

1 SECCIÓN: Recursos Naturales.

2 <https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2024.05.05>

3 Artículo

4
5 **Diversidad de la macrofauna edáfica en sistemas agroforestales con *Theobroma cacao***
6 **en Córdoba, Colombia**
7

8
9 Camilo Sierra-Arroyo¹

10 Judith Martínez-Atencia*²

11 Juan Linares-Arias¹

12 Jeyson Garrido-Pineda²

13 José Contreras-Santos²

14
15
16 ¹Universidad de Córdoba, Departamento de Biología, Carrera 6 núm. 76-103, Montería,
17 Colombia.

18 ²Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, km 13, Vía
19 Montería – Cereté.

20
21
22 *Corresponding author: jcmartinez@agrosavia.co ORCID ID: 0000-0003-0492-2486

23
24 **Resumen**

25 Las prácticas agrícolas ejercen presiones ambientales que comprometen las condiciones
26 fisicoquímicas del suelo y, por ende, su sostenibilidad. Esto provoca variaciones en la
27 diversidad de la macrofauna edáfica y sus funciones ecosistémicas. Ante esta situación,
28 surgen alternativas como los sistemas agroforestales (SAF), que buscan mejorar las
29 propiedades edafoclimáticas. En Córdoba, Colombia, se desconoce la sostenibilidad del
30 suelo de los SAF y la diversidad que albergan. Evaluar la diversidad de la macrofauna
31 edáfica en sistemas agroforestales con cacao en el municipio de Tierralta, Córdoba. Se
32 realizaron muestreos en nueve fincas productoras de cacao en el área de estudio. La
33 macrofauna edáfica se obtuvo mediante la metodología TSBF (Tropical Soil Biology and
34 Fertility), colectando un total de 1 006 individuos, clasificados en tres phyla, 10 clases y 19
35 órdenes. Se estimó la diversidad alfa y beta, y se describieron los grupos funcionales
36 presentes. Se encontró una alta diversidad de macroinvertebrados edáficos en los sistemas
37 agroforestales de cacao con 19 órdenes identificados. La presencia de detritívoros e
38 ingenieros del suelo sugiere una regeneración y estructuración positiva del suelo. Grupos
39 dominantes como Opisthoptera, Polydesmida, Hymenoptera y Blattodea contrastan con
40 órdenes “raros” indicativos de condiciones específicas del suelo. Esto evidencia el potencial
41 de los sistemas agroforestales de cacao para albergar una diversidad significativa de
42 macrofauna edáfica, contribuyendo a la sostenibilidad del suelo en la región.

43 **Palabras clave:** Agroecosistemas, cacao, diversidad, macrofauna, suelo.

44

45 **Abstract**

46 **Keywords:** Agroecosystems, cocoa, diversity, macrofauna, soil.

47 **Fecha de recibido:** Noviembre 20, 2024

48 **Fecha de aceptado:** Marzo 14, 2025

49

50

51

Introducción

52

54 El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre, definido como un ente natural,
55 organizado e independiente. Sus propiedades y su formación resultan de la acción de
56 factores activos como el clima, los organismos, el relieve y el tiempo sobre el material de
57 origen (López, 2006; Schoonover & Crim, 2015). Este recurso enfrenta diversas presiones
58 sobre su calidad y salud, principalmente debido a prácticas humanas. Entre ellas se
59 incluyen la deforestación, la producción agrícola, la ganadería extensiva, la fragmentación
60 del hábitat, la urbanización y el uso de pesticidas en la agricultura, entre otros. Todas estas
61 prácticas ponen en riesgo la sostenibilidad del suelo como recurso no renovable y
62 comprometen su calidad (Martínez et al., 2019). Es por esto por lo que en la actualidad se
63 han optado por prácticas de manejo del suelo que representen una alternativa
64 ecológicamente sostenible con el ambiente, y que reduzcan el impacto sobre el medio
65 edáfico, entre ellos los sistemas agroforestales (SAF) que son prácticas de uso de la tierra
66 que combinan cultivos agrícolas con árboles en la misma unidad de producción,
67 proporcionando beneficios ecológicos y económicos (Anchundia et al., 2018; François et
68 al., 2023).

69 La eficiencia de los SAF se refleja en la mejora de los procesos edáficos, abarcando
70 aspectos físicos, químicos y biológicos (Suárez et al., 2015). Por lo que la mayoría de las
71 investigaciones sobre la calidad de suelos, principalmente, han evaluado parámetros físicos
72 y químicos que permiten hacer comparaciones entre usos de la tierra, sistemas de cultivo,
73 prácticas culturales o niveles de recuperación del suelo (Koutika et al., 2005; Rousseau et
74 al., 2010; Saviozzi et al., 2001). Uno de los métodos para el monitoreo de la calidad de
75 suelo corresponde al análisis de la diversidad de la macrofauna asociada al ecosistema de
76 suelo, como una comunidad bioindicador del mejoramiento de los procesos ecosistémicos.
77 Debido a que esta comunidad juega un rol funcional importante al contribuir con procesos
78 biológicos y ecológicos, como la descomposición de la materia orgánica, la ciclación de
79 nutrientes, la aireación y la formación de estructuras estables del suelo (Arias, 2021;
80 Cabrera et al., 2011). Posibilitando la comprensión precisa del nivel de degradación o
81 mejora que puede experimentar en diferentes sistemas agropecuarios. También, facilitando
82 la toma de decisiones y la selección de prácticas de gestión sostenible que deben
83 implementarse (Contreras et al., 2023).

84 En el departamento de Córdoba, el área cultivada con cacao abarca aproximadamente 3 261
85 hectáreas (AGRONET, 2023). Sin embargo, las proyecciones indican un incremento
86 significativo, impulsado por el apoyo del gobierno nacional y local en sus políticas de
87 sustitución de cultivos ilícitos y pacificación del territorio. En la zona sur de Córdoba,
88 específicamente en los municipios de Tierralta y Valencia, se encuentran sistemas
89 agroforestales autóctonos cultivados con la especie *Theobroma cacao* L., que en su mayoría
90 son sistemas productivos que se establecieron sin lineamientos técnicos y que producen
91 distintas variedades de cacao (MADR, 2022).

92 Dado que el uso del suelo impacta aspectos ecológicos como la composición, estructura,
93 diversidad taxonómica y funcional de las comunidades edáficas, estas se vuelven altamente
94 sensibles a los cambios generados a partir del mismo (Ramírez, 2000; Salas, 1982; Suárez
95 et al., 2015). Como resultado, las especies, ante estas variaciones ambientales o
96 ecosistémicas, desarrollan valores de diversidad y roles funcionales que les permiten
97 reaccionar de manera eficaz y ajustarse al ambiente cambiante (Córdova & Zambrano,
98 2015). Frente a este componente agroecológico que alberga el departamento, no existen
99 estudios realizados sobre el monitoreo de la calidad de suelos que logren evidenciar el
100 mejoramiento de las propiedades que determinan la calidad a partir de su establecimiento.
101 Por otro lado, se desconoce la diversidad de macroinvertebrados edáficos que se asocian a
102 estos agroecosistemas productivos debido a que la mayor parte de los estudios realizados se
103 centran en el monitoreo de áreas naturales como relictos de bosques o zonas protegidas,
104 dejando por un lado la diversidad encontrada en los agroecosistemas. En este sentido se
105 busca conocer ¿Cuál es la diversidad taxonómica y funcional de la macrofauna edáfica
106 asociada a sistemas agroforestales con *T. cacao* en el municipio de Tierralta, Córdoba?
107 Además, ¿Cómo se relacionan algunas propiedades fisicoquímicas del suelo de sistemas
108 agroforestales con *T. cacao* con la diversidad de la macrofauna edáfica en dicho municipio?

109 Dado que el departamento de Córdoba contribuye en gran porcentaje a la producción
110 nacional del componente agrícola y pecuario (Ballesteros-Correa et al., 2019; Vilorio,
111 2007). Y los SAF con cacao son sistemas productivos sostenibles que mantienen la
112 cobertura vegetal continua, la diversificación de la producción y el ciclo eficaz de
113 nutrientes. Es necesario estudiar estos sistemas de producción y las relaciones que guardan
114 con la conservación de la biodiversidad del departamento. Fundamentalmente conociendo

115 las comunidades edáficas que se encuentran en los sistemas de producción del
116 departamento como un indicador de la calidad del suelo, debido a que juegan un papel
117 importante en la regulación de procesos (ciclado de nutrientes, regulación de la materia
118 orgánica, mineralización, modificación de la estructura del suelo y los regímenes hídricos)
119 esenciales para el correcto funcionamiento de los ecosistemas naturales (Lavelle et al.,
120 2022).

121 Comprender el funcionamiento del suelo y los efectos de las prácticas agrícolas es crucial
122 para desarrollar sistemas de producción sostenibles que promuevan la conservación,
123 rehabilitación y mantenimiento de la biodiversidad y funcionalidad del ecosistema. Esta
124 información no solo ofrece opciones económicas viables para la toma de decisiones a corto,
125 mediano y largo plazo, sino que también es fundamental en contextos de restauración y
126 rehabilitación del suelo (Contreras et al., 2023). Al comprender cómo la actividad agrícola
127 impacta en la biodiversidad del suelo, se identifican prácticas de manejo sostenibles que
128 promuevan la conservación de la macrofauna edáfica y, por ende, mejoren la salud del
129 suelo y la productividad agrícola en la región. Por tanto, este estudio evaluó la diversidad
130 taxonómica y funcional de la macrofauna edáfica en sistemas agroforestales con cacao (*T.*
131 *cacao*) en el municipio de Tierralta, Córdoba, Colombia.

132

133

134

Materiales y Métodos

135

136

137

Enfoque y naturaleza de la investigación

138

139

140 Este estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo, con un diseño de investigación
141 descriptivo y correlacional. El objetivo principal es evaluar la diversidad de la macrofauna
142 edáfica en sistemas agroforestales con cacao en el municipio de Tierralta, Córdoba,

143 Colombia y su relación con las propiedades fisicoquímicas del suelo. La investigación se
144 basa en la recolección y análisis de datos de campo, utilizando metodologías estandarizadas
145 para la evaluación de la macrofauna y las propiedades del suelo.

146

147

148

Área de estudio

149

150

151 El estudio se realizó en nueve fincas productoras de cacao bajo sistemas agroforestales,
152 ubicadas en una zona de piedemonte dentro del municipio de Tierralta, Córdoba, Colombia.
153 Dicho municipio se encuentra en la parte suroccidental del departamento de Córdoba, con
154 coordenadas de (8° 10' 00" N y 76° 04' 00" W), y una altitud promedio de 384 msnm,
155 alcanzando altitudes máximas de 2 610 msnm en su zona al norte (Figura 1).

156 En el área de estudio, el régimen de lluvias es significativamente alto, con volúmenes que
157 alcanzan hasta 4 000 mm anuales, especialmente en las zonas colindantes con la cordillera.

158 El patrón de lluvias se caracteriza por una época seca de diciembre a marzo, seguida de un
159 aumento progresivo de las precipitaciones a partir de abril, alcanzando su máximo en julio,
160 agosto y septiembre, y decreciendo a finales de año (Alcaldía de Tierralta 2020; IDEAM,
161 2024).

162

163

164

Metodología de campo

165

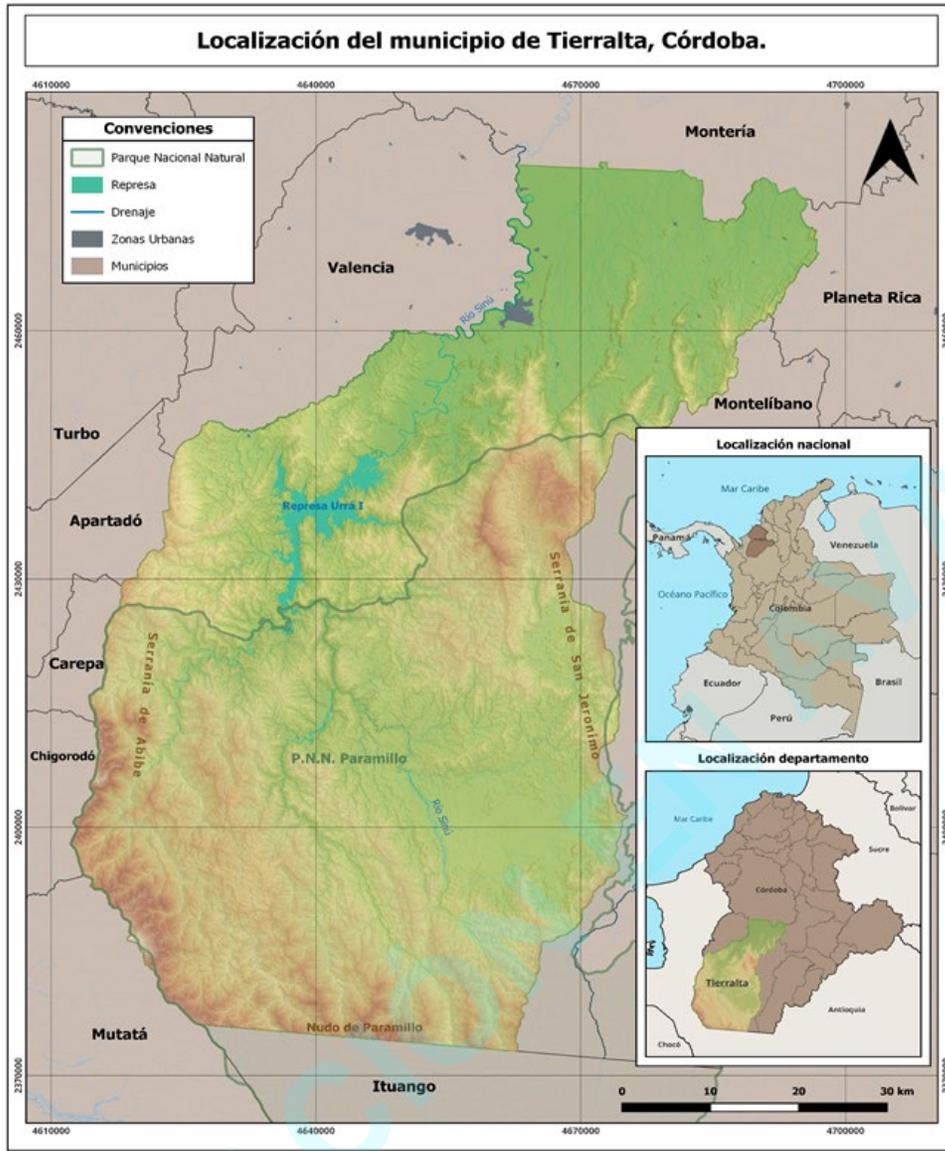
166

167 La delimitación del área de muestreo se realizó marcando tres monolitos en cada finca,
168 separados a una distancia de 10 m entre sí a lo largo de un transecto lineal con un origen al
169 azar asociado a la topografía del área. Se obtuvieron un total de seis muestras por finca,

170 discriminadas por dos profundidades. Los muestreos se desarrollaron en dos periodos
171 contrastantes: en la época de alta precipitación (octubre de 2023) y en la época de baja
172 precipitación (abril de 2024).

173 La colecta de macroinvertebrados del suelo se realizó por medio de la metodología de
174 Anderson e Ingram (1993), adaptada para utilizar un monolito de 20 cm² y discriminar
175 entre dos estratos de suelo (0-5 y 5-20 cm). Cada monolito se examinó manualmente para
176 colectar los organismos presentes, utilizando bandejas y pinzas entomológicas. Los
177 especímenes se almacenaron en alcohol al 70 %, excepto las lombrices de tierra, que se
178 contaron y liberaron *in situ*.

179 **Figura 1.** Ubicación geográfica del municipio de Tierralta, Córdoba, Colombia



180

181 **Fuente:** Elaboración propia.

182

183

184 **Metodología de Laboratorio**

185

186

187 Las muestras recolectadas en el campo se transportaron y almacenaron en la red de
188 laboratorios del centro de investigación Turipaná, donde se procesaron según
189 procedimientos establecidos. Los organismos recolectados fueron examinados y
190 clasificados hasta el nivel de orden utilizando la información disponible en la bibliografía
191 (Triplehorn et al., 2005; SEA, 2017) y corroborando su nivel taxonómico actualizado con
192 ayuda de (ITIS, 2024). Se registraron sus abundancias en tablas diseñadas para la
193 recolección de datos. Además, se catalogaron según su grupo funcional de acuerdo con el
194 tipo de alimentación y rol dentro del ecosistema de suelo.

195

196

197

Análisis de datos

198

199

200 Se estimó la completitud del muestreo mediante curvas de interpolación/extrapolaciones
201 basadas en el tamaño de la muestra, permitiendo comparaciones estadísticas de la riqueza
202 de especies en diferentes tamaños de muestra (Chao & Jost, 2012). La diversidad alfa, se
203 calculó utilizando índices de diversidad verdadera (números de “Hill”), analizando la
204 riqueza de especies (q_0), la diversidad ponderada por abundancia relativa (q_1) y la
205 diversidad centrada en las especies más abundantes (q_2) (Jost, 2006; Chao et al., 2014). La
206 diversidad β se calculó mediante el índice de similaridad de Jaccard en el programa Infostat
207 (Di Rienzo et al., 2010). La macrofauna se agrupó en cuatro gremios funcionales:
208 ingenieros del suelo, detritívoros, omnívoros y depredadores, analizando su densidad y rol
209 ecológico en el suelo (Lavelle, 1997; Zerbino et al., 2008; Cabrera et al., 2011).

210

211

212

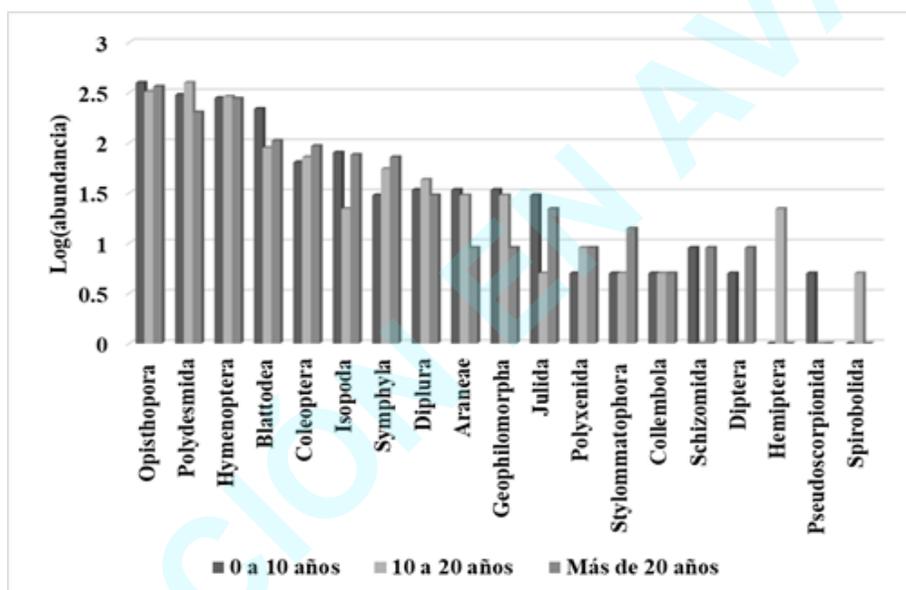
Resultados

213

214

215 En el área de estudio se recolectaron un total de 1 006 macroinvertebrados edáficos,
 216 distribuidos en 3 phyla, 10 clases y 19 órdenes (Cuadro 1). El 76.9 % de la abundancia total
 217 de macroinvertebrados de suelo estuvo representada por cuatro órdenes: Opisthoptera (25.7
 218 %), Polydesmida (21.4 %), Hymenoptera (20.1 %) y Blattodea (9.7 %). El 23.1 % total de
 219 la abundancia quedó representada en menor proporción por los órdenes Coleoptera,
 220 Isopoda, Symphyla, Diplura, Geophilomorpha, Araneae, Julida, Hemiptera, Polyxenida,
 221 Stylommatophora, Schizomida, Diptera, Collembola, Pseudoscorpionida y Spirobolida
 222 (Figura 2).

223 **Figura 2.** Densidad de la macrofauna edáfica por rango de edades de las fincas productoras
 224 de *T. cacao* bajo sistemas agroforestales.



225

226 **Cuadro 1.** Diversidad taxonómica (Phyllum, clase y orden) y densidad (ind·m²) de
 227 macrofauna edáfica por rango de edades de las fincas productoras de *T. cacao* bajo SAF.

Macrofauna edáfica			Rango de edades de los SAF		
Phyllum	Clase	Orden	0 a 10 años	10 a 20 años	Más de 20 años
Clitellata	Anélida	Opisthoptera	396	321	363
Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	279	288	275
		Diptera	4	0	8

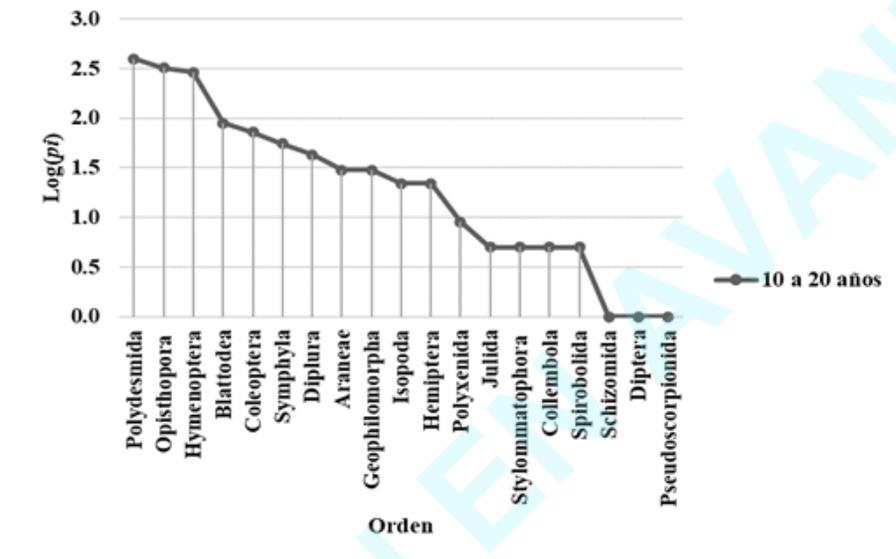
		Blattodea	217	88	104
		Hemiptera	0	21	0
		Coleoptera	63	71	92
	Euchelicerata	Araneae	33	29	8
		Schizomida	8	0	8
		Pseudoscorpionida	4	0	0
	Crustacea	Isopoda	79	21	75
	Chilopoda	Geophilomorpha	33	29	8
	Symphyla	Symphyla	29	54	71
	Diplopoda	Julida	29	4	21
		Polydesmida	300	396	200
		Polyxenida	4	8	8
		Spirobolida	0	4	0
	Diplura	Diplura	33	42	29
	Collembola	Collembola	4	4	4
Mollusca	Gastropoda	Stylommatophora	4	4	13
	Total		1519	1384	1287
	q0		16	16	17
	q1		7.2	7.9	7.8

228

229 La estructura ecológica de la macrofauna edáfica varía según el tiempo de establecimiento
 230 del sistema agroforestal (SAF). Las fincas dentro del grupo de edad de cero a 10 años
 231 muestran una marcada dominancia de los taxones Opisthoptera, Polydesmida, Hymenoptera
 232 y Blattodea, en comparación con los taxones considerados raros como Pseudoescorpionida,

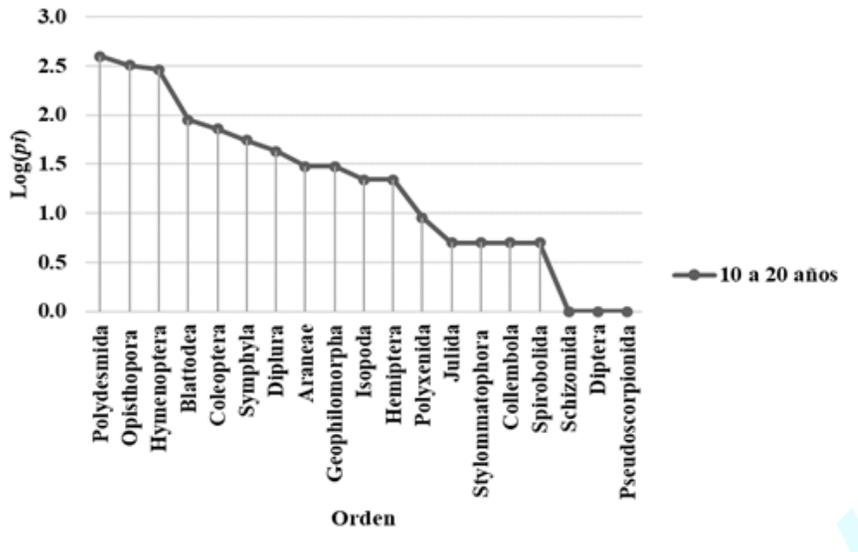
233 Hemiptera y Spirobolida. La pendiente observada en las Figuras 3 y 4 demuestra que, en
234 estos sitios de muestreo, la comunidad es dominada por pocos taxones, resultando en la
235 existencia de muchos taxones raros.

236 **Figura 3.** Rango de abundancia de la macrofauna edáfica en SAF con 0 a 10 años de
237 establecimiento.



238 Por otro lado, las fincas con SAF de 10 a 20 años de establecimiento presentan una
239 dominancia similar de taxones, con el reemplazo de Polydesmida como el grupo con mayor
240 dominancia en estos sitios de muestreo (Figura 4). La tendencia de la curva muestra una
241 mayor dominancia de los órdenes Diplura, Araneae, Geophilomorpha e Isopoda en
242 comparación con los SAF con menor tiempo de establecimiento.

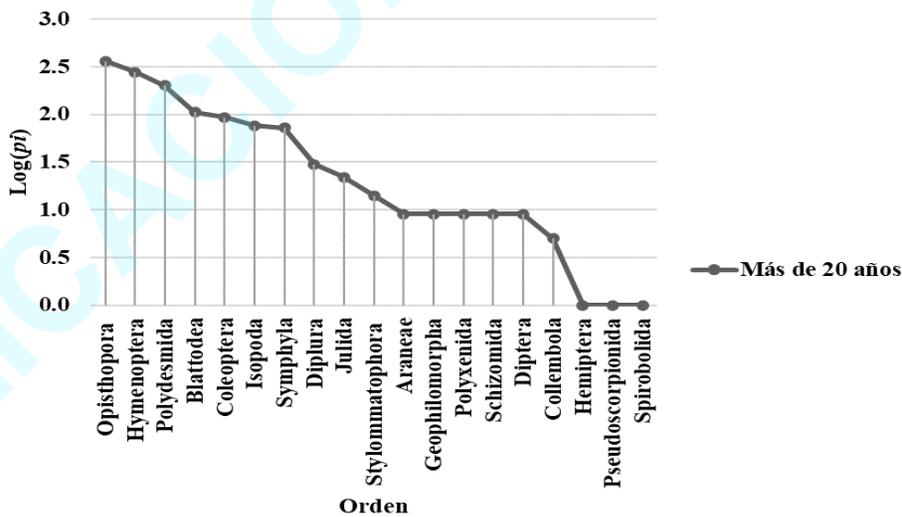
243 **Figura 4.** Rango abundancia de la macrofauna edáfica en SAF con 10 a 20 años de
244 establecimiento.



245

246 El comportamiento en los SAF con mayor tiempo de establecimiento contrasta con los
 247 demás SAF. Aunque los taxones dominantes Opisthoptera, Polydesmida, Hymenoptera y
 248 Blattodea se mantienen para todos los sitios de muestreo, en estos SAF se evidencia una
 249 pendiente menos pronunciada entre algunos taxones como Araneae, Geophilomorpha,
 250 Polyxenida, Schizomida y Diptera (Figura 5).

251 **Figura 5.** Rango de abundancia de la macrofauna edáfica en SAF con más de 20 años de
 252 establecimiento.



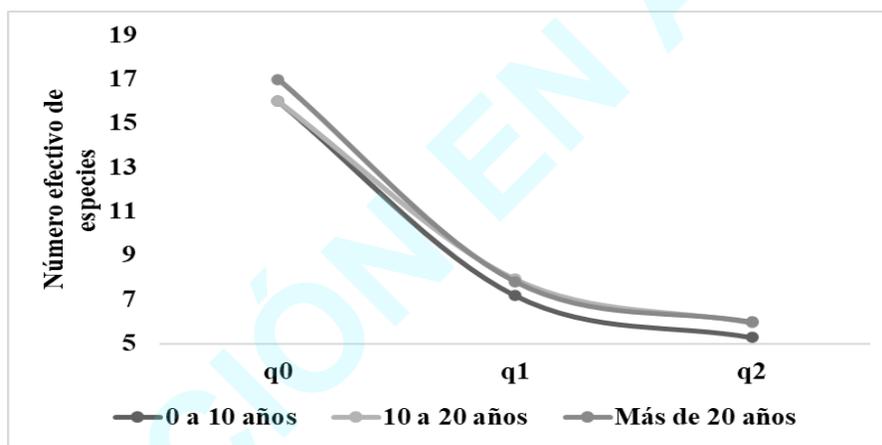
253

254 La riqueza total de órdenes (q_0) es similar para todos los sitios de colecta, con valores
 255 alrededor de 16 a 17 taxones. Esto indica que la diversidad total es comparable entre los
 256 sistemas agroforestales con cacao de 0 a 10 años, 10 a 20 años y más de 20 años de

257 establecimiento. En cuanto a la diversidad de taxones efectivos (q_1) que incluye a todos los
258 órdenes según el peso en la comunidad según la proporción que guarda respecto a su
259 abundancia, los valores oscilan entre 7 a 8 órdenes efectivos en los tres grupos, lo que
260 sugiere que el número de órdenes verdaderamente dominantes es similar. Sin embargo,
261 ligeramente superior para los sistemas con mayor tiempo de establecimiento (Figura 6).

262 La diversidad de orden q_2 demuestra que cuando se les da mayor peso a los taxones con
263 mayor abundancia en la estimación de la diversidad se logran obtener 5.3, 5.9 y 6 órdenes
264 igualmente abundantes para establecimientos con cero a 10 años, 10 a 20 años y más de 20
265 años respectivamente. Lo que implica una distribución de abundancia de los taxones más
266 equitativa para los SAF con mayor tiempo de establecimiento.

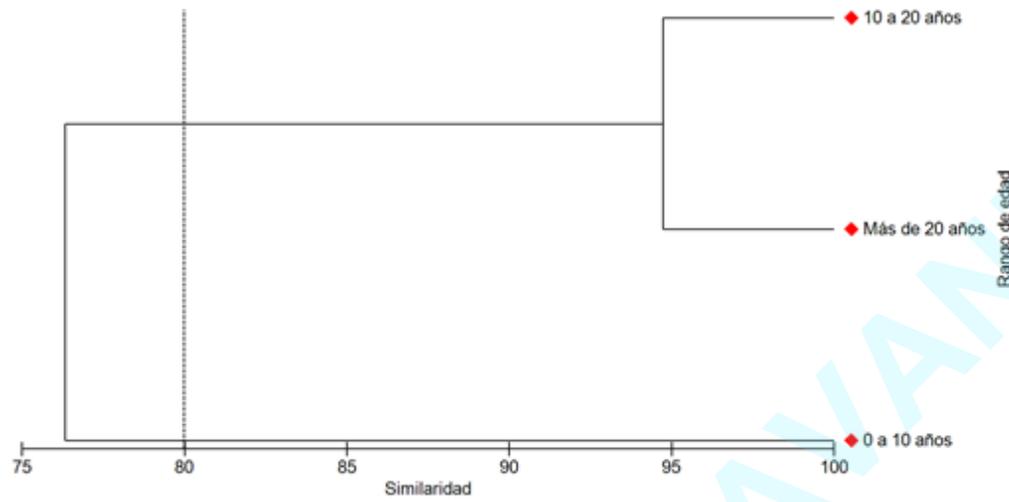
267 **Figura 6.** Diversidad de la macrofauna edáfica en función del grupo de edad de
268 establecimiento del SAF.



269

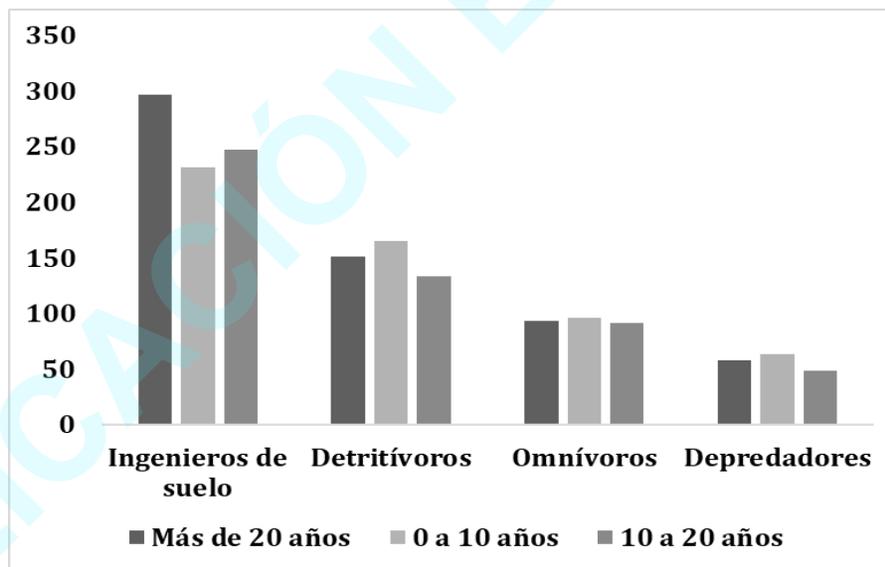
270 La composición de la macrofauna edáfica en los SAF con cacao evaluados fue similar. El
271 grupo de fincas conformado dentro del rango de edad de 10 a 20 y más de 20 años
272 compartieron el nivel más alto de similaridad (93.7 %) y luego agrupándose con las fincas
273 que conforman el grupo de cero a 10 años con el que guardan una similaridad menor (77.7
274 %) (Figura 7).

275 **Figura 7.** Similaridad en la composición de macrofauna edáfica en fincas productoras de
 276 cacao pertenecientes a distintos grupos de edades.



277

278 **Figura 8.** Densidad (ind·m⁻²) de grupos funcionales de la macrofauna edáfica en función
 279 del grupo de edad de establecimiento del SAF.



280

281

282 La densidad de los grupos funcionales varía según la edad de establecimiento del SAF
 283 (Figura 8). Los detritívoros demuestran una densidad de 165 ind·m⁻² en sistemas de cero a
 284 10 años, disminuyendo a 133 ind·m⁻² en sistemas de 10 a 20 años y aumentando a 151

285 ind·m⁻² en sistemas de más de 20 años, con una densidad total de 450 ind·m⁻², lo que
 286 representa un 27 % de los individuos totales colectados.

287 Los depredadores presentan una densidad de 64 ind·m⁻² en sistemas de cero a 10 años, 49
 288 ind·m⁻² en sistemas de 10 a 20 años y 58 ind·m⁻² en sistemas de más de 20 años, con un
 289 total de 171 ind·m⁻², evidenciando un crecimiento progresivo conforme aumenta el tiempo
 290 de establecimiento y representando el 10 % del total de individuos colectados.

291 Los omnívoros, representados exclusivamente en este estudio por la familia Formicidae del
 292 orden Hymenoptera, mantienen una densidad relativamente constante: 96 ind·m⁻² en
 293 sistemas de cero a 10 años, 92 ind·m⁻² en sistemas de 10 a 20 años y 93 ind·m⁻² en sistemas
 294 de más de 20 años, con un total de 281 ind·m⁻², conformando el 17 % de los individuos
 295 colectados.

296 Los ingenieros de suelos, conformados por lombrices de tierra (Opisthopora), hormigas
 297 (Formicidae) y termitas (Termitidae), muestran una tendencia creciente: 232 ind·m⁻² en
 298 sistemas de cero a 10 años, 247 ind·m⁻² en sistemas de 10 a 20 años y 297 ind·m⁻² en
 299 sistemas de más de 20 años, con una densidad total de 776 ind·m⁻², siguiendo un
 300 crecimiento progresivo conforme aumenta el tiempo de establecimiento y representando el
 301 46 % de los individuos colectados (Cuadro 2).

302 **Cuadro 2.** Densidad (ind·m⁻²) de grupos funcionales de la macrofauna edáfica en función del
 303 grupo de edad de establecimiento del SAF.

Grupos funcionales de la macrofauna edáfica	Orden	0 a 10 años	10 a 20 años	Más de 20 años	Total
Detritívoros	Isopoda, Symphyla, Julida, Polydesmida, Polyxenida, Spirobolida, Diptera, Collembola, Stylommatophora	165	133	151	450
Depredadores	Diplura, Hemiptera, Coleoptera, Araneae, Schizomida, Pseudoescorpionida, Geophilomorpha	64	49	58	171
Omnívoros	Hymenoptera (Formicidae)	96	92	93	281
Ingenieros de suelo	Opisthopora, Formicidae, Termitidae	232	247	297	776

305

306

Discusión

307

308

309 En este estudio se identificaron 19 órdenes de la macrofauna edáfica asociada a sistemas
310 agroforestales (SAF) con T, cacao lo que supera en número a los reportados por investigaciones
311 realizadas en agroecosistemas por (Cabrera Dávila et al., 2018; Royero, 2019) que registran
312 18 y 13 órdenes respectivamente. El orden Opisthophora (Glossoscolecidae), Hymenoptera
313 (Formicidae), Coleoptera, Blattodea (Termitidae) y Polydesmida (Polydesmidae). Son los
314 taxones más representativos en términos de densidad ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$) en los periodos de colecta.
315 Estos atributos de la composición se asocian con los ciclos biológicos de los mismos,
316 debido a que se trata en su mayoría de organismos con altas tasas de reproducción.
317 Además, una mayor riqueza de especies en comparación con el resto, en el caso de
318 Termitidae e Hymenoptera. Estos grupos son conocidos por sus altos niveles de
319 organización social y cooperación, lo que puede explicar su dominancia en la comunidad
320 del suelo (Pereira et al., 2017).

321 La estructura de las comunidades estudiadas para cada una de las fincas evidencia los
322 órdenes con mayores abundancias. Exhibiendo variaciones en cuanto a la distribución
323 jerárquica que tienen los diferentes taxones en cada sitio. También, se puede reafirmar la
324 dominancia de Hymenoptera (Formicidae), Opisthophora (Glossoscolecidae), Polydesmida
325 (Polydesmidae) y Blattodea (Termitidae). Estos resultados probablemente se deben a
326 condiciones específicas de suelo en cada una de las fincas. Varios autores han identificado
327 que los órdenes Opisthophora (Glossoscolecidae) e Hymenoptera (Formicidae) como
328 predominantes de la macrofauna edáfica en todos los sistemas de producción agrícola
329 (Cabrera et al., 2011; Chávez et al., 2016). Igualmente, son considerados ingenieros del
330 ecosistema, debido a que influyen en las propiedades físicas y transformaciones de la
331 materia orgánica del suelo al crear galerías y poros que mejoran la aireación, el drenaje y la
332 retención de agua. Como también, su actividad genera estructuras biogénicas que funcionan
333 como reservorios de nutrientes, regulan el acceso a recursos para otros organismos y

334 estimulan la actividad de la microflora del suelo a través de interacciones mutualistas
335 (Lavelle et al., 2016).

336 Debido a que el cultivo de cacao proporciona numerosos servicios ecosistémicos al suelo,
337 como la mejora de su fertilidad, fijación de nutrientes, control de la erosión mediante sus
338 raíces, creación de poros, bioturbación y regulación del ciclo hidrológico, fomenta la
339 biodiversidad del suelo al crear un hábitat favorable para la comunidad edáfica, incluyendo
340 a la macrofauna del suelo, que cumple un rol funcional esencial como trituradores de
341 hojarasca y estructuradores del perfil del suelo (François et al., 2023).

342 La gran similitud en la composición de la macrofauna edáfica entre los sistemas
343 agroforestales con cacao de diferentes grupos de edad puede deberse a factores ecológicos
344 comunes, como el tipo de suelo, la vegetación circundante y las prácticas de manejo. Otro
345 factor que puede estar influenciando es el tiempo de establecimiento o madurez de los
346 sistemas que proporciona una estabilidad de hábitat que se refleja en los resultados
347 obtenidos, donde las fincas con mayor tiempo de establecimiento presentan una mayor
348 similitud en la composición de la macrofauna del suelo. Además, las conexiones ecológicas
349 entre estos agroecosistemas y las zonas rurales cercanas contribuyen a esta similitud (Dilas
350 & Mugruza, 2020; Somarriba et al., 2013).

351 El componente funcional de la macrofauna edáfica estuvo representado por cuatro grupos
352 funcionales tróficos: Detritívoros ($450 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$), Ingenieros de suelo ($776 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$),
353 Omnívoros ($281 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) y Depredadores ($171 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) coincidiendo con lo reportado y
354 descrito por Rodríguez et al. (2019), demuestra que el establecimiento de sistemas
355 agroforestales proporciona diversos servicios ecosistémicos al incorporar material orgánico
356 proveniente de la caída de hojarasca, lo que beneficia el establecimiento de grupos
357 funcionales clave, como los detritívoros, para la salud y el desarrollo del suelo (Bautista et
358 al., 2018).

359 Otro grupo funcional importante hallado fueron los ingenieros del ecosistema de suelo,
360 conformado por hormigas (Hymenoptera: Formicidae), Lombrices de tierra (Ophistopora) y
361 Termitas (Blattodea: Termitidae) (Decaëns et al., 2003). Los cuales cumplen un rol de
362 estructuradores del suelo, removiendo y formando galerías que permiten el ingreso de aire y
363 agua hacia profundidades mayores (Morerira, 2012).

364 A pesar de no dominar en abundancia, los depredadores son un gremio trófico con alta
365 riqueza de órdenes. Entre ellos se encontraron escarabajos (Coleoptera: Staphylinidae,
366 Scarabaeidae y Carabidae), milpiés (Geophilomorpha), doble colas (Diplura), arañas
367 (Araneae), esquizómidos (Schizomida) y falsos escorpiones (Pseudoscorpionida). Su rol se
368 asocia con el control de las poblaciones de otros organismos. Esto es sumamente
369 importante para este estudio, ya que demuestra la existencia de gremios funcionales
370 complejos que mejoran el equilibrio ecológico (Zerbino et al., 2008).

371

372

373

Conclusión

374

375

376 Las comunidades de macroinvertebrados edáficos en suelos de sistemas agroforestales con
377 cacao en el departamento de Córdoba estuvieron representadas por tres phyla, 10 clases y
378 19 órdenes. Los patrones de diversidad sugieren que los sistemas agroforestales con cacao
379 de mayor edad se asocian con superiores estructuras de material orgánico, mejorando las
380 condiciones del ecosistema del suelo. La identificación de 19 órdenes de la macrofauna
381 edáfica demuestra que el sistema productivo de cacao permite la regeneración del suelo y la
382 creación de hábitats adecuados para una comunidad edáfica bien estructurada. Esta
383 comunidad se asocia con grupos funcionales clave para el mejoramiento de la fertilidad del
384 suelo y su estructuración física, como los detritívoros e ingenieros del suelo.

385

386

Agradecimiento

387 A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, que en el
388 marco del proyecto “Implementación de tecnologías de producción para el fortalecimiento
389 de la cadena de valor de cacao y la sostenibilidad ambiental del sistema productivo en el
390 departamento de Córdoba”, aportó los recursos necesarios para llevar a cabo este estudio.

391

392

393

Referencias

394

395

396 AGRONET. (2023.). Agronet -
397 Estadísticas.<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4>

398 Alcaldía de Tierralta. (2020). Plan de desarrollo municipal Tierralta 2020-2023.
399 [https://www.scribd.com/document/533220171/Plan-de-Desarrollo-Municipal-\(Tierralta\)-](https://www.scribd.com/document/533220171/Plan-de-Desarrollo-Municipal-(Tierralta)-2020-2023)
400 2020-2023

401 Anchundia, D. M., Herrada, M. R., & Montalvan, E. L. S. (2018). Sistemas agroforestales
402 con cultivo de cacao fino de aroma: entorno socio-económico y productivo. *Revista Cubana*
403 *de Ciencias Forestales*, 6(1).

404 Anderson, J. M., & Ingram, J. S. I. (1993). *Tropical soil biology and fertility: a handbook*
405 *of methods*. CAB International eBooks.

406 Andrade, V. H. G. Z. de, Redmile-Gordon, M., Barbosa, B. H. G., Andreote, F. D., Roesch,
407 L. F. W., & Pylro, V. S. (2021). Artificially intelligent soil quality and health indices for
408 ‘next generation’ food production systems. In *Trends in Food Science and Technology*
409 (Vol. 107).://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.018

410 Arias Castro, Á. F. (2021). Evaluación de la macrofauna del suelo en cacao en las zonas de
411 Santo Domingo y Esmeraldas. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/25978>

412 Ballesteros-Correa, J., Morelo-García, L., & Pérez-Torres, J. (2019). Composición y
413 estructura vegetal de fragmentos de bosque seco tropical en paisajes de ganadería extensiva
414 bajo manejo silvopastoril y convencional en Córdoba, Colombia. *Caldasia*, 41(1).
415 <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.71320>

416 Bautista, E. H. D., Suárez, L. R., & Salazar, J. C. S. (2018). Relationship between
417 macroinvertebrates and soil properties under different agroforestry arrangements in the
418 Colombia Andean Amazon. *Acta Agronómica*, 67(3), 395–401.
419 <https://doi.org/10.15446/acag.v67n3.67266>

420 Cabrera Dávila, G. de la C., & López Iborra, G. M. (2018). Caracterización ecológica de la
421 macrofauna edáfica en dos sitios de bosque siempreverde en El Salón, Sierra del Rosario,
422 Cuba. *Bosque (Valdivia)*, 39(3). <https://doi.org/10.4067/s0717-92002018000300363>

423 Cabrera, G., Robaina, N., & Ponce, D. (2011). Composición funcional de la macrofauna
424 edáfica en cuatro usos de la tierra en las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba. *Pastos
425 y Forrajes*, 34(3).

426 Cabrera, G., Robaina, N., & de León, D. P. (2011). Riqueza y abundancia de la macrofauna
427 edáfica en cuatro usos de la tierra en las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba.
428 Richness and Abundance of Soil Macrofauna in Four Land Uses of the Artemisa and
429 Mayabeque Provinces, Cuba., 34(3).

430 Chao, A., Gotelli, N. J., Hsieh, T. C., Sander, E. L., Ma, K. H., Colwell, R. K., & Ellison,
431 A. M. (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling
432 and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*, 84(1).
433 <https://doi.org/10.1890/13-0133.1>

434 Chao, A., & Jost, L. (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: Standardizing
435 samples by completeness rather than size. *Ecology*, 93(12). [https://doi.org/10.1890/11-
1952.1](https://doi.org/10.1890/11-
436 1952.1)

437 Chávez, L., Labrada-Hernández, Y., & Álvarez-Fonseca, A. (2016). Macrofauna del suelo
438 en ecosistemas ganaderos de montaña en Guisa, Granma, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 39(3).

439 Contreras-Santos, J., Martínez-Atencia, J., Luis Rodríguez-Vitola, J., Barragán-Hernández,
440 W., Garrido-Pineda, J., & Katherine Falla-Guzman, C. (2023). Índice de Calidad del Suelo
441 Bajo Sistemas Agropecuarios en el Bosque Seco Tropical-Colombia Soil Quality Index for
442 Agricultural Systems in the Tropical Dry Forest-Colombia. <https://doi.org/10.28940/terra>

443 Córdova, F., & Zambrano, L. (2015). La diversidad funcional en la ecología de
444 comunidades | Córdova-Tapia | *Revista Ecosistemas*. *Ecosistemas: Revista Científica y
445 Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 24(3).

446 Decaëns, T., Galvis, J. H., & Amézquita, E. (2003). Propiedades de las Estructuras
447 Construidas por los Ingenieros del Ecosistema en la Superficie del Suelo de una Sabana
448 Colombiana1 *Materiales y Métodos*. *El Arado Natural: Las Comunidades de*

449 Macroinvertebrados Del Suelo En Las Sabanas Neotropicales de Colombia, 171–197.
450 [https://books.google.com/books/about/El_arado_natural_Las_comunidades_de_macr.html?](https://books.google.com/books/about/El_arado_natural_Las_comunidades_de_macr.html?hl=es&id=y5Pb2xaYtVoC)
451 [hl=es&id=y5Pb2xaYtVoC](https://books.google.com/books/about/El_arado_natural_Las_comunidades_de_macr.html?hl=es&id=y5Pb2xaYtVoC)

452 Dilas, J. O., & Mugruza-Vassallo, C. A. (2020). Instalación de fincas cafetaleras en sistema
453 agroforestal para recuperación y sostenibilidad de suelos degradados de selva alta. *Revista*
454 *de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 4(1).
455 <https://doi.org/10.25127/aps.20201.534>

456 Di Rienzo, J., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F., Tablada, M., & Walter Robledo,
457 C. (2010). Infostat: software para análisis estadístico.

458 François, M., Pontes, M. C. G., da Silva, A. L., & Mariano-Neto, E. (2023). Impacts of
459 cacao agroforestry systems on climate change, soil conservation, and water resources: a
460 review. *Water Policy*, 25(6). <https://doi.org/10.2166/wp.2023.164>

461 IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2024). Consultado
462 6 de marzo de 2024. <https://www.ideam.gov.co/>

463 ITIS. (2024). Integrated Taxonomic Information System. ITIS. <https://www.itis.gov/>

464 Jost, L. (2006). Entropy and diversity. In *Oikos* (Vol. 113, Issue 2).
465 <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>

466 Koutika, L. S., Nolte, C., Yemefack, M., Ndango, R., Folefoc, D., & Weise, S. (2005).
467 Leguminous fallows improve soil quality in south-central Cameroon as evidenced by the
468 particulate organic matter status. *Geoderma*, 125(3–4).
469 <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.09.009>

470 Lavelle, P. (1997). Faunal Activities and Soil Processes: Adaptive Strategies That
471 Determine Ecosystem Function. *Advances in Ecological Research*, 27(C).
472 [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60007-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60007-0)

473 Lavelle, P., Mathieu, J., Spain, A., Brown, G., Fragoso, C., Lapiéd, E., De Aquino, A.,
474 Barois, I., Barrios, E., Barros, M. E., Bedano, J. C., Blanchart, E., Caulfield, M., Chagueza,
475 Y., Dai, J., Decaëns, T., Dominguez, A., Dominguez, Y., Feijoo, A., ... Zhang, C. (2022).
476 Soil macroinvertebrate communities: A world-wide assessment. *Global Ecology and*
477 *Biogeography*, 31(7). <https://doi.org/10.1111/geb.13492>

478 Lavelle, P., Spain, A., Blouin, M., Brown, G., Decaëns, T., Grimaldi, M., Jiménez, J. J.,
479 McKey, D., Mathieu, J., Velasquez, E., & Zangerlé, A. (2016). Ecosystem Engineers in a
480 Self-organized Soil. *Soil Science*, 181(3/4). <https://doi.org/10.1097/ss.000000000000155>

481 López, A. J. (2006). *Manual de edafología*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y
482 Química. Agrícola de la Universidad de Sevilla.

483 Martínez, E. A., Torreglosa, A. C., Crissien, T. J., Marrugo, J. L., & González, L.C. (2019).
484 Evaluation of contaminants in agricultural soils in an Irrigation District in Colombia.
485 *Heliyon*, 5(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02217>

486 Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2022). *Evaluaciones*
487 *Agropecuarias Municipales: Ficha metodológica*. [Página web].
488 www.minagricultura.gov.co

489 Morerira, F. (2012). *Manual de biología de suelos tropicales*. In Books.Google.Com.

490 Pereira, J. de M., Segat, J. C., Baretta, D., Vasconcellos, R. L. de F., Baretta, C. R. D. M.,
491 & Cardoso, E. J. B. N. (2017). Soil macrofauna as a soil quality indicator in native and
492 replanted *Araucaria angustifolia* forests. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 41.
493 <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160261>

494 Ramírez, W. (2000). Manejo de sistemas agroforestales. In *Proyecto Forestal* (Vol. 2).

495 Rodríguez, N. R., Márquez, S. M., & Restrepo, L. F. (2019). The edaphic macrofauna in
496 three components of the coffee plant arrangement associated with different management
497 typologies, Antioquia, Colombia. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 51(2).

498 Rousseau, G., Dos Santos Silva, P. R., & Reis de Carvalho, C. J. (2010). Earthworms, ants
499 and other arthropods as soil health indicators in traditional and no-fire agro-ecosystems
500 from Eastern Brazilian Amazonia. *ACTA ZOOLOGICA MEXICANA* (N.S.), 26.
501 <https://doi.org/10.21829/azm.2010.262882>

502 Royero, S. Y. (2019). Macrofauna edáfica y características físicas y químicas del suelo en
503 áreas con diferentes sistemas de manejo en el departamento del Atlántico, Colombia. In
504 Universidad Nacional de Colombia.

- 505 Salas, J. L. (1982). Sistemas agroforestales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 3(1), 55–63.
506 https://doi.org/10.15359/RCA.3_4-1.6
- 507 Saviozzi, A., Levi-Minzi, R., Cardelli, R., & Riffaldi, R. (2001). A comparison of soil
508 quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils. *Plant and Soil*, 233(2).
509 <https://doi.org/10.1023/A:1010526209076>
- 510 Schoonover, J. E., & Crim, J. F. (2015). An Introduction to Soil Concepts and the Role of
511 Soils in Watershed Management. *Journal of Contemporary Water Research and Education*,
512 154(1). <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2015.03186.x>
- 513 SEA. (2017). Sociedad Entomológica Aragonesa. <http://www.sea-entomologia.org>
- 514 Somarriba, E., & Lachenaud, P. (2013). Successional cocoa agroforests of the Amazon-
515 Orinoco-Guiana shield. *Forests Trees and Livelihoods*, 22(1).
516 <https://doi.org/10.1080/14728028.2013.770316>
- 517 Suárez, J. C., Duran Bautista, E. H., & Patiño, G. R. (2015). Macrofauna edáfica asociada
518 con sistemas agroforestales en la Amazonía Colombiana. *Acta Agronómica*, 64(3).
519 <https://doi.org/10.15446/acag.v64n3.38033>
- 520 Triplehorn, C. A., Johnson, N. F., & Borror, D. J. (2005). Borror and DeLong's
521 Introduction to the Study of Insects. Cengage Learning.
- 522 Vilorio, J. (2007). La economía del departamento de Córdoba: ganadería y minería como
523 sectores clave. *Las Economías Departamentales Del Caribe Continental Colombiano*.
524 Capítulo 4. La Economía Del Departamento de Córdoba: Ganadería y Minería Como
525 Sectores Clave. Pág.:278-369.
- 526 Zerbino, S., Altier, N., Morón, A., & Rodríguez, C. (2008). Evaluación de la macrofauna
527 del suelo en sistemas de producción en siembra directa y con pastoreo. *Agrociencia*, 12(1).
528 <https://doi.org/10.31285/agro.12.744>