



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Suelos en plantaciones de café en la provincia de Loja:

características, clasificación, fertilidad, aptitud y manejo



Carlos Valarezo Manosalvas
Luis Valarezo Manosalvas
Miguel Ángel Villamagua
Pedro Guaya Pauta

Suelos en plantaciones de café en la provincia de Loja:

**características, clasificación, fertilidad,
aptitud y manejo**

Suelos en plantaciones de café en la provincia de Loja:

características, clasificación, fertilidad,
aptitud y manejo

Carlos Valarezo Manosalvas

Luis Valarezo Manosalvas

Miguel Ángel Villamagua

Pedro Guaya Pauta

UNL



unl

Universidad
Nacional
de Loja

Nikolay Aguirre, Ph.D

Rector UNL

Elvia Zhapa Amay, Ph.D

Vicerrectora Académica

Max Encalada, Ph.D

Director de Investigación

**Suelos en plantaciones de café en la provincia de Loja:
características, clasificación, fertilidad, aptitud y manejo**

Autores:

Carlos Valarezo Manosalvas

Luis Valarezo Manosalvas

Miguel Ángel Villamagua

Pedro Guaya Pauta

Revisión por pares Académicos:

Luis Duicela, Ph.D

Max Iñiguez, Mgtr

ISBN digital: 978-9942-671-38-7

Editorial Universitaria - UNL

Universidad Nacional de Loja

Ciudad Universitaria Guillermo Falconí, Loja - Ecuador

Contacto: comision.editorial@unl.edu.ec

Tel: +59372593550

www.unl.edu.ec

Mayo, 2026

Loja, Ecuador



Índice General

Prólogo.....	xv
Prefacio	xxv
Preface.....	xxxí
Agradecimientos	xxxvii

Capítulo 1. Características biofísicas, aspectos socioeconómicos y producción agropecuaria en la provincia de Loja.....39

1.1. Características biofísicas	39
1.1.1. Contexto geográfico y fisiográfico de la Región Sur del Ecuador y la provincia de Loja.....	39
1.1.2. La provincia de Loja en la Región Sur y en el Ecuador	42
1.1.3. Cuencas hidrográficas.....	45
1.1.4. Clima	46
1.1.5. Geología y geomorfología	51
1.1.6. Suelos.....	53
1.1.7. Biomas y zonas de vida	59
1.1.8. Vegetación y uso del suelo.....	61
1.1.9. Desertificación y sequía.....	62
1.2. Aspectos socioeconómicos.....	63
1.2.1. Población	63
1.2.1.1. Población de Ecuador.	63
1.2.1.2. Población de la Provincia de Loja.....	64
1.2.2. Indicadores económicos	67
1.2.2.1. Población económicamente activa (PEA).	67
1.2.2.2. Valor Agregado Bruto (VAB).	68
1.2.2.3. Pobreza y desigualdad.	69
1.3. Producción agropecuaria de la Provincia de Loja.....	70
1.4. Referencias bibliográficas.....	74

Capítulo 2. El café: visión e importancia mundial, nacional y local 79

2.1. Importancia y problemática mundial del café	79
2.1.1. Aspectos generales	79
2.1.2. Producción mundial, superficie cosechada y rendimientos	80
2.1.3. Comercialización del café	82
2.1.4. Importancia económica y social del café.....	84
2.1.5. Fluctuación histórica del precio del café y sus impactos.....	86

2.1.6. Afectación de la producción de café por el cambio climático y el COVID.....	88
2.2. Importancia social, económica y ambiental del café en el Ecuador y en la provincia de Loja	91
2.2.1. Visión global del café en Ecuador	91
2.2.1.1. Área cultivada, distribución espacial y variedades ..	91
2.2.1.2. Producción.	94
2.2.1.3. Rendimientos.	96
2.2.1.4. Importancia económica.	98
2.2.1.5. Importancia social.	101
2.2.1.6. Importancia ambiental.	102
2.2.1.7. Factores que inciden en la producción del café en el país	106
2.2.2. Café en la provincia de Loja.....	107
2.2.2.1. Área cultivada y distribución espacial.	108
2.2.2.2. Variedades.	108
2.2.2.3. Sistemas agroforestales con café.	119
2.2.2.4. Rendimientos.	110
2.2.2.5. Importancia social, económica y ambiental del café en la provincia de Loja.	112
2.2.2.6. Desafíos y oportunidades para el café de la provincia de Loja.	113
2.3. Referencias bibliográficas.....	120
Capítulo 3. Requerimientos edáficos y nutricionales del café arábigo	135
3.1. Características biológicas y requerimiento de clima del café arábigo.....	135
3.2. Requerimientos edáficos del café arábigo	137
3.2.1. El suelo como sustrato básico para el crecimiento de las plantas.....	137
3.2.2. Profundidad efectiva.....	138
3.2.3. Textura	139
3.2.4. Estructura.....	140
3.2.5. Porosidad, densidad real, densidad aparente y condición física.....	141
3.2.6. Consistencia del suelo	143
3.2.7. Drenaje interno y conductividad hidráulica saturada	144
3.2.8. Materia orgánica y relación carbono nitrógeno	145
3.2.9. Reacción del suelo	147

3.2.10. Capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiables, saturación de bases y proporción de cationes	149
3.2.11. Acidez actual, intercambiable y total.....	152
3.2.12. Carbonatos y yeso.....	154
3.2.13. Salinidad y sodicidad.....	156
3.3. Evaluación de la aptitud del suelo para el café arábigo	157
3.4. Requerimientos nutricionales del café arábigo	159
3.4.1. Aspectos generales.....	159
3.4.2. Macronutrientes	162
3.4.2.1. Nitrógeno (N).	162
3.4.2.2. Fósforo.	165
3.4.2.3. Potasio.	168
3.4.2.4. Calcio.	170
3.4.2.5. Magnesio.	171
3.4.2.6. Azufre.	173
3.4.3. Micronutrientes.....	174
3.4.3.1. Hierro.....	174
3.4.3.2. Cobre.	175
3.4.3.3. Zinc.	176
3.4.3.4. Manganeso.	177
3.4.3.5. Boro.	178
3.4.3.6. Molibdeno.	179
3.4.4. Rangos de niveles óptimos y síntomas de deficiencia y exceso de nutrientes	180
3.4.5. Recomendaciones para la plantación y fertilización del café arábigo	183
3.5. Referencias bibliográficas	184

Capítulo 4. Unidades de suelos de plantaciones seleccionadas de café arábigo en diferentes agroecosistemas de la provincia de Loja: propiedades físico-químicas, aptitud y manejo.....198

4.1. Suelos de los sistemas agroforestales de café arábigo en la hacienda El Cristal, cantón Loja.....	200
4.1.1 Aspectos generales.....	200
4.1.2. Suelo del sistema agroforestal de café y alisos	202
4.1.2.1. Características de la unidad	202
4.1.2.2. Descripción general del suelo.....	203
4.1.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo ..	205

4.1.2.4. Características químicas	206
4.1.2.5. Fertilidad actual.....	207
4.1.2.5.1. Análisis de laboratorio.....	207
4.1.2.5.2. Evaluación biológica de la fertilidad.....	208
4.1.2.5.3. Análisis de laboratorio vs. evaluación biológica ...	209
4.1.2.6. Aptitud del suelo para café arábigo	211
4.1.2.7. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua	212
4.1.2.8. Avances en la corrección de la acidez y la fertilización	214
4.2. Suelos de los sistemas agroforestales de café arábigo en el sector Consapamba, cantón Espíndola	217
4.2.1. Aspectos generales.....	217
4.2.2. Suelo del sistema agroforestal de café en vertiente de montaña, pendiente de 20 %	219
4.2.2.1. Características de la unidad	219
4.2.2.2. Descripción general del suelo	219
4.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo.....	221
4.2.4. Características químicas	222
4.2.5. Fertilidad actual	222
4.2.5.1. Análisis de laboratorio.....	222
4.2.5.2. Evaluación biológica	223
4.2.5.3. Análisis de laboratorio vs. evaluación biológica.	225
4.2.6. Aptitud del suelo para café arábigo	227
4.2.7. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua	228
4.3. Unidades de suelos del sistema agroforestal de café arábigo en el sector Guanga, cantón Olmedo	230
4.3.1. Aspectos generales.....	230
4.3.2. Suelo del sistema agroforestal de café arábigo en terreno de 11 % de pendiente	233
4.3.2.1. Características de la unidad.	233
4.3.2.2. Descripción general del suelo.	233
4.3.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo. .	235
4.3.2.4. Características químicas.....	236
4.3.2.5. Fertilidad actual.	237
4.3.2.5.1. Análisis de laboratorio.	237
4.3.2.5.2. Evaluación biológica de la fertilidad.....	237
4.3.2.5.3. Análisis de laboratorio vs. evaluación biológica. .	240

4.3.2.6. Aptitud del suelo para café arábigo.	241
4.3.2.7. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua.	241
4.4. Suelos del sistema agroforestal de café arábigo en el sector Romerillos, cantón Chaguarpamba	243
4.4.1. Aspectos Generales.....	243
4.4.2. Suelo del sistema agroforestal de café arábigo de la variedad Catuai	245
4.4.2.1. Características de la unidad.	246
4.4.2.2. Descripción general del suelo.....	246
4.4.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo. ..	248
4.4.2.4. Características químicas.	249
4.4.2.5. Fertilidad actual.	250
4.4.2.5.1. Análisis de laboratorio.....	250
4.4.2.5.2. Evaluación biológica de la fertilidad.	250
4.4.2.5.3. Evaluación biológica vs. análisis químico.	253
4.4.2.6. Otros análisis de suelos.	253
4.4.2.7. Aptitud del suelo para café arábigo.	254
4.4.2.8. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua.	255
4.5. Suelos del sector Lozumbe de la parroquia Santa Rufina, cantón Chaguarpamba	258
4.5.1. Aspectos Generales.....	258
4.5.2. Suelo del sistema agroforestal de café arábigo en el terreno de 26% de pendiente	259
4.5.2.1. Características de la Unidad.	259
4.5.2.2. Descripción general del suelo.	260
4.5.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo. ..	261
4.5.2.4. Características químicas.	262
4.5.2.5. Fertilidad actual.....	263
4.5.2.5.1. Análisis de laboratorio.	263
4.5.2.5.2. Evaluación biológica.	263
4.5.2.5.3. Análisis de laboratorio vs. evaluación biológica. ..	266
4.5.2.6. Aptitud del suelo para café arábigo.	266
4.5.2.7. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua.	267
4.6. Referencias bibliográficas.....	270

Capítulo 5. Influencia de los factores de formación sobre las propiedades de los suelos de las plantaciones seleccionadas y su relación con la aptitud para el café arábigo.....	272
5.1. Introducción	272
5.2. Características morfológicas del perfil.....	275
5.3. Características hidrodinámicas del suelo	279
5.4. Reacción del suelo y acidez cambiable.....	282
5.5. Materia orgánica	283
5.6. Capacidad de Intercambio catiónico, cationes cambiables y saturación de bases	284
5.7. Fertilidad actual	285
5.8. Aptitud de los suelos para el café arábigo.....	288
5.9. Infiltración.....	289
5.10. Erosión	290
5.11. Clasificación Taxonómica de los Suelos.....	291
5.12. Referencias bibliográficas.....	294

Capítulo 6. Mejoramiento de la productividad del café en la provincia de Loja: tareas que debe enfrentar la investigación sobre la gestión de la fertilidad del suelo y el uso óptimo del agua	297
6.1. Introducción	297
6.2. Herramientas de diagnóstico para la evaluación de la fertilidad del suelo	300
6.3. Mejoramiento de las condiciones físicas del suelo	302
6.4. Corrección de la fuerte acidez del suelo	305
6.5. Reposición de las reservas de nutrientes del suelo	306
6.6. Gestión de la fertilidad del suelo en la producción de café orgánico	309
6.7. Investigación en biofertilizantes para las plantaciones de café	311
6.8. Prácticas de manejo y conservación del suelo y el agua.....	322
Manejo del suelo.....	323
Control de la erosión.....	323
Manejo del agua.....	323
Riego eficiente	323
Control de la escorrentía.....	324
6.9. Referencias bibliográficas.....	325

Anexo A	328
Descripción de perfiles adicionales de suelo de la hacienda El Cristal.....	328
Unidad de suelos del sistema agroforestal de café con pinos y eucaliptos en vertiente de loma, pendiente de 60%	328
Características generales de la unidad	328
Unidad de suelos del sistema agroforestal de café con pinos y eucaliptos en vertiente de cresta, pendiente 73% en paisaje de montaña	330
Características generales de la unidad	330
Unidad de suelos del sistema agroforestal de café con árboles frutales y maderables en terraza, pendiente 14%, en pie de vertiente	331
Características generales de la unidad	332
Anexo B	334
Descripción de perfiles adicionales de suelo del sector de Consapamba, cantón Espíndola	334
Unidad de suelos del sistema agroforestal de café, vertiente de montaña, pendiente 15%	334
Unidad de suelos del sistema agroforestal de café, pie de monte en vertiente de montaña, pendiente 20%, bajo el canal	336
Características Generales de la Unidad	336
Anexo C	338
Descripción de perfiles adicionales de suelo del sector Guanga, cantón Olmedo	338
Unidad de suelos del sistema agroforestal de café arábigo sector Guanga	338
Anexo D	340
Descripción de perfiles adicionales de suelo del sector Romerillos, cantón Chaguarpamba	340
Unidad de suelos del sistema agroforestal de café de la variedad Geisha	340
Características Generales de la Unidad	340
Unidad de suelos del sistema agroforestal de café arábigo de la variedad Villalobos	342
Características Generales de la Unidad	342
Anexo E	345
Descripción de perfiles adicionales de suelo del	

sector Lozumbe, cantón Chaguarpamba	345
Unidad de suelos del sistema agroforestal de café arábigo en pendiente escarpada (60%)	345
Características Generales de la Unidad	345
Anexo F	347
Anexo G.....	350
Evaluación biológica de la fertilidad del suelo.....	350
1. Antecedentes.....	350
2. Materiales y métodos.....	352
2.1. Materiales	352
2.2. Metodología	353
2.2.1. Preparación de las soluciones nutritivas.	353
2.2.3. Preparación de los recipientes.	355
2.2.4. Instalación del experimento.	355
2.2.5. Siembra y raleo de la planta indicadora.	356
2.2.6. Reposición de la solución nutritiva.....	357
2.2.7. Registro del crecimiento y de la masa seca de la planta indicadora.....	357
3. Interpretación de los resultados	358
4. Referencias bibliográficas.....	359

Prólogo

A Carlos Valarezo Manosalvas lo conocí a inicios de los 70 del siglo pasado, coincidentemente en esa etapa crucial de la vida cuando yo iniciaba mi carrera de docente universitario y Carlos había ingresado al primer año de la carrera de Ingeniería Agronómica en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional de Loja (UNL). Yo, como bisoño profesor y él como ilusionado alumno y futuro profesional. Más tarde, cuando Carlos estaba ya equipado con un importante posgrado, trabajamos juntos en la Subcomisión Ecuatoriana-PREDESUR y, desde luego, por muchos años después como docentes de la querida UNL, dirigiendo tesis estudiantiles y proyectos de investigación. Un largo contacto temporal de intercambio de ideas, experiencias y amistad, orientado a metas comunes, donde coincidimos, con otros apreciados compañeros, en tratar de encontrar soluciones al complejo problema del desarrollo, especialmente agrícola, de la provincia de Loja. Campo en el cual, lo digo sin ambages, Carlos destacó como el que más, porque supo encontrar con visión clara los puntos de mayor interés para investigar el caso particular de los bajos rendimientos agrícolas de Loja y la Región Sur del Ecuador, y proponer soluciones. Apoyado, desde luego, por una magnífica formación académica en importantes universidades de Europa (Bélgica, Holanda, Italia) y de América (México), haciendo especial énfasis en la línea de las Ciencias del Suelo.

Producto de su arduo trabajo de docente investigador, y como buen lojano que contribuye al progreso del terruño con lo mejor de sus capacidades y afectos, Carlos ha publicado 10 libros y es coautor de otro tanto, y tiene a su haber cerca de un centenar de artículos científicos sobre diversos temas de su especialidad. Y, justamente, entre estos importantes aportes, destacan, desde mi óptica, las siguientes tres tareas:

- Haber liderado el grupo de docentes-investigadores de la Universidad Nacional de Loja y de especialistas del Servicio Holandés de la Cooperación al Desarrollo, que tuvo a su cargo el diseño y la ejecución de la Primera Promoción del Programa de Posgrado en Riego Comunitario Andino, que fue galardonado con el premio EURAL 1966 de la Unión Europea.
- Haber sido el Representante Oficial del Ecuador a las Sesiones de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en: Dakar-Senegal; Recife-Brasil; Bonn, Alemania y San Salvador, El Salvador, ejerciendo la Vicepresidencia del Comité de Ciencia y Tecnología, por elección, en el período 1999-2000.
- Haber diseñado y dirigido la ejecución del proyecto de investigación “Gestión de la fertilidad del suelo con enmiendas de biocarbón en plantaciones de árboles maderables en el Sur de la Amazonía Ecuatoriana”, obteniendo resultados muy alentadores en la producción de árboles de valor comercial, como alternativa para recuperar los suelos empobrecidos de las laderas, degradados por la ganadería.

El último libro de Carlos Valarezo Manosalvas, *Suelos en plantaciones de café en la provincia de Loja: características, clasificación, fertilidad, aptitud y manejo*, como líder y coautor, junto a los distinguidos docentes investigadores de la UNL, los ingenieros Luis Valarezo Manosalvas, Miguel Angel Villmagua y Pedro Guaya Pauta (quienes durante varios años lo han acompañado en la ejecución de diversos programas de formación de posgrado y de proyectos de investigación), refleja, desde su acertada titulación, el importante contenido en materia técnico-científica. Porque, se constituye en un valioso apoyo y guía al creciente desarrollo de uno de los mayores rubros económicos de Loja, la

producción del mejor café de altura del país, a la hora actual marca de identificación provincial con alcance internacional. Un importante logro, sin lugar a dudas; que, sin embargo, se ve afectado por un revés natural que no incide únicamente en el cultivo de café, sino en toda la producción agrícola de Loja y el país: la baja producción. Enorme y negativo efecto cuya causa madre la detenta la calidad de los suelos y su manejo.

El minucioso estudio que ha dado origen a este importante libro fue realizado en, precisamente, los antiguos sistemas agroforestales de Loja (conocidos también como “huerto lojano”) que, desde el siglo XVIII, según la referencia histórica, habían introducido el café arábigo a la provincia y lo adaptaron como propio. Tanto, que aún en muchos sitios del medio rural lojano actual, el típico y sostenido desayuno con tamales, sambates, zango o mote con sarandajas aliñadas, ineludiblemente acompañado de un buen jarro de café filtrado (“de chucho”), se denomina simplemente “café” o “tomar el café”... Cabe agregar que, en todos los cantones de Loja, excepto Zapotillo (con piso tropical, a menos de 200 m.s.n.m), se cultiva café, pero en todos se toma el desayuno con café de altura, el gran ganador de las “Tasas de Oro”.

El mencionado trabajo de investigación fue realizado en “un rango de altitud de 800 a 2.100 m.s.n.m” (piso premontano al montano bajo y cinco localidades repartidas en cuatro cantones: Loja, Olmedo, Chaguarpamba y Espíndola). En cada lugar se estudiaron las características morfológicas del perfil y las hidrofísicas derivadas de la curva del pF, la acidez del suelo y acidez cambiante, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, cationes cambiantes y saturación de bases; la fertilidad actual, la aptitud de los suelos para el café arábigo, la infiltración, la erosión y la clasificación taxonómica de los suelos de una muestra muy representativa del piso del café de altura

de Loja. Y con este completo y específico diagnóstico, como quien dice equipado con todos los elementos científico-técnicos requeridos, esbozar certeras recomendaciones para mejorar significativamente la reconocida baja producción de café de altura en Loja y Región Sur del Ecuador. ¿Cómo?

1. Desarrollando herramientas de diagnóstico para evaluar la fertilidad del suelo, que se adopten a las condiciones locales;
2. Mejorando la estructura del suelo para elevar la capacidad de aireación en la zona correspondiente al estrato radicular del cafeto;
3. Corrigiendo la elevada acidez de los suelos, con pH inferior a 5;
4. Reponiendo los nutrientes del suelo (programa urgente de reposición de la fertilidad del suelo);
5. Implementando prácticas apropiadas de control de la erosión y manejo del agua bajo lluvia y bajo riego.

Esto es, en pocas líneas, la importancia y contenido de este libro de Carlos Valarezo Manosalvas y colaboradores, resultado de un trascendente trabajo de investigación científica junto a un grupo de distinguidos colegas y tesisas, estudiantes y laboratoristas. Y, por cierto, contando con el apoyo de los dueños de los predios y fincas que, conscientes de la importancia del trabajo realizado, permitieron que se lleven a efecto los ensayos experimentales con espontáneo despegue y generosidad, como fue el caso del Dr. Gustavo Samaniego, dueño de la hacienda Cristal (cantón Loja).

Quiero terminar estas breves palabras recalcando, una vez más, que Carlos Valarezo Manosalvas, a lo largo de su vida, ha sido un hombre de bien como pocos: un excelente maestro, un científico serio, un buen

compañero y amigo, y un extraordinario lojano. El trabajo que presenta en este libro es una prueba fehaciente de su generosa contribución al territorio que lo vio nacer. Y es un ejemplo de buen comportamiento y valores cívicos no sólo para sus eficientes colaboradores y alumnos, sino para todos los ciudadanos que pretenden honrar con responsabilidad esa alta designación.

Numa Maldonado Astudillo

Ingeniero Agrónomo

Ex Decano de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional de Loja



Para nadie, amante o no del café, puede dejar de darse un suspiro frente al aroma de un buen café que se está tostando o filtrando en una taza. Este mágico brebaje ha conquistado el mundo gracias a su exquisito sabor o a los innumerables atributos para la salud que se le adjudican, tales como: ayudar a prevenir el ictus, la diabetes, el Alzheimer, el Parkinson y los problemas estomacales. Así también, la cafeína puede ayudar a disminuir la fatiga y aumentar la concentración, estimular la mente, reducir el dolor de cabeza, contribuir a la pérdida de peso, proteger el corazón, entre otras. Que sea cierto o no, pero muchas de estas cualidades están en la mente colectiva; y, por lo tanto, ejercen sobre ella alguna influencia, lo que naturalmente vuelve al café una bebida codiciada.

Algunos datos podrían ser interesantes de conocer para poder valorar debidamente este cultivo; por ejemplo, el tamaño del mercado mundial de café fue valorado en USD 145.600 millones al cierre del año 2023 y se anticipa un crecimiento anual compuesto de 5.4% entre el 2024 al 2032. El café es el segundo producto de mayor importación a nivel mundial, únicamente superado por el petróleo; pero, desgraciadamente constituye una materia prima volátil, por lo que está propensa a sufrir variaciones de precios dependiendo de varios factores como: el clima en los países productores, enfermedades, geopolítica, costos de transformación (principalmente el precio del petróleo), transporte, tipo de cambio, oferta y demanda; así como, ciertos movimientos técnicos, incluyendo aquel de que el precio se decide en New York, ciudad que no produce ni un solo gramo de café. Solamente en noviembre de 2024, el café pasó de un mínimo de USD241 a un máximo de USD335, el saco de 60kg; es decir, que se movió 94 dólares en un mes.

El Ecuador no está colocado entre los principales productores de café del mundo, este sitio lo tienen: Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia, India, Honduras, Etiopía, Perú, Uganda, Guatemala; pero, el café del sur del Ecuador es muy apreciado, de tal forma que en algunos años su producción no alcanza a cubrir la demanda, sobre todo entre los principales consumidores del mundo: Unión Europea, Estados Unidos de América, Brasil, Japón, Filipinas, China, Canadá, Indonesia, Rusia y Reino Unido (World Markets and Trade; USDA; junio 2024).

Si bien el café es originario del cuerno de África (Etiopía), donde se encuentra la mayor variabilidad de esta especie, en el sur del Ecuador, cada vez con mayor incidencia se está sembrando esta planta, tanto para el consumo interno como para la exportación de café de alta calidad; es así que, en varios eventos internacionales como “La Taza Dorada” que se realiza cada año, muchos agricultores de esta región la han ganado,

adquiriendo cada vez un genuino prestigio, que coloca al café producido en el sur del Ecuador como uno de los mejores del país.

Pero no todo es bonanza, puesto que diversos problemas inciden en su producción; por ejemplo, 40% del suelo está erosionado y hay que producir mucho más en el mismo suelo, por lo que no podemos producir hoy con la agricultura de ayer, y se vuelve indispensable mejorar su productividad.

En este contexto, es la ciencia la que debe encontrar una solución para redimir a los suelos de donde se nutren las plantas; en esta línea, un equipo de docentes investigadores de la Universidad Nacional de Loja, que, con profundo compromiso, experiencia y conocimiento, ha abordado de manera seria esta problemática. Si bien estos estudios están basados principalmente en la Región Sur del país, lo que lo vuelve particularmente interesante para la agricultura de nuestra región, sus resultados pueden ser perfectamente extrapolados para otras regiones.

A la cabeza del equipo está Carlos Antonio Valarezo Manosalvas, ingeniero agrónomo, con estudios de posgrado en física, química y fertilidad de suelos en Bélgica, Países Bajos e Italia, y larga trayectoria como investigador y profesor de grado y posgrado en la Universidad Nacional de Loja y otras universidades del país. Lo acompañan Luis Guillermo Valarezo Manosalvas, Pedro Guaya Pauta y Miguel Ángel Villamagua, todos ellos con formación de posgrado y de reconocida trayectoria en investigación, quienes se han dedicado a investigar las causas y soluciones de algunos de los problemas que tienen los suelos de las plantaciones de café en la provincia de Loja, para primero entender la problemática y luego mejorar su productividad.

Este importante libro, que constituye un valioso aporte al conocimiento de nuestros suelos para el cultivo del café en Loja, está compuesto de seis capítulos:

El Capítulo 1, aborda la caracterización biofísica, los aspectos socioeconómicos y la producción agropecuaria en la provincia de Loja, donde pone énfasis en las cuencas hidrográficas, el clima, la geología y geomorfología, los suelos, los biomas y zonas de vida, la vegetación y uso del suelo, la desertificación y sequía, los aspectos socioeconómicos, la población, la población económicamente activa y pobreza; y, finalmente la producción agropecuaria en la provincia de Loja.

El Capítulo 2, está dedicado al café: visión e importancia mundial, nacional y local, en donde pone énfasis en la producción del café en la provincia de Loja, el área cultivada y distribución espacial, las variedades, los sistemas agroforestales con café, los rendimientos, la importancia social, económica y ambiental del café en la provincia de Loja, para culminar con los que a su juicio son los desafíos y oportunidades.

El Capítulo 3, corresponde a una sistematización del conocimiento sobre los requerimientos edáficos y nutricionales del café arábigo, donde se hace énfasis en: características biológicas, los requerimientos edáficos (profundidad efectiva, textura, estructura, la porosidad, densidad real, densidad aparente y condición física), la materia orgánica y relación carbono nitrógeno, capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiable, saturación de bases y proporción de cationes, terminando con los requerimientos nutricionales del cultivo y exponiendo las recomendaciones para la plantación y fertilización del café arábigo.

El Capítulo 4, aborda la problemática de las unidades de suelos de las plantaciones de café arábigo en diferentes ecosistemas de la provincia de Loja, aptitud y recomendaciones de manejo abarcando las unidades de suelos de los sistemas agroforestales de café arábigo en la hacienda El Cristal, cantón Loja, del sector Consapamba, cantón Espíndola; del sector Guanga, cantón Olmedo, del sector Romerillos, cantón

Chaguarpamba; y, del sector Lozumba, cantón Chaguarpamba.

El Capítulo 5, se encarga de describir y estudiar las características de los suelos en relación con los factores de formación (material parental, clima, tiempo, organismos, relieve), y la aptitud para el café arábigo.

Para terminar, en el Capítulo 6, se analiza los desafíos para la investigación en la perspectiva de mejorar la productividad del café en la provincia de Loja, abordando con profundidad sobre el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo, corrección de la acidez, reposición de las reservas de nutrientes, la gestión de la fertilidad del suelo, incluyendo los biofertilizantes, así como en las prácticas de manejo y conservación del suelo y el agua.

Todo este aporte convierte a esta publicación, producida por el equipo de Carlos Valarezo Manosalvas, en un texto indispensable de consulta para los investigadores, cultivadores y consumidores del apreciado café.

Ángel Rafael Morales Astudillo

*Ingeniero Agrónomo, Doctor de Estado en Genética Vegetal
Ex Docente Investigador de la Universidad Nacional de Loja*



Prefacio

En Ecuador, desde el siglo XVIII, el cultivo del café es un producto tradicional de gran importancia económica, social y ambiental; pues, a más de aportar divisas, genera oportunidades de empleo para varios miles de familias vinculadas a la cadena de producción, procesamiento, transporte, comercialización, industrialización, y exportación.

El café se cultiva en todas las provincias del país, incluyendo las islas Galápagos. A las provincias de Manabí, Loja y El Oro, les corresponde el 80% del área cultivada con café arábigo; en tanto que, en las provincias de Orellana y Sucumbíos, predominan las plantaciones de café robusta.

En cuanto al inicio del cultivo del café en la provincia de Loja, el historiador Galo Ramón relata lo siguiente: *“los registros revelan que la primera planta de café del país fue sembrada en la provincia de Loja. El Censo Económico de 1825 ya registraba un quintal de café (60 kg) en el cantón Calvas, lo que implica que su cultivo se inició entre 1822 y 1823. Para 1826, la producción se había extendido a los cantones de Paltas y Zaruma, consolidando una cultura cafetalera naciente pero sólida en toda la provincia”*.

Actualmente, en la provincia de Loja el café (exclusivamente arábigo) se cultiva en todos los cantones, excepto en Zapotillo. Las plantaciones se distribuyen altitudinalmente en el rango de 500 a 2.100 m.s.n.m. Ello significa que éstas se encuentran en diversos agroecosistemas, diferenciados por el clima, el material geológico (parental), la forma del terreno (relieve), la biodiversidad; y, en consecuencia, los suelos, cuyas propiedades son el resultado de la acción conjunta de estos cinco factores a lo largo del tiempo.

La gran mayoría de los cafetales se encuentran en fincas menores a cinco hectáreas; consecuentemente, es una actividad de pequeños productores, de limitada capacidad económica, muy vulnerables a las

variaciones de los precios nacionales e internacionales, en un contexto de comercialización inequitativo, particularmente para ellos.

Al presente, la provincia de Loja es una de las regiones más reconocidas y valoradas a nivel nacional e internacional por la calidad del café que produce, consenso que se refuerza en el hecho de que en 12 de las 18 ediciones del concurso nacional de la Taza Dorada celebradas en el período 2007-2025, las muestras de café de varios cantones han alcanzado el primer lugar, lo cual evidencia que es uno de los cultivos locales más importantes, con gran incidencia en los aspectos sociales, económicos y ambientales.

En Loja, los arbustos de café se asocian con otras especies de plantas, en diferentes arreglos conformando un sistema agroforestal (comúnmente llamado “huerta”), constituido por un estrato superior de árboles que proporcionan sombra (madera, frutos, biomasa), un estrato medio con arbustos (café, cítricos, banano, plátano, guandul, etc.), y un estrato inferior con cultivos anuales. En este sistema, a más de la producción del café, los cultivos asociados contribuyen a la alimentación, tanto de las familias de los campesinos, como de los pobladores de las zonas urbanas circundantes (maní, yuca, fréjol, etc.). Ambientalmente el sistema es muy apropiado para los terrenos inclinados, que son los que imperan en una provincia predominantemente montañosa, ya que no demanda la remoción anual del suelo (al menos por diez años), disminuyendo la erosión y aumentando la retención de humedad aprovechable. Además, contribuye a preservar la biodiversidad.

Las cifras de la bibliografía evidencian que en Ecuador los rendimientos de café son muy bajos, siendo alrededor de 45% menor que los de otros países sudamericanos como Perú y Colombia; y, 78% menor que aquellos de Brasil. En el caso de la provincia de Loja, la productividad es aún más baja, lo cual se atribuye a varias causas (técnicas, sociales, económicas y ambientales). Una de ellas, hace referencia a una inapropiada gestión de la fertilidad física y química de los suelos, lo

que con el tiempo resulta en una grave degradación de los terrenos y un agotamiento de los nutrientes que demanda el cultivo.

Frente al reto de contribuir a la generación de conocimientos sobre los factores edáficos que determinan la baja productividad del café en los distintos agroecosistemas de la provincia de Loja, cuatro Docentes-Investigadores de la Universidad Nacional de Loja (UNL)¹, (tres de los cuales actualmente están jubilados), decidieron asumir esta tarea buscando responder a las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las características del ambiente natural del suelo (clima, geomorfología, material parental, drenaje), en plantaciones de café seleccionadas dentro del rango altitudinal del cultivo en la provincia de Loja?
- ¿Cuáles son las características morfológicas, las propiedades hidrodinámicas y las condiciones físicas internas del suelo, que inciden en el desarrollo del sistema radicular de las plantas de café?
- ¿Cuáles son las características químicas de los suelos seleccionados y la disponibilidad de los diferentes nutrientes requeridos por las plantas?
- ¿En qué medida los suelos seleccionados cumplen con los requisitos físicos, químicos y de fertilidad, que demanda específicamente el cultivo del café arábigo?
- ¿Cuáles son las prácticas de manejo más adecuadas para superar las limitaciones físicas, químicas y de fertilidad en cada suelo, que garanticen el apropiado desarrollo del sistema radicular, suficiente aireación para el intercambio de CO₂ y O₂, adecuada retención de agua aprovechable, un suministro continuo y oportuno de todos los nutrientes en las cantidades requeridas por la planta en sus diferentes etapas de desarrollo y producción; así como, las

¹ Carlos Valarezo Manosalvas; Luis Valarezo Manosalvas, Miguel Ángel Villamagua y Pedro Guaya Pauta

medidas necesarias de conservación del suelo, para controlar la erosión?

- ¿Qué temas de investigación deben abordarse para generar conocimientos orientados a una gestión integrada de fertilidad del suelo y la optimización del uso agua de riego, de manera de elevar los rendimientos del café hasta un nivel de productividad al menos comparable con países como Costa Rica y Colombia ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)?

El proceso de investigación en las diferentes plantaciones de café seleccionadas de la provincia de Loja, dentro de un rango de altitud de 800 a 2.100 m s. n. m, conducente a dar respuesta a las interrogantes planteadas, se llevó a cabo en la siguiente secuencia:

1. Selección de sitios para la descripción de perfiles de suelo en la plantación de café (al menos dos perfiles).
2. Caracterización del ambiente natural del perfil del suelo: forma del terreno, material parental, condiciones de drenaje, entre otras.
3. Descripción general del perfil y de cada una de sus capas y horizontes.
4. Pruebas de infiltración por triplicado.
5. Determinación en el laboratorio de la densidad aparente y la retención de humedad a diferentes valores de succión; y, calificación de la condición física del suelo para el crecimiento de las plantas.
6. Valoración de la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, mediante análisis de laboratorio y evaluación biológica en invernadero.
7. Clasificación climática de los sitios seleccionados y clasificación taxonómica de los suelos.
8. Evaluación de la aptitud del suelo para el cultivo del café arábigo.

9. Orientaciones básicas para el manejo sostenible del suelo y el agua, en la perspectiva de lograr los mayores rendimientos del café arábigo.

En los trabajos de campo, laboratorio e invernadero, participaron estudiantes tesistas de las carreras de ingeniería agronómica e ingeniería agrícola de la UNL.

Los sitios seleccionados de las plantaciones de café de los cantones de la provincia de Loja, la altitud, y los estudiantes tesistas participantes se listan a continuación:

- Cantón Loja: sitio hacienda El Cristal, altitud 2.071 m.s.n.m. Tesista: Paola Zambrano
- Cantón Olmedo: sitio Guanga, altitud 1.780 m.s.n.m. Tesista: Karina Lima
- Cantón Espíndola: sitio Consapamba, altitud 1.766 m.s.n.m. Tesista: Paola Zambrano
- Cantón Chaguarpamba: sitio Romerillos, altitud 1.465 m.s.n.m. y sitio Lozumbe, 828 m.s.n.m. Tesista: Karina Tandazo

Motivados por el entusiasmo y compromiso permanentemente demostrado por el doctor Gustavo Samaniego Rodríguez, en pro del desarrollo de la provincia de Loja, los Docentes Investigadores, conjuntamente con los estudiantes tesistas, iniciaron el trabajo en la finca El Cristal de su propiedad, el 18 de octubre de 2017.

Dadas las limitaciones de tiempo y de recursos financieros, aún quedan por estudiar los suelos de las plantaciones de café en los demás cantones de la provincia; sin embargo, el grupo de Docentes-Investigadores consideró oportuno sistematizar la información disponible e incluirla en este libro, que se lo ha titulado *Suelos en plantaciones de café en la provincia de Loja: características, clasificación, fertilidad, aptitud y manejo*.

La obra está estructurada de la siguiente manera: 1.- Características biofísicas, aspectos socioeconómicos y producción agropecuaria en la provincia de Loja; 2.- Café: visión e importancia mundial, nacional y local; 3.- Requerimientos edáficos y nutricionales del café arábigo; 4.- Unidades de suelo de las plantaciones de café arábigo en diferentes agroecosistemas seleccionados de la provincia de Loja: propiedades físico-químicas, clasificación, fertilidad, aptitud y manejo; 5.- Influencia de los factores de formación sobre las propiedades de los suelos de las plantaciones seleccionadas y su relación con la aptitud para el café arábigo; 6.- Mejoramiento de la productividad del café en la provincia de Loja: tareas que debe enfrentar la investigación sobre la gestión de la fertilidad del suelo y el uso óptimo del agua, para mejorar la productividad y asegurar la sostenibilidad del sistema agroforestal biodiverso. Las referencias bibliográficas se proporcionan al final de cada capítulo. Los anexos contienen: la descripción de los perfiles de suelo restantes de los diferentes sitios; el diagrama ombrotérmico de los sectores seleccionados; y, el procedimiento para evaluar fertilidad del suelo por el método biológico de la planta indicadora.

Los autores esperan que esta publicación sirva como: 1.- material de estudio en las carreras universitarias y programas de especialidad relacionados con la temática; 2.- referente para los profesionales, las instituciones públicas y privadas que promueven el desarrollo productivo en la provincia de Loja; y, 3.- guía para orientar la investigación científica y técnica dirigida a generar conocimientos con miras a mejorar la productividad y sostenibilidad de los sistemas agroforestales de café de la provincia de Loja.

Lo más importante de los resultados del proceso de investigación que se propone en el Capítulo 6, será asegurar la adopción de las mejores prácticas de gestión integral de la fertilidad del suelo, el control de la erosión y el manejo del agua, por parte de los cafetaleros de la provincia de Loja, quienes dependen directamente de este sistema de cultivo biodiverso para su sustento y bienestar.

Preface

Since the 18th century, coffee cultivation in Ecuador has been a traditional product of great economic, social, and environmental importance. In addition to facilitating the acquisition of foreign currency, its multiplier effect also generates employment opportunities for several thousands of families linked to the production, processing, transportation, marketing, industrialization, and export chain sectors associated with the coffee product.

Coffee is grown in all provinces of the country, including the Galapagos Islands. The provinces of Manabí, Loja, and El Oro account for 80 % of the area cultivated with Arabica coffee, while the provinces of Orellana and Sucumbíos are the predominant producers of the Robusta coffee species.

Regarding the beginning of coffee cultivation in the province of Loja, the historian Galo Ramón recounts the following: *Records reveal that the first coffee plant in the country was planted in the province of Loja. The 1825 Economic Census already recorded a quintal of coffee (60 kg) in the Calvas canton, implying that its cultivation began between 1822 and 1823. By 1826, production had spread to the cantons of Paltas and Zaruma, consolidating a nascent but solid coffee-growing culture throughout the province.*

Coffee is currently grown in all cantons of Loja province (exclusively Arabica), except Zapotillo. The plantations are distributed altitudinally between 500 and 2,100 meters above sea level. This means that they are found in various agroecosystems, differentiated by climate, geological material, landforms, biodiversity, and, consequently, soils, whose properties are the result of the aforementioned factors over time.

The vast majority of coffee plantations are located on farms smaller than five hectares. This, therefore, means that coffee planting is an opportunity largely representative of small-scale farmers. These smaller scale farmers are typically faced with challenges such as a limited economic capacity, as well as a high vulnerability to fluctuations with regard to national and international prices, especially in the contexts of inequitable and unfair marketing.

Currently, the province of Loja is one of the most recognized and valued regions nationally and internationally for the quality of the coffee it produces, a consensus that is reinforced by the fact that in 12 of the 18 editions of the national Golden Cup competition held in the period 2007-2025, coffee samples from various cantons have reached first place, which shows that it is one of the most important local crops, from a social, economic and environmental perspective.

In Loja, coffee bushes are associated with other plant species in different arrangements, forming an agroforestry system commonly called “huerta”. The system consists of an upper stratum of shade-providing trees, a middle stratum of shrubs including coffee, citrus, banana, plantains, and pigeon peas, etc., and a lower stratum of crops including peanuts, cassava, beans, etc. In addition to coffee production, the associated plants contribute to the food supply of both the families of the farmers and the inhabitants of the surrounding urban areas (peanuts, cassava, beans, etc.). Environmentally, the system is very suitable because of the sloping terrain prevalent in the predominantly mountainous province, as it does not require annual soil removal, thereby reducing erosion and increasing the retention of available moisture, this also contributes to preserving biodiversity.

Figures from the literature show that coffee yields in Ecuador are very low, approximately 45 % lower than those in other South American countries such as Peru and Colombia, and 78 % lower than those in Brazil.

In the province of Loja, productivity is even lower, which is attributed to several causes (technical, social, economic, and environmental). One of these is the inappropriate management of the physical and chemical fertility of the soil, which over time results in severe land degradation and a depletion of the nutrients required by the crop.

Faced with the challenge of contributing to the generation of knowledge about the soil factors that determine the low productivity of coffee in the different agroecosystems of the province of Loja, four Research Professors from the National University of Loja (UNL), (three of whom are currently retired), decided to take on this task seeking to answer the following questions:

- What are the characteristics of the natural soil environment (climate, geomorphology, parent material, drainage) in selected coffee plantations within the altitude range of the crop in the province of Loja?
- What are the morphological characteristics, hydrodynamic properties, and internal physical conditions of the soil that influence the development of the root system of coffee plants?
- What are the chemical characteristics of the selected soils and the availability of the different nutrients required by Arabica coffee?
- To what extent do the selected soils meet the physical, chemical, and fertility requirements specifically demanded by Arabica coffee cultivation?
- What are the most appropriate management practices to overcome the limitations of each soil, ensuring proper root system development, sufficient aeration for CO₂ and O₂ exchange, adequate water retention, a continuous and timely supply of all nutrients in the quantities required by the plant at its different stages of development and production, and soil conservation practices to control erosion?

- What research topics need to be addressed to generate knowledge aimed at proper soil fertility management and irrigation water optimization, thereby increasing coffee yields to a productivity level at least comparable to countries like Costa Rica and Colombia ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)?

The research process aimed at answering the questions posed included five selected coffee plantations in the province of Loja within an altitude range of 800 to 2,100 meters above sea level and was carried out in the following sequence:

1. Selection of sites for soil profile descriptions on the coffee plantation (at least two profiles).
2. Description of the characteristics of the soil profile's natural environment: landform, parent material, drainage conditions, among others.
3. General description of the soil profile and each of its layers and horizons.
4. Triplicate infiltration tests.
5. Undisturbed samples were taken from the two upper horizons for laboratory determination of bulk density and moisture retention at different suction values. From this information, values were derived for the following: aeration capacity, water availability, and physical conditions of the soil in relation to plant growth.
6. Soil sampling from the 00–25 cm depth layer was carried out for laboratory analyses; as well as, for biological soil fertility assessment applying the missing element methodology.
7. Climate classification of the selected site and Soil Taxonomic Classification.
8. Land suitability evaluation for Arabica coffee cultivation.
9. Basic guidelines for sustainable soil and water management, in the interest of achieving the highest yields and, at the same time, controlling erosion, since all plantations are located on hillsides.

In the field, laboratory and greenhouse work, under the guidance of the Research Professors, thesis students from the agronomic engineering and agricultural engineering programs of the UNL participated.

The selected coffee plantation sites in the cantons of Loja province, their altitude, and the participating thesis students are listed below:

- Loja Canton: El Cristal Hacienda site, altitude 2.071 m above sea level. Thesis student: Paola Zambrano
- Olmedo Canton: Guanga site, altitude 1.780 m above sea level. Thesis student: Karina Lima
- Espíndola Canton: Consapamba site, altitude 1.766 m above sea level. Thesis student: Paola Zambrano
- Chaguarpamba Canton: Romerillos site, altitude 1.465 m above sea level and Lozumbe site, 828 m above sea level. Thesis student: Karina Tandazo

The team of research professors, together with the thesis students, began fieldwork at the El Cristal farm on October 18, 2017, motivated by the enthusiasm and commitment to the development of the province of Loja consistently demonstrated by its owner, Dr. Gustavo Samaniego Rodríguez.

Given the limitations of time and financial resources, the soils of coffee plantations in the other cantons of the province have yet to be studied; however, the group of research professors considered it appropriate to systematize the information available to date and include it in this book, entitled *Soils in Coffee Plantations in the Province of Loja: Characteristics, Classification, Fertility, Suitability, and Management*.

The book is structured as follows: 1. Biophysical Characteristics, Socioeconomic Aspects, and Agricultural Production in the Province of Loja; 2. Coffee: Global, National, and Local Vision and Importance; 3. Soil and Nutritional Requirements of Arabica Coffee; 4. Soil units

of selected Arabica coffee plantations in different agroecosystems of the province of Loja: physical-chemical properties, suitability and management; 5. Influence of Formation Factors on Soil Characteristics and their relationship with suitability for Arabica Coffee; 6. Tasks Facing Research on Soil and Water Management to Improve Productivity and Ensure the Sustainability of the System. References are provided at the end of each chapter. The appendices contain a description of the remaining soil profiles at the different sites, the ombrothermic diagram for those sectors where monthly temperature and rainfall data were available, and the methodology for assessing current soil fertility (through laboratory analysis and the biological indicator plant method).

The authors hope that this publication will serve as: 1. study material in university degrees and specialty programs related to the subject; 2. a reference for professionals, public and private institutions that promote productive development in the province of Loja; and, 3. a guide to direct scientific and technical research aimed at generating knowledge with a view to improving the productivity and sustainability of coffee agroforestry systems in the province of Loja.

The most important outcome of the research process proposed in Chapter 6 will be to ensure the adoption of best practices for integrated soil fertility management, erosion control, and water management by coffee growers in the province of Loja, who depend directly on this biodiverse farming system for their livelihood and well-being.

Agradecimientos

Los autores expresan su especial agradecimiento a las siguientes personas que contribuyeron en el proceso de investigación, elaboración, revisión y publicación del presente libro: Dr. Nikolay Aguirre Mendoza, Rector de la Universidad Nacional de Loja (UNL) y Dra. Elvia Zhapa, Vicerrectora Académica, por auspiciar y autorizar la publicación de la obra por la institución. Dr. Max Encalada, Director de Investigación de la UNL, por las facilidades brindadas para la edición final y publicación. Ing. Numa Maldonado Astudillo y Dr. Rafael Morales, por sus fraternos y fundamentados prólogos. Dr. Luis Duicela e Ing. Max Iñiguez Mg.Sc., revisores del libro, designados por la Universidad Nacional de Loja. Dr. Ramiro Vásquez, Dr. César Benavides, Ing. María Chamba e Ing. Fernanda Livisaca, por su valioso apoyo en el procesamiento estadístico de los datos de la evaluación biológica de la fertilidad. A los propietarios de las fincas en cuyos sistemas agroforestales de café se realizaron las calicatas de los perfiles, y se estudiaron las características físico-químicas y el comportamiento hidrodinámico de los suelos: Dr. Gustavo Samaniego, Sr. Manuel Romero, Sr. Servio Rojas Merino y Sr. Milton Franco Reyes. A Carolina Molina García por el diseño de la portada. Nuestro reconocimiento especial a los tesisistas que participaron en el proceso de investigación: Karina Lima, Karina Tandazo y Paola Zambrano.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a los ingenieros Vinicio Alvarado y Augusto Correa, de la Editorial Universitaria UNL, por su dedicación, esmero y paciente labor en la edición de la presente obra hasta su fase final.

Capítulo 1

Características biofísicas, aspectos socioeconómicos y producción agropecuaria en la provincia de Loja

1.1. Características biofísicas

1.1.1. Contexto geográfico y fisiográfico de la Región Sur del Ecuador y la provincia de Loja

El Ecuador se ubica al noroeste de América del Sur, limita al norte con Colombia, al sur y este con Perú, y al oeste con el océano Pacífico. Es el más pequeño de los países andinos con aproximadamente 252.000 km². Lo cruza la línea equinoccial o ecuatorial (de donde adquiere su nombre). Se extiende entre las latitudes 1° 3' N y 5° 0' S y las longitudes 75° 2' O y 91° 0' O (Varela y Ron, 2018).

La cordillera de los Andes es la característica fisiográfica dominante en Ecuador; recorre a lo largo del país en dos ramales (oriental y occidental), separados por cuencas interandinas y conectadas por crestas transversales (Lynch y Duellman, 1997). Esta cordillera divide el territorio continental ecuatoriano en tres regiones diferentes: Costa, Sierra y Amazonía (Figura 1.1), cada una de ellas con un sistema complejo y diverso de climas, suelos, biodiversidad y paisajes, a causa de la combinación del carácter ecuatorial de la zona y la altitud (desde el nivel del mar hasta la cumbre del volcán Chimborazo) (Ministerio del Ambiente y Agua y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [MAE-FAO], 2018). Debido a estas

condiciones, la insolación no es uniforme en todo el país, lo que produce vientos anárquicos y diferentes patrones de precipitación (Espinosa et al., 2018). Winckell et al. (1997) indican que la cordillera de los Andes, es una línea divisoria de aguas perfectas, su costado occidental fluye hacia el océano Pacífico distante de 200 a 300 km; mientras que, los ríos que drenan su costado oriental, van hacia la cuenca del Amazonas, recorriendo más de 3.000 km antes de desembocar en el océano Atlántico.



Figura 1.1. Regiones Naturales y División Política de Ecuador.
Nota. Adaptado de Ministerio de Agricultura y Ganadería. (MAG, 2019).

En cada una de estas regiones se encuentran diferentes paisajes (Winckell et al., 1997); así, la Sierra está compuesta por las siguientes formaciones: 1.- laderas y cordilleras andinas, 2.- cuencas interandinas de la Sierra norte con cobertura piroclástica, 3.- cuencas y valles de la Sierra central sin cobertura piroclástica, y 4.- relieves de la Sierra Sur de rocas antiguas (Figura 1.2).

En la sierra sur, la provincia de Loja, junto con las provincias de El Oro y Zamora Chinchipe, conforma la Región Sur del Ecuador (RSE). Esta región ocupa la porción ecuatoriana de la Depresión de los Andes

Bajos, conocida como la depresión de Amotape–Huancabamba, ubicada entre los 2° y 7° S (Figura 1.3). En esta zona, la estructura tripartita de los Andes (cordilleras Occidental y Oriental, separadas por la meseta interandina) se fragmenta en numerosas cordilleras y cuencas de menor tamaño, acompañadas por un denso sistema de ríos y arroyos que drenan tanto hacia la cuenca amazónica como hacia el océano Pacífico (Beck, 2019). Se trata de un territorio carente de macizos montañosos elevados y, por ende, de nieves perpetuas (Weigend, 2002).

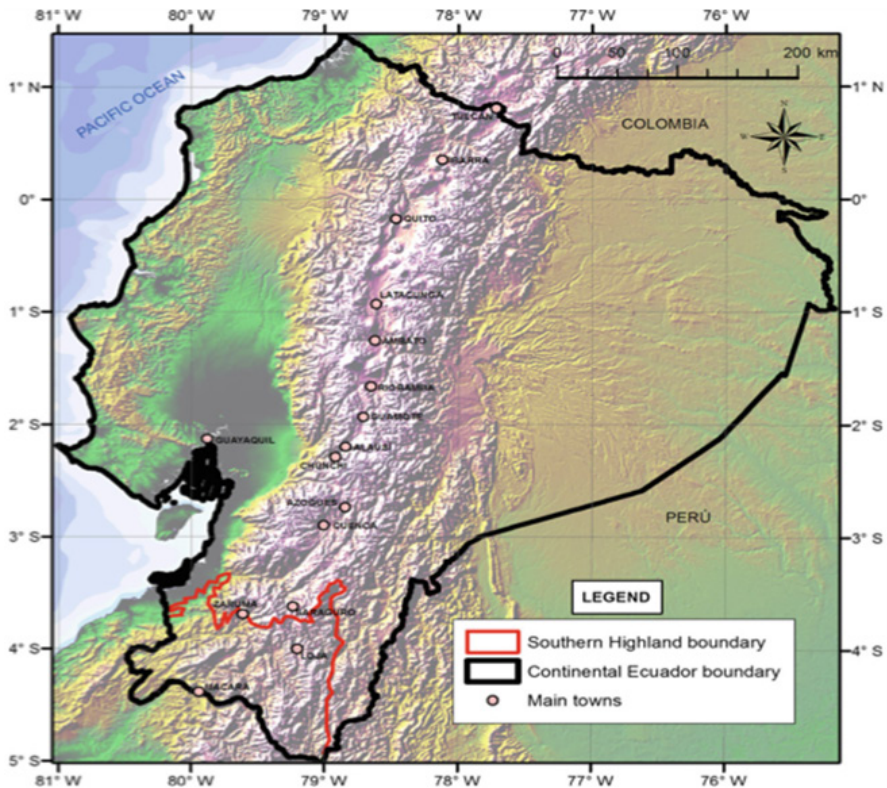


Figura 1.2. Ubicación de la Sierra Sur en relación con el Ecuador Continental. Nota. Adaptado de Paisajes naturales de Ecuador (Winckell et al., 1997).

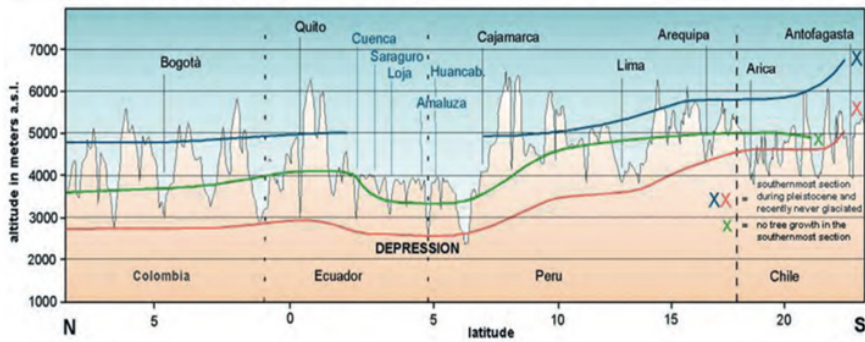


Figura 1.3. Perfil norte–sur de los Andes tropicales y subtropicales que muestra la depresión de Amotape–Huancabamba.

Nota. Adaptado de Geología de los Andes (Richter et al., 2013).

Las tres regiones naturales del Ecuador continental (Costa, Sierra y Amazonía) también se encuentran en la RSE. La relativa baja altitud permite el trasplante latitudinal (horizontal) de los frentes atmosféricos del océano Pacífico y la Amazonía, lo cual genera multiplicidad de climas, ecosistemas y suelos, por lo que es reconocida a nivel mundial por su mega biodiversidad. La zona serraniega o andina de la RSE corresponde a la parte alta de la provincia de El Oro y toda la provincia de Loja, típicamente montañosa, con predominio de terrenos de ladera y escasas áreas planas y onduladas (Valarezo, 2020).

1.1.2. La provincia de Loja en la Región Sur y en el Ecuador

La provincia de Loja está ubicada en el extremo sur occidental del Ecuador, entre las siguientes coordenadas geográficas: 03° 19' 49" en el río León y 04° 45' 00" en el límite con Perú (Latitud Sur); y, 79° 05' 54" en la cordillera Oriental y 80° 29' 03" en Cazaderos (Longitud Oeste) (Plan Integral de Desarrollo de Recursos Hídricos de la Provincia de Loja [PHILO], 1998). Cubre una superficie de 11.063,8 km², equivalente

al 4,3% del territorio nacional, por lo que es la más extensa de las provincias de la Sierra ecuatoriana. Limita al norte con las provincias del Azuay y El Oro, al este con la provincia de Zamora Chinchipe, y al sur y oeste con la República del Perú (Cueva, 2012).

La cordillera Oriental de los Andes atraviesa el territorio provincial de norte a sur; en tanto que, la cordillera Occidental desde Zaruma-Saraguro hasta la frontera peruana se bifurca en una serie de cordilleras transversales que apenas alcanzan 2.500 m.s.n.m., descendiendo progresivamente hacia el sur-occidente hasta la planicie costera occidental, formando pequeños valles u hoyas, la mayoría en forma de “V”, y una red de meso y micro-relieves (Winckell et al., 1997).

Esta dispersión de ramales y sub-ramales de montañas, con sus estribaciones, nudos y portetes, determina el predominio de un relieve muy irregular, con pendientes pronunciadas. Así, el 16,5% del territorio pertenece al rango de pendiente de 0-12% (plano a moderadamente inclinado); el 27,7% al rango de 12-25% (fuertemente inclinado); el 33,9% al rango de 25-50% (ligeramente escarpado); y, el 21,9% mayor de 50% (escarpado a fuertemente escarpado) (Gobierno Provincial de Loja [GPL], 2023).

La variación altitudinal de la provincia de Loja, oscila desde 120 hasta 3.880 m.s.n.m. (unión de los ríos Alamor y Chira, y Cerro Pata-Amaluza, respectivamente) (Instituto Geográfico Militar [IGM], 2020). En este intervalo, el 28,7% del área de la provincia se encuentra entre 120 a 1.000 m.s.n.m.; el 47,4% entre 1.000 a 2.200 m.s.n.m; y, el 23,9% sobre 2.200 m.s.n.m. (Figura 1.4), (MAE-FAO, 2018). En el rango de 1.200 y 1.600 m.s.n.m. se encuentran los pequeños valles subtropicales regados por los ríos Piscobamba, Malacatos, Guayabal-

Catamayo, Casanga, Macará y Pindo-Calvas, todos pertenecientes al curso superior y medio de la cuenca del río Catamayo; de ellos, el más extenso es el valle de Catamayo (3.500 ha) (Valarezo, 2020).

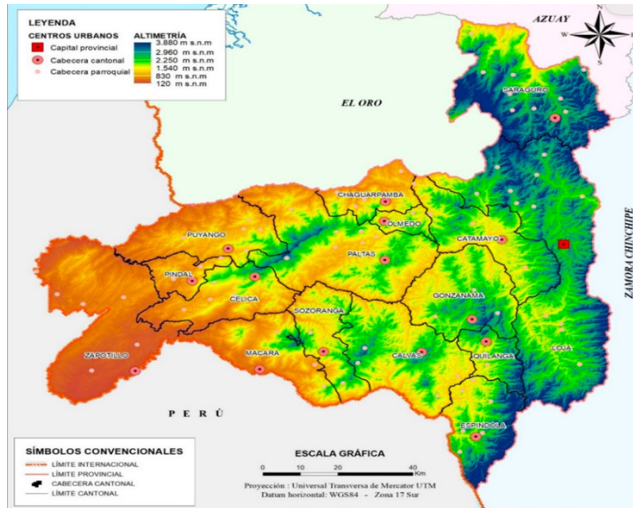


Figura 1.4. Mapa de altimetría de la provincia de Loja.

Nota. Adaptado de Evaluación subnacional de degradación de la tierra (MAE-FAO, 2018).

Según Maldonado et al. (2005) en el relieve de la provincia de Loja se destacan los siguientes nudos:

- Guagrahuma-Acacana, que constituye el principal accidente orográfico de la provincia; emplazado entre los límites de los cantones Loja y Saraguro.
- Cajanuma, es el más pequeño, situado en la parte centro-oriental, a siete kilómetros al sur de la ciudad de Loja.
- Sabanilla, que representa el accidente orográfico más meridional del Ecuador, de este nudo en dirección noroeste, se desprende la cordillera de Santa Rosa que más adelante se desvía en dirección suroeste, para terminar cerca de Macará.

Administrativamente la provincia de Loja está conformada por 16 cantones: Loja, Calvas, Catamayo, Celica, Chaguarpamba, Espíndola, Gonzanamá, Macará, Olmedo, Paltas, Pindal, Puyango, Quilanga, Saraguro, Sozoranga y Zapotillo (Figura 1.5). Estos contienen 26 parroquias urbanas y 78 rurales (Senplades, 2019).



Figura 1.5. División Política Administrativa de la provincia de Loja.
 Nota. Adaptado de Plan de desarrollo y ordenamiento territorial (GPL, 2023).

1.1.3. Cuencas hidrográficas

El territorio de la provincia de Loja se reparte en cuatro cuencas hidrográficas, las cuales contienen 12 subcuencas y 174 microcuencas, todas de relieve muy irregular y drenajes naturales profundos (Valarezo, 2020).

- Al norte, en la parte central occidental, la cuenca del río Jubones, que desemboca en el océano Pacífico y que es compartida con las provincias del Azuay y El Oro; cubre el 9,5% del área de la provincia (1.051,1 km²).
- Al nor-oeste, la vertiente izquierda de la cuenca del río Puyango, que es límite con la provincia de El Oro, y entra a territorio

peruano con el nombre de río Tumbes, para desembocar en el océano Pacífico; cubre el 19,6% del área de la provincia (2.170,7 km²).

- Al extremo este, se encuentra la cuenca alta del río Santiago, que nace en el nudo de Cajanuma y rompe la cordillera Oriental para formar parte de la gran cuenca Amazónica que desagua en el océano Atlántico; cubre el 5,75% de la superficie de la provincia (636,2 km²).
- Finalmente, en el centro y sur, ocupando el 65% de la superficie de la provincia (7.203,6 km²), se encuentra la cuenca del río Catamayo, el cual, a partir de la confluencia con el río Macará forma el río Chira que entra a territorio peruano y desemboca en el océano Pacífico.

1.1.4. Clima

El clima en los Andes del Sur está estrechamente relacionado con la altitud. Las cimas de las partes más altas son muy húmedas, los flancos son húmedos; mientras que, la precipitación disminuye con el descenso de la altitud, a tal punto que los valles y los fondos de las cuencas son muy secos y hasta áridos (Winckell et al., 1997). Al respecto, De Koning et al. (1997) señalan que en la provincia de Loja se observa una diversidad de climas en distancias cortas (40 km), desde el clima árido con precipitación anual de cerca de 400 mm, al hiper-húmedo con más de 4.000 mm.

Maldonado et al. (2005) indican que la diversidad de climas de la provincia de Loja, es el resultado de la acción de los diferentes factores comunes a la macro-región andina (latitud, interacción océano-atmósfera, circulación general y regional de la atmósfera, cubierta vegetal y relieve). Sin embargo, los factores que le proporcionan

características especiales al clima de la provincia son el relieve (Andes Bajos) y la circulación local de la atmósfera ligada al mismo.

En cuanto a la latitud, los citados autores indican que la ubicación del Ecuador y la provincia de Loja, en la denominada Faja Ecuatorial de baja latitud, le otorga, entre otras, las siguientes características generales: 1.- días y noches de igual duración (aproximadamente 12 horas diurnas y 12 nocturnas); 2.- mínima oscilación o amplitud térmica anual de la temperatura media inferior a 5 °C (clima isotérmico), y 3.- mayor oscilación térmica diaria, superior a 15 °C.

Además, la caótica orografía de los Andes Bajos de la RSE, con largos contrafuertes transversales y cortos ramales ortogonales o meridionales, llanuras y valles pequeños e irregulares, constituye un importante factor que da origen a la variedad de climas. Sobre el litoral ecuatoriano y las laderas de barlovento de la cordillera occidental de los Andes septentrionales, influyen a lo largo del año, dos corrientes oceanográficas de diferentes características: la corriente fría de Humboldt y la corriente cálida del Niño; que, en el caso de la provincia de Loja incide hasta el rango de 1.500 a 1.800 m s. n. m. El clima de la provincia también es afectado por las diferentes corrientes de vientos alisios que ingresan hacia la depresión Andina.

Debido a la variación altitudinal, los valores anuales de temperatura media en la provincia de Loja fluctúan entre 6 °C (cumbres del cerro los Picachos en el cantón Espíndola y Fierrohurco en el cantón Saraguro) y 26 °C (Zapotillo, Paletillas, Mangahurco). Los extremos térmicos registrados (temperaturas mínima y máxima absolutas) oscilan entre 9 °C (Saraguro) y 26 °C (Zapotillo). La oscilación o amplitud térmica (diferencia entre el mes con mayor temperatura media y el mes con menor temperatura media) está entre 0,6 y 3,3 °C (isotérmico) (MAE-FAO, 2018). El promedio de gradiente de temperatura es de 0,7 °C

por cada 100 m de incremento de la altitud, para un rango de 1.960 a 2.450 m s. n. m., entre las ciudades de Loja y Zamora, en los Andes del Sur del Ecuador (4°00'S, 79°05'O) (Bendix et al., 2004).

De acuerdo con la clasificación de pisos térmicos elaborada por Cañadas (1983) para el Ecuador, se determina que el 62,7% del régimen térmico de la provincia de Loja, es tropical y subtropical, el 27,5% es temperado; y, el 9,8% es frío.

Maldonado et al. (2005) describen los siguientes pisos térmicos en función de los rangos de la temperatura promedio anual (TPA):

- **Tropical:** (TPA > 22 °C). Cubre la mayor superficie de la provincia con el 36, 5 % (4.038, 3 km²), se localiza en las áreas bajo la cota de 1.200 m s. n. m.: cantón Zapotillo y gran parte de los cantones Macará, Celica, Pindal, Alamor, Chaguarpamba y Catamayo; desplazándose hacia las dos riberas de penetración aguas arriba del río Catamayo hasta cerca de Chinguilamaca.
- **Subtropical:** (TPA 18-22 °C). Se ubica en el piso comprendido entre 1.200 y 1.900 m s. n. m. (Yangana, Quinara, Vilcabamba, Malacatos, Amaluza y Catacocha). Abarca el 26,2% (2.898,7 km²) del territorio de la provincia y se distribuye en una franja muy irregular ubicada entre los bordes más orientales del clima tropical y los más occidentales del clima temperado.
- **Temperado:** (TPA 12-18 °C). Corresponde al piso entre 1.900 y 3.000 m s. n. m. (Celica, Cariamanga, Gonzanamá, Saraguro, Loja, Chuquiribamba), cubre el 27,3% del territorio de la provincia (3.024 km²).
- **Frío:** (TPA < 12 °C). Comprende el piso entre 3.000 y 3.880 m s. n. m. (mesetas, flancos y picachos de cordillera más altos de los cantones Saraguro, Loja y Espíndola), cubriendo el 10% del territorio provincial (1.106,4 km²).

Los regímenes de lluvia en el territorio de la provincia son: 1.- régimen tipo costa al sur-oeste, en el cual se presenta la temporada lluviosa de diciembre a mayo, con mayor incidencia en los meses de enero a marzo; 2.- régimen típicamente andino en el centro, presentándose la temporada lluviosa de octubre a abril y 3.- régimen oriental o amazónico hacia el oriente, correspondiente a las estribaciones de la cordillera de los Andes, donde se presentan lluvias con mayor frecuencia a lo largo de todo el año (MAE-FAO, 2018).

Maldonado et al. (2005) describen las siguientes clases de distribución de la precipitación media anual en el territorio de la provincia:

- **Árido.** Promedio de lluvia $< 400 \text{ mm año}^{-1}$, aparece en las áreas bajo la cota de 1.200 m s. n. m., principalmente en Sozoranga, Zapotillo, valle de Catamayo y en la parte más septentrional del cantón Saraguro. Ocupa una superficie de 166 km^2 (1,65 %).
- **Semiárido.** Rango pluviométrico de 400 a 600 mm año^{-1} , se localiza en el sectores occidental y central de la provincia, en gran parte del cantón Zapotillo y las zonas más occidentales de los cantones de Macará y Pindal, prolongándose a través de una larga y sinuosa faja hasta el cantón Catamayo, envolviendo a la faja árida. Cubre 1.992 km^2 (18 %).
- **Semihúmedo.** Promedio de lluvia de 600 a $1.000 \text{ mm año}^{-1}$, se distribuye en cerca del 45 % del territorio de la provincia, en dos sectores: 1.- hacia el norte, el resto del área que no cubre el clima árido y semiárido del cantón Saraguro y luego, en dirección norte-sur y este-oeste, fragmentos de los cantones Loja, Catamayo, Paltas, Olmedo, Chaguarpamba, Celica, Pindal y Zapotillo; y 2.- hacia el sur, parte de los territorios de los cantones Loja, Catamayo, Gonzanamá, Calvas, Quilanga, Macará y Espíndola.

- **Húmedo.** Precipitación de 1.000 a 1.500 mm año⁻¹, se distribuye hacia el norte, sur-este y este, inmediatamente después del clima semihúmedo, en los cantones Saraguro, Loja, Chaguarpamba, Olmedo, Paltas, Celica, Puyango, Gonzanamá, Quilanga, Calvas, Sozoranga y Espíndola. Cubre cerca del 36% del territorio provincial (3.983 km²).

Los datos promedios de precipitación indican que en la parte baja occidental de la provincia el mes más lluvioso es marzo, con un promedio de 240 mm en Zapotillo (estación Malvas, 20 años de registro) y 340 mm en Macará (estación Totumos, 30 años de registro), en ambos casos con pocas lluvias torrenciales y destructivas. Las precipitaciones con mayor intensidad (aguaceros) se presentan en el sector occidental, habiéndose registrado intensidades de 184 mm día⁻¹ en Macará y 153 mm día⁻¹ en Zapotillo, específicamente en el mes de marzo; contra 65,4 mm día⁻¹ en la ciudad de Loja y 57,6 mm día⁻¹ en la ciudad de Saraguro, localidades ubicadas en el sector oriental de la provincia (Valarezo et al., 2009).

En la parte occidental de la provincia de Loja, el clima “típico” se modifica casi periódicamente por el fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación del Sur), que generalmente se subdivide en dos fenómenos con extremos climáticos, en su mayoría recurrentes en intervalos de 3 a 11 años. Durante El Niño, el Pacífico oriental y central tropical revela un incremento positivo de la temperatura de la superficie del mar (TSM), lo que conduce a un fuerte aumento de la temperatura del aire y fuertes lluvias, particularmente en las llanuras costeras, el Bosque Seco Tumbesino y las laderas de la cordillera Occidental. Su antagonista, La Niña, se caracteriza por anomalías muy frías en la TSM, lo que causa una reducción significativa de la temperatura del aire y sequía en las áreas antes mencionadas, pero a veces también

produce lluvias más intensas en los Bosques Lluviosos de las laderas orientales de los Andes (Beck, 2019).

En la provincia hay mayor intensidad de la velocidad del viento en los meses de julio y agosto; y, en la ciudad de Loja la dirección predominante del viento es del norte, porque la corriente de aire en movimiento tiende a desplazarse a lo largo del pequeño conducto orográfico que forma el río Zamora que corre de sur a norte, hasta el sitio Las Juntas, en el cual rompe la cordillera oriental, para pasar a la provincia de Zamora-Chinchipec (Maldonado et al., 2005).

En el mismo valle de Loja o de Cuxibamba, en la cordillera del Villonaco sitio Ventanas (2.720 m.s.n.m.), hay el encuentro de dos fuertes corrientes de aire, donde se ha instalado el primer parque eólico de altura en el país, para la generación de energía eléctrica (GPL, 2015).

1.1.5. Geología y geomorfología

Winkell et al. (1997) indican que en la Sierra Sur no existe actividad volcánica reciente (post-oligocena) como sucede en la Sierra Norte, lo que se traduce en la ausencia de proyecciones piroclásticas superficiales. Las formaciones litológicas pertenecen a cuatro grupos: 1.- rocas metamórficas y facies asociadas: esquistos y cuarcitas paleozoicas; gneises, anfíbolitas y migmatitas paleozoicas; esquistos verdes azules y pelíticos, anfíbolitas y cuarcitas. 2.- rocas volcánicas y volcánico-sedimentarias: volcanismo cretácico andesíticos; fliach cretácico (lutitas, grauvacas y piroclastos); lavas y volcánico-clásticas, paleocenas y oligocenas; cobertura cimérica de lavas y piroclásticos ácidos volcánico-clásticas, pleistocenos. 3.- rocas sedimentarias: arcillas, areniscas y conglomerados (mioplocenos) y aluviones del cuaternario; fliach cretácico (conglomerados, areniscas lutitas) y 4.-

rocas intrusivas: batolitos granitoides; inclusiones ultra-básicas. Se complementan con la presencia de algunos depósitos sedimentarios muy localizados.

Las rocas cristalinas de la cordillera Real (cordillera Oriental) constituyen el basamento en la parte oriental de la zona, además de las rocas metamórficas, que también están presentes en el Bloque Amotape-Tahuín. La parte occidental del área está dominada por: rocas volcánicas y volcano-sedimentarias, las rocas oceánicas de la cuenca Alamor-Lancones, los conjuntos volcánicos de arco continental terciario y las cuencas sedimentarias intramontañosas. Las rocas oceánicas del Cretácico en la zona están representadas por secuencias volcano-sedimentarias de ante-arco (Instituto Nacional de Investigación en Geología, Minería y Metalúrgica [ININGEMM], 2017).

La geomorfología hace relación a las formas del terreno y los procesos de formación involucrados. El aspecto físico natural de la provincia de Loja favorece el desarrollo de una fuerte erosión, la cual se manifiesta en la ocurrencia de movimientos en masa y en una acción de denudación por escurrimiento difuso y concentrado.

Según Ochoa (2015), debido a los procesos dinámicos que han modelado las formas, la geomorfología de la provincia de Loja comprende los siguientes Grandes Paisajes: Modelado Glacial, Estructural Fluvio-Erosional, Estructural Denudativo y Fluvial Acumulativo.

La unidad geomorfológica predominante en la provincia de Loja pertenece al relieve montañoso, que cubre el 62% del territorio (6.859,6 km²), en la que se observan montañas con cimas agudas y subagudas que corresponden a una línea a partir de la cual divergen sus laderas que son generalmente rectas, y en otros casos presentan escarpas bastante fuertes. La geoforma colinada ocupa el 25,4%

del territorio (2.810,2km²), se presenta principalmente al oeste de la provincia. Las ondulaciones corresponden al 12,6% del área (1.394km²). En los sectores de Saraguro, Puyango, Alamor y Zapotillo, las colinas son el resultado de la degradación por disección intensiva de anteriores planicies (Puyango, Alamor y Zapotillo) y altiplanicies (Saraguro), o resultado del cuasi aplanamiento, por la denudación extrema (senil) de una antigua cordillera, y en otros sitios como Loja, Catamayo, Malacatos, Vilcabamba, Quinara, Lucero y Río Playas, son depósitos coluviales y aluviales de origen deposicional o de acumulación (Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos [CLIRSEN], 1986).

1.1.6. Suelos

El levantamiento de los Andes en épocas pasadas, modificó radicalmente el relieve y el clima de la sección occidental de América del Sur y permitió que Ecuador, un país relativamente pequeño, desarrolle una variedad de suelos que soportan una de las expresiones más amplias de biodiversidad en el mundo. A pesar de su importancia y diversidad, el suelo es quizá uno de los recursos naturales menos conocidos en el país. A través de los años se han publicado mapas con sus respectivas memorias explicativas. En el libro *Suelos del Ecuador: Clasificación, Uso y Manejo*, que es una versión ampliada en español del libro “Soils of Ecuador”, publicado en inglés por Springer en el año 2018, presenta la historia de la investigación, el clima, la geología, la geomorfología, los principales tipos de suelo, las propiedades, clasificación, uso y manejo de los suelos en el Ecuador (Espinosa et al., 2022).

Entre los estudios regionales de suelos realizados en la década de 1970 en el país, se destaca el Levantamiento Exploratorio General de Suelos de las provincias de Loja y El Oro, ejecutado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), que cubrió una superficie de 13.767km². Los

resultados se publicaron a escala 1:250.000. Las unidades de mapeo de los suelos incluyen asociaciones y consociaciones (Programa Nacional de Regionalización de Tierras [PRONAREG], 1980). En 1977 el ex Programa de Desarrollo del Sur (PREDESUR) desarrolló un estudio de suelos y su interpretación agrológica que cubrió una superficie de 69.016ha en las áreas ecuatorianas del Proyecto Binacional Puyango-Tumbes (Ecuador-Perú) consideradas prioritarias para el Ecuador (Espinosa et al., 2018).

En años posteriores, levantamientos detallados de suelos se realizaron en las áreas de los proyectos de riego de la provincia de Loja, tanto por el ex Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI), como por el exPREDESUR.

De la sistematización de la información existente, es pertinente enfatizar que debido a la ausencia de actividad volcánica reciente (post-Oligoceno), los materiales parentales de los que se han formado los suelos corresponden al tipo de rocas antiguas (ígneas, metamórficas y lavas), complementados con algunos depósitos sedimentarios localizados; en cambio, en la Sierra Norte por la presencia de volcanes activos, el material parental está constituido por recubrimientos volcánicos del cuaternario (cenizas, piedra pómez y otros), lo cual determina que los suelos sean completamente diferentes entre estas regiones.

La variedad de suelos desarrollados sobre rocas antiguas en la RSE, se explica por la diversidad de condiciones pedogenéticas que resultan de los diferentes climas (variaciones de temperatura y precipitación debido a la altitud), material parental (regolito) y el relieve (definido principalmente por el grado de pendiente). Consecuentemente, los suelos de la Sierra Sur responden a una topo-climo-secuencia que se superpone a una paleo-secuencia; así, en las zonas medio altas se han formado suelos fersialíticos, saturados, ricos en minerales 2:1 con trazas de minerales 1:1 que se unen paulatinamente a paleosuelos

ferralíticos desaturados. Sin embargo, las tierras bajas están dominadas principalmente por Vertisoles, rodeados de paleo-suelos fersialíticos (Zebrowski y Sourdat, 1997).

En la Figura 1.6. se presenta un corte esquemático de la RSE, adaptado del Mapa de Suelos del Ecuador por la Sociedad de la Ciencia del Suelo del Ecuador (1986), en el que para cada una de las tres regiones naturales (Zona Costera, Zona Interandina y Zona Amazonía) se resume la información sobre los factores de formación del suelo: relieve, material parental, clima (expresado por la temperatura y humedad); y, el nombre del orden del suelo (según la Taxonomía de Suelos del Departamento de Agricultura de Los Estados Unidos - USDA, 1975)².

En el corte esquemático, a la provincia de Loja le corresponden los suelos de la Zona Interandina, que es una región montañosa, en la cual a medida que se asciende en altura disminuye la temperatura y el clima se hace más frío y más húmedo, distinguiéndose los pisos altitudinales tropical, subtropical, temperado y frío, en los cuales la vegetación y por ende los suelos son diferentes. En los diversos paisajes de esta zona, en términos generales se encuentran los siguientes órdenes de suelos (Valarezo, 2020).

² La Taxonomía de Suelos del USDA (1975), en el nivel jerárquico superior clasifica a los suelos en 10 órdenes, seis de los cuales se encuentran en la provincia de Loja.

Alfisoles: suelos moderadamente a bien desarrollados, con alta fertilidad, con un horizonte de acumulación de arcilla (Bt), ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos, y saturación de bases superior > 35%.

Entisoles: suelos muy jóvenes, sin horizontes de diagnóstico.

Inceptisoles: suelos jóvenes con desarrollo incipiente, sin acumulaciones significativas (horizonte Bw).

Mollisoles: suelos con un horizonte superficial oscuro, rico en materia orgánica y con alta fertilidad.

Ultisoles: suelos de un avanzado grado de desarrollo (intemperizados), fuertemente ácidos, con baja saturación de bases (< 35%), y con un horizonte de acumulación de arcilla (Bt).

Vertisoles: suelos ricos en arcillas expansivas, que se contraen y expanden según el contenido de agua, generando grietas profundas.

- **Estribación occidental**, de material parental metamórfico, volcánico antiguo y sedimentario, clima temperado seco-húmedo y húmedo, donde predominan Alfisoles y Ultisoles (éstos fueron desarrollados en un clima más húmedo que el actual).
- **Sierra alta**, de material parental volcánico antiguo (lava), clima frío-húmedo, con predominancia de Entisoles (poco profundos, contacto rocoso a menos de 50 cm) e Inceptisoles, en ambos casos son de reacción ácida y baja saturación de bases.
- **Vertientes interandinas**, de material parental metamórfico y volcano-antiguo sedimentario, clima temperado seco-húmedo, con suelos Entisoles, Inceptisoles, Alfisoles y Ultisoles (éstos últimos, en las partes más altas y húmedas).
- **Valles interandinos**, de material parental coluvial y aluvial, de clima temperado-cálido estacionalmente seco (por ejemplo, el valle de Malacatos), con suelos Entisoles, Inceptisoles y Vertisoles.

Según el mapa geopedológico, los seis ordenes de suelos del USDA Taxonomy que cubren el 96 % del territorio de la provincia de Loja tienen la siguiente distribución: Alfisoles 121.702 ha (11 %); Entisoles 287.659 ha (26 %); Inceptisoles 542.126 ha (49 %); Mollisoles 44.255 ha (4 %); Ultisoles 55.319 ha (5 %); y, Vertisoles 11.063 ha (1 %) (MAG, 2019).

La irregularidad de la topografía con predominio de fuertes pendientes, es la que ha determinado en mayor grado la aptitud de los suelos y constituye la principal limitante para el desarrollo agropecuario de la provincia (MAE-FAO, 2018).

Las clases agrológicas (clases de aptitud de uso del suelo), se definen en función de la pendiente del terreno, el tipo y grado de erosión, y la profundidad efectiva. Consecuentemente, en la provincia de Loja

no se encuentran terrenos de la Clase I. Las características, aptitud, requerimiento de manejo y extensión de las clases de II a VIII se describen resumidamente a continuación:

- Clase II. Comprende los terrenos de 2-6% de pendiente, ondulados a suavemente inclinados. Tienen una extensión de 5.575 ha (0,5 % de la superficie de la provincia). Pueden cultivarse permanentemente con prácticas sencillas de conservación de suelos: cultivo en contorno (curvas de nivel), cultivo en fajas, barreras vivas.
- Clase III. Incluye los terrenos de 6-13 % de pendiente, inclinados, con una extensión de 36.911 ha (3,3 %). Son aptos para cultivos limpios continuos, con prácticas intensivas de conservación del suelo: franjas en contorno menos anchas, barreras vivas menos distanciadas, vías de agua.
- Clase IV. Corresponde a los terrenos moderadamente escarpados de 13 a 40 % de pendiente, con una extensión de 56.431 ha (5,1 %). Se pueden realizar cultivos limpios ocasionales con prácticas intensivas de conservación de suelos: zanjas de absorción, barreras de piedra, barreras vivas, terrazas intermitentes, terrazas individuales, canales de desviación.
- Clase V. Es una clase de transición que incluye terrenos que pueden ser inclinados o no, pero que necesitan de mayores estudios para establecer su aptitud. Las limitaciones podrían ser: alta pedregosidad, elevada salinidad, escaso drenaje, entre otras. Cubren 16.638 ha (1,5 %).
- Clase VI. Corresponde a los terrenos escarpados de 40 a 60 % de pendiente. Abarca una superficie de 123.019 ha (11,2 %). Son terrenos impropios para cultivos limpios, que requieren de vegetación permanente, semi-bosques de frutales arbóreos,

sistemas agroforestales (por ejemplo, café y árboles asociados), sistemas silvopastoriles.

- Clase VII. Comprende terrenos muy escarpados de 60-75 % de pendiente. Cubren 544.969 ha (49,3 %). Impropios para cultivos y pastizales, solamente bosques.
- Clase VIII. Son las áreas extremadamente escarpadas de pendiente mayor a 75 %. Cubren 294.708 ha (26,6 %). Terrenos inapropiados para las actividades antrópicas debiendo mantener su propia cobertura vegetal (vegetación protectora con especies nativas) (GPL, 2023).

1.1.7. Biomás y zonas de vida

Cuando se grafican en un plano de coordenadas los valores de la temperatura del aire (promedio mensual) y precipitación media mensual, se obtiene el diagrama ombrotérmico, en el cual se pueden identificar los meses ecológicamente secos. Esta información se vincula estrechamente con las zonas de vida de Holdridge, lo que permite explicar las variaciones de los tipos de vegetación en una determinada zona (Cañadas, 1983).

Complementariamente, se debe considerar el número horas de radiación solar directa; así, en la provincia de Loja, la mayor insolación se registra en el sector occidental bajo, semiárido y despejado; y, la menor, en el sector oriental más alto húmedo y nublado. Por ejemplo, la ciudad de Loja presenta un promedio de 1.800 horas de sol al año (5 horas diarias); en cambio, Macará y Zapotillo, tienen más de 2.000 horas al año de radiación solar directa (Maldonado et al., 2005).

A lo largo de la costa del Pacífico, la alta presión asociada con el anticiclón del Pacífico Sur, que se desplaza hacia el norte y el sur junto con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), influyen

especialmente en la depresión de Amotape-Huancabamba suprimiendo las lluvias del equinoccio de septiembre, quedando así, solo una estación lluviosa entre enero y mayo. Esta es el área de los famosos bosques secos Tumbesinos, con sus altos ceibos de gruesas raíces y verdes tallos que tiene por función almacenar agua; y las llamativas Erythrinas y Bugambillas que están densamente cubiertas de epífitas como *Tillandsia usneoides* y otras Bromelias. Consecuentemente, la provincia de Loja constituye una región de biodiversidad única en el mundo, donde se destaca y contrasta la riqueza de los bosques secos con los neblinosos. En este contexto, se distinguen cuatro biomas: sabana tropical, estepa cálida, pradera, y páramo. La multiplicidad de paisajes tiene su origen en el fraccionamiento de los Andes en macizos de pequeña escala, por un lado, y en los gradientes climáticos extremos, por otro (Beck, 2019).

En los pisos climáticos que corresponden a las formaciones ecológicas Basal y Premontano, que en conjunto abarcan cerca del 65% del territorio provincial (7.191,5km²), ha surgido un paisaje de estepa seca o sabana y de estepa moderada. Aquí, la vegetación arbórea está representada por las siguientes especies: guayacán (*Tabebuia billbergii*), almendro (*Geoffroea spinosa*), charán blanco (*Chloroleucum manguense*), palosanto (*Bursera graveolens*), algarrobo (*Prosopis juliflora*), guásimo (*Guazuma ulmifolia*), ceibo (*Ceiba pentandra*), porotillo (*Cochlospermum vitifolium*), barbasco (*Piscidia carthagenensis*), pretino (*Cavanillesia plantifolia*), fernansánchez (*Triplaris cumingiana*), amarillo (*Centrolobium ochroxylum*), faique (*Acacia macracantha*), sota (*Clarisia racemosa*), laurel oloroso (*Cordia macracantha*), y arabisco (*Jacaranda* sp.).

Las formaciones ecológicas Montano y Montano Bajo, conforman la parte serrana de la provincia, que comprende el 35% del territorio (3.872,3km²). En estos pisos se destacan las siguientes especies arbóreas: cedro (*Cedrela*

montana), cascarilla (*Cinchona* spp.), luma (*Pouteria lucuma*), curiquiro (*Ocotea* sp.), guailo (*Delostoma integrifolia*), pumamaqui rosado (*Oreopanax* sp.), aliso (*Alnus acuminata*), cashco (*Weinmannia* sp.), laurel de cera (*Myrica pubescens*), curiquiro (*Ocotea* sp.), romerillo (*Prumnopitys montana*), y llashin (*Cyathea* sp.) (GPL, 2015).

1.1.8. Vegetación y uso del suelo

El territorio de la provincia de Loja presenta una diversidad de ecosistemas con diferentes coberturas de vegetación y usos del suelo, con la siguiente distribución (Chalán y Cueva, 2010):

- Páramo: 2,6 % (28.665 ha).
- Bosque húmedo: denso 5,8 % (64.045 ha); intervenido 4,12 % (45.458 ha).
- Matorral húmedo: alto 15,28 % (168.778 ha) y degradado 0,56 % (6.160 ha).
- Bosque seco: denso 3,26 % (36.052 ha); semidenso 9,55 % (105.491 ha), y ralo 3,99 % (44.007 ha).
- Matorral seco: alto 7,44 % (82.145 ha) y bajo 4,62 % (50.968 ha).
- Pastos: natural 17,41 % (192.234 ha); cultivado 11,26 % (124.367 ha).
- Cultivos asociados: andinos 0,75 % (8.257 ha); subtropicales 3,19 % (35.180 ha).
- Otros cultivos: café 0,44 % (4.823 ha); maíz 2,58 % (28.518 ha); caña de azúcar 0,36 % (3.928 ha).
- Bosques plantados: pino 0,3 % (3.355 ha); eucalipto 0,12 % (1.372 ha).
- Asociaciones: pasto plantado-cultivo 0,64 % (7.102 ha); pasto matorral 1,31 % (14.433 ha).

- Suelo desnudo: 0,54 % (5.996 ha).
- Cuerpos de agua: ríos 0,24 % (2.608 ha); lagunas 0,02 % (261 ha).
- Área urbana e infraestructura: 0,34 % (4.831 ha).
- Sin definición de uso: 3,15 % (34.814 ha).

1.1.9. Desertificación y sequía

En el Ecuador, las provincias más afectadas por problemas de desertificación y sequía son: Loja, Manabí y Chimborazo, las mismas que a su vez presentan los índices más altos de pobreza rural del país.

En Loja, el 70 % de la superficie provincial sufre procesos de degradación. Las causas antrópicas de la desertificación pueden agruparse en tres grandes categorías: deforestación, uso desequilibrado del suelo (con relación a su aptitud); y, artificialización excesiva o inadecuada del ecosistema (ligada a prácticas como la mecanización excesiva y el riego inadecuado (MAE, 2014).

El déficit hídrico estacional (mayo-diciembre) afecta al 49% del territorio de la provincia de Loja, predominantemente en los cantones de Macará, Zapotillo, parte baja de los cantones Celica, Pindal, Paltas, Olmedo, Chaguarpamba, Olmedo, Sozoranga, Puyango, Quilanga, Catamayo, Loja, Gonzanamá y Saraguro. Las zonas con menor déficit hídrico se ubican en las partes altas de los cantones Loja, Saraguro, Calvas y Espíndola (GPL, 2015).

La distribución del área de la provincia en cuanto a la susceptibilidad a la sequía es la siguiente: sin susceptibilidad 47.949 ha (4,3 %); baja susceptibilidad 324.970 ha (29,4 %); media susceptibilidad 523.204 ha (47,3 %); y, alta susceptibilidad 210.255 ha (19 %) (GPL, 2023).

En el periodo 2000-2017, Loja fue la segunda provincia a nivel nacional con el indicador más alto de superficie agrícola pérdida por sequía (IPS: 1,93%). Los cultivos más afectados, fueron: maíz duro seco (15.605 ha), café (5.692 ha), banano (3.696 ha); y, maíz duro choclo (2.805 ha) (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador [MAATE], 2021).

1.2. Aspectos socioeconómicos

1.2.1. Población

1.2.1.1. Población de Ecuador.

Los datos del VIII Censo de Población y VII de Vivienda realizado en el 2022, revelan que la población de Ecuador fue de 16.938.986 habitantes, lo que representa un crecimiento de 17,2% con respecto al VII Censo de Población y VI de Vivienda del 2010 (14.459.077 personas), con un crecimiento promedio anual de 1,3%. La edad promedio de la población es de 29 años, 5 años mayor que en el 2010 (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2010; INEC, 2022).

Porcentaje de población según sexo. De los resultados de los dos últimos Censos, se deprenden que los porcentajes de la población por sexo son muy similares entre hombres y mujeres. En el 2010, los hombres alcanzaron el 49,6% (7.171.702) y las mujeres el 50,4% (7.287.375) de la población nacional (14.459.077), con una variación del 1,6%; mientras que, en el 2022, de una población de 16.938.986 de habitantes, el 48,7% (8.249.286) fueron hombres y el 51,3% (8.689.700) restante correspondió a las mujeres; generando una variación de 5,3%.

Relación hombres-mujeres. La variación de hombres y mujeres en Ecuador decreció 4,3 % entre los censos de 2010 y 2022, pasando de 98 a 94 hombres por cada 100 mujeres, respectivamente. Esta variación podría deberse a múltiples factores demográficos y sociales, entre otros: la migración, mayor esperanza de vida femenina, cambio en las tasas de natalidad, fenómenos sociales y culturales; y, los patrones de mortalidad.

1.2.1.2. Población de la Provincia de Loja.

La población de la provincia de Loja creció 8,1 % entre los dos últimos censos, pasando de 448.966 (2010) a 485.421 (2022) (2,9 % de la población nacional). La edad media en la provincia es de 34 años, (5 años más que la nacional). De los 5.188.402 de hogares a nivel nacional, 148.760 corresponden a la provincia (INEC, 2022).

Porcentaje de población según sexo. En el censo del año 2010, la variación entre el número de hombres y el número de mujeres fue de 3,3 % (hombres: 49,2 %: 220.891; mujeres: 50,8 %: 228.075); en cambio, en el censo del 2022 la variación se incrementó a 6,2 % (hombres: 48,5 %: 235.429; mujeres: 51,5 %: 249.992) (INEC, 2010; INEC, 2022).

Relación hombres-mujeres. En el Censo del 2010 hubo 97 hombres por cada 100 mujeres; mientras que, en el Censo 2022 la proporción de hombres con respecto al de mujeres disminuyó en 3,3 % (94 hombres por cada 100 mujeres). Las causas son de tipo demográfico y social específicos (INEC, 2010; INEC, 2022).

Población por cantones. En los censos del 2010 y del 2022, se observa una marcada concentración de habitantes en el cantón Loja, con el 47,9 % (215.055) y el 51,5 % (249.992), de la población

provincial, respectivamente. Este último informe, señala que uno de cada dos habitantes de la provincia residen en el cantón Loja. Otros cantones relevantes poblacionalmente, según el censo de 2022, son: Catamayo, con el 7,3 % (35.435); Saraguro, el 6,0 % (29.125) y Calvas, el 5,4 % (26.212); en tanto que, los cantones con menor población, son: Sozoranga, con 1,4 % (6.796); Olmedo, con 0,9 % (4.369) y Quilanga, con 0,8 % (3.883) (INEC, 2010; INEC, 2022).

Población por rangos de edad. Las pirámides poblacionales evidencian que hay un descenso de la población dependiente en el rango de 0-14 años, oscilando entre el 31,5 % en 2010 a 24,2 % en 2022; mientras que, en el grupo etario de 15-64 años (población económicamente activa), se ha elevado el porcentaje poblacional de 59,3 (2010) a 63,9 % (2022). De igual manera, la población adulta mayor a 65 años presenta una tendencia de un envejecimiento gradual, variando de 9,2 % (2010) a 11,9 % (2022). Por otro lado, Loja es la provincia que concentra más adultos mayores en relación al tamaño de su población con 11,9 % (57.799), seguido de las provincias de Bolívar 11,7 % (23.272) y Cañar 11,6 % (26.481) (INEC, 2010; INEC, 2022).

Población según área de residencia. En la provincia de Loja, la población en las zonas urbanas pasó de 151.956 (1990) a 293.194 (2022), cuyo incremento fue de 92,9 %. Al respecto, Macuacé y Gómez (2014) anotan que la migración rural-urbana en el Ecuador es un fenómeno global que se ve influenciado por diversos factores, como la búsqueda de mejores oportunidades laborales y económicas, mejor calidad de servicios básicos y la concentración de la actividad económica en las ciudades; en cambio, en el mismo periodo (1990-2022), la población rural decreció 17,4 % (232.742-192.227). Esta fuerte contracción de la población rural, mientras la urbana

prácticamente se duplica, evidencia un intenso flujo de ciudadanos, ya que las zonas rurales no solo pierden habitantes por migración, sino que también experimentan tasas de natalidad más bajas y el envejecimiento de la población (INEC, 2010; INEC, 2022).

Densidad poblacional. El rango de la densidad poblacional en la provincia de Loja se identifica como intermedia, oscilando de 40,6 (2010) a 44,0 habitantes km⁻² (2022), incremento equivalente a 26%. De acuerdo al Censo de 2022, los cantones con mayor densidad poblacional, son: Loja: 132,1; Catamayo: 54,3; Olmedo: 38,4 y Calvas: 30,8 hab km⁻²; en tanto que, Quilanga y Sosoranga con 16,5 y 16,2 hab km⁻² son los de menor densidad poblacional, respectivamente. Con relación a lo anotado, Sudharsanan et al. (2022) señalan que la densidad poblacional se incrementa por la interacción entre factores demográficos, como el aumento de la natalidad o la disminución de la mortalidad (gracias a avances médicos y mejoras en la calidad de vida) y a factores geográficos y socioeconómicos, como la presencia de recursos naturales, un clima favorable, o el desarrollo de actividades económicas que atraen migrantes en búsqueda de mejores oportunidades y servicios. En cambio, Bish (2024) sostiene que un mayor número de personas implica una mayor demanda de alimentos, agua, vivienda, energía, atención médica, transporte, entre otros; generando con ello una mayor degradación ecológica, el aumento de conflictos y un mayor riesgo de desastres a gran escala como las pandemias (INEC, 2010; INEC, 2022).

Identificación según cultura y costumbres. Martínez (2011) anota que la auto identificación étnica, es el acto de una persona de reconocerse y declararse como miembro de un grupo étnico específico, basándose en sus costumbres, antepasados, idioma, cultura y sentido

de pertenencia. El Censo de año 2022 establece que la población de la provincia de Loja es mayoritariamente mestiza (95,4%). La población indígena representa el 3,7%; mientras que, otras etnias como afro-ecuatoriano, negra, mulata y montubia alcanzan el 0,9% restante.

1.2.2. Indicadores económicos

1.2.2.1. Población económicamente activa (PEA).

En la provincia de Loja, hay una variación de 19,8% con respecto a la población en edad de trabajar (PET) para los años 2010 (307.038) y 2022 (367.949). De igual manera, en el mismo periodo hay un incremento de la población económicamente activa (PEA) de 22,0% (151.699 y 185.078). Este incremento podría interpretarse como un crecimiento de la economía y con ello, más oportunidades de trabajo; sin embargo, también puede resultar contraproducente en el momento en que el incremento de la PEA sea mayor que la creación de fuentes de trabajo, lo que se produciría un aumento de la tasa de desempleo (Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo [ENEMDU], 2022).

Desempleo. De acuerdo a los resultados de los Censos 2010 y 2022, en la provincia de Loja, el desempleo decreció de 4,7% (7.129) a 3,1% (5.742), variación equivalente a 19,5% de los valores absolutos. Este resultado es un avance importante en el mercado laboral de la provincia, en vista que una menor proporción de la PEA se encuentra desempleada (INEC, 2023).

Subempleo. De igual manera, la tasa de subempleo disminuyó en los dos últimos censos, de 68,9% (2010) a 22,9% de la PEA (2022). El decrecimiento fue de 46% puntos porcentuales y la variación de la

tasa fue 67%. Es evidente que la caída en la tasa de subempleo es muy positiva, por cuanto el mercado laboral se ha fortalecido y las condiciones de empleo han mejorado sustancialmente (INEC, 2023).

1.2.2.2. Valor Agregado Bruto (VAB).

El valor agregado bruto (VAB) de la provincia de Loja, entre los Censos de 2010 y 2022, creció 27,9% con cifras de 1.296,2 a 1.657,7 millones de dólares, respectivamente; mientras que, en términos de valor agregado bruto per cápita, el crecimiento fue de 18,3% (2.887 a 3.415 dólares por persona), lo que se interpretaría como un incremento en la productividad y un aumento en la riqueza generada por cada habitante (INEC, 2023).

La distribución del VAB en los sectores económicos de la provincia de Loja, en los años de estudio (2010-2022) son los siguientes: el sector primario o de extracción y producción de recursos naturales, ha decrecido de 13,0 a 7,3%; el sector secundario o de transformación de materias primas en productos manufacturados ha aumentado 2,7% (22,0-24,7%); así mismo, el sector terciario o de prestación de servicios se ha elevado (65,0-68,0%). Al respecto, se anota que históricamente la provincia de Loja ha tenido como base económica el sector primario, actividades como la agricultura y ganadería principalmente; sin embargo, ha decrecido por una serie de factores multidimensionales en los ámbitos sociales, económicos, técnicos, ambientales y políticos, fortaleciéndose por un lado, el sector secundario con sus actividades en la industria y manufactura; y, por otro, el sector terciario con el mayor porcentaje del VAB en el que destacan actividades como: comercio, transporte y la administración pública.

1.2.2.3. Pobreza y desigualdad.

Pobreza por ingresos. Entre los Censos del 2010 y 2022 se registra un considerable decrecimiento (18,7%) de la pobreza por ingresos, pasando de 186.892 a 151.937 personas, lo que indica que alrededor de 35.000 personas tienen mejores ingresos para satisfacer las necesidades básicas y con ello mejorar las condiciones de vida; sin embargo, la pobreza por ingresos en el año 2022 a nivel nacional (25,2%) es menor al de la provincia de Loja (31,3%), resultado preocupante porqué la concentración de la pobreza en áreas rurales (44,5%) crece por falta de infraestructura y servicios básicos (salud, educación, entre otros); además, no hay fuentes de trabajo y el desempleo y subempleo siguen en aumento; así como, la escasa inversión pública en el ámbito de la producción agropecuaria, principalmente.

Pobreza por necesidades básicas insatisfechas. Igualmente, la pobreza por necesidades básicas insatisfechas en los años de análisis, pasó de 47,8 a 31,2%; este último, resulta menor que el promedio del país (39,8%). Las políticas públicas, tanto del gobierno central como de los gobiernos autónomos descentralizados (GAD) de la provincia, han sido determinantes a objeto de un mejor acceso a servicios esenciales como vivienda, educación, salud y servicios básicos (agua, saneamiento ambiental, otros). Al respecto, Mideros y Sanchez (2024) anotan que la pobreza en Ecuador no puede entenderse únicamente desde la perspectiva económica o coyuntural, sino como el resultado de profundas estructuras de desigualdad, discriminación y exclusión territorial, que afectan de manera desproporcionada a poblaciones vulnerables.

Desigualdad. El índice de Gini en la provincia de Loja, decreció de 0,505 a 0,495 entre los años 2010 y 2020, respectivamente, valores que son mayores al promedio nacional (0,466). Este pequeño decrecimiento,

significa que los ingresos fueron mejor distribuidos en la población durante estos años. Piketty (2014) señala que las provincias con mayor desigualdad de ingresos presentan mayores tasas de empobrecimiento, lo que evidencia cómo la concentración de la riqueza intensifica las privaciones de las poblaciones más vulnerables.

1.3. Producción agropecuaria de la Provincia de Loja

El sector agropecuario en Ecuador constituye una parte medular de su sistema económico; por cuanto, permite la interrelación con los demás sectores de la economía, genera un efecto multiplicador (Freire et al., 2018). Pino y Ortega (2023) sostienen que el sector agropecuario es parte fundamental de la soberanía y seguridad alimentaria; además, es la principal fuente de empleo y produce el 94,8% de los alimentos que se consumen en el país.

Dentro del marco económico, este sector figura como la principal actividad productiva proveedora de ingresos, generando un aporte de alrededor del 8,6% al Producto Interno Bruto (PIB) del país (Banco Central del Ecuador [BCE], 2022). En este contexto, el valor agregado bruto agropecuario del Ecuador en el 2024, fue de 9.781 millones de dólares; de lo cual, la provincia de Loja contribuyó con el 0,9%. Además, el sector agropecuario aportó con el 4,9% a la economía provincial y el 51% del total de las personas empleadas en la provincia, trabajan en el sector agropecuario (MAG, 2023).

A pesar de la importancia del sector agropecuario en la economía nacional, el gasto público ha ido disminuyendo permanentemente; así, en el año 1995 se situó en alrededor del 6%, mientras que en el año 2020 el aporte fue del 0,6%, lo que significa una reducción del 5,4% del Presupuesto General del Estado (PGE) para el desarrollo del sector (BCE, 2022).

Según la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC, 2021), la provincia de Loja, tiene el 4,7% (39.597) de UPAs y el 4,1% (507.628 ha) del total nacional. De la información del MAG (2024), se desprende que el uso del suelo tiene la siguiente distribución: montes y bosques (55%), pastos naturales (3,6%), pastos cultivados (25,3%), cultivos transitorios y barbecho (6,9%); y, cultivos permanentes (1,3%), lo que suman el 92% del total. Entre los cultivos transitorios, aquellos de mayor superficie sembrados solos, son: maíz suave seco (22,8%), maíz duro seco (22,0%) (tres pisos altitudinales, en todos los cantones), arroz (2,2%) (Macará); y, arveja seca (1,3%); mientras que, la caña de azúcar (Catamayo, Espíndola, Loja) y el café (en todos los cantones, excepto Zapotillo), son los de mayor uso del suelo de los cultivos permanentes con 23,1 y 13%, en su orden. En menor escala en los diferentes pisos se cultiva fréjol, maní, papa, tomate riñón, haba, entre otros. En el grupo de los frutales arbóreos y arbustivos se tiene: cítricos (limón, naranjo), mango, papaya, aguacate, babaco, granadilla, maracuyá, tomate de árbol. Esta producción es la principal abastecedora de alimentos para la población rural y parcialmente para la población urbana.

La estructura agraria en la provincia de Loja presenta una elevada concentración de la tierra en manos de pocos terratenientes, lo que genera desigualdad social y limita el desarrollo adecuado de la actividad productiva, ello se demuestra con los siguientes datos: el 56% de las UPAs son menores a 1 ha y les corresponde únicamente el 3,1% de la superficie; en el rango de 1 a 5 ha se encuentra el 27,5% de UPAs, con el 11,7% de la tierra cultivada; al rango de 5 a 20 ha pertenece el 12,1% de UPAs con el 21,1% de tierra; finalmente, en el rango mayor a 50 ha se encuentran el 1,5% del UPAs, con el 48,2%

de la tierra (SIG-Tierras, 2015); además, el 74,7% de las propiedades disponen del título respectivo. A las tierras con tenencia mixta y comuneras o cooperado, les corresponden el 12,8% y el 5,9% de la superficie, respectivamente; mientras que, el 2,5% están ocupadas y no poseen título (MAG, 2022). Ante esta realidad, es indispensable definir políticas que promuevan una distribución más equitativa de la tierra y fomenten las actividades productivas de los pequeños agricultores.

Al respecto, Quinde et al. (2025) manifiestan que la tierra es considerada un recurso básico en el desarrollo de la producción agropecuaria, que bien distribuido se convierte en un factor de crecimiento económico para los pequeños productores, quienes representan el mayor porcentaje de la población rural. Becerra (2015), al concluir una investigación sobre la tenencia de tierra y su impacto en los ingresos de los agricultores ecuatorianos en el año 2022, señala que la tenencia de la tierra tiene una influencia significativa en los ingresos de los agricultores. Los propietarios de tierras muestran mayores ingresos en comparación con los arrendatarios u otras formas de tenencia.

En cuanto a la producción pecuaria de la provincia de Loja, los pastos cultivados y naturales representan el 14,1 y 32,6% de la superficie total del uso del suelo, respectivamente. La población pecuaria está conformada por 662.317 individuos, cuya distribución es la siguiente: bovinos 54,5%; porcinos 20,8%; caprinos 16,8%. Los equinos, asnos y ovinos se reparten en el 7,9% restante (MAG, 2022). La producción de leche de vaca es de 171.229 l día⁻¹ (MAG, 2022).

El Plan Provincial de Riego y Drenaje 2020-2027, puntualiza que la provincia tiene un total de 3.561 concesiones, que comprometen

un caudal de 39.783 l s⁻¹. Existe un total de 660 sistemas de riego comunitarios, 11 sistemas de riego públicos no trasferidos y 15 sistemas de riego públicos trasferidos, que cubren un área total regada de 37.206 ha y benefician a 18.853 usuarios. Los sistemas de riego comunitarios abarcan el 54 % de la superficie regable y el 65 % de los usuarios. En las áreas bajo riego se siembra principalmente caña de azúcar, arroz, tomate riñón, pimiento, pepino, cebolla, maíz, fréjol, maní, yuca, cítricos (limón, naranja), pastos y la asociación café + banano (guineo) + frutales (guabo, cítricos, mango, ciruelo); denominada huerta por los agricultores. Actualmente, la infraestructura de algunos sistemas de riego grandes (Macará, por ejemplo), ya ha sobrepasado la vida útil y requiere ser rehabilitada urgentemente. El Plan también propone la construcción de nuevos sistemas en aquellas áreas aptas para el riego, así como la mejora de aquellos pequeños sistemas de riego de la agricultura familiar campesina, con lo cual se procura garantizar y fortalecer la soberanía alimentaria (GPL, 2023).

Debido al predominio de terrenos de pendiente pronunciada (excepto en los valles), el uso inadecuado de los suelos y el mal manejo (quemadas de la vegetación y cultivos limpios sin medidas de protección), el mayor problema de degradación de éstos es la erosión. En las laderas en las que se siembran cultivos que requieren deshierbas (maíz, maní, fréjol, papa y otros), la preparación del suelo consiste en la quema de la vegetación herbácea del cultivo anterior; luego, las lluvias intensas estacionales o el agua del riego mal aplicado arrastran el suelo hacia las quebradas y los ríos, produciendo desbordamientos, acumulación de sedimentos y destrozos en las partes bajas. En los terrenos de cultivo aparecen áreas blanquecinas, luego se forman surcos y grandes zanjones o cárcavas (Valarezo, 2020).

1.4. Referencias bibliográficas

- Banco Central del Ecuador (BCE). (2022). Información estadística mensual. <https://contenido.bce.fin.ec/home1/estadisticas/bolmensual/IEMensual.jsp>
- Becerra, J. (2025). La tenencia de tierra y su impacto en los ingresos de los agricultores ecuatorianos en el año 2022 [Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja]. Repositorio institucional. <https://dspace.unl.edu.ec/server/api/core/bitstreams/7685534e-e8f2-4cb8-bec1-accd8635d026/content>
- Beck, E. (2019). Introducción. En J. Bogner, U. Bendix & E. Beck (Eds.), *El bosque tropical de montaña: Hotspot de biodiversidad* (pp. xx-xx). Naturaleza y Cultura Internacional.
- Bendix, J., Fabian, P., & Rollenbeck, R. (2004). Gradients of fog and rain in a tropical montane cloud forest of southern Ecuador and its chemical composition. En *Proceedings of the 3rd International Conference on Fog, Fog Collection and Dew* (pp. xx-xx). Cape Town, South Africa.
- Bish, J. (2024). Overpopulation: Cause and effect. Population Media Center. <https://www.populationmedia.org/the-latest/overpopulation-cause-and-effect>
- Cañadas, L. (1983). *El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador*. Editores Asociados.
- Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN). (1986). *Memoria técnica: Mapa geológico de la zona sur del país*.
- Chalán, L., y Cueva, J. (2010). Cobertura vegetal y uso actual del suelo de la provincia de Loja. *Naturaleza y Cultura Internacional*. <https://es.scribd.com/document/90067854/Informe-Cobertura-Vegetal>
- Cueva, J. (2012). *Elaboración y análisis del estado de la cobertura vegetal de la provincia de Loja, Ecuador* [Tesis de maestría]. Universidad Internacional de Andalucía. <https://dspace.unia.es/handle/10334/1794>

- De Koning, G., Van de Kop, P. & Fresco, L. (1997). Estimates of sub-national nutrient balances as sustainability indicators for agroecosystems in Ecuador. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00059-5).
- Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. (2021). Principales resultados ESPAC 2021. INEC. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2021/Principales%20resultados-ESPAC_2021.pdf
- Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo. (2022). Boletín técnico anual 2022. INEC. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/EMPLEO/2022/Anual/Bolet%C3%ADn%20t%C3%A9cnico%20anual%20enero-diciembre%202022.pdf>
- Espinosa, J., Moreno, J., & Bernal, G. (2018). The soils of Ecuador. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25319-0_1
- Espinosa, J., Moreno, J., y Bernal, G. (2022). Suelos del Ecuador: Clasificación, uso y manejo. Instituto Geográfico Militar.
- Freire, C., Govea, K., y Argüello, J. (2018). Importancia de la agricultura en una economía dolarizada. *Revista Espacios*, 39(16). <https://www.revistaespacios.com/a18v39n16/a18v39n16p01.pdf>
- Gobierno Provincial de Loja. (2015). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Loja 2015–2025.
- Gobierno Provincial de Loja. (2023). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Loja 2023–2033.
- Instituto Geográfico Militar. (2020). Cartas topográficas Loja Norte y Loja Sur 8417S (Escala 1:50000). IGM. <http://www.igm.gob.ec>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2010). Fascículo provincial Loja. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/loja.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2022). Ecuador en cifras. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/35-079-personas-mas-viven-en-la-provincia-de-loja/>

- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2023). Buenas cifras, mejores vidas. <https://www.censoecuador.gob.ec/35-079-personas-mas-viven-en-la-provincia-de-loja/>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2023). Principales resultados de la ENEMDU 2023. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/EMPLEO/2023/anual/Principales_resultados_de_Mercado_Laboral_y_Pobreza_Anual_2023.pdf
- Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. (2017). Hoja geológica de Loja (Hoja 56, escala 1:100000). INIGEMM.
- Lynch, J., & Duellman, W. (1997). Frogs of the genus *Eleutherodactylus* in western Ecuador. University of Kansas. <https://archive.org/details/frogsofgenus>
- Macuacé, R., y Gómez, A. (2014). Migración hacia los espacios rururbanos en Popayán. *Economía, Sociedad y Territorio*, 14(44). <http://www.scielo.org.co/pdf/ecoca/n14/n14a03.pdf>
- Maldonado, N., Vivar, F., y Vélez, J. (2005). Escenario Natural de la Cultura de Loja. Casa de la Cultura Benjamín Carrión Núcleo de Loja.
- Mideros, A., y Sánchez, C. (2024). Pobreza y desigualdad: Análisis de brechas. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29221/32/Pobreza%20y%20desigualdad.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1975). Levantamiento exploratorio general de suelos de las provincias de Loja y El Oro. MAG.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2019). Mapa geopedológico del Ecuador continental (Escala 1:25000). MAG. <http://geoportal.agricultura.gob.ec>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2022). Tercer censo nacional-agropecuario. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/CNA/Tomo_CNA.pdf
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2023). Estadística agropecuaria: Provincia de Loja. https://pidara.mag.gob.ec/wp-content/uploads/2024/09/11.Provincia_Loja_2023.pdf

- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2021). Plan nacional de sequía. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/01/PLAN-NACIONAL-DE-SEQUIA.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2014). Gestión integrada para la lucha contra la desertificación. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/07/3.GIDDACC.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador & FAO. (2018). Evaluación subnacional de la degradación de la tierra en la provincia de Loja. <https://wocat.net/documents>
- Ochoa, P. (2015). Manejo y conservación del suelo y agua en los Andes del sur de Ecuador. Universidad de Málaga. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/11961>
- Piketty, T. (2014). Capital in the twenty-first century. Harvard University Press. <https://dowbor.org/wp-content/uploads/2014/06/14Thomas-Piketty.pdf>
- Pino, S., y Ortega, K. (2023). Análisis de los principales indicadores socioeconómicos del sector agropecuario ecuatoriano (2000–2022). *Perspectivas Rurales*. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/perspectivasrurales/article/view/20109/30927>
- Plan Integral de Desarrollo de Recursos Hídricos de la Provincia de Loja (PHILO). (1998). Plan integral de desarrollo de recursos hídricos de la provincia de Loja (Tomo 1). Loja, Ecuador.
- Programa Nacional de Regionalización (PRONAREG). (1980). Levantamiento exploratorio general de suelos de las provincias de Loja y El Oro. Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Quinde, V., Bucaram, R., Bucaram, M., Quinde, F., y Vera, P. (2023). Caracterización e importancia del sector agrícola en el Ecuador. <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/736160/1/caracterizacion-e-importancia-del-sector-agricola-en-el-ecuador.pdf>
- Richter, M., Beck, E., Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2013). The study area. En J. Bendix et al. (Eds.), *Ecosystem services, biodiversity and environmental change in a tropical mountain ecosystem of South Ecuador* (pp. 3–17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38137-9_1

- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2019). Agenda zonal 7. <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/Agenda-Coordinación-Zonal-Z7-2017-2021.pdf>
- Sistema de Información Geográfica – SIG Tierras. (2015). Catastro rural de la provincia de Loja.
- Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. (1986). Mapa de Suelos del Ecuador.
- Soil Survey Staff. (1975). A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (Agricultural Handbook No. 436). U.S. Department of Agriculture.
- Sudharsanan, N., Aburto, J., Riffe, T., y Van Raalte, A. (2022). Gran variación en la transición epidemiológica entre países. *International Journal of Epidemiology*. <https://doi.org/10.1093/ije/dyac107>
- Valarezo, C. (2020). Aprovechamiento sostenido de los suelos de la región sur del Ecuador. *Naturaleza*, (1), Casa de la Cultura Ecuatoriana Benjamín Carrión Núcleo de Loja.
- Valarezo, C., Maza, H., y Gómez, I. (2009). Sistemas agroforestales exitosos y prácticas de uso óptimo del agua. Universidad Nacional de Loja.
- Varela, A., y Ron, S. (2018). Geografía y clima del Ecuador. PUCE. <https://bioweb.bio/geografiaClima.html>
- Weigend, M. (2002). Observations on the biogeography of the Amotape-Huancabamba zone. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*. <https://doi.org/10.1663/0006-101>
- Winckell, A., Zebrowski, C., y Sourdat, M. (1997). Los paisajes naturales del Ecuador (Vol. IV). CEDIG–IPGH–IRD–IGM.
- Zebrowski, C., y Sourdat, M. (1997). Los factores de la pedogénesis y los suelos en Ecuador. En A. Winckell et al. (Eds.), *Los paisajes naturales del Ecuador*. CEDIG–IPGH–ORSTOM–IGM.

Capítulo 2

El café: visión e importancia mundial, nacional y local

2.1. Importancia y problemática mundial del café

2.1.1. Aspectos generales

El café pertenece al género *Coffea* de la familia de las Rubiaceae (Eira et al., 2006), siendo las especies de mayor importancia el *Coffea arabica* L (café arábigo), con las variedades tales como Típica, Bourbon, Caturra, Geisha, Blue Montain; y, la *Coffea canephora* Pierre (café robusta), con las variedades Conilón, Kouillou, Niaoulli y Uganda, entre otras (Davis et al., 2006; World Coffee Research [WCR], 2024). El café se cultiva ampliamente a lo largo de una franja tropical que se extiende por América Central y del Sur, África y Asia (Reay, 2019).

El café arábigo se produce en más de 60 países, sus variedades provienen de una pequeña área del bosque húmedo en el sur-oeste de Etiopía, su lugar de origen, donde se encuentra como un arbusto silvestre en el sotobosque, en un rango de altitud de 1.300 a 2.000 m s. n. m., con una precipitación anual que oscila entre 1.500 a 1.800 mm, en un rango de temperatura de 20 a 25 °C, y una definida estación seca (Berthaud y Charrier, 1988; Campuzano y Wohlgemuth, 2022). Tiene menores rendimientos y resistencia a las plagas y enfermedades y a los cambios climáticos, en comparación con el café robusta (Bertrand et al., 2001), específicamente durante la etapa de floración y fructificación (Hagggar y Schepp, 2012). En términos de calidad, se caracteriza por ser más suave, más aromático y con una acidez pronunciada, por lo que se ve

favorecido en el mercado gourmet e internacional; además, contiene más lípidos y azúcares, con mayor acidez (similar al vino), y su concentración de cafeína varía de 1,0 a 1,5% (Rosas, 2020).

2.1.2. Producción mundial, superficie cosechada y rendimientos

La producción mundial de café se encuentra en permanente evolución; así, en el periodo de 1961 a 2023, se incrementó de 75,8 a 164,4 millones de sacos³ (116,9%) (Faostat, 2020; USDA, 2024), producidos en 9,8 y 11,4 millones de hectáreas, con rendimientos de 0,5 y 0,9 t ha⁻¹, respectivamente (Faostat, 2020; OIC, 2023). En los últimos sesenta años la producción de café ha experimentado ciclos de auge y depresión, con creciente volatilidad y variaciones acentuadas en tiempos muy cortos (Chellai, 2021). Mundialmente, la producción varía de un año a otro según las condiciones climáticas, las enfermedades y otros factores, lo que da como resultado un mercado inherentemente inestable, caracterizado por amplias fluctuaciones de los precios (Organización Internacional del Café [OIC], 2014).

En el año 2023, la producción mundial de café fue de 164,4 millones de sacos, menor en 0,4% al año anterior (165 millones de sacos); de los cuales, el 53,4% le correspondió al café arábigo y el 46,6% restante al café robusta (USDA, 2024). Este decrecimiento se atribuyó a las condiciones climáticas adversas que afectaron a Colombia y Vietnam principalmente, ocasionando una pérdida neta de 1,1 y 2,2 millones de sacos, en su orden (OIC, 2023b).

Los principales países productores de café en el año 2023, fueron: Brasil (38,1%), Vietnam (17,2%) y Colombia (6,5%), con el 61,8% de la producción mundial (101,6 millones de sacos) (USDA, 2024).

3 Sacos de 60 kg

Kenresearch (2024) destaca que estos países dominan el mercado mundial del café, gracias a sus climas favorables y a su sólida infraestructura de producción. En todo caso, Brasil sigue siendo el mayor productor de café del mundo, en gran parte, gracias a sus extensas plantaciones y técnicas agrícolas avanzadas; mientras que, Vietnam ha experimentado un crecimiento constante por el apoyo gubernamental y al aumento de las inversiones en tecnología cafetera. En el mismo año, América del Sur fue la región con la mayor producción a nivel mundial, con 81,3 millones de sacos (49,5 %) (OIC, 2023a). En el año 2022 (77,6 millones de sacos), ocurrió un crecimiento pequeño de 4,8%, por cuanto en el año cafetero 2021/2022 hubieron problemas climáticos en Brasil, cuyos cafetales terminaron la temporada en estado de agotamiento debido a las heladas y el estrés hídrico; así mismo, en Colombia las lluvias excesivas, la nubosidad y los niveles más bajos de fertilización (por los altos costos) (USDA, 2022).

En el periodo 1961-2023 el promedio anual de la superficie cosechada de café fue de 10,1 millones de hectáreas. Existe una variación de 30,7% entre la mayor y menor superficie cosechada, que corresponde a los años 2021 y 1976 (11,4 y 7,9 millones de hectáreas), respectivamente. El total de la superficie cosechada en 63 años ha sido de 639,0 millones de hectáreas (Faostat, 2020; OIC, 2023). Los países con la mayor superficie cosechada (millones de hectáreas) en el año 2023, fueron: Brasil: 1,92 (16,9%), Indonesia: 1,26 (11,1%) y Etiopía: 0,844 (7,4%), sumando el 35,4% de la superficie mundial (Statista, 2024).

La variación del rendimiento de café a nivel mundial en el periodo 1961-2023, alcanzó 150%, pasando de $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ (1962, 1963, 1964, 1966, 1970, 1976) a $1,0 \text{ t ha}^{-1}$ (2018 y 2020). El rendimiento promedio anual fue de $0,63 \text{ t ha}^{-1}$ (Faostat, 2020; OIC, 2023). Esto refleja la disparidad

en la capacidad organizativa, el apoyo gubernamental, la topología y otros factores entre los diferentes orígenes; consecuentemente, es necesario cerrar la brecha entre los niveles más altos y más bajos de productividad, lo que implica satisfacer la creciente demanda sin expandir la superficie cultivada (OIC, 2024). Existe una gran diferencia con respecto a la productividad entre los mayores productores de café en el mundo, mientras que Vietnam tiene un rendimiento de $2,8 \text{ t ha}^{-1}$ (USDA, 2024), el de Brasil es de $1,9 \text{ t ha}^{-1}$ (USDA, 2023), diferencia equivalente a 47,4 %.

2.1.3. Comercialización del café

El café verde en grano es el principal tipo para la exportación a nivel mundial; del cual, en el año 2023 se exportaron 121 millones de sacos, equivalente al 90,1 %; en tanto que, el 9,9 % restante le correspondió al café procesado (tostado, soluble) (13,3 millones de sacos) (OIC, 2023b).

El Observatorio de Complejidad Económica (OCE, 2024) reporta que la exportación mundial de café en el año 2023 generó un valor de 42,7 mil millones de dólares. Según USDA (2024), Brasil, Vietnam y Colombia, fueron los principales exportadores en todas sus presentaciones, con 36,1 (26,9 %), 28,3 (21 %); y, 10,6 (7,9 %) millones de sacos, respectivamente. Por otra parte, el OCE (2024) señala que Brasil, Suiza y Colombia tuvieron los mayores ingresos (millones de dólares) con 8.200 (19,2 %); 3.690 (8,6 %); y, 3.190 (7,5 %), en su orden.

En el año 2023, la Unión Europea, Estados Unidos y Japón fueron los principales compradores de café en todas sus presentaciones, con 44,5 (32,3 %), 23,9 (17,8 %); y, 6,5 (4,9 %) millones de sacos respectivamente (USDA, 2024); en cambio, Estados Unidos, Alemania y Francia se constituyeron en los primeros importadores de café en

todas sus presentaciones, con 7.850 (18,4%), 4.060 (9,5%) y 3.090 (7,2%) millones de dólares, respectivamente (OCE, 2024).

El consumo del café se efectúa bajo las siguientes presentaciones de productos elaborados: café tostado y molido, café soluble y café descafeinado. El primero de ellos es el más demandado, pues representa el 75% del consumo mundial. Por su parte, el café soluble tiene una alta participación en los mercados de Europa del Este, y del Este y Sudeste de Asia (Centro de Comercio Internacional [CCI], 2021).

El procesamiento de café es de dominio de los países industrializados del Norte, que se convirtieron en importantes actores del comercio internacional aprovechando la base industrial que disponen, por lo que reexportan café verde descafeinado; así como, café tostado y soluble en gran escala (Samper et al., 2017).

El comercio del café es bastante emblemático del efecto de la globalización; por cuanto, la producción se genera en los países del tercer mundo ubicados en el hemisferio Sur, en cambio la demanda es exclusivamente de países más desarrollados y con mayor ingreso per cápita del hemisferio Norte (FAO, 2024). En virtud de ello, el patrón de producción-consumo proporciona información sobre las relaciones Norte-Sur (Ponte, 2002).

Los países nórdicos son los principales consumidores de café en kilogramos per cápita por año: Finlandia (11,6), Noruega (10,0), Islandia (8,9), Dinamarca (8,7), y Suecia (8,4), ello debido a las condiciones climáticas imperantes que determina la necesidad de recurrir a una bebida caliente como el café (OIC, 2019).

El CCI (2021) señala que en las últimas dos décadas se han generado nuevas oportunidades para el café, por cuanto los países consumidores de té han desarrollado una fuerte preferencia por el café. Entre los

mercados emergentes se destacan: China, India, Indonesia, Filipinas, República de Corea y Vietnam.

2.1.4. Importancia económica y social del café

El café es una de las bebidas más consumidas y una de las materias primas agrícolas más comercializadas a nivel mundial (FAO, 2023). Se estima que diariamente se toman alrededor de 3.000 millones de tazas (OIC, 2019), cifra que de acuerdo a Samper et al. (2017) pone de relieve la dimensión social y económica del café en la vida de una significativa parte de la población mundial.

El mercado mundial del café en el año 2023 se valoró en cerca de 224 mil millones de dólares, y se prevé que crezca a una tasa anual compuesta de 5,4 % entre 2024 y 2030 (Market Analys Report [MAR], 2024). Factores claves como el aumento de la población a nivel mundial, la rápida urbanización, el aumento de las ventas minoristas a través del comercio electrónico y el aumento de los ingresos de la generación Z, han incrementado la demanda de café, especialmente en regiones como Asia-Pacífico y Latinoamérica (Globe Newswire [GN], 2022). Además, los beneficios del café para la salud y el auge de los productos listos para beber impulsan aún más la expansión del mercado (Kenrsearch, 2024).

El café es un producto de relevante importancia económica, cultural y social, por cuanto aporta divisas para las economías de más de 60 países e ingresos para 25 millones de productores cafetaleros (CCI, 2021) en más de 11 millones de hectáreas a nivel mundial (Samper et al., 2017). El 95 % de las fincas cafetaleras son menores a 5 hectáreas y el 84 % de éstas son minifundios con menos de 2 hectáreas, cuya producción mundial representa entre el 73 % y 80 %, el porcentaje restante es producido por las grandes plantaciones cafetaleras (Panhuisen y Pierrot, 2020).

El CCI (2021) resalta que aproximadamente 120 millones de familias en el mundo dependen del café para ganarse la vida. La OIC (2019) señala que una cantidad importante de puestos de trabajo y oportunidades económicas se crean en torno a la cadena mundial de valor del café, que van desde proveedores de insumos a los agricultores, comerciantes, transportadores, elaboradores, tostadores, distribuidores, comercializadores, proveedores de embalaje, baristas y hasta aquellos que se ocupan de la eliminación y reutilización o reciclaje de los residuos de café.

Da Silva y Ramos (2024) sostienen que las mujeres siempre han jugado un papel importante en la agricultura y en el cultivo del café en particular; por cuanto, están presentes en todas las etapas de la producción y en todos los sectores del sistema agroindustrial cafetalero. Según la OIC (2018) las mujeres contribuyen significativamente al sector cafetalero mundial, dado que entre el 20 a 30% de las fincas cafetaleras son manejadas por ellas; además, hasta el 70% de la mano de obra en la producción de café es proporcionada por mujeres, dependiendo de la región y las condiciones prevalecientes de los sistemas de producción. Leach (2016) anota que a pesar de estar activas en la caficultura, las mujeres aún enfrentan dificultades, especialmente en cuanto al acceso a la tierra, implementos, financiamiento, mercados, capacitación y asistencia técnica, reconocimiento y visibilidad.

Granados (2018) afirma que los pequeños productores son un sector muy vulnerable, viven exclusivamente del cultivo del café; es decir, no tienen capacidad financiera de recuperación si acontece algún fenómeno climático (sequías, heladas, precipitaciones extremas y otros), o si las plagas o enfermedades han diezmando el cultivo. En esta misma línea, la FAO (2023) manifiesta que no obstante la expansión del sector cafetalero, los desequilibrios recurrentes y perjudiciales del mercado y

la distribución asimétrica del ingreso entre los actores, pueden amenazar el sustento de millones de pequeños productores.

2.1.5. Fluctuación histórica del precio del café y sus impactos

Los precios internacionales del café están determinados tanto por la interacción oferta vs demanda, como por las expectativas del comportamiento futuro de estas fuerzas del mercado (Ballard, 2019). Prácticamente la oferta total determina el comportamiento del precio; en cambio, la demanda total lo regula, pero ambas fuerzas inciden finalmente en su fijación. Sin embargo, el mercado es imperfecto, debido a que, tanto del lado de la oferta como de la demanda dominan oligopolios y oligopsonios, respectivamente (Rivera, 2021). De igual forma, Salinas (2004) señala que la oferta y la demanda han tendido a crecer, aunque la oferta ha crecido más rápido que la demanda. La tasa de crecimiento de la oferta y la demanda para el periodo 1981-2000 fue de 4 y 1 % anual, respectivamente. Esta es la primera razón que explica que la tendencia general de los precios sea a la baja. En la década de los ochenta, la oferta crecía al 5 % y la demanda a 3 %, pero en la década de los noventa, la oferta creció a razón de 6 % anual, mientras que la demanda lo hizo en 1 %.

La enorme cantidad de dinero alrededor del negocio cafetalero significa que hay un gran número de intereses e interesados en participar en el mercado, por eso se trata de un oligopsonio, donde el dominio de las grandes trasnacionales se hace presente, tanto en la comercialización como en la transformación del grano (Muradian y Pelupessy, 2005). Al respecto, Duris y Perret (2007) expresan que el comercio del café está dominado por un puñado de multinacionales a quienes las grandes empresas tostadoras de café les compran sus suministros. Estas multinacionales se instalan, en los países productores como exportadores, y en los países consumidores como importadores.

El CCI (2021) indica que el menor valor de la cadena del café corresponde a la fase de producción; en tanto que, el mayor se concentra en la fase de comercialización, la cual está dominada por los países desarrollados. La OIC (2019) anota que las mayores alteraciones provocadas por los riesgos, las fluctuaciones de los precios de mercado, las crisis socioeconómicas, las pandemias sanitarias y los fenómenos derivados del cambio climático, afectan a los eslabones inferiores de la cadena de valor, debido a que los países productores son habitualmente más vulnerables y menos resilientes. De igual forma, Subervie (2011) afirma que los productores constituyen la parte de la cadena de producción que recibe menores ingresos en períodos de precios al alza y se ven afectados con mayor rapidez en períodos de precios a la baja.

En la situación de mercado libre de oferta y demanda que está vigente desde 1989, luego de que a partir de 1963 se estableciera el Acuerdo Internacional del Café (AIC), en la que los precios del mercado estuvieron regulados por cuotas (Utrilla, 2020), se han presentado dos periodos muy bien marcados de precios bajos: 1989-1993 y 1999-2004. En el primero hubo un descenso de 154% de los precios pasando de \$3,01 en 1989 a \$1,19 kg⁻¹ en 1993 (Ponte, 2002); mientras que, el segundo periodo es conocido como el de la crisis del café, ya que en el año 2001 el precio fue de \$0,90 kg⁻¹, considerado como el más bajo de la historia, debido principalmente a una producción excedentaria con respecto al consumo, con graves consecuencias para las economías cafetaleras de los países exportadores (OIC, 2014).

La volatilidad de los precios del café en los países exportadores genera incertidumbre en relación con los ingresos (exportaciones, fiscales, productores); mientras que, en los países importadores afecta el control que tienen los comerciantes y tostadores sobre los costos de procesamiento y los márgenes de ganancia, cuyos precios se transfieren

posteriormente a los consumidores (OIC, 2024). Al respecto, Godínez et al. (2016) indican que la alta volatilidad en los precios del café afecta principalmente a los productores directos y sus beneficios son capitalizados generalmente por los intermediarios, quienes especulan acumulando existencias cuando los precios bajan y colocándolas en el mercado durante periodos de alza de las cotizaciones. De igual manera, Calfat y Flores (2002) señalan que los precios del café siempre dependerán de Brasil y Vietnam, por cuanto los dos países tienen la mayor parte del mercado mundial.

Los efectos de los bajos precios impactan notablemente los ingresos por concepto de exportación, haciendo muy vulnerables las economías de los países que dependen de este rubro y afectando las condiciones de vida de los productores que participan en la cadena agroalimentaria del café. En las fluctuaciones de esta variable inciden las variaciones climáticas, los excesos de demanda y los cambios de existencias (Quintero y Rosales, 2014).

2.1.6. Afectación de la producción de café por el cambio climático y el COVID

El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, está influyendo en la variabilidad climática con impactos severos sobre la naturaleza (CCI, 2021). Howden et al. (2008) sostienen que el cambio climático es un fenómeno de escala mundial, cuyos efectos se han intensificado en las últimas décadas, principalmente por las actividades antrópicas.

Los Expertos del Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), anotan que el calentamiento del planeta es una realidad no sólo evidenciada en el aumento de la temperatura promedio del aire

y los océanos, sino también en de la fusión generalizada de las nieves y el hielo, así como el aumento del nivel del mar. Hagggar y Schepp (2012) señalan que en el año 2060, la temperatura crecerá entre 1,9 y 2,8 °C; las precipitaciones aumentarán de 2 a 14% en 2090; además, debido a los eventos climáticos extremos, se espera que el nivel del mar aumente de 0,18 a 0,56 m, con alto riesgo de inundaciones, así como graves daños sociales y económicos.

El cambio climático está afectando los sistemas agrícolas del mundo con implicaciones en todo el sistema alimentario (Pachauri et al., 2014). Al respecto, el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IIIPA, 2009) advierte que el ritmo acelerado de cambio climático, junto con el aumento de la población y los ingresos a nivel mundial, amenaza la seguridad alimentaria en todas partes.

Kenresearch (2024) señala que el cambio climático representa una grave amenaza para el cultivo del café, con patrones climáticos impredecibles que afectan su producción. Maletic (2023) sostiene que la planta de café es vulnerable a las sequías prolongadas, a las olas de calor o las precipitaciones excesivas durante las etapas de floración y desarrollo de los frutos, lo que baja la productividad; además, las temperaturas más cálidas y la mayor humedad pueden provocar un aumento del ataque de la broca, la roya y otros patógenos, causando daños importantes a las plantaciones. De igual manera, Bates et al. (2008) enfatizan que al calentarse continuamente la atmósfera se producen variaciones en el régimen de lluvias que afectan negativamente la oferta hídrica pudiéndose presentar sequías y estrés hídrico, a lo que Zacharias et al. (2008), indican que los procesos de fotosíntesis se vuelven limitados debido al cierre de los estomas y la reducción de otras actividades fisiológicas de la planta.

Davis et al. (2012) predicen que el cambio climático en el mejor de los casos provocará una reducción del 65 % de las tierras aptas para el cultivo de café arábigo; mientras que, en el peor de los casos, el 100 % desaparecerán para el año 2080. Al respecto, Agegnehu et al. (2015) mencionan que, los pequeños caficultores (84 % de UPAS) son los más afectados por los crecientes riesgos del cambio climático, la competencia por los recursos, la disminución de la fertilidad del suelo y las presiones económicas. La volatilidad de los precios y una distribución de valor desequilibrada desafían aún más su capacidad para lograr un ingreso digno y próspero.

Desde una perspectiva socioeconómica, comprender el alcance de los impactos climáticos en la producción de café y los beneficios de las posibles estrategias de adaptación, será de vital importancia para mantener y mejorar la productividad y la rentabilidad; así como, para sustentar los medios de vida de los pequeños productores de todo el mundo (Pham et al., 2019).

El desafío para enfrentar el cambio climático es reducir de forma sustancial y sostenida las emisiones de gases de efecto invernadero, para lo cual se plantean estrategias complementarias de mitigación y adaptación. Para que la implementación de las referidas estrategias sea efectiva, se necesitan políticas y cooperación en todas las escalas; y, para fortalecerla, se requieren respuestas integradas con otros objetivos sociales (Pachauri et al., 2014). Al respecto, Sachs et al. (2019) plantean que es necesario formular estrategias para fortalecer las economías cafetaleras, con un enfoque mundial sostenible, considerando las dimensiones: económica, técnica, social y ambiental; de lo contrario, como lo anotan algunas investigaciones, para el 2050 el cambio climático reducirá hasta en 50 % el área global adecuada para la producción cafetera.

Por otro lado, Beard y Burchfield (2021) señalan que el COVID-19 ha causado problemas importantes para muchos productos en todo el mundo, incluido el café. Las interrupciones en el transporte derivadas de la escasez de contenedores y la congestión de los puertos, probablemente mantendrán altos los precios del café durante más tiempo, ya que dificultan que el mercado lo distribuya equitativamente.

Al respecto, entre los años 2022 y 2023 el consumo de café solamente se incrementó en 0,94% (167,9 a 168,7 millones de sacos) (USDA, 2024), esta baja tasa de crecimiento es un reflejo de dos años de demanda reprimida, acumulada como resultado de las perturbaciones económicas y sociales globales causadas por el COVID-19. A medida que la población mundial salió de los confinamientos de la pandemia, la economía se recuperó desde una contracción del 3% en 2020, a una casi expansión sin precedentes del 6% en 2021 (OIC, 2023b). Los precios del café arábigo en Nueva York en octubre de 2021 estuvieron cerca de los más altos en siete años.

2.2. Importancia social, económica y ambiental del café en el Ecuador y en la provincia de Loja

2.2.1. Visión global del café en Ecuador

2.2.1.1. Área cultivada, distribución espacial y variedades

El café (*Coffea* sp.) se ha cultivado en el Ecuador desde el siglo dieciocho (Venegas et al., 2018). El 63% del área cultivada corresponde al café arábigo (*Coffea arabica* L) y el 37% al café robusta (*Coffea canephora* P) (Jiménez y Massa, 2016).

En 23 de las 24 provincias de Ecuador se cultiva el café (Capel et al., 2010). El 50% de la producción proviene de las provincias costeras; así, Manabí concentra el 25% de la producción total, especialmente en la zona de Jipijapa. Las regiones del Oriente y la Sierra, representan cada una el 30% de la producción. El café arábigo se cultiva en la Costa y la Sierra; mientras que, el robusta se planta en la Amazonía (USDA, 2021).

El declive de la producción cafetera ecuatoriana comenzó en la década de 1980, cuando la cantidad de tierras cultivadas empezó a disminuir, debido a que el café a menudo no se cosechaba a causa de los bajos precios (Forumcafé, 2024). La Asociación Nacional de Exportadores de Café (ANECAFE, 2024a), anota que la crisis cafetalera se manifiesta en la reducción de la producción, en la severa disminución de su aporte a la economía del país, y en el desmejoramiento de las condiciones de vida de los pequeños productores.

Jácome (2017) señala que la superficie plantada y la producción del café en Ecuador muestran una tendencia a la baja. La causa de esta disminución, entre otras son: la edad de los cafetales, los brotes de plagas y enfermedades, la falta de modernización y el escaso desarrollo de nuevas variedades de café.

El Censo Cafetalero de 1983 evidenció que en el país las plantaciones de café cubrían 426.969 ha; de las cuales, 347.000 ha (81,2%) correspondían a la superficie cosechada (ANECAFE, 2024a). Los resultados del III Censo Nacional Agropecuario del año 2000 (MAG, 2002), señalan una superficie de 151.941 ha (51,3%) de cafetales solos y de 144.221 ha (48,7%) de cafetales asociados con otras especies vegetales, dando un total nacional de 296.162 ha. Entre los años 2012 y 2023, la superficie plantada con café decreció 73,2%, pasando de 113.000 ha (INEC, 2021a) a 30.314 ha (INEC, 2023). Las cifras anotadas cronológicamente, indican que la superficie total plantada de

café en Ecuador se ha reducido drásticamente en los últimos 40 años; esto es, en el periodo 1983-2023 el decrecimiento ha sido de 92,9 %.

Al respecto, la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (INEC, 2021b), señala que el decrecimiento permanente de la superficie plantada de café se ha producido por las siguientes causas: 1.- la volatilidad de los precios internacionales del café; 2.- los caficultores han optado por sustituir sus cafetales por otros cultivos que les resulten más rentables y, 3.- el bajo rendimiento debido a que las plantas ya han pasado su etapa de mayor producción. De igual forma, Forumcafé (2024) anota que el decrecimiento de la superficie de café, responde a: fluctuación de precios del mercado, las plagas y enfermedades, y la falta de estructuras organizativas fuertes y de políticas agrarias efectivas por parte del estado. INEC (2021a) manifiesta también que la reducción de la superficie plantada de café podría explicarse por la exposición de los productores a riesgos de producción y comercialización, los mismos que están asociados a eventos naturales como: granizos, heladas y sequías.

En el país, en el año 2023 la superficie plantada de café alcanzó 30.314 ha, de las cuales, las provincias con las mayores extensiones fueron: Orellana (8.997 ha), Manabí (6.825 ha), Sucumbíos (6.485 ha) y Loja (3.003 ha), con un área total de 25.310 ha (83,5 %); mientras que, la superficie cosechada en el mismo año fue de 22.373 ha, en donde las provincias con las mayores áreas cosechadas fueron: Orellana (6.254 ha), Manabí (5.684 ha), Sucumbíos (5.117 ha) y Loja (1.910 ha), sumando 18.965 ha (82,6 %) (INEC, 2023).

Por otro lado, las variedades más cultivadas de café arábigo en Ecuador son: Bourbon, Típica, Caturra, Geisha, Catuai, Timor, Castilla Sarchimor y Sidra (Duicela et al., 2017); en tanto que, las de Robusta son NP 3056 y Tropical.

2.2.1.2. Producción.

La amplitud de fluctuación de las cifras, reflejan una marcada inestabilidad en la producción de café en Ecuador, a causa de una competencia global intensa, donde los precios son altamente volátiles y determinados por la bolsa de valores; además, la oferta del producto está fuertemente influenciada por factores naturales difíciles de gestionar (Chango y García, 2021).

La Figura 2.1. ilustra que en el periodo 1990-2001 la producción de café se incrementó en 47,3%, pasando de 1,82 a 2,68 millones de sacos, lo cual se atribuye a varios factores, entre otros, el control de plagas y enfermedades y las favorables condiciones agroclimáticas (Echeverría et al., 2022). Por su parte, ANECAFE (2024a) sostiene que, por efecto del fenómeno de El Niño en los años 1997 y 1998 el decrecimiento de la producción fue 45,2% (1,46 a 0,80 millones de sacos).

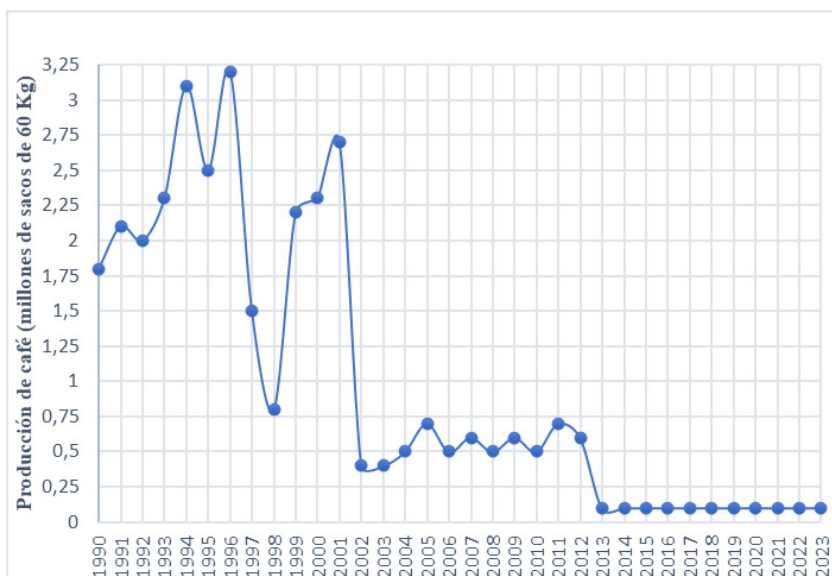


Figura 2.1. Evolución de la producción de café en Ecuador:1990-2013

En el periodo 2001-2012 se registró un declive de la producción de 78,3% (de 2,68 a 0,58 millones de sacos), descenso que se atribuye a los bajos precios en los mercados internacionales, el incremento de los costos de producción, la escasa evolución de las estrategias productivas del país, afectando los márgenes de utilidad de los productores, llegando inclusive a importar café para satisfacer la demanda interna (Chávez et al., 2024).

Nuevamente, en el periodo 2012-2024 se presentó otro descenso de la producción, de 0,58 a 0,10 millones de sacos (82,7%), entre las causas de esta disminución se anotan: envejecimiento de las plantaciones, deficiente manejo agronómico, cultivos en zonas marginales, falta de recursos financieros para la tecnificación de los procesos de producción y post-cosecha, limitada asistencia técnica y capacitación a actores de la cadena cafetalera, principalmente a los productores (Valverde et al., 2020).

En los últimos años la producción de café ha ido decayendo principalmente por falta de renovación de los cafetales. En el censo cafetalero del año 2022, se reportan los siguientes datos de producción (miles de sacos por año): Manabí 35,9 (55%), Loja 20,8 (32%), Zamora Chinchipe 3,3 (5%), Pichincha 3,0 (4%) e Imbabura 2,5 (4%) (Sistema de Información Pública Agropecuaria del Ecuador [SIPA], 2022).

Por su parte, Jadán et al. (2024) manifiestan que la baja producción de café en Ecuador, responde a carencias estructurales en términos de financiamiento y tecnificación, especialmente de los pequeños productores en zonas de difícil acceso; en tanto que, INEC (2023) indica que ello se relaciona con: la infraestructura deficiente, tanto vial como de riego; limitada capacidad gerencial; precios internacionales volátiles; y, los efectos del cambio climático.

Monteros (2017) anota que la baja producción de café en Ecuador es el problema central del sector cafetalero, atribuido a: prevalencia de cafetales viejos, falta de crédito y reducción del área cultivada, la misma que de acuerdo al MAG (2020) en el periodo 2001-2012 decreció 61,8% (296.162 a 113.000 ha). Igualmente, Duicela et al. (2017) sostienen que la baja producción es el resultado de cafetales viejos, materiales genéticos de baja productividad, prácticas agrícolas inadecuadas, limitada asistencia técnica y falta de capacitación de los productores.

Los impactos de la baja producción se expresan en: débil competitividad, reducción de las exportaciones y aumento de las importaciones de materia prima para la industria desde Vietnam, Brasil, Costa de Marfil e Indonesia (Ponce et al., 2016). La importación se realiza bajo la modalidad de internación temporal (ANECAFE, 2024a), para luego reexportarlo en presentación soluble principalmente (Banco Central del Ecuador [BCE], 2021); sin embargo, esta actividad coadyuva con la disminución de la producción, ya que se asocia al desincentivo causado por el aumento de las importaciones de café (Pozo, 2014).

2.2.1.3. Rendimientos.

En el año 2016, la productividad promedio del café arábigo en Ecuador fue de $0,22 \text{tha}^{-1}$. Zamora Chinchipe fue la provincia que presentó el mayor rendimiento ($0,49 \text{tha}^{-1}$); mientras que, Cotopaxi fue la de menor productividad ($0,20 \text{tha}^{-1}$) (MAG, 2016). La productividad promedio del café arábigo en el año 2021 fue de $0,50 \text{tha}^{-1}$, mayor en 61,3% que en el año 2020 ($0,31 \text{tha}^{-1}$). Las provincias con el mayor rendimiento fueron Carchi y Zamora Chinchipe con $0,97$ y $0,70 \text{tha}^{-1}$, respectivamente

(MAG, 2021). El aumento de los rendimientos del café arábigo se atribuye principalmente a la entrada en producción de cultivares nuevos y renovados (USDA, 2022). En el año 2023, el rendimiento promedio se mantuvo en $0,50 \text{tha}^{-1}$ (MAG, 2023), el mismo que constituye un valor bajo en comparación con otros países productores de la región como Colombia y Brasil, cuya productividad (tha^{-1}) y variaciones porcentuales fueron 1,2 (140%) y $1,8 \text{tha}^{-1}$ (260%), en su orden (FAO, 2022).

En el año 2023, los rendimientos (tha^{-1}) en las provincias con la mayor cantidad de fincas cafetaleras fueron: Orellana (0,30), Sucumbíos (0,33), Manabí (0,56), Loja (0,73), Zamora Chinchipe (0,84), Santo Domingo de los Tachilla (0,69); y, otros (0,37) (MAG, 2024).

Los bajos rendimientos de café en Ecuador, en comparación con los países vecinos, se atribuyen a los siguientes factores:

- Pobreza en zonas rurales, falta de mano de obra capacitada y cafetales envejecidos (Mero y Muñoz, 2021)
- Bajo nivel de tecnología predominante en el proceso productivo. El 80% de las plantaciones se cultivan de manera tradicional, sin ningún tipo de tecnología. El 15% utiliza un nivel semi-tecnificado y únicamente en el 5% se aplica un sistema tecnificado (ESPAC, 2021). En este contexto, el uso de fertilizantes es limitado; así, durante el año 2020 solo el 40% de los productores de café arábigo y el 16% de café robusta los utilizaron. El uso de sistemas de riego modernos se limita a las zonas costeras donde es posible la mecanización (USDA, 2021).
- La incidencia de plagas y enfermedades afecta al 75% del café arábigo y al 82% del robusta; las malezas al 3% del café arábigo; y, la escasez de agua al 8% del café arábigo y al 7% del café robusta,

consecuentemente, la falta de agua aparece como el tercer problema más importante en la producción de café (USDA, 2022).

- La roya del café (*Hemileia vastatrix*), ha sido históricamente responsable de caídas significativas en la producción en Ecuador. Una epidemia de roya que se desató en fincas ecuatorianas en el año 2013 (Avelino et al., 2015) redujo la producción en aproximadamente 50 % (USDA, 2018).

En las pocas fincas cafetaleras que se manejan de forma tecnificada se ha logrado alcanzar rendimientos de 2,4 t ha⁻¹ de café arábigo y 5 t ha⁻¹ de café robusta (USDA, 2021).

2.2.1.4. Importancia económica.

El café es uno de los rubros más importantes en las áreas económica y social de Ecuador. A nivel de América del Sur, el país es el cuarto exportador de café, lo que le permite contribuir con el 1,3 % al Valor Agregado Bruto Agropecuario (VAB) y con el 0,6 % a las exportaciones no petroleras ecuatorianas (MAG, 2024). Garcés (2021) indica que la producción de café representa el 0,3 % del PIB en sector productivo.

Ecuador es el único país productor que exporta más café soluble que en grano, ocupando el tercer lugar de este tipo de café, luego de Brasil y Colombia, (MAG, 2020). El 95 % del café que exporta Ecuador corresponde a café soluble industrializado que se elabora con materia prima importada y local (González, 2023).

En la Figura 2.2 se observa que las exportaciones de café en volumen en el periodo de 1990-1997 decrecieron 54,3 %, ya que de 1,76 disminuyó a 0,81 millones de sacos; mientras que, en valor monetario se mantuvieron relativamente estables con 125,4 (1990) y

125,2 millones de dólares (1997), respectivamente. Este fenómeno, de acuerdo a Godínez et al. (2016), se produjo por la recuperación de los precios a nivel internacional, debido a la presencia de heladas en Brasil, los mismos que alcanzaron 164%, pasando de \$ 1,63 kg⁻¹ (1994) a \$ 4,31 kg⁻¹ (1997). En el año de 1994, se produjo la mayor exportación de café, tanto en volumen como en ingresos, con 2,1 millones de sacos y 410,1 millones de dólares, respectivamente.

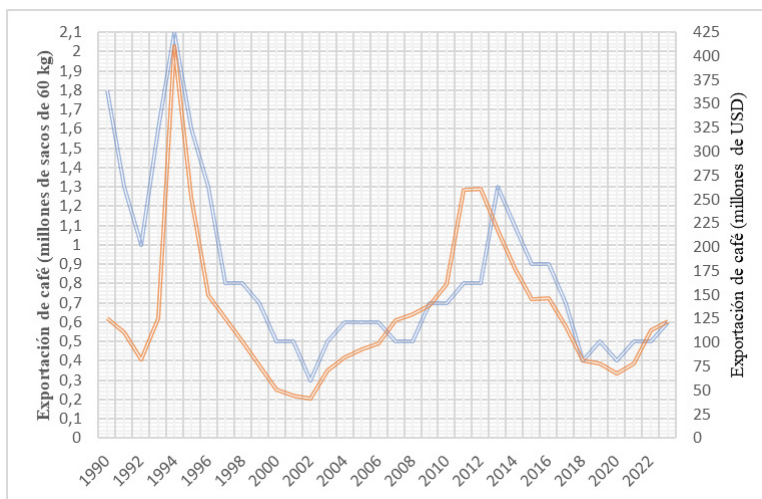


Figura 2.2. Evolución de la exportación del café ecuatoriano: 1990-2022

En el periodo 1998-2002, se desplomaron las exportaciones, tanto en volumen como en ingresos monetarios, disminuyendo de 0,84 a 0,34 millones de sacos (59,2%); y de 101,3 a 41,7 millones de dólares (58,9%). El Consejo Cafetalero Nacional (COFENAC, 2013) sostiene que, las principales causas fueron la reducción en la oferta interna y las tendencias de precios bajos en el mercado mundial.

En el periodo 2002–2013 las exportaciones de café tuvieron un ascenso significativo, pasando de 0,34 a 1,26 millones de sacos (270%) lo que en términos económicos significó un incremento de 41,7 a 218,0

millones de dólares (422,8%), el cual se atribuye a los efectos del proceso de renovación de cafetales arábigos principalmente y al repunte de los precios en el mercado internacional (MAG, 2016). En el mismo periodo, el precio del café creció de 0,97 a \$ 6,34 kg⁻¹ (554,5%), lo que se relaciona con una mayor demanda de las economías emergentes (China) y una demanda sostenida por parte de los mercados tradicionales (Estados Unidos y Europa) (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [FNCC], 2020).

Finalmente, entre los años 2013 a 2023, las exportaciones de café sufrieron una drástica caída, de 1,26 a 0,61 millones de sacos (52%); igualmente, los ingresos por la exportación en el mismo periodo disminuyeron de 218 a 122,5 millones de dólares (44%). Choque (2021) anota que la principal causa corresponde a la mayor competencia internacional en el sector, lo que ha llevado a precios más bajos y una mayor producción de otros países exportadores. USDA (2022) sostiene que la caída responde en parte a la fuerte competencia en café soluble de grandes mercados como Vietnam.

En el periodo 1990-2023, los años 1994 y 2002, fueron los de mayor y menor volumen de exportación y de ingresos, con 2,1 y 0,34 millones de sacos (83,6%); y, 410,1 y 41,7 millones de dólares (89,8%), respectivamente.

Los principales países para la exportación de café desde Ecuador (mayormente industrializado) en el año 2022 fueron: Alemania (36%), Colombia (23%), Rusia (12%), USA (11%), Polonia (9,0%), otros (9,0%) (ANECAFE, 2023).

Es pertinente señalar que, en perspectiva el mejor mercado para el café ecuatoriano es el asiático, por cuanto gusta mucho en China y Corea del Sur; además, por la facilidad de transporte a través del océano Pacífico.

En China, con una población que bordea mil 400 millones de habitantes, al menos 300 millones son grandes consumidores de café, con altas posibilidades de que se extienda a un porcentaje mayor de la población, sobre todo de clase media. La gran oportunidad que tiene Ecuador para desarrollar un nuevo boom cafetero debe apuntar necesariamente a este mercado (ANECAFE, 2024c).

2.2.1.5. Importancia social.

La producción de café en Ecuador es una actividad que demanda mucha mano de obra y genera empleo rural y urbano; pues, a las jornadas en el campo se suman aquellas necesarias para los procesos de comercialización, transporte, preparación del grano para la exportación, y la industrialización (Delgado et al., 2002). En lo social, a las cadenas productivas cafetaleras se integran pueblos y etnias, hombres y mujeres, en un amplio tejido social con impacto multisectorial (Capel et al., 2010).

La mayor producción de café en Ecuador proviene de pequeños productores (Ortega, 2003), por cuanto el 80% de los cafetales corresponden a superficies que oscilan entre 1 y 5 ha; el 13% son fincas de 5 y 10 ha; y, solamente el 7% de las unidades de producción agropecuaria, tienen una extensión superior a 10 ha (COFENAC, 2012; MAG, 2013).

En el año 2023 el café fue producido en 24.070 UPAS; las provincias con el mayor número de ellas, fueron: Orellana (7.358), Sucumbíos (5.523), Manabí (4.800), Loja (2.770), Zamora Chinchipe (571), Santo Domingo de los Tsáchilas (468), otros (2.576) (MAG, 2024). Jácome y Garrido (2017) anotan que la volatilidad e incertidumbre en los precios del café, así como la incidencia de plagas y enfermedades, podrían haber sido la principal razón por la que los productores abandonaron sus plantaciones.

Las cifras anotadas evidencian que la producción de café en el Ecuador está a cargo principalmente de pequeños agricultores. Según SIPA (2022), el 26% de los productores tiene como principal fuente de ingreso este cultivo; en tanto que, la población económicamente activa vinculada al sector cafetalero en el país fue de 105.000 familias, que corresponde al 18% del PEA rural.

La importancia social de la producción cafetalera está relacionada con los siguientes aspectos (Garcés, 2021):

- Generación de empleo para 62.000 familias, con 51.062 trabajadores encargados directamente de la producción.
- Fuente de trabajo para varios miles de familias adicionales vinculadas a las actividades de comercio, agroindustria artesanal, industria de café soluble, transporte y exportación.
- Ocupación de muchas familias dedicadas a la provisión de bienes y servicios vinculada al sector.
- Organización de un importante segmento de los cafetaleros que forman un amplio tejido social y participan activamente en la vida nacional.

Las crisis del sector cafetalero tienen fuerte impacto sobre las condiciones de vida de los productores, generando un incremento de la migración a las ciudades, el aumento de la pobreza, la persistencia del analfabetismo y la desatención del Estado en la dotación de servicios como salud, educación y seguridad (ANECAFE, 2024a).

2.2.1.6. Importancia ambiental.

En respuesta a la variabilidad de los factores socioeconómicos y biofísicos en los diferentes agroecosistemas, el café es cultivado bajo diversos sistemas de producción, que comprenden desde los sistemas

tradicionales bajo sombra diversificada, hasta los sistemas modernos de monocultivo (Somarriba et al., 2004).

La asociación de los arbustos de café con árboles y cultivos alimenticios que conforman sistemas agroforestales (agrosilvícolas o semi-bosques), reviste una gran importancia ambiental que se manifiesta en los siguientes aspectos:

- Amplia adaptabilidad de los cafetales a diferentes ecosistemas de las cuatro regiones naturales del país, los que producen importantes beneficios ambientales (Alemu, 2015).
- Los cafetales en su mayor parte, están asociados con árboles de alto valor ecológico y económico (frutas y/o madera) (Beer et al., 2003), que aportan materia orgánica (Villarreyna, 2016) y nutrientes al suelo en un proceso de reciclaje, sobre todo en los procesos de fijación y mineralización del nitrógeno, uno de los elementos fundamentales en los rendimientos del café (Rapidel et al., 2015).
- La diversidad de arbustos y árboles asociados en los semi-bosques de café, genera beneficios productivos y ecológicos, tal como la conservación de la biodiversidad, mitigación del cambio climático, regulación microclimática y adaptación al cambio climático (DaMatta y Rodríguez, 2007).
- Los semi-bosques de café contribuyen a la captura de CO₂ de la atmósfera, cuya biomasa se aporta a los suelos (Farfán, 2014).
- Los cafetales regulan el ciclo hidrológico en los agroecosistemas (Molla, 2015).
- En los sistemas agroforestales se reduce la evapotranspiración del café, generando protección al cultivo, frente a la vulnerabilidad de los recursos hídricos reducidos (Brenda, 2010).

- Con un adecuado manejo de las plantaciones se reduce la dependencia de agroquímicos (Guhl, 2008).
- Los sistemas conservan la humedad del suelo y controlan la erosión (Salamanca, 2017).

Aunque el uso de árboles de sombra contribuye a la diversificación de los sistemas cafetaleros y mejora la provisión de varios servicios ecosistémicos, también se conoce que pueden tener un efecto reductor en el rendimiento de los cafetos (Malézieux, 2012), principalmente si los niveles de sombra son superiores al 40%, dado que se generan relaciones de competencia por agua, luz y nutrientes con el cultivo asociado (Soto et al., 2000). Al respecto, Muschler (1999) señala que el nivel óptimo de sombra para los cultivos es multifactorial, lo cual depende de la tolerancia a la sombra y de las condiciones edáficas y climáticas de la zona.

Por otro lado, algunos estudios han establecido que el sistema a plena exposición solar presenta una productividad superior que aquellas bajo sombrío (Beer et al., 1998); mientras que, otras investigaciones reportan que no hay ninguna diferencia en los rendimientos del café con sombra y a pleno sol, lo que depende principalmente de la intensidad del manejo (DaMatta, 2004). Investigaciones realizadas por Moraga et al. (2011) y Cerda et al. (2015) entre otros, encontraron similitud de rendimientos en café a pleno sol y en el sistema agroforestal (sombra diversificada), ambos sistemas con alto manejo.

Como consecuencia, el sombrío ha sido abandonado como una práctica cultural regular en muchas regiones del mundo. Actualmente, alrededor del 25% de la superficie mundial de café, se gestiona bajo sombra diversa, el 35% bajo sombra parcial y el 40% a pleno sol. En el último

medio siglo ha aumentado drásticamente la superficie de cafetales a pleno sol, ya que los agricultores han intentado aumentar el rendimiento reconvirtiendo las explotaciones de sombra o implementando nuevas plantaciones a pleno sol (Root Capital, 2015). De igual manera, en Brasil, el mayor productor de café del mundo, la práctica se abandonó casi por completo en la década de 1950. En Colombia, cerca de 67% de los cafetales se produce bajo sombrío o semi-sombrío (Cardona y Sadeghian, 2005).

En todo caso, merece mencionar que la reducción de la cubierta arbórea para dar cabida a las plantaciones de café a pleno sol, está asociada a una pérdida de la biodiversidad. Guhl (2008) enfatiza que el café a pleno sol está asociado con tasas más altas de erosión del suelo, es más susceptible a las plagas y enfermedades y requiere mayores aportes de fertilizantes químicos y de pesticidas, que pueden contaminar las aguas superficiales y subterráneas, causar problemas de salud a los trabajadores, aumento de los costos de producción y efectos negativos en el ambiente, con repercusiones en la calidad del fruto del café. Por ejemplo, en Costa Rica se utiliza 30kg de nitrógeno por hectárea y por año, en comparación con el poco o ningún uso en las plantaciones cultivadas bajo sombra (COFENAC, 2012).

Existe poca información relacionada a la producción de café en sistemas agroforestales o a pleno sol, generada por los Centros Cafetaleros y universidades en Brasil y Colombia. En Ecuador, no se ha investigado nada con respecto a este tema, por lo que es una tarea pendiente de las Universidades principalmente, en asocio con del Ministerio de Agricultura y Ganadería, y los Consejos Provinciales que tienen la competencia de fomento al desarrollo agro productivo.

2.2.1.7. Factores que inciden en la producción del café en el país

La crisis del sector cafetalero ecuatoriano se refleja en un proceso continuado de fluctuación de la producción, siempre con tendencia a la baja. Entre las principales causas el COFENAC (2012) menciona:

- Limitada agrotécnica de cultivo.
- Falta de repotenciación del parque genético.
- Severo ataque de la roya (*Hemileia vastatrix*) en los años 2011 y 2012.
- Escaso relevo generacional de los productores. En Loja la edad promedio del caficultor es de 64 años, diez años más que el promedio en el resto del país.
- Baja adopción de las nuevas tecnologías por el productor.
- Ausencia de oferta oportuna de crédito para los caficultores.
- Falta de infraestructura vial rural, en la mayor parte de las zonas cafetaleras no existen vías carrozables estables en la temporada invernal.
- Escasa infraestructura de riego (reservorios, redes de distribución, riego tecnificado).
- Comportamiento errático del patrón de distribución de la lluvia (retraso de la temporada lluviosa, períodos de sequía o lluvias torrenciales, acentuados por el cambio climático).
- Sistema de comercialización inequitativo, lo que desmotiva al productor a mejorar la producción (el comerciante impone el precio). Como resultado de todo ello, el 80% de las plantaciones envejecidas e improductivas no se han renovado.

La cadena de comercialización del café (que abarca desde la recolección del grano en la finca hasta la exportación) es un factor clave en la disminución de producción. Los comerciantes intermediarios recogen

los sacos de café en las fincas, quiénes por lo general tienen asegurada la compra de la cosecha por adelantado, gracias a la entrega de préstamos a los productores. Los intermediarios habitualmente entregan el producto a los compradores medianos; quienes, a su vez, están conectados con los exportadores o los industriales, entregándoles volúmenes previamente acordados y con precios normalmente negociados con anterioridad. Estos últimos realizan operaciones de secado y selección, en procura de mejorar la calidad del producto. Este sistema denota el déficit asociativo del sector productor y la ausencia de políticas nacionales de comercialización, de calidad y de precios, que garanticen equidad para el sector productor.

Adicionalmente, se estima que en el país alrededor del 80% de las UPAs cafetaleras no tienen legalizada la tenencia de la tierra (COFENAC, 2012). La baja rentabilidad de la actividad cafetalera, no solo afecta a la economía de las pequeñas familias, sino que también se proyecta a escala local y nacional (Figueroa, 2016).

En contracorriente, las organizaciones regionales de productores vienen desde hace casi 20 años realizando la compra directa al productor asociado, garantizando sobre esta base la calidad y cantidad. El café ecuatoriano de especialidad, por esta vía, ha llegado a ubicarse en los mercados europeos, norteamericanos y asiáticos. Esta ventaja se traduce en precios más remunerativos para el productor, quien invierte en mejorar la calidad.

2.2.2. Café en la provincia de Loja

Ramón (2025), sustenta que los registros históricos revelan que la primera planta de café en el país se sembró en la provincia de Loja. El Censo Económico de 1825 ya registraba un quintal de café en el cantón Calvas, lo que implica que su cultivo comenzó entre 1822 y 1823.

Para 1826 la producción se había extendido a los cantones de Paltas y Zaruma (cantón lojano en ese entonces), consolidando una incipiente pero sólida cultura cafetalera en toda la provincia.

2.2.2.1. Área cultivada y distribución espacial.

Las cifras del área que cubren las plantaciones de café en la provincia de Loja son variables; así, según el COFENAC (2012), en el año 2012 se tenía 22.009 ha plantadas de café, por su parte, el INEC (2021) reporta que la superficie en el año 2019 fue de 17.910 ha; mientras que el SIPA (2022), anota que la superficie en el año 2022 había decrecido a 4.959 ha, lo que equivale a una reducción de 77,3% entre los años 2012 y 2022.

El café se cultiva en todos los cantones de la provincia de Loja, excepto Zapotillo. Lema (2019), reporta que los cantones con mayor extensión de café en hectáreas y porcentajes, son: Puyango: 2.259 (30,3%); Paltas: 1.560 (20,9%); Olmedo: 1.167 (15,6%); Espíndola: 910 (12,2%); otros, (20%), con un total de 7.457 hectáreas, equivalente al 16% de la superficie cafetalera total al país, manteniéndose como la segunda provincia cafetalera luego de Manabí. En resumen, alrededor del 80% de los cafetales están en los cantones de Loja, Puyango, Olmedo, Sozoranga, Quilanga, Espíndola y Chaguarpamba (MAG, 2023).

Las plantaciones en la provincia altitudinalmente se distribuyen en el rango de 500 a 2.100 m s. n. m., el mismo que cubre el piso subtropical y la franja inferior del piso temperado andino (Echeverría, 2022).

2.2.2.2. Variedades.

En la provincia de Loja se cultivan diferentes variedades exclusivamente de café arábigo; entre otras: Sidra, Típica Mejorada, Geisha, Caturra, San Salvador, Pacamara (Perfect Daily Grind, 2024). En las fincas de

las plantaciones de café en la zona de sur-oriental del cantón Loja, la distribución porcentual de las variedades es la siguiente: Criollo (21%), Catimor (22%), Colombia 6 (14%), Bourbon Rojo (13%), Bourbon Amarillo (5%), Típica Mejorada (5%); y, Nestlé F1 (1%) (Sánchez y Jumbo, 2023).

En las plantaciones de café del cantón Chaguarpamba, las principales combinaciones de variedades son: Típica - Caturra - Catuai (36%), Típica - Caturra - Bourbon - Catuai (24%), Caturra - Catuai (16%), Catuai (16%) y Caturra - Catuai (8%) (Jumbo, 2022). Guachisaca (2015) encontró que las variedades más cultivadas en el cantón Puyango, son: Nacional o Criollo (34%), Caturra (26%), Acawá (13%) y Sarchimor (11%). Cuenca (2023) reporta que el 70% de los caficultores del cantón Puyango siembran la variedad Sarchimor; además, tienen mucha preferencia por la variedad Acawá, y en los últimos años vienen trabajando con nuevas variedades, tales como Castilla, Obatá, Borbón y Catuai.

2.2.2.3. Sistemas agroforestales con café.

En la provincia de Loja los arbustos de café se cultivan asociados con otras especies de plantas en diferentes arreglos que corresponden a sistemas agrosilvícolas (comúnmente llamados “huerta”) con tres estratos. El estrato superior lo conforman los árboles que proporcionan sombra a los cafetos, además de madera, forraje y frutos. En el estrato medio se encuentran arbustos tales como, cítricos, banano, plátano y otros. El estrato inferior corresponde a cultivos que, durante los tres primeros años, son la base de alimentación, tanto de las familias de los campesinos, como de los pobladores de las zonas urbanas circundantes (maní, yuca, fréjol, guandul y otros).

En el 96% de los cafetales del cantón Chaguarpamba, el estrato superior está constituido por árboles tales como: guabo (*Inga edulis*), cedro colorado (*Cedrela fissilis*) y faique (*Acacia macracantha*). Las especies del estrato medio son: porotillo (*Erythrina fusca*), plátano (*Musa paradisiaca*) y naranjos (*Citrus sinensis*). El estrato inferior está representado por caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), maní (*Arachis hypogaea*) y fréjol (*Phaseolus vulgaris*) (Jumbo, 2022). Cuenca (2023) anota las siguientes especies arbóreas y arbustivas del estrato medio: aguacate (*Persea americana*), mango (*Mangifera indica*), granadilla (*Passiflora ligularis*), guayaba (*Psidium guajava*), guineo (*Musa × paradisiaca*), cítricos (lima, limón, limón dulce, mandarina), papaya (*Carica papaya*), tomate de árbol (*Solanum betaceum*) y zapote (*Pouteria sapota*). Guachisaca (2015) señala que en el cantón Puyango en todas las plantaciones de café como cultivo asociado se encuentra banano (guineo, plátano); en tanto que, los árboles frutales están presentes en el 57% de las fincas.

En conclusión, debido al predominio de terrenos de topografía irregular en la provincia de Loja, el café como cultivo semipermanente (10 años) asociado a otras especies arbóreas, arbustivas y herbáceas, algunas de ellas importantes fijadoras de nitrógeno atmosférico, constituye una opción de uso sustentable de los agroecosistemas en el rango altitudinal de los pisos subtropical y temperado inferior, con una serie de beneficios sociales, económicos y ambientales.

2.2.2.4. Rendimientos.

A pesar de que la calidad del café de la provincia de Loja ha sido reconocida a nivel nacional e internacional, la productividad es muy baja, con un promedio de 0,3 a 0,4 t ha⁻¹. Según el INEC (2021) el

rendimiento promedio anual como cultivo solo o asociado es similar ($0,12 \text{ t ha}^{-1}$), respectivamente, valor inferior al promedio nacional. El MAG (2023), indica que el rendimiento es aún menor, reportando un valor de $0,07 \text{ t ha}^{-1}$ para el año 2015.

La productividad del café en la provincia de Loja en los diferentes años es variable; así, en el año 2023 el rendimiento promedio fue de $0,73 \text{ t ha}^{-1}$, valor más alto que el promedio nacional ($0,6 \text{ t ha}^{-1}$), ocupando el segundo lugar, luego de Zamora Chinchipe ($0,84 \text{ t ha}^{-1}$) (MAG, 2023). En el año 2016 la productividad se incrementó en 329,0%, pasando de $0,17$ a $0,73 \text{ t ha}^{-1}$ (MAG, 2016), lo cual se atribuye, entre otros factores a: la renovación de cafetales, la introducción de nuevas variedades; y, la asistencia técnica a los productores (MAG, 2022).

Sánchez y Jumbo (2023) señalan que en los sistemas agroforestales de café en la zona del sur-oriental del cantón Loja, los rendimientos más altos ($0,83 \text{ t ha}^{-1}$) y más bajos ($0,46 \text{ t ha}^{-1}$), se producen en las UPAs cuya extensión es menor y mayor a 2 ha, respectivamente. Cueva (2022) indica que en el cantón Puyango el 34% de productores de café, cosechan entre $0,45$ y $0,68 \text{ t ha}^{-1}$, el 33% obtienen entre $0,22$ y $0,45 \text{ t ha}^{-1}$; y, el 11% logran entre $0,9$ y $1,8 \text{ t ha}^{-1}$.

Los factores que determinan los bajos rendimientos de café a nivel nacional inciden con mayor dureza en la provincia de Loja, entre otros:

- Edad avanzada de los cafetales, ineficientes prácticas de cultivo, falta de acceso a insumos de calidad, impacto negativo del cambio climático (ANECAFE, 2024a).
- Plantaciones en terrenos marginales, falta de recursos financieros para la tecnificación de los procesos de producción y post cosecha, limitada asistencia técnica y capacitación a los productores (MAG, 2012).

- Baja densidad por hectárea, poco o ningún control de plagas y enfermedades y escasa o ninguna reposición de la fertilidad a los suelos (Ramón, 2014).
- Baja asociatividad de los productores y grandes problemas en la comercialización (Venegas et al., 2018).
- Nula gestión de la fertilidad física y química del suelo en las plantaciones de café.
- Limitado acceso al riego. Por ejemplo, en el cantón Puyango el 70% de las fincas cafetaleras no cuentan con riego; es decir, el cultivo depende solamente de la temporada lluviosa, siendo la presencia de periodos secos el mayor riesgo para la producción. Además, el 95% de los productores reconocen que les hace falta capacitación en temas tales como: control de plagas y enfermedades, sombra óptima, gestión de la fertilidad del suelo (Cueva, 2022).
- Escasez de mano de obra agrícola que apoye las labores del cultivo, en especial en la cosecha del café que demanda gran cantidad de jornales, debido a la migración de la gente joven a otras zonas del país y del exterior (Ramón, 2014).

2.2.2.5. Importancia social, económica y ambiental del café en la provincia de Loja.

La provincia de Loja es una de las zonas más valoradas y reconocidas a nivel nacional e internacional por la calidad del café que produce (Perfect Daily Grind, 2024). Consecuentemente, el café es uno de los cultivos más importantes.

La producción cafetalera es de relevante importancia social, económica y ambiental en la provincia, generando miles de empleos en el sector rural. Su cadena productiva involucra desde la recolección hasta el procesamiento. Según el Servicio de Rentas Internas (SRI), en el año 2023 generó ingresos por 1,9 millones de dólares, equivalentes al 21,4 % del total nacional.

En general los cafetales se encuentran en terrenos de pequeños agricultores (< 5 ha), lo que significa generación de trabajo para una gran cantidad de personas de escasos recursos económicos. La huerta diversificada aporta con alimentos para la seguridad alimentaria de la familia (yuca, fréjol de palo, plátano, guineo y otros). El Sistema no demanda la remoción anual del suelo, lo que evita la erosión y aumenta la retención de la humedad en los terrenos inclinados. Los cafetos se reemplazan a los diez años o más, pero la sombra arbórea permanece protegiendo al suelo y promoviendo la conservación de la biodiversidad.

2.2.2.6. Desafíos y oportunidades para el café de la provincia de Loja.

A pesar de contar con condiciones agroclimáticas favorables, la producción de café de especialidad en la provincia de Loja enfrenta desafíos que comprometen su sostenibilidad y competitividad (WCR, 2024b). Uno de los principales retos es mejorar la productividad, la cual se ve afectada por el cambio climático, que ha alterado los patrones tradicionales de precipitación, provocando sequías prolongadas, lluvias intensas en periodos cortos, proliferación de plagas y enfermedades, degradación del suelo, contaminación del agua y escasa tecnificación del riego (MAG, 2023).

Consecuentemente, el gran desafío, tanto para los productores de café, como para todas las instituciones vinculadas a la tarea del fomentar el desarrollo agroproductivo de la provincia de Loja (instituciones públicas, universidades, ONG y asociaciones), es superar los factores que inciden en la baja productividad, siguiendo para ello las lecciones, por ejemplo, de Costa Rica y Colombia, en cuyas plantaciones con prácticas adecuadas de la gestión de la fertilidad del suelo y de optimización del agua de riego, se reportan rendimientos del orden de $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (café pergamino seco).

Los sistemas agroforestales tradicionales de conservación de suelo y agua, en los últimos años se han visto amenazados por incendios y prácticas agrícolas inadecuadas, lo que ha ocasionado que el 60% las fincas cafetaleras presenten erosión antrópica de moderada a severa, y pérdida de la fertilidad de los suelos (Arias et al., 2023).

Asimismo, persisten limitaciones, tanto en los viveros con el uso de semillas no certificadas y un inadecuado manejo de los sustratos, lo cual, conlleva un deficiente desarrollo de plántulas (Añazco, 2023). Del mismo modo, a nivel de cultivo se tiene escasa adopción de tecnologías para el manejo de suelos, agua de riego, fertilización, control de plagas y enfermedades y procesos poscosecha, lo que genera bajos niveles de productividad y calidad (Hidalgo, 2019).

La renovación de los cafetales es una acción absolutamente indispensable que es necesario incentivarla. En este contexto, la Delegación del Ministerio de Agricultura y Ganadería en la provincia de Loja, en el período 2014 a 2020, ha fomentado la renovación de 7.478 hectáreas de cafetales, con la participación de 3.936 familias, cuya distribución por cantones se presenta en el Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Superficie de renovación de cafetales promovida por la Delegación del Ministerio de Agricultura y Ganadería (período 2014–2020) y familias participantes en los cantones de la provincia de Loja.

Cantón	Superficie (ha)	Familias Productoras
Puyango	1.865	982
Chaguarpamba	1.281	674
Espíndola	901	474
Quilanga	661	348
Loja	581	306
Paltas	332	175
Sozoranga	283	149
Gonzanama	286	151
Calvas	273	144
Pindal	274	144
Olmedo	304	160
Catamayo	185	97
Celica	80	42
Macará	76	40
Saraguro	93	49
Total	7.478	3.936

Nota: Informe de la Delegación Provincial de Loja del MAG (2021)

Con el propósito de promover la tecnificación del cultivo del café y su comercialización en la RSE, se cuenta con la Federación Regional de Asociaciones de Pequeños Cafetaleros Ecológicos del Sur (FAPECAFES), la cual es una organización de segundo grado, de derecho privado con patrimonio propio y sin fines de lucro. Está conformada por siete asociaciones: PROCAP, APECAP, PROCAFEQ y APECAM, a las que posteriormente se sumaron APEOSAE, ACRIM y APECAEL, ubicadas en las principales regiones cafetaleras de las provincias de El Oro, Loja y Zamora Chinchipe. Estas asociaciones en la actualidad agrupan aproximadamente a 2020 productores, abarcando una superficie cercana a 24.000 ha. La producción promedio de café es de

alrededor de 0,65 t año⁻¹. La planta de procesamiento del café se localiza en la ciudad de Catamayo, desde donde se exporta exclusivamente café orgánico a diferentes partes del mundo (Yanangómez, 2025).

A fin de impulsar la producción de café especial de la mejor calidad, en la perspectiva de lograr un posicionamiento a nivel internacional, la Asociación Nacional de Exportadores de Café del Ecuador (ANECAFE) desde el año 2007 viene organizando el concurso Taza Dorada (ANECAFE, 2007). En este evento, expertos internacionales evalúan diferentes parámetros de la calidad del café (aroma, dulzor, cuerpo, color y otros) y se premia a los mejores productores. Los concursantes provienen de todas las zonas cafetaleras del país. A través de estos eventos anuales, se ha logrado mapear las diferentes zonas por su calidad. A más de catadores internacionales reconocidos, participan potenciales compradores de distintos países, sobre todo asiáticos. Los potenciales clientes también envían a sus catadores al concurso antes de hacer su elección de compra (ANECAFE, 2024c).

Cabe enfatizar que, de las 18 ediciones realizadas de la Taza Dorada en el país, el café de altura de la provincia de Loja ha obtenido el primer lugar en 12 de ellas (ANECAFE, 2024b). Cronológicamente, los cantones de la provincia de Loja premiados con la Taza Dorada son: Loja (2007, 2011 y 2016), Olmedo (2013, 2014 y 2025), Puyango (2015), Sozoranga (2020), Quilanga (2022), Saraguro (2024) y Olmedo (2025). En el año 2021, las variedades Sidra y Geisha, cultivadas en las provincias andinas de Pichincha y Loja en su orden, fueron las más valoradas por el panel de expertos, logrando calificaciones de calidad superiores a 90 puntos (ANECAFE, 2023).

No obstante que, el concurso de la Taza Dorada, se ha realizado siempre en Ecuador (18 oportunidades), en el año 2023 adicionalmente se lo llevó a cabo en los Estados Unidos, mediante una alianza estratégica entre la United Project Global (UPG) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería

(MAG), ocasión en la que se evidenció que la calidad del café ecuatoriano, en particular de la provincia de Loja, se encuentra entre las mejores del mundo (ANECAFE, 2024c).

ANECAFE (2024b) indica que el café producido en la finca La Noria en el cantón Loja, que en noviembre de 2023 alcanzó el primer lugar en el concurso Taza Dorada, luego se consolidó como el “NUMBER ONE” del concurso Taza de Excelencia 2024, edición Ecuador. Actualmente se lo exporta a China, Emiratos Árabes Unidos, Australia, Japón y Estados Unidos y esperan pronto expandirse a otros mercados.

Es digno de mencionar el gran cambio que se viene dando en la comercialización directa de café por los productores de la provincia de Loja, con el apareamiento relativamente reciente de las bolsas tipo Doypack⁴ (de plástico de polietileno/aluminio, con cierre de cremallera, ziplock o válvula de desgasificación), para el embalaje de café tostado, en un rango de peso de 200 a 2.000 g. Ello ha motivado el surgimiento de una gran diversidad de marcas de café tostado (en grano o molido), como empresas familiares artesanales, que comercializan directamente a nivel nacional e internacional, con el membrete de común de “Café de Loja”, inclusive se encuentran en franquicias tan importantes como el Starbucks en Praga, en donde la bolsa de 250 g se vende a \$16 (Figura 2.3).

Lo anotado abre un espacio prometedor para obtener un precio muy atractivo para el café de la provincia de Loja, lo cual incentivaría a los productores a renovar y ampliar las plantaciones, mejorar la tecnología del cultivo, optimizar la gestión de la fertilidad del suelo y del agua de riego, con miras a incrementar los rendimientos de un café arábigo de la mejor calidad a nivel mundial, y lograr mejores réditos económicos directos para los pequeños productores, apuntalando

⁴ Jamil Ramón Vivanco. Comunicación Personal. La ficha técnica indica que el material de la bolsa Doypack es una estructura laminada de 3 capas con adhesivo solvente, apto para productos alimenticios, libre de contaminantes.

concomitantemente el desarrollo económico y social de toda la provincia, en un marco de uso sustentable de sus recursos naturales (suelo, agua, biodiversidad), en un paisaje ambientalmente adverso, con predominio de laderas frágiles.



Figura 2.3. Café de Loja en el Starbucks de Praga.
Nota: Foto Carlos Valarezo Manosalvas (08/08/2022).

Un aspecto muy alentador para impulsar con verdadero compromiso el desarrollo de la caficultura en la provincia de Loja, fue la exposición del señor Víctor Yanangómez, presidente Ejecutivo de FAPECAFES, en el Panel: Situación Cafetalera en la Zona Sur del Ecuador y sus Alternativas, como parte del programa del Primer Encuentro Regional de Caficultura Sostenible, realizado en la Universidad Nacional de Loja, del 23 al 25 de julio de 2025, quien orgullosamente presentó una muestra del café Amarillo, Azul y Rojo, como Café del Sur del Ecuador; entre otras aspectos señaló lo siguiente:

- Durante 24 años exportan café a la Unión Europea.
- Han enviado muchas muestras a todo el mundo, incluyendo Japón y China.
- Los productores son los dueños de las organizaciones.
- Los productores son quienes actualmente fijan el precio y las ganancias se reparten equitativamente.
- Los análisis de residuos en el café orgánico que exportan los realizan en los laboratorios de Francia, por cuanto los laboratorios nacionales no son confiables.
- Exportan 12.000 sacos al año, con su respectiva trazabilidad.
- Resalta que falta café lojano para satisfacer la demanda internacional.
- Es necesario involucrar a los jóvenes en el proceso de producción del café, como estrategia de relevo generacional.
- Es indispensable mejorar la asociatividad.

La valoración internacional en los años recientes, confirma que se está viviendo el renacer del café lojano; por lo que, el reconocimiento oficial de Loja como la capital del café será una demanda ciudadana ante la Asamblea Nacional. Loja desde la primera planta sembrada sueña en convertirse en el corazón cafetalero del Ecuador (Ramón, 2025).

2.3. Referencias bibliográficas

- Agegnehu, E., Thakur, A., & Mulualem, T. (2015). Potential impact of climate change on dynamics of coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in Ethiopia. <https://www.researchgate.net/publication/276262177>
- Alemu, M. (2015). Effect of tree shade on coffee crop production. *Journal of Sustainable Development*, 8(9), 66–74. <https://doi.org/10.5539/jsd.v8n9p66>
- Añazco, J. (2023). Sustentabilidad de los sistemas agroforestales de café especial de altura en el sector sur oriental del cantón Loja. *Revista Bosques Latitud Cero*, 13(1), 45–60. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/1616>
- Arias, B., Saz, M., y Escolano, F. (2023). Efectos de la erosión en fincas cafetaleras de altura en la provincia de Loja [Documento interno]. Universidad Nacional de Loja.
- Asociación Nacional de Exportadores de Café del Ecuador. (2007). Primer concurso-subasta del mejor café ecuatoriano: Taza Dorada 2007. <http://www.anecafe.org.ec/taza-dorada/informefinal-taza-dorada-2007>
- Asociación Nacional de Exportadores de Café del Ecuador. (2023). Exportaciones de café. <https://anecafe.org.ec/estadisticas/>
- Asociación Nacional de Exportadores de Café del Ecuador. (2024a). Qué sucedió con el café en los últimos 20 años. <https://maizysoya.com/lector.php?id=20201292>
- Asociación Nacional de Exportadores de Café del Ecuador. (2024b). Loja pasea su café por el mundo. <https://maizysoya.com/lector.php?id=20201295>
- Asociación Nacional de Exportadores de Café del Ecuador. (2024c). Taza Dorada: Una vitrina del café ecuatoriano para el mundo. <https://maizysoya.com/lector.php?id=20201294>
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., & Morales, C. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7(2), 303–321. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>

- Ballard, B. (2019). Oversupply is causing coffee prices to plummet. *Business Destinations*. <https://www.businessdestinations.com/work/oversupply-is-causing-coffee-prices-to-plummet>
- Banco Central del Ecuador. (2021). Boletín de análisis agropecuario. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/Encuestas/Coyuntura/Integradas/etc202104.pdf>
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). Climate change and water (IPCC Technical Paper VI). IPCC. <https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-sp.pdf>
- Beard, J., & Burchfield, W. (2021). Analyzing price changes in coffee throughout history. <https://rpubs.com/jbeard127/coffeeprices>
- Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J., Somarriba, E., y Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. <https://www.researchgate.net/publication/228916276>
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., & Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38, 139–164. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9008-2_6
- Berthaud, J., & Charrier, A. (1988). Genetic resources of *Coffea*. IRD. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_53-54/010020483.pdf
- Bertrand, B., Anthony, F., & Lashermes, P. (2001). Breeding for resistance to *Meloidogyne exigua* in *Coffea arabica* by introgression of resistance genes from *Coffea canephora*. *Plant Pathology*, 50(5), 637–645. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.200100597.x>
- Brenda, B. (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee-agroecosystems. <https://www.researchgate.net/publication/248350905>
- Calfat, G., & Flores, R. (2002). Government actions to support coffee producers. European Union. <https://www.researchgate.net/publication/5024447>

- Campuzano, L., & Wohlgenuth, M. (2022). Strategies for Robusta coffee (*Coffea canephora*) improvement as a new crop in Colombia. *Agriculture*, 12(10), 1576. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101576>
- Capel, J., De la Figuera, M., Franco, R., Lizarraga, M., Pérez, J., y Riobó, P. (2010). Café y estilo de vida saludable. <https://www.fen.org.es/storage/app/media/imgPublicaciones/231120104820>
- Cardona, D., y Sadeghian, D. (2005). Beneficios del sombrío de guamo en suelos cafeteros. CENICAFÉ. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0335.pdf>
- Centro de Comercio Internacional. (2021). The coffee guide. <https://intracen.org/our-work/topics/food-and-agriculture/coffee>
- Cerda, R., Allinne, C., Krolczyk, L., Mathiot, C., Clément, E., Harvey, C. A., Aubertot, J., Tixier, P., Gary, C., & Avelino, J. (2015). Ecosystem services provided by coffee agroecosystems across a range of topo-climatic conditions and management strategies. *Ecosystem Services*, 14, 76–90. <https://www.researchgate.net/publication/297689810>
- Chango, M., y García, J. (2021). Análisis de la competitividad de las exportaciones de café de Ecuador versus Colombia y Brasil hacia el mercado de Estados Unidos. *X-Pedientes Económicos*. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/392/3922449005>
- Chávez, G., Aguilar, R., y Ramírez, A. (2024). Análisis de la producción del café en Ecuador y la parroquia Ayapamba. *Revista Neque*, 7(18). <https://doi.org/1033996/revistaneque.v7i18135>
- Chellai, F. (2021). Estimating and forecasting volatility in coffee prices: Evidence of ARIMA–GARCH models. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/354720821>
- Choque, D. (2021). Evolución de la exportación de café: 2010–2020 [Tesis de grado, Universidad de Lima]. <https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20500.12724/13716>
- Consejo Cafetalero Nacional. (2012). El sector cafetalero ecuatoriano: Diagnóstico. <https://www.yumpu.com/es/document/read/50537034>

- Consejo Cafetalero Nacional. (2013). Situación del sector cafetalero ecuatoriano: Manabí, Ecuador. <http://www.cofenac.org/wp-content/uploads/2010/09/situacion-sector-cafe-ecu.pdf>
- Cuenca, C. (2023). Caracterización de sistemas productivos de café con sombra en el cantón Chaguarpamba [Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/26581/1>
- Cueva, M. (2022). El conocimiento científico y tradicional en el manejo de variedades y sombra en los cafetales del cantón Puyango [Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/24775/1>
- Da Silva, K., y Ramos, H. (2024). Mujeres en el cultivo del café. Embrapa. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1168066/1/MUJERES-RURALES-CAFE.pdf>
- DaMatta, F. M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: A review. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/261706571>
- DaMatta, F. M., y Rodríguez, N. (2007). Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotrópico: Una visión agronómica y ecofisiológica. *Agronomía Colombiana*, 25(1), 113–123. <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v25n1/v25n1a13.pdf>
- Davis, A. P., Gole, T. W., Baena, S., & Moat, J. (2012). The impact of climate change on indigenous Arabica coffee (*Coffea arabica*): Predicting future trends and identifying priorities. *PLOS ONE*, 7(11), e47981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047981>
- Davis, A. P., Govaerts, R., Bridson, D. M., & Stoffelen, P. (2006). An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 152(4), 465–512. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.200600584.x>
- Delgado, P., Larco, A., García, C., Alcívar, R., Chilán, W., y Patiño, M. (2002). Café en Ecuador. Organización Internacional del Café. http://dev.ico.org/projects/cabi_cdrom/PDFFiles/ECUADOR.pdf

- Duicela, L., Martínez, M., Loor, R., Morris, A., Guzmán, A., Rodríguez, C., y Chilán, W. (2017). Gestión del conocimiento e innovación organizacional para reactivar la cadena productiva del café robusta. *ESPAMCIENCIA*, 8(1), 1–12. https://revistasespam.espam.edu.ec/index.php/Revista_ESPAMCIENCIA/article/view/156/139
- Duris, D., y Perret, C. (2007). Café. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. <https://www.oecd.org/swac/publications/39596349.pdf>
- Echeverría, K. (2022). Café ecuatoriano: Una guía completa para los amantes del café. Happy Gringo. <https://happygringo.com/blog/ecuador-coffee-many-sips-come/>
- Echeverría, M., Ortega, S., Obando, S., & Nuti, M. (2022). Scientific, technical, and social challenges of coffee rural production in Ecuador. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/362995293>
- Eira, M. T. S., Silva, E. A. A., Castro, R. D., Dussert, S., Walters, C., Bewley, J. D., & Hilhorst, H. W. M. (2006). Coffee seed physiology. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1), 149–163. <https://www.scielo.br/j/bjpp/a/zZgRS3Mbwg8KjW8R9bn9X3L/>
- Farfán, F. (2014). Agroforestería y sistemas agroforestales con café. Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2020). Economía cafetera. <https://federaciondefcafeteros.org/app/uploads/2020/05/Economia-Cafetera-No.-33.pdf>
- Figuerola, E. (2016). Evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción de café en fincas-hogares del sector San José, municipio de Linares (Nariño). *Tendencias*, 17(2), 107–125. <http://www.scielo.org.co/pdf/tend/v17n2/v17n2a06.pdf>
- Forumcafé. (2024). Café en Ecuador. https://forumdelcafe.com/wp-content/uploads/2024/06/FC-N97-_-LOW-RES-1.pdf

- Garcés, R. (2021). Conformando el gremio de caficultores del Ecuador. Rikolto Latinoamérica. <https://latinoamerica.rikolto.org/es/noticias/uncafe-conformando-el-gremio-decaficultores-del-ecuador>
- GlobeNewswire. (2022). Global coffee market analysis by product type, coffee bean type, region, size and trends with impact of COVID-19 and forecast up to 2027. <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/10/10/2530828/0/en/Global-Coffee-Market-Analysis-By-Product-Type-By-Coffee-Bean-Type-By-Region-Size-and-Trends-with-Impact-of-COVID-19-and-Forecast-up-to-2027.html>
- Godínez, L., Figueroa, E., y Pérez, F. (2016). Análisis del precio del café y el ingreso de los pequeños productores. ECORFAN Journal. https://www.ecorfan.org/handbooks/Handbook_Matematicas_Aplicadas_a_la_Economia_T1V1/Particiones/6.pdf
- González, P. (2023). Ecuador industrializa café en grano de Vietnam y Brasil. Primicias. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/cafe-industrial-soluble-vietnam>
- Granados, O. (2018). Un mundo loco por el café. El País (marzo 8). https://elpais.com/economia/2018/03/08/actualidad/1520527718_097899.html
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2007). Impactos, adaptación y vulnerabilidad. <https://www.un.org/es/climatechange/ipcc-wgii-report>
- Guachisaca, S. (2015). Análisis sectorial, producción y comercialización de café en el cantón Puyango [Trabajo de titulación]. Universidad Técnica Particular de Loja. <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789>
- Guhl, A. (2008). Café y cambio de paisaje en Colombia, 1970–2005. Banco de la República. <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll18/id/378/>
- Hagggar, J., & Schepp, K. (2012). Coffee and climate change: Impacts and options for adaptation in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam. *Climate Change, Agriculture and Natural Resources*. <https://www.academia.edu/2050482>

- Hidalgo, M. (2019). Infraestructuras, sequías y acceso diferenciado al agua: Un análisis desde la justicia hídrica en el cantón Loja [Tesis de maestría, Universidad Andina Simón Bolívar]. <https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/7016>
- Howden, S. M., Soussana, J. F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., & Meinke, H. (2008). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19691–19696. <https://www.researchgate.net/publication/5771975>
- Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias. (2009). Cambio climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/costo%20adaptacion.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2002). Tercer censo nacional agropecuario. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/CNA/Tomo_CNA.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2023). Cifras agroproductivas de café en Ecuador. <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/sipa-estadisticas/estadisticas-productivas>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2021a). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (ESPAC): Principales resultados. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2021/Principales%20resultados-ESPAC_2021.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2021b). Superficie, producción y ventas de café (grano oro) por región y provincia. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- Jácome, A. R. (2017). Coffee prices volatility and transmission: Developing risk management instruments for coffee growers in Ecuador [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/48156/>
- Jácome, A. R., & Garrido, A. (2017). A real option analysis applied to the production of Arabica and Robusta coffee in Ecuador. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15(4). <https://sjar.revistas.csic.es/index.php/sjar/article/view/10098>

- Jadán, V., Belduma, N., y Elizalde, M. (2024). Evolución y proyección de la producción agrícola (banano y café) en Ecuador en el periodo 2012–2025. *INVECom*, 4(1). <https://revistainvecom.org/index.php/invecom/article/view/3186/587>
- Jiménez, A., y Massa, P. (2016). Producción de café y variables climáticas: El caso de Espíndola, Ecuador. *Revista de Geografía Agrícola*, 56, 73–89. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=195648804006>
- Jumbo, N. (2022). Influencia de la variedad, altura y procesos tecnológicos en la calidad y sustentabilidad del café de Chaguarpamba, Loja, Ecuador [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20500.12996/5233>
- KenResearch. (2024). Perspectivas del mercado mundial del café hasta 2028. <https://www.kenresearch.com/industry-reports/global-coffee-market-outlook-to-2028>
- Leach, M. (2016). Gender equality and sustainable development. Routledge. https://observatorio2030.com.br/wp-content/uploads/2022/03/104324_9781315686455_previewpdf-1.pdf
- Lema, V. (2019). Informe de rendimientos objetivos de café (grano oro). <https://fliphtml5.com/ijia/zeck/basic>
- Leroy, T., Ribeyre, F., Bertrand, B., Charmetant, P., Dufour, M., Montagnon, C., & Pot, D. (2006). Genetics of coffee quality. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1), 229–242. <https://www.researchgate.net/publication/234107292>
- Maletic, M. (2023). Coffee production and export statistics: Latest data on global coffee trade. *Craft Coffee Spot*. <https://craftcoffeespot.com/coffee-production-and-export-statistics/>
- Malézieux, E. (2012). Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 15–29. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0027-z>
- Market Analysis Report. (2024). Tamaño, participación y crecimiento del mercado del café. Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/coffee-market>

- Martínez, L. (2013). La agricultura familiar en el Ecuador. FLACSO Ecuador. https://www.flacsoandes.edu.ec/sites/default/files/agma/files/la_agricultura_familiar_en_el_ecuador.pdf
- Mero, K., y Muñoz, R. (2018). Economía política del desarrollo: Claves del sector cafetalero para el desarrollo territorial de Manabí, Ecuador. Observatorio de la Economía Latinoamericana. <https://www.eumed.net/rev/oel/2018/11/sector-cafetalero-ecuador.html>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2012). Proyecto de reactivación de la caficultura ecuatoriana. <https://www.agricultura.gob.ec/magap-ejecuta-proyecto-de-reactivacion-de-la-caficultura-ecuatoriana/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2013). Proyecto de reactivación del café y cacao nacional fino de aroma. <https://www.agricultura.gob.ec/proyecto-de-reactivacion-de-cafe-y-cacao-nacional-fino-de-aroma-realizo-mesa-de-concertacion-de-cafes-especiales-del-ecuador/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2016). La política agropecuaria ecuatoriana: Hacia el desarrollo territorial rural sostenible 2015–2025. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu183434.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2020). Cifras agroproductivas. Sistema de Información Pública Agropecuaria. <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2021). Rendimiento de café en Ecuador. <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/rendimientos-de-cafe-2021>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2022). Renovación del cultivo de café en la provincia de Loja. <https://www.agricultura.gob.ec/6425-hectareas-de-cafe-son-renovadas-en-la-provincia-de-loja/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2023). Boletín situacional del cultivo de café. <https://www.agricultura.gob.ec>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2024). Boletín situacional de café. <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/situacionales-agricolas/situacional-cafe>

- Molla, M. (2015). Effect of tree shade on coffee crop production. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/283520106>
- Montero, A. (2017). Rendimientos de café grano seco en el Ecuador 2016. <https://fliphtml5.com/ijia/mzvg/basic>
- Moraga, P., Bolaños, R., Pilz, M., Munguía, R., Huth, J., Barrios, M., Herrera, J., y Gamboa, W. (2011). Árboles de sombra e intensidad del cultivo afectan el rendimiento de café (*Coffea arabica* L.) y la valoración ecológica en Masatepe, Nicaragua. *La Calera*, 11(16), 34–41. <https://lascalera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/141>
- Muradian, R., & Pelupessy, W. (2005). Governing the coffee chain: The role of voluntary regulatory systems. *World Development*, 33(12), 2029–2044. <https://www.researchgate.net/publication/4811203>
- Muschler, R. (1999). Árboles en cafetales. CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/453>
- Observatorio de Complejidad Económica. (2024). Principales países exportadores e importadores de café a nivel mundial. <https://oec.world/es/profile/hs/coffee>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). Producción de café en el mundo en el período 1961–2020 (FAOSTAT). https://drive.google.com/file/d/1Z6VYT5OmbMiMtIw_KtHfWLC4MfBxcXs2/view
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). FAO database results. <https://www.fao.org>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). Ecuador en una mirada. <https://www.fao.org/ecuador/fao-en-ecuador/ecuador-en-una-mirada/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). Markets and trade: Coffee. <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities/coffee/en/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). Mercados y comercio: Café. <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities-overview/beverages/coffee/es>

- Organización Internacional del Café. (2007). International coffee agreement: Benefits of membership. https://www.ico.org/Benefits_ICA2007.asp
- Organización Internacional del Café. (2014). World coffee trade (1963–2013): A review of the markets, challenges and opportunities facing the sector. <https://www.ico.org/news/icc-111-5-r1e-world-coffee-outlook.pdf>
- Organización Internacional del Café. (2018). Gender equality in the coffee sector. <https://www.ico.org/documents/cy2017-18/icc-122-11e-gender-equality.pdf>
- Organización Internacional del Café. (2019). Coffee development report 2019. <http://www.ico.org/documents/cy2021-22/coffee-development-report-2019.pdf>
- Organización Internacional del Café. (2023). Annual review 2022–2023. <https://www.icocoffee.org/documents/cy2023-24/annual-review-2022-2023-e.pdf>
- Organización Internacional del Café. (2024). Sostenibilidad y resiliencia del café a nivel mundial: Hacia un vehículo de inversión en café. <https://www.icocoffee.org/documents/cy2023-24/report-global-coffee-funding-mechanisms-june-2024-e.pdf>
- Organización Internacional del Café. (2023a). Coffee report and outlook. https://icocoffee.org/documents/cy2023-24/Coffee_Report_and_Outlook_December_2023_ICO.pdf
- Organización Internacional del Café. (2023b). Beyond coffee: Towards a circular coffee economy. <https://www.icocoffee.org/documents/cy2024-25/coffee-development-report-2022-23.pdf>
- Pachauri, R. K., Mayer, L., y IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Panhuisen, S., & Pierrot, J. (2020). Coffee barometer 2020. Hivos. https://coffeebarometer.org/wp-content/uploads/2021/04/Coffee-Barometer-2020_T.pdf
- Perfect Daily Grind. (2024, junio 28). Recorrido por algunas zonas productoras de café en Ecuador. <https://perfectdailygrind.com/es/2024/06/28/recorrido-zonas-productoras-cafe-ecuador/>

- Pham, Y., Reardon, K., Mushtaq, S., & Cockfield, G. (2019). The impact of climate change and variability on coffee production: A systematic review. *Climatic Change*, 156(4), 609–630. <https://www.researchgate.net/publication/335682030>
- Ponce, L., Orellana, K., y Acuña, I. (2016). Diagnóstico y propuesta de un sistema de innovación tecnológica cafetalera en Ecuador. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5768631>
- Ponte, S. (2002). The latte revolution: Regulation, markets and consumption in the global coffee chain. *World Development*, 30(7), 1099–1122. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(02\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00032-3)
- Pozo, M. (2014). Análisis de los factores que inciden en la producción de café en el Ecuador (2000–2011) [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/5abff928-2f81-4303-9955-822f39f440e6/content>
- Quintero, M., y Rosales, M. (2014). Mercado mundial del café: Tendencias recientes, estructura y estrategias de competitividad. <https://www.redalyc.org/pdf/4655/465545897005.pdf>
- Ramón, G. (2025). Loja, la capital del café. *Diario Crónica*. <https://www.cronica.com.ec>
- Ramón, J. (2014). Tipología de cafetaleros/as e institucionalidad de sus organizaciones: Elementos de participación en las políticas públicas en el sur del Ecuador [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Loja].
- Rapidel, B., Allinne, C., Cerdan, C., y Meylan, L. (2015). Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales. En *Sistemas agroforestales*. <https://www.researchgate.net/publication/273002860>
- Reay, D. (2019). Climate-smart coffee. En *Climate-smart food*. Springer. <https://www.researchgate.net/publication/334243306>
- Rivera, C. (2021). Competitividad del café mexicano en el comercio internacional: Un análisis comparativo con Brasil, Colombia y Perú (2000–2019). *Análisis Económico*, 37(94), 181–210. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ane/v37n94/2448-6655-ane-37-94-181.pdf>

- Root Capital. (2015). Café cultivado a la sombra: ¿Cuál es el problema? <https://rootcapital.org/es/cafe-cultivado-a-la-sombra-cual-es-el-problema/>
- Rosas, M. (2020). El café en el mundo del siglo XXI: Los retos para México. https://af6f3f45-e49c-4ab5-8df6-e08f3f8d962c.usrfiles.com/ugd/af6f3f_a085b2400752473b803acb3298a6b677.pdf
- Sachs, J., Cordes, K., Rising, J., Toledano, P., & Maennling, N. (2019). Ensuring economic viability and sustainability of coffee production. Columbia Center on Sustainable Investment. <https://ccsi.columbia.edu/sites/default/files/content/docs/publications/Ensuring-Economic-Viability-Sustainability-of-Coffee-Production.pdf>
- Salamanca, L. (2017). Evaluación de la producción de café bajo sombra con especies arbóreas en el municipio de Pajarito [Tesis de grado, UNAD]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13725>
- Salinas, E. (2004). El impacto de la onda cíclica de los precios del café en los productores de México. *Región y Sociedad*. <https://www.redalyc.org/pdf/413/41304014.pdf>
- Samper, L., Giovannucci, D., & Marques, L. (2017). The powerful role of intangibles in the coffee value chain. <https://www.researchgate.net/publication/321184182>
- Sánchez, M., y Jumbo, N. (2023). Sustentabilidad de los sistemas agroforestales de café del cantón Loja [Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/26985/1>
- Sistema de Información Pública Agropecuaria del Ecuador. (2022). Cifras agroproductivas. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>
- Somarriba, E., Harvey, C., Samper, M., Anthony, F., Gonzalez, J., Staver, C., & Rice, R. (2004). Biodiversity in neotropical *Coffea arabica* plantations. <https://www.researchgate.net/publication/324216664>
- Soto, L., Perfecto, I., Castillo, J., & Caballero, J. (2000). Shade effect on coffee production in Chiapas, Mexico. <https://www.researchgate.net/publication/222549710>

- Statista. (2024). Países líderes a nivel mundial según superficie de café cosechada en 2023. <https://www.statista.com/statistics/279162>
- Subervie, J. (2011). Producer price adjustment to commodity price shocks: An application of threshold cointegration. *Journal of Development Economics*, 95(2), 242–254. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264999311001428>
- United States Department of Agriculture. (2015). Coffee annual: Ecuador. https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Coffee%20Annual_Quito_Ecuador_5-5-2015.pdf
- United States Department of Agriculture. (2018). Coffee annual: Ecuador. https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Coffee%20Annual_Quito_Ecuador_5-8-2018.pdf
- United States Department of Agriculture. (2021). Coffee annual: Ecuador. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Coffee%20Annual_Quito_Ecuador_05-15-2021.pdf
- United States Department of Agriculture. (2022). Coffee annual: Ecuador. https://agriexchange.apeda.gov.in/MarketReport/Reports/Coffee%20Annual_Quito_Ecuador_EC2022-0008.pdf
- United States Department of Agriculture. (2023). Coffee annual: Brazil. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Coffee%20Annual_Brasilia_Brazil_BR2023-0011.pdf
- United States Department of Agriculture. (2024). Coffee: World markets and trade. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>
- Utrilla, R. (2020). Estudio del mercado del comercio internacional del café: Diagnóstico y evolución [Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/65672/1/TFG_REBECA_UTRILLA_CATALAN.pdf
- Valverde, L., Moreno, J., Quijije, K., Castro, A., Merchán, W., y Ortega, J. (2020). Los bioestimulantes: Una innovación en la agricultura para el cultivo del café (*Coffea arabica* L.).

Journal of the Selva Andina Research Society, 11(1), 33–45.
http://www.scielo.org.bo/pdf/jsars/v11n1/v11n1_a03.pdf

Venegas, S., Orellana, D., y Pérez, P. (2018). La realidad ecuatoriana en la producción de café. *RECIMUNDO*, 2(2), 345–356. <https://www.recimundo.com/index.php/es/article/download/218/html>

Villarreyna, R. (2016). Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo en sistemas agroforestales con café. <https://www.researchgate.net/publication/312190381>

World Coffee Research. (2024). Variedades de café arábica. <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/robusta/varieties>

Yanangómez, V. (2025). La situación cafetalera en la zona sur del Ecuador y sus alternativas [Ponencia]. Primer Encuentro de Caficultura Sostenible, Universidad Nacional de Loja.

Zacharias, A., Camargo, M., & Fazuoli, L. (2008). Agrometeorological model for estimating flowering in coffee. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90867130>

Capítulo 3

Requerimientos edáficos y nutricionales del café arábigo

3.1. Características biológicas y requerimiento de clima del café arábigo

Enríquez y Duicela (2014) indican que el café arábigo reúne un conjunto de características fenotípicas y genéticas que lo distinguen de las demás especies de café, las cuales se anotan a continuación:

- Es un arbusto de fotosíntesis C3, fecundación autógama, con copa piramidal abierta o compacta.
- La estructura genética es tetraploide, con 44 cromosomas (2n).
- El sistema radicular está compuesto por una raíz pivotante principal, raíces laterales y raicillas (Figura 3.1.).
- El tallo es ortotrópico monocaule (un solo tallo) y a veces multicaule.
- Las hojas son elípticas, oblongas y a veces lanceoladas.
- Las ramas son plagiotrópicas primarias, secundarias y terciarias.
- Las inflorescencias tienen 2 a 3 glomérulos por axila de la hoja.
- Las flores son hermafroditas, formadas por cáliz, corola, estambres y pistilo.
- El fruto es una drupa elipsoidal formada por: epicarpio (cáscara), mesocarpio, endocarpio (pergamino) y endospermo (semilla).
- La semilla está formada por el endospermo y el embrión. El endospermo está cubierto por una fina membrana llamada película plateada.
- El contenido de cafeína oscila entre 0,6 y 1,8% de materia seca.

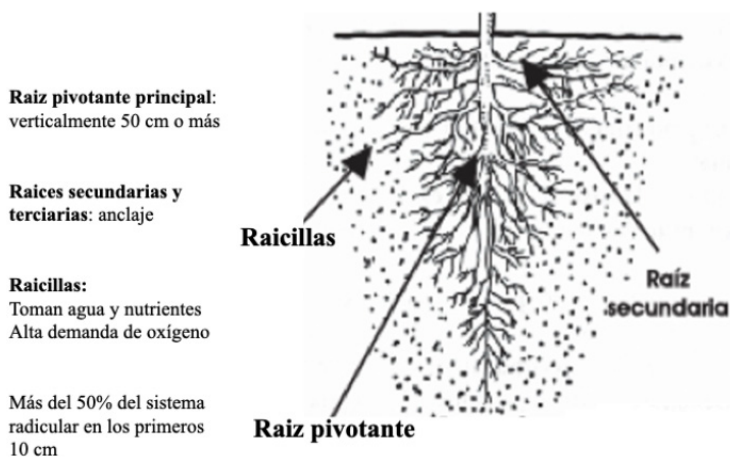


Figura 3.1. Sistema radical del café arábigo.
Nota. Adaptado de Enríquez y Duicela (2014)

En cuanto a la relación suelo-agua-planta, el órgano más importante del cafeto constituye su profundo sistema de raíces, conformado por una raíz pivotante que penetra verticalmente en el suelo hasta una profundidad de 50 cm o más; de ésta, salen las raíces secundarias y terciarias que se extienden horizontalmente, ayudando al anclaje de la planta, y de las cuales emergen las raicillas, que son bastante superficiales y las encargadas de tomar el agua y los nutrientes. En los primeros 10 cm de profundidad se encuentra más del 50% del sistema radicular (Melkel e Ittana, 2014). Al respecto, Ronchi et al. (2015) enfatizan que, los principales aspectos que determinan el crecimiento de la raíz del café, corresponden a las propiedades físicas y químicas de los suelos, la disponibilidad hídrica, el grado de competencia con las plantas vecinas y la interacción con otros organismos que habitan el suelo.

El café arábigo es una especie que ha conservado los atributos fisiológicos de las plantas amantes de la sombra, pero puede tolerar mucho mejor la intemperie y la luz solar plena cuando dispone de un

sistema de raíces bien desarrollado, un fuerte vigor de la planta y la capacidad de retener las hojas por más tiempo en condiciones de estrés hídrico (Yitagesu y Shimels, 2020).

La temperatura diaria óptima para el café arábigo se sitúa entre 18°C y 24°C. Prefiere temperaturas frescas, aquellas superiores a 30°C provocan estrés en la planta y reducen la fotosíntesis. Las temperaturas medias inferiores a 15°C son sub-óptimas, limitando el crecimiento y la productividad; además, es susceptible a los daños por heladas (Winston et al., 2005).

La precipitación ideal para el café arábigo se sitúa entre 1.200 mm y 1.500 mm por año. Tanto la lluvia total como su patrón de distribución son importantes. Los cafetos reaccionan positivamente a un período de sequía que; sin embargo, no debería durar más de 3 meses. Las mejores plantaciones se obtienen con una distribución uniforme de la lluvia durante siete a nueve meses al año. Las lluvias irregulares provocan floración y madurez de frutos desiguales. Además, para promover una floración uniforme y un buen cuajado de los frutos, el café requiere un período de estrés seco seguido de lluvia o riego adecuados (Yitagesu y Shimels, 2020).

3.2. Requerimientos edáficos del café arábigo

3.2.1. El suelo como sustrato básico para el crecimiento de las plantas

El suelo es un cuerpo natural tridimensional que conforma la capa porosa de la superficie terrestre. Constituye la interface entre la litosfera y la atmósfera e interactúa estrechamente con la biosfera y la hidrosfera (Lal y Shukla, 2004), sistemas con los que mantiene un continuo intercambio de materia y energía (Ortiz, 2005).

El suelo es un sistema heterogéneo, polifásico, particulado, disperso y poroso, con una gran área interfacial por unidad de volumen (Hillel, 2004). Está compuesto de una fase sólida, que es una mezcla de partículas minerales de varios tamaños y de materia orgánica en diferentes estados de descomposición; además, una fase líquida (solución del suelo) y una gaseosa (aire del suelo) (Jordán, 2010). En volumen, la fase sólida ocupa aproximadamente el 50% del total, mientras que las fases gaseosa y líquida se reparten el resto del espacio disponible (Easton, y Bock, 2016; White, 2006), complementándose con la presencia de una extensa población microbiana y de pequeños invertebrados (Kirkham, 2014).

El crecimiento de las plantas continentales depende del suelo en cuanto a: anclaje adecuado, reserva suficiente de nutrientes y agua, espacio poroso apto para la extensión de las raíces y para el intercambio gaseoso entre el O₂ y el CO₂ (éste último resultante de la respiración), y un ambiente confortable, lo que significa estar libre de factores inhibidores del crecimiento, como una excesiva acidez o una concentración tóxica de sales solubles (Valarezo, 2012).

A continuación, se analizan los requerimientos edáficos del café arábigo en relación a los siguientes parámetros: profundidad efectiva, textura, estructura, densidad aparente, consistencia, drenaje, materia orgánica, reacción, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases, carbonatos, yeso, salinidad y sodicidad.

3.2.2. Profundidad efectiva

Una de las funciones más obvias del suelo es proveer soporte mecánico para las plantas. El volumen de suelo que pueden explorar las raíces en busca de agua y nutrientes; a la vez que, anclar la planta, depende de la profundidad efectiva, la misma que puede estar limitada por: presencia

de una tabla de agua cercana a la superficie, horizontes compactados e impermeables, capas de grava, roca y otros materiales (Valarezo, 2012).

Debido a que el café arábigo tiene un sistema radicular extendido, requiere que el suelo tenga una profundidad efectiva de 0,5 a 1 m, en la que puedan penetrar libremente la raíz pivotante y el resto del sistema radicular (Melkel e Ittana, 2014). Una profundidad efectiva del suelo menor a 50 cm limita la productividad de esta planta (Kravchenko y Bullock, 2000).

3.2.3. Textura

La porción mineral es la predominante en el suelo y está formada por partículas de diversas formas, tamaños y composición mineralógica, las mismas que se las separa en dos grandes grupos: la fracción denominada tierra fina (pasa por un tamiz de 2,0 mm de malla) y la fracción gruesa (Schaetzl y Anderson, 2009). Las partículas < 2,0 mm corresponden a: arcilla < 0,002 mm, limo 0,002-0,05 mm; y, arena 0,05-2,00 mm (Hodges, 2020); mientras que, los elementos gruesos son fragmentos de roca de tamaño superior a 2,0 mm y se dividen en gravilla (0,2-0,6 cm), grava (0,6-6,0 cm), cantos (6,0-25 cm) y bloques (25-60 cm y mayores) (Porta et al., 2014). Este tipo de fragmentos no se consideran para establecer la textura, aunque pueden influir tanto en la estructura del suelo como en sus relaciones hidro-sistémicas (Easton y Bock, 2016).

La textura es una propiedad física fundamental, que hace referencia a la composición granulométrica de la fracción inorgánica de la tierra fina del suelo (Baxter y Williamson, 2001). La clase textural a la que pertenece un suelo se determina con la ayuda del triángulo de textura, en el cual se ubican los porcentajes de arena, limo y arcilla (Valarezo, 2012).

Los suelos de textura arcillosa tienen un gran número de microporos, mientras que los macroporos predominan en los suelos de textura arenosa (Rucks et al., 2004). En razón de ello, la textura influye decisivamente sobre otras propiedades físico-químicas del suelo, tales como: estructura, color, porosidad, consistencia, intercambio de fluidos (aireación e infiltración), grado de hidromorfía, retención de agua y nutrientes, penetración de las raíces y fertilidad (White, 2006).

Los suelos de textura media (franco, franco arcillo limoso, franco limoso, franco arcilloso y franco arenoso) se consideran los más adecuados para el café arábigo (Quiroz et al., 2022). Los suelos franco arcillo arenoso, franco arenoso y arenoso son los menos aptos (Sys et al., 1993). Los suelos arenosos y arcillosos no son aptos (Melkel e Ittana, 2014).

3.2.4. Estructura

La estructura se refiere a los agregados relativamente estables del suelo, que resultan del arreglo espacial de las partículas de arena, limo y arcilla, más la materia orgánica humificada (Daniels y Haering, 2015). Un agregado es una unidad tridimensional de estructura que resulta de la unión de partículas individuales por procesos naturales (Porta et al., 2014), tales como: reordenamiento, floculación y cementación, mediados por el carbono orgánico, la biota, los puentes iónicos y los carbonatos (Anderson, 2023).

La estructura del suelo afecta la retención y transmisión de fluidos, incluyendo la infiltración y la aireación (Weil y Brady, 2017); también, se ve influenciada por los cambios en el clima, la actividad biológica y las prácticas de manejo del suelo, y es vulnerable a fuerzas destructivas de naturaleza mecánica y fisicoquímica (Hillel, 2004). A menudo se expresa como el grado de estabilidad de los agregados, lo cual depende de la textura, el tipo de arcilla, la clase de iones asociados a las arcillas,

la materia orgánica y la actividad microbiológica del suelo (Valarezo et al., 1998).

Enríquez y Duicela (2014) indican que las estructuras granular y migajosa son las más adecuadas para el cultivo del café arábigo.

3.2.5. Porosidad, densidad real, densidad aparente y condición física

La porosidad se refiere al porcentaje del volumen del suelo ocupado por el espacio poroso, por el cual el agua penetra, circula y se almacena en el suelo (Nimmo, 2013). La porosidad debe ser considerada un indicador de la calidad (fertilidad física) del suelo, por su capacidad para almacenar agua y permitir el intercambio fisicoquímico y biológico entre las diferentes fases (Karlen et al., 1997).

Los suelos de textura gruesa (arenosos) tienden a ser menos porosos que aquellos de textura fina (arcillosos); ya que, si bien el tamaño promedio de los poros individuales suele ser mayor en los primeros, los poros son más pequeños y más numerosos en los arcillosos (Pogosyan et al., 2005). Consecuentemente, los suelos arenosos presentan una porosidad que oscila de 35 a 50%; mientras que, los suelos de textura media a fina tienen de 40 a 60% de poros, incluso más, en casos de alto contenido de materia orgánica y granulación marcada (Brady, 1984).

En el suelo se distinguen tres tipos de porosidad: macro, meso y microporosidad. La primera corresponde al porcentaje del volumen de poros ocupado por la fase gaseosa (aire del suelo) cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, involucra los poros grandes (diámetro equivalente $> 30 \mu\text{m}$), los cuales están asociados a los procesos de infiltración, aireación y drenaje del agua; además, éstos son fuertemente influenciados por las actividades antropogénicas; y, por lo tanto, se ven

alterados por el uso y el manejo del suelo. Los mesoporos o poros de almacenamiento (0,2-30 μm), son importantes para el crecimiento de las plantas, por cuanto retienen el agua aprovechable. Los microporos o poros residuales ($< 0,2 \mu\text{m}$) son los menos afectados por el manejo del suelo y son biológicamente inactivos; también, son inaccesibles para los microorganismos y pueden ser estratégicamente útiles para el secuestro de carbono en el suelo (Lal y Shukla, 2004). Baxter y Williamson (2001) señalan que el suelo ideal es el que tiene el espacio poroso dividido por igual entre poros grandes, medianos y pequeños; se dice entonces que, tiene las mejores condiciones para una buena aireación, permeabilidad, y retención de agua.

La distribución del tamaño de los poros se estima a partir de los volúmenes de agua que se extraen a diferentes rangos de succión en muestras de suelo inalteradas y saturadas, con cuyos valores se grafica la curva de retención de agua del suelo o curva del pF (Valarezo et al., 1998).

La porosidad está relacionada con dos parámetros característicos: la densidad real y la densidad aparente (Schaetzl y Anderson, 2009). La densidad real del suelo (D_r) llamada también peso específico real o densidad de los sólidos, es la relación entre la masa de suelo seco y su volumen (Porta et al., 2014). La densidad real de la mayoría de los suelos es prácticamente constante ($2,65 \text{ g cm}^{-3}$), debido a que el cuarzo tiene una densidad real de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, siendo el mismo, uno de los minerales dominantes en los suelos (Ming et al., 2012). Sin embargo, los valores promedio de la densidad real de la arcilla y la materia orgánica son $2,83$ y $0,8 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente, por lo que los suelos con cantidades significativas de estos componentes se desviarán del valor de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ (Easton y Bock, 2016). La densidad de las partículas no proporciona información acerca de los procesos físicos del suelo; sin embargo, es un valor muy útil, ya que participa en el cálculo de propiedades del suelo, como la porosidad y la distribución del tamaño de las partículas (Flores y Alcalá, 2015).

La densidad aparente (D_a), es la relación entre la masa de suelo seco y el volumen total. Los valores de la D_a oscilan entre 1,0 (suelos bien estructurados) y $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ (suelos compactados) (Jordán, 2010). La densidad aparente está influenciada por la textura, la cantidad de materia orgánica, los constituyentes minerales, la porosidad y las prácticas de manejo del suelo (Daniels y Haering, 2010). De igual forma, la densidad aparente aumenta con la profundidad del suelo, debido a los cambios en el contenido de materia orgánica, la porosidad y la compactación (Chowdary et al., 2013).

La distribución de los volúmenes de las tres fases del suelo (sólida, líquida y gaseosa) a capacidad de campo ($pF = 2,0$ ó $pF = 2,52$), sirve para evaluar el estado físico del suelo para el crecimiento de las plantas. Para ello, se requiere disponer de los volúmenes porcentuales de: 1.- capacidad de aireación (macroporos), 2.- agua aprovechable (mesoporos) y 3.- volumen físicamente inerte del suelo (volumen de microporos más el volumen de sólidos). Estos valores se los ubica en un diagrama triangular, en el que se han delimitado cinco zonas de las condiciones físicas del suelo: I (muy pobre), II (pobre), III (medio), IV (bueno) y V (muy bueno) (ILACO, 1981).

Debido a que las raíces del café arábigo tienen un alto requerimiento de oxígeno, los suelos deben tener al menos 15% de macroporos, debiéndose evitar los suelos masivos y compactos (Hillel, 2004).

3.2.6. Consistencia del suelo

La consistencia se refiere al grado de cohesión o adhesión de la masa del suelo. Incluye las propiedades como: friabilidad, plasticidad, adhesividad, trabajabilidad y resistencia a la compresión (Weil y Brady, 2017). Depende en gran medida de la cantidad y tipo de arcilla, materia orgánica y el contenido de humedad del suelo. La penetración de las

raíces no sólo están limitada por la densidad aparente, sino también por la textura y la consistencia del suelo (FAO, 2009).

Los suelos para el café arábigo deben ser de consistencia friable. No se debe hacer cafcultura en suelos compactados, sino después de un proceso de laboreo (Enríquez y Duicela, 2014).

3.2.7. Drenaje interno y conductividad hidráulica saturada

El drenaje interno está determinado por la capacidad de los diferentes horizontes del suelo de transmitir el agua y permitir la entrada del aire en los macroporos (condiciones aeróbicas) (Valarezo, 2012).

El color del suelo refleja además de su composición, las condiciones pasadas y presentes de óxido–reducción en el interior. El color de los horizontes y capas del suelo, particularmente del horizonte B, expresa el estado del drenaje interno (FAO, 2009). Cuando el suelo tiene buen drenaje (buena aireación: condiciones de oxidación), el color de las diferentes capas u horizontes es uniforme (sin manchas herrumbrosas, grises, o negras) (Ritzema, 2009). Los moteados son manchas de diferentes colores intercalados con el color dominante del horizonte del suelo; cuando están presentes, indican que el suelo ha estado sujeto a condiciones de alternancia entre saturado (reducción) y secado (oxidación). Los suelos con colores oliva o moteados grises evidencian que el drenaje es pobre; en tanto que, aquellos de colores grises indican que el drenaje es muy pobre y que prevalecen las condiciones de reducción (Valarezo, 2012).

La conductividad hidráulica saturada (K_s) del suelo, se refiere a su capacidad para conducir agua cuando todos los poros están llenos de agua (permeabilidad). Es el volumen de agua que fluye a través de una sección transversal del suelo por unidad de tiempo (Porta et al., 2014).

Debido a que las raíces del café arábigo tienen un alto requerimiento de oxígeno, los suelos con drenaje insuficiente son inconvenientes. Consecuentemente, los terrenos aptos para su cultivo deben estar exentos de riesgos de inundación o de encharcamiento (agua de lluvia o de riego); además, el suelo debe ser internamente bien drenado (buena permeabilidad) (Melkel e Ittana, 2014); esto es, con una capa superior oscura, las capas interiores (entre 40 a 80 cm) de color uniforme, sin moteados (manchas herrumbrosas y azuladas) y una tabla de agua a más de 100 cm de profundidad (Sys, et al., 1993), previniendo así daños fisiológicos a las raíces o las pudriciones radiculares por acción de los patógenos del suelo (Melkel e Ittana, 2014).

3.2.8. Materia orgánica y relación carbono/nitrógeno

La materia orgánica del suelo (MOS) es el conjunto de compuestos heterogéneos con base de carbono, formados por la acumulación de materiales de origen animal y vegetal, en continuo estado de descomposición (Valarezo, 2012). Puede variar dependiendo del clima, el relieve, el tipo de suelo, y factores antrópicos. Cumple una función clave en la fertilidad, los procesos ecológicos, la productividad de las plantas y la sobrevivencia humana (Sánchez, 2016). Las funciones principales del suelo, como la producción primaria, la purificación y regulación del agua, el secuestro y regulación del carbono, la biodiversidad y el ciclo de los nutrientes, dependen en gran medida de la MOS (Grande y Michel, 2020).

La transformación de la MOS fresca se realiza mediante dos procesos diferentes, la mineralización y la humificación. La mineralización es la descomposición rápida de los compuestos orgánicos a formas inorgánicas simples, liberando nutrientes al suelo; mientras que, la humificación es la transformación lenta de la materia orgánica en sustancias más

estables (humus), que resulta de los compuestos orgánicos que no se mineralizan inmediatamente (Valarezo, 2012).

Genéricamente, se distinguen tres formas principales de MOS: 1.- los restos vegetales y animales en fase de descomposición microbiana (1-10%) que se encuentran en forma libre en el suelo o débilmente asociadas a la fracción mineral; 2.- las sustancias no húmicas (10-40%), que son compuestos orgánicos clasificables en categorías bioquímicas, y 3.- las sustancias húmicas (40-60%), que constituyen el principal reservorio de C en los suelos. El humus es muy estable y su mineralización es muy lenta, a un ritmo de 1 a 2% anual (Sales, 2006).

A pesar de que la MOS en general constituye solo el 2-6% del peso de la fase sólida, tiene gran influencia en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo: 1.- propiedades físicas (aumento de la estabilidad de los agregados; y, por lo tanto, la infiltración, la capacidad de retención de agua y nutrientes, y la distribución de aire y agua se ven mejoradas); 2.- propiedades químicas (es la única fuente de N y la principal fuente de S y P); y, 3.- propiedades biológicas (es la principal fuente de energía para los organismos del suelo responsables de la actividad bioquímica) (Weil y Brady, 2017).

La calidad de la materia orgánica está determinada por la relación C/N (C orgánico y N total), mientras menor sea el valor de esta relación, mejor será la calidad de la materia orgánica (Torres et al., 2017). Se considera como un indicador de la mineralización de la MOS y se correlaciona fuertemente con las propiedades edáficas (López, 2002).

Si la relación C/N es demasiado alta, los microbios consumen el nitrógeno disponible para descomponer el exceso de carbono, lo que genera un déficit de nitrógeno para las plantas; por el contrario, si la relación es demasiado baja, el nitrógeno puede liberarse demasiado rápido, lo que provoca lixiviación y posibles problemas ambientales

(Soto et al., 2016). Una relación C/N equilibrada es esencial para el ciclo de nutrientes, la diversidad microbiana y la gestión sostenible del suelo (Swanson, 2025).

Los suelos más adecuados para el café arábigo, deben ser ricos en materia orgánica, con abundante cantidad de hojarasca en la superficie (Melkel e Ittana, 2014). Además, el espesor de la capa de humus A0 y del horizonte A1 debe ser mayor a 10 cm (Enríquez y Duicela, 2014).

Sys et al., (1993) indican que el contenido de carbón orgánico en la capa superior determina la aptitud del suelo para este cultivo; así, en la clase I debe ser mayor a 2,5%; para la clase II se ubica entre 1,2 y 2,5%; para clase III entre 0,8 y 1,2%, y la clase IV es menor a 0,8%; también, la relación C/N debe estar entre 10 a 12. Irawan et al. (2022) recomiendan que el contenido de carbón orgánico debe ser mayor a 3,5%, y la relación C/N de 5 a 12.

3.2.9. Reacción del suelo

El término reacción del suelo se usa para denotar el grado de “acidez” o “alcalinidad”, lo que se corresponde con la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ en la solución del suelo (Sadeghian, 2016).

El agua se disocia naturalmente generando iones hidrógeno $[H^+]$ y iones oxidrilo $[OH^-]$. El producto de la concentración de estos iones es igual a la constante 10^{-14} , denominada constante de ionización del agua: $[H^+][OH^-] = 10^{-14}$. En cualquier medio ambiente, si la concentración del ion $[H^+]$ aumenta, concomitantemente la del ion $[OH^-]$ debe disminuir para mantener el producto igual a la constante 10^{-14} ; o inversamente. En el agua pura la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ y de iones oxidrilo $[OH^-]$ es igual, esto es 10^{-7} respectivamente, siendo su reacción neutra (Valarezo, 2012).

La reacción del suelo se mide y se representa como el valor de pH, el cual equivale al logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno (rango en el suelo 10^{-1} a 10^{-12} mol l⁻¹). A mayor concentración de iones hidrógeno, más bajo es su logaritmo negativo, lo que significa que el valor de pH es menor, y la reacción del suelo es más ácida (Molina y Alvarado, 2002).

Cuando el valor del pH es igual a 7, la reacción del suelo es neutra; para los valores de pH menores a 7, la reacción es ácida y para los valores mayores a 7, la reacción es alcalina (Uchida y Hue, 2000). El significado práctico de la expresión logarítmica del pH es que cada cambio en una unidad en el valor del pH representa un cambio de magnitud diez veces mayor en la acidez o la alcalinidad del suelo (variación exponencial). Así, un suelo de pH 4,0 será 10 veces más ácido que un suelo de pH 5 y cien veces más ácido que un suelo de pH 6 (Espinoza y Molina, 1999; Hue, 2008).

En la zona montañosa de la RSE, a medida que se asciende, la reacción del suelo se hace más ácida, debido a la mayor precipitación y la menor temperatura, factores que favorecen la acumulación de materia orgánica. En cambio, en las zonas más bajas y secas, la reacción del suelo es neutra o alcalina (Valarezo, 2012).

El pH es un indicador importante de la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Irawan et al., 2022). Fageria y Baligar (2008) anotan que el pH del suelo es un excelente indicador químico de su calidad. Havlin et al. (2014) señalan que los valores extremos de pH pueden ocasionar concentraciones tóxicas de ciertos componentes químicos: la acidez extrema causa toxicidad del Al y/o Mn; mientras que, los valores altos de pH pueden causar la producción de gas NH₃, el cual es especialmente tóxico para la germinación.

El rango de pH del suelo más adecuado para el café arábigo está entre 5,6 a 6,6 (Sys et al., 1993; Enríquez y Duicela, 2014; Melkel e Ittana, 2014; Irawan et al., 2022).

3.2.10. Capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiables, saturación de bases y proporción de cationes

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una medida de la cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas); y, representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Al^{3+}) (FAO, 2024; Weil y Brady, 2017). También, los cationes micronutrientes como: el Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} o Fe^{3+} , y Mn^{2+} , suelen estar presentes en concentraciones muy bajas en los suelos (Sonon et al., 2022). Normalmente, la CIC se expresa en cmol (+) kg^{-1} (centimol de carga positiva por kg de suelo seco, en reemplazo a la expresión anterior de $\text{meq}/100 \text{ g}$ de suelo seco⁵) (Cornell University Cooperative Extension [CUCE], 2007).

Existe un equilibrio casi constante entre la adsorción de cationes y aquellos que se mueven libremente en la solución del suelo, el mismo que es controlado por la valencia y las concentraciones iónicas; cuando éste se altera, ocurre el intercambio de iones entre la fase sólida y líquida del suelo, resultando ya sea en la adsorción o en la liberación de cationes (Valarezo, 2012).

La CIC es una de las propiedades más importantes de los suelos, por cuanto los cationes intercambiables influyen en las características físicas, químicas y biológicas (Ketterings et al., 2014). Así, la CIC

⁵ $1 \text{ meq}/100 \text{ g} = 1 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$

está vinculada a las reservas y el suministro de nutrientes del suelo, la movilidad de los elementos y la amortiguación del pH, factores importantes en el uso agrícola del suelo (Ross y Ketterings, 1995).

El complejo orgánico e inorgánico de intercambio del suelo puede considerarse como un reservorio que amortigua el abastecimiento iónico por parte de los minerales del suelo y de los fertilizantes aplicados; y, la extracción de iones debido al lavado y al consumo de las plantas (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [CENICAFE], 2016).

En la parte inorgánica del complejo de intercambio, sólo las partículas de arcilla juegan un rol importante, debido a que la superficie interna activa total del limo y la arena es muy pequeña en comparación con aquella de las arcillas (Mora et al., 2021). El tipo y la cantidad de arcilla dominante en el suelo determina la CIC, siendo mayor en las arcillas del tipo 2:1 que en aquellas del tipo 1:1, con la siguiente secuencia: montmorillonita (80-120) > illita (20-50) > caolinita [3-15 cmol (+) kg⁻¹] (Vázquez y Rodríguez, 2017).

La parte orgánica del complejo de intercambio (humus) tiene mayor valor de CIC que la arcilla, con un rango de 200-400 cmol (+) kg⁻¹. En el horizonte superficial con un aceptable contenido de materia orgánica, especialmente en suelos de textura liviana, la mayor parte de la CIC se debe al humus (Sonon et al., 2022).

Las concentraciones de los cationes intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺) se expresan en cmol (+) kg⁻¹ de suelo. La cantidad total de esos cuatro cationes (valor S) puede relacionarse con el valor de la CIC y expresarse como porcentaje de saturación de bases (PSB), la cual está estrechamente relacionada con el pH; así, en un suelo ácido, el

complejo de adsorción coloidal está lleno de cationes ácidos (Al^{3+} y H^+); en cambio, en un suelo alcalino, predominan cationes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) (Irawan et al., 2022).

Los valores de CIC, PSB y aquellos de Ca, Mg y K cambiables, dan concretas indicaciones respecto del estado de fertilidad potencial de los suelos (Mora et al., 2021). El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) constituye un importante criterio para identificar condiciones de sodicidad (alcalinidad) (Valarezo, 2012).

En el suelo de clase I para el café arábigo, la CIC de la arcilla debe ser mayor a $24 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; para el suelo de clase II se ubica entre $16\text{-}24 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; para los suelos de clase III y IV es menor a $16 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$. La saturación de bases para el suelo de Clase I debe ser mayor a 80%; para el suelo de Clase II se ubica entre 50 y 80%; en el suelo de Clase III entre 35 y 50%; mientras que, los suelos con menos de 20% no son aptos para este cultivo. La suma de cationes para un suelo de Clase I debe ser mayor a $6,5 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; para el suelo de Clase II se ubica entre 4 y $6,5 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; en el suelo de Clase III entre 2,8 y $4 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; en tanto que, los suelos con menos de $1,6 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ no son aptos (Sys et al., 1993). Irawan et al. (2022) indican que para este cultivo la CIC debe ser mayor a $15 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ y la saturación de bases superior al 35%.

Las siguientes relaciones se evalúan a partir de los contenidos de cationes intercambiables: Mg/K ; $(\text{Ca} + \text{Mg})/\text{K}$; y Ca/Mg . La tabla 3.1 permite establecer los rangos óptimos, los niveles críticos y las recomendaciones en cada caso para un adecuado balance de cationes en el suelo.

Tabla 3.1. Relaciones entre cationes: rangos óptimos, niveles críticos y recomendaciones.

Relaciones entre Cationes	Rangos óptimos (meq/100 ml)	Nivel crítico (meq/100 ml)	Recomendaciones
Ca/Mg	2,6-8,0	Si <2,6	Agregar calcio
		Si >8,0	Agregar magnesio
Mg/K	7,5-15,0	Si < 7,5	Agregar magnesio
		Si > 15	Agregar potasio
(Ca + Mg)/K	27,5-55,0	Si < 27,5	Agregar calcio y magnesio
		Si > 55,0	Agregar potasio
Suma de Bases (Ca+Mg+K)	15-30	Si < 15	Suelo normal
		Si > 30	Suelo rico en Ca, K y Mg

Nota. Adaptado de Laboratorio de Suelos de la Estación Pichilingue del INIAP (Enríquez y Duicela, 2014).

3.2.11. Acidez actual, intercambiable y total

La acidificación del suelo es el resultado de un conjunto complejo de procesos naturales y antropogénicos que reducen el pH de la solución del suelo (Krug y Frink, 1983). Entre los primeros, se tiene: lixiviación de nutrientes esenciales, como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), y potasio (K^+), producto del exceso de lluvias; meteorización de materiales parentales ácidos, como el granito y la arenisca, y mineralización de la materia orgánica (Goulding, 2016). Las actividades antropogénicas que agravan la acidez del suelo son: prácticas agrícolas (laboreo intensivo y erosión del suelo), aplicación de fertilizantes acidificantes como azufre elemental (S), urea o sales de amonio (NH_3), y el crecimiento de leguminosas como el trébol (Jhonson y Zhang, 2013).

Los principales efectos de la acidez de los suelos son: las concentraciones de aluminio (Al^{3+}) y manganeso (Mn^{2+}), pueden alcanzar niveles que resultan tóxicos para las plantas; además, se reduce la disponibilidad de los nutrientes, principalmente calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P), potasio (K), nitrógeno (N) y molibdeno (Mo); también, se alteran las poblaciones y las actividades de los microorganismos que intervienen en la mineralización de la materia orgánica y la transformación de nitrógeno (N) y azufre (S) (Havlin et al., 2014). La disponibilidad de fósforo (P) se reduce debido a que forma compuestos insolubles con las formas de hierro y aluminio solubles (Nduwumuremyi, 2013).

Sumner y Noble (2003) indican que la acidez del suelo es uno de los factores que más limitan el rendimiento de los cultivos. Se estima que la superficie terrestre afectada por la acidez es de 4 mil millones de hectáreas, lo que representa aproximadamente el 30% de la superficie total libre de hielo del mundo.

Se reconocen tres tipos de acidez en el suelo: acidez actual, acidez intercambiable y acidez total (Valarezo, 2012).

La acidez actual corresponde a los iones H^+ que se encuentran libres en la solución del suelo, y es la que se determina al medir el pH del suelo.

La acidez intercambiable comprende los iones H^+ y Al^{3+} que se encuentran neutralizando la carga eléctrica negativa de los coloides del suelo. Se la extrae del suelo mediante una solución KCl 1 N, los iones H^+ y Al^{3+} se determinan por titulación.

La acidez total o acidez extractable incluye a la acidez actual e intercambiable; así como, a todos los iones H^+ que se generan por deprotonización de los grupos ácidos, tanto orgánicos como inorgánicos (incluido el aluminio), con una solución de cloruro de bario y trietanolamina amortiguada a pH 8,2.



En el caso del cultivo de café arábigo, en suelos con pH menor a 5,5 la presencia de $\text{Al}^{3+}6\text{H}_2\text{O}$ puede causar toxicidad a los cafetos, por lo que es necesario neutralizar tanto de la acidez actual, como la intercambiable (Irawan et al., 2022). La alternativa más eficaz para corregir la acidez, radica en el empleo de materiales encalantes, los principales son: carbonatos (caliza y cal dolomítica), óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio (Bernier y Afaro, 2006) también ceniza (Enríquez y Duicela, 2014). Los efectos del encalamiento son: elevación del pH, neutralización del Al^{3+} y Mn^{2+} , incremento del contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} , aumento de la disponibilidad de fósforo (P) y molibdeno (Mo), mayor mineralización de la MOS, incremento de la fijación simbiótica de nitrógeno (N), floculación de los coloides, estimulación del crecimiento radical y, por ende, se mejora el aprovechamiento del agua y de los nutrientes por las plantas (Prochnow, 2014). El cálculo de la cantidad de corrector se debe hacer en base a los valores de H^+ , Al^{3+} y MOS, reportados en el análisis del suelo (Valarezo, 2012).

3.2.12. Carbonatos y yeso

Los carbonatos en los suelos son, ya sea residuos del material parental o el resultado de la neo-formación (carbonatos secundarios). Estos últimos se concentran principalmente en forma de cal polvorienta suave o revestimientos en los agregados, También como concreciones, costras superficiales o en el subsuelo. La presencia de carbonato de calcio (CaCO_3) se establece mediante la adición al suelo de gotas de ácido clorhídrico al 10%. El grado de efervescencia del dióxido de carbono gaseoso es indicativo de la cantidad de carbonato de calcio presente en el suelo (ILACO, 1981).

El carbono (C) en el suelo está presente en formas orgánicas e inorgánicas (carbonatos) (León, 2023). Los carbonatos son característicos de áreas áridas, semiáridas y subhúmedas (Loeppert y Suarez, 1996). El carbonato de calcio (CaCO_3), la magnesita (MgCO_3) y la dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], son los carbonatos más comunes, los mismos que representan más del 90% de los carbonatos naturales (Jannatul y Varun, 2021).

Los carbonatos en los suelos tienen tres vías de formación: 1.- geogénica como los residuos del material parental, 2.- biogénica y 3.- edafogénica, como resultado de la neoformación (carbonatos secundarios) (Lal et al., 1999). El contenido y distribución de carbonatos en el suelo son factores que influyen en sus propiedades físicas, químicas y biológicas y tienen efectos significativos en el pH, los procesos de sorción-desorción, precipitación-disolución y cementación de los suelos (FAO, 2021). Sin embargo, un exceso de carbonatos puede ocasionar problemas en la nutrición de las plantas por antagonismo con otros elementos (Andrades, 2012).

El yeso agrícola, cuyo componente principal es sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Valarezo, 2012), es una fuente que proporciona Ca (17-27%) y S (14-18%) (Saadaoui et al., 2017). Adicionalmente, como fuente de iones calcio (Ca^{2+}) es la enmienda más comúnmente empleada para mejorar las propiedades físico químicas de los suelos afectados por Na^+ , ya que el Ca^{2+} desplaza al Na^+ en el complejo de intercambio catiónico y promueve la floculación de los agregados (Wwil y Brady, 2017). Se lo usa también como un aditivo durante el compostaje (Prochnow et al., 2016).

Por otro lado, el exceso de yeso tiene varios efectos indeseables debido a su solubilidad. Una concentración de $> 10\%$, interfiere significativamente con la estructura, la consistencia y la capacidad de retención de agua; mientras que, los suelos con más de 25%, no proporcionan un buen medio para el crecimiento de las plantas (Omran, 2016).

El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se puede encontrar en forma de residuos de material parental yesífero o nuevos elementos formados en el suelo. Este último corresponde a la forma de pseudo-micelio, cristales de gruesos (individualizados, como revestimientos o como agrupaciones de cristales fibrosos elongados) o acumulaciones polvorientas de sueltas a compactas. Esta última forma da al horizonte yesífero su estructura masiva y textura arenosa (Valarezo, 2012).

El contenido de carbonato de calcio y de yeso en los suelos para el café arábigo no debe sobrepasar el valor de 3 % (Sys et al., 1993).

3.2.13. Salinidad y sodicidad

La salinización (acumulación de sales solubles y la sodificación o alcalinización (acumulación relativa de sodio) son un peligro constante en áreas bajo riego. El grado de salinización o sodificación del suelo depende del tipo y la cantidad de sales (Choudhary y kharche, 2018). Las principales sales solubles están constituidas por: los cationes sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+), y los aniones: cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) y nitrato (NO_3^-) (Zaman et al., 2018; FAO, 2021).

A nivel mundial se estima que más de 1.100 millones de hectáreas de suelos están con problemas de salinidad y sodicidad (FAO, 2008). Munns (2002) considera que entre el 20 y el 50 % de los suelos irrigados están afectados por salinidad. De igual manera, Jamil et al. (2011) estiman que para el año 2050, el 50 % de las áreas de cultivo a nivel mundial se verán afectadas por la salinización en diversos grados.

Los criterios de diagnóstico para caracterizar los peligros de salinidad y sodicidad del suelo son: la conductividad eléctrica del extracto de la pasta saturada del suelo (CE_{ex}), cuyas unidades son: Siemens por metro (S m^{-1}) o sus subunidades, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y el pH. Un suelo es sódico o alcalino cuando el PSI es mayor a 15 (Zaman et al., 2018).

No hay reducción de rendimiento del café arábigo cuando la C_{Ex} es menor a 0.5 dS m⁻¹; en cambio, cuando la C_{Ex} mayor a 2 dS m⁻¹, el suelo no es apto para este cultivo (Sys, et al., 1993).

3.3. Evaluación de la aptitud del suelo para el café arábigo

La evaluación de la tierra es un procedimiento esencial para establecer las oportunidades, potencialidades y limitaciones que presenta un determinado terreno para un uso específico. Se han desarrollado varios enfoques de evaluación de la tierra con metodologías específicas para estudiar la idoneidad del uso de la misma (De la Rosa, 2008).

Según Sys et al. (1993) la evaluación de la aptitud del suelo para el cultivo del café arábigo se debe realizar a partir de los siguientes parámetros: pendiente y forma del terreno, profundidad efectiva, textura, drenaje, materia orgánica, reacción, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases, sales solubles, carbonatos, y yeso. Las clases de aptitud consideran los grados de limitación y la escala de ponderación de las características arriba anotadas (Tabla 3.2.).

En cuanto al grado de la pendiente del terreno, Irawan et al. (2022) indican que el café arábigo se puede desarrollar óptimamente en terrenos de pendiente inferior al 30%. Por su parte, Quiroz et al. (2022) establecen las siguientes clases de aptitud del terreno: muy adecuado < 30% de pendiente; marginalmente adecuado 30-40%; no apto > 40%. Los terrenos de pendiente más pronunciada conllevan un riesgo importante de erosión y requieren un manejo especial (surcos en contorno, franjas de césped o terrazas). Una pendiente ligera mejorará el drenaje y reducirá los daños causados por las heladas (Winston et al., 2005). Las variaciones de la topografía del terreno afectan la distribución de la humedad del suelo, el contenido de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la composición textural, factores que influyen en el desarrollo de los cafetos y su productividad (Kravchenko y Bullock, 2000).

Tabla 3.2. Clases aptitud del suelo para el café arábigo, características, clases de aptitud, grado de limitación y escala de ponderación (Sys et al., 1993).

Características de la Tierra	Clase, grado de limitación y escala de ponderación					
	S1	S2	S3	N1	N2	
	0	1	2	3	4	
	100	95	85	60	40	25
Topografía (t)						
Pendiente (%) (1)	0-1	1-2	2-4	4-6	-	> 6
(2)	0-2	2-4	4-8	8-16	-	> 16
(3)	0-4	4-8	8-16	16-30	30-50	> 50
Humedad (w)						
	Io	Io	Io	Io	-	I1+
Inundación Drenaje	Bueno Tabla de A >150cm	Bueno Tabla de A 100 – 150cm	Moderado	Imperf.	Pobre, pero drenable	pobre, no drenable
Características físicas del suelo (s)						
Textura/estructura	Ac<60s FoAcLo, FoAc	Ac>60s, FoAc Fo	FoAcAo	FoAo FoAog	-	Acm, AcLom Ac>60v, AoFo, FoAog, Aof, Aog
Fragmentos gruesos (vol%)	0-3	3-15	15-35	35-55	-	
Profundidad (cm)	>200	200-150	150-100	100-50		> 55
CaCO ₃ (%)	0	0-1	1-2	2-5		<50
Yeso (%)	0	0-0,5	0,5-2	2-3		>5
Características de Fertilidad (f)						
CIC (cmol(+)/kg ⁻¹ arcilla)	> 24	24-16	< 16(-)	< 16(+)	-	-
Saturación Bases (%)	> 80	80-50	50-35	35-20	<20	-
Suma de cationes (cmol(+)/kg suelo)		6.5-4	4-2.8	2.8-1.6	< 1.6	-
	> 6.5	5.8-5.6	5.6-5.4	5.4-5.2	< 5.2	-
		6.2-6.6	6.6-7.4	7.4-7.8	-	> 7.8
pH _{H2O}	6.0-5.8					
	6.0-6.2	2.4-1.2	1.2-0.8	< 0.8	-	-
Carbón Orgánico (%)	> 2.4				-	-
Salinidad y Alcalinidad (n)						
CEe (dS/m)	0-0.5	-	-	0.5-2	2-6	> 6

Nota. Inundación: Io sin riesgo de inundación; I1+ inundable. Pendiente: (1) agricultura irrigada, riego por surcos; (2) Elevado nivel de manejo, completamente mecanizado; (3): Bajo nivel de manejo, tracción animal o manual. CIC aparente = CIC mineral x 100%/arcilla del horizonte B a 50 cm de profundidad. Textura: Acm arcilloso masivo; Ac<60s arcilloso <60, estructura en bloques; Ac>60 arcilloso >60, estructura en bloques; Ac>60v arcilloso <60, estructura vertisol; AcLom, arcillo limoso masivo; Ao: arenoso fino; Aog, arenoso grueso.

En relación a la textura del suelo, Irawan et al. (2022) establecen las siguientes clases de aptitud para el café arábigo: no apto, textura ligera (arenoso) y textura pesada (arcilloso); muy apto: textura media (franco).

Ochoa et al. (2016), caracterizaron las condiciones medioambientales y definieron cuatro categorías de zonificación para el café arábigo, aplicando una metodología participativa en 70 pequeñas fincas cafetaleras (< 1 ha), distribuidas en una superficie de 613,2 km², en tres microcuencas del cantón Loja, provincia de Loja, Ecuador, cuya distribución de áreas de aptitud es la siguiente: aptas 6.010 ha (9,5%); moderadamente aptas 29.563 ha (46,9%); marginales 12.737 ha (20,2%); y, no aptas 2.328 ha (3,7%). El 49% de las fincas se sitúan en terrenos de relieve colinado, con suelos francos. Se concluye que las principales limitaciones para aumentar la producción de café son la escasa profundidad y baja fertilidad del suelo.

3.4. Requerimientos nutricionales del café arábigo

3.4.1 Aspectos generales

Valarezo (2012) indica que la fertilidad química se define como la cualidad que le permite al suelo proveer los nutrientes esenciales, en las cantidades adecuadas y bajo un correcto balance para el crecimiento de un cultivo específico, cuando los demás factores son favorables. Manifiesta que se distingue dos tipos de fertilidad química del suelo: potencial y actual, cuyos fundamentos se abordan a continuación.

La fertilidad potencial se refiere a la capacidad del suelo para suplir elementos nutritivos desde sus reservas inorgánicas y orgánicas, a través de los procesos de meteorización de las rocas y/o mineralización microbiana de la materia orgánica (Tan, 2011).

La fertilidad actual alude a los elementos nutritivos cuyas formas químicas son más o menos aprovechables para las plantas en forma directa, siendo común referirse entonces a “nutrientes aprovechables o nutrientes disponibles”. La tasa a la cual los elementos nutritivos se convierten en aprovechables para los cultivos, es gobernada por el equilibrio de asimilación–reposición, en el que intervienen los sólidos y la humedad del suelo, por un lado; y la solución del suelo y las raíces de las plantas por otro (Cerisola, 2015).

Las plantas difieren ampliamente en su habilidad para movilizar y utilizar los nutrientes en el suelo por medio de los procesos de absorción activa y pasiva, presentando diferente grado de adaptación a las diversas condiciones del suelo (Parnes, 2013).

Se considera que por lo menos 16 elementos son esenciales para el crecimiento de las plantas. El carbón, oxígeno e hidrógeno que se obtienen del aire y del agua, se combinan en las reacciones fotosintéticas para formar primeramente carbohidratos, y constituyen más del 90% de la materia seca. Los 13 nutrientes restantes las plantas los obtienen del suelo; y por ende, también son indispensables para el desarrollo de los cafetos (Tabla 3.3.) (Rodríguez y Flórez, 2004). Los elementos: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre son requeridos en cantidades relativamente grandes por lo que se los llama macro elementos o elementos mayores. Los elementos: manganeso, hierro, boro, zinc, cobre, molibdeno y cloro, son requeridos en cantidades considerablemente pequeñas por lo que son llamados “micronutrientes” o “elementos traza”. Más de 40 elementos adicionales se han encontrado en las plantas. Algunas plantas acumulan elementos que no son esenciales pero que tienen un efecto benéfico. (Golden, 1995).

Tabla 3.3. Símbolo químico y formas iónicas asimilables de los elementos esenciales absorbidos del suelo por las raíces de las plantas.

Nutrientes	Símbolo químico	Formas iónicas absorbidas por las plantas
Macronutrientes		
Nitrógeno	N	NO_3^- NH_4^+
Fósforo	P	H_2PO_4^- $\text{HPO}_4^{=}$
Potasio	K	K^+
Calcio	Ca	Ca^{2+}
Magnesio	Mg	Mg^{2+}
Azufre	S	$\text{SO}_4^{=}$
Micronutrientes		
Manganeso	Mn	Mn^{2+}
Hierro	Fe	Fe^{3+}
Zinc	Zn	Zn^{2+}
Cobre	Cu	Cu^{2+}
Boro	B	H_2BO_3^-
Molibdeno	Mo	$\text{MoO}_4^{=}$
Cloro	Cl	Cl^-

Nota. Adaptado de: El suelo como recurso básico para el crecimiento de las plantas (Valarezo, 2012).

La proporción de los nutrientes es también un factor importante; puesto que, el exceso de un elemento en la forma aprovechable puede causar la deficiencia de otro. Así, las deficiencias de potasio se pueden presentar a causa de niveles altos de calcio y magnesio solubles, que interfieren con la absorción de este elemento. Es muy interesante también el hecho de que las plantas no reaccionan de la misma manera en ciertas condiciones dadas; pues, se pueden presentar deficiencias de potasio en un tipo de cultivo, mientras que en otro no aparecen estos efectos negativos.

Es muy raro encontrar un suelo que sea capaz de suplir, durante un largo período de tiempo, todos los elementos esenciales para las plantas, en las cantidades necesarias para obtener altos rendimientos de los cultivos.

Enríquez y Duicela (2014) indican que, el café arábigo demanda de suelos fértiles con un adecuado balance de nutrientes. La determinación de las deficiencias o los excesos de nutrientes en los cafetos debe ser una actividad permanente, de manera de corregirlas oportunamente.

A continuación, se describen las particularidades del comportamiento químico de los macro y micronutrientes y los requerimientos de éstos por el café arábigo.

3.4.2 Macronutrientes

3.4.2.1. Nitrógeno (N).

El nitrógeno (N) es el único elemento nutritivo que no forma parte de los minerales del suelo. La fuente de N en el planeta tierra es la atmósfera, de la cual constituye casi el 80% (Orchardson, 2020). Las plantas lo toman como ion nitrato (NO_3^-) o ion amonio (NH_4^+). Como elemento esencial (irremplazable) gobierna el crecimiento, el rendimiento y la calidad de los cultivos. Interviene en la síntesis de compuestos macromoleculares como las proteínas y ácidos nucleicos, los cuales juegan un rol muy importante en la construcción de los órganos, el metabolismo y la producción de energía de los organismos (Cruz et al., 2019). La aplicación suficiente de N al suelo no solamente mejora la eficiencia fotosintética de las hojas, sino que también promueve la diferenciación de las yemas y eleva los rendimientos (Raese et al., 2007).

Únicamente algunos microorganismos pueden aprovechar directamente el N atmosférico, el resto de este elemento necesario para los seres vivos debe ser obtenido de la atmósfera mediante algún proceso artificial.

El N se encuentra en el suelo en tres formas: orgánica, amoniacal y nítrica. La evolución de unas formas a otras se realiza por acción de los microorganismos, por lo que el ciclo del N es dominado principalmente

por procesos microbianos. La mayor parte del N contenido en el suelo está en la forma orgánica, ya que constituye una parte de la materia orgánica; la cual, al mineralizarse, el N orgánico se transforma a N mineral, proceso en el que intervienen los microorganismos como los hongos micorrizógenos y las rhizo-bacterias que liberan enzimas hidrolíticas y promueven la disponibilidad del nutriente en el suelo (Valarezo, 2012).

Al ser el N un elemento clave para el crecimiento de las plantas, es uno de los principales factores que se puede manipular para incrementar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, la excesiva aplicación de éste elemento genera un impacto adverso en el medioambiente, debido tanto a la volatilización en forma de amoníaco y óxido nitroso, como a las pérdidas de nitratos solubles que contaminan las aguas (Cameron et al., 2013). Consecuentemente, el desafío consiste en incrementar la eficiencia del N en la perspectiva de alcanzar altos rendimientos, con menos costos y con menor impacto ambiental.

El contenido de N, la relación C/N, el contenido de lignina y de polifenoles de los residuos de los cultivos, son los principales factores que gobiernan la mineralización neta del elemento. Por ejemplo, los materiales orgánicos como la paja de los cereales que tienen una alta relación C/N (79:1), disminuyen la mineralización en los estados tempranos de la descomposición debido a la inmovilización (Srinivas et al., 2006).

El N es uno de los nutrientes que las plantas de café lo requieren en grandes cantidades, en comparación con los otros elementos esenciales. En los cafetos, el nitrógeno interviene en la formación de clorofila y la absorción de agua; además, favorece el desarrollo foliar y la actividad fotosintética (Instituto de la Potasa y Fósforo [INPOFOS], 1993). Los síntomas carenciales se manifiestan en caída de hojas, decoloración

(amarillamiento) y enrollamiento de las hojas, y muerte regresiva de las puntas (Michiel et al., 2004).

Cuando los niveles de disponibilidad del N en el suelo, según el análisis de laboratorio, se encuentran en los rangos bajo, medio y alto, los requerimientos de este elemento por el café arábigo son 120, 80 y 40 kg ha⁻¹, respectivamente (Enríquez y Duicela, 2014). La extracción de N por ciclo de crecimiento para una elevada producción es de 135 kg ha⁻¹ (Sys et al., 1993).

En una plantación de café arábigo, en un suelo Typic Hapludox del Cerrado, Brasil, la estrategia de gestión del N más respetuosa con el medio ambiente fue el aporte de entre 200 y 300 kg de N ha⁻¹ año⁻¹, fraccionado en siete aplicaciones, reduciendo así la contaminación por exceso de aplicación (Pinto et al., 2017).

En cambio, en la región cálida-seca del suroeste de China, el tratamiento de 140 g N planta⁻¹ con un moderado déficit de riego (80 % del requerimiento total), fue la mejor estrategia para ahorrar agua, alcanzando un rendimiento promedio de 5,6 t ha⁻¹ de cerezas secas de café arábigo de alta calidad (Liu et al., 2016).

Paulos (1986) ha resumido los resultados de varios ensayos de fertilización en diferentes zonas cafetaleras del sudoeste de Etiopía, en los que el mayor rendimiento de café arábigo se registró en respuesta a la dosis más alta de N (300 kg ha⁻¹), con una reducción significativa del rendimiento para dosis mayores. Por su parte, el Institute of Agricultural Research (IAR, 1982) indica que el rendimiento más notable se obtuvo con 150 kg ha⁻¹ de N.

Existe una estrecha relación entre el suministro de N con el número de hojas y de botones florales; si bien, los niveles de N pueden ser adecuados en los tejidos para la síntesis de almidón y otros carbohidratos necesarios para la formación de los frutos, en las plantas de cafeto

deficientes los síntomas se desarrollan particularmente cuando crecen las cerezas (De Souza y Avila Silva, 2021).

Yitagesu y Shimels (2020) indican que una producción de $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de cerezas frescas de café arábico, contiene 40 kg de N en el grano y 35 kg en la pulpa y el pergamino (peso seco).

3.4.2.2. Fósforo.

En el suelo el fósforo (P) se encuentra en tres formas: 1.- como mineral insoluble, que corresponde a fosfatos de hierro y aluminio precipitados en suelos ácidos, y fosfatos de calcio en suelos alcalinos; 2.- fósforo fijado en el complejo arcilloso-húmico que atrae iones de carga positiva, especialmente calcio que queda fijado en su superficie y 3.- fósforo soluble contenido en la solución del suelo, este último constituye una mínima parte del fósforo total de los suelos (Rose et al., 2013).

Las plantas absorben el P del suelo bajo las formas, preferentemente de anión monovalente (H_2PO_4^-) y anión bivalente (HPO_4^{2-}). La proporción de las formas de iones fosfato existentes en el suelo, depende fundamentalmente del pH del mismo, siendo el rango óptimo de 5,5, a 7,5. Al aumentar el pH disminuye la proporción de los iones monovalentes y en consecuencia disminuye también la facultad de las plantas para asimilar este elemento. El P interviene en los procesos de acumulación y liberación de energía durante el metabolismo celular. También actúa en múltiples reacciones químicas de vital importancia (respiración, síntesis de proteínas e hidratos de carbono). Este elemento, ya sea solo o en combinación con el N, juega un importante rol en la fotosíntesis y en la acumulación de materia seca (Valarezo, 2012).

Siendo el P uno de los nutrientes que más limitan el crecimiento de las plantas, en los sistemas convencionales de cultivo, se requiere la aplicación de fertilizantes fosforados para alcanzar rendimientos

óptimos. El manejo de los fertilizantes fosforados está gobernado principalmente por la exportación de este elemento en los productos cosechados. Adicionalmente, los fertilizantes fosforados son relativamente ineficientes, por cuanto, el P es altamente reactivo, ligándose rápidamente a los compuestos del suelo, convirtiéndose así, en no aprovechable para las plantas, por lo que solamente de 10 a 20% del P aplicado es asimilado por los cultivos durante el primer año (Rose et al., 2013). Esta baja eficiencia también está ligada a un impacto negativo asociado con la transferencia del P a los sistemas acuáticos (eutrofización del agua). En los suelos altamente meteorizados como los Oxisoles y Ultisoles, los fosfatos tienden a unirse a los óxidos de hierro y aluminio generando formas insolubles no disponibles para las plantas. La elevada fijación de P en los suelos, junto con las bajas tasas de fertilización, hacen que el P sea el principal factor limitante en la producción de los cultivos (Saito et al., 2019).

Además, a diferencia del N, las rocas fosfatadas constituyen un recurso no renovable que está sujeto a las fluctuaciones del mercado internacional, lo cual puede ser un gran problema para garantizar la seguridad alimentaria. El 75% de las reservas conocidas de fosfatos se encuentran en Marruecos, el resto de las reservas se encuentran en China y Rusia. En el Ecuador, una importante reserva de fosforitas existe cerca del volcán Reventador en el nororiente del país (Valarezo, 2012). En virtud de todos estos desafíos, actualmente el mejoramiento de la eficiencia del P en los sistemas de cultivo reviste gran interés. Es posible alcanzar una mayor eficiencia de este elemento a través de una mejor comprensión de la secuencia de asimilación, transporte y re-movilización en los cultivos (Wang et al., 2016).

Las plantas pueden ajustar su metabolismo en correspondencia a la disponibilidad de P. Aunque una limitada provisión de P podría afectar muchas funciones fisiológicas, como la fotosíntesis y la transferencia

de energía, ello no conduce inmediatamente a la aparición de síntomas de deficiencia, excepto en los casos de severa limitación del nutriente. Esto ocurre debido a que la re-movilización interna del P en los tejidos de la planta podría proveer de cantidades adecuadas para el crecimiento de nuevos sumideros (Veneklaas et al., 2012).

Desde el enfoque del ciclo bio-geoquímico del P en el suelo, se ha demostrado que a través de la inoculación de las raíces con bacterias que promueven el crecimiento de las plantas, se puede mejorar la fracción disponible de este nutriente, debido al incremento de la secreción de ácidos orgánicos y fosfatasas en la rizósfera (Billah et al., 2019).

En los cafetos, el P interviene en la fotosíntesis, la respiración, la transferencia y almacenamiento de energía, el desarrollo de la raíz, la formación de tallos y ramas, así como en la floración (INPOFOS, 1993). Los síntomas carenciales se manifiestan en un retraso del crecimiento y hojas pálidas, comenzando por las más jóvenes (Michiel et al., 2004).

Cuando los niveles de disponibilidad de P en el suelo según el análisis de laboratorio, se encuentran en los rangos bajo, medio y alto, los requerimientos de este elemento por el café arábigo son de 60, 40 y 20 kg ha⁻¹, respectivamente (Enríquez y Duicela, 2014). La extracción de P₂O₅ por ciclo de crecimiento para una elevada producción es de 35 kg ha⁻¹ (Sys et al., 1993).

En el suroeste de Etiopía, el P es uno de los factores más limitantes para la producción de café, donde predominan suelos altamente meteorizados, de pH bajo y con elevados contenidos de hierro y aluminio, lo que conduce a una alta fijación de este elemento (Institute of Agricultural Reserch [IAR], 1984).

Paulos (1994) indica que en un experimento en Melko (región de Jima en el suro-este de Etiopía), con la aplicación de 33 kg ha⁻¹ de P, el rendimiento de café se incrementó en 64,5 % en relación al testigo.

También señala que la combinación N y P, dio mejores resultados que las aplicaciones individuales de estos elementos.

Yitagesu y Shimels (2020) indican que en una producción de $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de cerezas frescas, el contenido de P es de 4 kg en el grano y 7 kg en la pulpa y el pergamino (peso seco).

3.4.2.3. Potasio.

El potasio (K) es uno de los cationes que las plantas lo requieren en mayor cantidad; pues, ninguno de los otros es necesario en tal proporción. Aunque la reserva de este elemento en la corteza terrestre es de 2,6%, su disponibilidad para las plantas en la solución del suelo (0,1-0,2%), representa una pequeña proporción del contenido total de este elemento en el suelo. Una gran porción de potasio en los suelos está presente como parte de la estructura cristalina de los minerales primarios y secundarios tales como: micas, feldespatos y minerales micáceos de la fracción arcilla. Una pequeña parte del potasio se encuentra como catión intercambiable (K^+) y una mínima parte se presenta como catión hidratado soluble ($\text{K}^+ \text{nH}_2\text{O}$). En éstas dos formas es un catión bastante móvil, tanto en el suelo como en la planta; sin embargo, como componente de la estructura del retículo cristalino de los minerales, es muy inmóvil y relativamente resistente al proceso de meteorización (Valarezo, 2012).

El K en las plantas se mueve fácilmente entre los diferentes órganos. A diferencia del N y P, solamente la forma catiónica (K^+) existe en los tejidos de las plantas. El K es un activador de docenas de importantes enzimas que intervienen en la síntesis de las proteínas, el transporte de azúcares, el metabolismo del C y N y la fotosíntesis. También es muy importante en el crecimiento de las células, lo cual constituye un

proceso fundamental en el funcionamiento y desarrollo de las plantas. El K juega un importante rol en la regulación de la presión osmótica de las células y en el balance cationes y aniones en el citoplasma. A través de estos procesos, está involucrado en la regulación de la apertura y cerramiento de los estomas, la elongación de las células y otros procesos fisiológicos importantes (Hu et al., 2016).

El K cumple un papel importante en la fisiología de la planta de café arábigo, especialmente durante el crecimiento y la maduración del fruto. La cantidad de K exportada en el momento de la cosecha supera aquella del N, lo que ayuda a explicar por qué puede volverse limitante después de unos años; además, existe una buena correlación entre el estado de K medido por su contenido en las hojas, el almidón almacenado y el rendimiento (De Souza y Avila Silva, 2021).

En los cafetos, el K interviene en la fotosíntesis y síntesis de proteínas, favorece la formación y calidad de los frutos, el balance hídrico y proporciona resistencia a las enfermedades (INPOFOS, 1993). Los síntomas carenciales se manifiestan en decoloración y necrosis de los bordes de las hojas (Michiel et al., 2004).

Cuando los niveles de disponibilidad del K en el suelo, según el análisis de laboratorio, se encuentran en los rangos bajo, medio y alto, los requerimientos de este elemento son de 150, 50 y 20 kg ha⁻¹ respectivamente (Enríquez y Duicela, 2014). La extracción de K₂O por ciclo de crecimiento para una elevada producción es de 145 kg ha⁻¹ (Sys et al., 1993).

En un experimento de fertilización en Melko (sur-oeste de Etiopía), se observó una mejora significativa en el rendimiento del café arábigo, cuando el nivel de K se incrementó de cero a 62 kg ha⁻¹; pero, niveles adicionales de K no dieron como resultado un mayor rendimiento

(Paulos, 1994). Los cafetos con deficiencia de N y K sufren de la enfermedad denominada muerte regresiva, especialmente donde hay una pobre cobertura de sombra y agua insuficiente (De Souza y Avila Silva, 2021). Yitagesu y Shimels (2020) indican que en una producción de $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de cerezas frescas, la absorción de K es de 45 kg en el grano y de 53 kg en la pulpa y el pergamino (peso seco).

3.4.2.4. Calcio.

La mayoría de los componentes a base de calcio (Ca) que se encuentran en los suelos son insolubles; en consecuencia, no están disponibles para las plantas ya que éstas lo toman de la solución del suelo en forma de Ca^{2+} . El Ca predomina generalmente entre las bases cambiables del complejo coloidal del suelo. El contenido de Ca^{2+} cambiable depende del material parental y del grado de evolución de los suelos (Valarezo, 2012).

Las plantas demandan relativamente grandes cantidades de Ca, comúnmente entre 0,1 a 4,4 % de masa seca. No obstante, la deficiencia de Ca en los cultivos es generalmente rara, pero podría verse en plantas cultivadas en suelos con altos niveles de deposiciones ácidas o de baja saturación de bases y en suelos propensos a la lixiviación. Las deficiencias de Ca pueden ocurrir en suelos tropicales de elevada precipitación; también, en suelos sódicos y salinos cuando el Ca disminuye relativamente frente al Na. La deficiencia de Ca en los cultivos así mismo surge cuando el elemento es temporalmente inaccesible a los tejidos en crecimiento (Broadley y White, 2010).

Cuando hay cantidades excesivas de Ca en la solución de rizósfera las plantas pueden sufrir toxicidad de este elemento. La cantidad de cristales de oxalato de Ca en las paredes celulares aumenta con una elevada aplicación de Ca y en condiciones de alta humedad. (White y Broadley, 2003).

Una vez en las células de la planta, el Ca es relativamente inmóvil y no circula fácilmente a las partes en crecimiento, lo que puede conducir a deficiencias locales a pesar de un suministro adecuado del elemento. Esto causa muchos efectos secundarios; tales como, necrosis de las células locales, capacidad reducida de la planta para hacer frente al estrés abiótico y biótico, disminución de la calidad y menores rendimientos (Dayod et al., 2010).

En los cafetos el Ca interviene en la formación de las proteínas, el crecimiento de las semillas, las raíces, las hojas y la maduración de los frutos (INPOFOS, 1993). Además, gobierna la absorción de otros nutrientes. Los síntomas carenciales en el café arábigo se manifiestan en un amarillamiento de las hojas desde el centro hacia afuera (Michiel et al., 2004).

Los niveles bajos de Ca y P en el suelo obstaculizan el desarrollo de las raíces y contribuyen a la muerte regresiva del café arábigo, la cual causa disminución del rendimiento, y cuando es grave, las plantas pueden morir, especialmente las variedades de alto rendimiento como Catimor (Gussarsson y Jensen, 1992).

Cuando los niveles de disponibilidad de Ca en el suelo, según el análisis de laboratorio se encuentran en los rangos bajo, medio y alto, los requerimientos de este elemento son de 340, 150 y 0 kg ha⁻¹, respectivamente (Enríquez y Duicela, 2014).

3.4.2.5. Magnesio.

El magnesio (Mg) es el cuarto elemento nutritivo más abundante después del N, P y K. Tiene efectos insustituibles en la fisiología de las plantas y juega un papel clave en los mecanismos de defensa frente al estrés abiótico (Senbayram et al., 2015).

En las plantas, el Mg es el segundo catión más abundante a nivel intracelular y es el componente principal de la clorofila, por lo que tiene un alto impacto en la fotosíntesis, la activación de enzimas y la formación y utilización de ATP. Una proporción del 15-35% del Mg dentro de la planta se dedica al complejo de los cloroplastos de captura de la luz, donde no solamente funciona como un elemento estructural de la clorofila, sino que también apuntala el rendimiento fotosintético. Además, el Mg juega un papel esencial en el transporte de fotoasimilados a los diferentes órganos como las raíces y las semillas, principalmente en la etapa de llenado del grano que es crucial para el rendimiento. En consecuencia, mantener una disponibilidad suficiente de Mg es importante para el crecimiento de las plantas (Ruan et al., 2012).

El Mg que forma parte de la estructura cristalina de los minerales del suelo no puede ser absorbido directamente por las plantas. En su lugar, la forma cambiante (Mg^{2+}) que se encuentra adsorbido al complejo de intercambio catiónico y en la solución del suelo, es la que pueden tomar las raíces de las plantas. Las cantidades y la proporción con respecto a otros elementos es variable en los diferentes suelos. El contenido de Mg en la solución del suelo es generalmente intermedio entre el Ca y el K.

Una adecuada disponibilidad de Mg en el suelo es un factor clave para asegurar un crecimiento robusto de los cultivos y una elevada calidad y productividad. Las deficiencias de Mg ocurren más comúnmente en regiones de alta precipitación, con suelos ácidos, pobres en bases, altamente meteorizados, con predominio de cationes tales como H^+ , Al^{3+} y Mn^{2+} o fuertemente erosionados; así como, en sistemas de cultivo intensivo en los cuales ocurre una elevada remoción de Mg desde el suelo a los productos cosechados (Wang et al., 2019).

La disponibilidad del Mg también depende de su proporción en relación con las cantidades solubles o intercambiables de K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Al^{3+} y Mn^{2+} . Una excesiva aplicación de fertilizantes de K^+ y

NH^{4+} , antagónicamente interfiere con la absorción de Mg por la planta, aumentando el riesgo de deficiencia de este elemento.

En los cafetos, el Mg por ser el elemento central de la molécula de clorofila influye en la fotosíntesis, el desarrollo foliar y la germinación de las semillas (INPOFOS, 1993). Los síntomas carenciales se manifiestan en una coloración marrón y bronceada de las secciones de las hojas, desde el centro hasta los bordes (Michiel et al., 2004).

Cuando los niveles de disponibilidad de Mg en el suelo se encuentran en los rangos bajo, medio y alto según el análisis de laboratorio, los requerimientos de este elemento por el café arábigo son de 15, 10 y 0 kg ha^{-1} , respectivamente (Enríquez y Duicela, 2014).

3.4.2.6. Azufre.

El azufre (S) es un macronutriente importante para las plantas debido a sus funciones en la síntesis de proteínas, como componente de los aminoácidos cisteína y metionina, y coenzimas. Desde hace muchos años, la deficiencia de S en los cultivos con alto requerimiento de este elemento ha sido una preocupación principal en todo el mundo. El suelo recibe S con la lluvia y mediante la aplicación de fertilizantes NPK; sin embargo, recientemente se utilizan fertilizantes altamente puros con cantidades insignificantes de S, lo que lleva a la eliminación continua de S sin ningún aporte, ello determina que el suelo sea deficiente. La deficiencia de S también afecta la absorción de N, lo que reduce aún más el rendimiento y la calidad de los cultivos (Srinivasarao et al., 2008).

El S aprovechable del suelo está cercanamente relacionado al S liberado luego de aplicar métodos de incubación. El azufre en la forma de sulfatos (SO_4^-) se encuentra principalmente en el subsuelo. Para suelos minerales o suelos pobres en materia orgánica, se considera que

cantidades menores de 50 ppm obtenidos a partir de una extracción con agua (en una relación suelo agua de 10:25 con 30 minutos de agitación) pueden ser indicativas de una posible deficiencia de S para los cultivos (Valarezo, 2012).

En los cafetos, el S contribuye a la formación de proteínas, clorofila, vitaminas y enzimas. Ayuda al desarrollo de las raíces y la producción de semillas (INPOFOS, 1993). Cuando los niveles de disponibilidad de S en el suelo, según el análisis de laboratorio, se encuentran en los rangos bajo, medio y alto, los requerimientos de este elemento son de 150, 50 y 0 kg ha⁻¹, respectivamente (Enríquez y Duicela, 2014).

3.4.3. Micronutrientes

3.4.3.1. Hierro.

El hierro (Fe) es un micronutriente esencial que lo necesitan prácticamente todos los organismos vivos para un adecuado crecimiento y desarrollo, incluidas las plantas y los humanos (Valarezo, 2012).

Debido a su capacidad para aceptar y donar electrones, el Fe juega un papel central en las reacciones de transferencia de electrones en las mitocondrias y los cloroplastos. También es importante para la biosíntesis de clorofila y como cofactor enzimático (Briat et al., 2015).

El Fe es esencial para el transporte de oxígeno, ya que forma parte del núcleo funcional del grupo hemo en la hemoglobina y la mioglobina. Además, es importante como parte de los grupos de Fe-S y en la replicación del ADN (Muckenthaler et al., 2017).

La clorosis inducida por deficiencia de Fe es un fenómeno común en muchos cultivos. Se estima que más del 30% de los cultivos en todo el mundo están amenazados por la deficiencia de este elemento (Imsande, 1998).

La deficiencia de Fe es causada principalmente por la presencia del hidróxido férrico insoluble, la principal forma de Fe existente en el suelo, especialmente en suelos calcáreos. Las plantas no pueden utilizar la forma insoluble del Fe; por lo tanto, la biodisponibilidad se ve seriamente limitada. Además, la deficiencia de Fe a menudo se relaciona con la deficiencia de otros elementos. Los fosfatos disminuyen la solubilidad del óxido de hierro dando como resultado deficiencia de Fe (Sánchez et al., 2014).

En los cafetos el Fe favorece la formación de clorofila como catalizador (INPOFOS, 1993). Los síntomas carenciales graves se observan en las hojas jóvenes y corresponden a una decoloración amarillo blanquecina con las venas verdes (Michiel et al., 2004).

3.4.3.2. Cobre.

El cobre (Cu) las plantas lo toman en forma de catión divalente (Cu^{2+}). Posee propiedades redox adecuadas para sostener procesos fundamentales como la fotosíntesis, la respiración y las reacciones de defensa antioxidantes, entre otros. Sin embargo, las mismas propiedades redox conducen a la citotoxicidad cuando el elemento está en exceso (Ravet y Pilon, 2013); por ello, un nutriente esencial para las plantas como el Cu, puede volverse tóxico bajo ciertas condiciones. En consecuencia, las plantas requieren mecanismos afinados para mantener el nivel de Cu dentro de rangos equilibrados. A pesar de ser abundante en los suelos, la biodisponibilidad de Cu a menudo se ve restringida debido a: el efecto quelatante de la materia orgánica, la baja insolubilidad en suelos alcalinos o la sobreexplotación de los suelos con cultivos intensivos (Puig et al., 2007).

La movilidad y disponibilidad del Cu en los suelos y su absorción por las plantas son complejas y no solo dependen de las propiedades del suelo o de la planta, sino también de su interacción. En los suelos el Cu muestra una fuerte afinidad química por las partículas (p. ej., oxihidróxidos y materia orgánica). El contenido de Cu en la solución del suelo es generalmente bajo en comparación con el contenido total y está controlado principalmente por la presencia de ligandos orgánicos solubles y el pH. En las inmediaciones de las raíces (la rizósfera), las plantas pueden modificar las condiciones fisicoquímicas como el pH, el potencial redox (Eh) y la presencia de ligandos orgánicos para satisfacer sus necesidades de nutrición mineral, lo cual puede ser utilizado para limitar la toxicidad (Bravin et al., 2012).

3.4.3.3. Zinc.

El zinc (Zn) es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Desempeña un papel importante en diversas reacciones enzimáticas, procesos metabólicos, reacciones redox, metabolismo de las hormonas, el desarrollo de los órganos reproductivos, la resistencia a infecciones por ciertos patógenos y mejora la resistencia al estrés. Sin embargo, debido a la adsorción y fijación por el carbonato de calcio, la materia orgánica, los fosfatos y la arcilla, la efectividad del Zn en el suelo es baja (Suganya et al., 2021).

La deficiencia de Zn es probablemente la más frecuente de los micronutrientes en los suelos. Se estima que aproximadamente el 50% de los suelos cultivados para la producción de alimentos tienen deficiencia de este elemento. La falta de Zn conduce a rendimientos menores y afecta la calidad nutricional de los cultivos, ya que causa daño a las células, principalmente a nivel de la membrana celular y también puede alterar la estructura mitocondrial (Rehman et al., 2021).

Según un informe de la Organización Mundial de la Salud, alrededor del 30% de la población mundial es deficiente en Zn, situación que prevalece en los países en desarrollo. La absorción insuficiente de dicho micronutriente conduce a muchos problemas graves de salud (World Health Organization [WHO], 2016).

El Zn en los cafetos es necesario para la formación de clorofila, la producción de azúcares y hormonas/enzimas, lo cual favorece el crecimiento de la planta (INPOFOS, 1993). Los síntomas carenciales graves se observan primero en las hojas jóvenes con deformaciones y amarillamiento de las mismas (Michiel et al., 2004).

3.4.3.4. Manganeso.

El manganeso (Mn) es un micronutriente esencial que cumple varias funciones en la fisiología de las plantas, especialmente en el transporte de electrones en el fotosistema, la estructura del cloroplasto y el metabolismo del N. El Mn actúa como activador y cofactor de varias metalo-enzimas y cataliza varias reacciones enzimáticas, incluidas reacciones redox, fosforilación, descarboxilación e hidrólisis. Además, activa más de 35 enzimas, incluidas la fenilalanina amonioliasa descarboxilasa, deshidrogenasas y diferentes glicosiltransferasas (Schmidt y Husted, 2019).

La deficiencia de Mn genera estrés oxidativo y reducción en el transporte de electrones fotosintéticos, disminuye eficiencia del uso del agua y el funcionamiento de las raíces. Además, la deficiencia provoca reducción en el complejo de captura de luz, junto con las proteínas extrínsecas de la membrana (Schmidt et al., 2016).

La biogeoquímica del Mn es compleja. En el suelo existe en tres estados de oxidación a saber: Mn (II), Mn (III) y Mn (IV). Las plantas toman solo la forma divalente (Mn^{2+}) mientras que el Mn (IV) es altamente insoluble

y precipita en la solución del suelo. La disponibilidad de Mn para las plantas está muy influenciada por el pH del suelo y las condiciones redox, ya que un aumento en el pH del suelo provoca reducción en su disponibilidad al formar complejos de MnO_2 ; mientras que, la disponibilidad aumenta en condiciones de reducción, compactación e inundación (Schmidt y Husted, 2019).

En el café, el Mn funciona como parte del sistema enzimático, activa importantes reacciones metabólicas, ayuda a la síntesis de clorofila, y acelera la germinación y maduración (INPOFOS, 1993).

3.4.3.5. Boro.

En las plantas terrestres el boro (B) desempeña funciones importantes, incluyendo la estructura de las paredes celulares, el mantenimiento de las funciones de la membrana plasmática, la estimulación de los tejidos reproductivos y la mejora de la calidad de las semillas. Además, influye en la biosíntesis de algunos compuestos metabólicos como los antioxidantes y los polifenoles. También, está involucrado en la síntesis de ácidos nucleicos, el metabolismo fenólico, la biosíntesis y translocación de carbohidratos, el crecimiento del tubo polínico y el alargamiento de la raíz (Landi et al., 2019).

Los patrones de distribución de B en la rizósfera y el comportamiento de B en el suelo afectan directamente su disponibilidad para las plantas. La solución del suelo contiene predominantemente ácido bórico (H_3BO_3) y el anión borato [$\text{B}(\text{OH})_4^-$], en la que el equilibrio químico depende en gran medida del pH, siendo el H_3BO_3 la forma predominante. El B es captado por las plantas en forma de ácido bórico, que entra a las raíces por difusión pasiva (Klochko et al., 2006).

Aunque el B es un micronutriente importante requerido para el crecimiento y desarrollo normal de las plantas, su exceso en el suelo provoca severos daños a los tejidos vegetales, lo cual tiene

un efecto perjudicial sobre el crecimiento de las plantas, limitando así el rendimiento de los cultivos en diferentes partes del mundo, especialmente en terrenos de áreas áridas y semiáridas. Los terrenos que sufren de exceso de acumulación de B son aquellos que han sido regados con aguas con alto contenidos de B, de poca lluvia y lixiviación insuficiente. Junto con la limitación en el crecimiento de las raíces, los principales síntomas de toxicidad por B incluyen necrosis en las puntas de las hojas y clorosis (Camacho-Cristóbal et al., 2018).

El B en los cafetos favorece el desarrollo de nuevas raíces y flores; así como, la fructificación (INPOFOS, 1993). Además, influye en la germinación del polen, el transporte de azúcar y la formación de proteínas. Los síntomas carenciales se manifiestan en retraso en el crecimiento de las hojas jóvenes con coloración verde clara, y florecimiento reducido (Michiel et al., 2004).

3.4.3.6. Molibdeno.

El molibdeno (Mo) en las plantas interviene en la asimilación de N a través de la enzima nitrato reductasa. También, actúa directamente sobre la fase fotoquímica de la fotosíntesis mediante la biosíntesis de clorofila y la estabilidad del aparato fotosintético. El aumento de la actividad fotosintética activa la nitrato-reductasa y promueve el inicio de la formación de proteínas. Por lo tanto, hay un aumento en el contenido de proteína soluble total en las hojas, lo que puede conducir a un aumento en el contenido y la actividad de la enzima rubisco, la cual es responsable de la fijación de carbono durante la producción de carbohidratos, lo que conduce a un aumento en el contenido de azúcares solubles totales con el concomitante aumento del rendimiento del cultivo (Rodríguez et al., 2021).

Debido a que la mayoría de las plantas requieren pequeñas cantidades de Mo, que lo asimilan en forma de anión molibdato ($\text{MoO}_4^{=}$), no siempre se realiza la aplicación de este elemento junto con los fertilizantes sólidos al momento de la siembra. En su lugar, la aplicación foliar de Mo en etapas fenológicas específicas del cultivo, es una técnica importante para incrementar el crecimiento y la producción. Por ejemplo, una aplicación foliar de Mo de 30 g ha^{-1} puede tener efectos positivos claros en el maíz y la soya, aumentando además la tolerancia al estrés por la sequía (Oliveira et al., 2022).

3.4.4. Rangos de niveles óptimos y síntomas de deficiencia y exceso de nutrientes

Los rangos de los niveles óptimos de los nutrientes en las hojas del café se presentan en la Tabla 3.4; en tanto que, los niveles óptimos de los nutrientes en el suelo para el desarrollo de la planta se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4. Rangos óptimos de los nutrientes en las hojas del café arábigo (Smith, 1986; Lima y Malavolta, 2003).

Nutriente	Rango óptimo
N (Nitrógeno)	2,5-3,0%
P (Fósforo)	0,15-0,2%
K (Potasio)	2,1-2,6%
S (Azufre)	0,12-0,30%
Ca (Calcio)	0,75-1,5%
Mg (Magnesio)	0,25-0,40%
Na (Sodio)	< 0,05%
Cu (Cobre)	16-20 mg kg^{-1}
Zn (Zinc)	15-30 mg kg^{-1}
Mn (Manganeso)	50-100 mg kg^{-1}
Fe (Hierro)	70-200 mg kg^{-1}
B (Boro)	40-100 mg kg^{-1}

Tabla 3.5. Niveles óptimos de los nutrientes en el suelo para el desarrollo del café arábigo (Smith, 1986).

Nutriente (Método de extracción en paréntesis)	Rangos de niveles óptimos sugeridos en el suelo
pH (1:5 suelo/agua)	5,5-6,0
Materia Orgánica (Walkley Black)	1-3 %
Conductividad eléctrica (1:5 suelo/agua)	< 0,2 dSm ⁻¹
Nitrato (1:5 extracto acuoso)	> 20 mg kg ⁻¹ más relevante el análisis foliar
Fosfato (Colwell o bicarbonato)	60-80 mg kg ⁻¹
Potasio (Acetato de amonio)	> 0,75 mg kg ⁻¹
Azufre (KCl)	> 20 mg kg ⁻¹
Calcio (Acetato de amonio)	3-5 cmol (+) kg ⁻¹
Magnesio (Acetato de amonio)	> 1,6 cmol (+) kg ⁻¹
Aluminio (Extracto en cloruro de potasio)	Desconocido, pero muy bajo
Sodio (Acetato de amonio)	< 1,0 cmol (+) kg ⁻¹
Cloruro (1:5 extracto acuoso)	250 mg kg ⁻¹
Cobre (DPTA)	0.3-10 mg kg ⁻¹
Zinc (DPTA)	2-10 mg kg ⁻¹
Manganeso (DPTA)	< 50 mg kg ⁻¹
Hierro (DPTA)	2-20 mg kg ⁻¹
Boro (Cloruro de calcio caliente)	0,5-1,0 mg kg ⁻¹ (franco arenoso)
	1,0-2,0 mg kg ⁻¹ (otras texturas)

Nota. Distintos métodos de extracción darán resultados y rangos óptimos diferentes.

En la Tabla 3.6. se resumen los síntomas de deficiencia y excesos de nutrientes más comunes en el cultivo del café arábigo, la misma que puede servir como una guía de campo.

Tabla 3.6. Síntomas de deficiencia (-) y excesos (+) de los nutrientes esenciales para el café arábigo.

Síntomas	+/-	Elemento
Hojas viejas amarillas, poca brotación y poco follaje, muerte descendente de las ramas.	-	N
Mucho follaje y poco fruto.	+	N
Hojas verdes sin brillo y después manchas necróticas; hojas más viejas de color azul verdoso y tintes rojizos.	-	P
Clorosis y necrosis de las puntas y márgenes de las hojas más viejas (chamuscadas). Muerte descendente de ramas y frutos secos.	-	K
Ahuecamiento convexo de las hojas y crecimiento corchoso en las venas.	-	Ca
Clorosis intervenal de las hojas más viejas, patrón de espina de pescado en las hojas más viejas, mucha hoja caída. Altas concentraciones de K frecuentemente producirán deficiencias de Mg.	-	Mg
Clorosis de las hojas más nuevas, internudos más cortos.	-	S
Internudos cortos, hojas jóvenes deformadas, hojas estrechas coreáceas, muerte de las yemas terminales y super brotación.	-	B
Internudos acortados, hojas pequeñas estrechas y deformadas.	-	Zn
Hojas nuevas con nervaduras salientes (costillas), hojas volteadas hacia abajo y con manchas necróticas.	-	Cu
Hojas viejas con manchas acuosas, después pardas y negras, escaso crecimiento de las hojas y muerte de las raíces.	+	Cu
Hojas nuevas amarillas hasta las ramas, con nervaduras verdes y coloraciones blanquecinas entre las venas. Acidificar el suelo con sulfato de amonio.	-	Fe
Hojas nuevas verde-pálido con nervaduras verdes y tejido a lo largo de la misma también verde, puntuaciones blancas entre las nervaduras. Hojas terminales verde oliva, hojas verde oscuras en el envés.	-	Mn
Hojas pequeñas verde claras con bordes amarillentos	+	Mn
Hojas nuevas con clorosis en los márgenes	-	Ca

Nota. Adaptado de Diagnóstico del estado nutricional de los cultivos (INPOFOS, 1993), con complementos de Sys et al. (1993).

3.4.5. Recomendaciones para la plantación y fertilización del café arábigo

Enriquez y Duicela (2014) dan las siguientes recomendaciones para la plantación y fertilización del café arábigo:

- Los hoyos para la plantación del cafeto deben tener las siguientes dimensiones: 30 x 30 x 30 cm.
- La fertilización básica al momento de plantar los cafetos es una práctica fundamental para asegurar un adecuado crecimiento y una alta productividad.
- Aplicar de 100 a 150 gramos por hoyo de: 10-30-10; 18-46-00 u otro abono fosfatado, mezclado con 1 a 2kg de compost.
- Si el pH del suelo es menor a 5,5 al momento de plantar se debe adicionar cal, ceniza o roca fosfatada (50-100 g).
- En caso de bajos niveles de azufre en el suelo se puede agregar 50 a 100 g de yeso (sulfato de calcio).
- La aplicación de hojarasca descompuesta (mulch) puede ayudar a controlar una estructura adversa, una baja capacidad de retención de agua y un bajo estado de bases.
- El subsuelo siempre debe estar húmedo, pero la capa superficial debe estar seca en alguna parte del año para promover la floración a través de un stress de humedad.

3.5. Referencias bibliográficas

- Anderson, A. (2023). Introduction to soil science. University of Minnesota Libraries. <https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/introduction-to-soil-science>
- Andrades, M. (2012). Prácticas de edafología y climatología. Universidad de La Rioja.
- Baxter, N., & Williamson, J. (2001). Know your soils. Victorian Resources Online. <https://vro.agriculture.vic.gov.au/DPI/Vro/vrosite.nsf>
- Bernier, R., y Alfaro, M. (2006). Acidez de los suelos y efectos del encalado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://biblioteca.inia.cl>
- Billah, M., Khan, M., Bano, A., Hassan, T., Munir, A., & Gurmani, A. (2019). Phosphorus and phosphate-solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture. *Journal of Applied Microbiology*. <https://www.researchgate.net/publication/335379336>
- Brady, N. C. (1984). The nature and properties of soils. Macmillan. <https://www.academia.edu/23641831>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson. <https://api.pageplac.de/preview/DT04009781292162249>
- Bravin, M. N., Garnier, C., Lenoble, V., Gérard, F., Dudal, Y., & Hinsinger, P. (2012). Root-induced changes in pH and dissolved organic matter binding capacity affect copper dynamic speciation in the rhizosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 84, 256–268. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703712000543>
- Briat, J. F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in Plant Science*, 20(1), 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07005>
- Broadley, M. R., & White, P. J. (2010). Eats roots and leaves: Can edible horticultural crops address dietary calcium, magnesium and potassium deficiencies? *Proceedings of the Nutrition Society*, 69(4), 601–612. <https://www.researchgate.net/publication/44637509>

- Camacho-Cristóbal, J. J., Navarro-Gochicoa, M. T., Rexach, J., González-Fontes, A., & Herrera-Rodríguez, M. B. (2018). Plant response to boron deficiency and boron use efficiency in crop plants. En M. A. Hossain et al. (Eds.), *Plant micronutrient use efficiency* (pp. 109–121). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812104-700007-1>
- Cameron, K. C., Di, H. J., & Moir, J. L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. *Annals of Applied Biology*, 162(2), 145–173. <https://www.researchgate.net/publication/263753867>
- Cerisola, C. (2015). Fertilidad química. Universidad Nacional de La Plata. <https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar>
- Cornell University Cooperative Extension. (2007). Cation exchange capacity. Cornell University. <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet22.pdf>
- Cruz, D., Peña, E., Vázquez, M., y Villegas, C. (2019). Nitrógeno: ¿Elemento esencial? Importancia en la química de los productos naturales. Universidad de Guanajuato. <http://repositorio.ugto.mx>
- Choudhary, O. P., & Kharche, V. K. (2018). Soil salinity and sodicity. <https://www.researchgate.net/publication/327824188>
- Chowdary, V. M., Damodhara Rao, M., & Jaiswal, C. S. (2013). Study of infiltration process under different experimental conditions. *Agricultural Water Management*, 116, 69–78. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377405003392>
- Daniels, W. L., & Haering, K. C. (2010). Concepts of basic soil science. Virginia Tech. <http://www.soilphysics.okstate.edu>
- Dayod, M., Tyerman, S. D., Leigh, R. A., & Gilliam, M. (2010). Calcium storage in plants and the implications for calcium biofortification. *Protoplasma*, 247, 215–231. <https://doi.org/10.1007/s00709-010-0182-1>
- De la Rosa, D. (2008). Evaluación agro-ecológica de suelos: Para un desarrollo rural sostenible. <https://www.researchgate.net/publication/381574293>

- De Souza, G., & Ávila Silva, L. (2021). How nutrition and health interact in coffee farming. ICL Growing Solutions. <https://multisite-assets.icl-growingsolutions.com>
- Easton, Z. M., & Bock, E. M. (2016). Soil and soil water relationships. Virginia Cooperative Extension. <https://ext.vt.edu>
- Enríquez, G., y Duicela, L. (2014). Guía técnica para la producción y postcosecha de café arábigo. Consejo Cafetalero Nacional.
- Espinoza, J., y Molina, E. (1999). Acidez y encalado de los suelos. <https://www.researchgate.net/publication/270568287>
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2008). Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, 99, 345–399. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065211308004070>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2016). Capacidad de intercambio catiónico del suelo. CENICAFÉ. <https://biblioteca.cenicafe.org>
- Flores, L., y Alcalá, J. (2015). Laboratorio de física de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.geologia.unam.mx>
- Golden, M. H. (1995). Specific deficiencies versus growth failure: Type I and type II nutrients. *SCN News*, 12, 10–14. <https://www.researchgate.net/publication/11109325>
- Goulding, K. W. T. (2016). Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management*, 32(3), 390–399.
- Grande, A., y Michel, V. (2020). Materia orgánica del suelo. <https://orgprints.org/id/eprint/43417>
- Gussarsson, M., & Jensen, P. (1992). Effects of copper and cadmium on uptake and leakage of K⁺ in birch roots. *Tree Physiology*, 11(3), 305–313. <https://doi.org/10.1093/treephys/11.3305>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. Pearson.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier.

- Hodges, S. C. (2020). Soil physical properties. Virginia Department of Conservation and Recreation. <https://www.dcr.virginia.gov>
- Hu, W., Jiang, N., Yang, J., Meng, Y., Wang, Y., Chen, B., Oosterhuis, D., & Zhou, Z. (2016). Potassium supply affects photosynthetic physiology in cotton cultivars. *Field Crops Research*, 196, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.06005>
- Hue, N. V. (2008). Development, impacts and management of soil acidity in Hawaii. University of Hawaii. <https://hilo.hawaii.edu>
- Imsande, J. (1998). Iron, sulfur, and chlorophyll deficiencies: A need for an integrative approach in plant physiology. Research Gate. https://www.researchgate.net/publication/229724196_Iron_sulfur_and_chlorophyll_deficiencies_A_need_for_an_integrative_approach_in_plant_physiology
- Institute of Agricultural Research (IAR). (1982). Coffee research team progress report. Addis Ababa, Ethiopia.
- Institute of Agricultural Research (IAR). (1984). Progress report: Coffee department. Addis Ababa, Ethiopia.
- Instituto de la Potasa y el Fósforo. (1993). Diagnóstico del estado nutricional de los cultivos. Quito, Ecuador. <https://biblioteca.bne.gob.ec/cgi-bin/koha/opac-ISBDdetail.pl?biblionumber=45608>
- International Land Development Consultants of the Netherlands. (1981). Agricultural compendium for rural development in the tropics and subtropics. Elsevier.
- Irawan, S., Antriyandarti, E., Suprihatin, D., & Pangesti, A. (2022). Study the relationship of soil fertility with land suitability for Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) development in Bandar Sub-district, Pacitan District. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1111(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1111/1/012029>
- Jamil, A., Riaz, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2011). Gene expression profiling of plants under salt stress. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(5), 435–458. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011605739>

- Jannatul, F., & Varun, P. (2021). A review on the possible factors influencing soil inorganic carbon under elevated CO₂. *Catena*, 202, 105434. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021105434>
- Johnson, G., & Zhang, H. (2013). Causes and effects of soil acidity. *International Journal of Applied Research in Biological Sciences*, 2(3), 1–9. <https://ijarbs.com/pdfcopy/2021/mar2021/ijarbs8.pdf>
- Jordán, A. (2010). *Manual de edafología*. Universidad de Sevilla. <http://libnet.unse.edu.ar/1bi/ba/cefaya/cdig/000005>
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4–10. <https://www.academia.edu/30075295>
- Ketterings, Q., Gami, S., Mathur, R., & Woods, M. (2014). A simple method for estimating effective cation exchange capacity, cation saturation ratios, and sulfur across a wide range of soils. Cornell University. https://www.files.asianturfgrass.com/ketterings_cec14.pdf
- Kirkham, M. B. (2014). *Principles of soil and plant water relations* (2nd ed.). Academic Press. <https://themodern.farm/studies/Principles%20of%20Soil%20and%20Plant%20Water%20Relations%20-%20M.B.%20Kirkham.pdf>
- Klochko, K., Kaufman, A. J., Yao, W., Byrne, R. H., & Tossell, J. A. (2006). Experimental measurement of boron isotope fractionation in seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(13), 3258–3266. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04014>
- Kravchenko, A. N., & Bullock, D. G. (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1), 75–83. <https://doi.org/10.2134/agronj200092175x>
- Krug, E. C., & Frink, C. R. (1983). Acid rain on acid soil: A new perspective. *Science*, 221(4610), 520–525.

- Kwame, R., Dogbe, W., Sékou, K., Rabeson, R., Kamissoko, N., Maïga, I., ... Wopereis, M. C. S. (2019). Yield-limiting macronutrients for rice in sub-Saharan Africa. *Geoderma*, 338, 546–554. <https://www.researchgate.net/publication/329927539>
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. Marcel Dekker.
- Lal, R., Kimble, J. M., Stewart, B. A., & Eswaran, H. (1999). *Global climate change and pedogenic carbonates*. CRC Press. <https://www.osti.gov/biblio/691460>
- Landi, M., Margaritopoulou, T., Papadakis, I. E., & Araniti, F. (2019). Boron toxicity in higher plants: An update. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141, 70–83. <https://doi.org/10.1007/s00425-019-03220-4>
- León, D. (2023). Factores naturales y antrópicos que influyen en la distribución de carbonatos pedogénicos en la península de Santa Elena, Ecuador. *Pentaciencias*. <https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/917>
- Lima Filho, O. F., & Malavolta, E. (2003). Studies on mineral nutrition of the coffee plant (*Coffea arabica* L. cv. Catuai Vermelho): Remobilization and reutilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. *Brazilian Journal of Biology*, 63(3), 481–490. <https://www.scielo.br/j/bjb/a/Nq89rhdbYC3g3DMWcKmxNqs/>
- Liu, X., Li, F., Zhang, Y., & Yang, Q. (2016). Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) under different nitrogen rates. *Agricultural Water Management*.
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (2016). Carbonate and gypsum. In *Methods of soil analysis* (pp. 437–474). USDA-ARS. <https://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1509>
- López, R. (2002). *Degradación del suelo: Causas, procesos, evaluación e investigación*. Universidad de los Andes. <https://www.researchgate.net/publication/264311522>
- Melke, A., & Ittana, F. (2014). Nutritional requirement and management of Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) in Ethiopia. *National and Global Perspectives*.

- Michiel, K., Van Thiet, N., & Jansen, D. (2004). Manual for Arabica coffee cultivation.
- Ming, P., Li, Y., & Sumner, M. E. (2012). Handbook of soil sciences: Properties and processes (2nd ed.). CRC Press.
- Molina, E., y Alvarado, A. (2002). Manejo de la acidez y el encalado del suelo. Universidad de Costa Rica.
- Mora, J., Alcalá, M., Rosas, M., y González, J. (2021). Capacidad de intercambio catiónico y materia orgánica en el suelo. Memorias de Congreso.
- Muckenthaler, M. U., Rivella, S., Hentze, M. W., & Galy, B. (2017). A red carpet for iron metabolism. *Cell*, 168(3), 344–361. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.12034>
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 239–250. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.200100808.x>
- Nduwumuremyi, A. (2013). Soil acidification and lime quality: Sources, effects and liming requirements. *Research and Reviews: Journal of Agriculture and Allied Sciences*.
- Nimmo, J. R. (2013). Porosity and pore size distribution. En *Encyclopedia of soils in the environment*. USGS.
- Ochoa, P., Chamba, Y., & Capa, E. (2016). Environmental characterization and potential zoning for coffee production in the Andes of southern Ecuador. *Revista de Geografía*.
- Oliveira, S. M., Costa, C. H. M., Alves, V. C., et al. (2022). Molybdenum foliar fertilization improves photosynthetic metabolism and grain yields of soybean and maize. *Frontiers in Plant Science*, 13, 887682. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022887682>
- Omran, E. E. (2016). A simple model for rapid determination of gypsum in arid soils. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 160. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0242-3>
- Orchardson, E. (2020). El nitrógeno en la agricultura. CIMMYT. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/el-nitrogeno-en-la-agricultura/>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2008). Land and plant nutrition management service. FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). Guía para la descripción de suelos (4.^a ed.). FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). Cation exchange capacity and exchangeable bases determination. FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). Procedimiento operativo estándar para el análisis de carbonato de calcio equivalente en suelo. FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). Propiedades químicas del suelo. FAO.
- Ortiz, R. (2005). Edafología: Síntesis de la evolución de su conocimiento. Universidad de Murcia.
- Parnes, R. (2013). A guide to organic and inorganic soil amendments. NOFA. <https://nofa.org/wp-content/uploads/2019/10/soil-fertility-book.pdf>
- Paulos, D. (1986). The effect of inorganic fertilization on the yield of Arabica coffee in Ethiopia. En Soil science research in Ethiopia (pp. 11–14). IAR.
- Paulos, D. (1994). Ecology and soils of major coffee-growing regions of Ethiopia. Institute of Agricultural Research.
- Pinto, V. M., Bruno, I. P., Jong van Lier, Q., Dourado-Neto, D., & Reichardt, K. (2017). Environmental benefits of reducing nitrogen rates for coffee in the Cerrado. Agricultural Systems, 156, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06006>
- Pogosyan, L., Alvarado, S., y Abrosimov, K. (2005). Los poros del suelo. Instituto de Ecología, A. C. <https://www.inecol.mx/index.php/divulgacion/ciencia-hoy/los-poros-del-suelo>
- Porta, J., López-Acevedo, M., y Poch, R. (2014). Edafología: Uso y protección de suelos (3.^a ed.). Mundi-Prensa.

- Porta, J., López-Acevedo, M., y Roquero, C. (2014). *Edafología: Uso y protección de suelos* (3.^a ed.). Mundi-Prensa.
- Prochnow, L. I. (2014). Soil acidity evaluation and management. CABI. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20143098017>
- Prochnow, L. I., Caires, E. F., & Rodrigues, C. R. (2016). Phosphogypsum use to reduce subsoil acidity: The Brazilian experience. *Better Crops with Plant Food*, 100(2), 15–17. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20163196920>
- Puig, S., Andrés-Colás, N., García-Molina, A., & Peñarrubia, L. (2007). Copper and iron homeostasis in *Arabidopsis*: Responses to metal deficiencies, interactions and biotechnological applications. *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 271–290. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.200701642.x>
- Quiroz, U., Monterroso, A., Calderón, M., y Ramírez, A. (2022). Aptitude of coffee (*Coffea arabica* L.) and cacao (*Theobroma cacao* L.) crops considering climate change. *La Granja*, 36(2), 60–75. <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/lgr/v36n2/1390-3799-lgr-36-02-00060.pdf>
- Raese, J. T., Drake, R. S., & Curry, E. A. (2007). Nitrogen fertilizer influences fruit quality, soil nutrients and cover crops, leaf color and nitrogen content, biennial bearing and cold hardiness of ‘Golden Delicious’. *Journal of Plant Nutrition*, 30(10), 1583–1604. <https://doi.org/10.1080/01904160701615483>
- Ravet, K., & Pilon, M. (2013). Copper and iron homeostasis in plants: The challenges of oxidative stress. *Antioxidants & Redox Signaling*, 19(9), 919–932. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.5084>
- Rehman, R., Asif, M., Cakmak, I., & Ozturk, L. (2021). Differences in uptake and translocation of foliar-applied Zn in maize and wheat. *Plant and Soil*, 462, 87–102. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04867-3>
- Ritzema, H. (2009). Drainage for agriculture. FAO. <https://www.researchgate.net/publication/272511190>

- Ritzema, H. (2009). Drainage for agriculture. Wageningen Academic Publishers. <https://www.researchgate.net/publication/272511190>
- Rodríguez, M., y Flórez, V. (2004). Elementos esenciales y beneficiosos. <https://core.ac.uk/download/pdf/143458034.pdf>
- Rodríguez, V., Crusciol, C. A. C., Bossolani, J. W., Moretti, L. G., Portugal, J. R., Mundt, T. T., de Oliveira, S. M., Garcia, A., Calonego, J. C., & Lollato, R. P. (2021). Magnesium foliar supplementation increases grain yield of soybean and maize by improving photosynthetic carbon metabolism and antioxidant metabolism. *Plants*, 10(4), 797. <https://doi.org/10.3390/plants10040797>
- Ronchi, C. P., Sousa Júnior, J. M., Almeida, W. L., Souza, D. S., Silva, N. F., Oliveira, L. B., Guerra, A. M., y Ferreira, N. S. (2015). Morfologia radicular de cultivares de café arábica submetidas a diferentes arranjos espaciais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(3), 187–195. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300001>
- Rose, T. J., Liu, L., & Wissuwa, M. (2013). Improving phosphorus efficiency in cereal crops: Is breeding for reduced grain phosphorus concentration part of the solution? *Frontiers in Plant Science*, 4, 444. <https://doi.org/10.3389/fpls.201300444>
- Ross, D. S., & Ketterings, Q. M. (1995). Recommended methods for determining soil cation exchange capacity. *Agricultural and Food Science*, 4, 129–135. <https://journal.fi/afs/article/view/111107/66850>
- Ruan, J., Ma, L., & Yang, Y. (2012). Magnesium nutrition on accumulation and transport of amino acids in tea plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(5), 951–958. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4709>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., y Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. <https://bibliofagro.pbworks.com.pdf>
- Saadaoui, E., Ghazel, N., Ben Romdhane, C., & Massoudi, N. (2017). Phosphogypsum: Potential uses and problems—A review. *International Journal of Environmental Studies*, 74(4), 558–567. <https://doi.org/10.1080/00207233.20171330580>

- Sadeghian, S. (2016). La acidez del suelo: Una limitante para la producción de café. CENICAFÉ.
- Saito, K., Vandamme, E., Johnson, J.-M., Tanaka, A., Senthilkumar, K., Dieng, I., Akakpo, C., Gbaguidi, F., Segda, Z., Bassoro, I., Lamare, D., Gbakatchetche, H., Belay, B., Jaiteh, F.,
- Sales, B. (2006). Caracterización de la materia orgánica de suelos representativos de ecosistemas amazónicos del Perú, departamento de Ucayali, e influencia de su uso y manejo en el secuestro del carbono [Tesis de maestría]. <https://core.ac.uk/download/pdf/36094475.pdf>
- Sánchez, A., Del Campillo, M. C., Torrent, J., & Jones, D. L. (2014). Organic acids alleviate iron chlorosis in chickpea grown on two P-fertilized soils. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 74(4), 421–426. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162014005000024>
- Sánchez, P. (2016). Manejo de la materia orgánica para la producción sostenible. IICA.
- Schaetzl, R. J., & Anderson, S. (2009). *Soils: Genesis and geomorphology*. Cambridge University Press.
- Schmidt, S. B., & Husted, S. (2019). The biochemical properties of manganese in plants. *Plants*, 8(10), 381. <https://doi.org/10.3390/plants8100381>
- Schmidt, S. B., Jensen, P. E., & Husted, S. (2016). Manganese deficiency in plants: The impact on photosystem II. *Trends in Plant Science*, 21(7), 622–632. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.03001>
- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V., & Thiel, H. (2015). Role of magnesium fertilisers in agriculture: Plant–soil continuum. *Crop and Pasture Science*, 66(12), 1219–1229. <https://www.researchgate.net/publication/287800497>
- Silva, P., Silva, H., Garrido, M., y Acevedo, E. (2015). Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130642>

- Smith, F. W. (1986). Interpretation of plant analysis: Concepts and principles. En D. J. Reuter & J. B. Robinson (Eds.), *Plant analysis: An interpretation manual* (pp. 1–33). Inkata Press.
- Sonon, L., Kissel, D., & Saha, U. (2022). Exchange capacity and base saturation. University of Georgia Extension. https://secure.caes.uga.edu/extension/publications/files/pdf/C1040_3.PDF
- Soto, E., Hernández, M., Luna, H., Ortiz, E., y García, E. (2016). Evaluación del contenido de materia orgánica en suelos agrícolas y su relación carbono/nitrógeno. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(7), 45–55. <https://www.reibci.org/publicados/2016/oct/1800105.pdf>
- Srinivas, K., Singh, H., Vanaja, M., Raju, A. S., & Sharma, K. L. (2006). Effect of chemical composition of plant residues on nitrogen mineralization. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 54(3), 299–304.
- Srinivasarao, C., Wani, S. P., Sahrawat, K. L., Rego, T. J., & Pardhasaradhi, G. (2008). Zinc, boron, and sulfur deficiencies are holding back the potential of rainfed crops in semi-arid India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(5–6), 702–723. https://ijpp.gau.ac.ir/article_602_85e6e41d033ccbfe5a25cfbdc4e7692a.pdf
- Suganya, A., Saravanan, A., Baskar, M., Pandiyarajan, P., & Kavimani, R. (2020). Agronomic biofortification of maize (*Zea mays* L.) with zinc using graded levels of zinc combined with zinc-solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Nutrition*, 44(4), 497–512. <https://doi.org/10.1080/01904167.20201845383>
- Sumner, M. E., & Noble, A. D. (2003). *Soil acidification: The world story*. CRC Press.
- Swanson, M. (2025). Carbon to nitrogen ratio: The key to unlocking your soil potential. *Iowa Soybean Review*. <https://www.iasoybeans.com/newsroom/article/isr-january-2025-carbon-to-nitrogen-ratio-the-key-to-unlocking-your-soil-potential>
- Sys, C., Van Ranst, E., Debaveye, J., & Beernaert, F. (1993). *Land evaluation. Part III: Crop requirements*. FAO.

- Tan, K. H. (2011). *Principles of soil chemistry* (4th ed.). CRC Press.
- Torres, J., Sánchez, J., & Cayón, D. (2017). Nutrient accumulation models in the banana (*Musa AAA Simmonds cv. Williams*) plant under nitrogen doses. *Acta Agronómica*, 66(3), 366–373. <https://doi.org/1015446/acag.v66n358238>
- Uchida, R., & Hue, N. V. (2000). *Soil acidity and liming*. University of Hawaii.
- Valarezo, C. (2012). El suelo como recurso básico para el crecimiento de las plantas. Universidad Nacional de Loja.
- Valarezo, C., Íñiguez, M., Valarezo, L., y Guaya, P. (1998). Condiciones físicas de los suelos de la región sur del Ecuador. Universidad Nacional de Loja.
- Vázquez, A., y Rodríguez, A. (2017). Capacidad de intercambio catiónico. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(3), 52–60. <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263149891022.pdf>
- Veneklaas, E. J., Lambers, H., Bragg, J., Finnegan, P. M., Lovelock, C. E., Plaxton, W. C., Price, C. A., Scheible, W.-R., Shane, M. W., White, P. J., & Raven, J. A. (2012). Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist*, 195(2), 306–320. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.201204190.x>
- Wang, F., Rose, T., Jeong, K., Kretschmar, T., & Wissuwa, M. (2016). The knowns and unknowns of phosphorus loading into grains and implications for phosphorus efficiency in cropping systems. *Journal of Experimental Botany*, 67(5), 1221–1233. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv517>
- Wang, Z., Hassan, M. U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F., & Li, X. (2019). Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1727. <https://doi.org/10.3389/fpls.201901727>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcgl64>

- White, R. E. (2006). Principles and practice of soil science: The soil as a natural resource (4th ed.). Blackwell Publishing.
- Winston, E., Op, J., Marsh, T., Lempke, H., Aung, O., Nyunt, T., & Chapman, K. (2005). Arabica coffee manual for Myanmar. FAO. <https://openknowledge.fao.org/>
- World Health Organization. (2016). WHO guideline: Use of multiple micronutrient powders. WHO.
- Yitagesu, Y., & Shimels, S. (2020). Nutrition requirement, management and factors affecting yields of Arabica coffee (*Coffea arabica* L.): A review. *Journal of Plant Science*, 8(2), 34–45. <https://www.medtextpublications.com/>
- Yong, J. W. H. (2011). Nitrate signal sensing and transduction in higher plants. *Plant, Cell & Environment*, 34(12), 2073–2086. <https://www.researchgate.net/publication/255766099>
- Zaman, M., Shahid, S. A., & Heng, L. (2018). Guidelines for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3>

Capítulo 4

Unidades de suelos de plantaciones seleccionadas de café arábigo en diferentes agroecosistemas de la provincia de Loja: propiedades físico-químicas, aptitud y manejo

Con la finalidad de caracterizar los suelos en el ambiente natural de cinco sistemas agroforestales de café arábigo, seleccionados de cuatro cantones de la provincia de Loja, se describieron 14 perfiles en un rango de altitud de 800 a 2.100 m s. n. m. La secuencia de actividades realizadas, se anotan a continuación:

1. Selección del sector, ubicación del perfil (coordenadas) y altitud (m s. n. m.).
2. Caracterización del ambiente natural del perfil del suelo: fisiografía (relieve y grado de pendiente), material parental, condiciones de drenaje, entre otras.
3. Descripción general del perfil y de cada una de sus capas y horizontes: espesor, color, textura, estructura, consistencia, distribución de raíces, siguiendo la Guía para la Descripción de Suelos (FAO, 2009).
4. Determinación de la infiltración básica en pruebas por triplicado, mediante el método del doble anillo.
5. Determinación en muestras inalteradas de los dos horizontes superiores de la densidad aparente (D_a) y la retención de humedad a diferentes valores de succión. A partir de esta información se derivaron los valores de: capacidad de aireación (CA), agua

aprovechable (AA), y la condición física del suelo para el crecimiento de las plantas.

6. Muestras de la capa superior de 00-25 cm, para análisis de laboratorio de: pH, acidez cambiante, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, bases cambiables, saturación de bases y nutrientes disponibles; y, la evaluación biológica de la fertilidad del suelo, siguiendo la metodología del elemento omitido (Van Diest, 1983; Valarezo, 1985; Guayllas 1988). El proceso metodológico de la referida evaluación se presenta en el Anexo G.

Complementariamente, se realizó la clasificación del clima de cada sitio, aplicando los parámetros de la Clasificación de Climas del Ecuador de Cañadas, de cuya información se infirieron los regímenes de temperatura y humedad del suelo. La clasificación taxonómica del suelo hasta el nivel de Subgrupo, se realizó utilizando las claves del USDA Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010).

Sobre la base de toda la información generada, se realizó la evaluación de la aptitud del suelo para el cultivo del café arábigo, siguiendo el sistema de evaluación de uso específico de la tierra propuesto por Sys (2000), que consiste en comparar las características y limitaciones del suelo con los requisitos del tipo de utilización.

Finalmente, en cada unidad de suelos representativa se dan las orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua, tanto para las plantaciones de café arábigo en producción; como para las nuevas plantaciones, en la perspectiva de lograr los mayores rendimientos del sistema biodiverso en su conjunto; y, al mismo tiempo, controlar la erosión, dado que todas las plantaciones están ubicadas en terrenos de ladera.

Es pertinente señalar que, para cada nutriente se realiza la comparación del rango de su disponibilidad, tanto de los análisis reportados por el laboratorio, como de biomasa seca de la evaluación biológica.

A continuación, siguiendo una secuencia altitudinal descendiente (de 2.100 a 800 m s. n. m.), para cada unidad de suelo representativa de los sectores estudiados, se describen las condiciones del entorno natural; así como, las características morfométricas y las propiedades físico-químicas, clasificación, fertilidad, aptitud y manejo de los perfiles representativos. En los anexos A, B, C, D y E, se presenta la descripción de los perfiles adicionales de cada sector. El Anexo F contiene los diagramas obrotérmicos elaborados a partir de la información de temperatura y precipitación mensual.

4.1. Suelos de los sistemas agroforestales de café arábigo en la hacienda El Cristal, cantón Loja

4.1.1 Aspectos generales

La hacienda El Cristal se encuentra en la Sierra Austral del Ecuador, entre los barrios Pueblo Nuevo y Tres Leguas de la parroquia Malacatos del cantón Loja (kilómetro 15 de la vía carrozable Loja-Malacatos), en la parte alta de la cuenca binacional Catamayo Chira. Cubre una superficie de 600 hectáreas, en un paisaje de montaña, con un rango de altitud de 1.200 a 3.700 m s.n m. Las coordenadas planas (UTM zona 17S) son de: 9.544.493 N a 9.544.543 N, y de 700.338 E a 700.424 E (Figura 4.1.1).

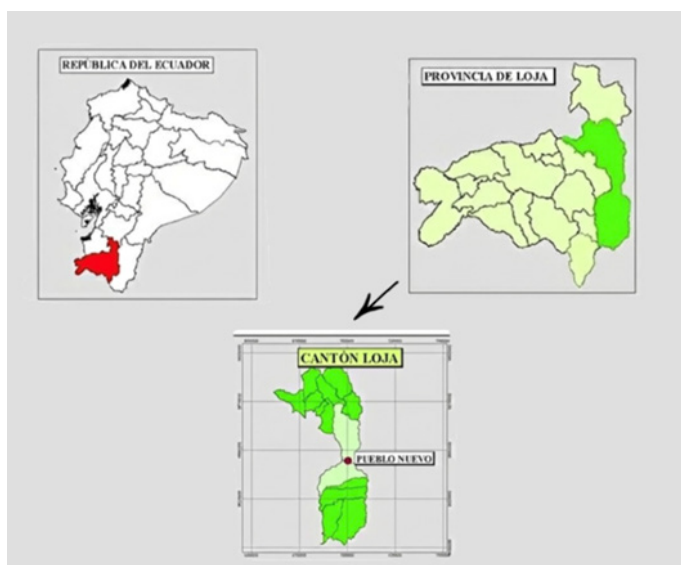


Figura 4.1.1. Ubicación de la hacienda El Cristal, barrio Pueblo Nuevo, cantón Loja, provincia de Loja, Ecuador.

Geológicamente, la hacienda El Cristal se asienta en la Unidad Chiguinda (Pz_{lc}) de la cordillera Real, en la región Sierra al sur de Ecuador, que se describe en la Hoja 57 Gonzanamá, del Mapa Geológico del Ecuador (escala 1:100.000). Incluye secuencias de rocas metamórficas de bajo grado, con filitas, cuarcitas, esquistos pelíticos y esquistos grafitosos (Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico, 2017).

En el predio, los sistemas agroforestales de café arábigo (asociado con diferentes especies frutales y arbóreas) cubren 10 ha. En éstos, se describieron cuatro perfiles de suelos en un rango de altitud de 1963 a 2.071 m.s.n.m, en cada una de las siguientes formas del terreno: 1.- vertiente de loma, pendiente de 40 % (escarpada); 2.- vertiente de loma, pendiente de 60 % (muy escarpada); 3.- vertiente de cresta, pendiente

de 73 % (muy escarpada); y, 4.- terraza estrecha en pie de vertiente de 14% de pendiente (moderadamente escarpada).

Los suelos de las tres vertientes con diferente grado de pendiente, se han formado a partir de rocas metamórficas, tales como: lutitas, filitas, cuarcitas, esquistos e intrusivas, areniscas, limonita y tobas de la Unidad Chiguinda (Pz_{Lc}); en cambio, el material del suelo de la terraza en pie de vertiente corresponde a una mezcla de material pedregoso de diferente tamaño, del antiguo lecho del río, con material fino procedente de las partes superiores.

El suelo del sistema agroforestal de café arábigo y alisos (*Alnus acuminata* H.B.K) instalado en la vertiente de loma de 40 % de pendiente, por presentar las menores limitaciones físicas para el cultivo del café arábigo, fue seleccionado para la realización, tanto de los análisis físicos-químicos, como la evaluación de la fertilidad actual, mediante el análisis de laboratorio y el método biológico. Las características de este suelo se describen a continuación. La descripción de los tres perfiles restantes se presenta en el Anexo A.

4.1.2. Suelo del sistema agroforestal de café y alisos

Código del perfil: PC1

Fecha de descripción del suelo: 18/10/2017

Autores: Carlos Valarezo Manosalvas, Miguel Villamagua, Pedro Guaya Pauta, Luís Valarezo Manosalvas y Paola Zambrano.

4.1.2.1. Características de la unidad

Clasificación Taxonómica: *Sombric Kandiodults* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: Zona 17; 7004299 E; 95444493 N.

Altitud: 2.071 m s. n. m

Fisiografía: Vertiente de loma, pendiente de 40 % (escarpada), en paisaje de montaña

Material Parental: Rocas metamórficas de la Unidad Chiguinda (PZ_{Lc}), filitas.

Drenaje interno: bueno.

Profundidad efectiva: 0,7 m

Sistema agroforestal: cafetos (*Coffea arabica* L.) de 30 meses de edad, en asociación con alisos (*Alnus acuminata* H.B.K) de cinco años, con 40% de sombra.

4.1.2.2. Descripción general del suelo

Suelo muy profundo (120 cm), constituido por una capa orgánica de 3 cm de espesor; y los horizontes: Ap de 8 cm; AE de 22 cm; Bt de 20 cm; Bth de 20 cm; y, C de más de 50 cm; este último, con 40% de manchas pardo amarillentas. El color más oscuro del horizonte Bth evidencia enriquecimiento de arcilla y humus coloidal, materiales que han migrado desde los horizontes superiores. Las raíces medianas, finas y muy finas se observan hasta 70 cm (profundidad efectiva). La descripción individual de los horizontes se presenta en el Tabla 4.1.1. La Figura 4.1.2. contiene la fotografía del perfil del suelo.

Tabla 4.1.1. Descripción de los horizontes del perfil PC1 del suelo del sistema agroforestal de café y alisos, pendiente del terreno 40%, hacienda El Cristal, cantón Loja.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Oe	03–00	Capa orgánica con abundantes raíces, muy finas, finas y gruesas
Ap	00–08	Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) húmedo, franco limoso (tacto), con bloques subangulares finos y medios, moderados, ligeramente adherente, ligeramente plástico, friable; raíces comunes, medias; límite brusco y plano.
AE	08–30	Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) húmedo; franco limoso (tacto); bloques subangulares finos y medios, moderados; ligeramente adherente, ligeramente plástico, friable; raíces pocas, finas; límite brusco y plano.
Bt	30–50	Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) húmedo; franco arcillo limoso (tacto); bloques subangulares, medios y gruesos, moderados; ligeramente adherente, ligeramente plástico, friable; cutanes zonales y delgados; raíces pocas, finas; límite brusco y plano.
Bth	50–70	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) húmedo; franco arcillo limoso (tacto); bloques subangulares, gruesos y muy gruesos, moderados; ligeramente adherente, ligeramente plástico, friable; cutanes zonales y delgados; raíces muy pocas, muy finas; límite brusco y plano.
C	70–120+	Pardo rojizo (2.5YR 4/3) húmedo, con 40% de manchas pardo amarillento (10YR 5/6), grandes y definidas; franco arcilloso (tacto); masivo; adherente, plástico y firme, sin raíces.



Figura 4.1.2. Perfil PC1 del suelo del sistema agroforestal de café y alisos, pendiente del terreno 40%, hacienda El Cristal, cantón Loja.

4.1.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo

En la Tabla 4.1.2 se presentan los datos sobre las características físicas de los dos primeros horizontes del perfil. La densidad aparente (D_a) para los horizontes Ap (00-08 cm) y AE (08–30 cm), es de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$, valor que se encuentra dentro del rango promedio para la clase textural franco limoso a limoso. El contenido de agua ($\% \theta_v$) a saturación (SS: $pF = 0,0$), que equivale a la porosidad total, es de 47,2 y 54,4 $\% \theta_v$, en su orden, lo que significa que alrededor de la mitad del volumen del suelo corresponde a poros. La capacidad de campo (CC: $pF=2,52$) va de 42,2 a 48,8 $\%v$, respectivamente, lo que indica que estas capas retienen una elevada cantidad de humedad después de haberse drenado el agua de los macro-poros (diámetro >30 micras). El punto de marchitez permanente (PMP: $pF 4,2$) es de 9,6 y 127 $\% \theta_v$, respectivamente. El agua aprovechable es de 32,6 y 36 $\% \theta_v$ (alta); en cambio, la capacidad de aireación (CA) es 5 $\%v$ (muy baja) y 5,7 $\%v$

(baja), en su orden. Consecuentemente, las condiciones físicas para el crecimiento de las plantas de las dos capas superiores se ubican en las zonas I y II del diagrama triangular (muy pobre y pobre), respectivamente. La velocidad de infiltración básica del agua en el suelo es de 2,7 cm h⁻¹ (media), lo cual guarda relación con su textura.

Tabla 4.1.2. Características físicas e hidrodinámicas de los dos primeros horizontes del suelo del sistema agroforestal de café y alisos en la hacienda El Cristal, cantón Loja (Zambrano, 2019)

Horizonte	Prof. cm	Da g cm ⁻³	Contenido de humedad a diferentes succiones (% Θ_v)			Distribución de volúmenes (%v) a capacidad de campo(pF=2,52)				Condición física del suelo: zona	Infiltración básica (cmh ⁻¹)
			SS	CC	PMP	AA	VS	CA	VSFI		
Ap	00-08	1,2	47,2	42,2	9,6	32,6	52,8	5	62,4	I	2,7
AE	08-30	1,2	54,4	48,8	12,7	36,1	45,6	5,6	58,3	II	

Nota. D = densidad aparente; AA = agua aprovechable; VS = volumen de sólidos; CA = capacidad de aireación; VPFI = volumen de poros físicamente inerte.

4.1.2.4. Características químicas

Las características químicas de la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café y alisos se presentan en la Tabla 4.1.3. El contenido de materia orgánica es muy alto (7,9%). La reacción es muy fuertemente ácida (pH 4,5). La acidez cambiante ($Al^{3+} + H^+$) es alta [4,2 cmol (+)kg⁻¹]. La capacidad de intercambio catiónico es baja [7,2 cmol (+)kg⁻¹]. La suma de bases es muy baja [3,3 cmol (+)kg⁻¹]. El calcio y el magnesio cambiables se encuentran en el rango bajo [1,9 y 0,8 cmol (+)kg⁻¹], respectivamente. El potasio está en rango medio [0,5 cmol (+)kg⁻¹]. La saturación de bases es baja (45,8%). La proporción porcentual de Ca²⁺/Mg²⁺/K⁺ es de 67,8/18,6/17,8, en su orden.

Tabla 4.1.3 Propiedades químicas de la capa de 00–25 cm del suelo del sistema agroforestal de café y alisos, pendiente 40 %, en la hacienda El Cristal (Zambrano, 2019).

M.O	pH _{H2O}	Al ³⁺	(H ²⁺ + Al ³⁺)	CIC	Cationes cambiabiles				SB %	Proporción de cationes (%)		
					cmol (+)kg ⁻¹					Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
%					Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	
7,9	4,5	2,1	4,2	7,2	1,9	0,8	0,5	0,1	44,8	67,8	18,6	17,8

4.1.2.5. Fertilidad actual

4.1.2.5.1. Análisis de laboratorio

En la Tabla 4.1.4. se presentan los contenidos promedio de los elementos disponibles, reportados por el laboratorio de Agrocalidad del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), para la capa de 00-25 cm del suelo de las muestras tomadas en tres lotes del sistema agroforestal de café y alisos, extraídos con la solución de Olsen Modificada (NaHCO₃, 0,5 N + EDTA 1M). Los resultados indican que los contenidos de Fe y Cu se ubican en el rango alto; N, P, S y Mn en el rango medio; y, K, Mg, Zn y B en el rango bajo.

Tabla 4.1.4. Contenido de los elementos disponibles en la capa de 00–25 cm, del sistema agroforestal de café y alisos de la hacienda El Cristal (promedio de tres lotes)

Elemento	Unidad	Valor	Interpretación
N	%	0,2	M
P	mg kg ⁻¹	16,6	M
K	cmol (+)kg ⁻¹	0,2	B
Mg	cmol (+)kg ⁻¹	0,2	B
S	mg kg ⁻¹	21,1	M
Zn	mg kg ⁻¹	2,1	B
Cu	mg kg ⁻¹	4,3	A
Mn	mg kg ⁻¹	5,4	M
B	mg kg ⁻¹	<0.5	B
Fe	mg kg ⁻¹	546,5	A

Nota: A = Alto; M = Medio; B = Bajo

4.1.2.5.2. Evaluación biológica de la fertilidad

Los valores promedio de los porcentajes de biomasa seca de la planta indicadora (tomate) a los sesenta días, para cada elemento omitido en las diferentes soluciones nutritivas, en relación con aquella de la solución completa (100 %), en la capa de 00-25 cm del suelo de tres lotes del sistema agroforestal de café y alisos se presentan en la Tabla 4.1.5. La evaluación biológica permitió clasificar en el rango alto a Zn, Cu, Mn y Fe; en el rango medio a K, Mg, S, y B; y, en el rango bajo a N, P y el testigo absoluto.

Tabla 4.1.5. Valores promedio de tres repeticiones del porcentaje de la masa seca de la planta indicadora (tomate), a los 60 días, en relación con la solución completa (100 %), de la capa de 00-25 cm del suelo, del sistema agroforestal de café y alisos en la hacienda El Cristal

Solución	Materia Seca g	%	Interpretación
-SC	10,2	100	
- N	2,1	20,6	B
- P	0,9	8,8	B
- K	5,8	56,9	M
- Mg	6,2	60,8	M
- S	5,1	50,0	M
- Zn	7,8	76,5	A
- Cu	8,1	79,4	A
- Mn	8,1	79,4	A
- B	6,3	61,8	M
- Fe	7,8	76,5	A
Testigo	0,9	8,8	B

Nota: SC: Solución completa. Testigo: únicamente con agua destilada. A = Alto; M = Medio; B = Bajo

Fuente: Zambrano (2019).

La Figura 4.1.3 muestra los resultados de la prueba de rangos múltiples de Tukey aplicada a los valores promedio de tres repeticiones de la biomasa seca (g) de la planta indicadora (tomate), evaluada a los 60 días en el suelo representativo del sitio El Cristal. Los resultados

evidencian la existencia de diferencias estadísticamente significativas al nivel de significancia del 5 % entre la solución completa (SC); las soluciones con omisión de Mn, Cu, Zn y Fe, clasificadas en el rango alto; las soluciones con omisión de B, Mg, K y S, ubicadas en el rango medio; y las soluciones con omisión de N y P, correspondientes al rango bajo; igualmente el testigo absoluto, los cuales coinciden con los rangos de la Tabla 4.1.5.

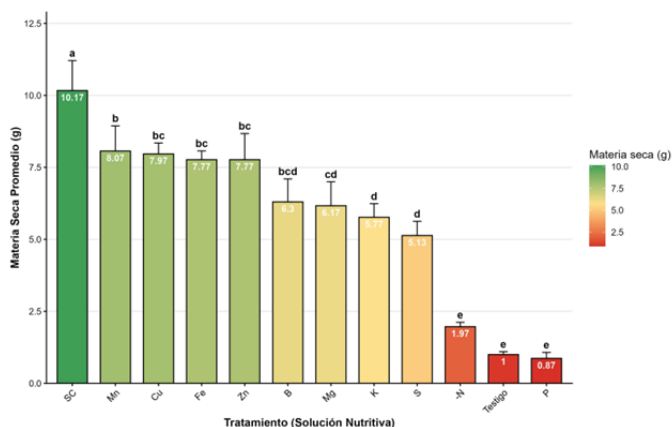


Figura 4.1.3. Prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la biomasa seca de la planta indicadora (tomate) a los 60 días de la evaluación biológica en el sitio El Cristal.

Nota. SC = solución completa; las letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < .05$).

4.1.2.5.3. Análisis de laboratorio vs. evaluación biológica

En la Figura 4.1.4. se ilustra la correspondencia de los rangos de disponibilidad de los elementos, entre el análisis químico y la evaluación biológica, en la capa de 00-25 cm del sistema agroforestal de café y alisos. Se observa que solamente coinciden en el rango alto el Cu y Fe, y en el rango medio el S. Según el análisis químico el N y P se encuentran en el rango medio; en cambio, la evaluación biológica los ubica en el rango bajo. El Zn es el caso más notable; por cuanto, el análisis químico

lo ubica en el rango bajo, en tanto que según la evaluación biológica pertenece al rango alto.

Las diferencias de crecimiento de la planta indicadora en las soluciones de la evaluación biológica claramente se observan en la Figura 4.1.5. La desigualdad de desarrollo de la planta en la solución completa (SC) y el testigo absoluto (únicamente en agua destilada) es incuestionable.

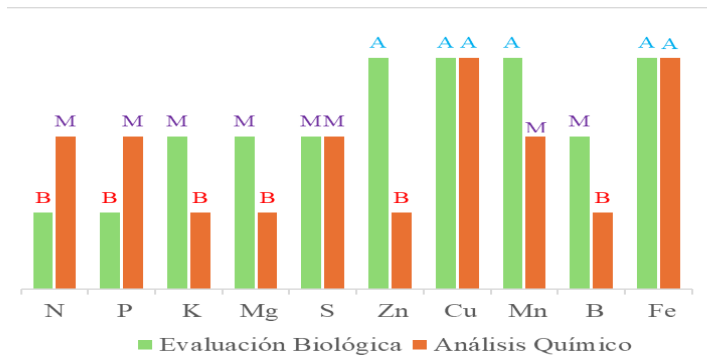


Figura 4.1.4. Correspondencia entre la evaluación biológica y el análisis químico de la disponibilidad de nutrientes en la capa de 00-25 cm del sistema agroforestal de café y alisos de la hacienda El Cristal.



Figura 4.1.5. Estado de desarrollo de la planta indicadora (tomate) a los sesenta días en las diferentes soluciones de la evaluación biológica, en el suelo de la capa de 00-25 cm del bloque 1 del sistema agroforestal de cafetos y alisos de la hacienda El Cristal (Zambrano, 2019).

Nota. SC = solución completa; T = testigo absoluto, solamente con agua destilada.

4.1.2.6. *Aptitud del suelo para café arábigo*

La aptitud del suelo del sistema agroforestal de café y alisos de la hacienda El Cristal, según el sistema de evaluación de la aptitud de la tierra propuesto por Sys (2000) para café arábigo, se describe a continuación:

- *Características topográficas del terreno:* debido a que la pendiente del terreno es de 40 %, la aptitud de la tierra corresponde a la clase S3.
- *Condiciones de humedad:* el drenaje interno del suelo hasta una profundidad de 70 cm es bueno; además, no existen limitaciones por riesgos de inundación, ni la presencia de una tabla de agua a menos de 70 cm de profundidad.
- *Características físicas del suelo:* no existen limitaciones por textura o por exceso de CaSO_4 o CaCO_3 . Debido a que las raíces se extienden en promedio hasta 70 cm (profundidad efectiva), la aptitud corresponde a la clase S3. Sin embargo, la baja capacidad de aireación de los dos horizontes superiores es una limitación importante, la cual se atribuye a la degradación de la estructura del suelo, con la concomitante pérdida de la macro-porosidad.
- *Fertilidad potencial:* El contenido de materia orgánica es alto; en cambio, la CIC de la arcilla y la suma de cationes constituyen limitaciones en la fertilidad potencial. Por ser la reacción del suelo muy fuertemente ácida (pH: 4,5), la saturación de bases baja, y la acidez cambiante elevada (Al^{3+} tóxico), la aptitud pertenece a la clase N1; sin embargo, esta limitación es corregible, por lo que se lo ubica en la clase S3.
- *Salinidad y alcalinidad:* estos suelos no presentan limitaciones por exceso de sales o sodio.

- *Fertilidad actual*: según la evaluación biológica, la disponibilidad de N y P se ubican en el rango bajo y en el rango medio para K, Mg, S, y B.

4.1.2.7. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua

La evaluación biológica de la fertilidad evidenció que, en las tres repeticiones del suelo sistema agroforestal de café con alisos, el testigo absoluto solamente produjo el 8,8% de la masa seca de la planta en la solución completa, de lo cual se deduce que sería posible elevar muy significativamente los rendimientos de cualquier cultivo si se manejaría óptimamente las condiciones físicas, químicas y de fertilidad del suelo (incluido un adecuado rango de tensión de humedad).

A continuación, se anotan las orientaciones conducentes a superar las limitaciones antes mencionadas, en la perspectiva de generar en el suelo un ambiente adecuado para el desarrollo de las variedades promisorias de café arábigo para la zona, de manera de asegurar sostenidamente los más altos rendimientos, las mismas que deberán ser comprobadas experimentalmente:

Plantaciones en producción

- Incrementar la porosidad de aireación (macroporos) en los dos horizontes superiores, al menos hasta 15 %v (Enriquez y Duicela, 2014), mediante la aplicación de materiales tales como compost, aserrín, bagazo, biomasa de *azolla*, biomasa de la poda de los alisos, entre otros; todo esto, en un círculo de 1,2 m de diámetro alrededor de la planta.
- Corregir la fuerte acidez del suelo, por cuanto, el aluminio al ser soluble reacciona con los fosfatos, haciéndolo insolubles, forma en

la cual la planta no puede tomar el P. Para ello se debe elevar el pH mediante la aplicación de una dosis suficiente de cal agrícola (preferentemente dolomítica que contiene calcio y magnesio) para neutralizar el aluminio intercambiable, en un rango de 1,5 a 2,0 cmol (+)kg⁻¹ de Ca²⁺ por cada cmol (+)kg⁻¹ de Al³⁺.

- Aplicar N y P, cuyos contenidos disponibles según la evaluación biológica se ubican en el rango bajo; además, K, Mg, S, y B, elementos que se encuentran en el rango medio y que progresivamente serán exportados con las cerezas cosechadas. Las dosis y las fuentes de fertilizantes a aplicar para nutrir adecuadamente los cafetos se deberá calcular en función de la edad de las plantas y los rendimientos de las cerezas.
- Balancear la proporción de cationes del complejo de intercambio mediante la aplicación suficiente de K, de manera de disminuir la relación (Ca+Mg)/K a un rango de 35–45. También, mejorar la relación Ca/Mg y Mg/K incrementando el Mg.
- Monitorear anualmente la evolución de la reacción del suelo y la fertilidad actual (contenidos disponibles de: N, P, K, Ca, Mg, S, Zn y B).

Nuevas Plantaciones y renovación de cafetales

- Elevar la macroporosidad de la capa de 00-25 cm y asegurar la formación de agregados estables; para ello, en el sitio de la plantación se debe trazar una circunferencia de 1,2 m de diámetro, cubrir homogéneamente la superficie el círculo con 5 kg de los materiales orgánicos existentes en la finca, la dosis de fósforo (de cualquier fuente disponible, al menos para diez años de producción) y de cal dolomítica (para corregir la acidez); luego, mezclar uniformemente hasta una profundidad de 25 cm. Con la finalidad de facilitar el desarrollo de la raíz pivotante, en el centro del círculo realizar un hoyo de 10 a 15 cm de diámetro y 1 metro

de profundidad (se puede utilizar un barreno tipo Edelman o un hoyador para postes). Finalmente rellenar el hoyo con el material mezclado de la capa superior, y a continuación sembrar la planta

Manejo y conservación del suelo y el agua.

- Asegurar la humedad suficiente en el suelo, especialmente en la temporada seca, mediante riego por goteo debidamente controlado, pero teniendo en cuenta que el cafeto necesita de una corta temporada seca para promover la floración.
- Implementar barreras vivas en curvas de nivel en todo el terreno, trazadas a una distancia vertical de 1,5 m. La barrera viva puede ser de hierba luisa (*Aloysia citrodora*), sábila (*Aloe vera*); agave (*Agave tequilana*), u otras especies de plantas adaptadas a las condiciones agroclimáticas del lugar, cuidando que no entren en competencia con los cafetos.
- Las hileras de cafetos y de los arbustos, árboles y cultivos asociados deben correr paralelas a las barreras vivas.
- Construir una zanja de desviación en la parte superior del sistema agroforestal para interceptar la escorrentía de las partes altas, la cual deberá estar conectada a vías de agua seguras para evitar la formación de cárcavas.

4.1.2.8. Avances en la corrección de la acidez y la fertilización

Villamagua et al. (2021) reportan los resultados iniciales de un experimento de corrección de la acidez y de aplicación de nutrientes, instalado en el sistema agroforestal de café arábigo y alisos de la hacienda El Cristal. Así, entre abril y julio de 2019 se estudió la evolución de la acidez del suelo frente a la aplicación de materiales neutralizantes; tanto en una fase de incubación rápida de laboratorio, como en un experimento de campo. Las dosis de 2,0 y 2,5 cmol (+)kg⁻¹

de Ca, determinadas mediante la prueba de incubación, elevaron el pH del suelo desde 4,2 a 5,3 y 5,1; la acidez cambiante descendió en 1,2 y 1,3 cmol (+)kg⁻¹ suelo y el Al³⁺ disminuyó en 1,0 y 0,8 cmol (+)kg⁻¹, en su orden.

En la fase de campo se estudió la disponibilidad de nutrientes en el suelo y el crecimiento del cafeto por efecto de la aplicación de 5 y 6,3 t ha⁻¹ de CaCO₃, en un diseño de bloques al azar con tres replicas. Al inicio del experimento cada planta recibió: N 20, P 12, K 10,3, Mg 24, S 30, B 1,0 y Zn 0,6 g. Para las dos dosis de cal, la reacción del suelo se incrementó en 1,0 unidad de pH en relación al testigo (Figura 4.1.6); mientras que, la acidez intercambiable disminuyó desde el rango tóxico al bajo y el Al³⁺ de tóxico a medio (Figura 4.1.7). La CICE⁶ se incrementó desde el rango muy bajo a medio; las bases cambiantes pasaron del rango bajo al medio y el porcentaje de saturación de bases se incrementó del rango medio a muy alto.

El contenido de los elementos disponibles (N, P, S, Ca, Mg, K, Cu y Zn) determinados en el laboratorio utilizando la solución extractora de Olsen Modificada, evolucionó al rango alto, a excepción del Fe y Mn que permanecieron en el rango medio, y del B que pasó de bajo a medio.

Con la aplicación de CaCO₃ más la fertilización, el crecimiento promedio de los cafetos fue de 0,1 cm día⁻¹ frente al testigo 0,06 cm día⁻¹ (66,7%), que también recibió la fertilización de base. Hasta los 120 días del monitoreo, el número de hojas promedio se incrementó (0,17 hojas día⁻¹); el diámetro de copa aumentó en 200 y 300 %, y el diámetro basal se incrementó en 0,36 y 0,48 cm. Las evidencias de crecimiento de los cafetos del testigo confirman que, en estos suelos ácidos solamente la aplicación de nutrientes no es suficiente para promover el desarrollo de las plantas; por lo que, en primer lugar, se debe corregir la acidez.

6 CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva.

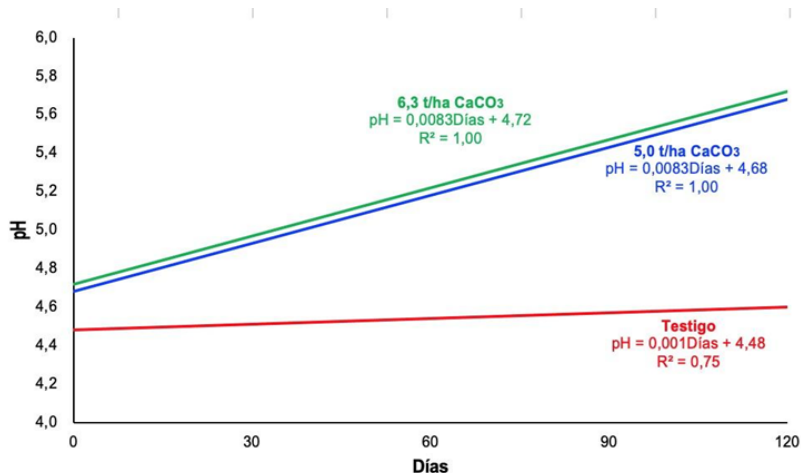


Figura 4.1.6. Regresión de los valores de pH durante 120 días de monitoreo, para la dosis de 0,0; 5,0 y 6,3 t ha^{-1} de CaCO_3 , en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de cafeto y alisos de la hacienda El Cristal, Sector Pueblo Nuevo (Villamagua et al., 2021).

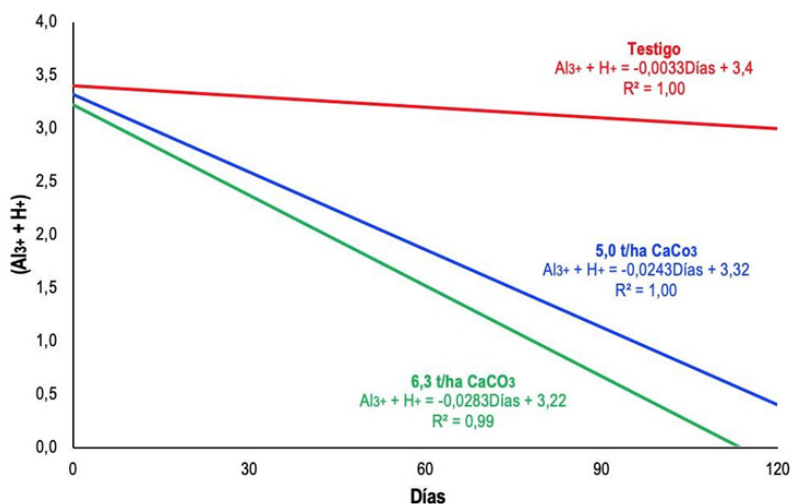


Figura 4.1.7. Regresión de la acidez cambiante durante 120 días de monitoreo, para la dosis de 0,0; 5,0 y 6,3 t ha^{-1} de CaCO_3 , en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de cafeto y alisos de la hacienda El Cristal, Sector Pueblo Nuevo (Villamagua et al., 2021).

4.2. Suelos de los sistemas agroforestales de café arábigo en el sector Consapamba, cantón Espíndola

4.2.1. Aspectos generales

El sector Consapamba está ubicado en la parroquia Bellavista del cantón Espíndola, a un kilómetro al sur del centro parroquial de la ciudad de Amaluza (Figura 4.2.1). Limita al norte con el barrio el Guabo, al sur con el barrio La Vaquería, al este con el barrio Cofradía y al oeste con la parroquia Jimbura. Las coordenadas planas son: desde 9492435 a 9492552 N; y, de 674299 E a 674328 E.

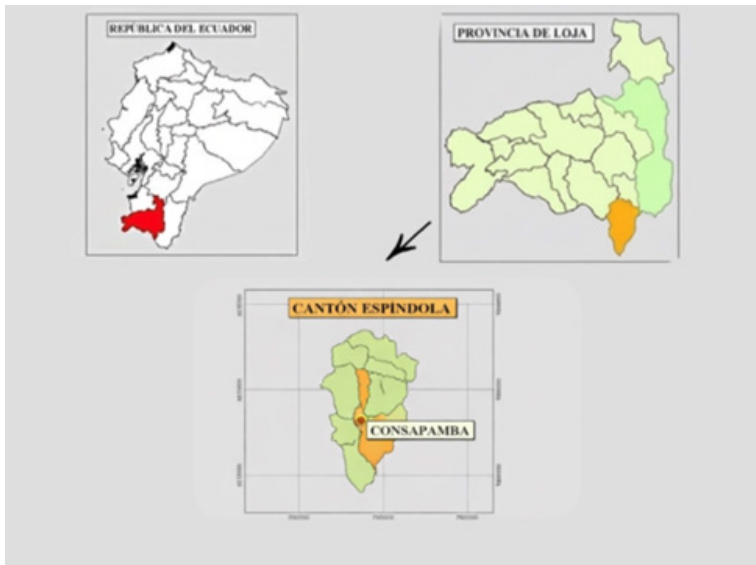


Figura 4.2.1. Ubicación del sector Consapamba en relación al cantón Espíndola, a la provincia de Loja y al Ecuador (Zambrano, 2019).

Los datos de clima registrados por la estación meteorológica de Amaluza del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), ubicada a 1.627 m.s.n.m. para un período de 30 años (1990-2019), indican que la temperatura media mensual es de 19,8 °C con una variación intermensual menor a 2 °C. El promedio de precipitación anual es de

1.002 mm, por lo que el clima de la zona corresponde a Subtropical Subhúmedo (Cañadas, 1983). El diagrama ombrotérmico (Anexo F), indica que la estación lluviosa se extiende desde octubre hasta mayo; consecuentemente, los meses ecológicamente secos comprenden el período de junio a septiembre. De la información de temperatura y precipitación se deduce que el régimen de humedad del suelo es ústico, y el de temperatura, isotérmico.

La geología del sector Consapamba se describe en la Hoja 58, que corresponde a Las Aradas, del Mapa Geológico del Ecuador (escala 1:100000) perteneciente al Sistema Montañoso Austral Andino del Ecuador, cuyas altitudes fluctúan entre 1.500 y más de 3.000 m s. n. m. El drenaje, con sus ríos Pindo y Espíndola, alimentan al río Catamayo-Chira, que fluye hacia el océano Pacífico en la costa peruana. En el lado occidental de la Hoja 58, las rocas volcánicas continentales del Paleoceno, Oligoceno y Plioceno se subdividen en cuatro unidades: Changaimina, Río Guayucu, El Ingenio y El Carmen del Laurel. En este contexto, Consapamba se asienta en la Unidad Changaimina (Pcch), constituida por tobas andesíticas y basálticas, brechas volcánicas, aglomerados, tobas andesíticas e ignimbritas (INIGMM, 2017).

En un rango de altitud de 1.762 a 1.805 m s. n. m. del sector Consapamba, en un sistema agroforestal de café arábigo se describieron tres perfiles de suelo correspondientes a las siguientes formas del terreno: 1.- vertiente de 15% de pendiente; 2.- vertiente de 20% de pendiente; y, 3.- pie de monte bajo el canal, vertiente de 20% de pendiente.

El suelo de la vertiente de 20% de pendiente (perfil P2C), fue seleccionado como representativo, tanto para la realización de los análisis físicos, químicos e hidrodinámicos, como para la caracterización de la fertilidad actual (análisis de laboratorio y evaluación biológica). La descripción de los suelos de la vertiente de 15% de pendiente, y del piedemonte bajo el canal, vertiente de 20% de pendiente se presenta en el Anexo B.

4.2.2. Suelo del sistema agroforestal de café en vertiente de montaña, pendiente de 20 %

Código del perfil: P2C.

Fecha de descripción del suelo: 22/08/2018

Autores: Carlos Valarezo Manosalvas, Miguel Villamagua, Pedro Guaya Pauta, Luís Valarezo Manosalvas y Paola Zambrano.

4.2.2.1. Características de la unidad

Clasificación Taxonómica: *Inceptic Haplustalfs* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010)

Ubicación del perfil: 674303 E 9492513 N

Altitud: 1.766 m s. n. m

Fisiografía: Vertiente de montaña de 20% de pendiente.

Material Parental: Lavas andesíticas y basálticas de la Unidad Changaimina (INIGMM, 2017).

Drenaje interno: bueno.

Sistema agroforestal: Café arábigo de dos años de edad, asociado con banano (*Musa paradisiaca* L.) y fréjol de palo (*Cajanus cajan* L. Huth.)

4.2.2.2. Descripción general del suelo

Suelo formado por depósitos de coluvión en dos momentos. El depósito superior se extiende hasta 55 cm de profundidad, con material coluvial pedregoso de 2 a 7 cm de diámetro y aristas pronunciadas. El depósito inferior (más antiguo) se extiende desde 65 cm hasta más 1,2 m de profundidad. El perfil está constituido por un horizonte Ap de 12 cm de espesor; un horizonte AE de 15 cm, con 30% de grava; y, un horizonte Bt de 28 cm. El horizonte 2C corresponde al depósito inferior. Las raíces muy pocas, medias y muy finas se observan hasta 55 cm de profundidad.

La descripción individual de los horizontes se presenta en la Tabla 4.2.1. La Figura 4.2.2. contiene la fotografía del perfil del suelo.

Tabla 4.2.1. Descripción de los horizontes del perfil P2C, del suelo del sistema agroforestal de café arábigo, en la vertiente de 20% de pendiente del sector Consapamba, cantón Espíndola, provincia de Loja.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00–12	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo; franco arcilloso (tacto), con gránulos finos, fuertes, adherente, plástico, friable; abundantes raíces muy finas, finas y medias.
AE	12–27	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo; franco arcilloso (tacto); con bloques subangulares medios y gruesos, moderados, adherente, plástico, friable
Bt	27–55	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; arcilloso (tacto); con bloques subangulares, medios y gruesos, moderados, muy adherente, muy plástico, friable
2C	55–120+	Pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) húmedo; arcillo limoso (tacto), masivo, sin raíces.

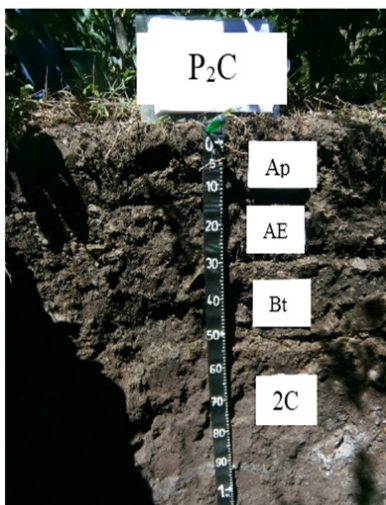


Figura 4.2.2. Perfil del suelo (P2C) del sistema agroforestal de café con banano y fréjol de palo, en la vertiente de pendiente de 20%, Consapamba, cantón Espíndola, provincia de Loja.

4.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo

En la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal seleccionado, la densidad aparente (D_a) es de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabla 4.2.2.), valor que se ubica en el promedio para un suelo de textura franco arcilloso. El contenido de agua a saturación (SS: $pF= 0,0$), que equivale a la porosidad total, es de $50,5 \% \theta_v$; por lo que, prácticamente la mitad del volumen del suelo corresponde a los poros. La capacidad de campo (CC: $pF = 2,52$) es de $45,4 \% \theta_v$, lo que indica que esta capa retiene una elevada cantidad de humedad después de haberse drenado el agua de los macroporos (diámetro >30 micras). El punto de marchitez permanente (PMP: $pF= 4,2$) es de $12,7 \% \theta_v$. Los volúmenes del suelo a capacidad de campo se distribuyen así: agua aprovechable $32,7 \% \theta_v$, (muy alta) y capacidad de aireación $5,1 \% v$ (bajo); en razón de ello, la condición física para el desarrollo radicular se ubican en la zona II del diagrama triangular, que corresponde a pobre.

La velocidad de infiltración básica es de $11,8 \text{ cm h}^{-1}$ (moderadamente rápida), lo cual no guarda relación con la textura de la capa superior (franco arcilloso), por lo que se deduce que el suelo habría desarrollado fisuras internas a consecuencia de la contracción de la arcilla en la estación seca.

Tabla 4.2.2. Propiedades físicas e hidrodinámicas de la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café en la vertiente de 20% de pendiente del sector Consapamba, cantón Espíndola.

Hori- zontes	Prof. (cm)	D_a (g cm^{-3})	Contenidos de humedad a diferentes succiones ($\% \theta_v$)				Distribución de volúmenes ($\%v$) a capacidad de campo (pF $= 2,52$)				Condición física del suelo: zona	Infiltración básica (cmh^{-1})
			SS	CC	PMP	AA	VS	CA	VPMI			
Ap/AE	00-25	1,2	50,5	45,4	12,7	32,7	49,5	5,1	62,2	I/II	11,8	

Nota. D = densidad aparente; AA = agua aprovechable; VS = volumen de sólidos; CA = capacidad de aireación; VPMI = volumen de poros físicamente inerte.

4.2.4. Características químicas

El valor de pH_{H_2O} de la capa de 00-25 cm es de 7,1 por lo que la reacción del suelo es prácticamente neutra (Tabla 4.2.3.); consecuentemente, los valores de Al^{3+} y la acidez cambiante ($Al^{3+}+H^+$) son muy bajos [0,2 y 0,3 $cmol (+)kg^{-1}$ respectivamente]. El contenido de materia orgánica es bajo (1,6%). La suma de bases es media 23 $cmol (+)kg^{-1}$. El calcio y el magnesio cambiables se encuentran en el rango alto [18,6 y 3,9 $cmol (+)kg^{-1}$], respectivamente. El potasio está en el límite de medio a bajo [0,3 $cmol(+)kg^{-1}$]. El sodio cambiante no representa peligro para el suelo, ni para los cultivos [0,2 $cmol(+)kg^{-1}$]. La saturación de bases es alta (100%). La proporción porcentual de $Ca^{2+}/Mg^{2+}/K^+$ es de 82/17/1.

Tabla 4.2.3. Propiedades químicas de la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café en la vertiente de 20% de pendiente del sector Consapamba, cantón Espíndola. (Zambrano, 2019).

M.O %	pH_{H_2O}	Al^{3+}	$(H^2+ Al^{3+})$	CIC	Cationes cambiables				SB %	Proporción de cationes (%)		
					$cmol (+)kg^{-1}$					Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+
					Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+		Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+
1,6	7,1	0,3	0,2	16,2	18,6	3,9	0,3	0,2	Sat	81	17	1

4.2.5. Fertilidad actual

4.2.5.1. Análisis de laboratorio

Los contenidos de los elementos disponibles para las plantas de la capa de 00-25 cm del suelo representativo del sistema agroforestal de café, reportados por el laboratorio de AGROCALIDAD, extraídos con la solución de Olsen Modificada se presentan en la Tabla 4.2.4. Los resultados indican que los contenidos de P, Mg, y Fe se ubican en el rango alto; N, K, S, Cu y Mn en el rango medio; y, N, Zn y B en el rango bajo.

Tabla 4.2.4. Contenido de los elementos disponibles en de la capa de 00-25 cm del suelo de la vertiente de 20 % del sistema agroforestal de café en el sector Consapamba, cantón Espíndola

Elemento	Unidad	Valor	Interpretación
N	%	0,08	B
P	mg kg ⁻¹	30,4	A
K	cmol (+) kg ⁻¹	0,29	M
Mg	cmol (+) kg ⁻¹	2,42	A
S	mg kg ⁻¹	11,41	B
Zn	mg kg ⁻¹	2,44	B
Cu	mg kg ⁻¹	3,95	M
Mn	mg kg ⁻¹	12,97	M
B	mg kg ⁻¹	<0.50	B
Fe	mg kg ⁻¹	51,1	A

Nota: A: Alto, M: Medio , B: Bajo. Fuente: Zambrano (2019).

4.2.5.2. Evaluación biológica

Los valores promedio de los porcentajes de biomasa seca de la planta indicadora a los sesenta días, para cada elemento omitido en las diferentes soluciones nutritivas, en relación con aquella de la solución completa (100%), en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de Consapamba se presentan en la Tabla 4.2.5. La evaluación biológica permitió clasificar en el rango alto a Mg, Zn y B, en el rango medio a K, Cu y Mn; y, en el rango bajo a N, P, S, Fe y el testigo absoluto.

Es pertinente enfatizar que el testigo absoluto solamente alcanzó el 10,7% de la materia seca de la solución completa, lo que indica que hay un rango de 90,3 % para elevar los rendimientos de cualquier cultivo, con una aplicación equilibrada de los nutrientes que se encuentran en los rangos medio y bajo, y superando el problema de aireación y control óptimo de la humedad aprovechable.

Tabla 4.2.5. Valores promedio del porcentaje de la masa seca (de tres repeticiones) de la planta indicadora (tomate) a los 60 días, en relación con la solución completa (100%), de la capa de 00-25 cm del suelo, del sistema agroforestal de café en Consapamba.

Solución	Materia Seca g	%	Interpretación
-SC	10,3	100	
-N	2,1	20,4	B
- P	3,3	32,0	B
- K	4,8	46,6	M
- Mg	8,2	79,6	A
- S	2,7	26,2	B
- Zn	7,7	74,8	A
- Cu	4,1	39,8	M
- Mn	5,1	49,5	M
- B	7,3	70,9	A
- Fe	2,8	27,2	B
Testigo	1,1	10,7	B

Nota. SC = solución completa; Testigo = únicamente con agua destilada. A = alto; M = medio; B = bajo.

Fuente: Zambrano (2019).

La Figura 4.2.3 muestra los resultados de la prueba de rangos múltiples de Tukey aplicada a los valores promedio de tres repeticiones de la biomasa seca (g) de la planta indicadora (tomate), evaluada a los 60 días en el suelo representativo del sitio Consapamba. Los resultados evidencian la existencia de diferencias estadísticamente significativas al nivel de significancia del 5% entre la solución completa (SC); las soluciones con omisión de Mg, Zn y B, clasificadas en el rango alto; las soluciones con omisión de Mn, K y Cu, ubicadas en el rango medio; y las soluciones con omisión de P, Fe, S, y N, correspondientes al rango bajo, los cuales guardan correspondencia con los rangos de la Tabla 4.2.5.

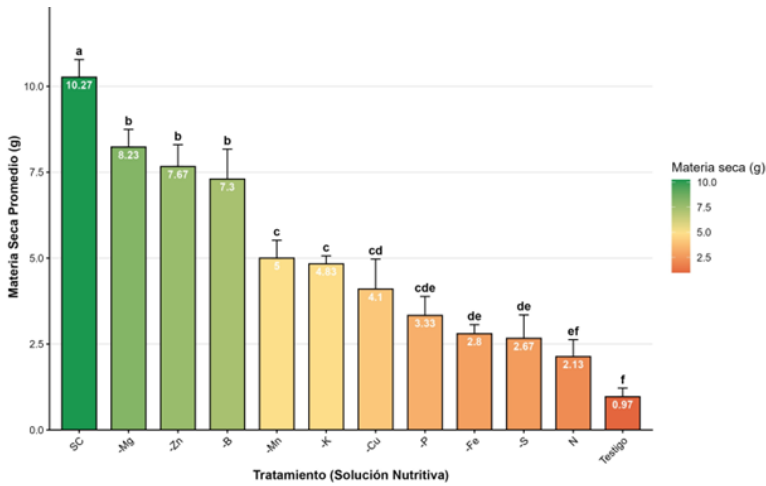


Figura 4.2.3. Prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la biomasa seca de la planta indicadora (tomate) a los 60 días de la evaluación biológica en el sitio Consapamba.

Nota. SC = solución completa; las letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < .05$).

4.2.5.3. Análisis de laboratorio vs. evaluación biológica.

En la Figura 4.2.4. se ilustra la correspondencia de la disponibilidad de los nutrientes (rangos: bajo, medio y alto), según el análisis químico y la evaluación biológica, en la capa de 00-25 cm del suelo de la vertiente con 20% de pendiente, correspondiente al sistema agroforestal de café en Consapamba.

Se observa que solamente coinciden en el rango bajo el N; en el rango medio el K, Cu y Mn; y, en el rango alto el Mg. En cambio, la disponibilidad del P y el Fe según el análisis químico se ubica en el rango alto, pero la evaluación biológica los sitúa en el rango bajo. Inversamente, el Zn y el B en el análisis químico están en el rango bajo; mientras que la evaluación biológica los ubica en el rango alto.

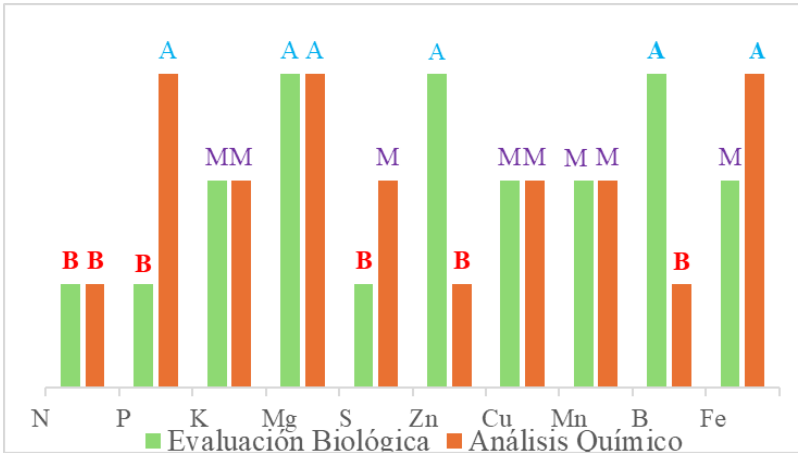


Figura 4.2.4. Correspondencia de la disponibilidad de los nutrientes en la capa de 00-25 cm del suelo (rangos bajo, medio y alto), entre la evaluación biológica y el análisis químico en Consapamba (Zambrano, 2019).



Figura 4.2.5. Estado de desarrollo de la planta indicadora (tomate) a los sesenta días en las diferentes soluciones de la evaluación biológica, en el suelo de la capa de 00-25 cm del bloque 1 del sistema agroforestal de café en Consapamba (Zambrano, 2019).

Nota. SC = solución completa; T = testigo absoluto, solamente con agua destilada.

El desarrollo de la planta indicadora (tomate), en las distintas soluciones de la evaluación biológica en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café en la vertiente de 20% de pendiente, se ilustra en la Figura 4.2.5, en la cual se evidencia que la diferencia de crecimiento de la planta en la solución completa (SC) y el testigo absoluto (únicamente en agua destilada) es incuestionable. Cabe señalar que el patrón de crecimiento de la planta indicadora en los suelos de las tres formas del terreno, fueron similares.

4.2.6. Aptitud del suelo para café arábigo

Al aplicar los criterios del sistema de evaluación de la aptitud de la tierra para café arábigo propuesto por Sys (2000), se obtiene lo siguiente:

- *Características topográficas del terreno.* El rango de pendiente en los tres terrenos del sistema agroforestal de café en Consapamba va de 15 a 20%, por lo que la aptitud de la tierra se ubica en la clase S3.
- *Condiciones de humedad.* El drenaje interno del suelo es bueno y no existen limitaciones por riesgos de inundación, ni por la presencia de una tabla de agua a menos de 100 cm de profundidad.
- *Características físicas del suelo.* Se nota que no existen limitaciones por textura o por exceso de CaSO_4 o CaCO_3 . Debido a que las raíces se extienden en un rango de 55 a 90 cm (profundidad efectiva), la aptitud corresponde a la clase S3; sin embargo, el mayor problema físico es la baja capacidad de aireación de los dos horizontes superiores; por lo que, la condición física para el crecimiento de las plantas corresponde a la clase pobre.

- *Fertilidad potencial.* La CIC de la arcilla, la suma de cationes, la reacción del suelo y la saturación de bases se encuentran en un rango adecuado, por lo que no constituyen limitaciones. En cambio, el contenido de materia orgánica es bajo.
- *Salinidad y alcalinidad.* Estos suelos no presentan limitaciones por exceso de sales o sodio.
- *Fertilidad actual.* Según evaluación biológica, los contenidos disponibles de N, P, S y Fe, se encuentran en el rango bajo; el K, Cu y Mn, pertenecen al rango medio; en tanto que, el Mg, Zn y B se ubican en el rango alto.

4.2.7. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua

A continuación, se anotan las orientaciones conducentes al manejo de los parámetros antes mencionados, de manera de asegurar los más altos rendimientos del cultivo de café arábigo, las mismas deberán ser comprobadas experimentalmente:

Plantaciones en producción.

- Incrementar la macro-porosidad de aireación en los dos horizontes superiores (al menos hasta 15%v) mediante la aplicación de materiales tales como compost, aserrín, bagazo, biomasa de los arbustos y árboles asociados, en un radio de 1,2m alrededor de la planta.
- Balancear la proporción de cationes del complejo de intercambio mediante la aplicación suficiente de K, de manera de disminuir la relación $(Ca+Mg)/K$ a un rango de 35-45.

- Aplicar N, P, S y Fe, cuyos contenidos disponibles según la evaluación biológica se ubican en el rango bajo. Las cantidades y fuentes de los fertilizantes se deberán calcular en función de la edad de las plantas de café y los rendimientos de cerezas.
- Monitorear anualmente la evolución de la reacción del suelo y la fertilidad actual (contenidos disponibles de: N, P, K, Ca, Mg, S, Zn y B).

Nuevas plantaciones y renovación de cafetales.

- Asegurar la formación de agregados estables en la capa superior del suelo, el desarrollo de la raíz pivotante del café y el abastecimiento del fósforo a largo plazo, según el siguiente procedimiento: 1.- trazar un círculo de 1,2 m de diámetro en el sitio de plantación; 2.- distribuir uniformemente sobre la superficie del círculo 5 a 10 kg de materiales orgánicos (compost, aserrín, bagazo y otros), 2 kg de yeso y la dosis de fósforo al menos para diez años de cualquier fuente (roca fosfórica, harina de huesos, fertilizante fosforado); 3. mezclar hasta una profundidad de 25 cm uniformemente. Luego en el centro del círculo realizar un hoyo de 10 a 15 cm de diámetro y 1 metro de profundidad (se puede utilizar un barreno tipo Edelman o un hoyador para postes). Finalmente rellenar el hoyo con el material mezclado de la capa superior y sembrar la planta.

Manejo y conservación del suelo y el agua.

- Asegurar la humedad suficiente en el suelo, especialmente en la temporada seca, mediante riego por goteo debidamente controlado.

- Implementar barreras vivas en curvas de nivel en todo el terreno del sistema agroforestal a una distancia vertical de 1,5 m. La barrera viva puede ser de: hierba luisa (*Aloysia citrodora*), tuna (*Opuntia ficus-indica*), poroto de palo (*Cajanus cajan* L.), piñón (*Jatropha curcas*) u otras especies de plantas adaptadas a las condiciones agroclimáticas del lugar, cuidando que no entren en competencia con los cafetos.
- Las hileras de cafetos y de los arbustos, árboles y cultivos asociados deben ser trazadas paralelas a las barreras vivas.
- Construir una zanja de desviación en la parte superior del sistema agroforestal para interceptar la escorrentía de las partes superiores, la cual deberá desembocar en vías de agua seguras para evitar la formación de cárcavas.
- Construir zanjas de infiltración en curvas de nivel en los terrenos de pendiente de 40%: base 20 cm, talud 1/1 y profundidad 30 cm, a una distancia vertical de 2,5 m.

4.3. Unidades de suelos del sistema agroforestal de café arábigo en el sector Guanga, cantón Olmedo

4.3.1. Aspectos generales

El cantón Olmedo de la provincia de Loja, limita al norte con el cantón Chaguarpamba, al sur con el cantón Paltas, al este con el cantón Catamayo y al oeste con los cantones Paltas y Chaguarpamba. La Figura 4.3.1. contiene la ubicación del cantón Olmedo en relación a la provincia de Loja y al país.



Figura 4.3.1. Ubicación geográfica del cantón Olmedo relativa a la provincia de Loja y al país. (IGM, 2019).

El relieve del cantón Olmedo es montañoso, con predominio de terrenos de pendiente mayor a 70 %. Una menor proporción del área corresponde a los terrenos ondulados y colinados de 10 a 30 % de pendiente.

Los suelos de las plantaciones de café arábigo en el cantón Olmedo se estudiaron en el sector de Guanga, situado a 5 km al norte de la cabecera cantonal, cuyas coordenadas son: 649224 E y 9567329 N, y una altitud promedio de 1.580 m s. n. m.

Debido a que en el cantón Olmedo no se dispone de estación meteorológica, se asume que los datos mensuales del clima del sector Guanga se pueden inferir de aquellos de la estación de Chaguarpamba ubicada en la misma cuenca hidrográfica (Puyango-Tumbes), a 1.334 m s. n. m. con una diferencia de altitud de 250 m. Considerando que en la zona de los Andes Bajos, el promedio de gradiente de temperatura

es de 0,7°C por cada 100 m de incremento de la altitud (Bendix et al., 2004), la temperatura media mensual sería de alrededor de 20°C con una variación intermensual menor a 2°C. También, se admite el mismo promedio de precipitación anual de alrededor de 1.300 mm siendo marzo el mes más lluvioso con un promedio de 290 mm; en tanto que, agosto es el mes más seco con un promedio de 8,5 mm. En base a los datos de temperatura media y precipitación anual indicados, el clima del sector de Guanga se clasifica como Subtropical Subhúmedo (Cañadas 1983). De ello se concluye que el régimen de humedad del suelo es ústico y el de temperatura isotérmico.

Geológicamente, el sector de Guanga está inmerso en la Formación Ciano, conformado por lutitas y limolitas multicolor, con intercalaciones de roca volcánica (andesita) y pizarras con presencia de sulfuros cuya génesis es tectónica erosiva (IGM, 2014).

El sistema agroforestal del sector Guanga, está compuesto de 90% de café arábigo (*Coffea arabica* L.), el 10% corresponde a la asociación de banano (*Musa paradisiaca* L.), guabo (*Inga edulis* Mart), achiote (*Bixa orellana* L) y diversos cítricos.

En el sector seleccionado se describieron dos perfiles contiguos, ubicados en terrenos de 11 y 28% de pendiente. Como perfil representativo se seleccionó el suelo del sistema agroforestal del terreno de 11% de pendiente (P1G). En los dos primeros horizontes del perfil se realizaron los análisis físicos, químicos e hidrodinámicos; mientras que, en la capa de 00-25 cm se hizo la evaluación de la fertilidad actual, mediante análisis de laboratorio y por el método biológico. La descripción del perfil P2G del terreno de 28% de pendiente se presenta en el Anexo C.

4.3.2. Suelo del sistema agroforestal de café arábigo en terreno de 11 % de pendiente

Código del perfil: P1G.

Fecha de descripción del suelo: 03/02/2023.

Autores: Carlos Valarezo Manosalvas, Miguel Villamagua, Pedro Guaya y Karina Lima.

4.3.2.1. Características de la unidad.

Clasificación Taxonómica: *Typic Haplustalf* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: 17649.224 E; 9567392 N.

Altitud: 1.593 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente de montaña, pendiente media 11 %.

Material Parental: Andesita de la formación Ciano.

Drenaje interno: bueno.

4.3.2.2. Descripción general del suelo.

Suelo moderadamente profundo, formado por cuatro horizontes genéticos (Ap de 15 cm, AE de 15 cm, Bt de 30 cm y C de 10 cm). A partir de 70 cm de profundidad se encuentra roca andesita fuertemente meteorizada. Los colores de los horizontes son uniformes, sin manchas, lo cual refleja un buen drenaje. Las raíces son abundantes en el Ap, comunes en el AE, y pocas y finas hasta 60 cm. La descripción individual de los horizontes se presenta en la Tabla 4.3.1. La Figura 4.3.2. contiene la fotografía del perfil del suelo.

Tabla 4.3.1. Descripción de los horizontes del perfil P1G del suelo del sistema agroforestal de café del sector Guanga, cantón Olmedo, terreno de 11 % de pendiente.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00-15	Pardo oscuro (7.5YR 3/3) en húmedo, franco limoso, estructura granular, fina; ligeramente adherente, plástico y friable; abundantes raíces finas, medias y gruesas, límite brusco y plano.
AE	15-30	Pardo oscuro (7.5YR 3/3) en húmedo; franco arcillo limoso; con bloques subangulares moderados, medios y finos; ligeramente adherente, plástico y friable; raíces finas, medias y gruesas; límite brusco y plano.
Bt	30-60	Pardo oscuro (7.5YR 3/3) en húmedo, arcillo limoso, bloques subangulares, grandes y gruesos, con revestimiento gruesos de arcilla iluvial; muy adherente, muy plástico, friable; raíces pocas finas y medias, límite neto y ondulado.
C	60-70	Pardo oscuro (7.5YR 4/4) en húmedo, arcilloso; bloques subangulares, medios, desarrollados; muy adherente, muy plástico, firme; sin raíces; límite brusco y plano.
R	70+	Andesita fuertemente meteorizada.

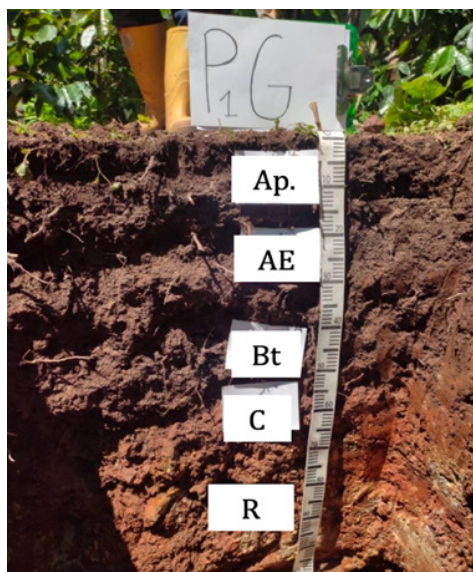


Figura 4.3.2. Perfil P1G, del suelo del sistema agroforestal de café del sector Guanga, cantón Olmedo, terreno de 11 % de pendiente.

4.3.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo.

En la Tabla 4.3.2. se presentan los datos sobre las características físicas e hidrodinámicas de los dos primeros horizontes del perfil P1G. La densidad aparente (D_a) para los horizontes Ap (00-15 cm) y AE (15-30 cm), es de 1,1 y 1,2 g cm^{-3} en su orden, valor que se encuentra dentro del rango promedio para las texturas franco limoso a franco arcillo limoso respectivamente. El contenido de agua ($\% \theta_v$) a saturación (SS: $pF=0,0$) que equivale a la porosidad total, es de 53,5 y 51,2 $\% \theta_v$ en su orden; lo que significa que más de la mitad del volumen del suelo corresponde a poros. La capacidad de campo (CC: $pF=2,52$) es de 35,2 y 36,2 $\% \theta_v$ respectivamente; lo que indica que estas capas retienen una elevada cantidad de humedad después de haberse drenado el agua de los macro-poros (diámetro >30 micras). El punto de marchitez permanente (PMP: $pF=4,2$) es de 15,0 y 15,2 $\% \theta_v$ en su orden. El agua aprovechable es de 20,2 y 21,0 $\% \theta_v$ (alto); en tanto que la capacidad de aireación (CA) es 18,3 $\% v$ (alta) y 15,0 $\% v$ (media), respectivamente.

Consecuentemente, la condición física para el crecimiento de las plantas, de las dos capas superiores del suelo se ubican en el límite de las zonas II y III del diagrama triangular (buena/media). La velocidad de infiltración básica del agua en el suelo es de 8,1 cm h^{-1} (moderadamente rápida), lo cual no guarda relación con la textura de las dos capas superiores; de ello se deduce que al momento de la prueba aún persistían fisuras internas a consecuencia de la contracción de la arcilla en la estación seca.

Tabla 4.3.2. Características físicas e hidrodinámicas los dos primeros horizontes del suelo del terreno de 11 % de pendiente, del sistema agroforestal de café del sector Guanga, cantón Olmedo (Laboratorio de Suelos de la UNL)

Horizonte	Prof. (cm)	Da (g cm-3)	Contenidos de humedad a diferentes succiones (% θ_v)			Distribución de los volúmenes (%v) a capacidad de campo (pF = 2,52)				Condición física del suelo: zona	Infiltración básica. (cmh ⁻¹)
			SS	CC	PMP	AA	VS	CA	VPFI		
Ap	00-15	1,1	53,5	35,2	15	20,2	46,5	18,3	61,5	II/III	8,1
AE	15-25	1,2	51,2	36,2	15,2	21	48,8	15	64	II/III	

Nota. D = densidad aparente; AA = agua aprovechable; VS = volumen de sólidos; CA = capacidad de aireación; VPFI = volumen de poros físicamente inerte.

4.3.2.4. Características químicas.

El valor de pH_{H_2O} (Tabla 4.3.3.) en la capa de 00-15 cm es de 6,6 descendiendo a 6,1 en la capa de 15-30 cm (reacción muy ligeramente ácida y ligeramente ácida, respectivamente) lo que explica la ausencia de Al^{3+} e H^+ intercambiables. El contenido de materia orgánica es alto (5,4%) en la primera capa, y medio en la segunda (3,6%). La CIC es alta en la primera capa y media en la segunda [32,6 y 24 cmol (+)kg⁻¹], respectivamente. El calcio y el magnesio cambiables en las dos capas se encuentran en el rango alto [12 y 11; 3,2 y 3,0 cmol (+)kg⁻¹, respectivamente]. El potasio cambiable es bajo en las dos capas [0,1 cmol (+)kg⁻¹]. La distribución porcentual de $Ca^{2+}/Mg^{2+}/K^+$ es de 78,4/21/0,6%.

Tabla 4.3.3. Características químicas de las capas 00-15 y 15-30 cm del suelo del sistema agroforestal de café en el terreno con 11 % de pendiente del sector Guanga, cantón Olmedo.

M.O %	pH_{H_2O}	Al^{3+}	$(H^+ + Al^{3+})$	CIC	Cationes cambiables				SB %	Proporción de cationes (%)		
					cmol (+)kg ⁻¹					Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+
					Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+				
*5,4	6,6	-	-	32,6	12,0	3,2	0,1	0,0	46,9	78,4	21,0	3,0
**3,6	6,1	-	-	24,0	11,0	3,0	0,1	0,0	58,8	78,4	21,0	3,0

Nota: *00-15 cm; ** 15-30 cm. Laboratorio de Suelos Estación Experimental Pichilingue, INIAP). Adaptado de Lima (2023)

4.3.2.5. Fertilidad actual.

4.3.2.5.1. Análisis de laboratorio.

En la Tabla 4.3.4. se presentan los contenidos promedio de los elementos disponibles, reportados por el laboratorio de la estación Pichilingue del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), para la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal del terreno del 11 % de pendiente, extraídos con la solución de Olsen Modificada (NaHCO_3 , 0,5 N + EDTA 1M). Los resultados indican que los contenidos de Mg, Fe, Mn y Cu se ubican en el rango alto; N, Zn y S en el rango medio; y, P, K y B en el rango bajo.

Tabla 4.3.4. Contenidos de los elementos disponibles en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café en el terreno de 11 % de pendiente del sector Guanga del cantón Olmedo.

Elemento	Unidad	Valor	Interpretación
N*	ppm	33,0	M
P	ppm	9,0	B
K	meq/100 ml	0,13	B
Mg	meq/100 ml	3,2	A
Fe	ppm	114	A
Mn	ppm	59,4	A
Cu	ppm	9,3	A
Zn	ppm	3,3	M
B	ppm	0,21	B
S	ppm	13,0	M

Nota. A = alto; M = medio; B = bajo. (* NH_3). (Lima, 2023)

4.3.2.5.2. Evaluación biológica de la fertilidad.

Los valores promedio de los porcentajes de biomasa seca de la planta indicadora (tomate) a los sesenta días, para cada elemento omitido en las diferentes soluciones nutritivas, en relación con aquella de la solución completa (100%), en la capa de 00-25 cm se presentan en la Tabla 4.3.5. La evaluación biológica permitió clasificar en el rango alto

a Mg, S, Zn, Cu, Mn, B y Fe; en el rango medio a K; y, en el rango bajo a N y P. El testigo absoluto solamente alcanzó el 0,3 % de la masa seca de la planta indicadora en la solución completa.

Tabla 4.3.5. Valores promedio de tres repeticiones del porcentaje de la masa seca de la planta indicadora (tomate) a los 60 días, en relación con la solución completa (100 %), de la capa de 00-25 cm del suelo, del sistema agroforestal de café en el terreno de 11 % de pendiente del sector Guanga, cantón Olmedo.

Solución	Materia Seca g	%	Interpretación
-SC	6,0	100	
-N	0,23	3,8	B
- P	0,03	0,5	B
- K	3,5	58,3	M
- Mg	5,2	86,7	A
- S	4,1	68,3	A
- Zn	4,4	73,3	A
- Cu	4,6	76,7	A
- Mn	4,0	66,7	A
- B	5,6	93,3	A
- Fe	4,5	75,0	A
Testigo	0,02	0,3	B

Nota. SC = solución completa; Testigo = únicamente con agua destilada. A = alto; M = medio; B = bajo. Fuente: Lima (2023).

La Figura 4.3.3 muestra los resultados de la prueba de rangos múltiples de Tukey aplicada a los valores promedio de tres repeticiones de la biomasa seca (g) de la planta indicadora (tomate), evaluada a los 60 días en el suelo representativo del sitio Guanga. Los resultados evidencian la existencia de diferencias estadísticamente significativas al nivel de significancia del 5% entre la solución completa (SC); las soluciones con omisión de Fe, Mg, Mn, B, Zn S, y Cu, clasificadas en el rango alto; la solución con omisión de K, ubicada en el rango medio; y las soluciones con omisión de N y P, correspondientes al rango bajo, lo que guarda correspondencia con los valores de la Tabla 4.3.5.

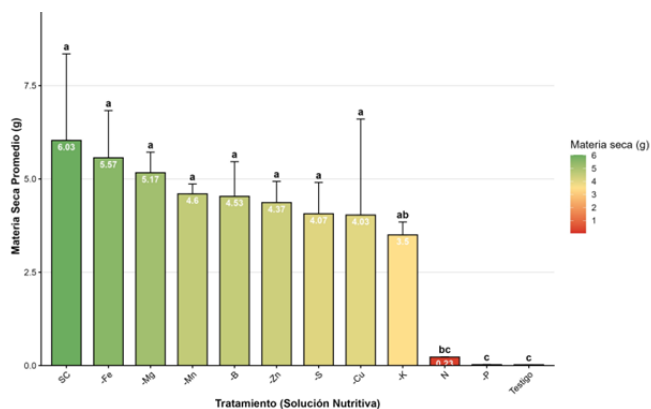


Figura 4.3.3. Prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la biomasa seca de la planta indicadora (tomate) a los 60 días de la evaluación biológica en el sitio Guanga.

Nota. SC = solución completa; las letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < .05$).



Figura 4.3.4. Estado de desarrollo de la planta indicadora (tomate) a los sesenta días en las diferentes soluciones de la evaluación biológica, de la capa de 00-25 cm en el suelo del terreno de 11 % de pendiente, del sector Guanga, cantón Olmedo (Lima, 2023).

Nota. SC = solución completa; T = testigo absoluto, solamente con agua destilada.

El desarrollo de la planta indicadora (tomate) en las distintas soluciones de la evaluación biológica en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café en el sector Guanga claramente se observa en la Figura 4.3.4, en la cual se evidencia la enorme diferencia de crecimiento de la planta en la solución completa (SC) y el testigo absoluto (únicamente en agua destilada).

4.3.2.5.3. Análisis de laboratorio vs. evaluación biológica.

Al comparar los rangos de disponibilidad de los elementos reportada en el análisis químico y aquella obtenida mediante la evaluación biológica en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café del terreno de 11 % de pendiente, se observa que en el rango alto coinciden el Mg, Cu, Mn y Fe; y, en el rango bajo únicamente el P. No guardan correspondencia los resultados de los dos procesos de evaluación para el K, S, Zn y B (Figura 4.3.5.).

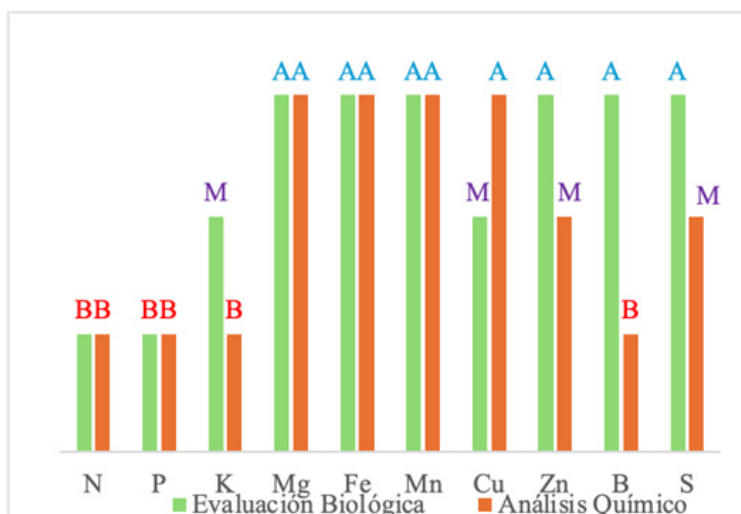


Figura 4.3.5. Correspondencia entre el análisis químico de la fertilidad actual del suelo vs. la evaluación biológica, en el terreno de 11 % de pendiente del sector Guanga, cantón Olmedo (Lima 2023).

4.3.2.6. Aptitud del suelo para café arábigo.

Según los parámetros del sistema de evaluación de la aptitud de la tierra para café arábigo, propuesto por Sys (2000), se obtiene lo siguiente:

- *Características topográficas del terreno.* Debido a que el rango de pendiente de los dos sistemas agroforestales oscila entre 11 a 28 %, la aptitud de la tierra corresponde a la clase S3.
- *Condiciones de humedad.* El drenaje interno del suelo es bueno, no existen limitaciones por riesgos de inundación, tampoco la presencia de una tabla de agua a menos de 100 cm de profundidad.
- *Características físicas del suelo.* No existen limitaciones por textura o por exceso de CaSO_4 o CaCO_3 . Debido a que las raíces se extienden en promedio hasta 60 cm (profundidad efectiva), la aptitud por este parámetro corresponde a la clase S3. La condición física para el crecimiento de las plantas se ubica en la Clase III (media).
- *Fertilidad potencial.* La CIC de la arcilla, la suma de cationes y la saturación de bases se encuentran en un rango adecuado, por lo que no representan limitaciones. La reacción del suelo es ligeramente ácida, ideal para el cultivo del café arábigo. Además, el contenido de materia orgánica es alto.
- *Salinidad y alcalinidad.* Estos suelos no presentan limitaciones por exceso de sales o sodio.
- *Fertilidad actual.* Según la evaluación biológica, en el rango alto se ubican el Mg, S, Zn, Cu, Mn, B y Fe; en el rango medio se encuentran el K; y, en el rango bajo el N y P.

4.3.2.7. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua.

Es de notar que la evaluación biológica de la fertilidad evidenció que el testigo absoluto solamente produjo el 0,3 % de la masa seca de la planta indicadora, en relación con la solución completa, por lo que se estima que sería posible incrementar los rendimientos de cualquier cultivo en

un nivel muy significativo, a condición de manejar óptimamente las condiciones físicas, químicas y de fertilidad del suelo, bajo un adecuado rango de tensión de humedad.

A continuación, se anotan las orientaciones conducentes a superar las limitaciones antes mencionadas, de manera de asegurar los más altos rendimientos del café arábigo; las mismas que primeramente deberán ser comprobadas experimentalmente:

Plantaciones en producción.

- Mantener la elevada macro-porosidad de aireación en los dos horizontes superiores, mediante la aplicación recurrente de materiales orgánicos propios de la finca, en un radio de 1,2m alrededor de la planta.
- Balancear la proporción de cationes del complejo de intercambio mediante la aplicación suficiente de K, de manera de disminuir la relación $(Ca+Mg)/K$ a un rango de 35-45.
- Aplicar los elementos N y P cuyos contenidos disponibles según la evaluación biológica se ubican en el rango bajo. Las dosis y las fuentes fertilizantes a aplicar, para nutrir adecuadamente los cafetos, se deberá calcular en función de la edad de las plantas y los rendimientos de las cerezas. Además, en los años sucesivos es necesario monitorear los contenidos disponibles de K que se ubican en el rango medio.

Plantaciones nuevas y renovación de cafetales.

- Aplicar la dosis de fósforo para diez años en un círculo de 1,2 m de diámetro en el sitio de la plantación, e incorporar hasta 25 cm.
- Asegurar el desarrollo de la raíz pivotante del cafeto; para lo cual, una vez que se ha excavado un hoyo de 30 x 30 cm (según lo recomiendan Enriquez y Duicela, 2014), realizar en el centro de éste un hoyo de 10cm de diámetro y 100cm de profundidad

(utilizando un barreno); luego, rellenar el mismo con material de la capa de 00-15 cm.

Manejo y conservación del suelo y el agua.

- Garantizar un rango de humedad aprovechable suficiente en el suelo especialmente en la temporada seca, mediante riego presurizado (goteo) debidamente controlado, pero teniendo en cuenta que el café necesita de una corta temporada seca para promover la floración.
- Implementar barreras vivas en curvas de nivel en todo el terreno a una distancia vertical de 1,5 m. La barrera viva puede ser de hierba luisa (*Aloysia citrodora* Palau), tuna (*Opuntia ficus-indica*), poroto de palo (*Cajanus cajan* L.), piñón (*Jatropha curcas* L.) u otras especies de plantas de crecimiento similar, adaptadas a las condiciones agroclimáticas del lugar, cuidando que no entren en competencia con los cafetos.
- Las hileras de cafetos y de los arbustos, árboles y cultivos asociados se deben trazar paralelas a las barreras vivas.
- Construir una zanja de desviación en la parte superior del sistema agroforestal para interceptar la escorrentía de las partes altas, la cual deberá estar conectada a vías de agua seguras para evitar la formación de cárcavas.

4.4. Suelos del sistema agroforestal de café arábigo en el sector Romerillos, cantón Chaguarpamba

4.4.1. Aspectos Generales

El sector Romerillos se ubica en la parroquia Chaguarpamba. Limita al norte con la parroquia el Rosario del cantón Chaguarpamba, al sur con el cantón Olmedo, al este con el cantón Catamayo y, al oeste con la parroquia Amarillos cantón Chaguarpamba (Figura 4.4.1).

El relieve de la zona es predominantemente montañoso, con pendientes mayores a 70%. Una menor proporción corresponde a los terrenos colinados y escarpados con 25-50% y 50-70% de pendiente, respectivamente. Según Midená et al. (2013), en el cantón Chaguarpamba se diferencian tres dominios fisiográficos: 1.- Dominio de vertientes y relieves de cuencas interandinas con una extensión de 283 km², que cubre la mayor parte de la superficie cantonal (90,4%). 2.- Dominio de relieves de fondo de cuencas interandinas que abarca una superficie de 17 km² (5,4% del área cantonal), y 3.- Dominio de medio aluvial de sierra, con una extensión de 13 km² (4,2% del área cantonal).



Figura 4.4.1. Ubicación geográfica de las parroquias de Chaguarpamba y Santa Rufina, relativa al cantón Chaguarpamba, a la provincia de Loja y al país (Fuente: IEE, 2013).

Los datos de temperatura y precipitación de la estación meteorológica del exPREDESUR en Chaguarpamba, ubicada a 1.334 m s. n. m., para un período de registro de 25 años (1990-2015), indican que la temperatura media mensual es de 21,4°C, con una variación intermensual menor a 2,1°C. El promedio de precipitación anual es de 1.244 mm, siendo marzo

el mes más lluvioso con 282,3 mm; en tanto que, agosto es el mes más seco con 8,4 mm de lluvia. Según el diagrama ombrotérmico (Anexo F), la estación lluviosa se extiende desde diciembre hasta mediados de mayo; mientras que, los meses ecológicamente secos corresponden al período de junio a noviembre. En base a los datos de temperatura media y precipitación anual, el clima de Romerillos (estación Chaguarpamba) se clasifica como Subtropical Subhúmedo (Cañadas 1983). De ello se deduce que, el régimen de humedad del suelo es ústico y el de temperatura isotérmico.

Geológicamente, el sector Romerillos está inmerso en la Formación Chaguarpamba, conformada por tobas arenosas intercaladas con limolitas y aglomerados (IGM, 2014).

En la finca del señor Manuel Romero del sector Romerillos, se describieron tres perfiles de suelo, ubicados en los sistemas agroforestales de las variedades de café Geisha, Catuaí y Villalobos, en terrenos de 26 a 38 % de pendiente, y en un rango de altitud de 1.444 a 1.465 m. s. n. m. Como perfil representativo, para la realización de los análisis físico-químicos y de fertilidad, se seleccionó el suelo del sistema agroforestal de la variedad Catuaí (perfil P2Ch, pendiente 38 %). La descripción de los perfiles de los suelos de los sistemas agroforestales de las variedades Geisha y Villalobos se presentan en el Anexo D.

4.4.2. Suelo del sistema agroforestal de café arábigo de la variedad Catuaí

Código del perfil: P2Ch.

Fecha de descripción del suelo: 22/11/2018.

Autores: Carlos Valarezo Manosalvas, Miguel Villamagua, Pedro Guaya y Karina Tandazo.

4.4.2.1. Características de la unidad.

Clasificación Taxonómica: *Typic Haplustults* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: Zona 17; 649958 E; 9570541 N.

Altitud: 1.465 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente de montaña, pendiente media del terreno 38 %.

Material Parental: Tobas volcánicas con presencia de cuarzo (Formación Chaguarpamba).

Drenaje interno: bueno.

Sistema agroforestal: café arábigo var Catuai, banano (*Musa paradisiaca* L.), guabo (*Inga edulis* Mart.), naranjo (*Citrus sinensis* L.) y porotillo (*Erythrina velutina* Willd.).

4.4.2.2. Descripción general del suelo.

Suelo muy profundo, formado por cinco horizontes genéticos (Ap, AB, Bt, BC y C), en los cuales se observa esporádicamente pequeños fragmentos redondeados de cuarzo, remanentes del material parental. Las raíces son abundantes en la capa de 00-20 cm, comunes de 20 a 30 cm y pocas hasta 65 cm de profundidad. El color rojizo en los horizontes, que se incrementa con la profundidad, se atribuye a la presencia de hematita, lo que evidencia una estación seca y otra lluviosa bien definidas a lo largo del año. La descripción individual de los horizontes se presenta en la Tabla 4.4.1; en tanto que la Figura 4.4.2 contiene la fotografía del perfil del suelo.

Tabla 4.4.1. Descripción de los horizontes del perfil P2Ch, del suelo del sistema agroforestal de café de la variedad Catuai, sector Romerillos, cantón Chaguarpamba.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00-20	Pardo oscuro (10YR 3/3) húmedo, franco arcillo limoso (tacto), con bloque subangulares, fuertes, medios y gruesos, friable, adherente y plástico.
AB	20-30	Pardo oscuro (10YR 3/6) húmedo, franco arcilloso, con bloques subangulares, fuertes, medios y gruesos, friable, adherente y plástico
Bt	30-65	Pardo (7.5YR 4/4) húmedo, franco arcilloso a arcillo limoso, con bloques subangulares, fuertes, medios y gruesos, friable, adherente y plástico.
BC	65-90	Pardo fuerte (7.5YR 5/6) húmedo, franco limoso, con bloques subangulares moderados, medios y gruesos.
C	90-120+	Rojo amarillento (5YR 5/6) húmedo, franco limoso, masivo, adherente, ligeramente plástico y friable.



Figura 4.4.2. Perfil P2Ch del suelo del sistema agroforestal de café de la variedad Catuai. Sector Romerillos, cantón Chaguarpamba.

4.4.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo.

En los dos primeros horizontes del suelo del sistema agroforestal de café de la variedad Catuaí (Tabla 4.4.2), los valores de D_a son de 1,1 y 1,2 g cm⁻³ para los horizontes Ap (00-20 cm) y AB (20-30 cm), respectivamente, lo cual guarda cercana relación con su textura fina. El contenido de agua a saturación (SS: pF=0) es de 58 y 54% θ_v en su orden, lo que evidencia que más de la mitad del volumen del suelo corresponde a poros. La capacidad de campo (CC: pF=2,52) es de 44 y 49% θ_v , respectivamente, ello indica que estas capas retienen una elevada cantidad de humedad después de haberse drenado el agua de los macroporos. El punto de marchitez permanente (PMP: pF=4,2) es de 11% θ_v en ambos horizontes. El agua aprovechable es de 33 y 38% θ_v , en su orden, calificada como muy alta. La capacidad de aireación es de 14% (media) para el horizonte Ap y disminuye a 5% (muy baja) en el AB; si se considera que ambos horizontes son de textura fina (franco arcillo limoso y franco arcilloso), la diferencia de nueve puntos porcentuales de la capacidad de aireación, revela que el segundo horizonte tiene serios problemas de compactación. La condición física para el crecimiento de las plantas de los dos horizontes superiores, se ubican en la zona media y muy pobre del diagrama triangular, respectivamente. La infiltración básica es de 28,6 cm h⁻¹ (muy rápida), valor que no corresponde a la textura de los dos horizontes superiores, por lo que se deduce que al final de la temporada seca en la que se realizó la prueba, el suelo habría desarrollado fisuras internas por la presencia de arcilla expansiva (tipo 2:1).

Tabla 4.4.2. Características físicas e hidrodinámicas de los dos primeros horizontes del suelo del sistema agroforestal de café de la variedad Catuaí del sector Romerillos, cantón Chaguarpamba.

Horizontes	Prof. (cm)	Da (g cm ⁻³)	Contenidos de humedad a diferentes succiones (%θ _v)			Distribución de volúmenes (% v) a capacidad de campo (pF=2,52)				Condición física del suelo: zona	Infiltración básica (cm h ⁻¹)
			SS	CC	PMP	AA	VS	CA	VPFI		
Ap	00-20	1,1	58	44	11	33	42	14	53	II/III	28,6
AB	20-30	1,2	54	49	11	38	46	5	57	I/II	

Nota: D = densidad aparente; AA = agua aprovechable; VS = volumen de sólidos; CA = capacidad de aireación; VPFI = volumen de poros físicamente inerte. (Tandazo, 2019).

4.4.2.4. Características químicas.

En la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de la variedad Catuaí, el pH_{H₂O} es de 4,8 por lo que la reacción es muy fuertemente ácida (Tabla 4.4-.3). El contenido de materia orgánica es alto (5,9%). La acidez cambiante (Al³⁺+ H⁺) es alta [4,6 cmol (+)kg⁻¹]. La suma de bases es media [9,6 cmol (+)kg⁻¹]. El calcio y el magnesio cambiables se encuentran en el rango medio [6,9 y 1,9 cmol (+)kg⁻¹ respectivamente). El potasio cambiante está en el límite de medio a bajo [0,3 cmol (+)kg⁻¹]. La saturación de bases es baja (37,7). La distribución porcentual de Ca²⁺/Mg²⁺/K⁺ es de 76/21/3.

Tabla 4.4.3 Características químicas de la capa 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café, variedad Catuaí, sector Romerillos. Laboratorio AGROCALIDAD, MAG. (Tandazo, 2019).

M.O	pH _{H₂O}	Al ³⁺	(H ⁺ + Al ³⁺)	CIC	Cationes cambiables				SB %	Proporción de cationes (%)		
					cmol (+)kg ⁻¹					Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺				
5,9	4,8	3,1	4,6	25,7	6,9	1,9	0,3	0,5	37,7	76,0	21,0	3,0

4.4.2.5. Fertilidad actual.

4.4.2.5.1. Análisis de laboratorio.

En la Tabla 4.4.4. se presentan los contenidos promedio de los elementos disponibles, reportados por el laboratorio de AGROCALIDAD del MAGAP, para la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café de la variedad Catuaí, extraídos con la solución de Olsen Modificada (NaHCO_3 , 0,5 N + EDTA 1M). Los resultados indican que los contenidos de Mg, S, Fe, Mn y Cu se ubican en el rango alto; N, P y K en el rango medio; y, Zn y B en el rango bajo.

Tabla 4.4.4. Contenidos de elementos disponibles en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café de la variedad Catuaí en el sector Romerillos, parroquia Chaguarpamba.

Elemento	Unidad	SAF café var Catuaí	
		Valor	Interpretación
N	%	0,29	M
P	mg kg ⁻¹	10,5	M
K	cmol kg ⁻¹	0,3	M
Mg	cmol kg ⁻¹	1,78	A
Fe	mg kg ⁻¹	436,0	A
Mn	mg kg ⁻¹	84,1	A
Cu	mg kg ⁻¹	10,6	A
Zn	mg kg ⁻¹	2,9	B
B	mg kg ⁻¹	0,9	B
S	mg kg ⁻¹	31,5	A

Nota. A = alto; M = medio; B = bajo. Fuente: Tandazo (2019).

4.4.2.5.2. Evaluación biológica de la fertilidad.

Los valores promedio de los porcentajes de biomasa seca de la planta indicadora a los sesenta días, para cada elemento omitido en las diferentes soluciones nutritivas, en relación con aquella de la solución completa (100%), en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de

café de la variedad Catuaí se presentan en la Tabla 4.4.5. La evaluación biológica permitió clasificar en el rango alto a Zn; en el rango medio a Cu, Fe, Mg, S, Mn, B; y K; y, en el rango bajo a N, P, y el testigo absoluto.

Tabla 4.4.5. Valores promedio de tres repeticiones del porcentaje de la masa seca de la planta indicadora (tomate) a los 60 días, en relación con la solución completa (100 %), de la capa de 00-25 cm del suelo, del sistema agroforestal de café de la variedad Catuaí, en el sector Romerillos, parroquia Chaguarpamba, cantón Chaguarpamba.

Solución	Materia Seca g	%	Interpretación
-SC	11,5	100	
-N	1,3	11,3	B
- P	0,7	6,1	B
- K	4,0	34,8	M
- Mg	7,0	60,9	M
- S	7,0	60,9	M
- Zn	7,9	68,7	A
- Cu	7,4	64,3	M
- Mn	6,1	53,0	M
- B	5,6	48,7	M
- Fe	7,3	63,5	M
Testigo	0,5	4,3	B

Nota. SC = solución completa; Testigo = únicamente con agua destilada. A = alto; M = medio; B = bajo. Fuente: Tandazo (2019).

La Figura 4.4.3 muestra los resultados de la prueba de rangos múltiples de Tukey aplicada a los valores promedio de tres repeticiones de la biomasa seca (g) de la planta indicadora (tomate), evaluada a los 60 días en el suelo representativo del sitio Romerillos. Los resultados evidencian la existencia de diferencias estadísticamente significativas al nivel de significancia del 5 % entre la solución completa (SC); las soluciones con omisión de Zn, clasificada en el rango alto; las soluciones con omisión de Cu, Fe, Mg, S, Mn, B, K, ubicadas en el rango medio; y las soluciones con omisión de N y P, correspondientes al rango bajo, lo cual guarda correspondencia con los rangos de la Tabla 4.4.5.

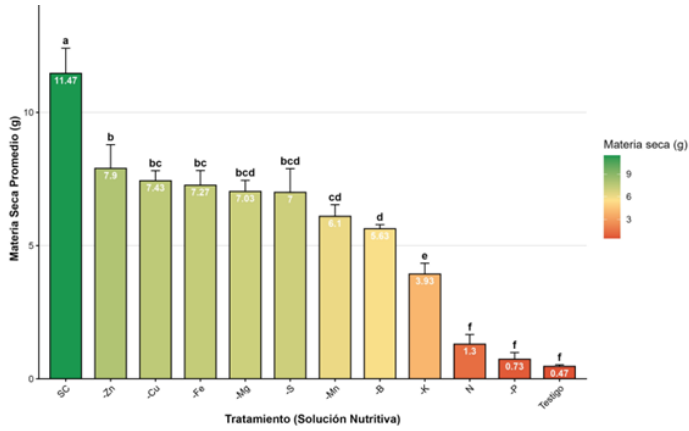


Figura 4.4.3. Prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la biomasa seca de la planta indicadora (tomate) a los 60 días de la evaluación biológica en el sitio Romerillos.

Nota. SC = solución completa; las letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < .05$).



Figura 4.4.4. Estado de desarrollo de la planta indicadora (tomate) a los sesenta días en las diferentes soluciones de la evaluación biológica, en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café de la variedad Catuai (Tandazo, 2019).

Nota. SC = solución completa; T = testigo absoluto, solamente con agua destilada.

4.4.2.5.3. Evaluación biológica vs. análisis químico.

Al comparar la disponibilidad de los elementos que se reporta en el análisis químico y aquella obtenida mediante la evaluación biológica en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café de la variedad Catuaí, se observa que únicamente coinciden en el rango medio el K (Figura 4.4.5).

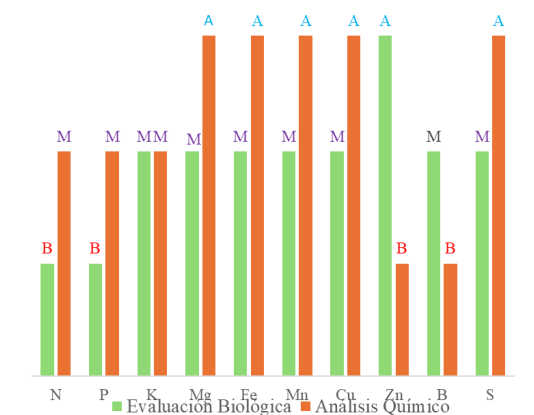


Figura 4.4.5. Correspondencia entre la evaluación biológica de la fertilidad actual y el análisis químico del suelo del SAF de café en el sector Romerillos, cantón Chaguarpamba (Tandazo, 2019).

4.4.2.6. Otros análisis de suelos.

El propietario de la finca, por su propia iniciativa había tomado muestras de la capa superior del suelo en cinco lotes del sistema agroforestal de café, las mismas que fueron enviadas al laboratorio Agrar Projekt. De la interpretación de los resultados de los referidos análisis, se deducen los siguientes comentarios: 1.- El contenido de materia orgánica fluctúa entre 16,7 y 19,1%, valores que son extremadamente altos, situación que no se evidenció visualmente en las características de los horizontes superiores en la descripción de los perfiles en el terreno, ni

en los valores de la densidad aparente y de la capacidad de aireación, por lo que es necesario solicitar al laboratorio se realice nuevamente el análisis de este parámetro. 2.- Los suelos son fuertemente ácidos con valores de pH entre 5,2 y 5,8; acidez intercambiable entre 0,8 y 2,4 cmol (+) kg⁻¹; aluminio intercambiable entre 0,2 y 1,1. cmol (+) kg⁻¹ y bajos porcentajes de saturación de bases. 3.- Los contenidos de la disponibilidad de P, K, S, Ca, Zn y B, se encuentran en el rango bajo; en cambio, los contenidos de Mg, Fe, Mn y Cu se encuentran en el rango alto y muy alto (Valarezo, 2018).

Al comparar los rangos de disponibilidad de los nutrientes que reporta por el referido laboratorio, con aquellos de la evaluación biológica, se evidencia que únicamente el P coincide en el rango bajo.

En cuanto a las diferencias entre los valores de los análisis de suelo (particularmente de MO, pH y acidez cambiante) reportados por los dos laboratorios (Agrocalidad y Agrar Projekt), es pertinente señalar la urgencia de disponer en el país de laboratorios certificados, con metodologías probadas para los diferentes tipos de suelos, de manera de contar con datos confiables, sobre cuya base se tomen decisiones para la gestión acertada de la fertilidad de los suelos, como se enfatiza en el Capítulo 6.

4.4.2.7. Aptitud del suelo para café arábigo.

Según los parámetros del sistema de evaluación de la aptitud de la tierra para café arábigo, propuesto por Sys (2000), se tiene lo siguiente:

- *Características topográficas del terreno.* Debido a que el rango de pendiente de los tres sistemas agroforestales oscila entre 25 a 38 %, la aptitud del terreno corresponde a la clase S3, por el riesgo de erosión.

- *Condiciones de humedad.* El drenaje interno del suelo es bueno, no existen limitaciones por riesgos de inundación, tampoco de una tabla de agua a menos de 100 cm de profundidad.
- *Características físicas del suelo.* No existen limitaciones por textura o por exceso de CaSO_4 o CaCO_3 . Debido a que las raíces se extienden en promedio hasta 65 cm (profundidad efectiva), la aptitud corresponde a la clase S3. Hay que adicionar la baja capacidad de aireación del segundo horizonte, lo cual está relacionado con la pérdida de la macro-porosidad por degradación de la estructura del suelo.
- *Fertilidad potencial.* La CIC de la arcilla, la suma de cationes y el contenido de materia orgánica no representan limitaciones de fertilidad potencial. En cambio, por ser la reacción del suelo muy fuertemente ácida (pH: 4,8), la baja saturación de bases y la elevada acidez cambiante, la aptitud se ubica en la clase N1.
- *Salinidad y alcalinidad.* Estos suelos no presentan limitaciones por exceso de sales o sodio.
- *Fertilidad actual.* Según el análisis químico y la evaluación biológica, los contenidos de N y P se ubican en el rango bajo; y aquellos de K y B, en el límite inferior del rango medio.

4.4.2.8. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua.

La evaluación biológica de la fertilidad evidenció que el testigo absoluto solamente produjo el 4,3 % de la masa seca de la planta indicadora, en relación con la solución completa, de lo cual se estima que sería posible elevar en alrededor de veinte veces los rendimientos de cualquier cultivo si se manejara óptimamente las condiciones físicas, químicas y de fertilidad del suelo, bajo un adecuado rango de tensión de humedad.

A continuación, se anotan las orientaciones conducentes a superar las limitaciones antes mencionadas, de manera de asegurar los más altos rendimientos del café arábigo, las mismas que primeramente deberán ser comprobadas experimentalmente:

Plantaciones en producción.

- Incrementar la macro-porosidad de aireación del horizonte Ap (al menos hasta 15%v), mediante la aplicación (en un círculo de 1,2 m de diámetro, alrededor de la planta) de materiales tales como compost, aserrín, bagazo, biomasa de *azolla*, porotillo, guabo y otros.
- Corregir la fuerte acidez del suelo mediante la aplicación de una dosis suficiente de cal agrícola (preferentemente dolomítica que contiene calcio y magnesio) para neutralizar el aluminio intercambiable: 1,5 a 2,0 cmol (+)kg⁻¹ de Ca²⁺ por cada cmol (+)kg⁻¹ de Al³⁺.
- Balancear la proporción de cationes del complejo de intercambio mediante la aplicación suficiente de K, de manera de disminuir la relación (Ca+Mg)/K a un rango de 35-45.
- Aplicar N, P, K y B. Las dosis y las fuentes de fertilizantes a aplicar para nutrir adecuadamente los cafetos, se deberá calcular en función de la edad de las plantas y los rendimientos de las cerezas.
- Monitorear anualmente la evolución de la reacción del suelo y la fertilidad actual (contenidos disponibles de: N, P, K, Ca, Mg, S, Zn y B).

Nuevas plantaciones o renovación de cafetales.

- Elevar la macroporosidad de la capa de 00-25 cm y la formación de agregados estables en los dos horizontes superiores, al menos hasta 15 %v (Enriquez y Duicela, 2014); para ello, en el sitio de la plantación cubrir un círculo de 1,2 m de diámetro con 10 kg de los

materiales orgánicos de la finca, la dosis de fósforo (de cualquier fuente disponible al menos para diez años de producción), más la cal dolomítica (para corregir la acidez) y 2 kg de yeso; luego, mezclar uniformemente hasta una profundidad de 25 cm. Con la finalidad de asegurar el desarrollo de la raíz pivotante, en el centro del círculo realizar un hoyo de 10 a 15 cm de diámetro y 1 metro de profundidad (se puede utilizar un barreno tipo Edelman o un hoyador para postes). Finalmente, rellenar el hoyo con el material mezclado de la capa superior y sembrar la planta.

Manejo y conservación del suelo y el agua.

- Garantizar un rango de humedad aprovechable suficiente en el suelo, especialmente en la temporada seca, mediante riego presurizado (por ejemplo, goteo) debidamente controlado, pero teniendo en cuenta que el cafeto necesita de una corta temporada seca para promover la floración.
- Implementar barreras vivas en curvas de nivel en todo el terreno a una distancia vertical de 1,5 m. La barrera viva puede ser de hierba luisa (*Aloysia citrodora*), tuna (*Opuntia ficus-indica*), poroto de palo (*Cajanus cajan* L.), piñón (*Jatropha curcas*), porotillo (*Erythrina velutina* Willd.) u otras especies de plantas de crecimiento similar, adaptadas a las condiciones agroclimáticas del lugar, cuidando que no entren en competencia con los cafetos.
- Las hileras de café y de los cultivos asociados se deben trazar paralelas a las barreras vivas.
- Construir una zanja de desviación en la parte superior del sistema agroforestal para interceptar la escorrentía de las partes altas, la cual deberá estar conectadas a vías de agua seguras para evitar la formación de cárcavas.

4.5. Suelos del sector Lozumbe de la parroquia Santa Rufina, cantón Chaguarpamba

4.5.1. Aspectos Generales

El sector Lozumbe pertenece a la parroquia Santa Rufina del cantón Chaguarpamba. Limita al norte con el cantón Piñas de la provincia de El Oro, al sur y oeste con el cantón Paltas y al este con la parroquia Buenavista del cantón Chaguarpamba (Figura 4.4.1). El relieve es predominantemente montañoso, con 44,7% de terrenos de pendiente fuerte y 42,6% de pendiente muy fuerte.

La geología corresponde a la unidad Chaguarpamba, constituida por tobas arenosas intercaladas con limolitas, aglomerados y turbiritas fosilíferas (IGM, 2014).

Los datos de clima registrados por la estación Santa Rufina del INAMHI, ubicada a 910ms.n.m. para un período de 30 años (1990-2019), indican que la temperatura media mensual es de 21,4°C, con una variación intermensual menor a 2°C. El promedio de precipitación anual es de 816,2mm. El diagrama ombrotérmico (Anexo F) indica que la estación lluviosa va de diciembre hasta mediados de mayo, por lo que el período de meses ecológicamente secos se extiende de junio a noviembre. Según la Clasificación de los Climas del Ecuador de Cañadas (1983), el clima de Santa Rufina corresponde a Subtropical Seco. De ello se deduce que el régimen de humedad del suelo es ústico y el de temperatura isotérmico.

En los sistemas agroforestales de café arábigo del sector Lozumbe, en un rango de altitud de 828 a 863 ms.n.m., se describieron dos perfiles de suelo en terrenos de 26 y 60% de pendiente, respectivamente. Como perfil representativo para la realización de los análisis físicos, químicos, hidrodinámicos y de fertilidad, se seleccionó el suelo del sistema

agroforestal de café en el terreno de 26% de pendiente (perfil P2L). La descripción del perfil del suelo del terreno de 60% de pendiente se presenta en el Anexo E.

En ambos sistemas agroforestales, las plantas de cafeto (92%) están asociadas con: banano (*Musa paradisiaca* L.), guabo (*Inga edulis* Mart.), lozumbé (*Myrsine andina*), naranjo (*Citrus sinensis* L.), fernán sánchez (*Triplaris cumingiana*), guabo blanco (*Inga edulis* Mart.), porotillo (*Erythrina velutina* Willd.), pachaco (*Schizolobium parahybum*), arabisco (*Jacaranda mimosifolia*), pico-pico (*Acnistus arborescens* L.), guayabo (*Psidium guajava* L.), mango (*Mangifera indica* L.), zapote (*Pouteria sapota*), chaya (*Cnidoscolus aconitifolius*), colorado (*Schinopsis balansae*), laritaco (*Vernonanthura patens* H.), cedro (*Cedrela odorata* L.), y papayo (*Carica papaya* L.).

4.5.2. Suelo del sistema agroforestal de café arábigo en el terreno de 26% de pendiente

Fecha de descripción del suelo: 23/11/2018.

Autores: Carlos Valarezo Manosalvas, Miguel Villamagua, Pedro Guaya y Karina Tandazo.

4.5.2.1. Características de la Unidad.

Código del perfil: P2L.

Clasificación Taxonómica: *Vertic Haplustalfs* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: Zona 17; 639792 E; 95.74263 N.

Altitud: 828 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente baja de montaña, terreno de 26% de pendiente (media).

Material Parental: Limolitas de la formación Chaguarpamba.

Drenaje interno: bueno.

4.5.2.2. Descripción general del suelo.

Suelo muy profundo constituido por los horizontes Ap, Bt y C; este último, con relictos dispersos del material parental. En los horizontes Ap y Bt se observan grietas verticales de 2 a 3 cm de ancho. Raíces abundantes se encuentran en la capa de 0-15 cm; adicionalmente, raíces muy finas y escasas se observan hasta 120 cm. La superficie del terreno está cubierta con abundante hojarasca seca proveniente de los árboles asociados, lo cual constituye una estrategia fisiológica de estas plantas para enfrentar la temporada fuertemente seca. La descripción individual de los horizontes se presenta en la Tabla 4.5.1. La Figura 4.5.1 contiene la fotografía del perfil del suelo.

Tabla 4.5.1. Descripción de los horizontes del Perfil P2L, del suelo del Sistema Agroforestal de café arábigo, terreno de pendiente media 26 %, Sector Lozumbe, parroquia Santa Rufina, cantón Chaguarpamba.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00-15	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo, franco limoso (tacto), con bloques subangulares fuertes, medios y gruesos, adherente, plástico, muy duro en seco.
Bt	15-45	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo, arcilloso, con prismas fuertes y gruesos, muy adherente, muy plástico y muy duro en seco.
C	45-115+	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) húmedo, arcillo limoso, masivo, muy adherente, muy plástico y muy duro en seco.

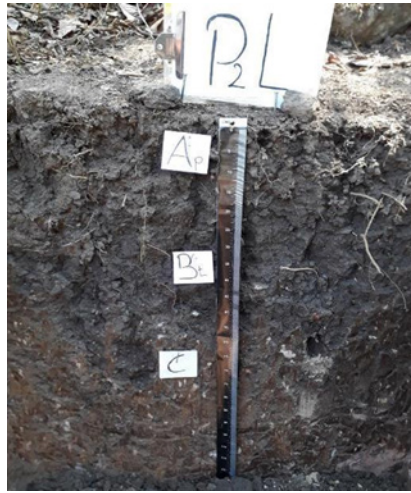


Figura 4.5.1. Perfil P2L del suelo del sistema agroforestal de café arábigo, pendiente media 26%, Sector Lozumbe, parroquia Santa Rufina, cantón Chaguarpamba.

4.5.2.3. Características físicas e hidrodinámicas del suelo.

La densidad aparente (D_a) para los horizontes Ap (00-15 cm) y Bt (15-45 cm) es de 1,3 y 1,4 gcm⁻³, respectivamente (Tabla 4.5.2.). El contenido de agua a saturación (SS: $pF=0$) es de 50 y 46% θ_v , en su orden. La capacidad de campo (CC: $pF=2,52$) es de 46 y 42% θ_v respectivamente, que revela que estas capas retienen una elevada cantidad de humedad después de haberse drenado el agua de los macroporos. El punto de marchitez permanente (PMP: $pF=4,2$) es alto, con 14 y 20% θ_v en su orden. El agua aprovechable (AA) es de 31 y 21% θ_v , calificada como muy alta; en cambio, la capacidad de aireación (CA) para los dos horizontes es de 4% θ_v (muy baja); consecuentemente, la condición física de estos horizontes para el crecimiento de las plantas se ubica en la zona I del diagrama triangular (muy pobre). La infiltración básica es de 1,8 cm h⁻¹ (moderadamente lenta), lo cual guarda relación con su textura superficial (franco limoso).

Tabla 4.5.2. Características físicas e hidrodinámicas de los dos primeros horizontes del suelo, en el terreno del 26% del sistema agroforestal de café arábigo del sector Lozumbe, parroquia Santa Rufina cantón Chaguarpamba.

Horizontes	Prof. (cm)	Da (g cm ⁻³)	Contenidos de humedad a diferentes succiones (%θ _v)			Distribución de volúmenes (% v) a capacidad de campo (pF=2,52)				Condición física del suelo: zona	Infiltración básica (cm h ⁻¹)
			SS	CC	PMP	AA	VS	CA	VPFI		
Ap	00-20	1,3	50	46	14	31	51	4	65	I	1,8
AB	15-45	1,4	46	42	20	21	54	4	75	I	

Nota. D = densidad aparente; AA = agua aprovechable; VS = volumen de sólidos; CA = capacidad de aireación; VPFI = volumen de poros físicamente inerte. (Tandazo, 2019).

4.5.2.4. Características químicas.

En la capa de 00-15 cm del suelo, el pH_{H₂O} es de 6,4 por lo que la reacción del suelo es ligeramente ácida (Tabla 4.5.3.). El contenido de materia orgánica es alto (4,7%). La acidez cambiante (Al³⁺ + H⁺) es muy baja [0,5 cmol (+)kg⁻¹]. La suma de bases es alta 31,9 [cmol (+)kg⁻¹]. El calcio y el magnesio cambiables se encuentran en el rango alto y medio, respectivamente [28,0 y 3,6 cmol (+)kg⁻¹]. El potasio está en rango bajo [0,2 cmol (+)kg⁻¹]; el sodio es bajo [0,1 cmol (+)kg⁻¹] por lo que no presenta amenaza para la estabilidad estructural. El suelo está completamente saturado de bases. Las relaciones Ca²⁺/Mg²⁺ es 7,9; Mg²⁺/K⁺ es 18,7 y (Ca²⁺+Mg²⁺)/K⁺ es 165,8. La proporción porcentual de Ca²⁺/Mg²⁺/K⁺ es de 86/12/1.

Tabla 4.5.3. Características químicas de la capa de 00-15 cm del suelo del sistema agroforestal de café en terreno de pendiente de 26%, del sector Lozumbe, parroquia Santa Rufina, cantón Chaguarpamba (Tandazo, 2019).

M.O	pH _{H₂O}	Al ³⁺	(H ⁺ + Al ³⁺)	CIC	Cationes cambiables				SB %	Proporción de cationes (%)		
					cmol (+)kg ⁻¹					Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
%					Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
4,7	6,4	0,3	0,5	25,9	28,0	3,6	0,2	0,1	100	87,0	13,0	1,0

4.5.2.5. Fertilidad actual.

4.5.2.5.1. Análisis de laboratorio.

En la Tabla 4.5.4. se presentan los contenidos promedio de los elementos disponibles, reportados por el laboratorio de Agrocalidad del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) para la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café en el terreno de pendiente de 26%, extraídos con la solución de Olsen Modificada (NaHCO_3 , 0,5 N + EDTA 1M). Los resultados indican que los contenidos de Mg, Fe, Mn, Cu y Zn se ubican en el rango alto; N, P, K y S en el rango medio; y, B en el rango bajo.

Tabla 4.5.4. Contenidos de elementos disponibles en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café en el terreno de 26% de pendiente, en el sector Lozumbe.

Elemento	Unidad	Valor	Interpretación
N	%	0,22	M
P	mg kg ⁻¹	13,7	M
K	cmol kg ⁻¹	0,21	M
Mg	cmol kg ⁻¹	1,78	A
Fe	mg kg ⁻¹	48,2	A
Mn	mg kg ⁻¹	33,88	A
Cu	mg kg ⁻¹	9,54	A
Zn	mg kg ⁻¹	14,51	A
B	mg kg ⁻¹	<0,5	B
S	mg kg ⁻¹	16,25	M

Nota. A = alto; M = medio; B = bajo. Fuente: Tandazo (2019)

4.5.2.5.2. Evaluación biológica.

Los valores promedio de los porcentajes de biomasa seca de la planta indicadora (tomate) a los sesenta días, para cada elemento omitido en las diferentes soluciones nutritivas, en relación con aquella de la solución completa (100%), en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema

agroforestal en el terreno de 26 % de pendiente del sector Lozumbe, se presentan en la Tabla 4.5.5. La evaluación biológica permitió clasificar en el rango alto a Zn, Cu, Mn y Fe; en el rango medio a Mg y B; y, en el rango bajo a N, P, S, K, y el testigo absoluto.

Tabla 4.5.5. Valores promedio de tres repeticiones del porcentaje de la masa seca de la planta indicadora (tomate), a los 60 días de edad, en relación con la solución completa (100 %), de la capa de 00-25 cm del suelo, del sistema agroforestal de café en el terreno de 26 % de pendiente en el sector Lozumbe.

Solución	Materia Seca g	%	Interpretación
-SC	13,0	100	
-N	1,7	13,1	B
- P	3,4	26,2	B
- K	3,3	25,4	B
- Mg	4,9	37,7	M
- S	3,9	30,0	B
- Zn	9,7	74,6	A
- Cu	10,2	78,5	A
- Mn	11,2	86,2	A
- B	6,1	46,9	M
- Fe	11,8	90,8	A
Testigo	1,6	12,3	B

Nota. SC = solución completa; Testigo = únicamente con agua destilada. A = alto; M = medio; B = bajo. Fuente: Tandazo (2019).

La Figura 4.5.2 muestra los resultados de la prueba de rangos múltiples de Tukey aplicada a los valores promedio de tres repeticiones de la biomasa seca (g) de la planta indicadora (tomate), evaluada a los 60 días en el suelo representativo del sitio Lozumbe. Los resultados evidencian la existencia de diferencias estadísticamente significativas al nivel de significancia del 5 % entre la solución completa (SC); las soluciones con omisión de Zn, Cu, Mn, y Fe, clasificadas en el rango alto; las soluciones con omisión de Mg y B, ubicadas en el rango medio; y las soluciones con omisión de S, P, K, y N, correspondientes al rango bajo, lo cual guarda correspondencia con los rangos de la Tabla 4.5.5.

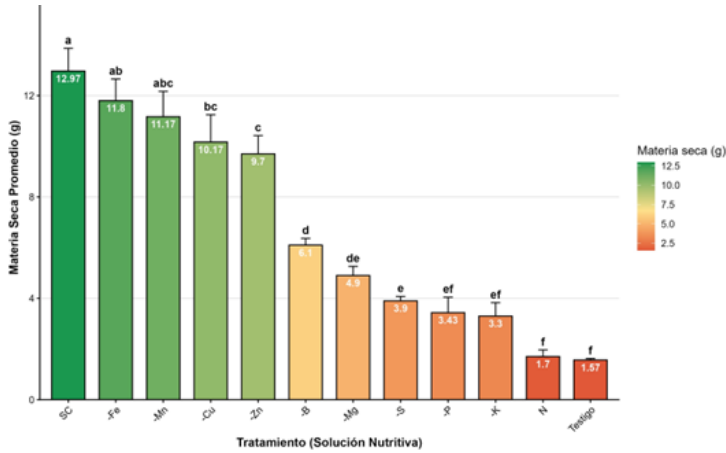


Figura 4.5.2. Prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la biomasa seca de la planta indicadora (tomate) a los 60 días de la evaluación biológica en el sitio Lozumbe.

Nota. SC = solución completa; las letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < .05$).



Figura 4.5.3. Estado de desarrollo de la planta indicadora (tomate) a los sesenta días en las diferentes soluciones de la evaluación biológica, de la capa de 00-25 cm en el suelo del sistema agroforestal de café en el terreno de 26 % de pendiente, sector Lozumbe (Tandazo, 2019).

Nota. SC = solución completa; T = testigo absoluto, solamente con agua destilada.

4.5.2.5.3. Análisis de laboratorio vs. evaluación biológica.

Al comparar la disponibilidad de los nutrientes entre el análisis químico y la evaluación biológica en la capa de 00-25 cm del suelo del sistema agroforestal de café en el terreno de 26% de pendiente del sector Lozumbé, solamente coinciden en el rango alto el Zn, Cu, Mn y Fe. Según la evaluación biológica, la disponibilidad de N, P y K pertenece al rango bajo; en tanto que, el análisis químico los ubica en el rango medio (Figura 4.5.4).

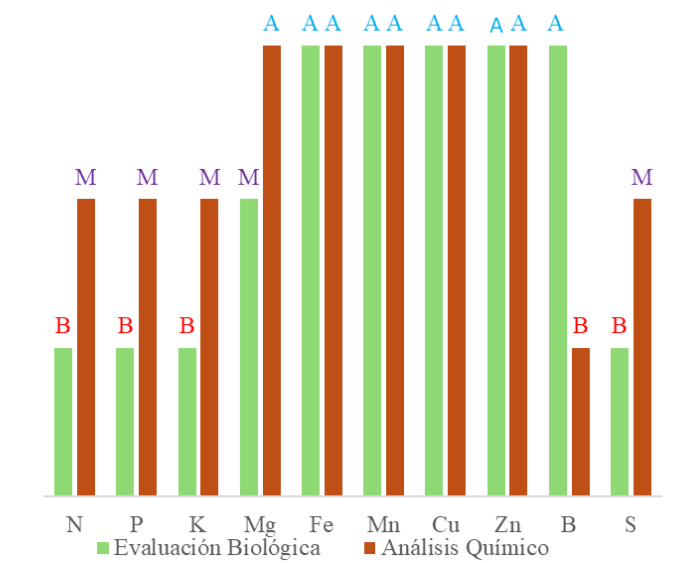


Figura 4.5.4. Correspondencia entre la evaluación biológica de la fertilidad actual y el análisis químico del suelo del SAF de café en el sector Lozumbé (Tandazo, 2019).

4.5.2.6. Aptitud del suelo para café arábigo.

Aplicando los criterios del sistema de evaluación de la aptitud de la tierra para café arábigo propuesto por Sys (2000) se obtiene lo siguiente:

- *Características topográficas del terreno.* En el sistema agroforestal del terreno de 26 %, la aptitud de la tierra corresponde a la clase S3; en cambio, en el sistema agroforestal del 60 % de pendiente, la aptitud de la tierra se ubica en la clase N₂ (no apto).
- *Condiciones de humedad.* El drenaje interno del suelo es bueno y no existen limitaciones por riesgos de inundación, ni por la presencia de una tabla de agua a menos de 100 cm de profundidad.
- *Características físicas del suelo.* No existen limitaciones por textura o por exceso de CaSO₄ o CaCO₃. Debido a que las raíces se extienden hasta 80 cm (profundidad efectiva), la aptitud corresponde a la clase S3; sin embargo, el mayor problema físico es la muy baja capacidad de aireación de los dos horizontes superiores, lo cual está relacionado con la pérdida de la macroporosidad por degradación de la estructura del suelo.
- *Fertilidad potencial.* La CIC de la arcilla, la suma de cationes, el contenido de materia orgánica, la reacción del suelo y la saturación de bases se encuentran en un rango adecuado, por lo que no constituyen limitaciones.
- *Salinidad y alcalinidad.* Estos suelos no presentan limitaciones por exceso de sales o sodio.
- *Fertilidad actual.* según la evaluación biológica, los contenidos disponibles de N, P, S y K se ubican en el rango bajo.

4.5.2.7. Orientaciones para el manejo sostenible del suelo y el agua.

La evaluación biológica de la fertilidad evidenció que en la capa de 00-25 cm del suelo, el testigo absoluto solamente produjo el 12,3 % de la masa seca de la planta en la solución completa, de lo cual se deduce que sería posible elevar en aproximadamente diez veces los rendimientos de cualquier cultivo si se manejaría óptimamente las condiciones físicas,

químicas y de fertilidad del suelo (incluida una adecuada tensión de humedad).

A continuación, se anotan las orientaciones conducentes para el manejo de las limitaciones antes mencionadas, de manera de asegurar los más altos rendimientos del cultivo de café arábigo, las mismas que deberán ser comprobadas experimentalmente:

Plantaciones en producción.

- Incrementar la macro-porosidad de aireación de la capa de 00-25 cm (al menos hasta 15%v), mediante la aplicación (alrededor de la planta en un diámetro de 1,2 m) de materiales de la poda de las especies arbustivas y arbóreas asociadas, bagazo, biomasa de *azolla* y otros, más 2 kg de yeso.
- Balancear la proporción de cationes del complejo de intercambio mediante la aplicación suficiente de K, de manera de disminuir la relación $(Ca+Mg)/K$ a un rango de 35-45.
- Aplicar N, P, K y S, así como, Mg y B cuyos contenidos disponibles se ubican en el rango bajo y medio, respectivamente. Las cantidades y fuentes de los fertilizantes se deberán calcular en función de la edad de las plantas de cafeto y los rendimientos de cerezas.
- Monitorear anualmente la evolución de la reacción del suelo y la fertilidad actual (contenidos disponibles de: N, P, K, Ca, Mg, S, Zn y B).

Nuevas plantaciones o renovación de cafetales.

- Elevar la macroporosidad de la capa de 00-25 cm y la formación de agregados estables; para lo cual, en el sitio de la plantación, cubrir uniformemente un círculo 1,2m de diámetro con 10kg de los materiales orgánicos disponibles en la finca, la dosis de

fósforo (de cualquier fuente disponible, al menos para diez años de producción), más 2 kg de yeso; luego, mezclar uniformemente hasta una profundidad de 25 cm. Con la finalidad de asegurar el desarrollo de la raíz pivotante, en el centro del círculo realizar un hoyo de 10 a 15 cm de diámetro y 1 metro de profundidad. Finalmente, rellenar el hoyo con el material mezclado de la capa superior y sembrar la planta.

Manejo y conservación del suelo y el agua.

- Asegurar la humedad suficiente en el suelo, especialmente en la temporada seca, mediante riego por goteo o microaspersión, debidamente controlado.
- Implementar barreras vivas en curvas de nivel en todo el terreno del sistema agroforestal a una distancia vertical de 1,5 m. La barrera viva puede ser de: hierba luisa (*Aloysia citrodora*), tuna (*Opuntia ficus-indica*), poroto de palo (*Cajanus cajan* L.), piñón (*Jatropha curcas*), también todas las especies herbáceas y arbustivas que actualmente conforman el sistema agroforestal, cuidando que no entren en competencia con los cafetos.
- Las hileras de café, y de los arbustos y árboles asociados del sistema agroforestal se deben trazar paralelas a las barreras vivas.
- Construir una zanja de desviación en la parte superior del sistema agroforestal para interceptar la escorrentía de las partes superiores, la cual deberá desembocar en vías de agua seguras para evitar la formación de cárcavas.
- Construir zanjas de infiltración en curvas de nivel en los terrenos de pendiente superior a 40 %: base 20 cm, talud 1/1 y profundidad 30 cm, a una distancia vertical de 2,5 m.

4.6. Referencias bibliográficas

- Bendix, J., Fabian, P., & Rollenbeck, R. (2004). Gradients of fog and rain in a tropical montane cloud forest of southern Ecuador and its chemical composition. En Proceedings of the 3rd International Conference on Fog, Fog Collection and Dew (11–15 October 2004, Cape Town, South Africa).
- Cañadas, L. (1983). El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador. Editores Asociados.
- Enríquez, G., y Duicela, L. (2014). Guía técnica para la producción y postcosecha de café arábigo. Consejo Cafetalero Nacional.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). Guía para la descripción de suelos (4.^a ed.). FAO.
- Guayllas, J. (1988). Estado nutricional de los suelos de Cañicapac y Ñamarin, mediante un método biológico [Tesis de ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Loja].
- Instituto Espacial Ecuatoriano. (2013). Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional: Cantón Chaguarpamba. IEE.
- Instituto Geográfico Militar. (2014). Mapa geológico del Ecuador: Hoja geológica 38 Zaruma.
- Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico.
- Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. (2017a). Hoja geológica Gonzanamá (Hoja 57, N VII-D, Serie J62-G). Dirección de Geología.
- Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. (2017b). Hoja geológica Las Aradas (Hoja 58, N VII-D, Serie J62-G). Dirección de Geología.
- Lima, K. (2023). Evaluación química y biológica de la fertilidad del suelo en los sistemas agroforestales con café en el sector Guanga del cantón Olmedo [Tesis de ingeniería agrícola, Universidad Nacional de Loja].
- MIDENA, Instituto Espacial Ecuatoriano, SENPLADES, & MAG. (2013). Memoria técnica geopedológica del cantón

- Chaguarpamba (Escala 1:25000). Proyecto Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional.
- Soil Survey Staff. (2010). Keys to soil taxonomy (11th ed.). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Sys, K. (2000). Land evaluation. International Postgraduate Centre for Soil Scientists, State University of Ghent.
- Tandazo, K. (2019). Evaluación química y biológica de la fertilidad del suelo en los sistemas agroforestales con café de los sectores Chaguarpamba y Lozumbe [Tesis de ingeniería agrícola, Universidad Nacional de Loja].
- Valarezo, C. (1985). Proyecto de evaluación de la fertilidad de los suelos de Saraguro. Universidad Nacional de Loja.
- Valarezo, C. (2018). Comentarios sobre los análisis del suelo y recomendaciones de fertilización para la plantación de café en la finca del señor Manuel Romero en Chaguarpamba [Informe técnico no publicado].
- Van Diest, A. (1983). A biological method for the assessment of the nutritional status of a soil. International Agricultural Centre.
- Villamagua, M., Vásquez, E., Sarango, R., y Valarezo, C. (2021). Evolución de la acidez del suelo y crecimiento del cafeto (*Coffea arabica* L.) en la hacienda El Cristal, cantón Loja, Ecuador. Universidad Nacional de Loja, Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables.
- Zambrano, P. (2019). Evaluación química y biológica de la fertilidad del suelo en los sistemas agroforestales con café de los sectores Consapamba y Pueblo Nuevo de los cantones Espíndola y Loja. [Tesis de ingeniero agrícola, Universidad Nacional de Loja].

Capítulo 5

Influencia de los factores de formación sobre las propiedades de los suelos de las plantaciones seleccionadas y su relación con la aptitud para el café arábigo

5.1. Introducción

Científicamente se reconoce que el suelo es un cuerpo natural que se forma por la acción conjunta de los siguientes factores: *clima* (principalmente temperatura y precipitación), *organismos vivos* (plantas, microorganismos, animales y el hombre), *relieve* (forma del terreno), los cuales actúan sobre el *material parental* en un cierto período de *tiempo* (Matchavariani, 2019). La variación de uno o más de estos factores da como resultado suelos diferentes, tanto por la presencia de distintos horizontes y capas, como por sus características físico-químicas, fertilidad, aptitud, y requerimientos de manejo. El tiempo que toma la formación del suelo es de miles de años (Valarezo, 2012).

Consecuentemente, los suelos encontrados en los sistemas agroforestales de café arábigo de la provincia de Loja (en el rango de altitud de 800 a 2.100 m s. n. m), son diferentes debido a las variaciones de los factores de formación mencionados, coincidiendo con la afirmación de Grieve et al. (1990) para zonas de montaña. La distribución altitudinal, los rasgos de los factores de formación y las características de los suelos estudiados se resumen en la Figura 5.1.

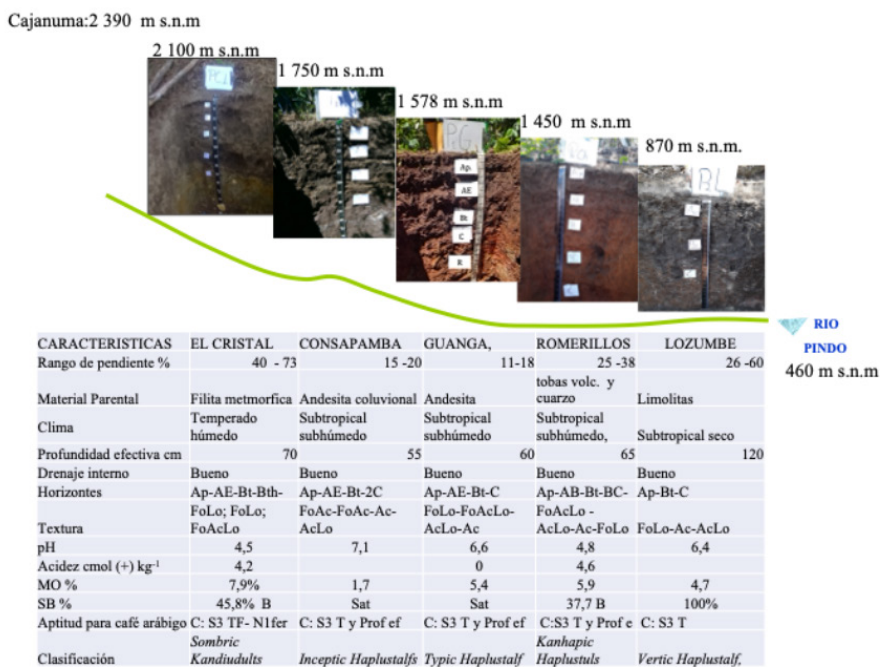


Figura 5.1. Rasgos de los factores de formación y características de los suelos estudiados en las plantaciones de café en la provincia de Loja, en función de la altitud.

En cuanto al factor *clima*, según la clasificación de climas del Ecuador (Cañadas, 1983), las plantaciones de café arábigo estudiadas en la provincia de Loja se encuentran desde el subtropical seco en Lozumbe (cantón Chaguarpamba), subtropical subhúmedo en Romerillos (cantón Chaguarpamba), Consapamba (cantón Espíndola) y la Guanga (cantón Olmedo); hasta temperado húmedo en El Cristal (cantón Loja). Los resultados indican que la temperatura media anual disminuye y la precipitación media anual aumenta a medida que se asciende, lo cual confirma lo encontrado por Wilcke et al. (2008) así: Lozumbe (830 m s.n.m. 21,4°C y 816,2 mm) y El Cristal (2.071 m s.n.m.; 16°C y 1.200 mm). Al respecto, Bendix et al. (2004) reportan que, entre las

ciudades de Loja y Zamora, en los Andes del Sur del Ecuador ($4^{\circ}00'S$, $79^{\circ}05'W$) el promedio de gradiente de temperatura es de $0,7^{\circ}C$ por cada 100m de incremento de la altitud, para un rango de 1.960 a 2.450 m s. n. m.

En base del Diagrama Ombrotérmico de Gaussen, en los agroecosistemas estudiados se ha podido identificar los meses ecológicamente secos, desfavorables para el crecimiento de la vegetación (Anexo F). En Lozumbe y Chaguarpamba se registran cuatro y medio meses ecológicamente secos (junio hasta mediados de octubre); en tanto que, Consapamba tiene cuatro meses (junio-septiembre). Los meses secos estimados en El Cristal van de septiembre a noviembre. También, se evidencia que marzo es el mes más lluvioso, con alrededor de 200 mm de precipitación y lluvias torrenciales (Valarezo et al., 2009).

En relación con lo anterior, en las plantaciones de café arábigo de la provincia de Loja, durante los meses ecológicamente secos es necesario asegurar la suficiente humedad en la zona radicular del suelo, mediante la aplicación de agua riego, utilizando un método apropiado para terrenos de ladera. Además, se debe considerar que, debido al cambio climático son más frecuentes los períodos secos y con mayor temperatura en la temporada lluviosa, en los cuales también es indispensable regar.

El *material parental* en el que se han formado los suelos es variable, desde limolitas en Lozumbe, tobas volcánicas y cuarzo en Romerillos, andesita en la Guanga-Olmedo, andesita coluvional en Consapamba; hasta filita metamorfozada en El Cristal. En ningún caso se encontraron suelos procedentes de rocas cristalinas ácidas (granito, granodiorita), que habrían dado lugar a la formación de suelos de textura gruesa.

El *relieve* de los suelos seleccionados como representativos en las plantaciones de café estudiadas, corresponde a terrenos de ladera en vertientes de la sierra montañosa sur, cuya pendiente varía de 20 a 40%; situación que demanda la implementación de prácticas de conservación para controlar la erosión. Lo más grave es que, en Lozumbe y en El Cristal hay plantaciones de café en terrenos de 60 y hasta 73% de pendiente respectivamente, en los cuales el riesgo de erosión es enorme; por lo que no son aptos para este tipo de uso.

Debido a que los suelos se han formado *in situ*, se asume que el *tiempo* de inicio (tiempo cero) corresponde a aquel en el que se formaron las respectivas geoformas (laderas), en las cuales se ha sucedido un proceso de reciclaje en equilibrio dinámico muy lento, tanto de remoción de material superficial por erosión natural o geológica, como de meteorización del material parental y neo-formación de minerales secundarios, excepto en el suelo en material aluvio coluvional reciente en El Cristal, por lo que no presenta horizontes de diagnóstico (Entisol).

A continuación, desde una aproximación integral, se aborda el efecto de los factores de formación mencionados sobre las características morfológicas, las propiedades físico-químicas y de fertilidad, la clasificación taxonómica de los suelos estudiados; así como, su relación con la aptitud para la producción de café arábigo.

5.2. Características morfológicas del perfil

Las características morfológicas del perfil del suelo están representadas por la profundidad efectiva, el drenaje interno y los horizontes/capas que se han formado en el transcurso del tiempo.

La profundidad efectiva de los suelos seleccionados como representativos en cada lugar de las plantaciones de café estudiados en la provincia de Loja (rango de pendiente 20-40%) oscila entre 55 y 70 cm, que corresponde a aquella que pueden explorar las raíces de los cafetos y las plantas asociadas que conforman el sistema agroforestal, si se considera que el sistema radicular del café arábigo demanda suelos profundos bien drenados (Melkel e Ittana, 2014). Sin embargo, la profundidad efectiva disminuye drásticamente a 20 cm en el terreno de pendiente de 73% de la plantación de café arábigo y eucaliptos (*Eucalyptus* sp.) de la hacienda El Cristal.

El drenaje interno en todos los suelos estudiados es calificado como bueno, debido a que los horizontes presentan colores uniformes, prácticamente sin manchas que evidenciarían procesos de óxido-reducción. Ello se atribuye también al factor relieve; por cuanto, al ser terrenos inclinados el agua lluvia o de riego fluye sin estancarse en el interior.

En relación a la presencia de horizontes o capas, cabe indicar que el bosque primario de los terrenos inclinados de los diferentes ecosistemas de las plantaciones de café en el paisaje de montaña de la provincia de Loja, en el cual hipotéticamente operaba un equilibrio natural entre el suelo y la cubierta vegetal que regulaba el funcionamiento de los ciclos del agua, los nutrientes y demás organismos vivos (Wilcke et al., 2002), ha sido eliminado por acción humana para implementar otro tipo de uso como pastizales, cultivos diversos y/o las plantaciones de café; lamentablemente sin compensar el referido equilibrio con medidas de protección del suelo y control del agua de escorrentía, dando paso a un proceso acelerado de erosión que ha eliminado la capa orgánica y parcialmente el horizonte A original.

Todos los suelos seleccionados como representativos en cada lugar de las plantaciones de café estudiados, contienen los horizontes minerales Ap, Bt y C; también AE y AB. Estos son el resultado del proceso de formación del suelo a lo largo del tiempo, con la alteración total de la estructura de la roca original.

El horizonte Ap se encuentra en la superficie del suelo, presenta acumulación de materia orgánica mezclada con la fracción mineral con texturas que van de franco limoso, franco arcillo limoso a franco arcilloso (atribuible al tipo de material parental); de estructura granular y con raíces finas y abundantes, propiedades que resultan de las actividades de cultivo, pastoreo o tipos similares de alteraciones.

El horizonte Bt se presenta debajo de los horizontes AE o AB, es de textura arcillo limosa a arcillosa con mayor contenido de arcilla que los horizontes superiores. El símbolo (t) indica acumulación de arcilla silícea, debido a un proceso recurrente de iluviación de material fino desde los horizontes superiores, incluyendo la formación de recubrimientos de películas de arcilla sobre los agregados (cutanes). Estos son bloques angulares o subangulares, que reflejan cambios de humedad en el suelo por la ocurrencia de una estación lluviosa y otra seca definidas a lo largo del año, situación que caracteriza al clima de la parte occidental de la provincia de Loja. Solamente en el suelo del terreno de 20% de pendiente de Lozumbe se encontraron prismas angulares. La textura predominantemente arcillosa del horizonte Bt puede constituir un impedimento para el desarrollo de la raíz pivotante del cafeto, como se evidencia en la Figura 5.2. Consecuentemente, será necesario considerar prácticas adecuadas en el momento de la plantación para asegurar superar esta limitación.



Figura 5.2. Raíz pivotante de cafeto atrofiada por efecto del impedimento físico debido a la presencia de horizontes arcillosos en el interior del suelo. Plantación de café en La Tingue, cantón Paltas, provincia de Loja.
Nota. Foto: Ing. Miguel Villamagua e Ing. Fernanda Livisaca (17/10/2025).

El horizonte C se encuentra en la parte inferior del perfil, con texturas que van de franco arcilloso, franco limoso, arcillo limoso y arcilloso; masivo, de consistencia firme y generalmente sin raíces. Es un horizonte mineral poco afectado por los procesos pedogenéticos.

La influencia de la forma del terreno sobre la morfología del perfil del suelo cuando aumenta la inclinación de la pendiente es evidente en los suelos de la hacienda El Cristal, en iguales condiciones de clima y material parental (filitas); así, en el suelo de 60% de pendiente se encuentra el horizonte Bw de incipiente formación, que ha reemplazado al horizonte Bt presente en el suelo de 40% de pendiente. Cuando la inclinación del terreno aumenta a 73% únicamente se encuentra el horizonte Ap seguido del horizonte C. Por otro lado, la influencia

del material parental sobre la morfología del perfil es muy clara, ya que en el terreno de 10% de pendiente cuyo material parental es aluvio-coluvional, únicamente se distingue el horizonte Ap y luego la discontinuidad litológica 2Cr con 80% de pedregosidad interna, pero con la presencia de raíces hasta 80 cm de profundidad.

5.3. Características hidrodinámicas del suelo

La relación fundamental entre el contenido de humedad (θ) y el potencial mátrico del suelo (Ψ_m) se denomina curva característica de humedad del suelo o curva pF (Lal y Shukla, 2004). Esta es una importante propiedad hidráulica relacionada con el tamaño y la conectividad del espacio poroso, la cual está afectada fuertemente por la textura, la estructura y por el contenido de materia orgánica (Kirkham, 2014). Bitelli (2010) señala que para un determinado contenido de humedad del suelo le corresponde un valor específico del potencial matricial; es decir, la curva de retención de agua en el suelo varía para cada tipo de suelo.

La curva de pF puede variar desde pF=0 (saturación), hasta pF=7 (suelo seco a la estufa). Para las aplicaciones agrícolas, usualmente el rango de interés está entre pF=0 y pF= 4,2 como punto de marchitez permanente (Dane y Hopmans, 2010).

De la capa superior (25 cm) de los suelos representativos de las plantaciones de café estudiadas, se tomaron muestras inalteradas con cilindros Kopecky de 100 cm³ y fueron sometidas a succiones crecientes en el Laboratorio de Suelos de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja (UNL), a fin de determinar los contenidos de humedad a: saturación o porosidad total (pF=0), capacidad de campo (pF= 2,52) y punto de marchitez permanente (pF=4,2). Con los resultados obtenidos, se elaboraron las curvas características de humedad de los suelos, de las cuales se derivaron los valores de: capacidad de aireación (CA),

agua aprovechable (AA) y el volumen de poros físicamente inerte (VPFI). La clase a la que pertenece la condición física del suelo para el desarrollo de las raíces de las plantas se obtuvo al introducir en un diagrama triangular de International Land Development Consultants of the Netherlands (ILACO, 1981), los valores porcentuales de los volúmenes de CA, AA y VPFI, cuando el contenido de humedad del suelo corresponde a la CC (pF: 2,52). (Figura 5.3).

Los valores de la capacidad de campo (CC) en la capa superior de los suelos estudiados, que corresponden al máximo contenido de agua aprovechable, oscilan entre 33 y 49% θ_v (altos); igualmente, son muy altos los valores del rango de agua aprovechable (31 y 38% θ_v), excepto en el sector de Guanga 20,2% θ_v (medio); los cuales en ambos casos se explica por la textura predominantemente fina de estos suelos.

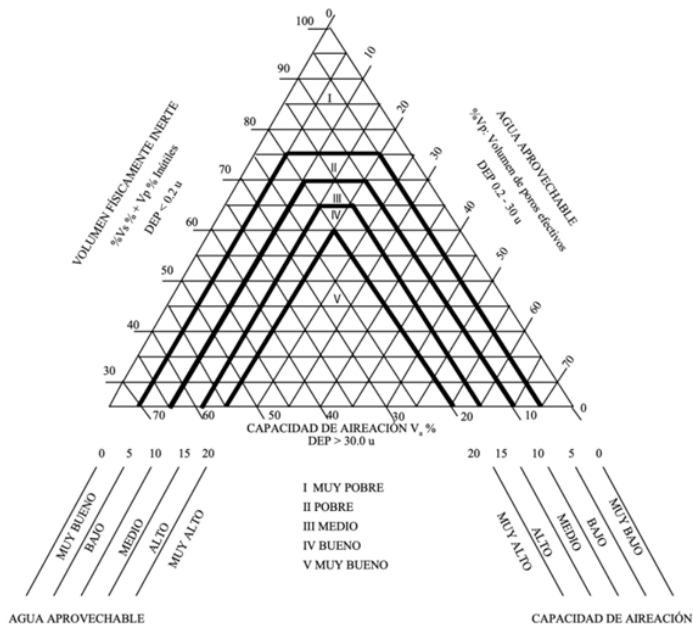


Figura 5.3. Diagrama triangular para la calificación de las condiciones físicas del suelo para el crecimiento de las plantas

Nota. Adaptado de Agricultural compendium for rural development in the tropics and subtropics (ILACO, 1981).

La capacidad de aireación (CA), que equivale al volumen porcentual del contenido de agua entre saturación y capacidad de campo, representa los poros del suelo que tienen un diámetro equivalente mayor a 30 micras (macroporos). La CA en la capa superior de los suelos estudiados es $<10\%v$, calificada como a baja (excepto en el suelo del sector Guanga-Olmedo que es alta: $18,3\%v$); lo cual constituye una grave limitación para el desarrollo de las raicillas tanto del cafeto como de los cultivos asociados, ya que restringe el intercambio de CO_2 por O_2 resultante del proceso de respiración. A consecuencia de la baja capacidad de aireación la condición física de estos suelos para el crecimiento de las plantas se ubica en las clases baja y muy baja.

La baja capacidad de aireación estaría relacionada con la textura fina de los suelos (franco limoso a franco arcilloso), en los cuales la mayoría de los poros son meso y microporos, que retienen altas cantidades de agua a capacidad de campo (pF: 2,52), generando muy poco espacio para que sea ocupado por el aire; en otras palabras, la mayoría del espacio poroso del suelo está lleno de agua, lo que genera una deficiente disponibilidad de aire para el desarrollo de las plantas. Pero, podría también estar asociada a una degradación de la estructura debido a condiciones anteriores de sobrepastoreo de vacunos; o, según indica Jordan (2010), aguaceros con grandes gotas de lluvia que destruyen los agregados y la dilución de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} que favorecen la floculación de los coloides (arcilla y humus).

Al respecto, Hutapea y Apriliya (2020), sostienen que la falta de aire en el suelo, afecta negativamente las características físicas (compactación y una estructura deficiente); químicas (altera el ciclo de nutrientes, disminuyendo el Fe y el Mn, y liberando gases nocivos (metano y el sulfuro de hidrógeno); y, biológicas (debilita las raíces, inhibe la actividad microbiana aeróbica y puede causar la muerte de las raíces).

Por su parte, Amber y Rivka (2025) señalan que cuando el oxígeno se agota, se reduce la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrientes, (especialmente N, P, K y S); de igual manera, el número, la actividad y la biodiversidad de los microorganismos y las lombrices de tierra se ven afectados, lo que les impide descomponer y reciclar la materia orgánica y los nutrientes con mayor eficiencia. En razón de ello, las prácticas de manejo de estos suelos deberán estar orientadas; entre otros, al incremento de la capacidad de aireación al menos a 15 %, lo que demanda la aplicación tanto de materiales orgánicos disponibles en la finca, como de minerales que contengan Ca^{2+} para flocular las arcillas y promover la formación de agregados estables (caliza, dolomita y yeso).

En la situación excepcional de la capa superior del suelo de Guanga, la alta capacidad de aireación a capacidad de campo (pF: 2,52), estaría asociada a la interacción de algunas de sus propiedades específicas, tales como: baja densidad aparente ($1,1 \text{ g cm}^{-3}$) y alto contenido de materia orgánica (5,4%), lo que demuestran que el suelo está bien estructurado y drenado, con una buena disponibilidad de oxígeno en la zona radicular. La capa superior del suelo de Romerillos también presenta una aceptable aireación, pero desciende abruptamente a muy baja en el horizonte AB.

5.4. Reacción del suelo y acidez cambiante

En los sitios de estudio, la reacción del suelo expresada en unidades de pH en agua, disminuye con la altitud desde pH 6,4 (débilmente ácido) en el sector Lozumbe (830 m s. n. m.) hasta pH 4,5 (fuertemente ácido) en la finca El Cristal (2.071 m s. n. m.), lo cual se atribuye al efecto de disminución de temperatura e incremento de la precipitación, coincidiendo con lo que afirman Schrumpf et al. (2001). Sin embargo,

en el sitio Romerillos (cantón Chaguarpamba 1.450 m s. n. m.) el pH es de 4,8 (fuertemente ácido), lo cual se explicaría por el tipo de material parental (lutitas y limolitas de grano fino y granos de cuarzo de la Unidad Chaguarpamba del Cretáceo) o por haber existido un paleoclima más húmedo, según lo sustentan Espinosa et al. (2018). No obstante, en la localidad de Guanga-Olmedo (1.580 m s. n. m., prácticamente con el mismo clima que en Romerillos) y Consapamba (1.750 m s. n. m.), cuyo material parental es andesita y andesita coluvional respectivamente, los valores de pH son 6,6 (débilmente ácido) y 7,1 (ligeramente alcalino) respectivamente, valores considerados adecuados para el cultivo de café arábigo.

La acidez cambiante ($Al^{3+}+H^+$) solamente se presenta en los suelos de las plantaciones de Romerillos [$4,6 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$] y El Cristal [$4,2 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$], valores calificados como muy altos, lo cual guarda correspondencia con su reacción que es fuertemente ácida ($pH < 5$). En tales condiciones el aluminio se encuentra en forma soluble ($Al^{3+} \cdot 6H_2O$) y precipita los fosfatos, lo que impide que éstos sean absorbidos por la planta, por lo que resulta indispensable neutralizar la acidez mediante la aplicación de enmiendas calcáreas calculadas en base al contenido de Al^{3+} , hasta alcanzar un rango de pH de 5,6 a 6,0 que es el óptimo recomendado para la plantación de café arábigo (Melkel e Ittana, 2014).

5.5. Materia orgánica

El contenido de materia orgánica en la capa de 00-25 cm es muy alto en los suelos de las plantaciones El Cristal (7,9%), Guanga (5,4%) y Lozumbe (6,4%); mientras que, es medio en Romerillos (4,8%) y bajo en Consapamba (1,7%). En el suelo de El Cristal, el alto contenido de materia orgánica guarda correspondencia con la altitud (clima

temperado húmedo) y la fuerte acidez. En los casos de Guanga y Lozumbe, es posible que sea el resultado de las prácticas de manejo, lo cual requiere ser investigado. El mantenimiento de un contenido alto de materia orgánica en estos suelos es necesario para asegurar la formación de agregados estables y elevar la capacidad de aireación.

5.6. Capacidad de Intercambio catiónico, cationes cambiables y saturación de bases

La capacidad de intercambio catiónico en la capa de 00-25 cm de los suelos estudiados se ubica en el rango bajo para El Cristal [7,2 cmol (+)kg⁻¹]; medio en Consapamba [16,2 cmol (+)kg⁻¹] y alto en Guanga, Romerillos y Lozumbe [25,7; 25,9 y 28,6 cmol (+)kg⁻¹ respectivamente]. Sin embargo, en El Cristal el contenido de materia orgánica es alto, el valor bajo de la CIC indicaría que ésta es poco humificada y que el tipo dominante de arcilla es caolinita; en tanto que, en los otros suelos las arcillas del grupo de las esmectitas (montmorillonita y vermiculita) serían las predominantes, lo cual se relaciona con el clima y el tipo de material parental. Se requieren estudios de difracción de rayos X para confirmar el tipo de arcilla de estos suelos.

La saturación de bases guarda correspondencia con el pH del suelo. En los sectores de El Cristal y Romerillos, cuyos suelos son de reacción fuertemente ácida, la saturación de bases es baja (45,8% y 37,7% respectivamente), lo que indica que en el complejo de intercambio predominan los iones hidrógeno y aluminio. Por el contrario, en Guanga, Consapamba y Lozumbe, la saturación de bases es completa (100%). En todos los casos, el catión predominante en el complejo de intercambio es el Ca, aunque con valores bajos en El Cristal y Romerillos [1,9 y 6,9 cmol (+)kg⁻¹ en su orden], seguido por el Mg y el K.

5.7. Fertilidad actual

La disponibilidad de los nutrientes para las plantas de los suelos estudiados (fertilidad actual) fue evaluada en muestras tomadas en la capa de 00-25 cm. Una parte de las mismas fueron enviadas a diferentes laboratorios del país, en los cuales, la extracción de los elementos disponibles se realiza utilizando la solución de Olsen Modificada, oficialmente aprobada por la Red de Laboratorios de Suelos del Ecuador (RELASE, 2016); la otra parte, se utilizó para realizar la evaluación biológica de la fertilidad, mediante el método del elemento omitido, propuesta por Van Diest (1983), posteriormente adaptada y validada para las condiciones locales por Valarezo (1985) y Guayllas (1988), en la cual se utiliza el tomate como planta indicadora en experimentos de invernadero de sesenta días de duración. La correspondencia entre los resultados de la disponibilidad de los nutrientes mediante el análisis de laboratorio frente a la evaluación biológica de los suelos estudiados se anota a continuación:

- Según los resultados de los análisis de laboratorio, el nitrógeno aprovechable se encuentra en el rango medio, excepto en el suelo de Consapamba que se ubica en el rango bajo. Por su parte, la evaluación biológica evidenció que en todos los suelos la disponibilidad de este elemento es baja.
- El análisis de laboratorio indica que el fósforo aprovechable es bajo únicamente en el suelo de Guanga (Olmedo), siendo medio en Romerillo, Lozumbe y El Cristal, y alto en Consapamba. En cambio, la evaluación biológica evidenció que la disponibilidad de este elemento es baja en todos los suelos.
- La disponibilidad del potasio, según el análisis de laboratorio es media en Consapamba, Romerillos y Lozumbe y baja en El Cristal

y la Guanga. La evaluación biológica indica que la disponibilidad es media-baja solamente en Lozumbe, en tanto que en los otros suelos se ubica en el rango medio.

- En El Cristal, según el análisis de laboratorio la disponibilidad del magnesio es baja y alta en los demás suelos; en cambio, según la evaluación biológica se ubica en el rango medio en El Cristal, Romerillos y Lozumbe, y en el rango alto en Consapamba y La Guanga. La disponibilidad de este elemento por los dos métodos, únicamente coincide en el rango alto en Consapamba y La Guanga.
- La disponibilidad del azufre mediante el análisis de laboratorio se ubica en el rango alto en Romerillos, mientras que en los demás suelos se encuentra en el rango medio. La evaluación biológica indica que la disponibilidad de este elemento es baja en Consapamba y Lozumbe; media en El Cristal y Romerillos, y baja en Lozumbe. La disponibilidad de este elemento no coincide en ningún caso para los dos métodos. Cabe señalar que, en el análisis de laboratorio de este elemento no se utiliza la solución del Olsen Modificada, sino que la extracción se hace con agua, y luego titulación (método turbidimétrico).
- Según el análisis de laboratorio, el contenido de cobre aprovechable se ubica en el rango alto en todos los suelos, excepto en El Cristal que es medio; en tanto que, la evaluación biológica evidencia que el rango de este elemento es medio en Consapamba y Romerillo, y alto en los otros suelos. El rango de disponibilidad de este nutriente coincide para los dos métodos de estimación en el rango alto en El Cristal, La Guanga y Lozumbe.
- El análisis de laboratorio reveló que el contenido de hierro aprovechable es alto en todos los suelos, lo cual coincide con la evaluación biológica, excepto en Consapamba que es bajo.

- El contenido de manganeso aprovechable según el análisis de laboratorio se ubica en el rango medio en El Cristal y Consapamba; y, en el rango alto en los otros suelos. Por su parte, la evaluación biológica indica que la disponibilidad de este elemento es media en Consapamba y Romerillos, y alta en El Cristal, Guanga, y Lozumbe. Los rangos de disponibilidad para los dos métodos coinciden en Consapamba, Guanga, Romerillos y Lozumbe.
- La disponibilidad del zinc, según el análisis de laboratorio se ubica en el rango bajo en El Cristal, Consapamba y Romerillos, en el rango medio en Guanga, y en el rango alto en Lozumbe; en cambio, la evaluación biológica indica que la disponibilidad es alta en todos los suelos. El rango de disponibilidad para los dos métodos únicamente coincide en Lozumbe (alto).
- La disponibilidad del boro según el análisis de laboratorio es baja en todos los suelos. Por su parte, la evaluación biológica ubica en el rango medio a los suelos de El Cristal, Romerillos y Lozumbe, y en el rango alto a los suelos de Consapamba y Guanga. No obstante que en el análisis químico de este elemento no se utiliza la solución de Olsen Modificada, el rango de disponibilidad de este elemento no coincide en ninguno de los suelos para los dos métodos.

Lo anterior evidencia que no existe una correspondencia aceptable entre el análisis químico de laboratorio y la evaluación biológica prácticamente para todos los elementos, por lo que se concluye que los datos de los contenidos de nutrientes disponibles extraídos con la solución de Olsen Modificada son de dudosa aplicación en los suelos de la provincia de Loja; por lo tanto, es necesario investigar la disponibilidad de estos elementos empleando otras soluciones extractoras que deben validarse mediante la evaluación biológica.

Es importante recalcar que el N y P son los macroelementos que se encuentran en el rango de baja disponibilidad en estos suelos, por lo que deben ser aplicados de fuentes orgánicas o inorgánicas. Adicionalmente, se debe tomar en cuenta que en la cosecha de las cerezas de café y de los otros cultivos asociados al sistema agroforestal se exportan los nutrientes tomados del suelo, por lo que frecuentemente será necesario considerar la reposición de aquellos que se encuentran en el rango medio.

5.8. Aptitud de los suelos para el café arábigo

En la clasificación de la aptitud para el café arábigo Sys, et al. (2013) se indica que el suelo ideal para este cultivo es aquel que pertenece a la Clase S1, la cual demanda las siguientes características: pendiente del terreno $< 4\%$ sin riesgo de inundación, buen drenaje; textura FoAcLo a FoAc; fragmentos gruesos $< 3\%$; profundidad efectiva > 200 cm; $\text{CaCO}_3 < 1\%$; yeso $< 0,5\%$; CIC aparente > 24 cmol(+) kg⁻¹ de arcilla; saturación de bases $> 80\%$; $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 6,5-7,0; materia orgánica $> 4\%$; $\text{CE}_e < 0,5$ dS m⁻¹.

En el caso de los suelos estudiados en las plantaciones de café de la provincia de Loja, ninguno de ellos reúne todas las características y condiciones para ubicarse en la Clase S1, por lo que se los ha clasificado en la Clase S3, debido a las siguientes limitaciones: grado de pendiente, profundidad efectiva, textura fina, baja capacidad de aireación (excepto Guanga), reacción fuertemente ácida y baja saturación de bases (El Cristal y Romerillos), y bajos niveles de nitrógeno y fósforo.

Algunas de las limitaciones químicas y de fertilidad como la fuerte acidez y los bajos niveles de macro y micronutrientes, son relativamente manejables técnica y económicamente; en tanto que, las limitaciones físicas (textura fina, baja capacidad de aireación y pendiente) requieren

de prácticas adecuadas de manejo integral del suelo, las cuales deberían ser generadas y validadas por la investigación aplicada.

5.9. Infiltración

La infiltración es el proceso que gobierna la entrada y el movimiento vertical del agua a través de la superficie del suelo en una unidad de tiempo definida (LT^{-1}) (Porta et al., 2014). Es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico, puesto que está relacionado con el escurrimiento superficial y con la recarga de los acuíferos; por lo tanto, su evaluación es de suma importancia para un manejo sustentable de los suelos (Landini et al., 2007).

La velocidad de infiltración es considerada como un indicador clave de la calidad física del suelo; así, una tasa de infiltración muy lenta o demasiado rápida crea problemas en el manejo del agua y del suelo. El agua que no se infiltra en los terrenos planos se estanca; en cambio, en aquellos inclinados fluye como escorrentía, la cual es responsable de la erosión hídrica (a mayor escorrentía, mayor erosión) (Arshad y Martin, 2002).

La infiltración básica (I_b) es aquella que presenta una tasa relativamente constante, la misma que se alcanza después de 3 o 4 horas de iniciada la prueba. El término relativamente constante significa que el cambio de la velocidad de infiltración es $<10\%$ a la velocidad de infiltración de la hora precedente (Lanfranco et al., 2014).

En Lozumbe y El Cristal los valores de infiltración básica son de 1,8 y $2,7\text{ cm h}^{-1}$, calificados como moderada y moderadamente lenta respectivamente, lo cual guarda relación con la textura fina de la capa superior del suelo. En cambio, en Guanga, Consapamba y Romerillos los valores van de 8,1 a $28,6\text{ cm h}^{-1}$ (rápida y muy rápida), los cuales no

corresponden a la textura fina del suelo; por lo que se deduce que, en estos casos el suelo ha desarrollado en la temporada seca fisuras internas debido a la contracción de la arcilla (grupo de las esmectitas) que demoran en cerrarse. Consecuentemente, en estos suelos las pruebas de infiltración deberían realizarse después de la mitad de la temporada lluviosa; esto es, cuando la arcilla se haya expandido completamente, para de esa manera obtener el valor real de la infiltración; por cuanto, para decidir las medidas adecuadas de manejo del agua de riego y el suelo, es esencial conocer a qué velocidad el agua de lluvia o de riego se infiltra.

5.10. Erosión

Las condiciones de topografía irregular predominante en la provincia de Loja limitan la disponibilidad de tierra agrícola y condicionan a que se cultiven terrenos inclinados, propensos a severos procesos de erosión por efecto de las lluvias de elevada intensidad cuando están desprotegidos. Ello significa la pérdida progresiva de la capa superior del suelo, con el concomitante afloramiento de capas internas arcillosas de menor fertilidad y de pobres condiciones físicas, lo cual impide asegurar una mayor y sostenida productividad de las plantaciones de café arábigo.

Debe quedar claro que la principal consecuencia de la erosión es la pérdida del suelo productivo, que es el recurso más importante para la producción agrícola, lo que se traduce en un profundo impacto negativo, tanto para la regulación del ciclo hidrológico como para la economía de los productores. También, los sedimentos transportados causan graves problemas en las partes bajas de las cuencas, afectando además a los pobladores de los centros urbanos (Espinosa et al., 2018).

Al respecto, al café arábigo no se recomienda plantarlo en pendientes mayores a 30% (Melkel e Ittana, 2014); sin embargo, los sistemas agroforestales de café estructurados con tres estratos de vegetación, constituyen una alternativa sostenible en la arrugada fisiografía de la provincia de Loja, pero, es necesario que vayan acompañados de prácticas de conservación de suelos adecuadas para los diferentes rangos de pendiente del terreno, que incluya la evacuación controlada del exceso de agua lluvia, principalmente en el mes de marzo y la aplicación eficiente de agua de riego en la temporada seca. Este es un desafío para toda la sociedad, particularmente las instituciones públicas que promueven el desarrollo productivo, el manejo sustentable de los recursos naturales y el bienestar social. También, para la academia, las instituciones financieras, ONG, las asociaciones de productores, los medios de comunicación colectiva y obviamente los productores.

5.11. Clasificación Taxonómica de los Suelos

En Ecuador oficialmente se utiliza el Sistema Americano de Taxonomía de Suelos, conocido como Soil Taxonomy. Es un sistema jerárquico que clasifica los suelos en diferentes categorías, basadas en sus propiedades morfológicas, químicas y físicas. Este sistema es ampliamente usado en estudios científicos, manejo de tierras y conservación de suelos.

El Soil Taxonomy se organiza en seis niveles jerárquicos: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie. En la versión inicial del Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975) en el nivel jerárquico superior clasifica a los suelos en 10 órdenes, actualmente el sistema reconoce 12 órdenes (Soil Survey Staff, 2010), clasificados según sus características de formación y propiedades dominantes: Alfisoles, Andisoles, Aridisoles, Entisoles, Gelisoles, Histosoles, Inceptisoles, Mollisoles, Oxisoles, Spodosoles, Ultisoles, y Vertisoles.

En los suelos estudiados de las plantaciones de café en la provincia de Loja, no se dispone de todos los análisis físicos, químicos y mineralógicos de los horizontes y capas que se requieren para ser clasificados dentro del Soil Taxonomy hasta el nivel de Serie; sin embargo, en la perspectiva de orientar futuros estudios y comunicar los resultados a la comunidad científica, sobre la base de información disponible se ha realizado la clasificación taxonómica aproximada de los suelos, aplicando las claves del Soil Taxonomy del 2010 (Soil Survey Staff, 2010) hasta el nivel de Subgrupo.

Debido a que todos los suelos cuyos perfiles han sido seleccionados como representativos en las plantaciones de café estudiadas, presentan en el interior un horizonte argílico, producto de la acumulación iluvial de arcilla, se clasifican en los órdenes Alfisoles y Ultisoles; pero, con diferencias clave en su fertilidad y el grado de meteorización. Los Alfisoles tienen un alto contenido de bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), lo que determina que sean más fértiles que los Ultisoles que se caracterizan por ser fuertemente ácidos, con baja saturación de bases y la presencia de altos contenidos de $\text{Al}^{3+} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, situación que se atribuye al clima (mayor precipitación) y al efecto del material parental.

A continuación, se presenta la clasificación taxonómica (con aproximación hasta el Subgrupo) de los suelos representativos de las plantaciones de café estudiadas:

- El Cristal, cantón Loja, 2.071 m.s.n.m.; cuenca alta del río Catamayo-Chira. Clasificación: *Sombric Kandiodults*, Ultisol con régimen de humedad údico, y con la presencia en el interior de un horizonte sómbrico de color oscuro.

- Consapamba, cantón Espíndola, 1.750 m.s.n.m.; cuenca media del río Catamayo-Chira. Clasificación: *Inceptic Haplustalfs*, Alfisol, con régimen de humedad ústico e inceptic por el espesor del horizonte argílico.
- Guanga, cantón Olmedo, 1.580 m.s.n.m.; cuenca alta del río Puyango-Tumbes. Clasificación: *Typic Haplustalf*, Alfisol típico, con régimen de humedad ústico.
- Romerillos, cantón Chaguarpamba, 1.470 m.s.n.m.; cuenca alta del río Puyango-Tumbes. Clasificación: *Typic Haplustuls*, Ultisol típico, con régimen de humedad ústico.
- Lozumbe, cantón Chaguarpamba, 830 m.s.n.m.; cuenca media del río Puyango-Tumbes. Clasificación: *Vertic Haplustalf*, Alfisol con régimen de humedad ústico, con grietas de 3 mm o más de grosor y estructura prismática, por efecto de la presencia de arcillas expansivas.

5.12. Referencias bibliográficas

- Amber, A., & Rivka, F. (2025). Introduction to soil science. <https://doi.org/1031274/isudp.2025201>
- Arshad, M., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for quality indicators in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 153–160. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880901002523>
- Bendix, J., Fabian, P., & Rollenbeck, R. (2004). Gradients of fog and rain in a tropical montane cloud forest of southern Ecuador and its chemical composition. En *Proceedings of the 3rd International Conference on Fog, Fog Collection and Dew (11–15 October 2004, Cape Town, South Africa)*.
- Bitelli, M. (2010). Measuring soil water potential for water management in agriculture. *Sustainability*, 2(5), 1226–1247. <https://www.mdpi.com/2071-1050/2/5/1226>
- Cañadas, L. (1983). *El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador*. Editores Asociados.
- Dane, J. H., & Hopmans, J. W. (2010). Water retention and storage. En *Methods of soil analysis: Part 4—Physical methods*. University of California. <http://hopmans.lawr.ucdavis.edu/papers-ppt-zip/Chapt3-3-1&21.pdf>
- Grieve, I. C., Proctor, J., & Cousins, S. A. (1990). Soil variation with altitude on Volcán Barva, Costa Rica. *Catena*, 17, 525–534.
- Guayllas, J. (1988). Estado nutricional de los suelos de Cañicapac y Ñamarin, mediante un método biológico [Tesis de ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Loja].
- Hutapea, S., & Apriliya, I. (2020). Soil aeration. <https://indahapriliya.blog.uma.ac.id/wp-content/uploads/sites/620/2020/12/11th-Meeting.pdf>
- International Land Development Consultants of the Netherlands. (1981). *Agricultural compendium for rural development in the tropics and subtropics*. Elsevier.

- Jordán, A. (2010). Manual de edafología. Universidad de Sevilla, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. <http://libnet.unse.edu.ar>
- Kirkham, M. B. (2014). Principles of soil and plant water relations (2nd ed.). Kansas State University. <https://themodern.farm/studies/Principles%20of%20Soil%20and%20Plant%20Water%20Relations%20-%20M.B.%20Kirkham.pdf>
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). Principles of soil physics. The Ohio State University.
- Landini, A., Martínez, D., Díaz, H., Soza, E., Agne, D., y Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. Ciencia del Suelo. <http://www.scielo.org.ar/pdf>
- Lanfranco, J., Pellegrini, A., y Cattani, V. (2014). Contenidos de edafología: Génesis, evolución y propiedades físico-químicas del suelo. Universidad Nacional de La Plata.
- Matchavariani, L. (2019). Soil forming factors. https://www.researchgate.net/publication/333899810_Soil-Forming-Factores
- Melkel, A., & Ittana, F. (2014). Nutritional requirement and management of Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) in Ethiopia. <https://www.researchgate.net/publication/287341230>
- Porta, J., López-Acevedo, M., y Poch, R. M. (2014). Edafología: Uso y protección de suelos. Mundi-Prensa.
- Red de Laboratorios de Suelos del Ecuador. (2016). Informe de gestión correspondiente al año 2015. <http://www.agrocalidad.gob.ec/wp>
- Schrumpf, M., Guggenberger, G., Schubert, C., Valarezo, C., & Zech, W. (2001). Tropical montane rain forest soils: Development and nutrient status along an altitudinal gradient in the south Ecuadorian Andes. *Die Erde*, 132, 43–59.
- Soil Survey Staff. (1975). A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (Agricultural Handbook No. 436). U.S. Department of Agriculture.

- Soil Survey Staff. (2010). Keys to soil taxonomy (11th ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Sys, C., Van Ranst, E., & Debaveye, J. (1993). Land evaluation: Part III. Crop requirements. State University of Ghent.
- Valarezo, C. (1985). Proyecto de evaluación de la fertilidad de los suelos de Saraguro. Universidad Nacional de Loja.
- Valarezo, C. (2012). El suelo como recurso básico para el crecimiento de las plantas: Génesis, mineralogía, características físico-químicas y fertilidad. Universidad Nacional de Loja.
- Valarezo, C., Maza, H., y Gómez, I. (2009). Sistemas agroforestales exitosos y prácticas de uso óptimo del agua para las zonas secas de la provincia de Loja. Universidad Nacional de Loja.
- Van Diest, A. (1983). A biological method for the assessment of the nutritional status of a soil. International Agricultural Centre.
- Wilcke, W., Oelmann, Y., Schmitt, A., Valarezo, C., Zech, W., & Homeier, J. (2008). Soil properties and tree growth along an altitudinal transect in Ecuadorian tropical montane forest. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 220–230.
- Wilcke, W., Yasin, S., Abramowski, U., Valarezo, C., & Zech, W. (2002). Nutrient storage and turnover in organic layers under tropical montane rain forest in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 53, 15–27.

Capítulo 6

Mejoramiento de la productividad del café en la provincia de Loja: tareas que debe enfrentar la investigación sobre la gestión de la fertilidad del suelo y el uso óptimo del agua

6.1. Introducción

En el Capítulo 2 se hizo referencia que en el Ecuador los rendimientos de café son muy bajos con un promedio de 0,3 a 0,4 t ha⁻¹ (INEC, 2021), en comparación con aquellos que se reportan de Perú, Colombia y Brasil, y que en el caso de la provincia de Loja, la productividad es incluso inferior. Se indica que una de las causas está relacionada con la pobre gestión de la fertilidad física y química de los suelos, en cuanto a: 1.- proveer en cantidad suficiente, equilibrada y sostenida todos los nutrientes que demanda la planta en sus diferentes estados; 2.- superar las condiciones de fuerte acidez; 3.- garantizar el intercambio de CO₂ y O₂ en la zona radicular; 4.- asegurar continuamente una tensión de humedad en el rango aprovechable, y 5.- controlar la erosión.

Las principales limitaciones en cuanto a las características físico-químicas y de fertilidad que se han encontrado en los suelos de los sistemas agroforestales de café estudiados en los diferentes cantones de la provincia de Loja, que se reportan en el Capítulo 4 y se discuten en el Capítulo, 5 son:

- Muy baja macro-porosidad en la capa de 00-25 cm (zona de las raicillas del cafeto), lo que se traduce en una muy limitada capacidad de aireación, que impide el intercambio del CO₂ y el

- O₂, el normal desarrollo del sistema radicular; y, por ende, la absorción de los nutrientes.
- Horizontes internos del suelo con elevado contenido de arcilla iluvial (Bt), que limitan el desarrollo perpendicular de la raíz pivotante del cafeto.
 - En algunos suelos, fuerte acidez (pH < 5,0) con presencia de Al³⁺.6H₂O.
 - Bajos contenidos de N y P aprovechable en la zona radicular de todos los suelos y contenidos medios de K, Mg, S, Cu y B, que sin la reposición oportuna de las cantidades extraídas por los cultivos que conforman el sistema agroforestal, limitarán el crecimiento vegetativo y los rendimientos.
 - Clima con una estación seca de duración variable y períodos de estiaje frecuentes en la estación lluviosa, por lo que es necesario aplicar agua de riego para mantener un rango adecuado de humedad aprovechable en el suelo, en correspondencia a las exigencias de la planta.
 - En los terrenos inclinados, que son los que predominan en la provincia de Loja, altas pérdidas de suelo por erosión, tanto por las lluvias de elevada intensidad, como por la inadecuada aplicación del agua de riego.

De no superarse las limitaciones indicadas, con el transcurso del tiempo el resultado será una grave degradación de los terrenos, un agotamiento de los nutrientes del suelo que demanda el cultivo, y rendimientos cada vez más bajos.

Consecuentemente, en la perspectiva de coadyuvar a mejorar los sistemas agroforestales de café en los diferentes agroecosistemas de la provincia de Loja, es indispensable generar conocimientos orientados

a desarrollar estrategias y tecnologías que mejoren la resiliencia a las tensiones ambientales y eleven la productividad y la calidad, a través de la formulación y ejecución de proyectos de investigación colaborativa. Esto conlleva un esfuerzo conjunto y sostenido, liderado por las universidades locales (que por ley tienen que realizar investigación), más la efectiva participación de las instituciones públicas, como el GAD Provincial de Loja (que tienen la competencia de promover el desarrollo productivo), las ONG, las organizaciones campesinas y, por supuesto, los productores. Lo importante es disponer de opciones tecnológicas probadas en los diferentes agroecosistemas, que puedan ser constatadas por los caficultores, en la perspectiva que su aplicación signifique para ellos mayores ingresos y mejor calidad de vida.

Las estrategias de investigación sobre la Gestión Integrada de la Fertilidad del Suelo (GIFS) deben concebirse bajo un enfoque holístico, que enfatice el manejo sostenible y rentable de la fertilidad física y química del conjunto del sistema agroforestal (considerando todos los componentes de los tres pisos); en otras palabras, que abarque toda la gama de factores impulsores y consecuencias de la degradación del suelo: biológicos, químicos, nutricionales, físicos, sociales, económicos, ambientales y políticos. La GIFS debe procurar hacer el mejor uso de las reservas inherentes de nutrientes del suelo, de los recursos para enmiendas disponibles localmente, de la biomasa, y de los materiales minerales para aumentar la productividad, mientras se mantiene o mejora la fertilidad del suelo. Estas incluyen:

- Generación de herramientas de diagnóstico para la evaluación de la fertilidad del suelo, que sean pertinentes a las condiciones locales.
- Mejora de la estructura de la capa superior del suelo (que corresponde a la zona de las raicillas del cafeto), en procura de elevar la capacidad de aireación.

- Corrección de la fuerte acidez, que implica la neutralización del aluminio soluble en los suelos con pH menor a 5,0.
- Manejo integral del sistema agroforestal, que asegure la fijación de nitrógeno y la provisión de biomasa por parte de los arbustos y árboles asociados.
- Reposición de las reservas de nutrientes del suelo, maximizando la generación y el reciclaje de nutrientes en la finca, y reduciendo las pérdidas de éstos al medio ambiente.
- Implementación de prácticas apropiadas de control de la erosión y manejo del agua.

6.2. Herramientas de diagnóstico para la evaluación de la fertilidad del suelo

Ante la necesidad de disponer de datos homogéneos y confiables de los nutrientes disponibles en el suelo, resultantes de los análisis de los diferentes laboratorios del país con el apoyo de la Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo, el 20 de octubre de 2011 se constituyó la Red de Laboratorios de Suelos del Ecuador (RELASE), cuyas actividades se orientan al ajuste de las metodologías e inter-comparaciones de los resultados entre los laboratorios participantes. La RELASE ha oficializado la utilización de la solución extractora de Olsen Modificada ($\text{NaHCO}_3 + \text{EDTA}$), para cuantificar la disponibilidad de los elementos P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn en los suelos del país (RELASE, 2016).

En consideración de que los suelos de la Región Sur del Ecuador son geológica, mineralógica, física y químicamente diferentes de aquellos de la Sierra Central y Norte, Valarezo (1985) y Guayllas (1988) adaptaron y validaron el método de Van Diest (1983), para evaluar biológicamente en invernadero la fertilidad actual del suelo (técnica

del elemento omitido utilizando el tomate como planta indicadora), de manera de establecer la correspondencia entre la producción de biomasa de la planta indicadora, frente a los resultados de los contenidos de nutrientes extraídos con la solución de Olsen Modificada, con miras a disponer de referentes precisos para tomar las mejores decisiones en cuanto a la nutrición de los cultivos.

De la evaluación química y biológica de la fertilidad de los suelos de las plantaciones de café de la provincia de Loja, cuyas características se reportan en el Capítulo 4 y se discuten en el Capítulo 5, en general se concluye que no existe una correspondencia aceptable entre el análisis químico de laboratorio y la evaluación biológica; por lo que, los datos de los contenidos de nutrientes disponibles extraídos con la solución de Olsen Modificada son de dudosa aplicación.

Por otro lado, el laboratorio especializado en análisis agrícolas Agrar-Projekt (2024) de la ciudad de Quito, reporta que aplicando la Norma ISO 17025, utiliza las siguientes soluciones extractoras para evaluar la disponibilidad de los diferentes nutrientes en el suelo: 1.- nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$), azufre ($\text{SO}_4\text{-S}$) y boro (B), extracción con agua; 2.- amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), extracción con NaCl 0,05 M. 3.- fósforo (P), extracción con NaHCO_3 , 0,5 M. 4.- hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), extracción con DPTA/ CaCl_2 . Sin embargo, en los análisis de las muestras de suelo del sector Romerillos, realizados en este laboratorio, a solicitud del propietario de la finca, los valores reportados sobre el contenido de materia orgánica son extremadamente altos, lo cual no se evidenció en la descripción del perfil del suelo, ni en los valores de la densidad aparente y de la capacidad de aireación. Adicionalmente, en la comparación de los nutrientes disponibles con aquellos de la evaluación biológica, en el rango bajo únicamente coincidió el P.

Las diferencias de los valores de los análisis reportados por los laboratorios a los cuales se enviaron las muestras de suelo de las plantaciones de café estudiadas, justifican la urgencia disponer en el país de laboratorios certificados, con metodologías probadas para los diferentes tipos de suelos, de manera de contar con datos confiables, sobre cuya base se tomen decisiones para la gestión acertada de la fertilidad de los suelos de la RSE.

Una de las soluciones extractoras utilizadas por Valarezo (1978), que sería interesante probar esta compuesta de: NH_4AC 0,5 N + EDTA 0,02 M a pH 4,65; con una relación suelo/solución de 1/5.

También, es indispensable continuar las investigaciones en otras plantaciones de café de los restantes cantones de la provincia de Loja, sobre la correspondencia de los resultados de los contenidos de los nutrientes disponibles, obtenidos en el laboratorio con los diferentes métodos de extracción, frente a aquellos de la evaluación biológica, tanto con el método del elemento omitido, validado y probado en la zona; como con otros métodos biológicos, incluyendo la utilización de microorganismos (Salas y Ramírez, 2001).

6.3. Mejoramiento de las condiciones físicas del suelo

En las plantaciones en producción, los trabajos de investigación orientados a generar soluciones con miras a elevar la capacidad de aireación (macro porosidad) al menos hasta 15 %v, en la capa superior del suelo (25 cm) que corresponde a la zona de las raicillas del cafeto, deben incluir la aplicación de diversos materiales vegetales de bajo costo (residuos de los cultivos) tales como: biomasa de la poda de los árboles y arbustos asociados (leucaena, guabo, erythrinas), pulpa de cerezas de café, cáscaras de maní, bagazo y hojas de caña de azúcar, aserrín, hojas y raquis de banano

(picados), pastos, paja de trigo, rastrojo de maíz y otros; más la aplicación de yeso como fuente de calcio. Con estos insumos también se pueden preparar abonos orgánicos tales como: compost, bioles y biofertilizantes, cuyas dosis serían probadas en los experimentos. Además, se debería experimentar las dosis de aplicación de la biomasa, proveniente de las diferentes especies de plantas asociadas, especialmente leguminosas (*Canavalia ensiformis*, *Vigna radiata*, *Dolichus lablab*, entre otras); así como, de *azolla*; y su efecto, tanto sobre la macro-porosidad, como en la dinámica microbiana del suelo.

En el caso de plantaciones nuevas o de renovación de cafetales, sería oportuno investigar estrategias de bajo costo al momento de la siembra en cuanto; por un lado, elevar la capacidad de aireación en la capa de 00-25 cm y por otro, promover el desarrollo de la raíz pivotante del cafeto, de manera de superar el impedimento físico interno debido a la presencia de horizontes con elevado contenido de arcilla. Una de ellas, que ya ha sido probada exitosamente por Valarezo (2012) en una investigación para recuperar suelos degradados de las laderas en el sur de la Amazonía Ecuatoriana (Figura 6.1), consiste en trazar una circunferencia de 1,2 m de diámetro, cubrir homogéneamente el círculo con 10 kg de materiales orgánicos, 1 kg yeso, y la dosis de fósforo (de cualquier fuente económica) calculada al menos para diez años; luego, mezclar uniformemente los materiales hasta una profundidad de 25 cm; a continuación, en el centro del círculo realizar un hoyo de 10 a 15 cm de diámetro y 1 metro de profundidad y rellenar el mismo con una parte del suelo mejorado de la capa superior, para finalmente sembrar la planta. Cabe indicar que la aplicación de yeso, como fuente de calcio, tiene el propósito de flocular la arcilla y promover la formación de agregados estables; adicionalmente, aporta S como nutriente.



- (a): Trazado del área a tratar para cada árbol
 (b): Aplicación del tratamiento de fertilizantes y cal en el área de cada árbol
 (c): Aplicación del tratamiento de carbón vegetal + fertilizantes + cal en el área de cada árbol
 (d): Incorporación del carbón vegetal y los fertilizantes hasta 25 cm de profundidad

Figura 6.1. Aplicación de cal, nutrientes y biocarbón. Proyecto: Gestión de la fertilidad del suelo con enmiendas de biocarbón en suelos degradados del sur de la Amazonía Ecuatoriana. Nota. Fuente: Valarezo (2012).

Las hipótesis a probar serían que la incorporación de estos materiales, tengan los siguientes efectos benéficos:

- Incrementen el contenido de materia orgánica (humus) en la zona radicular.
- Promuevan la formación de agregados estables, lo que se traduciría en mejora de la estructura y por ende el incremento de la macro-porosidad (aplicación de cal o yeso).
- Aporten nutrientes a los cafetos y a las plantas asociadas que conforman el sistema agroforestal, particularmente de nitrógeno biológicamente fijado.
- Ayuden a controlar las malezas
- Protejan al suelo de las gotas de lluvia y la erosión.
- Preserven la humedad aprovechable.

6.4. Corrección de la fuerte acidez del suelo

Los suelos de las plantaciones de café que se encuentran tanto en las partes más altas de la provincia (franja inferior del piso temperado, ejemplo la hacienda El Cristal, cantón Loja), como aquellos que se han formado de esquistos en condiciones de un paleoclima más húmedo (Sector Romerillos, cantón Chaguarpamba), son de reacción fuertemente ácida ($\text{pH} < 5$) y evidencian la presencia de aluminio soluble ($\text{Al}^{3+} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), elemento que en esta forma química precipita el fósforo por lo que no puede ser tomado por la planta. Consecuentemente, las condiciones de fuerte acidez no favorecen el óptimo desarrollo y rendimiento de los cafetos, siendo indispensable corregir esta situación desfavorable. Para ello, se debe elevar el pH mediante la aplicación de una dosis suficiente de cal agrícola (preferentemente dolomítica que contiene calcio y magnesio), calculada en función del contenido de aluminio intercambiable.

Las investigaciones para determinar las dosis de Ca^{2+} (cmol kg^{-1}) por cada cmol kg^{-1} de Al^{3+} ya se han iniciado en el suelo del sistema agroforestal de café y alisos en la hacienda el Cristal por parte de los investigadores de la UNL. Es así que, Villamagua et al. (2021), se encuentran probando la respuesta del crecimiento de los cafetos a la aplicación de 5,0 y 6,3 t ha^{-1} de CaCO_3 , (cal agrícola) con resultados positivos hasta el momento (véase Capítulo 4). La aplicación de las dosis de caliza y/o dolomita ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) se haría sobre la superficie de un círculo de 1,2 m de diámetro y luego se mezclarían homogéneamente hasta 25 cm de profundidad.

Los experimentos adicionales en los diferentes suelos fuertemente ácidos; deberían, a más del encalado, balancear la proporción de cationes del complejo de intercambio, mediante la aplicación suficiente de K, de manera de que la relación $(\text{Ca} + \text{Mg})/\text{K}$ se encuentre en el rango de 35-45.

6.5. Reposición de las reservas de nutrientes del suelo

Las investigaciones para reponer las reservas de nutrientes en el suelo se deberán orientar a generar conocimientos sobre el uso de fertilizantes y abonos orgánicos en las diferentes condiciones locales, en la perspectiva de maximizar la eficiencia de los nutrientes aplicados y mejorar la productividad del sistema agroforestal.

Se debe considerar que la aplicación de fertilizantes no es una práctica común en la producción de café por parte de los pequeños productores de la provincia de Loja. Cuando se aplican fertilizantes, incluso se hace en dosis muy inferiores a las recomendadas. En todo caso, debe quedar claro que, cuando el café se cultiva comercialmente, es indispensable reponer los nutrientes que se pierden del sistema. Por ejemplo, el nitrógeno es un nutriente esencial en el café y la base para el crecimiento y desarrollo de la planta; así, la disminución del rendimiento puede llegar al 60% cuando no se aplica nitrógeno durante la etapa reproductiva del café (Salamanca-Jiménez et al., 2017). Sin nutrientes adicionales en alguna forma de fertilizante o abono, el rendimiento del café seguirá siendo muy bajo (Fisseha et al., 1993).

Al respecto, es necesario enfatizar que la tasa general de crecimiento y producción del cafeto depende del nutriente menos disponible. Las plantas crecerán y producirán solo en la medida en que el nutriente menos aprovechable les permita. No importa la cantidad de los otros nutrientes que estén en forma disponible; por cuanto, el de menor disponibilidad será el que limita el crecimiento vegetativo y el rendimiento (Ley del Mínimo).

Los nutrientes se deben aplicar para reponer los que se utilizan para la formación de tejido vegetal, los que se exportan en los productos cosechados, los que se pierden por lixiviación y los que forman

compuestos en el suelo de los que no pueden ser extraídos fácilmente por las raíces. La cantidad de nutrientes que requieren los cafetos puede variar dependiendo de varios factores, entre otros: la cantidad de lluvia y su distribución, las variedades (incluyendo las otras plantas cultivadas en asociación que también se deben fertilizar), la topografía, el tipo de suelo y las prácticas culturales predominantes. La estimación de los nutrientes requeridos por el cultivo generalmente se basa en el análisis del suelo y del tejido vegetal (Paulos, 1986).

Se sabe que no sólo la cantidad de fertilizantes aplicados, sino también su manejo, son muy importantes para aumentar la productividad y la eficiencia en su uso. Por ejemplo, una proporción significativa del nitrógeno aplicado puede perderse en forma de amoníaco en unos pocos días después de la aplicación; por lo tanto, un manejo adecuado puede resultar en una reducción significativa de las pérdidas. Al respecto, Leal et al. (2010) reportan que la eficiencia de la urea (el fertilizante nitrogenado más comúnmente utilizado) es muy baja, lo que significa que al menos 30% del nitrógeno de la urea se pierde por volatilización cuando se aplica a los cafetos en una dosis de 360 kg ha⁻¹. En todo caso, es necesario aclarar que en Ecuador el problema más importante del uso de fertilizantes es su costo cada vez mayor y prohibitivamente alto (Espinosa et al., 2018).

En general, el café responde bastante bien a la aplicación de fertilizantes. A la hora de aplicarlos, hay que tener en cuenta que varios factores determinan el máximo rendimiento posible: el clima, la variedad y la edad del café. Las condiciones de sombra también desempeñan un papel importante (Michiel et al., 2004).

Se ha comprobado que la aplicación única de los fertilizantes en la temporada de lluvias, da como resultado la pérdida de nutrientes del suelo, una baja eficiencia en el uso de los fertilizantes, un bajo

rendimiento y calidad del café, sumados a problemas de contaminación ambiental. En este contexto, aún no está claro cómo mejorar y regular el rendimiento y la calidad del café mediante la fertilización fraccionada, por lo que este tema merece más estudio. Las hipótesis a probar serían que la aplicación de diferentes fertilizantes al momento de la siembra, al comienzo de la floración, y en la maduración de las cerezas favorecería el rendimiento y la calidad del grano (Sánchez y Jama, 2001).

Los nutrientes de fuentes inorgánicas suelen estar disponibles de inmediato; mientras que, la materia orgánica debe descomponerse primero para liberar N y otros nutrientes para que los absorban las raíces, con excepción del K y otros iones disueltos que se lixivian fácilmente de los residuos orgánicos. En razón de ello, los abonos orgánicos son más apropiados como fertilización de base; en tanto que, los fertilizantes inorgánicos ofrecen flexibilidad en cuanto al momento de la aplicación en relación con las demandas del cultivo (Malavolta et al., 1986).

Según Sánchez y Jama (2001), no hay nada de malo con la utilización de fertilizantes inorgánicos cuando se aplican de acuerdo con las mejores prácticas. Tanto los fertilizantes inorgánicos como la materia orgánica son fuentes de nitrógeno y fósforo para la planta. Sin embargo, solo la materia orgánica es fuente de carbono para los microorganismos del suelo, que son esenciales en el ciclo de nutrientes de los residuos orgánicos y la agregación del suelo (mejora de la estructura). Los fertilizantes inorgánicos también aumentan la materia orgánica del suelo, ya que se recuperarán más residuos del cultivo a medida que se incrementa la producción.

Es necesario enfatizar que los experimentos sobre la reposición de nutrientes en los suelos de las plantaciones de café deben durar al menos tres años. En éstos se deberían probar el efecto de las dosis de materia orgánica, de los correctores, de los fertilizantes y del fraccionamiento

de su aplicación en las diferentes fases del cultivo sobre: rendimiento, eficiencia del uso del agua, contenidos de nutrientes en las cerezas y de los compuestos volátiles, y la calidad de taza.

Debido a que todos los suelos de la provincia de Loja son bajos en fósforo (P); y que, su movilidad en el suelo es muy limitada, se recomienda aplicar este nutriente al inicio de la plantación, utilizando cualquier fuente económica de manera de satisfacer la demanda de la plantación durante diez años.

En consideración de la predominancia de las plantaciones de café en terrenos inclinados en la provincia de Loja, el riego por goteo es el método más recomendable para optimizar el uso del agua de riego y controlar la erosión; en tales circunstancias, coincidiendo con Vinecky et al. (2017), se debería investigar tanto la aplicación de los nutrientes mediante la fertirrigación, como los rangos de tensión de humedad, para los diferentes períodos de crecimiento vegetativo y de maduración, en procura de mejorar el rendimiento y la calidad del café.

El proceso de investigación planteado permitirá disponer de una base científica para el manejo y optimización de la fertilización del café y sus acompañantes en los suelos de diferentes agroecosistemas de la provincia de Loja, tanto para las variedades tradicionales, como para las nuevas variedades recientemente lanzadas.

6.6. Gestión de la fertilidad del suelo en la producción de café orgánico

Cuando el café es cultivado y procesado en un agroecosistema sostenible y viable sin utilizar ningún producto químico sintético se denomina generalmente café orgánico (International Federation of Organic Agriculture Movements [IFOAM], 1998). Además, tiene

que estar certificado para poder declararse orgánico (trazabilidad). El café orgánico se produce en 20 países del mundo, la mayor parte de la producción proviene de México, Nicaragua, Brasil y Papúa Nueva Guinea. Recientemente, muchos países como India, Kenia, Uganda, entre otros, han tomado importantes iniciativas para promover la producción de café orgánico para la exportación (Kilcher et al., 2002).

Los cafés orgánicos no solo brindan un mayor beneficio económico para los productores a través de un precio más alto; sino que también, generan beneficios adicionales que ayudan a los productores a mejorar su sostenibilidad mediante ventajas ambientales y sociales. El negocio de estos cafés ha crecido recientemente de manera bastante sólida en todos los niveles de la cadena de suministro, debido a razones de salud humana y seguridad ambiental (Kilcher et al., 2002). La producción de café orgánico se basa en el uso de recursos renovables y claramente apunta a la gestión sostenida de los recursos naturales (suelo, biodiversidad, agua, nutrientes, energía y más) (IFOAM, 1998).

En la provincia de Loja, el establecimiento de nuevos sistemas agroforestales de café bajo el sistema de producción orgánica requiere una atención especial a ciertos aspectos de las prácticas de cultivo. Estos incluyen la elección de variedades que deben estar bien adaptadas a las condiciones locales y ser tolerantes o resistentes a plagas y enfermedades, así como el uso de abonos orgánicos y los arbustos y árboles asociados (sombra apropiada). Además, las semillas para el cultivo en vivero deben recolectarse únicamente de fincas o bloques orgánicos. Sin embargo, si no están disponibles, se pueden utilizar semillas de fincas o bloques convencionales que no hayan sido tratados con ningún producto químico. En los terrenos recién plantados, se pueden cultivar plantas para abono verde como el caupí (*Vigna unguiculata*) y otras leguminosas durante dos o tres años, para

aumentar la fertilidad (fijación de nitrógeno y producción de biomasa) y evitar la competencia por la humedad del suelo como (leucaena, porotillo, aliso, *azolla* y otros). También, las siguientes prácticas serían esenciales para satisfacer los requerimientos de nutrientes de las plantaciones de café jóvenes: 1.- corrección del pH del suelo usando cal agrícola o dolomítica, con base al contenido de aluminio cambiante, al menos una vez cada 3 años; 2.- aplicación de estiércol de granja o compost preparado en la finca; 3.- la deficiencia en el suministro de nutrientes se puede cubrir usando otros productos permitidos como roca fosfórica, harina de huesos, ceniza y otros materiales; y, 4.- también se puede recurrir al uso de biofertilizantes de manera restringida, para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes (raquis fermentado del banano, por ejemplo).

Al respecto, es pertinente mencionar que FAPECAFES es una organización de la provincia de Loja, dedicada a la exportación de café orgánico, nacida de la pasión por la calidad, la sostenibilidad y el comercio justo. Don Víctor Yanangómez (2025), su presidente, afirma que sus cafés especiales orgánicos tienen gran aceptación en el mercado internacional porque su trazabilidad y calidad están garantizadas; y que, en la actualidad les falta café orgánico para exportar.

6.7. Investigación en biofertilizantes para las plantaciones de café

El suelo actúa como reservorio de millones de microorganismos, de los cuales más del 85 % son beneficiosos para la vida de las plantas, lo que constituye un ecosistema resiliente. Un buen suelo se compone de un 93 % de sustancias minerales y un 7 % de sustancias bio-orgánicas. Las partes bio-orgánicas son: 85 % de humus, 10 % de raíces, y 5 % de edafón (DaMatta, 2004). El humus existe en estado dinámico como producto de las actividades de descomposición y síntesis de la microflora, por

lo que está bajo ataque continuo. De manera similar, el edafón es un mundo de vida y está compuesto por hongos, bacterias, lombrices de tierra, microflora y macrofauna, en las siguientes proporciones: 1.- 40% de hongos/algas; 2.- 40% de bacterias/actinomicetos; 3.- 12% de lombrices de tierra; 4.- 5% de macrofauna, y 5.- 3% de microfauna/mesofauna. Las actividades de los microorganismos del suelo generan condiciones favorables al crecimiento de las plantas, ya que trabajan silenciosamente para mantener el equilibrio ecológico mediante la participación activa en los ciclos del carbono, nitrógeno, azufre y fósforo. De esta forma, los microorganismos del suelo desempeñan un papel fundamental, tanto en la evolución de las condiciones del suelo agrícolamente útiles, como en la estimulación del crecimiento de las plantas (Atlas y Bartha, 1993).

Los biofertilizantes son insumos biológicos que contienen microorganismos vivos o latentes como bacterias, hongos, algas y helechos, que se aplican al suelo para mejorar su fertilidad y promover el crecimiento vegetal. Estos microorganismos interactúan con las plantas y el entorno del suelo, proporcionando nutrientes esenciales, mejorando su estructura y aumentando su capacidad para retener agua. No contaminan el medio ambiente, son ecológicos e inofensivos. Los biofertilizantes abordan el asunto central de complementar los nutrientes, sin afectar el medio ambiente y con una tecnología de bajo costo, particularmente para los productores de café. Los microorganismos utilizados en los biofertilizantes son: Micorrizas, Azospirillum, Azotobacter, Rhizobium, Sesbania, algas Verde-azuladas y *Azolla*, los cuales constituyen una herramienta clave en la agricultura sostenible, particularmente en la agricultura orgánica (Diriba, 2007).

Las funciones principales de los biofertilizantes son:

- Fijación del nitrógeno atmosférico en formas utilizables para las plantas. A nivel mundial, se estima que alrededor de 175 millones de toneladas de nitrógeno por año se añaden al suelo a través de este proceso microbiano. Los microorganismos principales que intervienen en el proceso son: *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum* y *Anabaena*.
- Solubilización del fósforo, proceso en el que intervienen bacterias como *Pseudomonas* y *Bacillus*, que descomponen los compuestos de fósforo insoluble, haciéndolo progresivamente disponible para las plantas.
- Producción de hormonas de crecimiento, tales como auxinas, giberelinas y citoquininas, que estimulan el desarrollo de las raíces y la absorción de nutrientes.
- Control biológico de enfermedades, ya que algunos biofertilizantes contienen microorganismos, como los hongos *Trichoderma* y *Beauveria*, que combaten patógenos.
- Descomposición de la materia orgánica, liberando nutrientes esenciales para las plantas y mejorando la fertilidad del suelo.

En relación a lo arriba expuesto, debido a que en el cultivo de café orgánico no se puede utilizar fertilizantes nitrogenados, la reposición de este elemento indispensable, debe hacerse de fuentes orgánicas generadas en la propia finca, tales como: *azolla* y los arbustos/ árboles de sombra asociados en el sistema agroforestal (*leucaena*, *aliso*, *erythrina*, *guabo*, etc.).

La capacidad de fijar nitrógeno atmosférico por la *azolla*, ha llevado a su uso generalizado como biofertilizante, especialmente en zonas del sureste de Asia. En el género *Azolla* de la familia *Salviniaceae*, se

reconocen siete especies de helechos acuáticos de agua dulce. No tiene flores ni frutos, se reproduce vegetativamente. Flota sobre la superficie del agua por medio de numerosas hojas pequeñas en forma de escamas triangulares (2-10 cm), estrechamente superpuestas, con sus raíces que cuelgan en el agua. Forma una relación simbiótica con la cianobacteria *Anabaena azolla*, un endosimbionte extracelular (que vive fuera de las células del huésped), la cual fija nitrógeno atmosférico para sí misma y para el helecho; en tanto que, éste le proporciona protección y una fuente segura de carbono. La *Azolla* es una planta altamente productiva, pudiendo duplicar su biomasa en tan solo dos días, dependiendo de las condiciones de crecimiento. En los arrozales asiáticos puede alcanzar un rendimiento de 8-10 t ha⁻¹ de materia verde. En India se han reportado 37,8 t ha⁻¹ de materia verde (Adzman et al., 2021).

Montaño (2024) indica que, en el litoral ecuatoriano, en piscinas de 3 x 6 m, con tierra en el fondo y estiércol seco de bovinos, la *azolla* fija 5% de nitrógeno. También se reportan rendimientos de 0,25 kg de nitrógeno m⁻² año⁻¹. Igualmente, 9 toneladas de abono verde ha⁻¹ año⁻¹, casi equivalente a un kg de *azolla* m⁻² año⁻¹.

El mismo autor viene promoviendo el concepto de agricultura biogénica, en la perspectiva de que en el futuro sea un factor diferenciador importante con otros cultivos tradicionales que utilizan urea o derivados de nitrógeno artificial para fertilizar. Indica que una vez establecida, la *azolla* podría suplir el 100% de la necesidad de nitrógeno en todos los cultivos del Ecuador, con excelente potencial de exportación. Es así que, en el marco de la ejecución del proyecto Desarrollo Sostenible y Apropiado en Territorios Rurales (DESATAR) del Ministerio de Agricultura y Ganadería, ha propuesto implementar el componente denominado “Transferencia de Tecnología Biogénica

Sostenible”, en algunos cantones seleccionados de la costa, incluyendo los cantones Loja y Saraguro de la provincia de Loja. La propuesta contempla el aprovechamiento del agua del azollario (piscina donde crece el helecho), denominada NitrAgua y la biomasa de la *azolla*, tanto en forma de abono para los cultivos, como de forraje para alimentación de animales menores (Figura 6.2).



Figura 6.2. Piscina de *azolla* de 3 x 6 m, en el fondo con tierra y estiércol seco de ganado bovino. Sitio: Refugio Agroecológico Valarezo & Lozano, Salapa Bajo, cantón Loja.

Nota. Fotografía de Carlos Valarezo Manosalvas, 25 de abril 2024.

Recientemente, en la provincia de Loja se viene investigando la aplicación de biomasa y NitrAgua de *Azolla* como fuente de nitrógeno. Así, Vásquez y Espinosa (2023), estudiaron la fase inicial de una plantación de café arábigo (*Coffea arabica*) variedad Sarchimor, en la Estación La Argelia de la Universidad Nacional de Loja, ubicada en la parroquia Punzara del cantón Loja (altitud 2.150 m s. n. m, temperatura media anual 16 °C, precipitación media anual 960 mm año⁻¹, con un

registro de 50 años). Indican que a los 150 días, con la aplicación de biomasa de *Azolla filiculoides* (36 g/planta/15 días) los cafetos alcanzaron un incremento de altura de 19,3 cm y un diámetro del tallo de 3,24 mm.

En otros experimentos instalados en las parroquias Sucre, Gualiel y Vilcabamba, del cantón Loja por Vásquez et al. (2023), evidencian que la producción de masa verde de la *Azolla filiculoides-Anabaena*, fue de 135 a 158 t ha⁻¹ año⁻¹; en tanto que la fijación anual de nitrógeno fue de 3,1 a 5,2 t ha⁻¹ año⁻¹. Además, la biomasa de la *azolla* aporta con P, K, Ca y Mg, mientras que la NitrAgua contiene N, K, Ca y Mg.

Esto demuestra que este helecho promisoriamente puede ser empleado como biofertilizante, en reemplazo de los fertilizantes comerciales, por lo que resulta altamente recomendable continuar estas investigaciones en los diferentes agroecosistemas de café en la provincia de Loja. El tema específico sería: *Efecto de la aplicación de biomasa de azolla y NitrAgua sobre las condiciones físicas y químicas del suelo; y, la productividad y calidad de taza del café arábigo.*

En relación a la fijación del nitrógeno y producción de biomasa por los arbustos y árboles de sombra asociados en el sistema agroforestal del café arábigo (leucaena, aliso, erythrinas, faique y guabo), a continuación, se anota lo siguiente:

- Somarriba et al. (2012) y Somarriba et al. (2023) señalan que la *leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, conocida comúnmente como leucaena o acacia blanca, es una leguminosa arbustiva-arbórea muy valorada en sistemas agroforestales y de recuperación de suelos, principalmente por su capacidad de fijación de nitrógeno y mejora de la fertilidad del suelo. Es una especie originaria de Mesoamérica, que se ha difundido

ampliamente en regiones tropicales y subtropicales, debido a su rusticidad, rápido crecimiento y múltiples beneficios.

- En cuanto a los requerimientos de clima, los referidos autores indican: temperatura media anual 25-30°C (tolerancia 18-35°C), precipitación anual de 800 a 1.500 mm; tolera sequías estacionales de 4-6 meses. El rango de altitud va de 0 a 1.800 m.s.n.m., puede crecer hasta 2.000 m.s.n.m. pero su desarrollo es más lento. Es una planta fotófila (necesita buena luz) y termófila (prefiere el calor) y no prospera en suelos ácidos (pH < 5).
- Señalan que, la leucaena presenta un hábito de crecimiento arbustivo a arbóreo pequeño, de porte erecto y ramificación abierta de rápido crecimiento. Puede alcanzar entre 2 a 6 metros como arbusto manejado y hasta 15 metros si se deja crecer libremente. Por su sistema radicular pivotante se adapta al estrés hídrico. Forma nódulos en sus raíces donde alberga bacterias del género *Rhizobium*, que fijan nitrógeno atmosférico. Puede fijar entre 100 a 500 kg ha⁻¹ año⁻¹ de nitrógeno, dependiendo del clima, el suelo y el manejo. Parte del nitrógeno fijado se libera al suelo a través de la descomposición de hojas, raíces y exudados, beneficiando a los cultivos intercalados.
- Respecto a la mejora de suelos se anota: 1.- aporte de materia orgánica, las hojas, ramas y raíces al descomponerse aumentan el contenido de humus en el suelo, mejorando su estructura (aireación) y capacidad de retención de agua; 2.- sus raíces profundas acceden a nutrientes en las capas inferiores del suelo y los redistribuyen a la superficie a través del follaje; 3.- su denso sistema radicular y cobertura foliar protegen al suelo contra la erosión, y 4.- favorece la aireación y porosidad del suelo facilitando el crecimiento de los cultivos asociados.

- Sugieren que, en los sistemas agroforestales con café, la densidad típica de arbustos es de 400 a 600 plantas ha⁻¹. Además, requiere un manejo constante, ya que debido a su rápido crecimiento se necesita de podas frecuentes para mantener el equilibrio del sistema. Se debe sembrar de 6 a 12 meses antes del café para facilitar el desarrollo radicular y la fijación de nitrógeno. La poda se realiza cada dos a tres meses durante la estación de crecimiento, a una altura de 2 m para mantener sombra moderada (40-60%). Los residuos de la poda se distribuyen en las hileras de café como acolchado y abono verde, siendo la madurez productiva de un año en adelante. Se puede asociar también con banano, plátano y frutales (aguacate).
- Según Szott et al. (1991), el aliso (*Alnus acuminata*), también se utiliza en sistemas agroforestales de café como árbol de sombra y mejorador del suelo. Forma nodos radiculares con bacterias del género Frankia que fijan nitrógeno y liberan parte de él al suelo y cultivos asociados.
- El rango altitudinal del aliso en Colombia y Ecuador se encuentra entre 1.500 y 3.500 m s. n. m. En las regiones de cafetales de altura (1.200 a 2.000 m s. n. m.), el aliso ha mostrado buen desempeño como árbol de sombra y fijador de nitrógeno.
- El aliso aporta entre 3 a 6 t⁻¹ ha⁻¹ año⁻¹ de hojarasca con un contenido de nitrógeno de 3,4 a 3,7 g 100g⁻¹ de materia seca, contribuyendo significativamente al reciclaje de nutrientes en el sistema agroforestal. Según la especie y las condiciones locales el aporte de nitrógeno en rodales consolidados va de 60 a 320 kg ha⁻¹ año⁻¹.
- En los sistemas con café, se suele intercalar el aliso como árbol de sombra parcial, por cuanto su copa abierta permite luz suficiente al cafeto, mientras mejora la fertilidad del suelo y

- reduce la erosión. La densidad recomendada en cafetales es de 50 a 100 árboles ha⁻¹, alternando también con otros cultivos.
- El aliso requiere de poda o manejo de orientación espacial para mantener el equilibrio entre sombra y luz al café. La cantidad de N disponible para el café depende en gran medida de la descomposición de la hojarasca y rebrotes; por lo tanto, la incorporación de residuos y su descomposición mejora el rendimiento del sistema.
 - Beer et al. (1988) reportan que la *Inga edulis*, conocida comúnmente como guaba o guabo, es una leguminosa arbórea tropical ampliamente usada en sistemas agroforestales de café por su capacidad de fijar nitrógeno (nódulos radiculares con la presencia de bacterias *Rhizobium* o *Bradyrhizobium*), dar sombra, mejorar los suelos y producir frutos comestibles.
 - El guabo puede aportar de 2 a 5 t ha⁻¹ año⁻¹ de hojarasca rica en nitrógeno. El promedio de fijación de N oscila de 50 a 100 kg ha⁻¹ año⁻¹. Aunque no es tan eficiente como la leucaena, tiene ventajas por su longevidad, copa amplia y múltiples funciones. La densidad recomendada en cafetales es de 100 a 150 árboles ha⁻¹.
 - Zuluaga (2004) indica que las leguminosas del género *Erythrina* (porotillo), especialmente especies como *E. poeppigiana*, *E. fusca* y *E. berteroana*, son árboles muy usados en sistemas agroforestales con café arábigo, por su excelente capacidad de fijar nitrógeno, proporcionar sombra regulada, y producir biomasa rica en nutrientes.
 - La fijación promedio de nitrógeno oscila de 80 a 250 kg ha⁻¹ año⁻¹. Estos valores dependen de varios factores: densidad de árboles (típicamente 100 a 300 árboles ha⁻¹); manejo de podas (frecuencia y reincorporación al suelo); edad y vigor de los

- árboles; tipo de suelo y clima; y simbiosis efectiva con bacterias fijadoras (*Rhizobium*).
- El manejo típico de *erythrinas* en cafetales comprende la poda (altura de 2 a 4 m, dependiendo del control de sombra) y frecuencia de poda (cada 2 a 4 meses en época lluviosa). La biomasa aportada por las hojas y ramas finas en términos de masa seca fluctúa de 4-8 t ha⁻¹ año⁻¹. El reciclaje de nutrientes es rápido, por cuanto las hojas se descomponen en 2-4 semanas. Las hojas y ramas de las *erythrinas* contienen entre 2,5 y 3,5 % de N en base seca, por lo que su aporte como abono verde es muy eficiente y bien balanceado para los cafetos.
 - En el caso del faique (*Acacia macracantha*), no existe muchos estudios que cuantifiquen la fijación biológica de N. Se estima que por pertenecer al género *Acacia*, en sistemas agroforestales la fijación de N estaría en el rango de 30-150 kg ha⁻¹ año⁻¹.

Por otro lado, el Consejo Cafetalero Nacional (COFENAC, 2003) en el marco del Programa de Modernización de los Servicios Agropecuarios (PROMSA), publicó una sistematización del avance de las investigaciones sobre tecnologías para la producción de café arábigo orgánico. A continuación, se mencionan algunos temas y objetivos, que con las modificaciones pertinentes serían factibles de ser replicados en la investigación sobre la gestión de la fertilidad del suelo en las plantaciones de café en la provincia de Loja:

Tema 1: Reciclaje de subproductos de la finca cafetalera

Objetivos:

- Determinar el método de compostaje más apropiado (dosis de acelerador de compostaje y método de bocashi modificado), para producir abonos orgánicos a partir de los subproductos de la

finca cafetalera: pulpa de café y aguas mieles (beneficio húmedo) y cáscara de café (beneficio seco) más estiércol de bovino y pseudotallos de banano.

- Establecer el efecto de diferentes materiales de compost de los subproductos del café, sobre el crecimiento vegetativo, el rendimiento y el beneficio económico.

Tema 2: Micorrizas asociadas a la rizósfera del café arábigo y propagación artesanal de micorrizas arbusculares

Objetivos:

- Identificar las micorrizas arbusculares que en forma nativa están asociadas al suelo del sistema cafetalero (nivel de género).
- Determinar las alternativas de propagación artesanal de las micorrizas artesanales de las plantaciones de café.
- Establecer en qué medida los contenidos de los diferentes elementos nutritivos están asociados (P, Zn, Ca, Mg, otros) a la incidencia de micorrizas en las raíces del cafeto.

Tema 3: Influencia de la aplicación de compost, micorrizas y ácidos húmicos sobre el crecimiento vegetativo y producción del café arábigo

Objetivos:

- Determinar el efecto de la aplicación de compost y micorrizas sobre las condiciones físicas del suelo.
- Evaluar el efecto de la aplicación de compost + micorrizas y de ácido húmico en el crecimiento vegetativo y el rendimiento del café arábigo.

Tema 4: Efecto de la aplicación de bioles sobre la productividad del café arábigo

Objetivos:

- Determinar el efecto de la aplicación de diferentes dosis de bioles al suelo y al follaje, sobre el crecimiento vegetativo y el rendimiento.
- Establecer el tiempo y frecuencia de la aplicación de diversos bioles, sobre el crecimiento vegetativo y el rendimiento.
- Evaluar el beneficio económico de la aplicación de bioles.

Tema 5: Efecto de la cobertura vegetal viva y del mantillo sobre el control de la erosión y la productividad del café arábigo

Objetivos:

- Establecer el efecto de la cobertura vegetal viva y de mantillo sobre la pérdida de suelo en las plantaciones de café en terrenos inclinados.
- Determinar el efecto de la cobertura vegetal viva y de mantillo sobre el crecimiento vegetativo, el rendimiento y el beneficio económico del café arábigo en los terrenos inclinados.

6.8. Prácticas de manejo y conservación del suelo y el agua

Debido a la irregularidad de la topografía de la provincia de Loja, los cafetales predominantemente se encuentran en terrenos en un rango de pendiente de 20 a 50%, con alto riesgo de erosión. Consecuentemente, la conservación del suelo y el agua es esencial para prevenir la erosión, mantener la fertilidad del suelo y garantizar la sostenibilidad de la producción. A continuación, se describen las prácticas cuya efectividad debe investigarse en el sistema agroforestal, en función del grado de inclinación del terreno, el tipo de suelo y el clima:

Manejo del suelo

Cobertura vegetal permanente: mantener una capa de vegetación viva o residuos orgánicos sobre el suelo para protegerlo de la erosión causada por la lluvia:

- Plantación de los cafetos siguiendo las curvas de nivel entre las hileras de los arbustos y arboles de sombra asociados (preferiblemente fijadores de nitrógeno) y cultivos de cobertura para reducir el impacto directo de la lluvia y ampliar la biodiversidad.
- Labranza mínima o cero: reducir las alteraciones del suelo para preservar su estructura y evitar la pérdida de nutrientes.
- Aplicación de biomasa de los restos de plantas (hojas, paja, otros) y de la poda de los arbustos y arboles asociados, para mejorar la retención de humedad y proteger el suelo de la erosión.

Control de la erosión

- Surcos en curvas de nivel y diferentes tipos de terrazas, para reducir la velocidad del agua y evitar la pérdida de suelo.
- Barreras vivas o muertas: barreras vivas de diferentes especies de vegetación o barreras de piedra para frenar el flujo del agua.

Manejo del agua

- Zanjias de infiltración para almacenar agua lluvia y mejorar su disponibilidad

Riego eficiente

- Implementar riego por goteo para optimizar el uso del agua y evitar el exceso que podría causar escorrentía.

Control de la escorrentía

- Dirigir el excedente de agua hacia canales controlados (vías de agua) para minimizar el impacto en el suelo.

En cada una de las prácticas implementadas en las diferentes plantaciones de café, se deberá realizar el monitoreo periódico para evaluar su eficiencia y el manejo adecuado del agua, en comparación con las áreas no tratadas (testigo).

Cabe enfatizar que, lo más importante del resultado de todo el proceso de investigación propuesto en el presente capítulo, será asegurar la adopción de las mejores prácticas por parte de los cafetaleros de la provincia de Loja.

En esta perspectiva, es recomendable implementar parcelas modelo en los diferentes agroecosistemas, que sirvan como escenarios para desarrollar una amplia promoción y capacitación sobre las mejores prácticas de gestión integral de la fertilidad del suelo, el control de la erosión y el manejo del agua.

Finalmente, será indispensable investigar el grado de aceptación y adopción de las mejores prácticas por parte de los productores. Este trabajo debe enmarcarse en el paradigma de la investigación cualitativa, mediante la cual se trata de abordar el asunto de la complejidad humana, explorándola de manera directa; para ello, el investigador interactúa con los investigados y el conocimiento se obtiene mediante procesos inductivos, haciendo hincapié en la totalidad del fenómeno investigado (holismo). La información obtenida es narrativa y su análisis es cualitativo (Valarezo, 2022).

6.9. Referencias bibliográficas

- Amber, A., & Rivka, F. (2025). Introduction to soil science. <https://doi.org/1031274/isudp.2025201>
- Arshad, M., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for quality indicators in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 153–160. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880901002523>
- Bendix, J., Fabian, P., & Rollenbeck, R. (2004). Gradients of fog and rain in a tropical montane cloud forest of southern Ecuador and its chemical composition. En *Proceedings of the 3rd International Conference on Fog, Fog Collection and Dew (11–15 October 2004, Cape Town, South Africa)*.
- Bitelli, M. (2010). Measuring soil water potential for water management in agriculture. *Sustainability*, 2(5), 1226–1247. <https://www.mdpi.com/2071-1050/2/5/1226>
- Cañadas, L. (1983). *El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador*. Editores Asociados.
- Dane, J. H., & Hopmans, J. W. (2010). Water retention and storage. En *Methods of soil analysis: Part 4—Physical methods*. University of California. <http://hopmans.lawr.ucdavis.edu/papers-ppt-zip/Chapt3-3-1&21.pdf>
- Grieve, I. C., Proctor, J., & Cousins, S. A. (1990). Soil variation with altitude on Volcán Barva, Costa Rica. *Catena*, 17, 525–534.
- Guayllas, J. (1988). Estado nutricional de los suelos de Cañicapac y Ñamarin, mediante un método biológico [Tesis de ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Loja].
- Hutapea, S., & Apriliya, I. (2020). Soil aeration. <https://indahapriliya.blog.uma.ac.id/wp-content/uploads/sites/620/2020/12/11th-Meeting.pdf>
- International Land Development Consultants of the Netherlands. (1981). *Agricultural compendium for rural development in the tropics and subtropics*. Elsevier.

- Jordán, A. (2010). Manual de edafología. Universidad de Sevilla, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. <http://libnet.unse.edu.ar>
- Kirkham, M. B. (2014). Principles of soil and plant water relations (2nd ed.). Kansas State University. <https://thefarm.farm/studies/Principles%20of%20Soil%20and%20Plant%20Water%20Relations%20-%20M.B.%20Kirkham.pdf>
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). Principles of soil physics. The Ohio State University.
- Landini, A., Martínez, D., Díaz, H., Soza, E., Agne, D., y Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. Ciencia del Suelo. <http://www.scielo.org.ar/pdf>
- Lanfranco, J., Pellegrini, A., y Cattani, V. (2014). Contenidos de edafología: Génesis, evolución y propiedades físico-químicas del suelo. Universidad Nacional de La Plata.
- Matchavariani, L. (2019). Soil forming factors. https://www.researchgate.net/publication/333899810_Soil-Forming-Factores
- Melkel, A., & Ittana, F. (2014). Nutritional requirement and management of Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) in Ethiopia. <https://www.researchgate.net/publication/287341230>
- Porta, J., López-Acevedo, M., y Poch, R. M. (2014). Edafología: Uso y protección de suelos. Mundi-Prensa.
- Red de Laboratorios de Suelos del Ecuador. (2016). Informe de gestión correspondiente al año 2015. <http://www.agrocalidad.gob.ec/wp>
- Schrumpf, M., Guggenberger, G., Schubert, C., Valarezo, C., & Zech, W. (2001). Tropical montane rain forest soils: Development and nutrient status along an altitudinal gradient in the south Ecuadorian Andes. *Die Erde*, 132, 43–59.
- Soil Survey Staff. (1975). A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (Agricultural Handbook No. 436). U.S. Department of Agriculture.

- Soil Survey Staff. (2010). Keys to soil taxonomy (11th ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Sys, C., Van Ranst, E., & Debaveye, J. (1993). Land evaluation: Part III. Crop requirements. State University of Ghent.
- Valarezo, C. (1978). Trace element content and behaviour of zinc on soils developed on volcanic ash deposits in Ecuador [Master in soil Science Thesis]. State University of Ghent, Belgium.
- Valarezo, C. (1985). Proyecto de evaluación de la fertilidad de los suelos de Saraguro. Universidad Nacional de Loja.
- Valarezo, C. (2012). El suelo como recurso básico para el crecimiento de las plantas: Génesis, mineralogía, características físico-químicas y fertilidad. Universidad Nacional de Loja.
- Valarezo, C., Maza, H., y Gómez, I. (2009). Sistemas agroforestales exitosos y prácticas de uso óptimo del agua para las zonas secas de la provincia de Loja. Universidad Nacional de Loja.
- Van Diest, A. (1983). A biological method for the assessment of the nutritional status of a soil. International Agricultural Centre.
- Wilcke, W., Oelmann, Y., Schmitt, A., Valarezo, C., Zech, W., & Homeier, J. (2008). Soil properties and tree growth along an altitudinal transect in Ecuadorian tropical montane forest. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 220–230.
- Wilcke, W., Yasin, S., Abramowski, U., Valarezo, C., & Zech, W. (2002). Nutrient storage and turnover in organic layers under tropical montane rain forest in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 53, 15–27.

Anexo A

Descripción de perfiles adicionales de suelo de la hacienda El Cristal

Unidad de suelos del sistema agroforestal de café con pinos y eucaliptos en vertiente de loma, pendiente de 60 %

Código del perfil: PC2.

Fecha de descripción del suelo: 18/10/2017.

Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua, Pedro Guaya y Luis Valarezo.

Características generales de la unidad

Clasificación Taxonómica: *Humic Dystrustepts* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: 9544543 N, 17M0700338 S.

Altitud: 2.046 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente de loma, pendiente muy escarpada (60%) en paisaje de montaña.

Material Parental: Rocas metamórficas de la Unidad Chiguinda (Pz_{Lc}), filitas.

Drenaje interno: bueno.

Sistema agroforestal: café arábigo con pino (*Pinus radiata*) y eucalipto (*Eucaliptus globulus*).

Descripción general del suelo

Suelo modernamente profundo (90 cm), constituido por una capa orgánica de 3 cm de espesor; y, los horizontes: Ap de 8 cm; Bw de 22 cm; BC de 15 cm; y, C de 45 cm. Las raíces finas y muy finas se observan hasta 70 cm de profundidad. Es de notar que el suelo proviene del mismo material parental del perfil PC1; sin embargo, por la pendiente

muy escarpada solamente se ha formado un horizonte Bw, por lo que se ubica en el orden de los Inceptisoles. La Tabla A1. contiene la descripción de las características de los horizontes y capas del perfil. En la Figura A1. se presenta la fotografía del perfil.

Tabla A1. Características de los horizontes y capas del perfil PC2.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Oe	03 – 00	Capa orgánica con abundantes raíces muy finas, finas y gruesas
Ap	00 – 08	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) húmedo, franco limoso (tacto); bloques subangulares, finos moderados; ligeramente adherente, ligeramente plástico, friable; raíces abundantes, finas.
Bw	08 – 30	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) húmedo, franco arcillo limoso (tacto), con bloques subangulares finos medios moderados, adherente, plástico, friable; raíces pocas, finas.
BC	30 – 45	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) húmedo, franco arcillo limoso (tacto); bloques subangulares finos y medios, adherente, plástico, friable.
C	45 – 90	Rojo pálido (2.5YR 7/2) húmedo, franco arcillo limoso (tacto), masivo



Figura A1. Perfil PC2 del suelo del Sistema Agroforestal de café con pino y eucalipto en vertiente de loma. Hacienda El Cristal, cantón Loja.

Unidad de suelos del sistema agroforestal café con pinos y eucaliptos en vertiente de cresta, pendiente 73 % en paisaje de montaña

Código del perfil: PC3.

Fecha de descripción del suelo: 27/10/2017.

Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua, Pedro Guaya, Luís Valarezo y Paola Zambrano.

Características generales de la unidad

Clasificación Taxonómica: *Typic Ustorthents* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: 9544653 N, 170700215 S.

Altitud: 1.994 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente de cresta, pendiente muy escarpada (73 %) en paisaje de montaña.

Material Parental: Rocas metamórficas de la Unidad Chiguinda (PzLc), filitas.

Drenaje interno: bueno.

Sistema agroforestal: café arábigo con pino (*Pinus radiata*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*).

Descripción general del suelo

Suelo constituido por los horizontes Ap 20 cm de espesor y un horizonte C >100 cm. La pendiente muy escarpada ha impedido el desarrollo de un horizonte B, por lo que su clasificación se ubica en el orden de los Entisoles. La Tabla A2. contiene la descripción de las características de los horizontes y capas del perfil. En la Figura A2. se presenta la fotografía del perfil.

Tabla A2. Características de los horizontes y capas del perfil PC3.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00 – 20	Gris muy oscuro (10YR 3/1) húmedo, gris (10 YR 5/1) seco; franco limoso (tacto); bloques subangulares finos y medios, moderados; ligeramente adherente, ligeramente plástico, friable; con abundantes raíces finas, medias y gruesas.
C	20 – >120	Gris muy oscuro (10YR 3/1) húmedo, gris (10YR 6/1) seco; franco limoso (tacto), masivo.



Figura A2. Perfil PC3 del suelo del Sistema Agroforestal de café con pino y eucalipto en vertiente de cresta. Hacienda El Cristal, cantón Loja.

Unidad de suelos del sistema agroforestal de café con árboles frutales y maderables en terraza, pendiente 14%, en pie de vertiente

Código del perfil: PC4.

Fecha de descripción del suelo: 27/10/2017.

Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua, Pedro Guaya, Luís Valarezo y Paola Zambrano.

Características generales de la unidad

Clasificación Taxonómica: *Lithic Ustorthents* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: 9544678, 17M0700145 S.

Altitud: 1.963 m s. n. m.

Fisiografía: Terraza de 14% de pendiente, en pie de vertiente.

Material Parental: Coluvial-aluvial pedregoso.

Drenaje interno: excesivo.

Pedregosidad Superficial: 30%, diámetro equivalente de 25 – 30 cm.

Sistema agroforestal: café arábigo con romerillo (*Podocarpus* sp.), banano (*Musa* sp.), cítricos (*Citrus* sp.), y varias especies arbóreas.

Descripción general del suelo

Suelo constituido por un horizonte Ap de 20 cm de espesor, formado por materiales provenientes de las áreas superiores; y, un horizonte 2Cr de más 70 cm, que constituye una discontinuidad litológica del antiguo lecho del río. Las raíces pocas finas, medias y gruesas se observan hasta 70 cm. Por no presentar horizontes de diagnóstico se ubica en el orden de los Entisoles. La Tabla A3. contiene la descripción de las características de los horizontes y capas del perfil. En la Figura A3. se presenta la fotografía del perfil.

Tabla A3. Características de los horizontes y capas del perfil PC4.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00 – 20	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo, franco arenoso a franco (tacto), con bloques subangulares finos y medios, moderados, no adherente, no plástico, con abundantes raíces finas y medias
2Cr	20 – 90+	Predomina una mezcla de arena, gravilla y grava, correspondiente al antiguo lecho del río, con pocas raíces finas, medias y gruesas

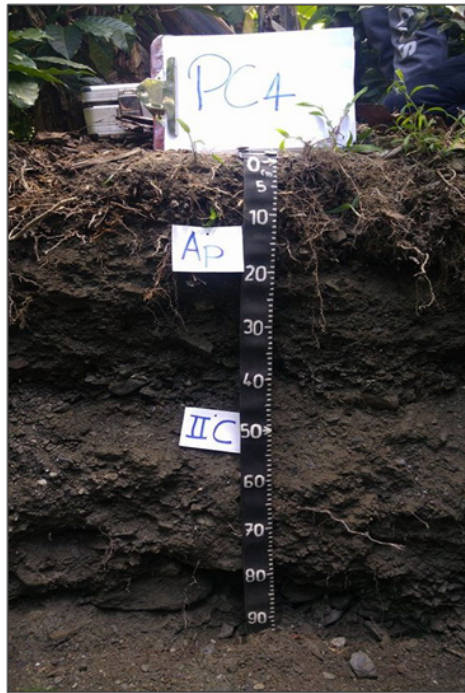


Figura A3. Perfil PC4 del suelo del Sistema Agroforestal de café con romerillo, banano, cítricos, en vega de pie de vertiente. Hacienda El Cristal, cantón Loja.

Anexo B

Descripción de perfiles adicionales de suelo del sector de Consapamba, cantón Espíndola

Unidad de suelos del sistema agroforestal de café, vertiente de montaña, pendiente 15 %

Código del perfil: P1C.

Fecha de descripción del suelo: 22-08-2018.

Autores: Carlos Valarezo Manosalvas, Miguel Villamagua, Pedro Guaya Pauta, Luís Valarezo Manosalvas y Paola Zambrano.

Clasificación Taxonómica: *Lithic Haplustepts*. (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: 674299 E; 9492435 N.

Altiud: 1.805 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente de 15 % de pendiente.

Material Parental: Lavas andesíticas y basálticas de la Unidad Changaimina (INIGMM, 2017).

Drenaje interno: bueno.

Sistema agroforestal: Cafetos (*Coffea arabica* L.) de dos años de edad, + banano (*Musa paradisiaca* L.) + fréjol de palo (*Cajanus cajan* L.)

Descripción general del suelo

Suelo moderadamente profundo formado en dos etapas secuenciales. La parte superior se extiende hasta 65 cm de profundidad, el material parental es andesita coluvional, con los siguientes horizontes: Ap de 12 cm de espesor; Bw de 10 cm con 50 % de fragmentos rocosos angulares (5 – 15 cm de diámetro); Cr de 43 cm, con 95 % de piedras

de 10 a 15 cm de diámetro equivalente, de aristas vivas, con muy pocas raíces. La parte inferior corresponde a la capa 2C de 55+ cm. La Tabla B1. contiene la descripción de las características de los horizontes y capas del perfil. En la Figura B1. se presenta la fotografía del perfil.

Tabla B1. Características de los horizontes y capas del perfil P1C.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00 – 12	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo; franco arcilloso al tacto; con bloques angulares finos y medios, moderados, muy adherente, plástico, friable, raíces comunes finas y muy finas.
Bw	12 – 22	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo; arcilloso (tacto), con 50% de fragmentos rocosos angulares (5 – 15 cm de diámetro), bloques subangulares medios y gruesos, moderados, muy adherente, muy plástico, friable.
Cr	22 – 65	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo; arcilloso (tacto); con 95% de piedras de 10 a 15 cm de diámetro, de aristas vivas, muy pocas raíces.
2C	65 – 120+	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) húmedo; arcillo limoso (tacto), masivo, adherente, plástico, firme y muy duro

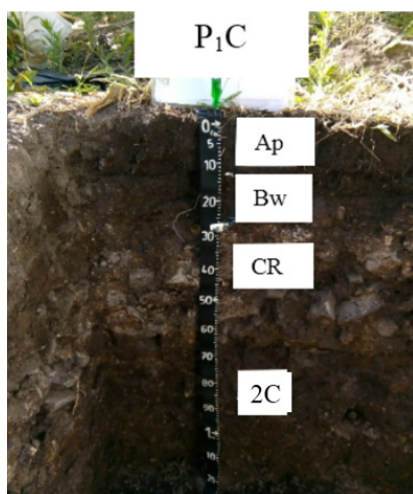


Figura B1. Perfil P1C del suelo del Sistema Agroforestal de café con banano y fréjol de palo, vertiente de montaña de 15% de pendiente, Sector Consapamba, cantón Espíndola.

Unidad de suelos del sistema agroforestal de café, pie de monte en vertiente de montaña, pendiente 20 %, bajo el canal

Código del perfil: P3C.

Fecha de descripción del suelo: 22-08-2018.

Autores: Carlos Valarezo Manosalvas, Miguel Villamagua, Pedro Guaya Pauta, Luís Valarezo Manosalvas y Paola Zambrano.

Características Generales de la Unidad

Clasificación Taxonómica: *Lithic Haplustepts*. (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: 674328 E 9492552 N.

Altiud: 1.762 m s. n. m.

Fisiografía: Pie de monte de vertiente de 20 % pendiente, bajo el canal.

Material Parental: Lavas andesíticas y basálticas de la Unidad Changaimina (INIGMM, 2017).

Drenaje interno: bueno.

Sistema agroforestal: Cafeto + banano + fréjol de palo.

Descripción general del suelo

Suelo formado en una secuencia de cuatro deposiciones de material coluvial. En la deposición superior se identifican los siguientes horizontes: Ap de 20 cm de espesor y Bw de 25 cm. Las deposiciones inferiores corresponden a los horizontes: 2C de 10 cm; 3C de 35 cm y 4C de 40 cm. Se observan características vérticas con caras lustrosas en el horizonte Bw. A 130 cm de profundidad resume agua que se asume que se ha infiltrado desde el canal de riego. Las raíces muy pocas y finas se observan hasta los 90 cm. La Tabla B2. contiene la descripción de las características de los horizontes y capas del perfil. En la Figura B2. se presenta la fotografía del perfil.

Tabla B2. Características de los horizontes y capas del perfil P3C.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00 – 20	Pardo oscuro (10YR 3/3) húmedo; arcilloso (tacto); bloques subangulares finos y medios, moderados; muy adherente, muy plástico, firme.
Bwss	20 – 45	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo; arcilloso (tacto); bloques subangulares, medios, fuertes; muy adherente, muy plástico, firme y muy duro
2C	45 – 55	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) húmedo; arcilloso (tacto); masivo; muy adherente, muy plástico, firme y muy duro.
3Cr	55 – 90	Pardo muy oscuro (7.5 YR 2,5/2) húmedo; arcillo limoso (tacto); masivo; con 40% de fragmentos rocosos angulares de 5-15 cm.
4C	90 – 130	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo; franco arcillo arenoso (tacto); masivo; ligeramente adherente, ligeramente plástico, friable y muy duro; sin raíces.

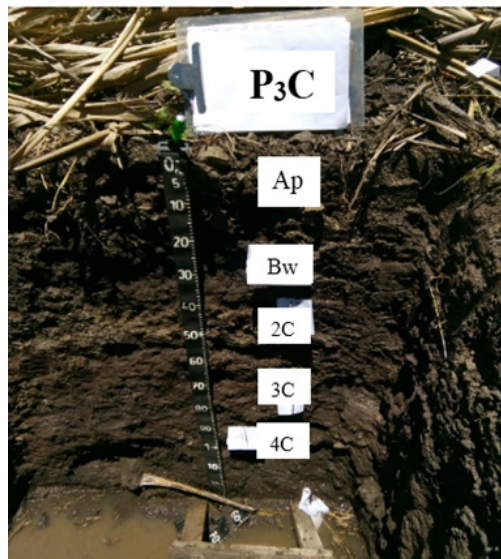


Figura B2. Perfil P3C del suelo del Sistema Agroforestal de café con banano y fréjol de palo, en pie de monte de vertiente montañosa de pendiente 20%, bajo el canal. Consapamba.

Anexo C

Descripción de perfiles adicionales de suelo del sector Guanga, cantón Olmedo

Unidad de suelos del sistema agroforestal de café arábigo sector Guanga

Código del perfil: P2G.

Fecha de descripción del suelo: 03-02-2023.

Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua, Pedro Guaya y Karina Lima.

Clasificación Taxonómica: *Typic Haplustalf* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010)

Ubicación del perfil: 17649222E; 9567396 N.

Altitud: 1.582 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente de montaña, loma con pendiente media 28%.

Material Parental: Andesita de la formación Ciano.

Drenaje interno: bueno.

Descripción general del suelo

Suelo muy profundo constituido por cuatro horizontes genéticos (Ap de 20 cm; AE de 15 cm; Bt de 25 cm; y, BC > 60 cm). Los horizontes son de color uniforme, sin manchas, lo cual evidencia un buen drenaje interno. En el horizonte AE se observan pocas piedras desnudas de 4 a 5 cm. Las raíces medias y finas son abundantes en el Ap, comunes en el AE, y finas y pocas hasta 60 cm de profundidad. La Tabla C1. contiene la descripción de las características de los horizontes y capas del perfil. En la Figura C1. se presenta la fotografía del perfil.

Tabla C1. Características de los horizontes y capas del perfil P2G.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00 – 20	Pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; franco limoso al tacto; con granulos finos, desarrollados; ligeramente adherente, ligeramente plástico, friable; raíces abundantes, finas y medias; límite brusco, plano.
AE	20 – 35	Pardo amarillamiento oscuro (10YR 4/4) en húmedo, franco arcillo limoso al tacto; con bloques subangulares, moderados, finos y medios; adherente, plástico y friable; raíces pocas y finas; límite brusco, plano.
Bt	35 – 60	Pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) en húmedo; arcillo limoso al tacto; con bloques subangulares gruesos; adherente, plástico y firme; muy pocas raíces finas; límite neto, plano.
BC	60 – 120+	Pardo fuerte (75YR 5/8) en húmedo; arcillo limoso al tacto; con bloques subangulares gruesos, desarrollados, que presentan revestimientos gruesos de arcilla iluvial; adherente, plástico, firme; sin raíces.

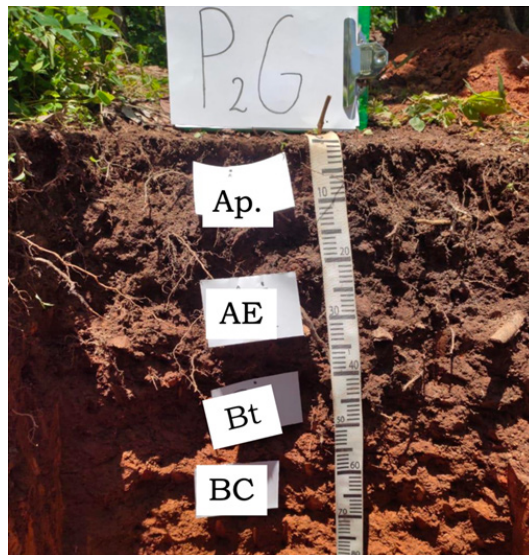


Figura C1. Perfil P2 G del suelo del sistema agroforestal de café del sector Guanga, cantón Olmedo, pendiente del terreno 28%.

Anexo D

Descripción de perfiles adicionales de suelo del sector Romerillos, cantón Chaguarpamba

Unidad de suelos del sistema agroforestal de café de la variedad Geisha

Código del perfil: P1Ch.

Fecha de descripción del suelo: 22-11-2018.

Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua, Pedro Guaya y Karina Tandazo.

Características Generales de la Unidad

Clasificación Taxonómica: *Typic Haplustults*. (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: 649885 E; 9570496 N.

Altitud: 1.462 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente de montaña, pendiente del terreno 25% (media).

Material Parental: Tobas volcánicas con presencia de cuarzo (Formación Chaguarpamba).

Drenaje interno: bueno.

Sistema agroforestal: café (*Coffea arabica* L.) var Geisha, banano (*Musa paradisiaca* L.) y guabo (*Inga edulis* Mart.)

Descripción general del suelo

Suelo profundo con dos grupos de horizontes genéticos, lo que revela que el perfil ha evolucionado en dos etapas. La parte superior (horizontes

Ap, BC1, Bc2 y C) se ha formado sobre material coluvial, con presencia de rocas fracturadas; en tanto que la parte inferior (horizonte Ab), corresponde a un horizonte enterrado. Los fragmentos rocosos en el interior del perfil se encuentran altamente meteorizadas (80%), dado que se rompen con la presión de la mano o se cortan con el cuchillo. La mayor abundancia de raíces se presenta en la capa de 0 – 15 cm; sin embargo, raíces muy finas y muy pocas se observan hasta 50 cm de profundidad. La Tabla D1. contiene la descripción de las características de los horizontes y capas del perfil. En la Figura D1. se presenta la fotografía del perfil.

Cuadro D1. Características de los horizontes y capas del perfil P1Ch.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00 – 15	Pardo oscuro (10YR 4/3) húmedo, franco limoso a franco arcillo limoso (tacto), con bloques subangulares, fuertes, gruesos, medios y finos, adherente, plástico y friable
BC1	15 – 30	Pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) húmedo, franco arcilloso, con bloques subangulares, fuertes, medios y grandes y presencia de fragmentos rocosos frecuentes de tamaño de grava con formas redondeadas; adherente, plástico y friable
BC2	30 – 55	Pardo (7.5 YR 5/4) húmedo, arcillo limoso, con bloques subangulares fuertes, medios y grandes, adherente, plástico y friable, pocos fragmentos rocosos de tamaño grava con formas redondeadas
C	55 – 70	Pardo fuerte (7.5 YR 5/8) húmedo, franco a franco limoso, masivo, adherente, plástico y friable.
Ab	70 – 110+	Pardo oscuro (10 YR 3.3) húmedo, arcillo limoso, con bloques subangulares, gruesos, adherente, muy plástico y friable.

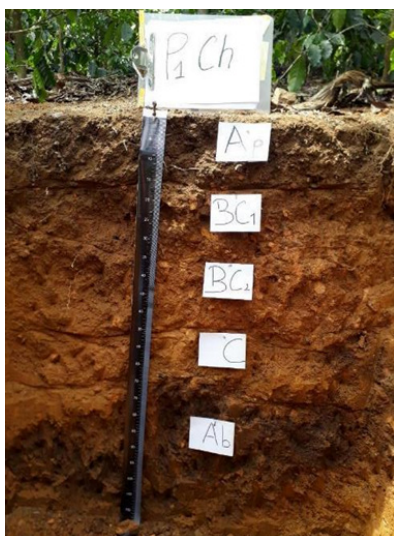


Figura D1. Perfil P1Ch del sistema agroforestal de café de la variedad Geisha. Sector Romerillos, cantón Chaguarpamba.

Unidad de suelos del sistema agroforestal de café arábigo de la variedad Villalobos

Código del perfil: P3Ch.

Fecha de descripción del suelo: 22-11-2018.

Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua, Pedro Guaya y Karina Tandazo.

Características Generales de la Unidad

Clasificación Taxonómica: *Typic Haplustults* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: 650062 E; 9570494 N.

Altitud: 1.444 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente de montaña, pendiente del terreno 26% (media).

Material Parental: Tobas volcánicas con presencia de cuarzo (Formación Chaguarpamba).

Drenaje interno: bueno.

Sistema agroforestal: café arábigo var Villalobos, banano (*Musa sapientum* L.), naranjo (*Citrus sinensis* L.) y porotillo (*Erythrina velutina* Willd.).

Descripción general del suelo

Suelo muy profundo formado cronológicamente en tres fases. La tercera fase (más reciente), corresponde a la capa superior, denominada horizonte Ap, está constituida por materiales depositados provenientes de la erosión de las partes altas. En la segunda fase (sección intermedia del perfil), el suelo se ha formado de material coluvial y está constituido por los horizontes 2AE, 2Bt y 2C. La primera fase (la más antigua), corresponde al horizonte inferior 3C. Las raíces son abundantes en la capa de 00 a 25 cm; sin embargo, raíces finas y pocas se observan hasta 75cm de profundidad. La Tabla D2. contiene la descripción de las características de los horizontes y capas del perfil. En la Figura D2. se presenta la fotografía del perfil.

Tabla D2. Características de los horizontes y capas del perfil P3Ch.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00 – 05	Pardo fuerte (7.5YR 4/6) húmedo, franco arcillo limoso (tacto), con bloques subangulares, fuertes, finos y gruesos, adherente, plástico y friable.
2AE	05 – 25	Pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) húmedo, franco limoso, con bloques subangulares fuertes, finos y gruesos, adherente, plástico y duro
2Bt	25 – 45	Pardo amarillento oscuro (5YR 4/4) húmedo, franco arcilloso, con bloques subangulares fuertes y gruesos, adherente, plástico y duro.
2C	45 – 75	Pardo fuerte (7.5 YR 5/8) húmedo, arcillo limoso, masivo adherente, plástico y friable, con fragmentos rocosos frecuentes, redondeados y angulares, del tamaño de grava relictos del material parental.
3C	90 – 120+	Rojo amarillento (5YR 5/8) húmedo, franco arcillo limoso, masivo, ligeramente adherente, ligeramente plástico, y friable.



Figura D2. Perfil P3Ch del suelo del Sistema Agroforestal de café de la variedad Villalobos. Sector Romerillos, cantón Chaguarpamba.

Anexo E

Descripción de perfiles adicionales de suelo del sector Lozumbe, cantón Chaguarpamba

**Unidad de suelos del sistema agroforestal de café arábigo en
pendiente escarpada (60 %)**

Código del perfil: P1L.

Fecha de descripción del suelo: 23-11-2018.

Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua, Pedro Guaya y Karina Tandazo.

Características Generales de la Unidad

Clasificación Taxonómica: *Inceptic Haplustalfs* (USDA Soil Taxonomy: Soil Survey Staff, 2010).

Ubicación del perfil: 639805 E, 9574025 N.

Altitud: 863 m s. n. m.

Fisiografía: Vertiente media de montaña de pendiente escarpada (60 %).

Material Parental: Rocas sedimentarias: Limolitas de la formación Chaguarpamba.

Drenaje interno: bueno.

Descripción general del suelo

Suelo muy profundo, constituido por los horizontes Ap, Bt, C1 y C2. Las raíces son abundantes hasta 45 cm; y, muy finas y pocas hasta 80 cm. Debido a la fuerte pendiente en la base de los árboles se evidencia pérdida del suelo debido a un proceso severo de erosión laminar, lo que

ha ocasionado la desaparición de la capa orgánica y el horizonte A original. La Tabla E1. contiene la descripción de las características de los horizontes y capas del perfil. En la Figura E1. se presenta la fotografía del perfil.

Tabla E1. Características de los horizontes y capas del perfil P1L.

Horizontes	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	00 – 10	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) húmedo, franco arcillo limoso (tacto), con bloques subangulares fuertes y gruesos, adherente, plástico, muy duro en seco.
Bt	10 – 45	Pardo oscuro (10YR 3/3) húmedo, arcillo limoso, con bloques subangulares, fuertes y gruesos, adherente, plástico, muy duro en seco.
C1	45 – 80	Pardo amarillento oscuro (10YR 4/4), arcillo limoso, masivo, adherente, plástico, muy duro en seco.
C2	80 – 120+	Pardo amarillento oscuro (10YR 3/6) húmedo 50% y amarillo pálido (2.5Y 7/4) húmedo 50%, arcillo arenoso, masivo, adherente, plástico, duro en seco.



Figura E1. Perfil P1L del suelo del Sistema Agroforestal de café arábigo, pendiente escarpada (60%). sector Lozumbe, parroquia Santa Rufina, cantón Chaguarpamba.

Anexo F

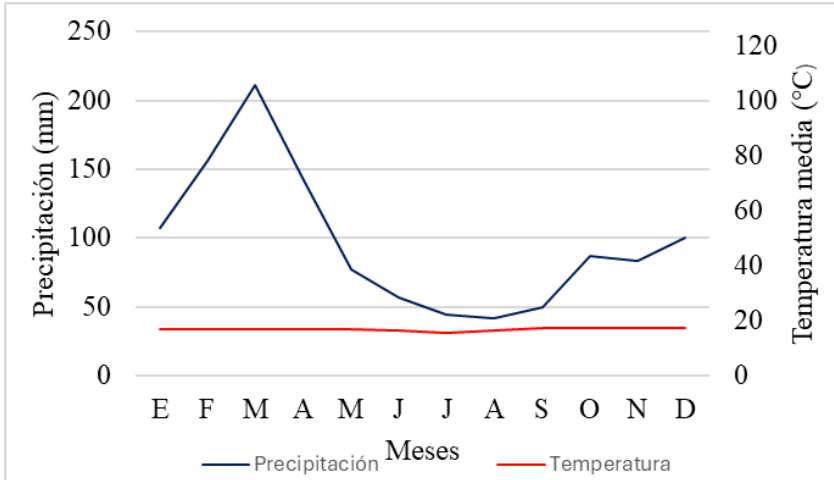


Diagrama ombrotérmico sector El Cristal (2.071 m.s. n. m.)
Período: 1980-2000

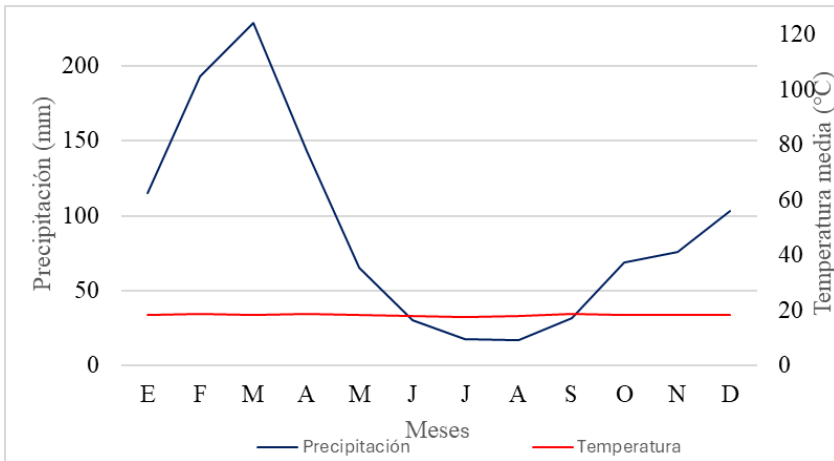


Diagrama Ombrotérmico de Amaluza
Datos de la estación meteorológica de Amaluza, cantón Espíndola, provincia de Loja.
Altitud: 1.672 m.s. n. m. Período de registro 1990-2019. INAMHI

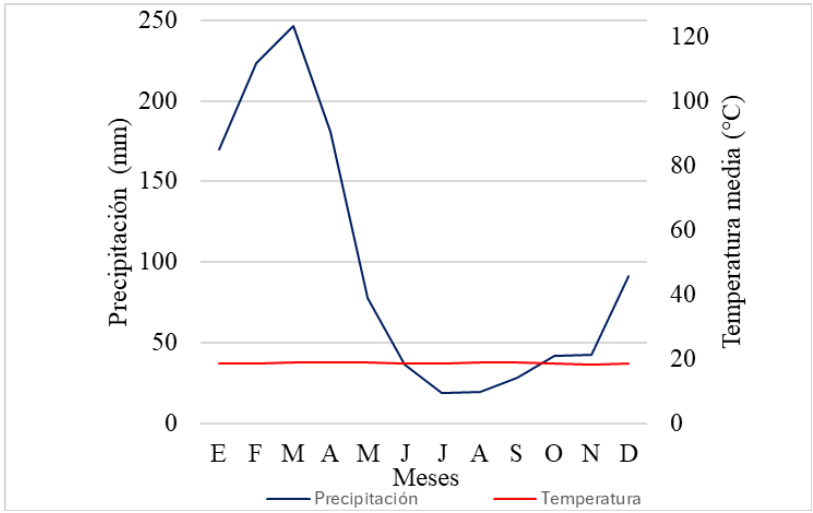


Diagrama ombrotérmico sector Guanga, cantón Olmedo
Período 1980-2020

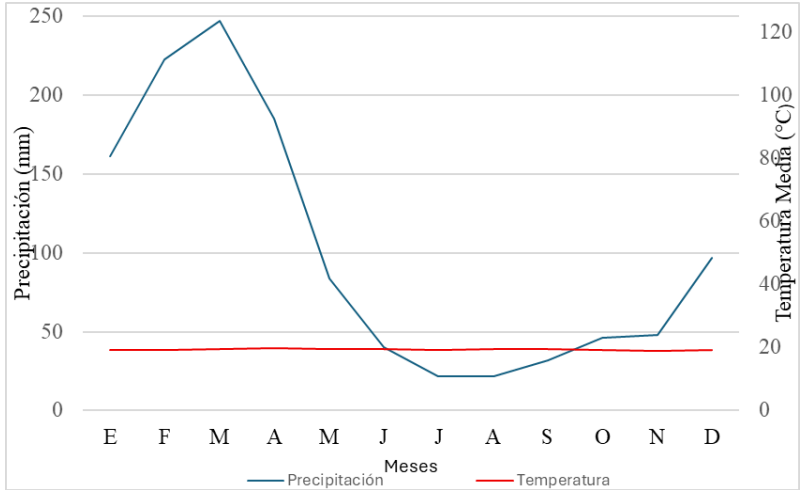


Diagrama Ombrotérmico de Chaguarpamba
Datos de la estación meteorológica de Chaguarpamba, cantón Chaguarpamba, provincia de Loja. Altitud: 1.334 m.s.n.m. Período de registro 1990-2015. PREDESUR

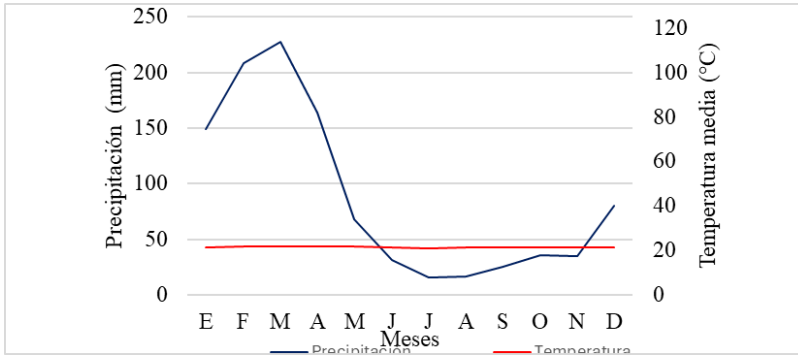


Diagrama Ombrotérmico de Santa Rufina.

Datos de la estación meteorológica de Santa Rufina, cantón Chaguarpamba, provincia de Loja. Altitud: 910 m s. n. m. Período de registro 1990-2019.

PREDESUR

Anexo G

Evaluación biológica de la fertilidad del suelo

1. Antecedentes

No obstante que en los laboratorios de suelos de la Costa y Sierra ecuatoriana se ha generalizado el uso de la solución extractora de Olsen Modificada para cuantificar la disponibilidad de los elementos P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn, en consideración de que los suelos de la Región Sur del Ecuador son geológica, genética, mineralógica, física y químicamente diferentes que aquellos de la Sierra Central y Norte, Valarezo (1985) y Guayllas (1988) adaptaron y validaron el método de Van Diest (1983), (técnica del elemento omitido), para evaluar biológicamente en invernadero la fertilidad actual en suelos de las comunidades de Cañicapac y Ñamarín del cantón Saraguro, de la provincia de Loja, Ecuador, en la perspectiva de establecer la correlación con los resultados del análisis químico de laboratorio utilizando la solución de Olsen Modificada, con miras a disponer de referentes para tomar las mejores decisiones en cuanto a la gestión integral de la fertilidad de los suelos.

La técnica del elemento omitido es un procedimiento relativamente rápido, eficiente y efectivo para detectar las carencias de nutrientes en el suelo. Se fundamenta en el hecho de que, al eliminar de una fórmula nutritiva completa sistemáticamente uno de los elementos nutritivos, en caso de que éste se encuentre deficiente en el suelo, se detectará su ausencia en la planta indicadora, lo cual permitirá establecer la necesidad de corregirlo para un adecuado desarrollo del cultivo.

En la metodología adaptada y validada por Valarezo y Guayllas, se utiliza como planta indicadora el tomate (*Solanum lycopersicum* L), por tener una semilla pequeña, con pocas reservas nutritivas, lo que permite que en poco tiempo la planta dependa de los nutrientes disponibles en el suelo.

Las raíces de la planta indicadora se desarrollan parte en el suelo y parte en la solución nutritiva, durante ocho semanas. La solución nutritiva completa (SC) se prepara utilizando diferentes sales, con una concentración de alrededor de 12,5 meq l⁻¹, la cual contiene todos los elementos nutritivos; así como, las soluciones en las que se ha eliminado uno de los nutrientes: -N; -P; -K; -Mg; -S; -Zn, -Cu, -Mn -B, -Fe. También, se incluye un testigo absoluto sin ningún nutriente, únicamente con agua destilada.

Ante el reto de recuperar productivamente los suelos del ambiente de ladera, degradados por la ganadería (800 a 1.200 m.s.n.m.) en el corredor fluvial Zamora – Nangaritza de la zona sur de la Amazonía Ecuatoriana, mediante la aplicación de carbón vegetal (biocarbón), cal y nutrientes, como estrategia para la producción de árboles maderables de valor comercial: (Melina: *Gmelina arborea* Roxb. y Pachaco: *Schizolobium parahybum* Vell. Conc), y secuestrar CO₂ de la atmósfera, en julio y agosto de 2009 se instalaron dos experimentos en la Victoria - Zamora (*Typic Kandihumults*, granodiorita, pendiente 15%) y Los Zapotes – Panguintza (*Typic Kandiudults*, andesita y brechas tobáceas, pendiente 60%) (Valarezo, 2012b). Al tercer año de la plantación, en los árboles, principalmente de pachaco, apareció un proceso de muerte regresiva desde el punto terminal, debido posiblemente a la carencia de un nutriente. Dada la incertidumbre sobre la confiabilidad de los análisis de laboratorio sobre la disponibilidad de nutrientes en el suelo,

se decidió retomar la metodología de la evaluación biológica de la fertilidad (adaptada y probada por Valarezo y Guayllas), mediante un trabajo de tesis de pregrado que fue desarrollado por Burneo (2012) en la Universidad Nacional de Loja (UNL), bajo la dirección de Carlos Valarezo, detectándose que el boro era el elemento deficiente, causante de la muerte regresiva. Esta metodología permitió corregir con precisión la carencia del referido elemento y proceder a una segunda aplicación de los macronutrientes (N, P y K) que los árboles habían agotado del suelo.

Desde ese entonces, en la UNL se decidió continuar con las investigaciones para establecer la correspondencia entre los nutrientes extraídos con la solución de Olsen Modificada y aquellos cuantificados mediante la evaluación biológica, en los rangos de Bajo, Medio y Alto; así, Loaiza (2013), y Mendoza (2013), en suelos del Sur de la Amazonia Ecuatoriana desarrollados sobre andesita, granodiorita, arenisca cuarzosa, y aluvial reciente, respectivamente; Castillo y Salinas (2014) en suelos de origen volcánico de los cantones Buena Fe, provincia de Los Ríos, y Quinindé, provincia de Esmeraldas. Los resultados permiten concluir que no existe una correspondencia aceptable entre ambas aproximaciones, particularmente para los elementos N, P, K, S, Mg y B.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

- Vasos cónicos de plástico de 250 ml.
- Tarrinas de plástico con tapa de 700 ml.
- Semillas de tomate riñon.

- Pipetas de 5 y 10 ml.
- Balanza de precisión 0,1 g.
- Probetas 500 y 1.000 ml.
- Estufa.
- Fundas de papel y de plástico.
- Barreno.
- Regla.
- Marcadores y papeletas de identificación.

2.2. Metodología

2.2.1. Preparación de las soluciones nutritivas.

En las Tablas G1 y G2 se indican los tipos de sales y las cantidades para la preparación de la solución madre (1N), de cada uno de nutrientes (macro y micro).

Tabla G1. Tipos de sales y las cantidades para preparar las soluciones madres 1N de los macro elementos.

Sales utilizadas	Peso molecular (g)	Cantidad/ litro Sol 1N (g l ⁻¹)
Ca (NO ₃) ₂ . 4H ₂ O	236,0	118,0
KNO ₃	101,0	101,0
KH ₂ PO ₄	136,0	136,0
NaH ₂ PO ₄	120,0	120,0
K ₂ SO ₄	174,0	87,0
MgSO ₄ . 7H ₂ O	246,0	123,0
MgCl ₂ . 6H ₂ O	202,0	101,0
CaCl ₂ . 6H ₂ O	218,0	109,0
NaCl	58,0	58,0

Tabla G2. Concentración de la solución madre y cantidades de sales para la preparación de un litro de micronutrientes.

Sales	g l ⁻¹	ppm solución madre	ml l ⁻¹	ppm solución nutritiva
MnCl ₂ . 4H ₂ O	1,81	500,0	1,0	0,50
H ₃ BO ₃	2,86	500,0	1,0	0,50
ZnSO ₄ . 7H ₂ O	0,22	50,0	1,0	0,05
CuSO ₄ . 5H ₂ O	0,16	40,0	1,0	0,04
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ . 4H ₂ O	0,04	20,0	1,0	0,02
NaFe-EDTA	32,75	5.000,0	1,0	5,00

En la Tabla G3. se presenta los volúmenes de las soluciones madre en ml que se requiere para preparar 1 litro de solución nutritiva.

Tabla G3 Volúmenes de las soluciones madre (ml) que se necesita para 1 litro de las soluciones nutritivas.

Solución madre	ml										
	SC	-N	-P	-K	-Mg	-S	-Zn	-Cu	-Mn	-B	-Fe
Ca (NO ₃) ₂ . 4H ₂ O	6,0	-	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
KNO ₃	2,0	-	2,0	-	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
KH ₂ PO ₄	2,0	2,0	-	-	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
NaH ₂ PO ₄	-	-	-	2,0	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ SO ₄	-	2,0	2,0	-	1,0	-	-	-	-	-	-
MgSO ₄ . 7H ₂ O	1,5	1,5	1,5	1,5	-	-	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
MgCl ₂ . 6H ₂ O	-	-	-	-	-	1,5	-	-	-	-	-
CaCl ₂ . 6H ₂ O	-	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaCl	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
NaFe-EDTA	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-
MnCl ₂ . 4H ₂ O	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0
H ₃ BO ₃	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0
ZnSO ₄ . 7H ₂ O	1v	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0
CuSO ₄ . 5H ₂ O	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ . 4H ₂ O	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

2.2.3. Preparación de los recipientes.

En los vasos de plástico de 250 ml, se recorta la base y se sustituye por una lámina de tejido nylon, que se sujeta con cinta y liga delgada, de manera que pueda soportar 200 g de suelo y permitir que las raíces de la planta indicadora puedan llegar a la solución nutritiva.

En el centro de las tapas de las tarrinas se hace un círculo cuyo diámetro permita asentar el vaso cónico que contiene el suelo. Se debe asegurar que un centímetro del fondo del vaso esté en contacto con la solución nutritiva de la tarrina, como se ilustra en la (Figura G1).



Figura G1. Vaso de 250 ml que contiene 200 g de la muestra de suelo, cuyo fondo está en contacto de 1 cm con la solución nutritiva de la tarrina.

2.2.4. Instalación del experimento.

Se etiqueta cada tarrina y se añade 600 ml de la respectiva solución nutritiva (cuatro repeticiones).

- La solución nutritiva completa (SC): contiene todos los macros y micro elementos (N, P, K, Mg, S, Fe, Mn, Zn, B y Cu).
- Solución nutritiva menos nitrógeno, contiene macros y micro elementos (P, K, Mg, S, Fe, Mn, Zn, B, Cu).

- Solución nutritiva menos fósforo, contiene macros y micro elementos (N, K, Mg, S, Fe, Mn, Zn, B, Cu).
- Solución nutritiva menos potasio, contiene macros y microelementos (N, P, Mg, S, Fe, Mn, Zn, B, Cu).
- Solución nutritiva menos magnesio, contiene macros y micro elementos (N, P, K, S, Fe, Mn, Zn, B, Cu).
- Solución nutritiva menos azufre, contiene macros y micro elementos (N, P, K, Mg, Fe, Mn, Zn, B, Cu).
- Solución nutritiva menos hierro, contiene macros y micro elementos (N, P, K, Mg, S, Mn, Zn, B, Cu).
- Solución nutritiva menos manganeso, contiene macros y micro elementos (N, P, K, Mg, S, Fe, Zn, B, Cu).
- Solución nutritiva menos zinc, contiene macros y micro elementos (N, P, K, Mg, S, Fe, Mn, B, Cu).
- Solución nutritiva menos boro, contiene macros y micro elementos (N, P, K, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu.)
- Solución nutritiva menos cobre, contiene macros y micro elementos (N, P, K, Mg, S, Fe, Mn, Zn, B).
- Testigo absoluto: la tarrina solamente contiene agua destilada.
- Se coloca la tapa perforada de cada tarrina en la que se ha puesto la respectiva solución nutritiva, luego se introduce el vaso plástico que contiene los 200 g de suelo, hasta que esté en contacto con la solución nutritiva (1 cm).

2.2.5. Siembra y raleo de la planta indicadora.

- Después de 24 horas de contacto, la solución nutritiva por efecto de capilaridad asciende y humedece todo el suelo.
- En cada vaso se siembra tres semillas de tomate (por ejemplo, variedad Flora Dade).

- Después de 15 días de la germinación se realiza el raleo, se deja una planta por vaso.

2.2.6. Reposición de la solución nutritiva.

En función la tasa evapotranspiración de la planta indicadora, se realiza la reposición de la solución nutritiva diariamente durante los 60 días del ensayo, de manera de mantener contacto del fondo del vaso que contiene el suelo a un centímetro dentro de la solución nutritiva.

2.2.7. Registro del crecimiento y de la masa seca de la planta indicadora.

Cada semana se registra la altura de la planta y los síntomas visuales que se detecten (Figura G2). A los 60 días después de la germinación, se registra la altura de la planta indicadora en cada tratamiento (cuatro repeticiones). A continuación, se corta la planta a nivel del cuello y luego se coloca en la estufa a 60 °C, durante cuatro días para determinar la biomasa seca, con cuyos valores se interpretan los resultados.



Figura G2. Planta de tomate a los 60 días después de la germinación, desarrollada en la muestra de suelo contenida en el vaso plástico, en contacto de 1 cm con la solución nutritiva de la tarrina.

3. Interpretación de los resultados

La interpretación de los resultados de la evaluación biológica se realiza utilizando los valores de la biomasa seca de cada una de las soluciones del elemento excluido (promedio de cuatro repeticiones), los cuales se expresan como porcentaje de la biomasa seca de la solución completa, aplicando los rangos alto (A), medio (M) y bajo (B), (Tabla G4) sugeridos por Valarezo (1985).

Tabla G4. Interpretación de valores biomasa (%) de la planta indicadora de cada elemento omitido los 60 días de edad (promedio de tres repeticiones), en relación con la solución completa (SC = 100%) (Valarezo, 1985).

% de materia seca relativa a la SC	Interpretación
< 33	Bajo
33-66	Medio
> 66	Alto

4. Referencias bibliográficas

- Burneo, P. (2012). Evaluación biológica de la fertilidad de un suelo desarrollado sobre andesita tratado con carbón vegetal, cal y nutrientes en el Sur de la Amazonia ecuatoriana. Tesis ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Loja]..
- Castillo, F. y Salinas, J. (2014). Correspondencia entre la evaluación química y biológica de la fertilidad actual de suelos de origen volcánico en dos unidades productivas de las provincias de Los Ríos y Esmeraldas [Tesis ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Loja].
- Guayllas, J. (1988). Estado nutricional de los suelos de Cañicapac y Ñamarin, mediante un método biológico [Tesis ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Loja].
- Loaiza, G. (2013). Evaluación biológica de la fertilidad de un suelo desarrollado sobre granodiorita, tratado con carbón vegetal, cal y nutrientes en el Sur de la Amazonía Ecuatoriana. [Tesis de ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Loja].
- Mendoza, O. (2013). Evaluación biológica de la fertilidad de un suelo desarrollado sobre arenisca cuarzosa, tratado con carbón vegetal, cal y nutrientes en San Francisco-El Pangui. [Tesis ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Loja].
- Valarezo, C. (1985). Proyecto de evaluación de la fertilidad de los suelos de Saraguro. Universidad Nacional de Loja.
- Valarezo, C. (2012). Gestión de la fertilidad del suelo con enmiendas de biocarbón en plantaciones de árboles maderables en el sur de la Amazonía ecuatoriana [Informe final]. Universidad Nacional de Loja & SENESCYT.
- Van Diest, A. (1983). A biological method for the assessment of the nutritional status of a soil. International Agricultural Centre.



Universidad
Nacional
de Loja

Suelos en plantaciones de café en la provincia de Loja: características, clasificación, fertilidad, aptitud y manejo

La provincia de Loja es una de las regiones más reconocidas a nivel nacional e internacional por la calidad del café que produce, lo cual se refleja en los primeros lugares obtenidos por muestras de varios cantones en concursos de la Taza Dorada. Este desempeño confirma su relevancia social, económica y ambiental. No obstante, la productividad de los cafetales es baja, asociada, entre otros factores, al limitado conocimiento científico de los suelos y a la inadecuada gestión de su fertilidad.

Con el propósito de aportar a la superación de esta problemática, se desarrolló un proceso de investigación en cinco sistemas agroforestales de café, cuyos resultados se sistematizan en este libro. Los tres primeros capítulos abordan las características biofísicas y socioeconómicas de la provincia en el contexto nacional, la importancia del café a escala mundial, nacional y local, y los requerimientos edáficos y nutricionales del café arábigo.

Los tres capítulos siguientes presentan la caracterización de los suelos (propiedades fisicoquímicas, clasificación taxonómica, fertilidad actual y aptitud) y, sobre esta base, se proponen orientaciones para la gestión integral de la fertilidad, el uso eficiente del agua y el control de la erosión. Finalmente, se plantean líneas de investigación orientadas a mejorar la productividad y la sostenibilidad del sistema agroforestal cafetero, destacando la necesidad de promover la adopción de buenas prácticas por parte de los productores, cuyo sustento depende directamente de este cultivo.

