuenta aspectos de tamaño de los materiales, humedad y contenidos minerales de los mismos, de tal forma que el inicio del proceso cumpla con determinados requerimientos técnicos que aseguran el adecuado proceso de sucesiones microbiológicas y fases de maduración de la mezcla de materiales. En este sentido, se profundiza a continuación el proceso de compostaje (figura 6.3).

FIGURA 6.3 Restricciones y procesos de habilitación de los residuos



Fuente: Los autores (2019)

En la gestión de los sistemas de compostaje las variables más importantes son de dos tipos: las de seguimiento, que como su nombre lo indica se realizan durante todo el proceso y deben ser adaptadas a los requerimientos técnicos de cada fase del proceso y en segundo término las variables de naturaleza del sustrato, que deben estar en el rango adecuado al inicio del proceso de compostaje.

La humedad, temperatura, pH, aireación y espacios de aire libre son parámetros de seguimiento del compostaje mientras que la relación carbono: nitrógeno (C/N), carbono: fósforo (C/P), tamaño de partícula materia orgánica, nutrientes y conductividad eléctrica son variables o parámetros relacionados con la naturaleza del sustrato. En este sentido, las condiciones ambientales, el tipo de sustrato o residuo y la técnica de compostaje influyen en el valor o rango de los parámetros (Moreno y Moral, 2008).

6.5 PARÁMETROS DE SEGUIMIENTO DEL COMPOSTAJE

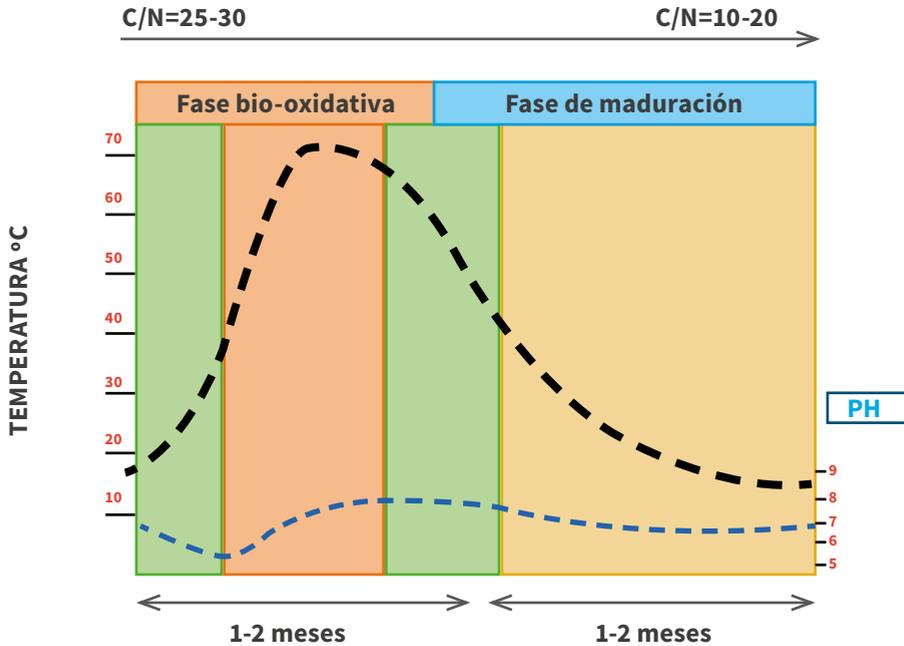
Temperatura: las diferentes poblaciones de microorganismos intervienen gestionando los materiales orgánicos y la energía inherente a ellos de manera que en unas condiciones determinadas de humedad y aireación del ambiente compostable generan un incremento en la temperatura. Se reconocen tres fases de temperatura en el proceso de compostaje: la fase mesófila inicial en donde la temperatura es menor a 45 °C; la fase termófila, cuya temperatura se encuentra en un rango de 50 a 60 °C y la fase mesófila final, periodo en el cual el proceso alcanza nuevamente la temperatura inicial (figura 6.4).

La temperatura es un parámetro importante en el proceso de compostaje; algunos científicos la consideran como la principal característica de dicho proceso en comparación con otros factores como el pH, la humedad y la aireación. Esto se debe a que la temperatura influye en diferentes aspectos de habilitación de los sustratos como la ruptura de enlaces de macromoléculas de la lignina, celulosa y hemicelulosa, por ejemplo; también influye en la dinámica sucesional de microorganismos según diferentes rangos de temperatura que se dan en cada una de las fases nombradas anteriormente, siendo la fase termofílica en donde mueren gran cantidad de microorganismos que en muchos casos pueden ser patógenos, lo que genera la habilitación microbial de los materiales orgánicos.

También influye en la disociación de moléculas contaminantes como insecticidas organofosforados, ditiocarbamatos, herbicidas y hormonas, entre otros. Es importante

anotar que en el seguimiento de este parámetro se recomienda no dejar sobrepasar el proceso por encima de los 70 °C puesto que se estaría generando desperdicio de elementos por volatilización excesiva.

FIGURA 6.4 Curva de temperatura y pH durante el proceso de compostaje



Fuente: Adaptado de Moreno y Moral (2008)

pH: la variable pH muestra una notable influencia en el proceso de compostaje pues influye notoriamente en los estados sesionales de los microorganismos a lo largo del proceso (figura 6.4). Como se puede apreciar, el pH inicial de la fracción orgánica se encuentra normalmente entre 5 y 7. Inicialmente cae a 5 o menos de 5, momento en el que la masa orgánica está en temperatura ambiente y se produce una liberación de ácidos orgánicos; posteriormente observamos una alcalinización de la masa orgánica, producto de la migración de dichos ácidos orgánicos y la producción de amoníaco a partir de las proteínas; al finalizar el proceso, el pH tiende a la neutralidad debido a la generación de compuestos húmicos que poseen un efecto tampón.

Humedad: como el proceso de compostaje es en esencia el aprovechamiento de sucesiones microbianas en torno a unos residuos, esta masa microbiana requiere para su desarrollo y sus procesos fisiológicos un contenido adecuado de agua. El porcentaje óptimo de humedad para el proceso de compostaje depende del tipo de residuos que se

mezclan en el proceso, pero en términos generales el rango óptimo se encuentra entre el 50 y 60 %. Es de anotar que el conocimiento de los contenidos de humedad y de las características físicas de los residuos para mezclar es fundamental en la gestión del proceso de compostaje; por ello, se debe tener en cuenta el carácter higroscópico de algunos materiales para ser mezclados por otros que tengan alto contenido de humedad, es decir, materiales fibrosos con materiales suculentos. La gestión técnica del compostaje exige realizar unos cálculos en cuenta a dicha humedad inherente de los residuos para de esta forma calcular cuánta agua externa debe adicionarse aproximadamente.

Aireación: debido a que el compostaje es un proceso eminentemente aeróbico, la aireación debe ser adecuada para que los microorganismos que intervienen en el proceso tengan una dinámica eficiente en la gestión de los residuos y estos últimos presenten una oxidación adecuada para su descomposición; una aireación insuficiente puede generar aparición de poblaciones de microorganismos anaeróbicas que generan algunos compuestos volátiles asociados a olores desagradables.

El proceso de aireación del compostaje es uno de los aspectos que más pesa en los costos de producción; es por ello que su adecuada gestión se constituye en un aspecto clave para la factibilidad económica de una propuesta comercial. La aireación está asociada directamente con el tiempo del proceso de compostaje; los procesos altamente industrializados de compostaje incluyen maquinaria para realizar volteo frecuentemente de la masa orgánica (maquina Backhus, volteadoras de trinchera en nave cerrada e insufladoras de oxígeno en sistemas de compostaje cerrado), mientras que los procesos de compostaje de pequeña escala de agricultores generalmente son diseñados *in situ* y sus sistemas de aireación son muy sencillos (mediante volteos manuales en pilas abiertas y mediante elementos mecánicos como varas, guadas transversales en compostera estática) para evitar costos de mano de obra y su maduración se realiza en tiempos más largos.

6.6 PARÁMETROS DE LA NATURALEZA DEL SUSTRATO

Tamaño de la partícula: es un parámetro importante en el proceso de compostaje puesto que incide en aspectos como la densidad aparente, la superficie de contacto y, por ende, en un mejor ataque microbio del residuo, que redundará en una más rápida estabilización del proceso. Según varios autores, las mejores dimensiones del residuo oscilan entre 1 y 5 cm de diámetro. Algunos residuos llegan al proceso con una

dimensión adecuada, como es el caso de la cereza de café, la gallinaza, la caprinaza, etc., pero en algunos como los residuos de vegetales es necesario realizar el picado o desbrozado de los mismos.

Nutrientes: como se ha venido expresando, el compostaje es un producto de la acción de poblaciones de microorganismos que necesitan una fuente de carbono que les proporcione energía y materiales para la constitución de nuevas células, además de una fuente de nitrógeno necesaria para el metabolismo de las proteínas celulares. El nitrógeno es el elemento más importante del proceso y si existe buena disponibilidad de este, la mayoría de los demás nutrientes estarán también disponibles en cantidades adecuadas. El carbono se requiere en la síntesis celular para la conformación del protoplasma, grasas y carbohidratos y durante el metabolismo del compostaje sufre una oxidación para producir energía y dióxido de carbono. Como se observó anteriormente, la gestión para un compostaje adecuado requiere que el proceso inicie con una relación carbono-nitrógeno que oscile entre 25 y 30, como se explicará en el siguiente parámetro. Otro elemento importante es el fósforo, que desempeña una función importante al constituir compuestos celulares ricos en energía (ATP), requeridos en la dinámica microbiana.

Relación C/N y C/P: La relación carbono-nitrógeno es el principal parámetro para la gestión del compostaje (Tchobanoglous et al., 1998). Dicha relación de los contenidos elementales de los residuos orgánicos influye en su velocidad de descomposición pues los microorganismos requieren generalmente 30 partes de carbono por cada una de nitrógeno; por tal razón, se considera que el óptimo de relación C/N de un residuo o una mezcla de residuos oscila en el rango de 25-30:1. El exceso de nitrógeno genera pérdidas de este elemento en forma de amoníaco y genera olores desagradables; por el contrario, cuando no hay suficiente nitrógeno la descomposición de los residuos en el proceso es más lenta (tabla 6.2).

En la gestión del compostaje es fundamental conocer la composición química de los residuos de la mezcla con el fin de realizar los cálculos aproximados que nos lleven a establecer las proporciones óptimas de dichos residuos, de tal forma que el comienzo del compostaje tenga una relación carbono-nitrógeno que oscile entre 25 y 30.

Según Sanclemente et al., (2011), la alta relación carbono/nitrógeno es un aspecto que influye notoriamente en la dinámica de descomposición del residuo en estudio ya que su bajo contenido de nitrógeno incide negativamente en el metabolismo microbiano, lo que desencadena el estancamiento de la descomposición. Por ser un residuo en el que priman la celulosa y la hemicelulosa, con una alta relación carbono/nitrógeno, que está por el orden de 13:1, se puede apreciar que después de la cuarta semana del proceso

la tasa de descomposición presenta una tendencia similar para todos los tratamientos. Esto se debe además de otros aspectos, al bajo contenido de nitrógeno en dicha relación, lo cual repercute en el metabolismo microbiano y afecta la descomposición.

A manera de ejemplo, si se cuenta con dos residuos cuyo análisis de laboratorio generó los siguientes resultados:

- a. Boñiga: C/N= 18; nitrógeno= 0,7 % y humedad= 65 %
- b. Pasto: C/N=45; nitrógeno= 0,2 % y humedad= 45 %

Después de realizar los cálculos pertinentes se encuentra que por cada tonelada de boñiga con las características mencionadas se requieren 1,78 toneladas de pasto para obtener una relación C/N de 30; adicionalmente, al evaluar el contenido inicial de humedad se encuentra que está por el orden de 52 %, encontrándose en el rango apropiado, pero podríamos hacer los cálculos para llegar a 60 % para lo cual se necesita según el peso total, que son 2781 toneladas de mezcla, 549 litros adicionales de agua.

En cuanto a la relación C/P, investigaciones han encontrado que compostajes de paja de trigo con adición de roca fosfática aumentan la descomposición en la medida que se aumenta la cantidad fósforo añadida. El óptimo de relación C/P para el compostaje oscila entre 75 y 150 y para la relación N/P está en el rango de 5 a 20 (Moreno y Moral 2008).

TABLA 6.2 Relación carbono-nitrógeno y % de nitrógeno en base seca de algunos residuos

MATERIAL	% NITRÓGENO (MS)	RELACIÓN C/N
Bovinaza	1.7	18
Gallinaza	3 - 6	15
Porquinaza	3.8	20
Equinaza	2.3	25
Cortes de prado	3.6	12-15
Tamo de trigo	0.3- 0.5	128-150
Viruta de madera	0.1	200-500
Suelo nocturno	5.5-6.5	6-10
Orines	15-18	0.8
Ovinaza	3.75	22
Residuos de fruta	1.52	34.8
Residuos de aserraderos	0.13	170.0
Paja de avena	1.05	48.0

MATERIAL	% NITRÓGENO (MS)	RELACIÓN C/N
Madera (pino)	0.07	723
Papel de periódico	0.05	983
Correo basura	0.17	223
Papel mezclado	0.25	173
Jacinto de agua	1.96	20.9
Hierba bermuda	1.96	24
Residuos mezclados de mataderos	7.0-10.0	2.0
Fangos digeridos activados	1.88	15.7
Fangos crudos activados	5.6	6.3
Hojas (caídas recientemente)	0.5-1.0	40.08 - 80.0
Pulpa de café	1.0-2.3	8
Harina de pescado	4 - 10	4-5
Basura urbana, alto contenido en material vegetal	2-3	10-16
Basura urbana, alto contenido en papel	0.6-1.3	30-80
Harina cascos y cuernos	12	ND

Fuente: Adaptado de Dalzell et al. (1991)

6.7 MICROBIOLOGÍA DEL COMPOSTAJE

El proceso del compostaje constituye una dinámica microbial en donde dichos organismos utilizan unos residuos orgánicos como fuente de carbono y energía en condiciones aeróbicas. En este proceso se presentan sucesiones poblacionales de diferentes microorganismos regidos por factores como la temperatura, el pH, la humedad y las diferentes macro y micro moléculas orgánicas (tabla 6.3).

Inicialmente, en la fase mesofílica existe una gestión microbiana de los residuos caracterizada por poblaciones de bacterias Gram+, Gram-, lactobacillus y actinomicetos y hongos como penicillium y aspergillus, donde la temperatura oscila entre la temperatura ambiental hasta más o menos 40 °C; en ella existe una alta disponibilidad de nutrientes y el pH de la masa sufre una leve acidificación (que llega cerca de un pH 5) debido a la alta producción de ácidos orgánicos.

llus; la temperatura desciende ostensiblemente y al terminar esta fase se encuentra un poco por encima de la temperatura inicial del proceso de compostaje y el pH se estabiliza a valores cercanos a la neutralidad. Finalmente, se presenta la fase de maduración, donde priman los hongos; también se presentan poblaciones de bacterias Gram-, Actinomicetos, algas y nematodos. Esta fase se caracteriza por que el pH se estabiliza cerca de la neutralidad, la temperatura de la masa orgánica regresa a su estado inicial del proceso y la relación C/N se encuentra entre 10 y 20.

6.8 BIOQUÍMICA DEL COMPOSTAJE

Al inicio del proceso de compostaje, en la etapa mesofílica, las macromoléculas fácilmente degradables sirven de sustrato y de energía a las poblaciones microbiales (tabla 3), por tanto hay liberación de agua y dióxido de carbono, lo que reduce el contenido de carbono en la masa compostable y tiende a aumentar el porcentaje de la fracción mineral. En esta etapa prima el $N-NH_4$ sobre el $N-NO_3$. En la etapa termofílica comienza la degradación de macromoléculas de difícil descomposición (hemicelulosa, celulosa y lignina).

En esta etapa se genera la máxima liberación de dióxido de carbono y agua, lo que disminuye la concentración de carbono y eleva el porcentaje de minerales. Esta etapa es fundamental en la disociación de moléculas contaminantes y en la ruptura de enlaces de todo tipo de moléculas. En la fase de maduración se invierte la presencia de nitrógeno nítrico frente a la amoniacal y continua la reducción del carbono en la masa. La formación de ácidos húmicos empieza a ser importante y el pH tiende a la neutralidad. En etapa de maduración sigue la tendencia al aumento de la fracción mineral y de los nitratos y la disminución del porcentaje de carbono. Al terminar el proceso, es importante (dependiendo los residuos utilizados en el compostaje) calcular el coeficiente isocompuesto, que es la fracción del residuo o la mezcla estandarizada de ellos que se convierte en compost.

6.9 ACELERADORES DEL COMPOSTAJE

En la actualidad se vienen desarrollando tecnologías que aceleran los procesos de transformación de la materia orgánica y que tienen efectos positivos cuando se utilizan en el compostaje.

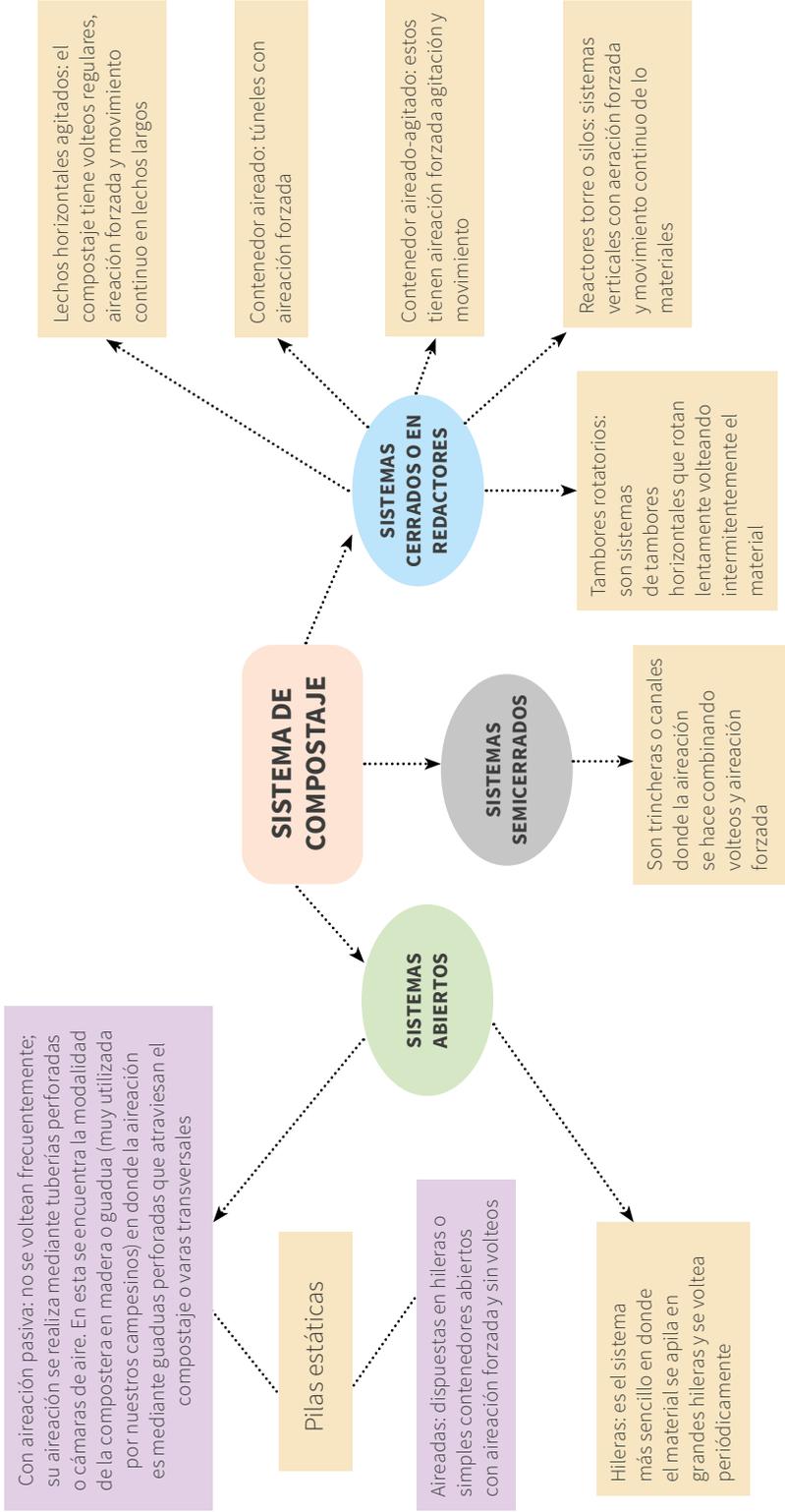
Los aceleradores finitos: se denominan así a las sustancias que al ser adicionadas a los suelos o a los residuos orgánicos generan una aceleración en la velocidad de la mineralización de la materia orgánica del suelo o en la transformación de los residuos. Se denominan aceleradores finitos porque una vez agotados en el proceso, cesa la aceleración. En el proceso de compostaje se pueden considerar aceleradores finitos de nitrógeno a las leguminosas, el matarratón o materiales ricos en azúcar como la miel de purga (Gómez, 2004).

Los aceleradores Infinitos: Se denominan así a los inoculantes microbiales especiales que se adicionan al suelo o a los residuos orgánicos con el fin de acelerar la velocidad del proceso de mineralización de la materia orgánica del suelo o la transformación de los residuos. Se denominan aceleradores infinitos porque continúan su labor en el largo plazo pues continúan reproduciéndose si hay sustrato para hacerlo (Gómez, 2004). En el mercado existen variados productos basados en microorganismos especializados en descomponer residuos; es el caso de microorganismos eficientes, otros a base de *Trichoderma lignorum* y otros especializados en descomponer materiales lignocelulíticos.

6.10 SISTEMAS DE COMPOSTAJE

Tanto en Colombia como en el mundo existen diferentes sistemas de habilitación de los residuos sólidos mediante el compostaje, que dependen de variables como la tecnología, los recursos económicos, los volúmenes y los tipos de residuos (figura 6.5).

FIGURA 6.5. *Sistemas de compostaje*



Fuente: Los autores

A nivel nacional, el manejo del compostaje se viene desarrollando para habilitar diferentes residuos, principalmente en los sectores de los palmicultores, avicultores, caficultores, cañicultores, ganaderos y floricultores, entre otros. Existe además un sector de productores de abonos orgánicos a base de compost que mediante el enriquecimiento mineral e inoculación de microorganismos le dan valor agregado al compost y lo comercializan en diferentes contextos del país.

6.11 CARACTERIZACIÓN DEL COMPOST

Terminado el compostaje y habiendo tenido la habilitación completa de los residuos, no podemos decir que ese recurso se constituye en un abono orgánico en el sentido estricto de la palabra porque existe un marco normativo nacional en donde se encuentra la Resolución No 00150 ICA y las normas técnicas NTC 5167 y 1927, que establecen los diferentes criterios y especificaciones técnicas que se deben cumplir para diferenciar si ese producto es un abono orgánico, orgánico-mineral, una enmienda o un acondicionador de suelos. Para tal efecto, a continuación aclaramos el significado de cada uno de ellos.

Enmienda orgánica: material orgánico que se adiciona al suelo para mejorarle sus condiciones químicas adversas como pH, salinidad, acidez, aluminio intercambiable etc.

Abono: producto, insumo o recurso que al ser aplicado al suelo o a las plantas suministra nutrientes, de forma que se obtiene una respuesta sensible por parte del cultivo.

Sustrato: materiales sólidos, orgánicos o inorgánicos colocados en contenedores en los cuales las plántulas encuentran el medio óptimo para el anclaje y desarrollo de las raíces.

Acondicionador de suelos: recurso, producto o insumo que se aplica al suelo con el fin de mejorar sus condiciones físicas.

Para poder gestionar un compost como abono orgánico ante el ICA y de esta forma comercializarlo con registro es importante evaluar su calidad. Un abono orgánico o un orgánico-mineral debe tener un contenido mínimo de la sumatoria de nitrógeno, fósforo y potasio expresado en porcentaje en base seca, un contenido de humedad, una estabilidad y granulometría adecuados (anexos 1 y 2). De otra parte, existen en el mercado diferentes insumos tanto orgánicos como minerales utilizables para mejo-

rar la calidad del compost; además, el hecho de no cumplir esas características no lo excluye de que se pueda comercializar como enmienda o acondicionador (anexo 3).

6.12 PROCEDIMIENTO PARA LA PRODUCCIÓN COMPOSTAJE

Las técnicas de producción de compostaje de los residuos orgánicos tratan de ajustarse a las condiciones mencionadas anteriormente. Dependiendo del nivel tecnológico del proceso, lo más importante es que se elija un procedimiento sencillo que se pueda llevar a cabo con la mano de obra, la capacidad y los medios económicos disponibles. Los aspectos que se tienen en cuenta para decidir el proceso a emplear son:

- Tipo de desechos, facilidad de descomposición y presencia de patógenos en ellos.
- Cantidad de compost que hay que elaborar
- Costo permisible en términos de mano de obra, equipos y espacio.
- Uso que se le va a dar al compost.

Basado en estos cuatro aspectos, se diseña la estructura de la planta o zona donde se realizará el proceso teniendo en cuenta la dinámica de entrada de residuos y de salida del recurso compost, es decir, el área de recepción de insumos, las líneas de distribución de los mismos en el interior de las composteras y las líneas de salida del producto final (compost). Es fundamental establecer la cubierta de la estructura pues el compostaje es un proceso aeróbico, por lo tanto, la variable humedad debe ser manejada adecuadamente.

Luego, con base en los parámetros de seguimiento y los parámetros relativos a la naturaleza de los sustratos con que se cuenta, se define el plan de producción, que tiene en cuenta los siguientes aspectos:

1. Definir las proporciones de los residuos en la mezcla según la relación carbono / nitrógeno.
2. Establecer la metodología para obtener el tamaño de partícula óptimo para el proceso.
3. Establecer la estrategia de mezcla de residuos, humedecimiento de la misma y dinámica de volteos de la masa de residuos.

4. Establecer la estrategia para evaluación de parámetros de seguimiento de la evolución del compostaje (grado de madurez del compost) y variables de calidad del producto final.
5. Fijar la metodología de recolección y empaque.

6.13 CONCLUSIONES

El proceso de compostaje exige una gestión técnica que implica el conocimiento de los residuos que se van a utilizar, las dinámicas microbiales y los gradientes de temperatura para obtener al final un insumo adecuado para su utilización en la agricultura. El compost es un insumo que puede presentar diferentes expresiones que lo tipifiquen como enmienda, abono orgánico, abono orgánico enriquecido con minerales o abono orgánico enriquecido con minerales e inoculado con microorganismos; por tanto, no se puede generalizar su aplicación sin tener en cuenta su naturaleza.



El compostaje se constituye en una estrategia de la sociedad para habilitar de forma técnica residuos y macromoléculas de la agroindustria que, sin su debido tratamiento, pueden ser contaminantes.

6.14 REFERENCIAS

Bueno, M. (1999). *El Huerto Familiar Ecológico*. Editorial RBA Libros.

ICONTEC – ICA. (2003) Sobre Fertilizantes en Colombia. Reglamentos y Normas Técnicas Colombianas.

Dalzell, H., Biddlestone, A., Gra, K. y Thurairajan, K. (1991). *Manejo del Suelo: Producción y Uso de Compostaje en Ambientes Tropicales y Subtropicales*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO. Boletín de suelos N° 56 de la FAO.

Eweis, J., Ergas, S., Chang, D. y Schroeder, E. (1999). *Principios de Biorrecuperación*. Editorial Mac Graw Hill.

Gómez, J. (2000). *Abonos Orgánicos*. Universidad Nacional de Colombia.

Gómez, J., Pineda, A., y Prager, M. (2002). *Acolchados Orgánicos*. Universidad Nacional de Colombia.

Gómez, J. (2004). *Aceleradores de la materia orgánica*. Asiava, (67), 10-11.

Moreno, J. y Moral, R. (2008). *Compostaje*. Editorial Mundiprensa.

Sancllemente, O., García, M. y Valencia, F. (2011). Efecto del uso de melaza y microorganismos eficientes sobre la tasa de descomposición de la hoja de caña (*Saccharum officinarum*). *Revista Investigación Agraria y Ambiental*, 2(2), 13-19.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. (1998). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Editorial Mac Graw Hill.

Valverde, A., Encinales, J., Vargas, G. y García, M. (2020). *Alternativas sostenibles para sistemas productivos de limón*. Ediciones Unibagué.



CAPÍTULO

APROVECHAMIENTO DE FIBRAS VEGETALES Y RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO COMPONENTES DE COMPUESTOS A BASE DE CEMENTO



Julián Eduardo Mejía Ballesteros

7.1 INTRODUCCIÓN

El uso de materiales de construcción es una constante en la vida del ser humano. Se destaca el cemento como un material de elevado aprovechamiento a nivel mundial, lo cual se evidencia con su enorme presencia en la mayor parte de los centros urbanos e industriales.

Los materiales compuestos se definen como aquellos materiales en cuya formulación participan de manera conjunta por lo menos 2 materiales, con la premisa de que el nuevo material constituido presente características superiores cuando son comparadas con los materiales iniciales de forma individual. Así, un tipo de material compuesto son los denominados fibrocementos, entendidos como materiales a base de cemento no estructurales, sin agregados, con la posibilidad de presentar adiciones minerales y con fibras de refuerzo distribuidas a lo largo de la matriz. Hasta hace unas décadas, para reforzar el compuesto se utilizaban abiertamente fibras minerales, de forma específica el amianto crisotilo o también conocido como asbesto (Jamshidi y Ramezani-pour, 2011). Sin embargo, surgió un movimiento internacional en búsqueda de su prohibición, argumentando que el uso del mismo se encuentra asociado a problemas comprobados de salud sobre los trabajadores de la industria y posiblemente sobre los usuarios, lo que ocasionó la detención en su uso e incluso su explotación a nivel mundial. Una alternativa como material de refuerzo son las fibras sintéticas, que han mostrado un desempeño positivo, pero muestran una serie de desventajas en función de su costo elevado y de estar basadas en petroquímicos que las hacen un producto no renovable (Ballesteros et al., 2017).

El refuerzo del material se torna importante pues como es ampliamente entendido, los materiales a base de cemento presentan un destacable comportamiento mecánico cuando son sometidos a esfuerzos de compresión, pero muestran importantes limitantes en cuanto a esfuerzos de flexión se trata. Cuando fuerzas de este tipo actúan sobre el compuesto cementante, el mismo sufre una rápida ruptura y, por consiguiente, el fin de su vida útil (Ballesteros et al., 2015). Este desempeño mecánico frágil se da como resultado de que el material no posee la capacidad de absorber las fuerzas a las cuales es sometido, lo que lo lleva a su rompimiento. Una vez son incluidas fibras de refuerzo en la matriz, ocurren fenómenos que posibilitan la obtención de un material con mayor tenacidad, con lo cual se viabiliza la absorción de energía, ductilidad y mayor resistencia mecánica (Claramunt et al., 2016).

Dado lo anterior, se hace fundamental desarrollar técnicas o procedimientos y adelantar investigaciones utilizando materiales no convencionales que permitan obtener productos de fibrocemento alternativos y siempre con el intuito de presentar un desempeño similar o incluso superior a aquellos encontrados comercialmente. De esta manera, una línea de investigación indica la potencialidad del uso de fibras vegetales como material de refuerzo de compuestos cementantes (Almeida et al., 2013; Ballesteros et al., 2015).

El uso de fibras de origen vegetal trae consigo una destacable serie de beneficios, entre los cuales se destacan el carácter biodegradable de los mismos, su elevada disponibilidad a nivel mundial, especialmente en países tropicales y subtropicales, representar un recurso renovable, presentar un menor requerimiento económico para su extracción y producción y, por consiguiente, un menor costo en el mercado (Ishizaki et al., 2006); finalmente, las mismas exponen un desempeño mecánico positivo, lo que posibilita su uso con la finalidad de refuerzo (Claramunt et al., 2011).

Sin embargo, aun con las ventajas ya expuestas, el aprovechamiento de fibras naturales presenta una serie de limitantes importantes que frenan hasta cierto grado el aprovechamiento de este recurso. Como ha sido comprobado por diversas investigaciones, las fibras vegetales son susceptibles a degradarse dentro de la matriz de cemento, como resultado del grado alto de alcalinidad del mismo (Tian y Zhang, 2016), el cual puede llegar hasta un pH de 13. Otra problemática establecida ocurre como efecto de la capacidad de absorción de agua de las fibras, las cuales dentro de compuesto tienden a absorber el agua que entra por medio del sistema poroso de la matriz, generando variación volumétrica y acarreado una interfaz entre fibra-matriz debilitada pues básicamente la fibra se desprende de la matriz y su capacidad de refuerzo se ve comprometida (Claramunt et al., 2010).

A modo de solventar esta problemática, existe la posibilidad de realizar tratamientos sobre la matriz o sobre la fibra. En el primer caso, el objetivo se centra en modificar químicamente la matriz cementante favoreciendo un ambiente menos alcalino o neutro; por su lado, los tratamientos sobre las fibras pretenden modificar su estructura superficial o interna limitando su capacidad de absorción de agua (Luna et al., 2016). Estos tratamientos posibilitan el empleo de las fibras vegetales como mecanismo de refuerzo en fibrocementos no estructurales, aportando a un desarrollo sostenible por el uso de un material ambientalmente amigable y al afianzamiento de un mercado “verde”, sin mencionar la posibilidad de aprovechar desechos del sector agrícola, sin valor aparente, como materia prima que funciona como sustituto parcial de la matriz de cemento, conservando su desempeño y competitividad en el mercado.

7.2 FIBRAS VEGETALES

Las fibras naturales, o lignocelulósicas, están constituidas por una importante variedad de componentes como compuestos inorgánicos, grasas, carbohidratos simples, polifenólicos y pectinas, entre otros. Adicionalmente, han sido identificados tres compuestos que se establecen como sus constituyentes fundamentales, siendo ellos la hemicelulosa con un porcentaje en masa de 20 %-40 %, la lignina con un porcentaje en masa de 10 %-25 % y la celulosa con un porcentaje en masa de 40 %-60 % (Spinacé et al., 2011), cuyos valores varían en función del tipo de especie vegetal, de su edad, de la parte utilizada y de las condiciones ambientales y del suelo.

De manera general, como se puede observar en la figura 7.1, una fibra vegetal está conformada por un elevado número de fibrillas; las mismas presentan una estructura que se asemeja a un “tubo achatado” cuya cavidad central recibe el nombre de lumen. La pared celular de estas fibrillas se divide en cuatro partes, representadas por una pared celular primaria y tres paredes celulares secundarias. Estas paredes celulares están conformadas por microfibrillas de celulosa en una matriz junto con hemicelulosa y lignina, en donde esta actúa como aglomerante natural, pudiendo ser reunidas aproximadamente entre 30 a 100 cadenas celulósicas por cada microfibrilla (Fernandes et al., 2015).



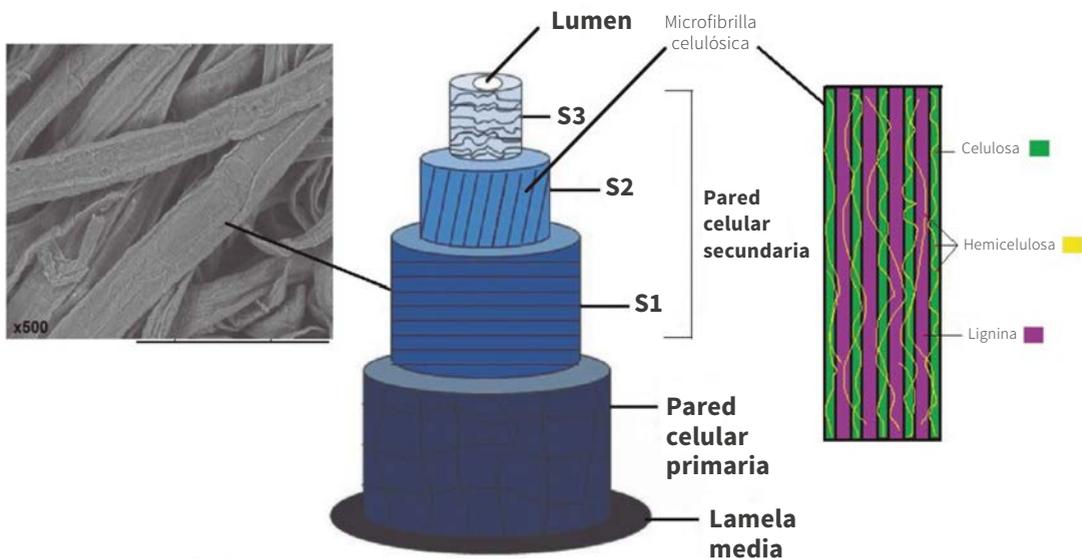
Estas paredes celulares están conformadas por microfibrillas de celulosa en una matriz junto con hemicelulosa y lignina, en donde esta actúa como aglomerante natural, pudiendo ser reunidas aproximadamente entre 30 a 100 cadenas celulósicas por cada microfibrilla (Fernandes et al., 2015).

De forma más específica, se indica que una fibrilla posee tres capas denominadas como lamela media, pared celular primaria y pared celular secundaria, la cual se subdivide en pared secundaria interna (S3), pared secundaria media (S2) y pared secundaria externa (S1). La lamela media presenta una composición dada por hemicelulosa, pectina y lignina; la pared celular primaria se constituye esencialmente por polisacáridos como la hemicelulosa y fibrillas de celulosa (en arreglos desordenados) y, finalmente, las paredes secundarias presentan principalmente microfibrillas de celulosa cristalinas, posibilitando la aparición de la estabilidad mecánica y resistencia de la planta.

En relación con el origen de las fibras celulósicas, se destaca que existen diversas fuentes como el algodón, el yute, el cáñamo, el lino y el sisal, entre otras. A su vez, su origen también puede proceder de cultivos tales como el coco, el trigo, el arroz y la caña de azúcar, entre otros. Sin embargo, a nivel global son las maderas las fuentes más comunes y aprovechadas de fibras naturales (Fernandes et al., 2015).

La amplia variedad de fuentes de este recurso también se encuentra relacionada con una destacable variación de sus características fundamentales; así, las fibras vegetales según su procedencia varían enormemente en lo que respecta a composición química y microestructura, la cual a su vez puede mostrar variaciones importantes como resultado de las condiciones ambientales del lugar de extracción, de las características del suelo, de la edad de la planta y del sistema de cultivo.

FIGURA 7.1 Representación esquemática de la pared celular de fibras celulósicas



Fuente: Adaptado de Fernandes et al. (2015)

CELULOSA

La celulosa se considera el polisacárido más abundante de la naturaleza; puede encontrarse ampliamente en el reino vegetal (Lavoine et al., 2012), en hongos, amibas y puede ser producida por ciertos animales marinos como los tunicados y algunas especies bacterianas (*Acetobacter xylinum*). La misma se expone como la molécula estructural de las plantas pues se encarga de destacable resistencia mecánica.

La molécula de celulosa se representa a partir de la fórmula química $C_6H_{10}O_5$. Se caracteriza por ser un polímero lineal rígido de hidrato de carbono, ser constituida por subunidades de glucosa, las cuales se unen por medio de enlaces β -1.4 y presenta la celobiosa como la unidad de repetición (Siqueira et al., 2010). Esta molécula puede alcanzar altos grados de polimerización, representados en largas cadenas de hasta 10 000 unidades de repetición, variando según la fuente de obtención (John y Thomas, 2008) y siendo el factor responsable del destacado desempeño mecánico de las plantas. De igual forma, presenta tres grupos hidroxilos en cada unidad de repetición, lo que le otorga su afinidad por el agua (Spinacé et al., 2011).

HEMICELULOSA

La hemicelulosa es definida como un polisacárido de cadena linear ramificada constituida a partir de diversos tipos de azúcares simples o de cadena corta como lo son la D-galactosa, D-manosa, D-xilosa, D-glicosa y L-arabinosa, entre otros (Chandel et al., 2007). Este componente de la pared celular de las fibras vegetales es considerablemente similar a la celulosa; no obstante, se caracteriza por presentar un grado de polimerización que resulta ser 10 o hasta 100 veces inferior (Jeronimo y Silva, 2013), ausencia de cristalinidad, elevada absorción de agua y baja masa molecular (Sanchez et al., 2010).

Esta molécula se consolida como el segundo mayor constituyente de las fibras naturales y se encarga de proporcionar refuerzo, como resultado de las relaciones con la celulosa, tanto a las paredes primarias como secundarias.

LIGNINA

La lignina es considerada la segunda macromolécula de mayor abundancia en la naturaleza y uno de los tres principales constituyentes de las fibras naturales después de la celulosa y hemicelulosa (Gadioli et al., 2014). Este componente vegetal se caracteriza por una estructura molecular bastante compleja y muy ramificada; además de ser

amorfa y tridimensional (Zeng et al., 2014), posee una destacable cantidad de grupos funcionales como lo son los grupos fenólicos, hidroxilos alifáticos y metoxilos (Gordobil et al., 2016), elevada resistencia a la degradación química y bioquímica, carácter fuertemente hidrofóbico (Ten y Vermerris, 2015), solubilidad en medios alcalinos con elevada temperatura, resistencia a la hidrolización por ácidos y facilidad de oxidación (John y Thomas, 2008).

La función básica de la lignina como constituyente de las fibras naturales es mantener unidas las fibrillas y microfibrillas, para lo cual, varias capas de este polímero se mezclan con la celulosa y hemicelulosa formando así el compuesto que constituye la pared celulósica de las fibras vegetales (Ten y Vermerris, 2015). De igual forma, este compuesto, al tener la capacidad de unir otros constituyentes, posibilita el surgimiento de la rigidez y resistencia mecánica de la pared celular (Fernandes et al., 2015).

7.3 APLICABILIDAD DE FIBRAS CELULÓSICAS EN COMPUESTOS DE CEMENTO

La definición más acertada de los fibrocementos indica que son materiales no estructurales a base de cemento u otro aglomerante hidráulico, con fibras de refuerzo distribuidas por la matriz, sin presencia de agregados y con la posibilidad de presentar en su formulación adiciones minerales. Cuando los compuestos a base de cemento son reforzados su comportamiento se distingue enormemente de aquellos sin refuerzo; en estos últimos, cuando se alcanza el valor máximo de resistencia a la flexión muestran una ruptura abrupta, sin ningún grado de deformación, destacándose como una característica típica de los materiales frágiles. En cambio, en un material compuesto reforzado una vez se alcanza y supera la deformación que corresponde a su resistencia máxima de flexión, su estructura interna posibilita el soporte de las tensiones más allá de esta etapa, pasando a exponer un comportamiento mecánico dúctil o semidúctil, permitiendo de esta manera un retraso en la fractura del material e incrementando su ciclo de vida útil. Este nuevo desempeño mecánico surge como resultado de la presencia de fibras de refuerzo que básicamente forman “puentes” de transferencia que permiten la absorción de tensiones y, con ello, una mayor distribución de microfisuras y fisuras, lo que a su vez genera una ruptura caracterizada por la progresividad. En otras palabras, es posible indicar que las fibras de refuerzo viabilizan el surgimiento de mecanismos que originan tenacidad en el material compuesto y de este modo un mejor desempeño mecánico.

Como se mencionó anteriormente, la transferencia de tensiones posibilitada por el refuerzo del material es una característica de fundamental importancia; debe existir una adherencia adecuada entre la fibra y el cemento para que esta condición sea cumplida (Faruk et al., 2012). La adherencia en esta interfaz fibra-cemento debe distinguirse por el anclaje y la fricción, que se dan como resultado de uniones de carácter físicas, químicas y fisicoquímicas entre la superficie de la fibra y la matriz de cemento. Por un lado, las uniones físicas se dan como consecuencia de la hidratación del cemento creando fases que se entrelazan entre ellas mismas y con las fibras de refuerzo; ya para el caso de las uniones químicas, estas se originan como resultado de la formación de puentes de hidrógeno entre fibra y matriz. Es de destacar que esta interfaz fibra-matriz debe ser lo suficientemente fuerte para garantizar el arrancamiento progresivo de la fibra de la matriz de cemento o también denominado “pull out”. Si la interfaz fibra-matriz es excesivamente fuerte, ocurrirá la ruptura de la fibra en sí; y si es débil, ocurrirá el desprendimiento de la fibra sin absorción de tensiones.

Otra situación para considerar es el tamaño de la fibra que va a ser utilizada como refuerzo. Longitudes menores de fibra permiten una mayor concentración de fibras por gramo, lo que favorece una distribución con mayor grado de homogeneidad dentro de la matriz de cemento (Jarabo et al., 2012). Así, las fibras de menor longitud se denominan fibras cortas (0,5-1,5 mm) y pueden ser obtenidas a partir de maderas “duras” como el eucalipto, también llamadas “hardwoods”. Por otro lado, fibras de mayor longitud regularmente son fibras más robustas y fuertes, de mayor resistencia, pero que en cierto grado tienden a aglomerarse entre sí generando defectos de refuerzo y deterioro de las propiedades mecánicas. Las fibras obtenidas de maderas “suaves” como el pino son representantes de las denominadas fibras largas (3-6 mm) o “softwoods” (Morton et al., 2010).

7.4 LIMITACIONES DEL USO DE FIBRAS CELULÓSICAS

Excluyendo las notorias ventajas y potencialidades del uso y aprovechamiento de fibras de origen vegetal, existen una serie de importantes limitantes que preocupan al sector de la construcción y que impiden un mejor posicionamiento dentro del mercado mundial de este tipo de productos; estos son la acelerada degradación de la fibra dentro del ambiente alcalino de la matriz de cemento Portland y su destacada afinidad hidrofílica.

El sobresaliente carácter alcalino de la matriz de cemento, con elevadas concentraciones de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) o portlandita, se convierte en un ambiente agresivo para el componente constitutivo de las fibras celulósicas (Morton et al., 2010), ocasionando que, a lo largo del tiempo, el efecto de refuerzo del material de refuerzo desaparezca y así el compuesto pasa de nuevo a mostrar un desempeño frágil. Esta situación se da como resultado de un proceso denominado mineralización, caracterizado por la migración de productos de hidratación del cemento a la superficie e interior de las fibras vegetales, lo que genera una hidrólisis alcalina de la celulosa y sus demás constituyentes. Este proceso de degradación química reduce el grado de polimerización de las fibras y con ello reduce su resistencia mecánica (Almeida et al., 2013). De igual forma, la degradación de la lignina y hemicelulosa de lamela media debilita los enlaces entre las células individuales de la fibra.

El sobresaliente carácter alcalino de la matriz de cemento, con elevadas concentraciones de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) o portlandita, se convierte en un ambiente agresivo para el componente constitutivo de las fibras celulósicas (Morton et al., 2010).

Según lo expuesto por Ballesteros et al. (2017), el ataque alcalino se origina como resultado de la dilución de portlandita por acción del agua, que en condiciones normales y naturales (como las lluvias) entra a la matriz de cemento por medio de su sistema poroso, generando un “agua alcalina” que a su vez consigue llegar hasta las fibras de refuerzo distribuidas en el material. Una vez ocurrido este paso y considerando la afinidad de las fibras celulósicas por el agua, estas absorben el agua alcalina y generan una variación dimensional de estas (expansión). Luego, en un periodo seco, las fibras pierden el agua absorbida (contracción) y el hidróxido de calcio se deposita en el interior y en la superficie de la fibra generando la mineralización ya mencionada. De igual forma, la variación dimensional reportada también desempeña un papel importante pues permite que la interfaz entre fibra-matriz se debilite debido a que la fibra se desprende de la matriz, afectando el desempeño mecánico del compuesto.

7.5 ALTERNATIVAS PARA POTENCIAR EL USO DE FIBRAS VEGETALES

Como resultado de la problemática existente en función del uso de fibras vegetales como refuerzo de compuestos de cemento, surgen diversas líneas de investigación para hacer frente a esta situación. En la actualidad existen principalmente dos líneas de acción que buscan ampliar la durabilidad del material celulósico de refuerzo: los tratamientos sobre la fibra o sobre la matriz de cemento (Ferreira et al., 2014).

Los tratamientos sobre las fibras son diversos; estos agrupan tratamientos físicos, químicos y fisicoquímicos que buscan alterar a conveniencia las propiedades de la fibra. Han sido utilizados gran variedad de agentes hidrófilos (como resinas, aceites, etc.) o revestimientos bloqueadores (como sulfato de sodio, sulfato de magnesio, etc.) que buscan modificar la superficie de la fibra antes de ser agregadas al compuesto y cuya finalidad es reducir su capacidad hidrofílica, logrando de forma adjunta menor variación volumétrica y por consiguiente posibilita constituir una interfaz fibra-matriz más estable (Ferreira et al., 2012), además de retardar el proceso de mineralización (Mohr et al., 2005). Estos métodos ya mostraron resultados parcialmente positivos pues no consiguen evitar completamente el proceso de mineralización o en su defecto, su aplicación se torna difícil o incrementa notoriamente el costo de la fibra.

En la actualidad, una alternativa es el proceso de hornificación; este método físico pretende modificar la estructura interna de la fibra reduciendo su porosidad y colapsándola para limitar su capacidad de absorción de agua (Köhnke et al., 2010). La misma se da como resultado de ciclos secuenciales de inmersión en agua y secado, lo que fomenta la formación de puentes de hidrógeno entre las microfibrillas de celulosa, ocasionando el colapso del lumen de la fibra y la reducción de la porosidad de la pared celular; esto, a su vez, reduce la disponibilidad de espacios vacíos en los cuales puede ser almacenada agua. Así, la hornificación se destaca como un tratamiento económico y simple (Ballesteros et al., 2017) y su influencia en la pérdida de la capacidad de variación dimensional trae beneficios como material de refuerzo pues permite mayor estabilidad volumétrica y con ello un mejor desempeño en la interfaz entre fibra-matriz (Ballesteros et al., 2015). Además de esto, esta modificación permitirá disminuir la incrustación de hidróxido de calcio en el interior de la fibra, reduciendo la mineralización y consecuente incremento de la durabilidad.

En relación con los tratamientos sobre la matriz de cemento, existe una amplia variedad de posibilidades, entre las cuales se destacan la sustitución parcial de la ma-

triz por materiales puzolánicos como subproductos de la agroindustria (Mármol et al., 2013; Mejía et al., 2019) o las curas del material en ambientes enriquecidos con dióxido de carbono (Ballesteros et al., 2019; Correia et al., 2015). En ambos casos, ocurren una serie de reacciones químicas que involucran a los productos de hidratación del cemento, permitiendo así la reducción de la alcalinidad del material y permitiendo de forma adjunta un mejor desempeño mecánico y físico del mismo (Pereira et al., 2013).

Dentro de la literatura internacional pueden encontrarse diversas investigaciones que profundizan la aplicación de la técnica de hornificación como pretratamiento de las fibras vegetales antes de ser incorporadas como material de refuerzo en la matriz de cemento. Así, los resultados expuestos por Ballesteros et al. (2015) indican la potencialidad de la técnica. Los autores utilizaron pulpas de pino blanqueado y eucalipto no blanqueado como refuerzo de una matriz de cemento y calcita. Para hornificar las fibras, las mismas fueron sometidas a cuatro ciclos de humedecimiento y secado. El humedecimiento se realizó por inmersión de las fibras en agua corriente durante 15 horas; luego, se les retiró el exceso de agua por medio de drenaje por vacío; una vez finalizado el paso anterior, la masa fibrosa obtenida fue desagregada y colocada en horno para el proceso de secado a 60 °C durante 7 horas. Este proceso significaba un ciclo de hornificación y el mismo fue repetido hasta alcanzar cuatro ciclos.

Para evaluar el desempeño mecánico y la durabilidad de ambos tipos de refuerzo en su estado hornificado y no hornificado, los autores moldaron una serie de placas cementantes (160 mm x 160 mm) como se detalla en la tabla 7.1. Estas placas fueron curadas de la siguiente manera: Una vez elaboradas las placas de fibrocemento, de manera individual fueron selladas en bolsas plásticas durante un periodo de dos días para llevar a cabo una cura saturada; luego, las placas se depositaron en un baño térmico con parámetros establecidos de 55 °C y 90 % humedad relativa para realizar la cura térmica durante un periodo de cinco días. Una vez finalizada la cura, las placas fueron cerradas y a partir de cada una se obtuvieron cuatro especímenes (160 mm x 40 mm x 5 mm). Se destaca que los autores trabajaron con 16 especímenes para cada formulación. Los 16 se dividieron en dos series con ocho representantes cada una; la primera serie fue ensayada mecánicamente una vez finalizado el proceso de cura y la segunda serie se sometió a un proceso de envejecimiento acelerado por medio de 200 ciclos de inmersión y secado (cada ciclo presenta una etapa de inmersión en agua durante 170 minutos y etapa de secado a 70 °C). El envejecimiento acelerado es una técnica que pretende simular el envejecimiento natural o las condiciones sol/lluvia a las cuales se vería sometido el material. Con ello, al finalizar el tratamiento, los autores evaluaron mecánicamente el desempeño de los especímenes de fibrocemento para determinar el grado de deterioro de la capacidad de refuerzo de la fibra.

TABLA 7.1 *Formulación de las formulaciones evaluadas*

Tipo de fibra	Formulación (% masa)			Cura	Envejecimiento/ES
	Cemento	Calcita	Fibra		
Eucalipto no blanqueado	68	27	5	CT	Si/8
					No/8
Eucalipto no blanqueado hornificado	68	27	5	CT	Si/8
					No/8
Pino blanqueado	68	27	5	CT	Si/8
					No/8
Pino blanqueado hornificado	68	27	5	CT	Si/8
					No/8

*ES: Número de especímenes

Fuente: Adaptado de Ballesteros et al. (2015)

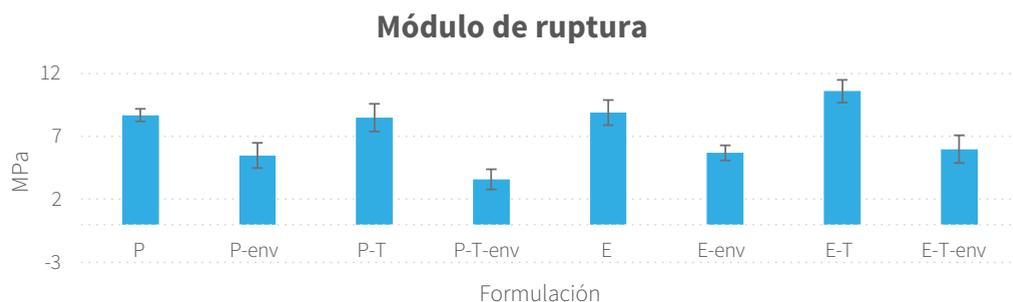
Una vez evaluado el desempeño mecánico de los fibrocementos, los autores determinaron que las propiedades mecánicas (figura 7.2) límite de proporcionalidad (LP) y módulo de elasticidad (MOE) no mostraron variaciones sobresalientes cuando fueron comparadas las formulaciones con el mismo tipo de fibra después de cura térmica. Una vez los especímenes evaluados fueron los envejecidos, los autores encontraron un incremento MOE, lo cual justifican con la continuidad del proceso de hidratación del cemento y algún grado de carbonatación. Los resultados referentes al módulo de ruptura (MOR) y energía específica (EE) se tornan especialmente importantes pues estas propiedades se relacionan estrechamente con el desempeño de la fibra como refuerzo del material. En este caso, los autores determinaron que para el material reforzado con fibra de eucalipto no blanqueada hornificada (E-H) se determinó un incremento superior al 19 % para los valores referentes a la propiedad de MOR. Para la formulación reforzada con pino blanqueado (P) al ser comparada con su contraparte reforzada con pino blanqueado hornificado (P-H), se presenta un incremento inferior a 5 %.

En relación con la EE, los autores encontraron que el refuerzo con P mostró valores superiores al refuerzo con E. Sin embargo, al ser evaluadas las fibras hornificadas, se determinó que los compuestos con fibras de E mostraron un incremento muy superior

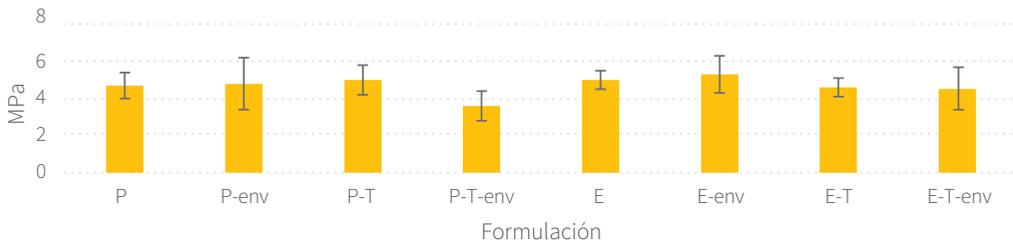
del desempeño representado por un porcentaje superior a 85 %. Los autores señalan este comportamiento como resultado de un mayor efecto del tratamiento de hornificación sobre las fibras de eucalipto. Por otro lado, cuando los autores estudiaron el desempeño de la propiedad EE para compuestos envejecidos y reforzados con pino blanqueado (P-env), pino blanqueado hornificado (P-H-env), eucalipto no blanqueado (E-env) y eucalipto no blanqueado hornificado (E-H-env), encontraron para todos los casos una reducción cercana a 90 % en el desempeño. Los autores informan que este resultado se da como consecuencia de la disolución y posterior precipitación en la superficie y e interior de las fibras, generando su degradación y pérdida de capacidad de refuerzo; de igual forma, la investigación resalta que el proceso de envejecimiento utilizado fue muy agresivo.

Aunque los resultados de la investigación de Ballesteros et al. (2015) evidencia que el proceso de hornificación permite un mejor desempeño de la fibra vegetal como material de refuerzo, los mismos también evidenciaron que el tratamiento como tal no consiguió evitar el deterioro de la fibra a lo largo del tiempo. Por otro lado, los autores continuaron con esta línea de investigación y a partir de los resultados expuestos en Ballesteros et al. (2019) explican que al refinar el proceso de hornificación alcanzaron una preservación de fibras de eucalipto no blanqueado hornificado como refuerzo de compuestos cementantes después de 200 ciclos de envejecimiento acelerado, comprobando así que este pretratamiento simple y económico es una alternativa destacada para combatir los limitantes al uso de fibras vegetales como refuerzo en fibrocementos.

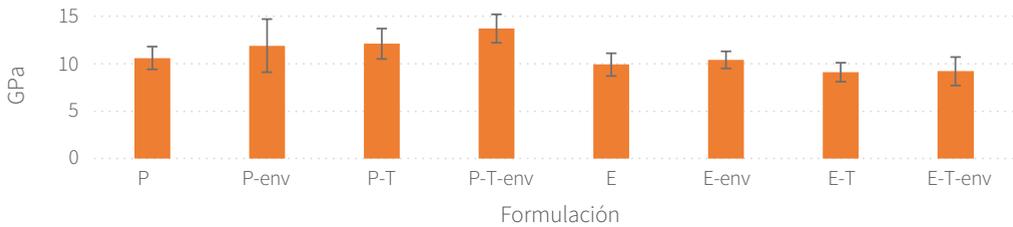
FIGURA 7.2 *Propiedades mecánicas evaluadas en los compuestos cementantes reforzados con fibras tratadas y no tratadas, antes y después del proceso de envejecimiento acelerado*



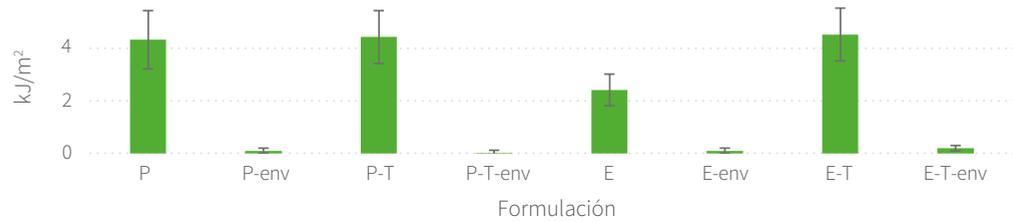
Límite de proporcionalidad



Módulo de elasticidad



Energía específica



Fuente: Adaptado de Ballesteros et al. (2015)

A modo de corroborar el efecto del proceso de hornificación sobre las fibras celulósicas, los autores procedieron a realizar una serie de evaluaciones para dicho fin. De esta manera, fue determinada la viscosidad, el índice de cristalinidad, el valor de retención de agua (tabla 7.2) y la microscopía electrónica de barradura (figura 7.3).

Los resultados expuestos por Ballesteros et al. (2015) indican que los valores de viscosidad no mostraron modificaciones importantes como resultado de la aplicación del proceso de hornificación sobre las fibras, situación que se torna importante cuando se define la estrecha relación de la viscosidad con el grado de polimerización de la molécula de celulosa, en donde reducciones indicarían que el tratamiento estaría deteriorando las cadenas celulósicas de las fibras. Por otro lado, el índice de cristalinidad mostro reducciones inferiores a 10 %, lo que según los autores era un comportamien-

to esperado y aceptable como resultado de cambios intramoleculares y remoción de componentes no cristalinos. Este resultado es destacable al considerar la importancia que tiene el grado de cristalinidad de la celulosa sobre el desempeño mecánico y físico de las fibras.

A partir de las consideraciones de los autores, el valor de retención de agua (VRA) es un ensayo fundamental pues permite definir con exactitud si la fibra está perdiendo o no su capacidad de retención/absorción de agua; por lo tanto, es una forma de medida indirecta del grado de hornificación alcanzado. Considerando lo anterior, los autores presentan valores inferiores de VRA para ambos tipos de fibra, después de ser aplicado el tratamiento de hornificación, indicando así la formación de puentes de hidrógeno y una aglomeración entre las microfibrillas de celulosa, que a su vez originan el colapso del lumen y el cierre del sistema poroso de la fibra. Los autores destacan que la fibra de eucalipto presentó un porcentaje mayor de hornificación (24 %) al ser comparada con la fibra de pino (10 %) y atribuyen este resultado a que la fibra de eucalipto fue obtenida en estado húmedo (nunca antes seca); la fibra de pino fue obtenida en forma de hojas secas.

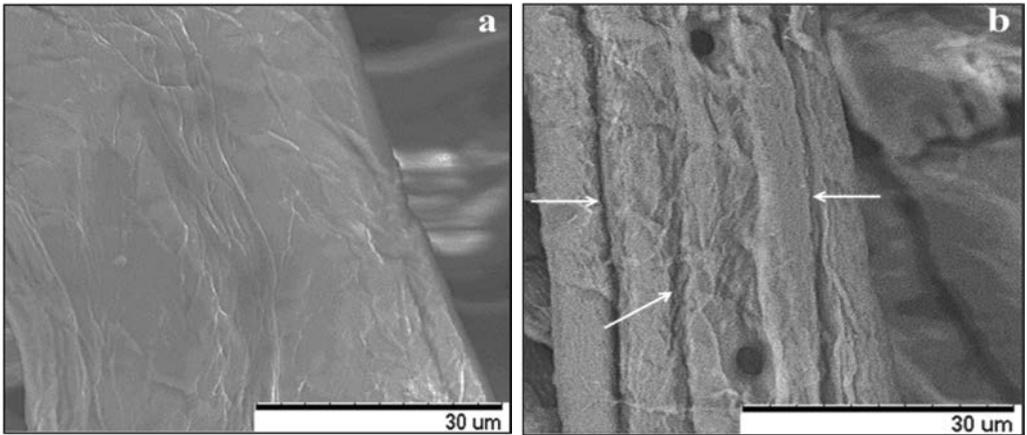
TABLA 7.2 *Propiedades físicoquímicas determinadas para las fibras celulósicas de eucalipto y pino tratadas y sin tratamiento*

Ensayo	Tipo de fibra			
	Pino blanqueado		Eucalipto no blanqueado	
	No hornificado	Hornificado	No hornificado	Hornificado
Viscosidad	730	725	919	848
Índ. de cristalinidad	81	77	82	73
Valor de retención de agua	123	111	221	168

Fuente: Modificado de Ballesteros et al. (2015)

En relación con los cambios microestructurales de las fibras, Ballesteros et al. (2017), por medio de la técnica de microscopía electrónica de barradura, observaron que el proceso de hornificación origina notoriamente el colapso de la fibra y de su lumen; hipótesis respaldada en el acercamiento observado entre los laterales de la fibra. Por otro lado, los autores rescatan que la superficie de la fibra se torna más rugosa, lo que favorecería a un mejor anclaje dentro de la matriz de cemento, lo que posibilitando una interfaz fibra-matriz más fuerte.

FIGURA 7.3 Microscopia electrónica de barradura para fibras de pino sin tratamiento (a) y hornificadas (b)



Fuente: Tomado y adaptado de Ballesteros et al. (2017)

A partir de los resultados obtenidos en la publicación abordada, se establece que es posible incrementar la durabilidad de las fibras naturales como refuerzo de matrices inorgánicas a base de cemento por medio de tratamientos como la hornificación, que, además, genera modificaciones a la estructura de la fibra permitiéndoles alcanzar un desempeño mecánico superior como material de refuerzo cuando es comparado con fibras sin tratamiento. Con esto, el autor concluye que las limitantes al uso de las fibras celulósicas dentro de los fibrocementos (degradación y variación volumétrica) pueden ser reducidas para potencializar el uso de este material ambientalmente amigable, renovable, biodegradable, abundante y económico dentro de la industria de fibrocementos no estructurales.

7.6 APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN COMPUESTOS DE CEMENTO

La generación de residuos agroindustriales es enorme a nivel mundial; muchos de estos residuos no presentan un adecuado manejo y gestión en relación con su disposición final, lo que ocasiona un impacto ambiental negativo de mayores proporciones que su propia producción. En la actualidad, existe una gran presión nacional e inter-

nacional en búsqueda de darle un manejo adecuado a estos residuos; más con las presiones de los mercados internacionales que cada día exigen a sus posibles socios y como requisito la denominada producción sostenible en todo el ciclo. De esta manera, surgen muchas líneas de investigación que buscan darle una solución concreta y viable a este tipo de residuos.

Dentro de la industria de la construcción el panorama no es diferente y existen fuertes presiones. El cemento Portland es un material de importancia estratégica a nivel mundial para el desarrollo social y humano (Frías et al., 2017); no obstante, es bien conocido que la industria cementera, como resultado de su proceso productivo, es culpada por liberar grandes cantidades de gases de efecto invernadero, donde se destaca el CO₂, generado en un valor superior a los 800 kg por cada tonelada de clinker que se produce (Hasanbeigi et al., 2010), representando de esta manera hasta el 8 % de la emisión antropogénica a nivel mundial (Benhelal et al., 2013). De igual forma, esta problemática obliga y condiciona al sector y a la comunidad investigativa a buscar alternativas o mecanismos que remedien o mitiguen la situación.

Considerando ambas problemáticas, una línea de investigación pretende aplicar el aprovechamiento de los residuos agroindustriales e industriales como materias primas de interés dentro del campo de los materiales de construcción, surgiendo de esta manera el concepto de sustitución parcial de la matriz de cemento y de manera derivada la sustitución parcial de la matriz por adiciones puzolánicas, todo enmarcado dentro de la teoría de economía circular.

Las puzolanas se definen como materiales siliciosos o silico-aluminosos amorfos que presentan un elevado potencial para reaccionar con el hidróxido de calcio productor durante los procesos de hidratación del cemento Portland, y el mismo es el encargado de generar el carácter básico del mismo (Mármol et al., 2013). Durante el proceso, ocurren una serie de reacciones donde se forman fases hidratadas similares a las obtenidas en la hidratación del cemento, favoreciendo el desempeño físico y mecánico del producto (Mejía et al., 2019). Adicionalmente, el uso de materiales puzolánicos representa una ventaja ambiental pues al reducir la cantidad de cemento utilizado se reduce la generación de CO₂ originado durante la producción de dicho cemento (Hesami et al., 2014). Esto, considerando las grandes cantidades de CO₂ liberadas a la atmósfera durante la producción de cemento, se torna sumamente importante y rescatable a nivel ambiental como forma de reducir el impacto generado.

Existen muchos materiales con características puzolánicas y muchos de ellos se obtienen a partir de residuos agroindustriales, como es el caso de la caña de azúcar y el bambú, entre otros. En este contexto, se destaca la cáscara de arroz, a partir de la cual se obtienen cenizas, que ya han sido usadas y estudiadas como sustitución parcial en compuestos de cemento. Actualmente se generan más de 100 millones de toneladas de cáscara de arroz, como subproducto de la industria arrocería (Wei y Meyer, 2016) y su disposición normalmente es inadecuada, lo que impacta negativamente al medio ambiente. Cuando se produce la ceniza de cáscara de arroz bajo condiciones controladas de temperatura se genera un material con elevado porcentaje de silicio amorfo, un material con gran desempeño puzolánico (Dias et al., 2017). Otra opción es el uso de residuos de la industria; en este sentido se destaca la industria de producción de carbón. Este sector productivo reporta una producción anual superior a los 7000 millones de toneladas (Statistical Review of World Energy, 2019) de las que entre el 10 % y 15 % pueden generarse como residuos de carbón, cuyo porcentaje varía considerando varios procesos industriales propios de su explotación (extracción, lavado, etc.).

Para activar las propiedades puzolánicas de estos residuos agroindustriales e industriales, los mismos deben ser sometidos a un tratamiento térmico con parámetros establecidos y controlados de temperatura (600 °C-800 °C) y tiempo de sometimiento, con lo cual se elimina el componente orgánico y el material pasa a exponer una composición química rica en sílice y alúmina (amorfos) que le otorga su desempeño puzolánico. Estudios alrededor del mundo ya mostraron las ventajas del aprovechamiento de los materiales puzolánicos a partir de residuos (Frías et al., 2015; Rodier et al., 2017); en ellos se expresa que su sustitución parcial por cemento acarrea una mejora en el desempeño mecánico y físico del material, además de reducir la absorción de agua por reducción del tamaño de poro del sistema poroso de la matriz, mejorar la interfaz fibra-matriz, reducir la alcalinidad de la matriz y permitir el incremento de la durabilidad de la fibra (Pereira et al., 2013).

Dentro de este contexto, en la investigación desarrollada por Mejía et al. (2019) trabajaron con matrices a base de cemento (C) con sustitución parcial por calcita, residuo de carbón activado (RCA) o ceniza de cáscara de arroz (CCA). Los autores utilizaron sustitución por calcita por ser una práctica común dentro de la industria de la construcción y RCA o CCA por ser materiales con características puzolánicas. Así, los autores informan que la materia prima base (residuo de carbón y cáscara de arroz) fue donada por empresa privada; paso seguido, se procedió a su tratamiento térmico para activación de las características puzolánicas por medio de horno de mufla con parámetros establecidos de 600 °C/2 h y seleccionados por mostrar buenos resultados dentro de la literatura consultada. Una vez fueron obtenidos los materiales de sustitución, se elaboraron especímenes de morteros con dimensiones de 4 cm x 4 cm x 16 cm y se sometieron a cura por inmersión en agua durante 7 y 60 días; a todas las formulaciones se les adicionaron 1350 g de arena estandarizada y se conservó una relación de agua/cemento de 0,5. Los autores evaluaron el desempeño mecánico en función de la resistencia a flexión y compresión de los especímenes a ambas edades con la finalidad de estudiar el comportamiento de las reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo pues, como lo informan, las reacciones puzolánicas suceden de forma progresiva. Las distintas formulaciones evaluadas por los autores pueden encontrarse en la tabla 7.3.

TABLA 7.3 *Composición de las formulaciones evaluadas*

Substitución	Formulación (% masa)			
	Cemento	Calcita	RCA	CCA
Formulación 1	100	0	0	0
Formulación 2	75	25	0	0
Formulación 3	75	0	25	0
Formulación 4	75	0	0	25

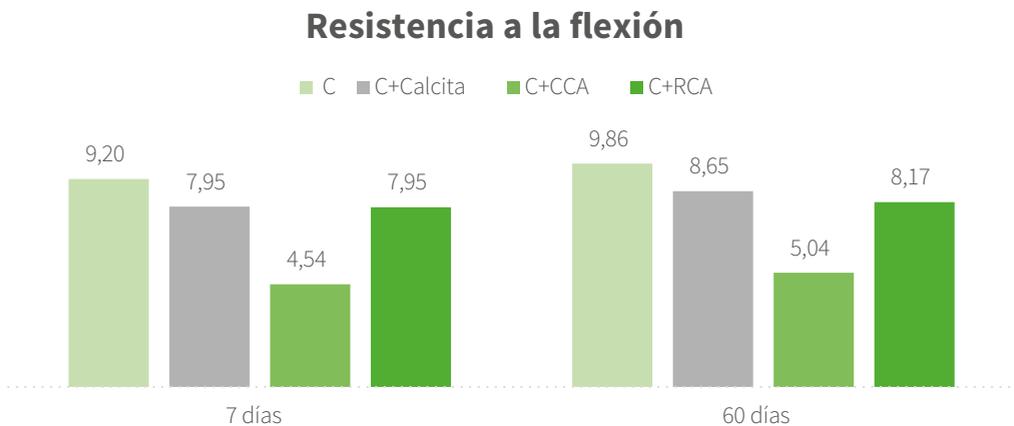
Fuente: Adaptado de Mejía et al. (2019)

A partir de los resultados expuestos por la investigación, al ser evaluada la resistencia a la flexión (figura 7.4) de los compuestos de cemento con y sin sustitución parcial a siete días de edad, fue identificada una reducción en los valores respecto de la formulación con 100 % cemento. Una vez evaluada la formulación después de 60 días de cura (figura 7.4), se observa para todos los casos un incremento en la resistencia a la flexión, en donde la formulación con 100 % cemento aún conserva el mejor desempeño. Al comparar las formulaciones con RCA y calcita, se observó un desempeño muy similar. Para el caso

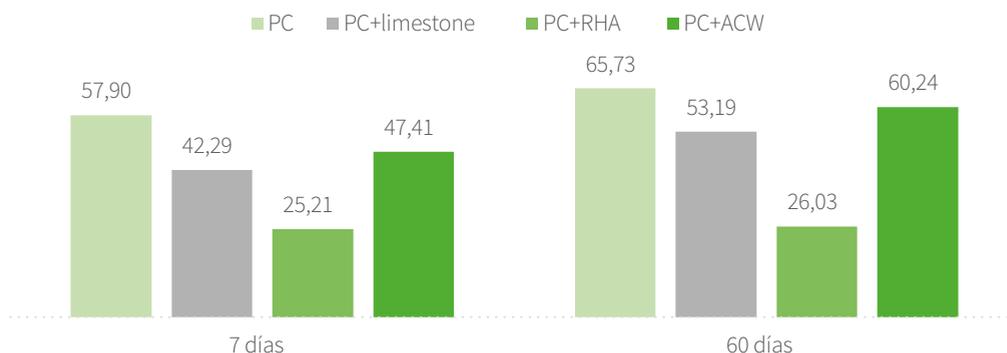
de la resistencia a la compresión (figura 7.4) a siete días de cura, la formulación con 100 % de cemento mostro el desempeño más destacable, seguido por la formulación con RCA y calcita, con una reducción de 18 % y 27 % respecto del desempeño del compuesto de 100 % cemento. Los especímenes ensayados a 60 días mostraron un incremento de resistencia a la compresión (figura 7.4) para todas las formulaciones evaluadas. Así, partiendo del desempeño de la formulación con 100 % cemento, se presentó una diferencia de aproximadamente 19 % y 8 % para las formulaciones con 25 % calcita y 25 % RCA respectivamente. Los autores destacaron que la formulación con RCA se mostró superior al ser comparada con los compuestos con calcita.

La investigación indica que los resultados encontrados son lógicos y consecuentes con otras publicaciones que utilizaron sustitución parcial por materiales puzolánicos. Los autores manifiestan que reducciones en el desempeño de la resistencia a compresión y flexión como resultado de la sustitución de cemento es un fenómeno esperado por el llamado efecto de dilución (Lawrence et al., 2003). De igual forma, para el comportamiento de las propiedades a la edad de 60 días, que mostraron una mejora en su desempeño, se daría como resultado de la continuidad de la hidratación del cemento y de las reacciones puzolánicas que toman parte. Los autores también destacan que ocurre la densificación de la matriz pues la portlandita es precipitada sobre los poros de la matriz reduciendo su tamaño.

FIGURA 7.4 Resultados de la resistencia a flexión y compresión para las formulaciones evaluadas con y sin sustitución parcial a 7 y 60 días



Resistencia a la compresión



Fuente: Adaptado de Mejía et al. (2019)

Se destaca que para aquellas formulaciones con 25 % de CCA, la reducción en los valores de resistencia a la flexión y compresión fue muy notoria, con un porcentaje de disminución de mínimo el 50 % tanto a siete días como a 60 días de cura. Los autores atribuyen este pobre desempeño de la sustitución por CCA al porcentaje utilizado, concluyendo que 25 % es un valor en exceso elevado, lo que dificulta los procesos de hidratación y compactación de la matriz pues la CCA posee una superficie específica muy elevada y, por tanto, una absorción de agua destacada que toma la mayor cantidad de agua del sistema.

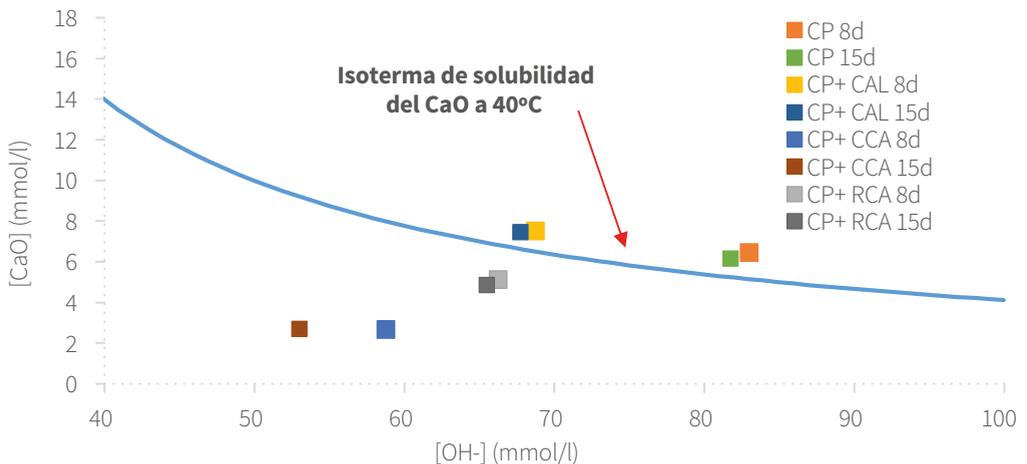
Para comprobar la capacidad de reacción del material de sustitución (caliza, RCA y CCA) con la portlandita, los autores aplicaron la metodología de Fratini a ocho y 15 días. Este ensayo permite la evaluación de la capacidad de reacción de un material con características puzolánicas con el hidróxido de calcio que es liberado durante el proceso de hidratación del cemento. Así mismo, se establece que esta metodología es diseñada para evaluar cementos puzolánicos. No obstante, como carácter orientativo, los autores aplicaron la metodología sobre las mezclas patrón y con sustitución parcial de calcita, que por constitución y literatura se establece que no poseen puzolanidad.

A partir de los resultados expuestos por la investigación y como puede observarse en la figura 7.5, se presenta la curva isoterma de solubilidad del CaO (óxido de calcio) y debajo de la misma se ubica el resultado para las sustituciones de cemento con CCA y RCA tanto para ocho como para 15 días. Considerando la definición del ensayo, que establece que un cemento es considerado puzolánico si su resultado, después de la valoración de los iones calcio e hidroxilo se encuentra por debajo de dicha curva, estas dos mezclas pueden catalogarse como de desempeño puzolánico. De forma general, los autores resaltan que las mezclas con CCA, mostraron ser más reactivas a la hora de

consumir $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y exhibir mayor disminución de la concentración de Ca^{2+} en comparación con las mezclas de RCA, lo cual puede tener su fundamento en el mayor contenido de sílice reactiva presente en el CCA (Antiohos et al., 2014). Como era de suponerse, tanto para el ensayo con 100 % de cemento como para la mezcla con sustitución de 25 % de calcita a ocho y 15 días, los resultados se ubicaron por encima de la curva, lo que indica que no presentan puzolanidad. Aunque estos resultados establecen un mejor desempeño puzolánico para la sustitución con CCA, los resultados mecánicos indicaron completamente lo contrario, lo cual, como fue expuesto por los autores, se debe a que 25 % de sustitución es un porcentaje excesivo de sustitución.

A partir de la investigación realizada por Mejía et al. (2019) se evidencia el potencial del uso de residuos tanto de la agroindustria como del sector industrial a modo de materiales con capacidad puzolánica y de sustitución parcial de materiales a base de cemento. La investigación de los autores evidenció que la sustitución reduce hasta cierto grado el desempeño mecánico del material cuando se compara con uno de 100 % cemento, pero esta reducción no es tan significativa como para que se convierta en una limitante del uso de la técnica. De igual forma, los autores indican que en la industria de materiales la sustitución por un porcentaje de calcita es una práctica aceptada y utilizada y, considerando que la sustitución por un mismo porcentaje de RCA permitió alcanzar un desempeño mecánico superior al ser comparado con los resultados determinados para la formulación con calcita, afirman la potencialidad de reincorporar residuos al sistema productivo de manera ambientalmente amigable y dentro de una economía circular.

FIGURA 7.5 Resultados del ensayo de Fratini para determinar la capacidad puzolánica de las formulaciones en estudio. CP: cemento, CAL: calcita, CCA: ceniza de cáscara de arroz, RCA: residuo de carbón activado



Fuente: Adaptado de Mejía et al. (2019)

7.7 REFERENCIAS

Almeida, A., Tonoli, G., Santos, S. y Savastano, H. (2013). Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cement and Concrete Composites*, 42, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.001>

Antiohos, S., Papadakis, V. y Tsimas, S. (2014). Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. *Cement and Concrete Research*, 61-62, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.04.001>

Ballesteros, J., Santos, S., Mármol, G., Savastano, H. y Fiorelli, J. (2015). Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 100, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.044>

Ballesteros, J., Dos Santos, V., Mármol, G., Frías, M. y Fiorelli, J. (2017). Potential of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-cement applications. *Cellulose*, 24(5), 2275-2286. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1253-6>

Ballesteros, J., Mármol, G., Filomeno, R., Rodier, L., Savastano, H. y Fiorelli, J. (2019). Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. *Construction and Building Materials*, 205, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.007>

Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E. y Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142-161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>

Chandel, A., ES, C., Rudravaram, R., Narasu, L., Rao, V. y Ravindra, P. (2007). Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. *Biotechnology and Molecular Biology Review*, 2(1), 14-32. [http://www.academicjournals.org/bmbr/PDF/pdf2007/Feb/Chandel et al.pdf](http://www.academicjournals.org/bmbr/PDF/pdf2007/Feb/Chandel%20et%20al.pdf)

Claramunt, J., Ardanuy, M. y García, J. (2010). Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers*, 79(1), 200-205. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.057>

Claramunt, J., Ardanuy, M., García, J. y Dias, R. (2011). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 586-595. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.003>

Claramunt, J., Fernández, L., Ventura, H. y Ardanuy, M. (2016). Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes. *Construction and Building Materials*, 115, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.044>

Correia, V., Santos, S. y Savastano, H. (2015). Effect of the Accelerated Carbonation in Fibercement Composites Reinforced with Eucalyptus Pulp and Nanofibrillated Cellulose. *Materials and Metallurgical Engineering*, 9(1), 7-10. <https://publications.waset.org/10000145/effect-of-the-accelerated-carbonation-in-fibercement-composites-reinforced-with-eucalyptus-pulp-and-nanofibrillated-cellulose>

Dias, D., Lapa, N., Bernardo, M., Godinho, D., Fonseca, I., Miranda, M. y Lemos, F. (2017). Properties of chars from the gasification and pyrolysis of rice waste streams towards their valorisation as adsorbent materials. *Waste Management*, 65, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.011>

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. y Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552-1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Fernandes, P., De Freitas, M., Cioffi, M., De Carvalho, K., Milanese, A., Voorwald, H. y Mulinari, D. (2015). Vegetal fibers in polymeric composites: A review. *Polimeros*, 25(1), 9-22. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1722>

Ferreira, S., Lima, P., Silva, F. y Toledo, R. (2012). Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with portland cement matrices. *Revista Materia*, 17(2), 1024-1034. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>

Ferreira, S., Lima, P., Silva, F. y Toledo, R. (2014). Effect of sisal fiber hornification on the fiber-matrix bonding characteristics and bending behavior of cement based composites. *Key Engineering Materials*, 600, 421-432. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.421>

Frías, M., Rodríguez, O. y Sánchez, M. (2015). Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials. A review. *Construction and Building Materials*, 74, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.007>

Frías, M., Rodríguez, O., Sánchez, M., Villar, E., Rodrigues, M. y Savastano, H. (2017). Advances on the development of ternary cements elaborated with biomass ashes coming from different activation process. *Construction and Building Materials*, 136, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.018>

Gadioli, R., Morais, J., Waldman, W. y De Paoli, M. (2014). The role of lignin in polypropylene composites with semi-bleached cellulose fibers: Mechanical properties and its activity as antioxidant. *Polymer Degradation and Stability*, 108, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.06.005>

Gordobil, O., Egúés, I. y Labidi, J. (2016). Modification of Eucalyptus and Spruce organosolv lignins with fatty acids to use as filler in PLA. *Reactive and Functional Polymers*, 104, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.05.002>

Hasanbeigi, A., Menke, C. y Price, L. (2010). The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1509-1518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.005>

Hesami, S., Ahmadi, S. y Nematzadeh, M. (2014). Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 53, 680-691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070>

Ishizaki, M., Visconte, L., Furtado, C., Leite, M. y Leblanc, J. (2006). Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: Influência do teor de fibra e das condições de mistura. *Polimeros*, 16(3), 182-186. <https://doi.org/10.1590/s0104-14282006000300006>

Jamshidi, M. y Ramezani-pour, A. (2011). Laboratory and industrial investigations on hybrid of acrylic and glass short fibers as an alternative for substituting asbestos in Hatschek process. *Construction and Building Materials*, 25(1), 298-302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.026>

Jarabo, R., Fuente, E., Monte, M., Savastano, H., Mutjé, P. y Negro, C. (2012). Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production. Effect on flocculation, retention, drainage and product properties. *Industrial Crops and Products*, 39(1), 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.017>

Jeronimo, C. y Silva, G. O. (2013). Estudo De Alternativas Para O Aproveitamento De Resíduos Sólidos Da Industrialização Do Coco. *Revista Monografias Ambientais*, 10(10), 2193-2208. <https://doi.org/10.5902/223613086935>

John, M. y Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343-364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>

Köhnke, T., Lund, K., Brelid, H. y Westman, G. (2010). Kraft pulp hornification: A closer look at the preventive effect gained by glucuronoxylan adsorption. *Carbohydrate Polymers*, 81(2), 226-233. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.02.023>

Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A. y Bras, J. (2012). Microfibrillated cellulose - Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate Polymers*, 90(2), 735-764. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.026>

Lawrence, P., Cyr, M. y Ringot, E. (2003). Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. *Cement and Concrete Research*, 33(12), 1939-1947. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00183-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00183-2)

Luna, P., Lizarazo, J. y Mariño, A. (2016). Guadua angustifolia bamboo fibers as reinforcement of polymeric matrices: An exploratory study. *Construction and Building Materials*, 116, 93-97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.139>

Mármol, G., Santos, S., Savastano, H., Borrachero, M., Monzó, J. y Payá, J. (2013). Mechanical and physical performance of low alkalinity cementitious composites reinforced with recycled cellulosic fibres pulp from cement kraft bags. *Industrial Crops and Products*, 49, 422-427. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.051>

Mejía, J., Savastano, H., Fiorelli, J. y Rojas, M. (2019). Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications. *Cement and Concrete Composites*, 98, 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.001>

Mohr, B., Nanko, H. y Kurtis, K. (2005). Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 435-448. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006>

Morton, J., Cooke, T. y Akers, S. (2010). Performance of slash pine fibers in fiber cement products. *Construction and Building Materials*, 24(2), 165-170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.015>

Pereira, C., Savastano, H., Payá, J., Santos, S., Borrachero, M., Monzó, J. y Soriano, L. (2013). Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber. *Industrial Crops and Products*, 49, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.038>

Rodier, L., Bilba, K., Onésippe, C. y Arsène, M. (2017). Study of pozzolanic activity of bamboo stem ashes for use as partial replacement of cement. *Materials and Structures*, 50(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0958-6>

Sanchez, E., Cavani, C., Leal, C. y Sanchez, C. (2010). Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades Unsaturation polyester resin composite with sugar cane bagasse: influence of treatment on the fibers properties *Polímeros, ciência e tecnologia*, 20(3), 194-200. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000034>

Siqueira, G., Bras, J. y Dufresne, A. (2010). Cellulosic bionanocomposites: A review of preparation, properties and applications. *Polymers*, 2(4), 728-765. <https://doi.org/10.3390/polym2040728>

Spinacé, M., Janeiro, L., Bernardino, F., Grossi, T. y De Paoli, M. (2011). Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: Sisal vs. curauá. *Polímeros*, 21(3), 168-174. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000036>

Statistical Review of World Energy (2019). *BP Statistical Review of World Energy June 2017*. <http://oilproduction.net/files/especial-BP/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>

Ten, E. y Vermerris, W. (2015). Recent developments in polymers derived from industrial lignin. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(24), 1-13. <https://doi.org/10.1002/app.42069>

Tian, H. y Zhang, Y. (2016). The influence of bagasse fibre and fly ash on the long-term properties of green cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 111, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.103>

Wei, J. y Meyer, C. (2016). Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber. *Cement and Concrete Research*, 81, 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.12.001>

Zeng, Y., Zhao, S., Yang, S. y Ding, S. (2014). Lignin plays a negative role in the biochemical process for producing lignocellulosic biofuels. *Current Opinion in Biotechnology*, 27, 98-45. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.008>



ANEXOS



ANEXO 1. Requisitos específicos fertilizantes y abonos orgánicos. Norma técnica colombiana 5167 de ICONTEC

Fertilizantes o abonos orgánicos, orgánico-minerales y enmiendas orgánicas													
Fertilizantes o abonos orgánicos													
Clasificación del producto	Indicaciones relacionadas con la obtención y los componentes principales												
Abono orgánico	<p>Producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos de animales, vegetales o residuos sólidos urbanos (separados en la fuente) o mezcla de los anteriores, que contienen porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total y los parámetros que se indican.</p>												
Parámetros para garantizar (en base humedad)	<p>Parámetros para caracterizar</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pérdidas por volatilización % * • Contenido de cenizas máximo 60 %* • Contenido de humedad: * <p>Para materiales de origen animal, máximo de 20 % Para materiales de origen vegetal, máximo 35 % Para mezclas, el contenido de humedad estará dado por el origen del material predominante.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Contenido de carbono orgánico oxidable total mínimo 15 % • N, P2O5 Y K2O totales (declarados si cada uno es mayor de 1 %) • Relación C/N • Capacidad de intercambio catiónico, mínimo 30 cmo (+)kg (meq/100g) • Capacidad de retención de humedad, mínimo su propio peso • PH mayor que 4 y menor que 9 • Densidad máximo 0,6 g/cm³. • Límites máximos en mg/ kg (ppm) de los metales pesados expresados a continuación: <table border="0"> <tr> <td>Arsénico (As)</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td>Cadmio (Cd)</td> <td>39</td> </tr> <tr> <td>Cromo (Cr)</td> <td>1200</td> </tr> <tr> <td>Mercurio (Hg)</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>Níquel (Ni)</td> <td>420</td> </tr> <tr> <td>Plomo (Pb)</td> <td>300</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Se indicará la materia prima de la cual procede el producto. <p>*La suma de estos parámetros debe ser 100</p>	Arsénico (As)	41	Cadmio (Cd)	39	Cromo (Cr)	1200	Mercurio (Hg)	17	Níquel (Ni)	420	Plomo (Pb)	300
Arsénico (As)	41												
Cadmio (Cd)	39												
Cromo (Cr)	1200												
Mercurio (Hg)	17												
Níquel (Ni)	420												
Plomo (Pb)	300												
Parámetros para garantizar (en base humedad)	<p>Contenido de carbono orgánico oxidable total (% C) Humedad máxima (%) Contenido de cenizas (%) Capacidad de intercambio catiónico (cmo)(+)(kg⁻¹) (meq/100gr) Capacidad de retención de humedad (%) pH Contenido de nitrógeno total (% N) Densidad (g/cm³)</p>												

ANEXO 2. Requisitos específicos fertilizantes o abonos orgánico-minerales. Norma técnica colombiana 5167 de ICONTEC

Fertilizantes o abonos orgánico-minerales			
Clasificación del producto	Indicaciones relacionadas con la obtención y los componentes principales	Parámetros para caracterizar	Parámetros para garantizar (en base humedad)
Abono orgánico Mineral sólido	Producto sólido obtenido por mezcla o combinación de abonos minerales y orgánicos de origen animal, vegetal, pedogenético (geológico) o provenientes de lodos de tratamiento de aguas residuales que contiene porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total y de los parámetros que se indican	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdidas por volatilización % * • Contenido de cenizas % * • Contenido de humedad máximo 15 % * • Contenido de carbono orgánico oxidable total mayor de 5 % y menor de 15 % • N, P₂O₅ Y K₂O Cao, MgO, elementos menores, reportan si la riqueza total de cada elemento mínimo es 2 % • La suma de los elementos para reportar debe ser mínimo 10 % • Densidad, reportar • pH, reportar • Residuo insoluble en ácido máximo 50 % del contenido de cenizas • Contenido de sodio, reportar • Conductividad eléctrica, reportar • Límites máximos en mg/kg (ppm) de los metales pesados expresados a continuación (solo para productos de mezcla con residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales): <p style="margin-left: 40px;">Arsénico (As) 41 Cadmio (Cd) 39 Cromo (Cr) 1200 Mercurio (Hg) 17 Níquel (Ni) 420 Plomo (Pb) 300</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se indicará la materia prima de la cual procede el producto <p>*La suma de estos parámetros debe ser 100</p>	<p>Contenido de carbono orgánico oxidable total (% C)</p> <p>Humedad máxima (%)</p> <p>Contenido total de nitrógeno (%Nt)</p> <p>El nitrógeno se expresará en forma orgánica y mineral N org N-NH₄ + y N-NO₃</p> <p>Contenido de potasio total (K₂O)</p> <p>Contenido de potasio soluble (%K₂O)</p> <p>Contenido de fósforo total (%P₂O₅)</p> <p>Contenido de fósforo soluble(%P₂O₅)</p> <p>CONTENIDO DE CALCIO (%CaO)</p> <p>Contenido de magnesio (%MgO)</p> <p>Contenido de elementos menores (%)</p> <p>Densidad (g/cm³)</p> <p>Contenidos de metales pesados (mg/kg) (ppm) Residuo insoluble (%)</p>

ANEXO 3. Requisitos específicos enmiendas orgánico húmicas y orgánico no húmicas. Norma técnica colombiana 5167 de ICONTEC

Enmiendas orgánicas															
Clasificación del producto	Indicaciones relacionadas con la obtención y los componentes principales	Parámetros para caracterizar	Parámetros para garantizar												
Enmienda húmica sólida	Producto orgánico sólido de origen pedogenético o geológico con o sin tratamiento químico que aplicado al suelo aporta o genera humus mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo y que cumple las especificaciones que se indican	<ul style="list-style-type: none"> • Si el producto no tiene tratamiento químico debe ser insoluble en agua y su disolución en medio alcalino debe ser mínimo el 50 % en el peso. • Si el producto tiene tratamiento químico debe ser soluble en agua y la disolución en agua debe desarrollar pH alcalino • Contenido de carbono orgánico oxidable total, mínimo 30 % • Extracto húmico total expresado como carbono (carbono total soluble en medio alcalino). • Mínimo 30 % del carbono orgánico oxidable total - Carbono de ácidos húmicos. Mínimo el 60 % del carbono del extracto húmico total. • Nitrógeno orgánico, reportar (%) • Humedad máxima: 20 % • Granulometría: tamaño de partícula, reportar • Indicar el origen del cuál procede el producto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Carbono orgánico oxidable total (% C) • Carbono del extracto húmico total % CEHT • Carbono de ácidos húmicos % CAH • (%CAH/%CEHT) *100 > %60 • Humedad máxima % • Solubilidad en medio alcalino % 												
Enmienda no húmica	Producto orgánico sólido obtenido a partir de la deshidratación y estabilización de los residuos provenientes de las plantas industriales y de tratamiento de: a) aguas residuales industriales y urbanas b) residuos sólidos urbanos separados en la fuente	<ul style="list-style-type: none"> • Si el producto se disuelve en agua su disolución no debe desarrollar pH alcalino • Contenido de carbono orgánico oxidable total, mínimo 15 % • Capacidad de intercambio catiónico mínimo 30 cmol (+) kg^{-1} (meq/100 gr) • Conductividad eléctrica, declararla • Contenido de sodio soluble (declararlo, restricciones de uso) <p>Límites máximos en mg/ kg (ppm) de metales pesados en base seca:</p> <table border="0"> <tr> <td>Arsénico (As)</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td>Cadmio (Cd)</td> <td>39</td> </tr> <tr> <td>Cromo (Cr)</td> <td>1200</td> </tr> <tr> <td>Mercurio (Hg)</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>Níquel (Ni)</td> <td>420</td> </tr> <tr> <td>Plomo (Pb)</td> <td>300</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Se indicará la materia prima de la cuál procede el producto. 	Arsénico (As)	41	Cadmio (Cd)	39	Cromo (Cr)	1200	Mercurio (Hg)	17	Níquel (Ni)	420	Plomo (Pb)	300	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de carbono orgánico oxidable total % C • Capacidad de intercambio catiónico cmol (+) kg^{-1} (meq/100 gr) • Contenido de metales pesados mg/kg
Arsénico (As)	41														
Cadmio (Cd)	39														
Cromo (Cr)	1200														
Mercurio (Hg)	17														
Níquel (Ni)	420														
Plomo (Pb)	300														





UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)

Sede Nacional José Celestino Mutis
Calle 14 Sur 14-23
PBX: 344 37 00 - 344 41 20
Bogotá, D.C., Colombia

www.unad.edu.co

