



EDITORIAL
NAVEGANTE



AGROBIODIVERSIDAD Y AGROECOLOGÍA: EVALUACIÓN DE ARVENSES EN CAFETALES

Mauricio García Arboleda
Jorge Arturo Romero Barrera
José Hember Ramírez Quimbayo



Mauricio García Arboleda

Correo: mgarciaarboleda1@gmail.com

Perfil: Doctor en Agroecología.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5073-1464>

Afiliación: Universidad del Tolima.

Jorge Arturo Romero Barrera

Correo: jaromerob@ut.edu.co

Perfil: Ingeniero Agrónomo, Docente Catedrático Universidad del Tolima.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7849-6777>

Afiliación: Universidad del Tolima.

José Hember Ramírez Quimbayo

Correo: jhramirezq@ut.edu.co

Perfil: MsC de Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas,
Profesor Asistente Universidad del Tolima.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4094-0316>

Afiliación: Instituto de Educación a Distancia- IDEAD- Universidad del Tolima.

AGROBIODIVERSIDAD Y AGROECOLOGÍA: EVALUACIÓN DE ARVENSES EN CAFETALES

Mauricio García Arboleda

Jorge Arturo Romero Barrera

José Hember Ramírez Quimbayo



EDITORIAL
NAVEGANTE

Todas nuestras publicaciones son sometidas a revisión doble-ciego de pares externos (*Peer Review Double Blinded*).

Esta publicación cuenta con licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 Unported License.



ISBN: 978-628-7736-54-2

© Mauricio García Arboleda
© Jorge Arturo Romero Barrera
© José Hember Ramírez Quimbayo

2025

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16746039>

©Editorial Navegante

www.editorialnavegante.com

Queda prohibida la reproducción bajo cualquier modalidad de toda o una parte de esta obra sin autorización expresa del titular de los derechos.

Diseño de carátula y composición: Editorial Navegante

Edición electrónica: Editorial Navegante

Editado en Colombia/ *Published in Colombia*

AGROBIODIVERSIDAD Y AGROECOLOGÍA: EVALUACIÓN DE ARVENSES EN CAFETALES

Mauricio García Arboleda

Jorge Arturo Romero Barrera

José Hember Ramírez Quimbayo



EDITORIAL
NAVEGANTE

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12

CAPÍTULO I

AGROBIODIVERSIDAD Y MANEJO DE ARVENSES EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN	15
--	----

1.1. Concepto y relevancia de la agrobiodiversidad en los sistemas agroecológicos	15
1.2. Arvenses: papel ecológico y agroecológico en los cultivos de café	19
1.3. Estrategias de manejo sostenible de arvenses en la producción agroecológica	23
1.4. Beneficios y desafíos de la integración de arvenses en el agroecosistema	25

CAPÍTULO II

BIOMASA Y COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LAS ARVENSES .31

2.1. Evaluación de biomasa vegetal en sistemas productivos de café	31
2.2. Métodos de cuantificación y análisis de biomasa.....	36
2.3. Composición química de las arvenses y su potencial como consorcio de abonos verdes	42
2.4. Comparación de la disponibilidad de nutrientes en diferentes sistemas de cultivo	45

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LA DIVERSIDAD VEGETAL Y SU IMPACTO EN LA SOSTENIBILIDAD.....49

3.1. Índices de diversidad: herramientas para la evaluación ecológica....	49
3.2. Aplicación del índice de Shannon y Simpson en sistemas agrícolas	57
3.3. Relación entre biodiversidad y productividad en cafetales.....	61
3.4. Sostenibilidad y resiliencia de los agroecosistemas.....	64

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS CRÍTICO Y APORTES DEL ESTUDIO.....69

4.1. Introducción al problema de estudio.....	69
4.2. Objetivos y metodología aplicada.....	70
4.3. Principales hallazgos y discusión.....	74
4.3.1. Taxonomía y Composición Química Arvense	74

4.3.2. Cuantificación de Biomasa Arvense	77
4.3.3. Diversidad de Arvenses	80
4.4. Conclusiones y recomendaciones.....	82

CAPÍTULO IV

REFLEXIONES FINALES	85
---------------------------	----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
----------------------------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes y Dimensiones de la Agrobiodiversidad	16
Tabla 2 Relevancia Funcional de la Agrobiodiversidad para los Sistemas Productivos.....	18
Tabla 3 Principales Familias y Especies de Arvenses Representativas en Agroecosistemas Cafetaleros	20
Tabla 4 Roles Ecológicos y Agronómicos de las Arvenses en Agroecosistemas Cafetaleros.	22
Tabla 5 Estrategias y Tácticas No Convencionales para el Manejo Sostenible de Arvenses	24
Tabla 6 Tecnologías Emergentes para la Detección y Control de Precisión de Arvenses.....	27
Tabla 7 Beneficios Ecológicos y Agronómicos de la Integración Funcional de Arvenses/Coberturas en Cafetales.....	28
Tabla 8 Desafíos y Barreras para la Adopción de la Integración Funcional de Arvenses/Coberturas en Cafetales	33
Tabla 9 Rangos de Producción de Biomasa de Arvenses y Componentes Análogos en Diferentes Sistemas Cafetaleros	34
Tabla 10 Factores Clave que Modulan la Acumulación de Biomasa Arvense en Cafetales.....	38

Tabla 11 Comparación de Métodos para la Cuantificación de Biomasa Arvense y Componentes Asociados en Cafetales.....	41
Tabla 12 Protocolos Clave para el Análisis de Calidad de la Biomasa Arvense Post-Muestreo	52
Tabla 13 Resumen de Índices de Diversidad Ecológica Clásicos, su Conversión a Números Efectivos y Cumplimiento de Axiomas Clave ..	55
Tabla 14 Índices de Riqueza Específica y Equitatividad Utilizados en Ecología de Comunidades.	60
Tabla 15 Ejemplos de Aplicación de Índices de Diversidad (Shannon, Simpson y Relacionados) en Estudios de Sistemas Agrícolas o Análogos.	66
Tabla 16 Indicadores Clave para la Evaluación de la Sostenibilidad y Resiliencia en Agroecosistemas Cafetaleros.....	72
Tabla 17 Variables Principales y Factores Considerados en la Investigación.....	74
Tabla 18 Especies arvenses identificadas	76
Tabla 19 Promedio de composición química de arvenses (n=55 especies).....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Gráfico de medias de biomasa arvense por tipo de finca, según prueba de Tukey con $\alpha=0,05$	78
Figura 2 Gráfico de medias de biomasa arvense por época del año, según prueba de Tukey con $\alpha=0,05$	79
Figura 3 Comparación de los índices de Shannon y Simpson.	82

INTRODUCCIÓN

La agrobiodiversidad, entendida como la variabilidad de formas de vida que interactúan en los sistemas agrícolas, emerge como un pilar fundamental para la seguridad alimentaria global y la sostenibilidad de la producción ante los crecientes desafíos del siglo XXI (Ortiz et al., 2021). En este intrincado tapiz biológico, los agroecosistemas cafetaleros de las regiones tropicales no solo representan una fuente crucial de ingresos y sustento para millones de familias, sino que también son reservorios potenciales de una considerable diversidad biológica, aunque enfrentan presiones significativas derivadas del cambio climático y la degradación de los recursos naturales (González et al., 2022). Dentro de este contexto, la vegetación arvense, a menudo subestimada o percibida únicamente bajo el prisma de la competencia con el cultivo principal, requiere una reevaluación profunda de su rol ecológico y su potencial contribución a la funcionalidad y resiliencia de dichos sistemas (Blanco, 2016, citado en García et al., 2024). Esta obra se adentra en la necesidad de una valoración integral de las arvenses, trascendiendo la dicotomía simplista entre "mala hierba" y planta benéfica, para explorar su verdadera implicación en la producción sostenible de café.

A pesar del creciente cuerpo de investigación sobre los componentes de los agroecosistemas, existe una notable laguna en la síntesis del conocimiento referente al manejo ecológico de las arvenses y su cuantificación como recurso en cafetales. Este libro busca llenar este vacío, proveyendo una perspectiva actualizada que integra los hallazgos de una investigación experimental específica —la desarrollada por García et al. (2024) en la región cafetera del Tolima, Colombia— con una revisión exhaustiva de la literatura científica pertinente. A lo largo de sus capítulos, se explora el concepto y la relevancia de la agrobiodiversidad, el papel ecológico y

agronómico de las arvenses, las estrategias para su manejo sostenible, los métodos para la cuantificación de su biomasa y el análisis de su composición química y nutricional. Ulteriormente, se examinan las herramientas para la evaluación de la diversidad vegetal y se analiza el impacto de esta diversidad en la productividad, sostenibilidad y resiliencia de los cafetales, culminando con un análisis crítico y la presentación de los aportes del estudio de caso mencionado. El objetivo general de esta obra es, por tanto, evaluar de manera integral el papel de las arvenses como componentes de la agrobiodiversidad en los sistemas de producción de café, analizando su contribución a la biomasa, la dinámica de nutrientes y la sostenibilidad del agroecosistema, con el fin de promover enfoques de manejo más ecológicos y productivos.

La estructura del libro ha sido diseñada para guiar al lector de manera progresiva a través de estos complejos temas. El Capítulo I establece el marco conceptual de la agrobiodiversidad y el manejo de arvenses, explorando su rol y las estrategias para su integración funcional. El Capítulo II se adentra en los aspectos cuantitativos y cualitativos de la biomasa arvense, detallando su composición y potencial como enmienda. Posteriormente, el Capítulo III analiza la diversidad vegetal en un sentido más amplio y su crucial nexo con la productividad y la sostenibilidad de los agroecosistemas cafetaleros. El Capítulo IV presenta en detalle la metodología y los principales hallazgos de la investigación experimental realizada por García et al. (2024), ofreciendo datos empíricos concretos sobre la biomasa, diversidad y composición de arvenses en diferentes sistemas de manejo. Finalmente, el Capítulo V ofrece reflexiones integradoras y una visión prospectiva sobre el campo de estudio. Se espera que esta obra sea de utilidad para investigadores, académicos, estudiantes de posgrado y profesionales del sector agrícola interesados en la agroecología, el manejo sostenible de recursos naturales y la producción de café, argumentando que una gestión informada de las arvenses, basada en la comprensión de su ecología y su potencial contribución, es un componente esencial para la transición hacia sistemas cafetaleros más resilientes y sostenibles.

CAPÍTULO I

AGROBIODIVERSIDAD Y MANEJO DE ARVENSES EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

1.1. Concepto y relevancia de la agrobiodiversidad en los sistemas agroecológicos

La agrobiodiversidad (ABD) constituye un concepto poliédrico y esencial para la contemporaneidad agrícola, cuya relevancia ha sido progresivamente reconocida en esferas internacionales (Ortiz et al., 2021). Este constructo abarca no solo la variabilidad genética dentro de las especies cultivadas y razas de animales domésticos, junto con sus parientes silvestres, sino también la diversidad de todas las demás especies biológicas presentes en los agroecosistemas, incluyendo polinizadores, antagonistas de plagas, y la biota edáfica, así como la diversidad de los propios agroecosistemas y paisajes agrícolas (García et al., 2024). Dicha complejidad inherente a la ABD subraya su papel fundamental en la estructura y función de los sistemas de producción de alimentos.

Profundizando en sus elementos constitutivos, la ABD se manifiesta a través de la riqueza de variedades locales y criollas, que representan un acervo genético crucial para la adaptación y la resiliencia (García et al., 2024). La diversidad de especies no se limita a los cultivos principales, sino que engloba también cultivos secundarios, plantas asociadas –entre las que se encuentran las arvenses, cuyo papel específico se analizará posteriormente–, y una miríada de organismos que contribuyen a la funcionalidad del sistema, como los insectos polinizadores y la micro y macrofauna del suelo (Monteiro & Santos, 2022).

A una escala superior, la heterogeneidad de los sistemas de cultivo y la configuración de los paisajes agrícolas constituyen la diversidad de agroecosistemas, que determina la provisión de múltiples servicios ambientales y la capacidad de sostenimiento de la producción (García et al., 2024). Para ilustrar la amplitud de este concepto y sus manifestaciones, la Tabla 1 detalla los componentes intrínsecos de la agrobiodiversidad y las dimensiones clave para su conservación.

Tabla 1 Componentes y Dimensiones de la Agrobiodiversidad.

Nivel de Agrobiodiversidad	Componentes Específicos	Dimensiones Clave para la Conservación (García et al., 2024)
Diversidad Genética	Variedades locales y cultivos tradicionales, razas criollas de ganado, parientes silvestres de cultivos y animales domésticos.	Conservación in situ y ex situ, fomento del uso de recursos genéticos locales, acceso y distribución equitativa de beneficios.

Diversidad de Especies	Cultivos principales y secundarios, plantas asociadas (incluyendo arvenses funcionales), animales domésticos, polinizadores, biota del suelo, enemigos naturales.	Mantenimiento de hábitats y recursos dentro y fuera de la finca, fomento de interacciones biológicas beneficiosas.
Diversidad de Agroecosistemas	Sistemas de cultivo (monocultivo, policultivo, agroforestería, etc.), paisajes agrícolas (mosaicos de usos de suelo, corredores biológicos).	Promoción de paisajes heterogéneos y conectados, diversificación de sistemas productivos a nivel de finca y región.

Fuente Elaboración propia a partir de García et al. (2024), y conceptos de la FAO y el Convenio sobre la Diversidad Biológica.

Esta diversidad biológica en los contextos agrícolas es crucial para la provisión de servicios ecosistémicos, un aspecto fundamental de su relevancia funcional. Los sistemas agrícolas biodiversos contribuyen significativamente a la regulación hídrica, mejorando la infiltración y reduciendo la escorrentía, y participan activamente en el ciclado de nutrientes, optimizando la disponibilidad de elementos esenciales para los cultivos (Ortiz et al., 2021). La polinización, vital para la producción de numerosos cultivos, incluyendo el café, es un servicio directamente dependiente de la diversidad de insectos y otros animales polinizadores, cuya presencia es favorecida por agroecosistemas complejos (Monteiro & Santos, 2022; García et al., 2024). Adicionalmente, la ABD soporta el control biológico de organismos fitófagos y enfermedades y es indispensable para la formación, conservación y mejora de la salud del suelo.

Más allá de estos servicios de regulación y soporte, la relevancia de la ABD se extiende a la capacidad de los sistemas productivos para enfrentar perturbaciones. La resiliencia y la adaptación al cambio climático son considerablemente mayores en agroecosistemas diversificados, gracias a la variedad de respuestas funcionales y a la plasticidad genética que permite a las especies y sistemas ajustarse a nuevas condiciones ambientales y bióticas (García et al., 2024).

Desde la perspectiva de la seguridad alimentaria y nutricional, la ABD es vital, especialmente en sistemas de pequeña escala, al diversificar las fuentes de alimento y nutrientes, y reducir la vulnerabilidad ante la falla de un único cultivo (Ortiz et al., 2021). Este enfoque sistémico subraya que la agrobiodiversidad no es un mero componente pasivo, sino un factor dinámico que configura la sostenibilidad y viabilidad de la agricultura. La Tabla 2 resume la importancia funcional de la agrobiodiversidad para los sistemas productivos.

Tabla 2 Relevancia Funcional de la Agrobiodiversidad para los Sistemas Productivos

Dimensión de Relevancia	Contribuciones Clave de la Agrobiodiversidad
Provisión de Servicios Ecosistémicos	Regulación hídrica, ciclado de nutrientes, polinización, control biológico de organismos fitófagos y enfermedades, formación y conservación del suelo, secuestro de carbono.
Resiliencia y Adaptación al Cambio Climático	Capacidad de resistir y recuperarse de perturbaciones climáticas (sequías, inundaciones) y bióticas (organismos fitófagos, enfermedades), adaptación a nuevas condiciones ambientales.
Seguridad Alimentaria y Nutricional	Diversificación de fuentes de alimento y nutrientes, reducción de la dependencia de monocultivos, mayor estabilidad de la producción a nivel local.

Aspectos Socioeconómicos y Culturales	Mantenimiento del conocimiento agrícola tradicional y local, diversificación de fuentes de ingreso para agricultores, preservación de la identidad cultural ligada a variedades y sistemas productivos específicos, fomento de la equidad social.
---------------------------------------	---

Fuente Elaboración propia a partir de Ortiz et al. (2021), Monteiro & Santos (2022), García et al. (2024), y conceptos del IPCC (Nkonya, 2019).

Finalmente, los aspectos socioeconómicos y culturales intrínsecamente ligados a la ABD no pueden ser soslayados; el mantenimiento del conocimiento tradicional asociado al manejo de la diversidad, la diversificación de ingresos para las familias agricultoras y la preservación de la identidad cultural vinculada a variedades y sistemas específicos son contribuciones inestimables (Fiore et al., 2024). Ejemplos paradigmáticos como los sistemas de milpa en Mesoamérica, que integran maíz, frijol y calabaza, o los complejos sistemas agroforestales cafetaleros en regiones tropicales, así como los huertos familiares altamente diversificados, evidencian la aplicación práctica y los múltiples beneficios de conservar y fomentar la agrobiodiversidad (García et al., 2024). Comprender la ABD en toda su magnitud y funcionalidad es, por consiguiente, un prerrequisito para transitar hacia una agricultura que sea productiva, resiliente y genuinamente sostenible en el siglo XXI (Ortiz et al., 2021).

1.2. Arvenses: papel ecológico y agroecológico en los cultivos de café

Continuando la exploración de la agrobiodiversidad detallada en la sección precedente, este apartado se adentra en el componente específico de las arvenses dentro de los sistemas productivos cafetaleros, analizando su identidad y sus complejas interacciones ecológicas y agronómicas. La delimitación del término "arvense" en el contexto del café resulta crucial, pues su connotación puede variar; una especie vegetal considerada indeseable en una circunstancia puede ser funcional o incluso beneficiosa en otra (Monteiro & Santos, 2022).

Investigaciones en cafetales brasileños han identificado una notable diversidad florística espontánea, con predominancia de familias como Poaceae y Asteraceae, donde especies de los géneros *Cyperus* y *Urochloa* (esta última a menudo también manejada como cobertura) frecuentemente presentan altos Índices de Valor de Importancia (Barros et al., 2024).

La caracterización de estas comunidades, diferenciando entre especies nativas e introducidas, así como entre ciclos de vida anuales o perennes, es un primer paso para comprender su dinámica e interacciones (Neve et al., 2018). La Tabla 3 presenta una categorización de las principales familias y algunas especies de arvenses comúnmente halladas en cafetales.

Tabla 3 Principales Familias y Especies de Arvenses Representativas en Agroecosistemas Cafetaleros.

Familia Botánica	Especies Representativas (Ejemplos)	Ciclo de Vida (General)	Origen (General)
Poaceae	<i>Digitaria sanguinalis</i> , <i>Eleusine indica</i> , <i>Urochloa decumbens</i>	Anual/Perenne	Nativa/Introducida
Asteraceae	<i>Bidens pilosa</i> , <i>Emilia sonchifolia</i> , <i>Sonchus oleraceus</i>	Anual/Perenne	Nativa/Introducida
Cyperaceae	<i>Cyperus rotundus</i> , <i>Cyperus esculentus</i>	Perenne	Nativa/Introducida
Fabaceae	<i>Desmodium</i> spp., <i>Senna obtusifolia</i>	Anual/Perenne	Nativa/Introducida
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia hirta</i> , <i>Chamaesyce hypericifolia</i>	Anual	Nativa/Introducida

Commelinaceae	Commelina diffusa, Commelina ben- ghalensis	Anual/Perenne	Nativa/Introducida
---------------	---	---------------	--------------------

Fuente Adaptada de Barros et al. (2024).

Nota: La categorización de origen (nativa/introducida) puede variar significativamente según la región geográfica específica del cafetal.

Desde una perspectiva ecológica, las arvenses en los cafetales pueden desempeñar funciones vitales. Una cobertura vegetal arvense, incluso si no es densa, contribuye a la protección del suelo contra la erosión hídrica y eólica, particularmente en cafetales de ladera, al tiempo que mejora la infiltración del agua y reduce la escorrentía superficial (Martinez et al., 2024; Monteiro & Santos, 2022). Además, la biomasa producida por estas plantas, al descomponerse, se incorpora como materia orgánica al suelo, liberando nutrientes y participando en el ciclado biogeoquímico; algunas especies incluso tienen la capacidad de movilizar nutrientes desde horizontes más profundos del perfil edáfico (Neve et al., 2018). Es igualmente significativo su rol como hábitat y fuente de recursos (néctar, polen, sitios de anidación o reproducción) para una diversidad de artrópodos benéficos, incluyendo depredadores de plagas del café, parasitoides y polinizadores, así como para otros organismos del suelo que son cruciales para la salud del agroecosistema (Monteiro & Santos, 2022).

No obstante, el papel agronómico de las arvenses en los cafetales es a menudo percibido como negativo debido a la competencia por recursos esenciales. Estas plantas pueden competir intensamente con los cafetos por luz, agua y nutrientes, especialmente durante etapas fenológicas críticas del cultivo, lo que puede llevar a mermas en el rendimiento si no se maneja adecuadamente (Barros et al., 2024). Algunos estudios han comenzado a dilucidar los periodos críticos de competencia, aunque esta información sigue siendo específica para cada contexto. Adicionalmente, ciertas especies arvenses pueden ejercer efectos alelopáticos, liberando

compuestos bioquímicos que inhiben o, en raras ocasiones, estimulan el crecimiento de las plantas de café o de otras arvenses vecinas (Monteiro & Santos, 2022). El análisis de estas interacciones es fundamental para un manejo informado. Finalmente, la presencia de arvenses puede implicar otras consideraciones agronómicas. Especies específicas pueden actuar como hospederas alternativas o reservorios de patógenos (hongos, nematodos) o insectos plaga que afectan directamente al café, aunque inversamente, algunas podrían repelerlos o interrumpir sus ciclos de vida (Martinez et al., 2024; Monteiro & Santos, 2022). Por otra parte, una alta densidad de arvenses puede interferir directamente con labores culturales esenciales, tales como la cosecha, la aplicación de fertilizantes, las podas y el tránsito dentro del cafetal, incrementando los costos y la dificultad de estas operaciones (Barros et al., 2024). La Tabla 4 resume los principales roles ecológicos y agronómicos de las arvenses, evidenciando su naturaleza dual en los sistemas cafetaleros. Este entendimiento matizado es un prerrequisito para desarrollar estrategias de manejo que busquen equilibrar sus efectos.

Tabla 4 Roles Ecológicos y Agronómicos de las Arvenses en Agroecosistemas Cafetaleros.

Categoría de Rol	Descripción del Rol	Implicación Principal
Diversidad Genética	Protección del Suelo	Reducción de erosión, mejora de infiltración (Martinez et al., 2024).
	Aporte de Materia Orgánica y Ciclado de Nutrientes	Mejora de fertilidad y estructura del suelo, movilización de nutrientes (Neve et al., 2018).
	Hábitat y Recurso para Biodiversidad Funcional	Soporte para polinizadores, enemigos naturales, biota del suelo (Monteiro & Santos, 2022).

AGRONÓMICO	Competencia por Recursos	Reducción potencial del rendimiento del café (Barros et al., 2024).
	Efectos Alelopáticos	Inhibición o estimulación del crecimiento de plantas vecinas (Monteiro & Santos, 2022).
	Hospedaje de organismos fitófagos y Enfermedades	Aumento o disminución del riesgo de problemas fitosanitarios (Martinez et al., 2024).
	Interferencia con Labores Culturales	Dificultad y encarecimiento de las prácticas de manejo del cafetal (Barros et al., 2024).

Fuente Elaboración propia a partir de Monteiro & Santos (2022), Neve et al. (2018), Martinez et al. (2024), y Barros et al. (2024).

1.3. Estrategias de manejo sostenible de arvenses en la producción agroecológica

Comprendida la naturaleza y funciones de las arvenses, según se detalló en el apartado 1.2, resulta imperativo examinar las intervenciones humanas diseñadas para su gestión bajo un paradigma de sostenibilidad. El Manejo Sostenible de Arvenses (MSA) se fundamenta en principios que contrastan marcadamente con el manejo convencional, el cual históricamente ha dependido de la erradicación y el uso intensivo de herbicidas (Monteiro & Santos, 2022). El MSA, en cambio, enfatiza la aplicación de umbrales ecológicos y económicos antes de intervenir, la conservación de los recursos naturales y la promoción activa de los servicios ecosistémicos que las comunidades vegetales, incluidas ciertas arvenses, pueden ofrecer (Neve et al., 2018; García et al., 2024). Este enfoque se alinea con los principios generales del Manejo de Insectos Organismos Fitófagos,

adaptándolos al contexto particular de la flora arvense.

Cuando las arvenses ya están presentes, los métodos mecánicos y físicos ofrecen alternativas de control directo. El deshierbe manual selectivo, como el plateo alrededor del tallo del café o la limpieza de coronas, aunque intensivo en mano de obra, permite una alta selectividad (Monteiro & Santos, 2022). El uso de herramientas manuales (machete, azadón) o motorizadas (guadaña, desbrozadora), aplicadas de forma juiciosa y en momentos oportunos para minimizar el impacto en el suelo y el cultivo, también es una práctica común.

El empleo de coberturas muertas (mulch), ya sea con residuos de cosecha del propio café o con la biomasa de las arvenses manejadas (cortadas antes de semillar), es otra táctica física eficaz para suprimir la emergencia de nuevas plántulas y conservar la humedad del suelo (Roberts & Florentine, 2024). Los avances tecnológicos recientes, detallados en la Tabla 5, están revolucionando algunas de estas prácticas, ofreciendo mayor precisión y eficiencia.

Tabla 5 Tecnologías Emergentes para la Detección y Control de Precisión de Arvenses.

Categoría Tecnológica	Descripción Específica de la Tecnología	Potencial en el Manejo Sostenible de Arvenses
Detección Avanzada	Uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) con cámaras multiespectrales/hiperespectrales, sensores proximales montados en vehículos terrestres, GPS de alta precisión, análisis de imágenes con IA.	Mapeo preciso de infestaciones, detección temprana de arvenses, identificación de especies, facilitando la aplicación sitio-específica de tratamientos (Roberts & Florentine, 2024).

Control Químico de Precisión	Pulverizadores inteligentes con sistemas de visión y actuadores que aplican herbicidas únicamente sobre las arvenses detectadas (spot spraying) o en dosis variables según la densidad.	Reducción drástica del volumen de herbicidas aplicados, minimización de la deriva y el impacto ambiental, ahorro de costos (Westwood et al., 2018; Monteiro & Santos, 2022).
Control Mecánico/Físico de Precisión	Deshierbadoras robóticas guiadas por visión/GPS, sistemas de control eléctrico selectivo, control con láser dirigido, aplicación precisa de vapor o agua caliente.	Control no químico altamente selectivo, reducción de la mano de obra, posibilidad de operar en condiciones donde el control manual es difícil (Roberts & Florentine, 2024; Westwood et al., 2018).

Fuente Elaboración propia a partir de Roberts & Florentine (2024), Westwood et al. (2018), y Monteiro & Santos (2022).

1.4. Beneficios y desafíos de la integración de arvenses en el agroecosistema

Tras la descripción de los roles inherentes de las arvenses y las herramientas disponibles para su manejo, como se expuso en los apartados 1.2 y 1.3 respectivamente, este análisis se enfoca en las consecuencias y la viabilidad de una filosofía de manejo proactiva: la integración funcional de arvenses en el agroecosistema cafetalero. Este enfoque trasciende la simple tolerancia o el control esporádico, proponiendo una gestión activa de la comunidad arvense para maximizar los servicios ecosistémicos que estas pueden proveer, mientras se minimiza su competencia y otros efectos negativos sobre el cultivo de café (Neve et al., 2018). Dicha estrategia se diferencia conceptualmente tanto de la erradicación total, a menudo insostenible y ecológicamente disruptiva (Monteiro & Santos, 2022), como de un enfoque de "dejar hacer" que podría comprometer la

productividad. La Tabla 6 resume los principales beneficios ecológicos y agronómicos derivados de esta integración.

La evidencia científica acumulada respalda múltiples beneficios de la integración funcional de arvenses o coberturas vegetales manejadas. Uno de los más significativos es la mejora de la salud del suelo; la presencia continua de cobertura vegetal, como la promovida por el intercultivo con *Urochloa* en cafetales, incrementa el contenido de materia orgánica, optimiza la estructura y agregación del suelo, aumenta la infiltración y retención de agua, y puede reducir la compactación (Martínez et al., 2024). Paralelamente, la conservación de la biodiversidad se ve favorecida, ya que una comunidad vegetal diversa dentro del cafetal provee recursos alimenticios (néctar, polen) y refugio para una mayor variedad de insectos, incluyendo polinizadores cruciales para el café y enemigos naturales de sus plagas, así como para aves y la biota edáfica general (García et al., 2024; Ortiz et al., 2021). Otro beneficio documentado es la supresión de arvenses particularmente problemáticas o agresivas, donde una comunidad diversa y bien establecida de especies arvenses "deseables" o coberturas manejadas puede competir eficazmente y reducir la incidencia de aquellas más difíciles de controlar (Martínez et al., 2024). Estos efectos combinados contribuyen a una mayor resiliencia del cafetal, incrementando su capacidad para amortiguar los impactos de eventos climáticos extremos, como sequías o lluvias intensas, o brotes de plagas, gracias a la complejidad funcional aportada por el componente arvense integrado (Fiore et al., 2024).

Tabla 6 Beneficios Ecológicos y Agronómicos de la Integración Funcional de Arvenses/Coberturas en Cafetales.

Categoría de Beneficio	Descripción Detallada del Beneficio con Énfasis en Cafetales
Mejora de la Salud del Suelo	Incremento de materia orgánica (ej. con Urochloa), mejora de estructura y agregación, aumento de infiltración y retención de agua, ciclado de nutrientes mejorado, reducción de erosión y compactación (Martinez et al., 2024).
Conservación de la Biodiversidad	Provisión de recursos (alimento, refugio) para insectos benéficos (polinizadores del café, enemigos naturales de la broca y el minador), aves y biota del suelo (García et al., 2024; Ortiz et al., 2021).
Supresión de Arvenses Problemáticas	Competencia interespecífica de una cubierta vegetal establecida (ej. Urochloa manejada) que reduce la incidencia o vigor de arvenses más agresivas para el café (Martinez et al., 2024).
Contribución a la Resiliencia del Cafetal	Mayor capacidad del sistema cafetalero para amortiguar efectos de sequías (por mejor retención de agua), lluvias intensas (por reducción de erosión) o brotes de organismos fitófagos (Fiore et al., 2024; Neve et al., 2018).

Fuente Elaboración propia a partir de Martinez et al. (2024), García et al. (2024), Ortiz et al. (2021), Neve et al. (2018), Fiore et al. (2024),

A pesar de estos beneficios, la adopción de una estrategia de integración funcional de arvenses no está exenta de desafíos y limitaciones, los cuales deben ser analizados críticamente. El manejo de la competencia entre las arvenses integradas y el cultivo de café sigue siendo una preocupación primordial; es indispensable asegurar que estas plantas no limiten el crecimiento y la producción del café, lo cual puede lograrse mediante una cuidadosa selección de especies de cobertura o arvenses toleradas, el manejo de su biomasa a través de podas o siegas selectivas, y la definición de zonas libres de arvenses alrededor del tallo del cafeto (Wienhold & Goulao, 2023).

Otro desafío significativo es la necesidad de un mayor conocimiento ecológico y técnico por parte del agricultor, ya que la integración funcional demanda una capacidad superior de observación, identificación de especies, y la toma de decisiones de manejo adaptativas basadas en las condiciones específicas de la finca y del ciclo del cultivo (Neve et al., 2018).

Tabla 7 Desafíos y Barreras para la Adopción de la Integración Funcional de Arvenses/Coberturas en Cafetales.

Tipo de Desafío/Barrera	Descripción Específica en el Contexto de Cafetales
Técnicos/Agronómicos	Manejo de la Competencia: Asegurar que las arvenses/coberturas no limiten recursos (luz, agua, nutrientes) para el café; requiere manejo de biomasa (siegas, podas selectivas), definición de zonas libres (Wienhold & Goulao, 2023).
	Riesgo de Hospedar organismos fitófagos/Enfermedades: Necesidad de monitoreo y selección de especies de arvenses/coberturas que no sean hospederas alternativas de organismos fitófagos (ej. nematodos como Pratylenchus con Urochloa) o enfermedades del café (Martinez et al., 2024).
	Transición y Costos Iniciales: Posibles costos de establecimiento de coberturas, o reducción temporal de rendimientos del café durante el periodo de adaptación del sistema (Fiore et al., 2024).

Socioeconómicos/Cul- turales	Necesidad de Conocimiento Ecológico y Técnico: Re- quiere mayor capacitación del agricultor en identifica- ción de especies, interacciones ecológicas, y toma de de- cisiones adaptativas (Neve et al., 2018). Percepciones Culturales y Barreras para la Adopción: Su- perar la visión tradicional de "finca limpia" y el prejuicio contra las arvenses. Influencia de factores de "incrusta- ción" (históricos, sociales, epistemológicos) (Wienhold & Goulao, 2023).
Institucionales/De Mer- cado	Falta de apoyo institucional (extensión, investigación adaptada), políticas que no incentivan la diversificación, y mercados que no siempre valoran los atributos de sis- temas integrados (Fiore et al., 2024).

Fuente Elaboración propia a partir de Wienhold & Goulao (2023), Fiore et al. (2024), Martinez et al. (2024), y Neve et al. (2018).

CAPÍTULO II

BIOMASA Y COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LAS ARVENSES

2.1. Evaluación de biomasa vegetal en sistemas productivos de café

La cuantificación de la materia vegetal presente en los agroecosistemas cafetaleros, particularmente la correspondiente a las comunidades de arvenses, constituye un componente esencial para comprender la dinámica ecológica y agronómica de estos sistemas productivos. Se define la biomasa arvense como la masa total de materia orgánica, expresada comúnmente como materia seca por unidad de área (e.g., t ha^{-1}), proveniente de las plantas espontáneas que coexisten con el cultivo principal (Heikkinen et al., 2021). Dicha biomasa se puede diferenciar en una fracción aérea, que incluye hojas, tallos, estructuras florales y fructíferas, y una fracción subterránea, compuesta por raíces, rizomas y tubérculos, cuya importancia relativa puede ser considerable en el contexto de los cafetales, especialmente para especies perennes o con órganos de almacenamiento subterráneo como algunas ciperáceas (Zhang et al., 2022; Oelbermann et al., 2023). La magnitud de los residuos vegetales a escala global, como lo ilustra Fu et al. (2021) para diversos

cultivos, subraya el potencial que la biomasa arvense podría representar dentro del balance de materia orgánica de los cafetales.

Considerando lo anterior, la evaluación de la biomasa arvense se justifica por múltiples razones fundamentales. Primero, permite estimar el potencial de secuestro de carbono en el suelo, derivado tanto del aporte de necromasa aérea y subterránea como de los exudados radiculares de las arvenses (Uwamahoro et al., 2023). Segundo, funciona como un indicador directo del potencial de aporte de materia orgánica y nutrientes al sistema edáfico, cuantificando el material vegetal que, tras su descomposición, se incorporará al suelo, influenciando su fertilidad (Heikkinen et al., 2021). Tercero, la biomasa aérea de las arvenses es una medida tangible de la competencia por luz y espacio que estas pueden ejercer sobre el cultivo de café, mientras que la biomasa radicular refleja la competencia subterránea (Santos et al., 2023). Finalmente, la cuantificación de la biomasa arvense bajo diferentes regímenes de manejo, ya sea de control o de integración funcional, es crucial para evaluar la efectividad de dichas prácticas agronómicas (Ruiz et al., 2019).

De este modo, la producción de biomasa por parte de las comunidades arvenses en los cafetales está modulada por una compleja interacción de factores bióticos y abióticos. La Tabla 8 resume los rangos de producción de biomasa de arvenses o componentes vegetales análogos en diversos sistemas cafetaleros, evidenciando una considerable variabilidad. Estudios como el de Vallejos et al. (2024) indican que la biomasa herbácea en cafetales amazónicos puede variar significativamente si el sistema es un monocultivo, un policultivo, o si incluye árboles de sombra específicos como *Inga* sp. Terán et al. (2018) también ilustran cómo distintos niveles de cobertura de dosel arbóreo en sistemas agroforestales de café en Oaxaca impactan la acumulación de biomasa herbácea.

Tabla 8 Rangos de Producción de Biomasa de Arvenses y Componentes Análogos en Diferentes Sistemas Cafetaleros.

Sistema de Manejo del Cafetal	Componente Vegetal Analizado	Rango de Biomasa (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Fuente(s)
Monocultivo a pleno sol (Amazonía Peruana)	Herbáceas + Hojarasca	~0.6 (C en biomasa)a	Vallejos et al. (2024)
Agroforestal con Inga sp. (Amazonía Peruana)	Herbáceas + Hojarasca	~5.9 (C en biomasa)a	Vallejos et al. (2024)
Agroforestal con policultivo (Amazonía Peruana)	Herbáceas + Hojarasca	~2.5 (C en biomasa)a	Vallejos et al. (2024)
Agroforestal (Oaxaca, México), cobertura de copa baja (<43%)	Herbáceas	1.56	Terán et al. (2018)
Agroforestal (Oaxaca, México), cobertura de copa media (43-86%)	Herbáceas	0.56	Terán et al. (2018)
Agroforestal (Oaxaca, México), cobertura de copa alta (>86%)	Herbáceas	1.26	Terán et al. (2018)
Silvopastoril (análogo a cafetal con gramíneas) pleno sol	Urochloa decumbens	~10.2 (Materia Seca)	Santos et al. (2023)
Silvopastoril con 46% sombra	Urochloa decumbens	~4.2 (Materia Seca)	Santos et al. (2023)
Silvopastoril con 60% sombra	Urochloa decumbens	~1.5 (Materia Seca)	Santos et al. (2023)

Los valores de Vallejos et al. (2024) son presentados como carbono en biomasa (t C/ha); para una estimación de biomasa total, se podría asumir un contenido de carbono del 45-50%. Por ejemplo, ~0.6 t C/ha equivaldría a ~1.2-1.3 t biomasa/ha.

La información presentada en la Tabla 8 pone de manifiesto que la intensidad de la sombra es uno de los factores preponderantes, tal como lo evidencia Santos et al. (2023), quienes observaron una reducción del rendimiento de materia seca de *Urochloa decumbens* de hasta un 86% bajo sombra densa. No obstante, la respuesta de la biomasa a la sombra puede ser no lineal, existiendo niveles intermedios (29-50% de sombra) que, según el modelo conceptual de Ruiz et al. (2019), podrían optimizar la producción de biomasa en el sotobosque antes de que la competencia por luz se vuelva excesivamente limitante. Además de la sombra, la Tabla 9 detalla otros factores determinantes.

Tabla 9 Factores Clave que Modulan la Acumulación de Biomasa Arvense en Cafetales.

Factor Determinante	Descripción de su Influencia en la Biomasa Arvense	Referencias Clave
Intensidad y Calidad de la Sombra	Reduce la radiación fotosintéticamente activa disponible; niveles altos de sombra generalmente disminuyen la biomasa, aunque respuestas no lineales son posibles.	Santos et al. (2023); Ruiz et al. (2019); Terán et al. (2018)
Especie y Arquitectura de Árboles de Sombra	La estructura del dosel arbóreo (denso, ralo, tipo de hoja) y la especie (e.g., leguminosas) afectan la transmisión de luz y el aporte de hojarasca.	Villarreyna et al. (2020); Ruiz et al. (2019)
Densidad y Arquitectura del Cafetal	Cafetales más densos o con variedades de porte alto pueden sombrear más el estrato arvense, limitando su crecimiento.	Meireles et al. (2019)
Especies Dominantes de Arvenses	Las características fisiológicas y morfológicas de las arvenses (C3 vs C4, ciclo de vida, porte) determinan su capacidad competitiva y productividad.	Zhang et al. (2022) (para biomasa subterránea de <i>Cyperus</i>)

Fertilidad Intrínseca del Suelo	La disponibilidad de nutrientes en el suelo afecta directamente el crecimiento y acumulación de biomasa de las arvenses.	Heikkinen et al. (2021)
Régimen Hídrico y Estacionalidad	La disponibilidad de agua y las variaciones estacionales de temperatura y luz impactan significativamente la fenología y producción de biomasa.	Uwamahoro et al. (2023)
Tipo e Intensidad del Manejo Arvense	Prácticas como el deshierbe selectivo, uso de coberturas vivas o el control químico alteran drásticamente la cantidad y composición de la biomasa arvense.	Villarreyña et al. (2020)
Calidad y Tasa de Descomposición de la Biomasa	Aunque no modula la producción per se, determina la persistencia del carbono aportado y la dinámica de nutrientes, justificando su evaluación.	Heikkinen et al. (2021); Uwamahoro et al. (2023)

Fuente Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

El análisis de estos factores, incluyendo la considerable biomasa que las arvenses pueden representar (como se observa en Villarreyña et al. (2020) y Meireles et al. (2019) al contextualizarla frente a la biomasa del café), subraya la necesidad de entender la biomasa arvense no solo como una cantidad, sino como un componente dinámico del agroecosistema. En este sentido, es fundamental establecer la relevancia de la biomasa de arvenses como un parámetro medible y significativo en los cafetales, vinculando su cuantificación con la comprensión de procesos ecológicos vitales como el ciclado de carbono y nutrientes, así como con la evaluación objetiva de las diversas prácticas de manejo implementadas.

2.2. Métodos de cuantificación y análisis de biomasa

Una vez establecida la trascendencia de la biomasa arvense como un indicador cuantitativo clave en los agroecosistemas cafetaleros, tal como se delineó en la sección precedente, resulta imperativo abordar con rigor los procedimientos metodológicos para su cuantificación y el subsecuente análisis de su calidad. La precisión en estas mediciones es fundamental, ya que de ella dependen la fiabilidad de las estimaciones sobre el secuestro de carbono, el potencial de aporte de materia orgánica y nutrientes, y la evaluación certera de la competencia interespecífica, así como la efectividad de las prácticas de manejo implementadas (Terán et al., 2018; Uwamahoro et al., 2023). De esta manera, la selección y aplicación de técnicas apropiadas se convierten en un pilar para la investigación agroecológica en estos sistemas complejos y diversos.

El punto de partida para cualquier estimación fiable de biomasa reside en la implementación de principios de muestreo robustos. El diseño de muestreo debe adecuarse a la heterogeneidad espacial y temporal inherente a los cafetales, pudiendo optarse por un muestreo aleatorio simple en áreas homogéneas, un diseño estratificado cuando existen variaciones claras (e.g., por tipo de manejo de sombra, edad del cafetal, o topografía), o un muestreo sistemático para capturar gradientes (Meireles et al., 2019). La determinación del tamaño y forma óptima de las unidades de muestreo, ya sean cuadrantes para vegetación herbácea o transectos para comunidades más dispersas, junto con un número adecuado de réplicas, es crucial para alcanzar la precisión deseada y la representatividad estadística (Vallejos et al., 2024). Especial consideración merece la biomasa subterránea, cuya cuantificación es inherentemente más laboriosa y variable que la aérea, demandando a menudo un mayor esfuerzo de muestreo y técnicas específicas de extracción (Meireles et al., 2019).

Los métodos directos, de naturaleza destructiva, son reconocidos por su alta precisión en la cuantificación de biomasa. La cosecha manual es la técnica central en esta categoría, implicando para la biomasa aérea el

corte de la vegetación a ras de suelo o a una altura definida dentro de la unidad de muestreo, seguido de la recolección y pesado del material fresco (Santos et al., 2023; Vallejos et al., 2024). Para la biomasa subterránea, el procedimiento comúnmente involucra la extracción de monolitos de suelo de volumen conocido, seguido por un meticuloso lavado de raíces utilizando tamices de diferente malla para separar el material vegetal del suelo (Meireles et al., 2019). Posteriormente, tanto la biomasa aérea como la subterránea deben ser sometidas a protocolos de secado en estufa, usualmente a temperaturas entre 65-70°C (aunque Santos et al. (2023) mencionan 55°C y 105°C para diferentes propósitos), hasta alcanzar un peso constante, lo que permite determinar el contenido de materia seca, base para todas las expresiones de biomasa (Terán et al., 2018). Si bien estos métodos ofrecen la mayor exactitud, sus desventajas radican en el considerable tiempo y mano de obra requeridos, el carácter destructivo que impide mediciones repetidas en el mismo sitio, y el potencial impacto ecológico en la parcela muestreada (Waite, 2020).

Frente a las limitaciones de los métodos destructivos, los enfoques indirectos, ya sean no destructivos o parcialmente destructivos, ofrecen alternativas valiosas, especialmente para estudios a gran escala o monitoreos a largo plazo. Entre estos, las estimaciones visuales calibradas, que utilizan escalas de cobertura-abundancia (como la de Braun-Blanquet), pueden correlacionarse con mediciones directas de biomasa para agilizar las evaluaciones en campo, aunque su subjetividad requiere una calibración rigurosa (adaptado de Daba & Soromessa, 2019). Un conjunto de técnicas indirectas de gran utilidad son las relaciones alométricas, que consisten en el desarrollo o uso de ecuaciones matemáticas que vinculan variables de fácil medición en campo (e.g., altura de la planta, cobertura porcentual, diámetro del tallo o de la base) con la biomasa total o de sus componentes (Daba & Soromessa, 2019; Meireles et al., 2019). El desarrollo de estas ecuaciones requiere una fase inicial de muestreo destructivo para su calibración, pero una vez validadas, permiten estimaciones rápidas y no destructivas. Es fundamental, como lo evidencian Terán et al. (2018) para cafetos y Daba & Soromessa (2019) para árboles, que estas ecuaciones

sean específicas para las especies o grupos funcionales de arvenses de interés y, preferiblemente, para las condiciones locales del cafetal, ya que la alometría puede variar significativamente entre sitios y taxones. La robustez de estos modelos se evalúa mediante indicadores como el coeficiente de determinación (R^2), el error estándar residual (RSE) y el criterio de información de Akaike (AIC) (Daba & Soromessa, 2019). La Tabla 10 presenta una comparación de estos y otros métodos relevantes.

Tabla 10 Comparación de Métodos para la Cuantificación de Biomasa Arvense y Componentes Asociados en Cafetales.

Método	Técnica Específica	Descripción Breve	Ventajas	Desventajas
Directo	Cosecha Manual (Aérea y/o Subterránea)	Corte, recolección y pesado (fresco/seco) de toda la biomasa en unidades de muestreo definidas.	Alta precisión, datos detallados por componente.	Laborioso, destructivo, consume tiempo, puede requerir permisos, costoso para grandes áreas.
Indirecto	Estimaciones Visuales Calibradas	Uso de escalas de cobertura-abundancia (e.g., Braun-Blanquet) correlacionadas con biomasa directa.	Rápido, no destructivo, útil para grandes áreas y monitoreo.	Subjetivo, requiere calibración rigurosa, menor precisión que métodos directos.
Indirecto	Relaciones Alométricas	Desarrollo de ecuaciones que relacionan variables de fácil medición (altura, diámetro) con biomasa.	No destructivo (tras calibración), rápido para mediciones repetidas, aplicable a plantas individuales.	Requiere fase inicial destructiva para calibración, especificidad de especie/sitio crítica.

Indirecto	Sensores Remotos (e.g., Drones con cámaras multiespectrales)	Cálculo de índices de vegetación (NDVI, EVI) correlacionados con biomasa.	Cubre grandes áreas rápidamente, permite mapeo espacial, no destructivo.	Requiere calibración en campo, costoso (equipo/software), afectado por condiciones atmosféricas.
Indirecto	Disco Medidor de Forraje / Reglas de Altura Ponderada	Instrumentos que miden la altura y/o densidad de la vegetación herbácea para estimar biomasa.	Rápido, no destructivo, portátil, útil para comunidades herbáceas densas.	Menos preciso en vegetación heterogénea o leñosa, requiere calibración local.

Fuente Elaboración propia a partir de las fuentes citadas y conocimientos generales de ecología vegetal

Avanzando en las técnicas indirectas, el uso de sensores remotos a escala de parcela, como drones equipados con cámaras multiespectrales, ha ganado tracción para estimar biomasa (Maimaitijiang et al., 2020). Estos sistemas permiten calcular índices de vegetación (e.g., NDVI, EVI) que pueden correlacionarse con la biomasa aérea de las arvenses, previa y rigurosa calibración en campo con datos destructivos. Aunque esta tecnología ofrece la ventaja de cubrir áreas extensas y generar mapas de distribución de biomasa, su implementación requiere una inversión inicial considerable y expertise técnico, además de ser sensible a las condiciones atmosféricas y a la estructura compleja de la vegetación en sistemas agroforestales.

Otros instrumentos más sencillos, como el disco medidor de forraje o las reglas de altura ponderada, tradicionalmente usados en pastizales, podrían adaptarse para estimar la biomasa de comunidades de arvenses predominantemente herbáceas y densas en cafetales, siempre y cuando se realice una calibración local adecuada (adaptado de Waite, 2020). La selección del método dependerá crucialmente de los objetivos del estudio,

la escala de análisis, los recursos disponibles y el nivel de precisión requerido.

Posterior a la cosecha y el pesaje, los protocolos de análisis post-muestreo son determinantes para obtener la información final sobre la cantidad y, fundamentalmente, la calidad de la biomasa arvense. El primer paso ineludible es la determinación del contenido de materia seca, que implica el secado de las submuestras en estufa hasta peso constante, como fue detallado previamente (Santos et al., 2023). Una vez obtenida la materia seca, las muestras suelen ser procesadas mediante molienda para homogeneizarlas y reducir el tamaño de partícula, lo cual es esencial para la precisión de los análisis químicos subsecuentes que definirán su potencial como enmienda y su rol en el ciclo de nutrientes, enlazando con la sección 2.3 de este capítulo (Heikkinen et al., 2021).

Estos análisis pueden variar desde la determinación elemental de carbono y nitrógeno, hasta fraccionamientos bioquímicos más complejos como el método AWEN (fracciones solubles en ácido, agua, etanol y no solubles) descrito por Heikkinen et al. (2021), que permite una caracterización más profunda de la labilidad y recalcitrancia de los componentes orgánicos. Asimismo, estudios de cinética de descomposición mediante incubaciones en laboratorio, como los realizados por Uwamahoro et al. (2023), permiten estimar el carbono potencialmente mineralizable (C_0) y las constantes de tasa de descomposición (k), ofreciendo una perspectiva dinámica de la contribución de la biomasa arvense al ciclo del carbono. La Tabla 11 resume algunos de estos protocolos clave.

Tabla 11 Protocolos Clave para el Análisis de Calidad de la Biomasa Arvense Post-Muestreo.

Protocolo de Análisis	Objetivo Principal	Principio Metodológico Resumido	Implicación para la Evaluación de Biomasa Arvense
Determinación de Materia Seca (MS)	Cuantificar la biomasa libre de humedad, base para todas las expresiones de cantidad y composición.	Secado de la muestra en estufa (e.g., 65-70°C o 105°C) hasta peso constante.	Estándar para reportar biomasa y calcular concentraciones de nutrientes.
Análisis Elemental (C, N, P, K, etc.)	Determinar el contenido de los principales elementos nutritivos y estructurales.	Digestión de la muestra y análisis mediante espectrofotometría, absorción atómica, o analizadores elementales (e.g., CHNS).	Permite calcular la relación C/N, estimar el aporte potencial de nutrientes al suelo.
Fraccionamiento Bioquímico (e.g., AWEN, Van Soest)	Separar la materia orgánica en fracciones con diferente labilidad/recalcitrancia (e.g., azúcares, celulosa, lignina).	Extracciones secuenciales con solventes de diferente polaridad y/o digestiones ácidas/neutras.	Proporciona información detallada sobre la calidad de la MO, crucial para predecir tasas de descomposición y humificación.
Cinética de Descomposición (Incubación en Laboratorio)	Estimar el carbono potencialmente mineralizable (C_0) y la tasa de descomposición (k) de la biomasa en el suelo.	Mezclar la biomasa con suelo e incubar bajo condiciones controladas, midiendo la evolución de CO_2 a lo largo del tiempo.	Evalúa la labilidad real de la biomasa y su contribución a corto/medio plazo al C y nutrientes del suelo.

Molienda y Homogeneización	Preparar la muestra seca para análisis químicos, asegurando representatividad y eficiencia en las extracciones/digestiones.	Reducción del tamaño de partícula mediante molinos (e.g., Wiley, de bolas) y mezclado exhaustivo.	Paso esencial previo a la mayoría de los análisis químicos para garantizar resultados fiables.
----------------------------	---	---	--

Fuente Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

2.3. Composición química de las arvenses y su potencial como consorcio de abonos verdes

Continuando con la caracterización de la biomasa arvense, y una vez comprendida la relevancia de su cuantificación (sección 2.1) y los métodos para tal fin (sección 2.2), resulta imperativo profundizar en su composición química, ya que esta cualidad intrínseca es el principal determinante de su destino en el agroecosistema cafetalero y de su potencial como enmienda orgánica. La composición química no solo define la calidad de la materia orgánica que se incorporará al suelo, sino que también modula directamente las tasas de descomposición microbiana y, consecuentemente, la velocidad y magnitud de la liberación de nutrientes esenciales para el cultivo de café y otros componentes del sistema (Heikkinen et al., 2021; Fu et al., 2021). Por lo tanto, un análisis detallado de los constituyentes elementales y bioquímicos de las arvenses proporciona una base científica sólida para optimizar su manejo integrado y sostenible, maximizando sus beneficios agronómicos y ecológicos.

El análisis de macronutrientes en la biomasa de las especies de arvenses clave, tales como leguminosas, gramíneas y compuestas frecuentemente encontradas en cafetales, revela la concentración de elementos fundamentales como Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio

(Ca), Magnesio (Mg) y Azufre (S). Estos contenidos pueden variar significativamente entre especies y grupos funcionales; por ejemplo, las arvenses leguminosas suelen presentar mayores concentraciones de N debido a su capacidad de fijación biológica, mientras que algunas gramíneas pueden acumular cantidades importantes de K (Abbasi et al., 2022; Fu et al., 2021). La investigación de Stark et al. (2019) sobre hierbas silvestres comestibles, muchas de las cuales son consideradas arvenses en contextos agrícolas, subraya su riqueza en Ca, Fe y K, lo que sugiere un potencial considerable para el enriquecimiento del suelo si estos materiales se reciclan. Del mismo modo, los micronutrientes como Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Boro (B) y Molibdeno (Mo), aunque requeridos en menores cantidades por las plantas, son igualmente esenciales, y su presencia en la biomasa arvense contribuye al mantenimiento de un balance nutricional adecuado en el suelo (Stark et al., 2019).

Un parámetro crítico derivado de la composición elemental es la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), la cual ejerce una influencia determinante sobre la velocidad de descomposición de la biomasa arvense y la dinámica de mineralización-inmovilización del N en el suelo. Residuos con una baja relación C/N (generalmente < 20-25:1), típicos de arvenses leguminosas o tejidos jóvenes y ricos en proteínas, tienden a descomponerse rápidamente, favoreciendo una pronta mineralización del N y su disponibilidad para el cultivo (Fu et al., 2021; Uwamahoro et al., 2023). Por el contrario, materiales con una alta relación C/N, como los residuos lignificados de gramíneas maduras, se descomponen más lentamente y pueden inducir una inmovilización temporal del N del suelo por parte de los microorganismos descomponedores (Heikkinen et al., 2021). Uwamahoro et al. (2023) constataron que una mayor relación C/N en residuos de hortalizas se correlacionaba positivamente con la cantidad de carbono potencialmente mineralizable (C_0) pero negativamente con la tasa de descomposición (k), lo que subraya la importancia de este índice para predecir el comportamiento de las enmiendas.

Más allá de los elementos individuales, las fracciones de fibra, que incluyen celulosa, hemicelulosa y lignina, también juegan un papel crucial. La lignina, en particular, es un polímero fenólico complejo altamente resistente a la degradación microbiana, y su concentración en la biomasa arvense influye directamente en la persistencia de esta como cobertura del suelo (mulch) y en la formación de humus estable (Fu et al., 2021). Materiales ricos en lignina y con alta relación C/N se descompondrán más lentamente, proporcionando una cobertura protectora más duradera y contribuyendo a la formación de materia orgánica del suelo más recalcitrante (Heikkinen et al., 2021). El fraccionamiento AWEN (soluble en ácido, agua, etanol y no soluble) propuesto por Heikkinen et al. (2021) permite una caracterización más fina de estas fracciones, donde la fracción no soluble (N) está fuertemente asociada con la lignina y la recalcitrancia.

El entendimiento detallado de la composición química permite evaluar el potencial de la biomasa arvense como enmienda orgánica, ya sea como abono verde (incorporación de material fresco) o como mulch (aplicación en superficie). Conociendo la cantidad de biomasa producida (discutida en 2.1) y su concentración de nutrientes, es posible calcular el aporte potencial de N, P, K y otros elementos por hectárea, lo que representa una contribución directa a la nutrición del cafetal (Abbasi et al., 2022). Sin embargo, para maximizar los beneficios, es fundamental considerar la sincronía entre la tasa de liberación de estos nutrientes desde la biomasa arvense en descomposición y las etapas de mayor demanda nutricional del cultivo de café (Hafez et al., 2021). Una liberación demasiado rápida podría llevar a pérdidas por lixiviación si no coincide con la absorción por el cultivo, mientras que una liberación muy lenta podría no satisfacer las necesidades del café en momentos críticos.

Finalmente, es crucial reconocer que la composición química de las arvenses no es estática, sino que está influenciada por múltiples factores. La especie de arvense es el factor primario, pero su estado fenológico al

momento del corte o manejo (e.g., vegetativo versus reproductivo, antes de la floración versus madurez) altera significativamente la relación C/N y el contenido de lignina (Uwamahoro et al., 2023). El tipo de suelo y su fertilidad intrínseca, así como las condiciones climáticas (temperatura, humedad), también modulan la absorción de nutrientes por las arvenses y, por ende, su composición (Santos et al., 2023, encontraron que la sombra afectaba el contenido de proteína y fibra de *Urochloa decumbens*). Estos factores deben ser considerados al interpretar los datos de composición y al diseñar estrategias de manejo de arvenses que busquen optimizar su contribución al ciclo de nutrientes y a la salud del suelo en los agroecosistemas cafetaleros.

2.4. Comparación de la disponibilidad de nutrientes en diferentes sistemas de cultivo

Tras haber examinado la composición química de las arvenses y su inherente potencial como fuente de materia orgánica y nutrientes (sección 2.3), la presente disertación se enfoca en la evaluación comparativa de la disponibilidad de nutrientes y los indicadores de salud del suelo bajo diferentes sistemas de cultivo de café. Este análisis es crucial, dado que la mera presencia y composición de las arvenses no garantiza por sí sola una mejora en la fertilidad; es la interacción de estas con el manejo global del agroecosistema la que determina el estado final de los recursos edáficos. La disponibilidad de nutrientes, entendida no solo como la cantidad total de elementos sino como las fracciones accesibles para la biota del suelo y las plantas de café, junto con otros indicadores de salud edáfica, son el resultado de una compleja red de procesos influenciados por las prácticas agrícolas (Li et al., 2021; Fu et al., 2021). En este sentido, se contrastarán sistemas de producción cafetalera que difieren sustancialmente en su aproximación al manejo de arvenses y a la fertilización, con el fin de dilucidar el impacto de estas estrategias en la sostenibilidad productiva.

Los sistemas de cultivo a comparar abarcan un espectro que va desde el cafetal convencional, caracterizado frecuentemente por el mantenimiento del suelo desnudo mediante el uso de herbicidas de amplio espectro o laboreo intensivo, hasta configuraciones más complejas y ecológicamente integradas. Entre estas últimas, se considera el cafetal con manejo ecológico de arvenses, donde se promueve el uso de coberturas vegetales seleccionadas o se maneja selectivamente la flora arvense espontánea, a menudo complementado con el aporte de la propia biomasa arvense como mulch (Villarreyna et al., 2020). Asimismo, se incluye el cafetal orgánico certificado, que implica prácticas específicas de manejo de arvenses (generalmente mecánicas o culturales) y el uso exclusivo de enmiendas y fertilizantes orgánicos (Chatterjee et al., 2020). Finalmente, se contempla el cafetal agroforestal diversificado, donde la presencia de árboles de sombra, tanto leguminosos como no leguminosos, interactúa de manera significativa con el estrato arvense y modula profundamente los ciclos de nutrientes y la dinámica de la materia orgánica del suelo (Ruiz et al., 2019; Ochoa et al., 2020).

La evaluación comparativa de estos sistemas se fundamenta en un conjunto de parámetros clave medidos en el suelo y, cuando la información lo permite, en el propio cultivo de café. El contenido de materia orgánica total (MOT) y sus fracciones lábiles, como el carbono orgánico particulado (COP), son indicadores primordiales de la salud del suelo y de su capacidad para almacenar y ciclar nutrientes (Fu et al., 2021). En este contexto, Chatterjee et al. (2020) constataron que los sistemas agroforestales de café, particularmente bajo manejo orgánico, tienden a presentar mayores stocks de carbono orgánico en el suelo (COS) en comparación con el monocultivo de café a pleno sol, especialmente en los horizontes superficiales. De igual forma, los niveles de macronutrientes disponibles, como las formas asimilables de nitrógeno (N-NO_3^- , N-NH_4^+), fósforo (e.g., P-Olsen o P-Mehlich) y potasio intercambiable (K^+), son determinantes directos de la capacidad productiva del suelo (Ochoa et al., 2020; Vallejos et al., 2024).

Además de los nutrientes, el pH del suelo y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) son propiedades químicas fundamentales que regulan la disponibilidad de la mayoría de los elementos y la actividad biológica. Ochoa et al. (2020) observaron que los SAF de café presentaban un pH más bajo pero mayor contenido de MO y P en comparación con el cultivo convencional, mientras que Zhao et al. (2018) documentaron una acidificación progresiva y una disminución de la MO en monocultivos de café a largo plazo. Estos resultados evidencian la complejidad de las interacciones. La actividad y biomasa microbiana del suelo, evaluada mediante técnicas como la respiración basal, el contenido de C y N microbiano, o la actividad de enzimas específicas (e.g., fosfatasas, deshidrogenasas), ofrecen una visión más dinámica de la salud del suelo, reflejando la intensidad de los procesos de descomposición y ciclado de nutrientes (Li et al., 2021). Vallejos et al. (2024) resaltan la importancia de las proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (GRSP) como un indicador biológico. Aunque la eficiencia en el uso de nutrientes por el cafeto es un parámetro agronómico deseable, su medición directa es compleja y los datos suelen ser escasos en estudios comparativos de sistemas.

El análisis integral de cómo las prácticas de manejo arvense influyen en estos parámetros revela que la presencia, biomasa y composición química de las arvenses (analizadas en 2.1 y 2.3) son factores moduladores clave. El aporte continuo de materia orgánica diversificada por parte de una comunidad de arvenses bien gestionada, como se infiere de Fu et al. (2021), puede mejorar la estructura del suelo, aumentar la retención de agua, incrementar la CIC y estimular la actividad biológica. La calidad de esta materia orgánica, especialmente su relación C/N y contenido de lignina, determinará la velocidad de descomposición y la tasa de liberación de nutrientes, afectando así su disponibilidad para el cultivo de café (Heikkinen et al., 2021; Uwamahoro et al., 2023). En sistemas agroforestales, la interacción entre las arvenses y los árboles de sombra añade otra capa de complejidad, donde la hojarasca de los árboles puede complementar o competir con el aporte de las arvenses, y modificar el

microclima de tal manera que se alteren las tasas de descomposición (Villarreyna et al., 2020; Ruiz et al., 2019). Por lo tanto, una evaluación crítica de estos sistemas permite identificar aquellas configuraciones y manejos que optimizan la salud del suelo y la disponibilidad de nutrientes, factores indispensables para la productividad y sostenibilidad a largo plazo de los agroecosistemas cafetaleros.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LA DIVERSIDAD VEGETAL Y SU IMPACTO EN LA SOSTENIBILIDAD

3.1. Índices de diversidad: herramientas para la evaluación ecológica

La cuantificación de la diversidad de especies vegetales, particularmente en el contexto de las comunidades de arvenses presentes en agroecosistemas como los cafetales, requiere de herramientas métricas que permitan una evaluación ecológica rigurosa y comparativa. Estos instrumentos matemáticos, conocidos como índices de diversidad, son fundamentales para traducir la complejidad estructural de una comunidad en valores numéricos interpretables (Daly et al., 2018). Dicha cuantificación es esencial no solo para la investigación básica en ecología de comunidades, sino también para la toma de decisiones en el manejo agronómico, donde la diversidad de arvenses puede tener implicaciones tanto para la competencia con el cultivo principal como para la provisión de servicios ecosistémicos (Augousti et al., 2021). Es importante reconocer que la diversidad alfa, o diversidad local, se conceptualiza a través de dos componentes principales: la riqueza de especies, que refiere al número

absoluto de especies presentes, y la equitatividad o uniformidad, que describe la distribución relativa de los individuos entre esas especies (Daly et al., 2018). Ambos componentes son cruciales para una caracterización integral, ya que una comunidad con alta riqueza, pero baja equitatividad (dominada por pocas especies) puede funcionar ecológicamente de manera muy distinta a una con igual riqueza, pero alta equitatividad. Profundizando en los índices de riqueza, el más elemental es la simple cuenta del número total de especies (S). Si bien su simplicidad es una ventaja, su principal desventaja radica en su alta sensibilidad al tamaño de la muestra y al esfuerzo de muestreo; comunidades más intensamente muestreadas tenderán a presentar una mayor riqueza aparente (Daly et al., 2018). Para mitigar esta limitación, se han propuesto índices que intentan corregir el efecto del tamaño muestral, como el índice de Margalef (DMg), cuya fórmula es $(S-1)/\ln(N)$, donde N representa el número total de individuos muestreados (Kumar et al., 2022). Este índice, al incorporar el número total de individuos, ofrece una medida de riqueza normalizada que facilita comparaciones entre muestras de diferente tamaño, aunque su eficacia depende de que las comunidades sigan ciertos patrones de distribución de abundancias. Otro enfoque para manejar la dependencia del tamaño muestral es el uso de curvas de rarefacción, que permiten estandarizar la riqueza esperada para un tamaño de muestra común (Hosokawa et al., 2021).

Avanzando hacia métricas que integran tanto la riqueza como la equitatividad, el índice de Shannon-Wiener (H') es uno de los más extendidos en la literatura ecológica. Basado en la teoría de la información, H' mide la incertidumbre asociada a la predicción de la identidad específica de un individuo tomado al azar de la comunidad (Konopiński, 2020). Su fórmula, $H' = -\sum(p_i * \ln(p_i))$, donde p_i es la proporción de individuos pertenecientes a la especie i y $\ln$ es el logaritmo natural (aunque también se usan logaritmos en base 2 o 10, lo que cambia las unidades a bits o dits, respectivamente), otorga mayor peso a las especies raras y es, por tanto, sensible a su presencia (Magurran, 2021). No obstante, Konopiński (2020) resalta una crítica importante: la fórmula original de Shannon (HMLE)

tiende a subestimar la diversidad real en muestras pequeñas debido a un sesgo negativo.

Tabla 12 Resumen de Índices de Diversidad Ecológica Clásicos, su Conversión a Números Efectivos y Cumplimiento de Axiomas Clave.

Índice Común	Fórmula Principal	Énfasis Principal	Número Efectivo de Especies (q D)b	Cumplimiento de Axiomas Clave (según Daly et al., 2018)	Unidades/Interpretación Primaria
Riqueza de Especies (S)	S	Riqueza	⁰ D = S	Falla Principio de Trans-ferencias.	Número de especies.
Índice de Shannon (H')	$H' = -\sum (p_i * \ln p_i)$	Riqueza y Equitatividad (sensible a raras)	¹ D = exp(H')	Falla Principio de Repli-cación.	Nats de información (incertidumbre); se transforma a número efectivo de especies.
Índice de Simpson (D o λ)	$D = \sum p_i^2$	Dominancia (inver-so a diversidad)	² D = 1/D	Falla Principio de Repli-cación.	Probabilidad de que dos individuos sean de la misma especie; se transforma a número efectivo.
Índice de Gini-Simpson (1-D)	$1 - \sum p_i^2$	Diversidad (sensible a dominantes)	² D = 1/(1-(1-D)) = 1/ $\sum p_i^2$	Similar a Simpson.	Probabilidad de que dos individuos sean de diferente especie; se transforma a número efectivo.

Índice de Berger-Paraker	$1 / p_{\max}$ (forma recíproca)	Dominancia (inverso)	${}^{\infty}D = 1/p_{\max}$	Falla varios axiomas importantes.	Número efectivo de especies si la más abundante fuera la única (interpretación extendida).
--------------------------	----------------------------------	----------------------	-----------------------------	-----------------------------------	--

a p_i es la proporción de individuos de la i-ésima especie; S es el número total de especies; $\ln$ es el logaritmo natural; $p_{\max}$ es la proporción de la especie más abundante.

b Los números de Hill (qD) representan la "verdadera diversidad" y permiten una comparación unificada.

Fuente Elaboración propia basada en Daly et al. (2018), con aportes de Augousti et al. (2021) y Konopiński (2020).

Paralelamente, el índice de Simpson, en su formulación más común como índice de Gini-Simpson ($1-D = 1 - \sum p_i^2$), mide la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar de la comunidad pertenezcan a especies diferentes (Adjimoti & Kwadzo, 2018; Daly et al., 2018). A diferencia del índice de Shannon, el de Simpson otorga mayor peso a las especies dominantes. La elección entre Shannon y Simpson puede depender del énfasis que el investigador desee poner en las especies raras versus las comunes. Una contribución teórica significativa, como exponen Daly et al. (2018) y Augousti et al. (2021), es la transformación de estos índices clásicos en "números efectivos de especies" o "verdadera diversidad". Esta conversión, por ejemplo, $\exp(H')$ para Shannon y $1/\sum p_i^2$ (o $1/(1-(1-D))$) para Simpson, unifica las unidades de medida a "número de especies equivalentes completamente equitativas", facilitando la comparación directa entre índices y proporcionando una interpretación más intuitiva y lineal de la diversidad. Esta perspectiva es fundamental para una evaluación ecológica coherente.

Los índices de equitatividad, por su parte, buscan cuantificar cuán pareja es la distribución de los individuos entre las especies presentes, independientemente de la riqueza total. El índice de Equitatividad de Pielou (J'), calculado como $H'/\ln(S)$ (donde H' es el índice de Shannon y S la riqueza de especies), compara la diversidad observada con la máxima diversidad posible para esa riqueza, arrojando valores entre 0 (mínima equitatividad) y 1 (máxima equitatividad) (Kumar et al., 2022). De forma análoga, la Equitatividad de Simpson ($E_{D'}$) se puede calcular como $(1/\sum p_i^2)/S$. Aunque útiles, Daly et al. (2018) advierten que algunos índices de equitatividad pueden ser problemáticos debido a su dependencia de S . Los índices de dominancia, como el de Berger-Parker (proporción de la especie más abundante, o su recíproco como medida de diversidad), son complementarios y se centran en el grado en que una o pocas especies controlan la comunidad (Daly et al., 2018). Es importante destacar que, si bien la diversidad alfa es el foco principal de esta sección, la diversidad beta (cambio o disimilitud en la composición de especies entre hábitats o a lo largo de gradientes) y la diversidad gamma (diversidad regional total) son

también niveles cruciales para comprender patrones ecológicos a escalas más amplias. La Tabla 13 detalla los índices de riqueza y equitatividad más pertinentes.

Tabla 13 Índices de Riqueza Específica y Equitatividad Utilizados en Ecología de Comunidades

Índice	Fórmula Propuesta	Parámetros Utilizados	Interpretación Ecológica	Ventajas y Limitaciones Principales
Riqueza de Especies (S)	S	Número total de especies observadas.	Medida directa del número de tipos taxonómicos diferentes.	Simple y directo. Muy sensible al tamaño de la muestra y al esfuerzo de muestreo; no considera la abundancia relativa (Daly et al., 2018; Hosokawa et al., 2021).
Índice de Riqueza de Margalef (D _{Mg})	$D_{Mg} = (S-1) / \ln(N)$	S = Riqueza de especies; N = Número total de individuos.	Intenta normalizar la riqueza con respecto al tamaño total de la muestra; valores más altos indican mayor riqueza relativa.	Corrige parcialmente el efecto del tamaño muestral. Sensible a S y N; asume una relación logarítmica (Kumar et al., 2022).
Índice de Equitatividad de Pielou (J')	$J' = H' / \ln(S)$ o $J' = H' / H'_{max}$	H' = Índice de Shannon-Wiener; S = Riqueza de especies; $H'_{max} = \ln(S)$ o $\log(S)$ según base de H'.	Mide la uniformidad de la distribución de abundancias, variando de 0 (mínima) a 1 (máxima equitatividad).	Ampliamente utilizado, fácil de calcular. Sensible a la precisión de H' y S; puede ser dependiente de S (Daly et al., 2018; Kumar et al., 2022).

Índice de Equitatividad de Simpson (E^D)	ED = $(1/\sum p_i^2) / S$ o $^2D / S$	$\sum p_i^2$ = Índice de concentración de Simpson (λ); S = Riqueza de especies; 2D = Número efectivo de especies de orden 2.	Compara la diversidad de Simpson observada (en su forma recíproca) con la riqueza; valores cercanos a 1 indican alta equitatividad.	Menos sensible a especies raras que Pielou (basado en Simpson). La interpretación puede ser menos intuitiva que J' para algunos.
--	---------------------------------------	---	---	--

Fuente Elaboración propia basada en Kumar et al. (2022) y Daly et al. (2018).

Finalmente, la aplicación práctica de estos índices requiere una serie de consideraciones metodológicas ineludibles. La necesidad de protocolos de muestreo estandarizados, que definan claramente el tamaño y forma del cuadrante o transecto, así como el esfuerzo de muestreo, es fundamental para garantizar la comparabilidad de los datos (Hosokawa et al., 2021). Una identificación taxonómica precisa de las especies de arvenses es igualmente crítica, ya que errores en este nivel invalidarían los cálculos de diversidad. Además, aunque muchos de estos índices pueden calcularse manualmente, el uso de software especializado (e.g., R con paquetes como 'vegan', o PAST) facilita enormemente el procesamiento de datos, especialmente con grandes conjuntos de muestras, y permite la aplicación de análisis estadísticos más complejos y la corrección de sesgos, como los discutidos por Konopiński (2020) y Hosokawa et al. (2021). La comprensión de los supuestos matemáticos y las limitaciones ecológicas de cada índice, tal como lo exponen Daly et al. (2018) y Augousti et al. (2021), es un requisito para su correcta interpretación y la generación de conclusiones ecológicamente significativas en el estudio de la diversidad de arvenses en cafetales.

3.2. Aplicación del índice de Shannon y Simpson en sistemas agrícolas

Una vez delineados los fundamentos teóricos y las herramientas métricas para la evaluación de la diversidad de especies en la sección precedente (3.1), resulta pertinente examinar la aplicación práctica de los índices de Shannon y Simpson en el contexto específico de los sistemas agrícolas. Estos dos índices, debido a su extendida utilización y a las diferentes facetas de la diversidad que capturan –Shannon más sensible a la riqueza y especies raras, Simpson a la dominancia (Daly et al., 2018)–, han sido empleados en una variedad de investigaciones agroecológicas para caracterizar la estructura de las comunidades vegetales, incluyendo la flora arvense. La revisión de estos estudios permitirá ilustrar cómo se interpretan los valores numéricos obtenidos y qué tipo de conocimiento se puede generar sobre la diversidad de la vegetación en agroecosistemas como los cafetales, así como identificar los desafíos inherentes a su aplicación en estos entornos manejados por el ser humano.

Un número considerable de investigaciones, aunque no siempre centradas exclusivamente en cafetales o flora arvense, han utilizado los índices de Shannon y Simpson para comparar la diversidad vegetal bajo diferentes manejos agrícolas o condiciones ambientales. Por ejemplo, Kumar et al. (2022), aunque en un contexto forestal, aplicaron estos índices (junto con Margalef y Pielou) para evaluar la diversidad arbórea en diferentes transectos, obteniendo valores de Shannon (H') que oscilaron entre 0.74 y 2.06, y de Simpson (D) entre 1.70 y 6.53. Estos rangos, si bien no directamente de arvenses en cafetales, proporcionan un marco de referencia sobre la magnitud de los valores que pueden encontrarse y cómo se interpretan en términos de mayor o menor diversidad y equitatividad. Una mayor H' o D generalmente indica una comunidad más diversa, con más especies y/o una distribución más equitativa de los individuos entre ellas. Hylander et al. (2021), en una revisión más amplia sobre biodiversidad en paisajes agrícolas, aunque no se centra en la aplicación

de índices específicos, sí resalta la importancia de prácticas como la agricultura orgánica y los sistemas agroforestales para el mantenimiento de la biodiversidad, contextos donde la aplicación de estos índices podría revelar cuantitativamente dichas diferencias. Por ejemplo, se podría hipotetizar que un cafetal orgánico, al evitar herbicidas de amplio espectro, presentaría valores de H' para su comunidad arvense significativamente mayores que un cafetal convencional intensivo.

La interpretación de los valores absolutos de estos índices en contextos agrícolas requiere cautela y un profundo entendimiento del sistema estudiado. Un valor de H' de 2.5 en una comunidad de arvenses de un cafetal podría interpretarse como una diversidad moderadamente alta, sugiriendo la presencia de un número considerable de especies de arvenses con una distribución de abundancias relativamente equitativa (Magurran, 2021). Un índice de Simpson (expresado como $1-D$, donde $D = \sum p_i^2$) de 0.8 indicaría una alta probabilidad (80%) de que dos individuos de arvenses tomados al azar pertenezcan a especies diferentes, lo que también denota una alta diversidad (Daly et al., 2018). Sin embargo, más importante que los valores absolutos suele ser la comparación de estos valores entre diferentes sistemas de manejo (e.g., orgánico vs. convencional, con sombra vs. pleno sol) o a lo largo del tiempo en un mismo sistema. Por ejemplo, Adjimoti y Kwadzo (2018) utilizaron el índice de Simpson para medir la diversificación de cultivos a nivel de finca en Benín, encontrando una correlación positiva entre una mayor diversificación de cultivos y la seguridad alimentaria de los hogares, lo que demuestra cómo un índice de diversidad puede vincularse a un resultado funcional del sistema agrícola. De manera análoga, la diversidad de arvenses en un cafetal, cuantificada mediante estos índices, podría correlacionarse con la incidencia de organismos fitófagos, la actividad de polinizadores o la fertilidad del suelo. González et al. (2022) emplearon el índice de Shannon para medir la diversidad del uso del suelo a escala de paisaje en regiones cafetaleras, encontrando que este factor tuvo una importancia relativa menor en la predicción del rendimiento del café en comparación con la cobertura forestal, lo que ilustra una aplicación del índice a una escala más amplia

y su utilidad para ponderar la influencia de diferentes componentes del paisaje agrícola.

La aplicación de los índices de Shannon y Simpson en agroecosistemas, no obstante, enfrenta desafíos y consideraciones específicas que deben ser abordados para una interpretación válida de los resultados. Primero, la definición de la "comunidad" a muestrear es crucial: ¿se incluirán solo las especies arvenses herbáceas, o también arbustos espontáneos, plántulas de árboles de sombra, o incluso las propias plantas de café si el objetivo es evaluar la diversidad vegetal total del sistema? (Hosokawa et al., 2021). Segundo, la heterogeneidad espacial y temporal inherente a los agroecosistemas, especialmente en cafetales con variaciones en topografía, tipo de suelo, o manejo de sombra, exige un diseño de muestreo que capture adecuadamente esta variabilidad, tanto dentro de una finca como a lo largo de las estaciones del año (Daly et al., 2018). Tercero, la influencia del manejo humano es un factor preponderante: los índices de diversidad de arvenses reflejarán no solo los procesos ecológicos de competencia y facilitación, sino también las decisiones del agricultor respecto a la selección de especies de cobertura, la intensidad y selectividad del deshierbe, o el uso de herbicidas (Hosokawa et al., 2021). Konopiński (2020) advierte sobre el sesgo del índice de Shannon en muestras pequeñas, una consideración relevante si los muestreos de arvenses en parcelas agrícolas son limitados en tamaño o número de individuos. La elección entre diferentes formulaciones del índice de Simpson o la decisión de utilizar estimadores insesgados para Shannon también puede influir en los resultados y su comparabilidad (Augousti et al., 2021).

A pesar de estos desafíos, los resultados obtenidos mediante la aplicación de los índices de Shannon y Simpson pueden informar de manera significativa la toma de decisiones en el manejo de los cafetales. Por ejemplo, la comparación de estos índices entre parcelas con diferentes prácticas de manejo de arvenses (e.g., deshierbe selectivo vs. control total, uso de coberturas específicas vs. flora espontánea) puede ayudar

a identificar aquellas prácticas que fomentan una mayor diversidad de arvenses funcionales sin comprometer excesivamente la productividad del café (Adjimoti & Kwadzo, 2018, en un contexto de diversificación de cultivos). Asimismo, el monitoreo de estos índices a lo largo del tiempo puede servir para evaluar el impacto de programas de conservación de la biodiversidad implementados en fincas cafetaleras, o para detectar cambios en la comunidad arvense debidos a variaciones climáticas o a la introducción de nuevas plagas o enfermedades. En esencia, estos índices, aunque con limitaciones, proveen un lenguaje cuantitativo para describir y comparar la estructura de las comunidades de arvenses, conectando así la teoría de la diversidad con la gestión práctica de los agroecosistemas (Kumar et al., 2022). La Tabla 14 presenta ejemplos de estudios que han aplicado estos índices, ilustrando los rangos de valores y las interpretaciones comunes.

Tabla 14 Ejemplos de Aplicación de Índices de Diversidad (Shannon, Simpson y Relacionados) en Estudios de Sistemas Agrícolas o Análogos.

Estudio (Autor, Año)	Sistema/ Contexto Analizado	Índice(s) Utili- zado(s)	Rango de Va- lores Obteni- dos (Ejemplos)	Principal Hallazgo/ Interpretación Rela- cionado con el Índice
Kumar et al. (2022)	Diversidad arbórea en transectos de bosque (India)	Shannon-Wiener (H'), Simpson (D), Margalef (SR), Pielou (J)	H': 0.74 - 2.06; D: 1.70 - 6.53	Los índices permitieron cuantificar y comparar la diversidad entre diferentes transectos, reflejando variaciones en riqueza y equitatividad.
Adjimoti & Kwadzo (2018)	Diversificación de cultivos en fincas rurales (Benín)	Simpson (SDI = $1 - \sum P_i^2$)	(Valores del índice no directamente reportados, pero sí su significancia)	Mayor diversificación de cultivos (mayor SDI) se asoció positivamente con una mejor seguridad alimentaria de los hogares.

González et al. (2022)	Paisajes cafetaleros (Brasil)	Shannon (para diversidad de uso del suelo)	(Valor del índice no directamente usado para comparación de diversidad de especies)	La diversidad del uso del suelo a nivel de paisaje tuvo menor impacto en el rendimiento del café que la cobertura forestal circundante.
Hosokawa et al. (2021)	Comunidades bentónicas marinas (Japón)	Densidad de especies, Hill-Simpson, Pielou	(Valores variables según sitio y calidad de datos)	Los índices de estructura comunitaria pueden ser insensibles o dar resultados erróneos con muestras pequeñas o alta variabilidad comunitaria.
Kono-piński (2020)	Datos genéticos simulados	Shannon ($H'_{sub} > MLE < /sub >$ y estimadores insesgados)	(Valores de sesgo y error reportados)	El índice de Shannon original subestima la diversidad en muestras pequeñas; se recomiendan estimadores insesgados.

Fuente Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

3.3. Relación entre biodiversidad y productividad en cafetales

Tras la caracterización de las herramientas métricas para evaluar la diversidad de especies (sección 3.1) y el análisis de su aplicación en contextos agrícolas (sección 3.2), esta sección se adentra en una de las cuestiones fundamentales de la agroecología: la relación entre la biodiversidad y la productividad en los sistemas cafetaleros. El examen crítico de esta interconexión es vital, ya que las decisiones de manejo que afectan la diversidad vegetal y asociada en los cafetales pueden tener consecuencias directas sobre su rendimiento económico y sostenibilidad a largo plazo. El marco teórico que sustenta las relaciones

biodiversidad-productividad (B-P) es diverso, proponiendo múltiples mecanismos a través de los cuales un mayor número de especies o una mayor diversidad funcional podrían influir en la producción primaria neta del agroecosistema (Cardinale et al., 2012). Entre las hipótesis más prominentes se encuentran la de complementariedad de nicho, que postula que especies con diferentes requerimientos de recursos pueden utilizarlos de manera más completa y eficiente en conjunto; la hipótesis de facilitación, donde ciertas especies pueden beneficiar el crecimiento o la supervivencia de otras (e.g., leguminosas fijadoras de nitrógeno); y la hipótesis del efecto de muestreo o selección, que sugiere que sistemas más diversos tienen una mayor probabilidad de incluir especies particularmente productivas o funcionalmente clave que impulsen la productividad del conjunto (Perfecto et al., 2019). No obstante, también es plausible encontrar relaciones negativas, donde una mayor diversidad (especialmente de arvenses competidoras) puede reducir la productividad del cultivo principal, o relaciones neutras, donde la diversidad no ejerce un efecto discernible sobre el rendimiento.

La evidencia empírica sobre la relación B-P en cafetales y sistemas perennes similares es variada y depende del componente de biodiversidad considerado y de la escala de análisis. En lo referente al impacto de la diversidad de arvenses sobre la productividad del café, la literatura es compleja. Si bien algunas arvenses pueden competir directamente por luz, agua y nutrientes, reduciendo el rendimiento del cafeto (como se infiere de los estudios sobre competencia en general, aunque no directamente correlacionando índices de diversidad de arvenses con rendimiento de café en los documentos proporcionados), otras pueden tener efectos indirectos positivos. Por ejemplo, una cubierta arvense diversa podría mejorar la estructura y fertilidad del suelo, atraer polinizadores que beneficien la cuaja de frutos del café, o albergar enemigos naturales que controlen plagas del cultivo (Tilden et al., 2024). Esto podría llevar a una relación unimodal, donde niveles moderados de diversidad de arvenses, adecuadamente manejados, se asociarían con una mayor productividad del café, mientras que niveles muy bajos (suelo desnudo, con posibles

problemas de erosión o pérdida de MO) o muy altos (competencia excesiva) la reducirían (adaptado de Cardinale et al., 2012).

Respecto al impacto de la diversidad de árboles de sombra en la productividad del café, la investigación es más extensa y a menudo favorable. Los sistemas agroforestales cafetaleros, por definición, incorporan una diversidad de especies arbóreas que pueden influir positivamente en la producción y calidad del grano, así como en la estabilidad de los rendimientos a largo plazo (Perfecto et al., 2019). González et al. (2022) constataron en un estudio a gran escala en Brasil que la cobertura forestal circundante a los cafetales (un proxy de la disponibilidad de hábitat para biodiversidad asociada) tuvo un efecto consistentemente positivo en los rendimientos del café, siendo este efecto más pronunciado para *Coffea canephora*, una especie más dependiente de polinizadores. Villarreyna et al. (2020) y Ochoa et al. (2020) también reportan cómo diferentes especies de árboles de sombra (Inga, teca, caoba africana) pueden modular el rendimiento del café, a menudo de manera positiva, mediante la regulación de la carga fructífera, la mejora del microclima y el aporte de materia orgánica. Sin embargo, la intensidad de la sombra es un factor crítico; Terán et al. (2018) sugieren una posible relación negativa entre alta densidad de sombra y biomasa del cafeto, y el modelo conceptual de Ruiz et al. (2019) postula que niveles medios de sombra (29-50%) podrían ser óptimos para la biomasa agrícola.

El impacto de la diversidad de polinizadores y enemigos naturales, intrínsecamente ligada a la diversidad vegetal general del cafetal y su entorno (incluyendo arvenses nectaríferas y árboles que proveen hábitat y recursos), también es un factor crucial. Como se mencionó, el estudio de González et al. (2022) sugiere que el beneficio de la cobertura forestal es mediado, en parte, por la mejora de los servicios de polinización. Tilden et al. (2024) también destacan que los árboles de sombra pueden favorecer a los polinizadores y enemigos naturales, lo que a su vez impacta positivamente la cuaja de frutos y reduce los daños por plagas, afectando indirectamente la productividad del café. La comprensión de estos mecanismos subyacentes es esencial. En el contexto del cafetal, la

complementariedad de nicho podría operar si una comunidad diversa de arvenses con diferentes profundidades de raíz explora distintos perfiles de suelo, mejorando el ciclado de nutrientes sin competir excesivamente con el cafeto. La facilitación es evidente en el caso de árboles de sombra leguminosos que fijan nitrógeno atmosférico, beneficiando tanto al café como a otras plantas del sotobosque (Villarreyna et al., 2020). Sin embargo, la competencia por recursos (luz, agua, nutrientes) es un mecanismo siempre presente, cuya intensidad dependerá de la densidad y composición de todos los componentes vegetales del sistema, incluyendo el café, los árboles de sombra y las arvenses (Terán et al., 2018).

Finalmente, la escala de análisis a la cual se manifiestan estas relaciones B-P es una consideración importante. Los efectos de la competencia o facilitación por arvenses pueden ser más evidentes a escala de planta individual o de parcela pequeña. En contraste, los beneficios de la diversidad de árboles de sombra o de la cobertura forestal del paisaje, que operan a través de la modificación del microclima o la provisión de hábitat para organismos móviles como polinizadores y aves dispersoras de semillas, se manifiestan a escala de finca o incluso de paisaje (González et al., 2022). Abordar la relación entre la biodiversidad y la productividad en los cafetales requiere, por tanto, un enfoque multiescala que integre los diferentes componentes de la diversidad y los mecanismos a través de los cuales estos influyen en la capacidad productiva del agroecosistema. Este entendimiento es crucial para diseñar sistemas cafetaleros que sean tanto productivos como ecológicamente sostenibles.

3.4. Sostenibilidad y resiliencia de los agroecosistemas

Una vez explorada la compleja relación entre la biodiversidad y la productividad en los agroecosistemas cafetaleros (sección 3.3), resulta imprescindible elevar la discusión hacia un nivel sistémico, analizando los conceptos de sostenibilidad y resiliencia como propiedades emergentes de estos sistemas. La sostenibilidad, en su acepción más amplia, se refiere a la capacidad de un agroecosistema para mantener su

productividad y funcionalidad a largo plazo, conservando la integridad de los recursos naturales (suelo, agua, biodiversidad), al tiempo que resulta económicamente viable para los productores y socialmente justo para las comunidades involucradas (FAO, 2021). Esta visión multidimensional, que integra las esferas ecológica, económica y social, es fundamental para evaluar la viabilidad de los sistemas cafetaleros en un contexto de crecientes presiones ambientales y socioeconómicas (Wright et al., 2024). Paralelamente, la resiliencia se define como la capacidad del agroecosistema para absorber perturbaciones –ya sean de origen climático (sequías, inundaciones), económico (caída de precios del café) o biótico (brotes de plagas y enfermedades)–, reorganizarse y mantener sus funciones esenciales, e incluso transformarse hacia configuraciones más deseables y adaptadas (Cleves et al., 2022). Este concepto se diferencia de la simple resistencia (capacidad de no cambiar ante una perturbación) y abarca la adaptabilidad y la transformabilidad, reconociendo la posibilidad de que los sistemas crucen umbrales y alcancen nuevos estados de equilibrio (Folke et al., 2004).

La agrobiodiversidad, cuyos componentes y relevancia general se discutieron en la sección 1.1 y cuyas métricas se abordaron en las secciones 3.1 y 3.2, juega un papel central en la construcción de la sostenibilidad y la resiliencia de los cafetaleros. La diversificación, tanto a nivel de especies (variedades de café, árboles de sombra, cultivos asociados, arvenses funcionales) como de sistemas de producción, se erige como una estrategia fundamental para la reducción de riesgos (Cleves et al., 2022). La presencia de múltiples componentes con diferentes respuestas a las perturbaciones puede estabilizar los ingresos de los agricultores y la producción total de la finca frente a la variabilidad ambiental y de mercado (Adjimoti & Kwadzo, 2018). Por ejemplo, los sistemas agroforestales de café con sombra diversificada, como los analizados por Tilden et al. (2024), no solo pueden mantener o mejorar la productividad del café, sino que también ofrecen productos adicionales (frutas, madera, leña) que contribuyen a la seguridad alimentaria y a la diversificación de ingresos, aumentando así la resiliencia económica de los pequeños productores. Además, la agrobiodiversidad

es la base para el mantenimiento de servicios ecosistémicos clave, como la polinización, el control biológico de plagas, la regulación hídrica y, fundamentalmente, la fertilidad del suelo, que son cruciales tanto para la productividad actual como para la capacidad de recuperación del sistema tras una perturbación (González et al., 2022; Tilden et al., 2024). La Tabla 15 presenta un conjunto de indicadores que pueden utilizarse para evaluar estas propiedades sistémicas.

Tabla 15 Indicadores Clave para la Evaluación de la Sostenibilidad y Resiliencia en Agroecosistemas Cafetaleros.

Dimensión de Sostenibilidad/Resiliencia	Categoría del Indicador	Indicador Específico
Ecológica/Ambiental	Conservación de Recursos Naturales	Stock de Carbono Orgánico del Suelo (COS), Materia Orgánica del Suelo (MOS), pH, Erosión del suelo, Calidad del agua.
	Biodiversidad Funcional y Estructural	Diversidad de árboles de sombra, Cobertura forestal en el paisaje, Diversidad de polinizadores y enemigos naturales, Diversidad de arvenses.
	Eficiencia en el Uso de Insumos	Dependencia de fertilizantes y pesticidas sintéticos, Eficiencia en el uso del agua.
Económica	Viabilidad y Estabilidad Económica	Productividad del café (kg/ha), Estabilidad de los rendimientos a lo largo de los años, Rentabilidad neta, Diversificación de ingresos.
	Acceso a Mercados y Servicios	Acceso a crédito, Asistencia técnica, Participación en mercados diferenciados (e.g., orgánico, comercio justo).

Social y de Gobernanza	Bienestar del Agricultor y Equidad	Seguridad alimentaria, Condiciones laborales, Acceso a educación y salud, Equidad de género en la toma de decisiones.
	Capacidad Adaptativa y de Gobernanza	Participación en organizaciones, Acceso a información climática, Adopción de prácticas innovadoras, Gobernanza de iniciativas de sostenibilidad.
Resiliencia Específica	Capacidad de Absorción/ Recuperación ante Perturbaciones	Índice AgRI o componentes (Robustez, Adaptabilidad, Transformabilidad) frente a sequías, plagas, caídas de precios.

Fuente Elaboración propia basada en Cleves et al. (2022); Wright et al. (2024); Tilden et al. (2024) y los demás estudios citados.

En el contexto del cambio climático, la agrobiodiversidad desempeña un rol insustituible en la capacidad de adaptación de los cafetales. El reservorio genético presente en las variedades tradicionales de café y en sus parientes silvestres, así como la diversidad de especies de árboles de sombra y otros componentes del agroecosistema, proporcionan una base de rasgos funcionales que pueden permitir al sistema ajustarse a nuevas condiciones climáticas, como el aumento de temperaturas o la alteración de los patrones de lluvia (Villarreyna et al., 2020). La evaluación de la sostenibilidad y resiliencia de los cafetales, por lo tanto, requiere el uso de un conjunto de indicadores que vayan más allá de la simple productividad. Cleves et al. (2022) proponen el Agroecosystem Resilience Index (AgRI), que integra 40 indicadores en dimensiones físico-bióticas, agroecológicas, socioculturales, económicas y tecnológicas, y que considera explícitamente la agrobiodiversidad y la conectividad. Otros indicadores relevantes incluyen la eficiencia en el uso de insumos externos (una menor dependencia suele asociarse con mayor sostenibilidad), la estabilidad de los rendimientos a lo largo de los años (un indicador de

resiliencia), la salud del suelo (MO, actividad biológica, como se discute en la sección 2.4), la diversidad funcional de los componentes del sistema, la rentabilidad neta y, crucialmente, el bienestar del agricultor y su familia (Wright et al., 2024; Tilden et al., 2024).

El análisis de estudios de caso de cafetales que demuestran alta sostenibilidad y resiliencia permite identificar los factores y prácticas que contribuyen a estas propiedades sistémicas. Los trabajos revisados por Wright et al. (2024) sobre diversas iniciativas de sostenibilidad en el sector cafetero (certificaciones, agroecología, comercio directo) ofrecen ejemplos de cómo diferentes modelos de gobernanza y enfoques de manejo buscan mejorar la sostenibilidad. Tilden et al. (2024), en su estudio sobre pequeños productores en Papúa Nueva Guinea, argumentan que los sistemas de café con sombra, al integrarse con las estrategias de vida y los valores socio-culturales de los agricultores y al mejorar la eficiencia laboral, son intrínsecamente más resilientes y sostenibles en ese contexto. Por otro lado, los hallazgos de Zhao et al. (2018) sobre la degradación del suelo y la alteración de las comunidades microbianas en monocultivos de café a largo plazo sirven como un contrapunto, ilustrando la insostenibilidad de los sistemas que carecen de diversidad y de un manejo ecológico de los recursos. La conservación de la cobertura forestal en los paisajes cafetaleros, como demuestra González et al. (2022), no solo beneficia la biodiversidad, sino que también puede mejorar la productividad del café, representando una estrategia "ganar-ganar" para la sostenibilidad. En última instancia, la construcción de agroecosistemas cafetaleros sostenibles y resilientes requiere un enfoque holístico que reconozca la interdependencia de los componentes ecológicos, económicos y sociales, y donde la agrobiodiversidad, en todas sus formas (incluyendo las arvenses funcionalmente importantes), sea gestionada como un activo fundamental.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS CRÍTICO Y APORTES DEL ESTUDIO

4.1. Introducción al problema de estudio

La investigación acometida por García et al. (2024.) se centró en la imperiosa necesidad de cuantificar la biomasa y caracterizar la diversidad de las comunidades de arvenses en tres sistemas diferenciados de producción de café —convencional, orgánico y mixto— situados en el departamento de Tolima, Colombia. El propósito fundamental de este quehacer científico fue evaluar el potencial inherente de estas plantas espontáneas para contribuir al mejoramiento de la calidad de los suelos en dichos agroecosistemas (García et al., 2024). Tal empresa se justifica por el rol dual que las arvenses desempeñan: por un lado, pueden aportar equilibrio ecológico y sostenibilidad, e incluso representar un recurso económico adicional (Agüero et al., 2018, citado en García et al. 2024, p. 2); por otro, un manejo inadecuado puede derivar en pérdidas productivas debido a la competencia con el cultivo principal (Blanco, 2016, citado en García et al., 2024, p. 2).

En este contexto, el análisis metódico de García et al. buscó trascender los enfoques convencionales de evaluación de sistemas cafetaleros, que tradicionalmente se han limitado a la rentabilidad financiera, obviando las particularidades ecológicas y los servicios ecosistémicos potenciales. La investigación se orientó, por tanto, a responder interrogantes clave tales como: ¿cuál es la magnitud de la biomasa arvense generada bajo diferentes manejos agronómicos y escenarios de agrobiodiversidad? ¿Cómo varía la composición de macronutrientes en esta biomasa? Y, ¿de qué manera influyen factores como el tipo de finca, la época del año y la localización específica dentro de los transectos en la cantidad y diversidad de las especies arvenses presentes? Este abordaje integral resulta esencial para una valoración holística de los sistemas de producción de café.

4.2. Objetivos y metodología aplicada

El propósito central de la investigación emprendida por García et al. (2024) fue la determinación cuantitativa de la biomasa producida por las comunidades de arvenses y la caracterización de su diversidad en tres sistemas distintos de producción de café (*Coffea arabica* L.), los cuales se distinguían por sus manejos agronómicos y los escenarios de agrobiodiversidad que representaban. Esta indagación, de carácter aplicado y con un enfoque cuantitativo descriptivo, se desarrolló con la finalidad última de evaluar el potencial de esta biomasa arvense para coadyuvar al mejoramiento de la calidad de los suelos en los cafetales estudiados, ubicados en la vereda La Marcada, municipio del Líbano, departamento de Tolima, Colombia (Latitud: 04°55" N, Longitud: 75°10" O). Los objetivos específicos inferidos de este planteamiento general incluyeron la cuantificación de la biomasa aérea y radicular de las arvenses, la determinación de su diversidad mediante los índices de Shannon y Simpson, y el análisis de la composición de macro y micronutrientes presentes en dicha biomasa (García et al., 2024, pp. 1, 6).

Para alcanzar dichos propósitos, se implementó un diseño experimental multilocacional que involucró la recolección aleatoria de muestras en tres fincas, caracterizadas como: Finca Convencional (Tipo I), con cultivo exclusivo de café y aplicación de insumos químicos de síntesis; Finca Orgánica (Tipo II), un policultivo asociado al café con manejo orgánico y presencia de diversas poblaciones vegetales; y Finca Mixta (Tipo III), con cultivo de café en arreglos y uso equilibrado de fertilizantes y plaguicidas de síntesis. En cada una de estas fincas, se establecieron cinco transectos de 50 m x 2 m, distribuidos al azar y separados aproximadamente por 20 cm. A partir de estos quince transectos, se tomaron un total de 135 muestras de arvenses (aproximadamente 500 g de material fresco por muestra, incluyendo partes aéreas y radicales) en un espacio de 10 m² por réplica, con tres réplicas por transecto, durante tres épocas distintas del año 2019: lluvia, sequía y cosecha. Las muestras colectadas fueron procesadas en el Laboratorio de Botánica de la Universidad de Tolima.

El tratamiento de las muestras para el cálculo de la biomasa arvense comprendió el secado en estufa a 65°C durante 48 horas, seguido de la linealización de los datos de peso seco para su correcto procesamiento estadístico, dada la no uniformidad de las varianzas. La evaluación de los cuatro factores (tipo de finca, época, transectos y cuadrantes) como aportantes de biomasa al sistema se realizó mediante una prueba de ANOVA multifactorial 3x3x5, en un diseño de Parcela Doblemente Dividida en Bloques Completamente al Azar con tres mediciones en cuadrantes de 1 m², utilizando la prueba de Tukey para la comparación de efectos ($\alpha=0,05$) (García et al., 2024, p. 6). Esta aproximación metodológica se alinea con los procedimientos generales para la cuantificación de biomasa descritos en las secciones 2.1 y 2.2 de este libro. En cuanto al análisis químico de la biomasa, se determinaron las concentraciones de nitrógeno (N) mediante el sistema micro Kjeldahl, y los porcentajes de los macronutrientes azufre (S), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na), así como las partes por millón de los micronutrientes hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), manganeso (Mn) y boro (B) por espectrometría de absorción, procedimientos cónsonos con lo expuesto en la sección 2.3. Para establecer

la diversidad de las especies arvenses encontradas, se aplicaron los índices de Shannon (H) y de Simpson (D), cuyas bases teóricas se detallan en la sección 3.1, empleando las ecuaciones $H = \sum (P_i)(\ln P_i)$ y $D = \sum n_i(n_i-1) / N(N-1)$. El procesamiento de todos los datos se efectuó utilizando los paquetes estadísticos RStudio, Statgraphics Centurion XVII y Microsoft Excel. La Tabla 16 resume las variables consideradas en el estudio.

Tabla 16 Variables Principales y Factores Considerados en la Investigación

Categoría de Variable	Variable Específica	Tipo de Medición/Factor	Unidades/Niveles
Variables Dependientes	Biomasa Arvense	Peso seco de la muestra de arvense.	g/m ²
	Diversidad de Arvenses	Índice de Shannon (H), Índice de Simpson (D).	Adimensional.
	Composición Química de Arvenses	Contenido de N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Fe, Zn, Cu, Mn, B.	% para macronutrientes, ppm para micronutrientes.

Factores Principales (ANOVA)	Tipo de Finca	Tres categorías: Convencional (Tipo I), Orgánica (Tipo II), Mixta (Tipo III).	Categorico (3 niveles).
	Época de Muestreo	Tres periodos: Lluvia, Sequía, Cosecha.	Categorico (3 niveles).
	Transecto	Cinco transectos por finca.	Categorico (5 niveles, anidado en finca).
	Cuadrante	Tres mediciones (submuestras o cuadrantes) por transecto en cada época.	Categorico (3 niveles, anidado en transecto).
Variables Descriptivas	Localización	Vereda La Marca, Libano, Tolima, Colombia.	Coordenadas: Lat: 04°55" N, Lon: 75°10"O.
	Diseño Experimental (para biomasa)	Parcela Doblemente Dividida en Bloques Completamente al Azar.	ANOVA multifactorial 3x3x5.
	Número de Muestras de Biomasa (total)	135 muestras (3 fincas x 5 transectos x 3 épocas x 3 cuadrantes).	-
	Número de Especies Arvenses Identificadas (total)	55 especies diferentes.	-

Fuente Elaboración propia a partir de García et al. (2024).

4.3. Principales hallazgos y discusión

La investigación de García et al. (2024) reveló una considerable diversidad taxonómica y variabilidad en la composición química de las comunidades de arvenses presentes en los tres sistemas de producción de café estudiados. Respecto a la cuantificación de la biomasa, se observaron diferencias significativas influenciadas tanto por el tipo de manejo de la finca como por la estacionalidad, mientras que los análisis de diversidad evidenciaron una mayor complejidad en las fincas bajo manejo orgánico.

4.3.1. Taxonomía y Composición Química Arvense

El proceso de recolección e identificación de especies arrojó un total de 55 especies distintas distribuidas en los tres sistemas de producción cafetalera. La tabla 17 detalla la lista completa de estas especies, entre las que se encuentran *Oplismenus burmannii*, *Commelina diffusa*, *Spermacoce alata*, *Emilia sonchifolia* y *Cyperus ferax*, entre muchas otras, reflejando una amplia gama de familias botánicas.

Tabla 17 Especies arvenses identificadas.

N°	Nombre científico	N°	Nombre científico
1	<i>Oplismenus burmannii</i> (Retz) P, Beauv	29	<i>Sida acuta</i> Burm f
2	<i>Commelina difusa</i> Burm f	30	<i>Hyptis atrorubens</i> Poit
3	<i>Spermacoce alata</i> DC	31	<i>Rottboellia exaltata</i> Ktze
4	<i>Plantago rugelli</i> Decne	32	<i>Cenchrus</i> sp.
5	<i>Emilia sonchifolia</i> (L) DC	33	<i>Euphorbia heterophylla</i> L.
6	<i>Drymaria cordata</i> (L) Willd	34	<i>Impatiens balsamina</i> L.
7	<i>Oxalis corniculata</i> L.	35	<i>Cyperus ferax</i> (L) Rich
8	<i>Bidens pilosa</i> L	36	<i>Synedrella nudiflora</i> (L) Gaerth
9	<i>Browalia americana</i> L	37	<i>Salvia palaefolia</i> H.B.K.
10	<i>Galinsoga parviflora</i> Cav	38	<i>Digitaria sanguinalis</i> (L) Scop

11	<i>Poligonum hydropiperoides</i>	39	<i>Euphorbia hirta</i> L.
12	<i>Oxalis latifolia</i> H.B.K.	40	<i>Canna coccinea</i> Mill
13	<i>Cuphea racemosa</i> (L) Spreng	41	<i>Eleusine indica</i> (L) Gaerth
14	<i>Stellaria</i> sp.	42	<i>Setaria geniculata</i> (Lam) Beauv
15	<i>Tradescantia cumanensis</i> L.	43	<i>Brassica alba</i> Boiss
16	<i>Astrephia chaerophylloides</i> DC	44	<i>Amaranthus dubius</i> Mart
17	<i>Hipoxis decumbens</i> L.	45	<i>Cyathula achyranoides</i> H.B.K.
18	<i>Kohleria spicata</i> H.B.K.	46	<i>Thunbergia alata</i>
19	<i>Paspalum macrophyllum</i> H.B.K.	47	<i>Dichromena ciliata</i>
20	<i>Desmodium tortuosum</i> (Sw) D.C.	48	<i>Ipomoea brífida</i>
21	<i>Pennisetum purpureum</i> Schum	49	<i>Jussiaea suffruticosa</i> L
22	<i>Iresine celosia</i> L	50	<i>Phyllanthus niruri</i> L
23	<i>Blechnum pyramidatum</i> (Lam) Urban	51	<i>Paspalum conjugatum</i> Bergius
24	<i>Acmella mutisii</i> Cass	52	<i>Boehmeria</i> sp.
25	<i>Coffea arábica</i>	53	<i>Ageratum</i> sp.
26	<i>Ctenitis ampla</i>	54	<i>Fleischmannia</i> sp.
27	<i>Verbena littoralis</i> H.B.K.	55	<i>Acmella linnaei</i> Cass
28	<i>Siegesbeckia jorullensis</i>		

El análisis químico promedio de estas 55 especies de arvenses, cuyos detalles se presentan en la tabla 18, indicó que los macronutrientes más abundantes fueron el potasio (K), el nitrógeno (N) y el calcio (Ca).

Tabla 18 Promedio de composición química de arvenses (n=55 especies).

Variable	n	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Mín	Máx
N%	55	2.75	0.76	0.57	27.48	1.25	4.4
P%	55	0.12	0.03	1.10E-03	28.28	0.05	0.19
K%	55	3.49	1.3	1.68	37.21	0.7	8.48
Ca%	55	2.42	2.28	5.2	94.12	0.02	10.82
Mg%	55	2.05	1.28	1.65	62.7	0.06	5.78
S%	55	0.21	0.1	0.01	47.8	0.01	0.51
B mg/kg	55	60.15	43.36	1880.36	72.1	5.48	225.1
Fe mg/kg	54	1320.29	903.65	816589.98	68.44	7.27	4312.1
Mn mg/ kg	55	75.37	147.65	21801.19	195.91	1.04	1082.1
Z mg/kg	55	67.58	65.39	4276.16	96.77	2.68	390.8
Na mg/kg	55	396.78	106.56	11354.56	26.86	187.6	625.4
Cu mg/kg	55	22.55	13.47	181.39	59.72	1.31	51.46
SiO2 %	55	3.96	4.25	18.09	107.41	0	18.42

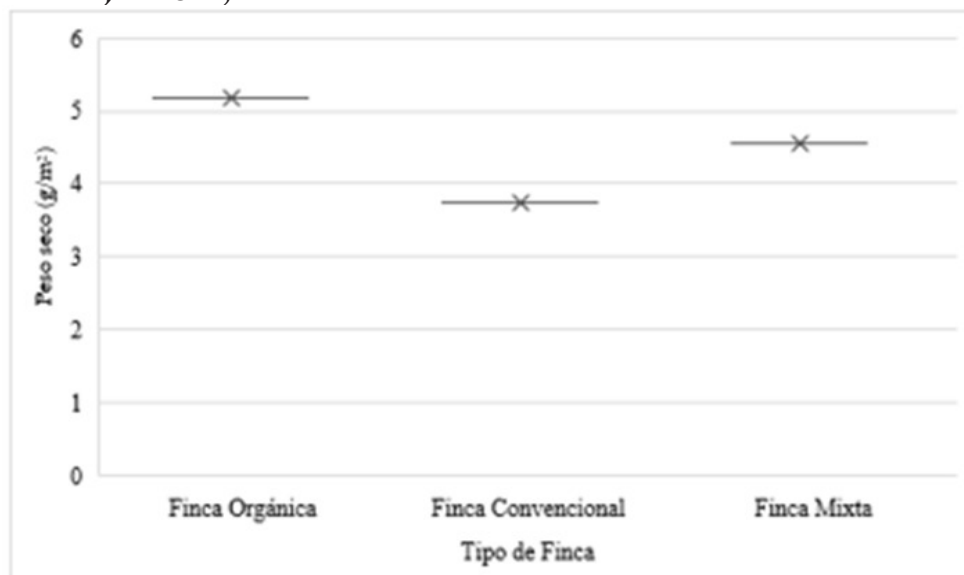
Las medias para K, N y Ca fueron de 3.49%, 2.75% y 2.42%, respectivamente, con valores máximos observados de 8.48%, 4.4% y 10.82%. En contraste, el fósforo (P) y el azufre (S) mostraron las menores cantidades promedio, con valores máximos de 0.19% y 0.51%, respectivamente. Entre los micronutrientes, el hierro (Fe) fue el más abundante, con una media de 1320.29 mg/kg, seguido por el sodio (Na) con 396.78 mg/kg. El manganeso (Mn) también presentó un valor máximo considerable de 75.39 mg/kg. Los altos coeficientes de variación para todas las propiedades químicas analizadas en las arvenses, como se puede observar en la tabla

18, demuestran una significativa variabilidad en las características y propiedades nutricionales entre las 55 especies encontradas. Esta variabilidad subraya el potencial diverso de las arvenses como enmienda, dependiendo de la especie dominante en un momento dado. Leyva et al. (2018), al estudiar propiedades de suelos en diferentes usos agropecuarios, también encontraron que la incorporación de biomasa diversa puede tener efectos positivos en la calidad del suelo, lo cual es consistente con el potencial aquí observado.

4.3.2. Cuantificación de Biomasa Arvense

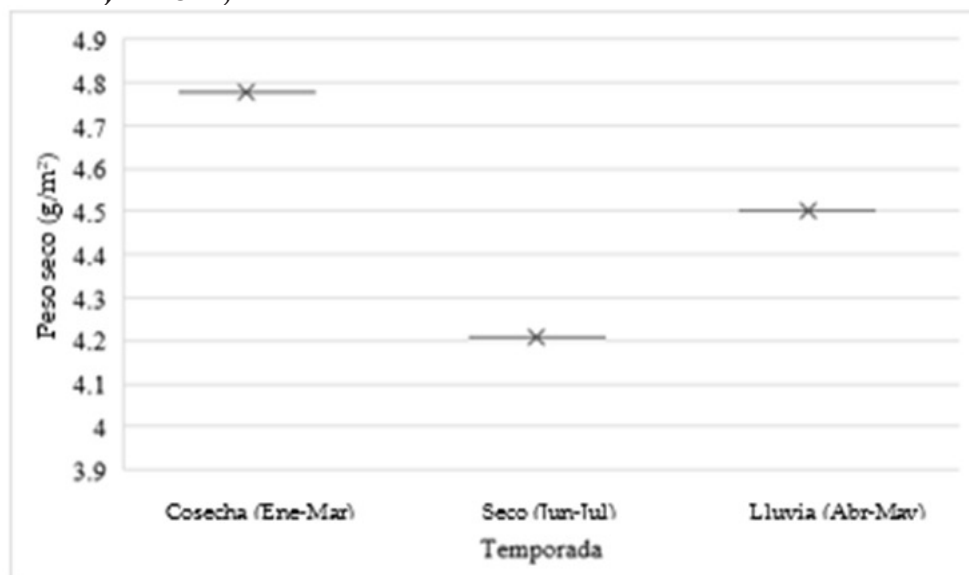
Los resultados referentes a la biomasa arvense (peso seco) indicaron diferencias significativas entre los tres tipos de finca. La finca bajo manejo orgánico (Tipo II) presentó el mayor contenido promedio de biomasa arvense, alcanzando 5.17 g/m^2 . En contraposición, la finca con manejo convencional (Tipo I) registró la menor cantidad, con un promedio de 3.75 g/m^2 . La finca con sistema de producción mixta (Tipo III) se situó en un valor intermedio, con 4.56 g/m^2 . Estas diferencias, ilustradas en la Figura 1, sugieren que la ausencia de herbicidas químicos en el sistema orgánico favorece una mayor acumulación de biomasa arvense, mientras que el control químico en el sistema convencional la limita.

Figura 1 Gráfico de medias de biomasa arvense por tipo de finca, según prueba de Tukey con $\alpha=0,05$.



La influencia de la época del año también fue estadísticamente significativa, como se observa en la Figura 2. El mayor valor de biomasa se obtuvo durante la época de cosecha (4.78 g/m^2), seguido por el periodo de lluvia (4.50 g/m^2), y el menor valor se registró en la época seca (4.21 g/m^2).

Figura 2 Gráfico de medias de biomasa arvense por época del año, según prueba de Tukey con $\alpha=0,05$.



Esta tendencia es consistente con la disminución esperada de arvenses durante periodos de estrés hídrico y su proliferación con el aumento de la humedad. Vadell et al. (2016) también encontraron que la aplicación de abono verde, derivado de diversos cultivos y arvenses, incrementaba la biomasa microbiana y el nitrógeno total, lo que se alinea con la idea de que una mayor biomasa arvense, como la observada en la finca orgánica, podría tener efectos positivos en el suelo. El análisis multifactorial de la biomasa, considerando tipo de finca, época del año, transecto y cuadrante como efectos principales, mostró que todos estos factores fueron estadísticamente significativos, indicando que la biomasa es dependiente de cada uno de ellos con un nivel de confianza del 95%. La variación de la biomasa respecto al tipo de finca fue especialmente relevante, confirmando que los diferentes sistemas productivos pueden generar cantidades disímiles de biomasa arvense. Martínez y Leyva (2014) ya habían expresado que la cantidad de biomasa generada en la actividad agrícola depende intrínsecamente del tipo de cultivo y del sistema de producción. La interacción de tres factores

(cuadrante – transecto – tipo de finca) también fue significativa, lo que es esperable dado que la distribución espacial de las arvenses (cuadrantes y transectos) está supeditada a las características y el manejo de cada finca.

4.3.3. Diversidad de Arvenses

La evaluación de la diversidad de especies arvenses mediante los índices de Shannon (H) y Simpson (D) reveló una mayor diversidad en la finca de tipo II (orgánica), como se detalla en el tabla 19.

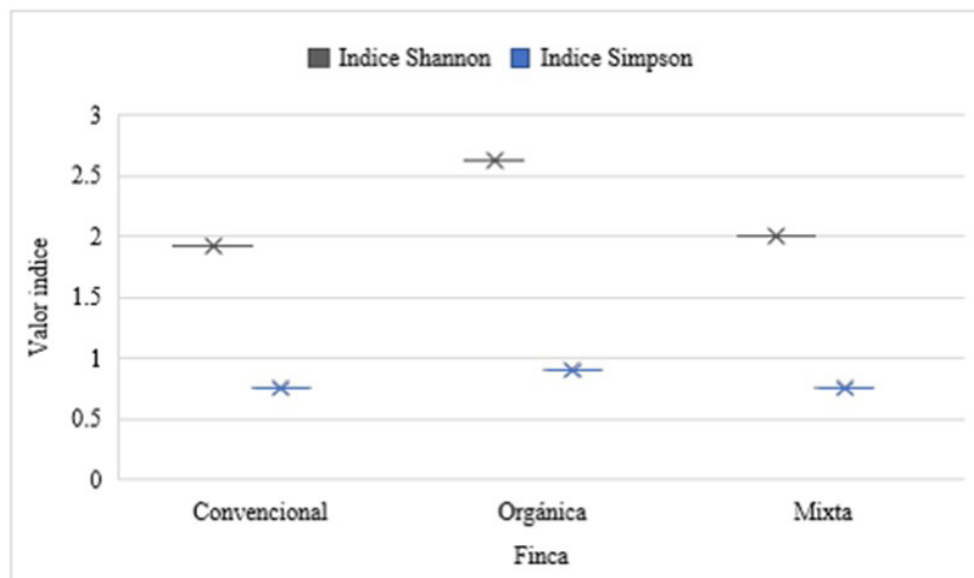
Tabla 19 Índices de Shannon y Simpson en las 3 fincas del estudio.

Finca	Índice de Shannon	Valor numérico	Índice de Simpson	Valor numérico
Tipo I	H	1.925	D	0.249
	Hmax	3.496	Rango D	0.20-0.30
	Uniformidad	0.55	Rango 1-D	0.70 – 0.80
	Índice de Diversidad de Shannon	1.925	Índice de Diversidad de Simpson = 1 -D	0.751
Tipo II	H	2.62	D	0.103
	Hmax	3.4	Rango D	0.10-0.20
	Uniformidad	0.77	Rango 1-D	0.80 – 0.9
	Índice de Diversidad de Shannon	2.62	Índice de Diversidad de Simpson = 1 -D	0.896
Tipo III	H	2	D	0.246
	Hmax	3.46	Rango D	0.20-0.30
	Uniformidad	0.57	Rango 1-D	0.70 – 0.80
	Índice de Diversidad de Shannon	2	Índice de Diversidad de Simpson = 1 -D	0.753

Nota. H =índice de Shannon, $H_{\text{máx}}$ =índice máximo, D =índice de Simpson.

La finca orgánica (Tipo II) presentó un índice H de 2.62, superior al de las fincas Tipo I (convencional, $H=1.925$) y Tipo III (mixta, $H=2$). Esta mayor diversidad en el sistema orgánico, que implica un cultivo de café asociado a plátano, es consistente con la expectativa de que manejos menos intensivos y con mayor diversificación estructural favorecen una mayor riqueza y equitatividad de especies arvenses. La uniformidad de H también fue mayor en la finca Tipo II (0.77), indicando una distribución de individuos más homogénea entre las especies presentes. En contraste, Castro et al. (2019), al analizar arvenses en cafetales de la selva central peruana, encontraron valores de H que oscilaron entre 1.28 y 2.06, siendo el valor más alto consistente con fincas convencionales y mixtas, lo cual difiere de los hallazgos de García Arboleda et al. (2024) para el sistema orgánico. El Índice de Simpson (D), que indica la probabilidad de que dos individuos tomados al azar sean de la misma especie (valores más bajos indican mayor diversidad), fue menor en la finca Tipo II (0.103) en comparación con las fincas Tipo I (0.249) y Tipo III (0.246), corroborando la mayor diversidad en el sistema orgánico. Salmerón et al. (2017) concluyeron que zonas con menor intervención suelen ser más homogéneas, lo que podría explicar la mayor diversidad (menor dominancia) en la finca orgánica, mientras que Cardenal et al. (2017) sugirieron que la labranza (común en algunos sistemas orgánicos) puede favorecer la dominancia de ciertas especies, un aspecto que matiza la interpretación. La Figura 3 ilustra gráficamente estas comparaciones.

Figura 3 Comparación de los índices de Shannon y Simpson.



4.4. Conclusiones y recomendaciones

La investigación acometida por García et al. (2024) culmina con hallazgos significativos que resaltan el valor intrínseco de las comunidades arvenses en los sistemas de producción cafetalera. Se constató de manera concluyente que las arvenses presentes en los tres tipos de fincas estudiadas (convencional, orgánica y mixta) no solo constituyen una biomasa considerable, sino que también albergan una notable concentración de micro y macronutrientes. Este contenido nutricional, al ser incorporado al suelo mediante la descomposición de la biomasa arvense, tiene el potencial de aportar beneficios sustanciales tanto para la fertilidad edáfica como para la nutrición del cultivo de café, tal como lo han sugerido revisiones sobre el impacto de residuos de cosecha en la salud del suelo (Fu et al., 2021). Particularmente, el sistema de producción orgánico se distinguió por presentar una mayor cantidad de biomasa arvense y una mayor diversidad de especies en comparación con los sistemas convencional y mixto, lo que sugiere una relación directa entre las prácticas de manejo menos intensivas

y la expresión de la flora espontánea. Derivado de estos resultados, se infiere la recomendación de reconsiderar el papel de las arvenses en los agroecosistemas cafetaleros, transitando desde una perspectiva predominantemente centrada en su control como competidoras hacia una valoración de su potencial como fuente de elementos químicos beneficiosos y como indicadores de la salud y complejidad del sistema. La notable variabilidad en la composición química entre las 55 especies de arvenses identificadas, con importantes concentraciones de K, N, Ca y Fe, sugiere que un manejo selectivo o la promoción de ciertas comunidades arvenses podrían optimizar su contribución al ciclo de nutrientes, en línea con lo propuesto por Heikkinen et al. (2021) sobre el control de la descomposición por la composición química. La valoración de los sistemas orgánicos, que demostraron un mayor aporte de biomasa y diversidad arvense, se alinea con la búsqueda de prácticas agrícolas más sostenibles y con menor dependencia de insumos externos.

CAPÍTULO V

REFLEXIONES FINALES

Al concluir este recorrido por la intrincada relación entre las arvenses, la agrobiodiversidad y la sostenibilidad de los sistemas cafetaleros, emerge una perspectiva integradora que trasciende los análisis particulares de cada componente. Este trabajo ha buscado dilucidar no solo el papel ecológico y agronómico de las arvenses (Capítulo I), sino también su contribución material en términos de biomasa y composición nutricional (Capítulo II), así como la importancia de la diversidad vegetal general para la productividad y estabilidad de los agroecosistemas (Capítulo III). La investigación original de García Arboleda et al. (Capítulo IV), al cuantificar la biomasa y diversidad arvense en tres sistemas de producción de café en Tolima, Colombia, y analizar su contenido de nutrientes, ha proporcionado una evidencia empírica valiosa que se enmarca y dialoga con este panorama más amplio. Se constató que las arvenses presentes en los sistemas estudiados poseen un considerable reservorio de micro y macronutrientes que, sumado a su biomasa, representa un aporte significativo potencial para la producción de café, destacándose el sistema orgánico por su mayor biomasa y diversidad arvense (García et al., 2024).

Esta conclusión específica refuerza el mensaje clave de que las arvenses, lejos de ser meros competidores, son componentes funcionales de la agrobiodiversidad cuya gestión informada puede ser crucial para la salud del suelo y la productividad sostenible.

No obstante la evidencia acumulada, la revisión de la literatura y los propios hallazgos del estudio de García et al. (2024) también señalan la persistencia de significativas lagunas de conocimiento y desafíos considerables para la implementación de prácticas de manejo que integren positivamente a las arvenses. Uno de los principales desafíos radica en la adopción por parte de los agricultores de enfoques que valoren los servicios ecosistémicos de las arvenses, superando la percepción tradicional de que toda vegetación espontánea debe ser erradicada (Tilden et al., 2024). Esto se ve exacerbado por la falta de políticas de apoyo específicas y la escasa disponibilidad de asistencia técnica que promueva un manejo ecológico de arvenses, como se infiere de las revisiones sobre iniciativas de sostenibilidad en el café (Wright et al., 2024). A nivel científico, persiste la necesidad de comprender mejor las interacciones específicas entre especies de arvenses, el cultivo de café y otros componentes del agroecosistema, incluyendo el microbioma del suelo y las redes tróficas asociadas, como lo sugieren las investigaciones sobre la calidad de enmiendas y su efecto en las comunidades microbianas (Heikkinen et al., 2021). Aunque se ha avanzado en la cuantificación de la biomasa (Vallejos et al., 2024; Terán et al., 2018) y la caracterización de su composición química (Fu et al., 2021; Uwamahoro et al., 2023; Stark et al., 2019), aún se requiere una mayor investigación sobre cómo la diversidad funcional de las arvenses, y no solo su riqueza o biomasa, impacta los servicios ecosistémicos. La sincronización entre la liberación de nutrientes de la biomasa arvense y las demandas del cafeto, como apuntan Hafez et al. (2021), es un área que merece mayor atención para optimizar el uso de arvenses como abonos verdes o mulch.

Mirando hacia el futuro, la investigación en este campo debe orientarse hacia una comprensión más holística y aplicada de las interacciones en los agroecosistemas cafetaleros. Se vislumbran líneas prometedoras como el estudio de las redes tróficas complejas que las arvenses pueden sustentar y cómo estas influyen en el control biológico de organismos fitófagos del café (Tilden et al., 2024). La investigación sobre el microbioma del suelo asociado a diferentes comunidades de arvenses y su impacto en el ciclado de nutrientes y la salud del cafeto es otra frontera excitante, donde los avances en metagenómica podrían ofrecer herramientas poderosas (Zhao et al., 2018). El desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías, como sensores remotos de alta resolución y modelos de simulación basados en inteligencia artificial, podrían revolucionar el monitoreo de la diversidad de arvenses y la predicción de su impacto en la productividad y los servicios ecosistémicos a diferentes escalas (Maimaitijiang et al., 2020). Fundamentalmente, se requiere un mayor énfasis en el desarrollo de enfoques participativos que involucren activamente a los agricultores en el co-diseño y la evaluación de sistemas cafetaleros más biodiversos y resilientes, reconociendo y valorando su conocimiento tradicional y sus prioridades socioeconómicas (Cleves et al., 2022). La investigación socioeconómica sobre la viabilidad, los costos de transición y los impactos en los medios de vida de la adopción de prácticas agroecológicas que integren el manejo de arvenses es igualmente crucial para fomentar su adopción a gran escala (Adjimoti & Kwadzo, 2018).

Las implicaciones del conocimiento generado en este campo trascienden el ámbito puramente científico o agronómico, extendiéndose a las esferas política, social y educativa. La evidencia sobre los beneficios de la agrobiodiversidad y el manejo ecológico de arvenses debería informar el diseño de políticas agrícolas y ambientales que incentiven prácticas sostenibles, en lugar de promover la simplificación y la dependencia de insumos externos (Wright et al., 2024). Los programas de extensión agrícola tienen un rol crucial que desempeñar en la disseminación de este conocimiento y en la capacitación de los agricultores en técnicas de manejo integrado de arvenses que valoren sus servicios ecosistémicos (Tilden et al., 2024).

Asimismo, es necesario un esfuerzo educativo más amplio para concienciar a los consumidores y a la sociedad en general sobre la importancia de la agrobiodiversidad para la producción de alimentos de calidad y la conservación del medio ambiente, promoviendo así una demanda de productos provenientes de sistemas agrícolas sostenibles (González et al., 2022). Este libro, al sintetizar el conocimiento actual y destacar los hallazgos de la investigación de García et al. (2024), aspira a contribuir a este esfuerzo colectivo.

En última instancia, la gestión de las arvenses en los cafetales se presenta no como un problema a erradicar, sino como una oportunidad para repensar y rediseñar nuestros sistemas de producción agrícola hacia modelos más integrados, resilientes y en armonía con los procesos ecológicos. El camino hacia una caficultura verdaderamente sostenible exige una profunda comprensión de la complejidad de la agrobiodiversidad y un compromiso renovado con la investigación participativa y la innovación adaptada a las realidades locales. La valoración y el manejo inteligente de las comunidades arvenses, como componentes funcionales clave, son un paso esencial en esta dirección, ofreciendo una vía prometedora para mejorar la salud del suelo, la productividad y la sostenibilidad general de los agroecosistemas cafetaleros del siglo XXI y más allá.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adjimoti, G., & Kwadzo, G. (2018). Crop diversification and household food security status: evidence from rural Benin. *Agriculture & Food Security*, 7, 82. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0233-x>
- Agüero, R., Rodríguez, A., González, M., Portuguese, P. & Brenes S. (2018). Abundancia y cobertura de arvenses bajo manejo convencional y orgánico de café y banano. *Agron. Mesoamericana*, 29 (1): 85-93. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.28053>
- Augousti, A., Atkins, N., Ben, A., Bignall, S., Hunter, G., Tunnicliffe, M., & Radosz, A. (2021). A new diversity index. *Physical Biology*, 18(6), 066004. <https://doi.org/10.1088/1478-3975/ac264e>
- Barros, V., Thimothee, J., Rodrigues, R., Gonçalves, A., Medeiros, F., Ferreira, A., & Carvalho, G. (2024). Coverage plants in coffee production systems as weed control. *Coffee Science*, 19, e192171. <http://sbicafe.ufv.br/handle/123456789/14643>
- Blanco, Y. (2016). El rol de las arvenses como componente en la biodiversidad de los agroecosistemas. *Cult. Trop*, 37 (4): 34-56. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10964.19844>

- Cardenal, Z., Torres, D., Doctor, M. & Morillo, A. (2017). Caracterización del banco activo de semillas en cultivos de zanahoria del municipio de Villa Pinzón (Cundinamarca). *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient*, 19(2): 297-306. <https://doi.org/10.31910/rudca.v19.n2.2016.83>
- Castro, V., Alvarado, L., Borjas, R. & Julca, A. (2019). Comunidad de malezas asociadas al cultivo de “café” *Coffea arabica* (Rubiaceae) en la selva central del Perú. *Arnaldoa*, 26 (3): 977-990. <http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26308>
- Chatterjee, N., Nair, P., Nair, V., Bhattacharjee, A., de Melo, E., Muschler, R., & Noponen, M. (2020). Do Coffee Agroforestry Systems Always Improve Soil Carbon Stocks Deeper in the Soil?—A Case Study from Turrialba, Costa Rica. *Forests*, 11(1), 49. <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/1/49>
- Cleves, A., Youkhana, E., & Toro, J. (2022). A Method to Assess Agroecosystem Resilience to Climate Variability. *Sustainability*, 14(14), 8588. <https://doi.org/10.3390/su14148588>
- Daba, D., & Soromessa, T. (2019). The accuracy of species-specific allometric equations for estimating aboveground biomass in tropical moist montane forests: case study of *Albizia grandibracteata* and *Trichilia dregeana*. *Carbon Balance and Management*, 14, 18. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0134-8>
- Daly, A., Baetens, J., & De Baets, B. (2018). Ecological Diversity: Measuring the Unmeasurable. *Mathematics*, 6(7), 119. <https://doi.org/10.3390/math6070119>
- Fiore, V., Borrello, M., Carlucci, D., Giannoccaro, G., Russo, S., Stempfle, S., & Roselli, L. (2024). The socio-economic issues of agroecology: a scoping

- review. *Agricultural and Food Economics*, 12(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s40100-024-00311-z>
- Fu, B., Chen, L., Huang, H., Qu, P., & Wei, Z. (2021). Impacts of crop residues on soil health: a review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 164-173. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1948354>
- García, D., Dumas, P., Prudhomme, R., Kremen, C., & Aubert, P. (2024). A safe agricultural space for biodiversity. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1328800. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1328800>
- González, A., Carvalheiro, L., Garibaldi, L., & Metzger, J. (2022). Positive forest cover effects on coffee yields are consistent across regions. *Journal of Applied Ecology*, 59(1), 330–341. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14057>
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Seppänen, L., Luostarinen, S., Fritze, H., Pennanen, T., Peltoniemi, K., Velmala, S., Hanajik, P., & Regina, K. (2021). Chemical composition controls the decomposition of organic amendments and influences the microbial community structure in agricultural soils. *Carbon Management*, 12(4), 359-376. <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1947386>
- Hosokawa, S., Momota, K., Chariton, A., Naito, R., & Nakamura, Y. (2021). The use of diversity indices for local assessment of marine sediment quality. *Scientific Reports*, 11, 14991. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94636-0>
- Konopiński, M. (2020). Shannon diversity index: a call to replace the original Shannon's formula with unbiased estimator in the population genetics studies. *PeerJ*, 8, e9391. <https://doi.org/10.7717/peerj.9391>

- Kumar, P., Dobriyal, M., Kale, A., Pandey, A., Tomar, R., & Thounaojam, E. (2022). Calculating forest species diversity with information-theory based indices using sentinel-2A sensor's of Mahavir Swami Wildlife Sanctuary. *PLOS ONE*, 17(5), e0268018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268018>
- Leyva, S., Baldoquín, A., Reyes, M. (2018). Propiedades de los suelos en diferentes usos agropecuarios, Las Tunas, Cuba. *Rev. de Cienc. Agr*, 35 (1), 36-47. DOI: <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.81>
- Martínez, A. & Leyva, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cult. Trop*, 35 (1): 11-20.
- Martinez, H., López, S., Santos, R., Baptistella, J., & Mazzafera, P. (2024). Agromonic practices toward coffee sustainability. A review. *Scientia Agricola*, 81, e20220277. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0277>
- Meireles, I., Matsumoto, S., Reis, C., Pereira, L., Oliveira, U., Barreto, P., Prado, T., & Ramos, P. (2019). Estimativa da biomassa de cafeeiros em sistemas agroflorestais sob manejo orgânico e convencional em diferentes arranjos. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, (53), 134-147. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190488>
- Monteiro, A., & Santos, S. (2022). Sustainable Approach to Weed Management: The Role of Precision Weed Management. *Agronomy*, 12(1), 118. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010118>
- Neve, P., Barney, J., Buckley, Y., Cousens, R., Graham, S., Jordan, N., Lawton, A., Liebman, M., Mesgaran, M., Schut, M., Shaw, J., Storkey, J., Barai-bar, B., Baucom, R., Chalak, M., Childs, D., Christensen, S., Eizenberg, H., Fernandez, C., Williams, M. (2018). Reviewing research priorities in

- weed ecology, evolution and management: a horizon scan. *Weed Research*, 58(4), 250–258. <https://doi.org/10.1111/wre.12304>
- Nkonya, E. (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://cgspace.cgiar.org/items/c972baa1-0750-4191-8e41-bd4243823f8b>
- Ochoa, M., Mantovani, J., Bortolotti, A., Rezende, T., & Landgraf, P. (2020). Soil attributes and coffee yield in an agroforestry system. *Coffee Science*, 15, e151676. <https://doi.org/10.25186/.v15i.1676>
- Ortiz, A., Outhwaite, C., Dalin, C., & Newbold, T. (2021). A review of the interactions between biodiversity, agriculture, climate change, and international trade: research and policy priorities. *One Earth*, 4(1), 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.12.008>
- Roberts, J., & Florentine, S. (2024). Advancements and developments in the detection and control of invasive weeds: a global review of the current challenges and future opportunities. *Weed Science*, 72(2), 205–215. <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.13>
- Ruiz, C., Hurtado, S., Carrillo, Y., & Parrado, C. (2019). Lo que sabemos y no sabemos sobre los sistemas agroforestales tropicales y la provisión de múltiples servicios ecosistémicos. Una revisión. *Ecosistemas*, 28(3), 26–35. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1697>
- Salmerón, A., Geadá, G. & Fagilde, M. (2017). Propuesta de un índice de diversidad funcional. Aplicación a un bosque semideciduo micrófilo de Cuba Oriental. *Bosque*, 38 (3): 457–466. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000300003>

- Santos, C., Oliveira, A., Moreira, E., Gonçalves, L., Viana, M., Neto, M., & Lana, Â. (2023). Influence of shade on productivity and nutritional value of *Urochloa decumbens* in silvopastoral systems using different spatial arrangements of eucalyptus cultivars. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 11(2), 169–182. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(11\)169-182](https://doi.org/10.17138/TGFT(11)169-182)
- Stark, P., Miller, D., Carlson, T., & de Vasquez, K. (2019). Open-source food: Nutrition, toxicology, and availability of wild edible greens in the East Bay. *PLOS ONE*, 14(1), e0202450. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202450>
- Terán, M., Rodríguez, G., Enríquez, J., & Velasco, V. (2018). Biomasa aérea y ecuaciones alométricas en un cafetal en la Sierra Norte de Oaxaca. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 217-226. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1444>
- Tilden, G., Aranka, J., & Curry, G. (2024). Ecosystem services in coffee agroforestry: their potential to improve labour efficiency amongst smallholder coffee producers. *Agroforestry Systems*, 98, 383–400. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00917-0>
- Uwamahoro, H., Kpomblekou-A., Mortley, D., & Quarcoo, F. (2023). Organic vegetable crop residue decomposition in soils. *Heliyon*, 9(3), e14529. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14529>
- Vadell, J.; Pascual, P. & Adrover, M. (2016). Evaluación de especies cultivadas y arvenses como abonos verdes. *AE. Rev. Agroec. de Div.*, (25): 24-25.
- Vallejos, G., Gaona, N., Pichis, R., Ordoñez, L., García, P., Quinteros, A., Lozano, A., Saavedra, J., Tuesta, J., Reategui, K., Macedo, W., Baselly, J., & Marín, C. (2024). Carbon reserves in coffee agroforestry in the Peruvian

- Amazon. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1410418. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1410418>
- Villarreyna, R., Avelino, J., & Cerda, R. (2020). Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 499-516. <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>
- Westwood, J., Charudattan, R., Duke, S., Fennimore, S., Marrone, P., Slaughter, D., Swanton, C., & Zollinger, R. (2018). Weed Management in 2050: Perspectives on the Future of Weed Science. *Weed Science*, 66(3), 275-285. <https://doi.org/10.1017/wsc.2017.78>
- Wienhold, K., & Goulao, L. (2023). The Embedded Agroecology of Coffee Agroforestry: A Contextualized Review of Smallholder Farmers' Adoption and Resistance. *Sustainability*, 15(8), 6827. <https://doi.org/10.3390/su15086827>
- Wright, D., Bekessy, S., Lentini, P., Garrard, G., Gordon, A., Rodewald, A., Bennett, R., & Selinske, M. (2024). Sustainable coffee: A review of the diverse initiatives and governance dimensions of global coffee supply chains. *Ambio*, 53, 984-1001. <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02003-w>
- Zhang, S., Li, P., Wei, Z., Cheng, Y., Liu, J., Yang, Y., Wang, Y., & Mu, Z. (2022). *Cyperus* (*Cyperus esculentus* L.): A Review of Its Compositions, Medical Efficacy, Antibacterial Activity and Allelopathic Potentials. *Plants*, 11(9), 1127. <https://doi.org/10.3390/plants11091127>
- Zhao, Q., Xiong, W., Xing, Y., Sun, Y., Lin, X., & Dong, Y. (2018). Long-Term Coffee Monoculture Alters Soil Chemical Properties and Microbial Communities. *Scientific Reports*, 8, 6116. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24537-2>



EDITORIAL
NAVEGANTE