



Criterios para la definición de planes de fertilización y la aplicación de riego en cultivos de aguacate Hass con un enfoque tecnificado

Alexander Rebolledo Roa | Diana Yaritza Dorado Guerra
Luis Carlos Grajales Guzmán | Ana María Trejos Arana
Adriana Katherine Rodríguez-León



DESARROLLO Y VALIDACIÓN
DE TECNOLOGÍAS
PARA INCREMENTAR
LA PRODUCTIVIDAD DEL
CULTIVO DE AGUACATE HASS
EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA



Alexander Rebolledo Roa

Diana Yaritza Dorado Guerra

Luis Carlos Grajales Guzmán

Ana María Trejos Arana

Adriana Katherine Rodríguez-León

Criterios para la definición de planes de fertilización y la aplicación de riego en cultivos de aguacate Hass con un enfoque tecnificado

Criterios para la definición de planes de fertilización y la aplicación de riego en cultivos de aguacate Hass con un enfoque tecnificado. / Alexander Rebolledo Roa [y otros cuatro]. -- Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2023.

328 páginas (Alianzas AGROSAVIA)
Incluye referencias bibliográficas, fotografías y gráficos.

ISBN: 978-958-740-679-5
ISBN e-Book: 978-958-740-680-1

1. *Persea americana* 2. Fenología 3. Nutrición de las plantas 4. Balance Hídrico 5. Crecimiento de la planta 6. Riego 7. Aplicación de abonos I. Rebolledo Roa, Alexander. II. Dorado Guerra, Diana Yaritza III. Grajales Guzmán, Luis Carlos IV. Trejos Arana, Ana María V. Rodríguez León, Adriana Katherine.

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura -Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria- AGROSAVIA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATÁ, MOSQUERA – CUNDINAMARCA. CÓDIGO POSTAL 250047 COLOMBIA.

Esta publicación forma parte de los resultados de los proyectos “Manejo integrado del cultivo de aguacate (*Persea americana*) var. Hass para incrementar la calidad y el rendimiento en zonas productoras de Colombia”, cofinanciado con recursos de Colciencias con código N.º 710650227844 y respaldado con recursos de contrapartida por las alianzas de productores: Hass Colombia SAT de Antioquia y la Asociación de productores de Frutas de Herveo (Asfruher), en el Tolima, y “Desarrollo y validación de tecnologías para incrementar la productividad del cultivo de aguacate Hass en el Departamento del Cauca”, financiado con recursos del Sistema General de Regalías del Cauca con código BPIN 2018000100010. La Gobernación del Cauca, a través de la Secretaría de Desarrollo Económico y Competitividad, respaldó la ejecución de este proyecto, al igual que las asociaciones de productores conformadas en los municipios de Piendamó, Cajibío, Morales, Caldono, Sotará, Timbío, El Tambo, Popayán, Caloto, Corinto y Toribío.

Colección: Alianzas AGROSAVIA
Tipología: Libro de análisis
Primera edición, 2017
Segunda edición ampliada, noviembre de 2023

Preparación editorial:

Editorial AGROSAVIA
editorial@agrosavia.co
Líder editorial: Astrid Verónica Bermúdez
Edición: Felipe Solano Fitzgerald
Corrección de estilo: Alejandro Merlano
Diseño y diagramación: Julián Hernández - Taller de diseño
Ilustraciones: Juan Felipe Martínez Tirado
Impresión: Imagen Editorial SAS
Primera impresión, 1.000 ejemplares
Segunda impresión, 1.000 ejemplares

Citación sugerida: Rebolledo-Roa, A., Dorado-Guerra, D. Y., Grajales-Guzmán, L. C., Trejos-Arana, A. M., & Rodríguez-León, A. K. (2023). *Criterios para la definición de planes de fertilización y la aplicación de riego en cultivos de aguacate Hass con un enfoque tecnificado*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia.

<https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7406801>

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones e información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
<http://www.agrosavia.co/>



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Tabla de contenido

Agradecimientos	21
Introducción	23
Unidad I. Requerimientos nutricionales del cultivo y manejo de la fertilización con base en el índice de balance de nutrientes (IBN)	26
Capítulo 1. Clasificación taxonómica del aguacate	28
División Magnoliophyta: plantas con flores.....	29
Familia Lauraceae	30
Género Persea.....	33
Especie Persea americana Miller	38
Capítulo 2. Modelo fenológico.....	40
Escala fenológica con subfases del proceso dicogámico de la flor, propuesta por Cabezas et al. (2003).....	42
Escala fenológica del desarrollo floral propuesta por Salazar-García et al. (1998).....	49
Escala fenológica del desarrollo reproductivo propuesta por Alcaraz et al. (2013).....	58

Capítulo 3. Función de los nutrientes en los procesos de crecimiento y desarrollo del fruto 66

Nitrógeno	69
Fósforo	75
Potasio.....	77
Calcio	79
Magnesio.....	82
Azufre.....	84
Micronutrientes	86

Capítulo 4. Propiedades químicas del suelo en zonas productoras de aguacate 92

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	94
Contenido de materia orgánica (MO)	99
pH del suelo.....	101

Capítulo 5. Requerimientos nutricionales del cultivo de aguacate Hass 108

Características de las muestras de suelo para análisis.....	110
Características de las muestras de tejido foliar.....	114
Índice de balance de nutrientes (IBN).....	114
Necesidades de fertilización	124
Fuentes de fertilización externa.....	145
Efecto de la fertilización basada en el IBN sobre las variables de producción de aguacate Hass.....	152

Capítulo 6. TECNOHASS: plataforma tecnológica para orientar planes de fertilización	158
Ubicación	160
Registro	163
Uso del módulo sobre planes de fertilización	166
 Unidad II. Requerimientos hídricos y manejo del riego	 178
 Capítulo 7. Generalidades del cultivo	 180
Requerimientos hídricos en aguacate	181
 Capítulo 8. Manejo del riego en aguacate Hass.....	 184
Diseño agronómico	186
Diseño hidráulico	190
Programación de riego	196
 Capítulo 9. Efecto del riego en la producción de aguacate Hass.....	 208
Caracterización de las zonas de estudio	209
Balance hídrico climático y cálculo de láminas de riego	228
Comportamiento de la humedad del suelo	235
Variables fisiológicas	238
Producción.....	246
Análisis de costos.....	248
 Capítulo 10. Indicadores de gestión eficiente del agua de riego en cultivos de aguacate Hass	 256
Indicador de eficiencia en el uso del agua.....	257

Capítulo 11. TECNOHASS: plataforma tecnológica para la programación de riego	270
Planes de riego.....	271
Conclusiones.....	287
Referencias	289
Los autores.....	325





Lista de figuras

Figura 1. Características de la flor de la división Magnoliophyta.....	30
Figura 2. Características de las plantas de la familia Lauraceae, especie <i>Persea americana</i>	31
Figura 3. Características de los frutos de <i>P. schiedeana</i>	34
Figura 4. Características de hojas, flores y frutos de <i>P. indica</i>	35
Figura 5. Frutos de aguacate de la variedad Hass de <i>P. americana</i>	37
Figura 6. Fases femenina y masculina de la flor de aguacate con definición de subfases.	42
Figura 7. Estados fenológicos del desarrollo reproductivo de la variedad Lorena bajo las condiciones de San Sebastián de Mariquita (Tolima).	47
Figura 8. Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de la variedad Lorena, en función de la precipitación, en las condiciones de San Sebastián de Mariquita (Tolima).	48
Figura 9. Características macroscópicas del desarrollo de la inflorescencia.....	50
Figura 10. Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de aguacate en la localidad de Rionegro (Antioquia).	55
Figura 11. Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de aguacate en la localidad de Morales (Cauca).	57
Figura 12. Descripción de los estados fenológicos para aguacate Hass según la codificación BBCH.	59
Figura 13. Calendario fenológico y tiempo térmico en las condiciones del Cauca.	65

Figura 14. Esquema de distribución de materia seca en tejidos del fruto de aguacate y composición mineral de elementos primarios.	69
Figura 15. Zona de muestreo en árboles frutales, forestales, ornamentales, etc.	111
Figura 16. Separación de áreas homogéneas de terreno.....	113
Figura 17. Índice de balance nutricional (IBN) para un cultivo de diez años de aguacate Hass ubicado en Timbío (Cauca).	121
Figura 18. Distribución anual del patrón de lluvias y de la evapotranspiración en las zonas de estudio. a. Morales; b. El Tambo.....	153
Figura 19. Niveles de concentración foliar basados en el índice de balance de nutrientes (IBN) propuesto por Kenworthy (1973). ..	155
Figura 20. Producción por planta con el plan de manejo de la fertilización basado en el índice de balance de nutrientes (IBN) y con el manejo del productor, bajo las condiciones de Morales y el Tambo (Cauca), para aguacate Hass.	156
Figura 21. Diagrama de frecuencias del peso fresco del fruto de aguacate Hass en cosecha, con base en la clasificación de calibres del <i>Codex Alimentarius</i> (FAO, 1995), en las condiciones de Morales y El Tambo (Cauca).	157
Figura 22. Acceso a la plataforma tecnológica TECNOHASS.	161
Figura 23. Registro como usuario para acceder a la plataforma tecnológica TECNOHASS.	163
Figura 24. Descripción de política de privacidad y condiciones de uso de la plataforma tecnológica TECNOHASS.....	164
Figura 25. Segundo paso para el registro de información como usuario.....	165
Figura 26. Confirmación de registro como usuario.	165
Figura 27. Selección de opción para ingresar al módulo de fertilización y riego.	166
Figura 28. Inicio para la creación del plan de fertilización.	167
Figura 29. Registro de información para la creación del plan de fertilización del/los lotes en que se encuentra distribuido el predio.....	168

Figura 30. Inicio de registro del/los lotes en que se encuentra distribuido el predio.....	170
Figura 31. Información general del lote registrado.....	171
Figura 32. Registro de resultados del análisis foliar para el/los lotes registrados para cada predio.	172
Figura 33. Registro de resultados del análisis de suelos para el/los lotes registrados para cada predio.	173
Figura 34. Informe del estado nutricional del cultivo basado en la metodología del índice de balance de nutrientes (IBN) para el/los análisis foliares registrados.....	174
Figura 35. Informe del contenido nutricional del suelo para el/los análisis de suelos registrados.	175
Figura 36. Información consolidada sobre los parámetros requeridos para calcular los planes de fertilización.....	176
Figura 37. Planes de fertilización sugeridos a partir de los análisis foliares y de suelos registrados para el/los lotes de cada predio.	177
Figura 38. Principales características para tener en cuenta para el diseño agronómico de un sistema de riego.....	187
Figura 39. Formación de bulbo de humedecimiento en zona de raíces.	188
Figura 40. Diseño hidráulico y componentes de un sistema de riego localizado.	190
Figura 41. Sistema de riego instalado en campo.	196
Figura 42. Área de humedecimiento utilizando un sistema de riego por goteo.....	204
Figura 43. Perfiles de suelo en cada localidad. a. Herveo; b. Rionegro; c. Morales.	212
Figura 44. Balance hídrico multianual en las zonas de estudio.....	224
Figura 45. Comparación de las variables climáticas (temperatura y humedad relativa) obtenidas en el análisis multianual y las registradas por las estaciones en los huertos experimentales de las tres localidades.	227
Figura 46. Comportamiento de la velocidad del viento en el predio ubicado en el municipio de Morales (Cauca).....	228

Figura 47. Balance hídrico mensual en las tres localidades durante el desarrollo del experimento.	229
Figura 48. Momentos de aplicación de riego para cada zona de estudio.	233
Figura 49. Instalación de sensores de humedad.	235
Figura 50. Comportamiento de la humedad del suelo con riego y testigo en Morales (Cauca).	237
Figura 51. Abscisión de flores y frutos en las tres zonas de estudio. .	241
Figura 52. Número de estructuras caídas en las tres zonas de estudio.	243
Figura 53. Crecimiento del fruto en las tres zonas de estudio.	244
Figura 54. Rendimiento promedio entre localidades y ciclos evaluados.	248
Figura 55. Relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Herveo.	252
Figura 56. Relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Morales.	253
Figura 57. Relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Rionegro.	255
Figura 58. EUA promedio para las tres zonas productoras estudiadas.	261
Figura 59. RIS para las zonas de estudio y los tratamientos de riego evaluados.	265
Figura 60. Huella hídrica para el cultivo de aguacate Hass con tratamiento de riego del 0,75 ETO en las tres localidades estudiadas.	268
Figura 61. Huella hídrica para el cultivo de aguacate Hass con tratamiento testigo (sin riego), en las tres localidades estudiadas.	268
Figura 62. Ingreso al módulo de planes de riego en plataforma TECNOHASS.	272
Figura 63. Registro de nuevo plan de riego.	272
Figura 64. Selección de método de cálculo de ETO de acuerdo con información disponible del usuario.	275

Figura 65. Registro de información para calcular el área de humedecimiento y finalización de registro de plan de riego..... 276

Figura 66. Consulta de información climática disponible en área de influencia de la plataforma.....277

Figura 67. Registro de datos para determinar las necesidades de riego de acuerdo con el método de cálculo de ETO. 280

Figura 68. Representación gráfica de balance hídrico diario realizado por la plataforma y balance hídrico histórico de los municipios priorizados..... 281

Figura 69. Descarga de informe del plan de riego registrado (balance hídrico y necesidades de riego). 282

Figura 70. Ingreso y consulta de plan de riego registrado.....283

Figura 71. Creación de nuevo plan de riego. 284



Lista de tablas

Tabla 1. Productos comerciales utilizados como fuente de P para planes de fertilización	76
Tabla 2. Productos comerciales utilizados como fuente de K para planes de fertilización	79
Tabla 3. Clasificación textural de los suelos según el USDA.....	94
Tabla 4. Área superficial de distintos tamaños de partículas de suelos.....	96
Tabla 5. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) para diferentes tipos de arcilla, materia orgánica (MO) y texturas del suelo.....	97
Tabla 6. Interpretación del porcentaje de materia orgánica (MO) del suelo.....	101
Tabla 7. Clasificación del pH del suelo	102
Tabla 8. Materiales utilizados para el encalado.....	106
Tabla 10. Valores estándar (S) y coeficientes de variación (CV)	117
Tabla 11. Rangos en términos de porcentaje del estado nutricional de hojas de aguacate, de acuerdo con el enfoque del índice de balance nutricional (IBN) propuesto por Kenworthy (1973).....	118
Tabla 12. Resultados del análisis de tejidos de aguacate Hass para la localidad de Timbío (Cauca).....	118
Tabla 13. Posibles combinaciones de relaciones entre la disponibilidad de elementos en el suelo y el contenido en la planta, para determinar la cantidad de fertilizante por aplicar	123

Tabla 14. Valores propuestos en la “Quinta aproximación” del <i>Manual de asistencia técnica</i> del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)	125
Tabla 15. Contenido nutricional del suelo en la localidad de Timbío (Cauca) y diagnóstico con base en los rangos de la “Quinta aproximación” del <i>Manual de asistencia técnica</i> del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)	126
Tabla 16. Valores de extracción de nutrientes en un cultivo de aguacate Hass para un rendimiento de 20 t/ha	127
Tabla 17. Efectos de diferentes fuentes de fertilizantes sobre la acidez del suelo	146
Tabla 18. Fuentes de fertilizantes y composición porcentual de cada nutriente	148
Tabla 19. Características físicas y químicas del suelo de las zonas experimentales del Cauca	154
Tabla 20. Coeficientes del cultivo (Kc) determinados para aguacate	200
Tabla 21. Valores diarios de Pe y ETo	205
Tabla 22. Resultados de balance hídrico	207
Tabla 23. Generalidades de los huertos experimentales	210
Tabla 24. Resultados de los análisis físicos de suelos en la parcela de Herveo	213
Tabla 25. Resultados de los análisis físicos de suelos en el predio experimental de Rionegro	215
Tabla 26. Resultados de los análisis físicos de suelos en el predio experimental de Morales	218
Tabla 27. Resultados de los análisis químicos de suelos en las fincas experimentales	219
Tabla 28. Resultados de la prueba de bulbo húmedo en las tres localidades	220
Tabla 29. Características climáticas históricas de las tres zonas de estudio	223
Tabla 30. Láminas de riego y volumen aplicados por árbol para los ciclos evaluados en las tres localidades	231

Tabla 31. Efecto de los tratamientos de riego en el rendimiento del cultivo de aguacate Hass en las tres zonas de estudio, utilizando la prueba de Duncan.....	.247
Tabla 32. Variables para la evaluación económica.....	.251
Tabla 33. VPN y relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Herveo.....	.252
Tabla 34. VPN y relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Morales	.254
Tabla 35. VPN y relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Rionegro.....	.255
Tabla 36. EUA en las tres zonas productoras de aguacate evaluadas.....	.259
Tabla 37. Valores promedio de RWS, RIS y RRS para las tres localidades.....	.264
Tabla 38. Valores promedio de RWS, RIS y RRS para los tres tratamientos de riego	.264



Agradecimientos

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-**LAGROSAVIA** agradece a la Secretaría de Desarrollo Económico y Competitividad de la Gobernación del Cauca, por el apoyo financiero a través del Sistema General de Regalías, para realizar el proyecto “Desarrollo y validación de tecnologías para incrementar la productividad del cultivo de aguacate Hass en el departamento del Cauca”, del cual se obtuvo la información para realizar este documento.

También se agradece a los productores Libardo Peña, perteneciente a la asociación Aprat; Esperanza Ledezma, de la asociación Asproamilenio, en el municipio de El Tambo, y Fernando Velasco y Nelson Porfidio Otero, de la asociación Asproamor, en el municipio de Morales, Cauca. También se agradece a los productores de Morales (Cauca), El Tambo (Cauca), Herveo (Tolima) y Rionegro (Antioquia) por permitirnos llevar a cabo la investigación en sus fincas y obtener los resultados que se muestran en este documento.

Agrosavia agradece a la Secretaría de Desarrollo Económico y Competitividad de la Gobernación del Cauca por el apoyo financiero a través del Sistema General de Regalías.

De igual manera, se brinda un reconocimiento al equipo técnico y administrativo de AGROSAVIA que participó en el desarrollo de esta investigación y realizó aportes en las distintas etapas de elaboración de este libro. Se agradece especialmente a los profesionales Ronal Arturo Burbano, Adriana Katherine Rodríguez, Devi Yolemny Parra Ruíz y Diego Fernando Morales, al auxiliar Jonnathat Valencia y al operario Óscar Murillo, por el apoyo en la ejecución técnica de las investigaciones que generaron el contenido de este libro. Se extienden agradecimientos a la Dirección de Planeación y Cooperación Institucional y a la Oficina Asesora de Comunicaciones, Identidad y Relaciones Corporativas.

Introducción

Algunos árboles frutales, como cítricos, aguacate y mango, llegan a producir un alto número de flores, pero la cantidad de frutos que finalmente permanecen en el árbol hasta su cosecha depende del balance nutricional y hormonal endógeno que se establece en la planta entre ciclos de producción, y de los factores de suelo y clima predominantes. Un árbol de aguacate puede producir más de un millón de flores, con un porcentaje de cuajado de frutos del 0,001 % para la variedad Bacon (Inoue & Takahashi, 1990), el 0,07 % para la variedad Fuerte (Cameron et al., 1952) y entre el 0,01 % y el 0,1 % para la variedad Hass (Dixon & Sher, 2002; Can-Alonzo et al., 2005; Cossio-Vargas et al., 2007; Garner et al., 2011; Garner & Lovatt, 2008).

Además, es preciso destacar la importancia que tiene el manejo del agua en el cultivo de aguacate, especialmente en las etapas de floración y cuajado de fruto, pues, en épocas de déficit hídrico, e incluso con la aplicación de riego deficitario (láminas de riego entre el 33 % y el 55 % de la evapotranspiración del cultivo [ET]), se presenta una fuerte pérdida de los frutos en desarrollo, lo que afecta la productividad (Zuazo et al., 2021). El aguacate Hass tiene un rendimiento potencial de más de 30 t/ha, pero, debido a las altas tasas de abscisión de flores y frutos, el rendimiento promedio mundial se encuentra por debajo de las 10 t/ha (Garner & Lovatt, 2008).

Entre tanto, Silber et al. (2019) encontraron que una frecuencia adecuada de riego es crucial para una óptima fructificación.

Existen varios factores que determinan el porcentaje de cuajado de frutos: la competencia por los nutrientes disponibles en la planta, que se presenta entre el crecimiento de hojas, flores y frutos recién cuajados (Scholefield et al., 1985; Sedgley, 1987; Zilkah et al., 1987); la alta demanda de carbohidratos y nutrientes para la formación y producción de frutos (Wolstenholme, 1986); la participación del boro y el nitrógeno en los procesos del desarrollo floral (Jaganath & Lovatt, 1995; Lovatt, 2015), y el contenido endógeno hormonal, como las giberelinas y el ácido indolacético (AIA), cuya importancia se ha demostrado tras su cuantificación endógena (Garner & Lovatt, 2016) y la aplicación exógena en un estado fenológico específico del desarrollo floral (Paz-Vega, 1997; Rossouw & Robbertse, 2001; Salazar-García & Lovatt, 2002).

El conocimiento básico generado en las distintas zonas productoras de aguacate en el mundo ha contribuido a la estandarización de las prácticas para el manejo nutricional del cultivo. En México, por ejemplo, en el estado de Nayarit, se han reportado rendimientos de hasta 32,5 t/ha con el manejo de fertilización basado en el enfoque del índice de balance de nutrientes (IBN), desarrollado por Kenworthy (1973) y aplicado en investigación por Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2003) en aguacate Hass.

El enfoque del IBN considera, por un lado, un valor estándar (óptimo) del contenido de cada nutriente obtenido de árboles seleccionados por sus altos rendimientos y, por otro lado, la variación fisiológica o desviación estándar del contenido de cada elemento existente en dicha población de árboles seleccionados. Los resultados del análisis de tejidos complementan la definición de los planes de fertilización a partir de los análisis de suelos, los contenidos de nutrientes extraídos por la cosecha y los porcentajes de eficiencia en la aplicación de cada nutriente.

Para garantizar el transporte de nutrientes a la planta, es necesario el suministro de agua en todas las fases fenológicas del cultivo. Los cultivos de aguacate Hass en Colombia, en su gran mayoría, no poseen sistema de riego, por lo que dependen de las lluvias para garantizar la producción (Grajales-Guzmán, 2017). Las zonas productoras de este cultivar presentan un régimen hídrico positivo durante la mayor parte del ciclo fenológico, pero la distribución de las lluvias no es uniforme, lo que ocasiona un periodo de baja disponibilidad de agua, que coincide con las épocas de floración y llenado del fruto (junio-agosto), etapas fenológicas con alta susceptibilidad a condiciones ambientales desfavorables, como el déficit hídrico, para suplir los requerimientos de agua del árbol (Bower, 1988; Rebolledo & Romero, 2011; Whiley et al., 1988).

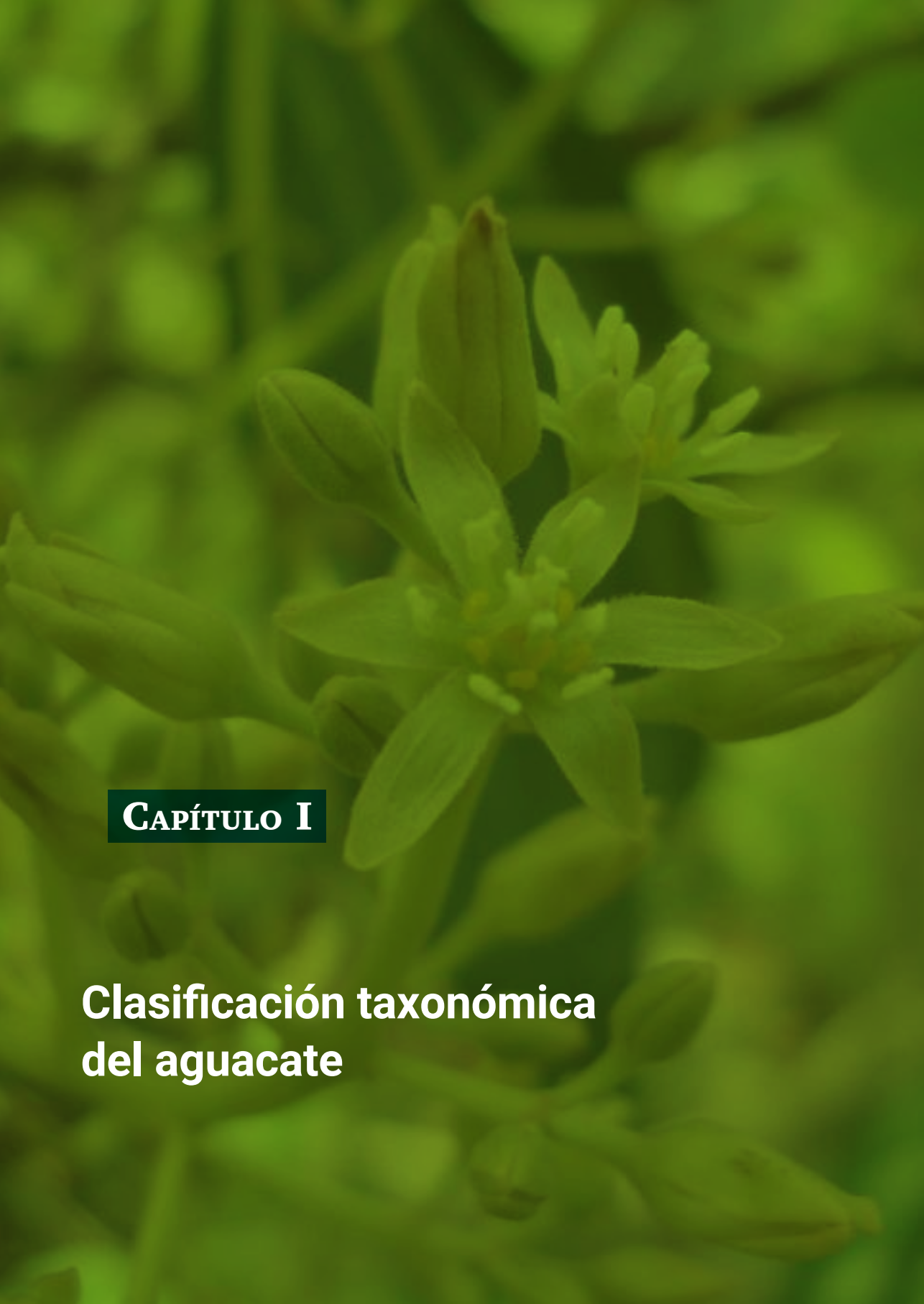
En este libro se presenta información obtenida en las investigaciones realizadas en zonas productoras de aguacate de Colombia, especialmente del departamento del Cauca. El documento está conformado por dos unidades: la primera trata sobre el manejo de la nutrición del cultivo, basada en la metodología del IBN, donde se destaca la importancia de los estados fenológicos como conocimiento básico requerido para enfocar su manejo, y la segunda aborda el uso eficiente del recurso hídrico y el manejo del riego en cultivos de aguacate. Entre las zonas productoras de aguacate en Colombia existen diferencias con respecto a las decisiones sobre el manejo del riego y la nutrición del cultivo, lo que puede generar variaciones en las calidades del fruto. La información documentada con procesos de investigación que incluyen los valores estándar de nutrientes a nivel foliar, la extracción de nutrientes por el fruto, el calendario fenológico en las zonas de estudio, las condiciones del suelo que afectan la disponibilidad de nutrientes para la planta y algunos indicadores de gestión para el uso eficiente del agua de riego constituye la base conceptual del conocimiento generado sobre el aguacate Hass y busca contribuir a la toma de decisiones sobre el manejo nutricional del cultivo.

A close-up photograph of an avocado plant. The image shows several green, elongated leaves with prominent veins. Interspersed among the leaves are numerous small, green, round fruits (avocados) on thin, light-colored stems. The background is a dense cluster of similar foliage.

UNIDAD I

**Requerimientos
nutricionales del cultivo y
manejo de la fertilización
con base en el índice de
balance de nutrientes (IBN)**



The background of the entire page is a close-up photograph of avocado flowers. The flowers are small, with five petals and prominent yellow stamens. Some flowers are in full bloom, while others are still in bud form. The overall color palette is a range of greens, from light yellow-green to deep forest green, with a soft, out-of-focus effect.

CAPÍTULO I

Clasificación taxonómica del aguacate

A continuación, se presenta la descripción del aguacate, de acuerdo con la clasificación taxonómica (división, familia, género y especie), y sus principales características morfológicas, anatómicas y hábitos de crecimiento. La descripción por especie aporta información sobre el centro de origen y las condiciones generales de clima predominantes en dichas regiones.

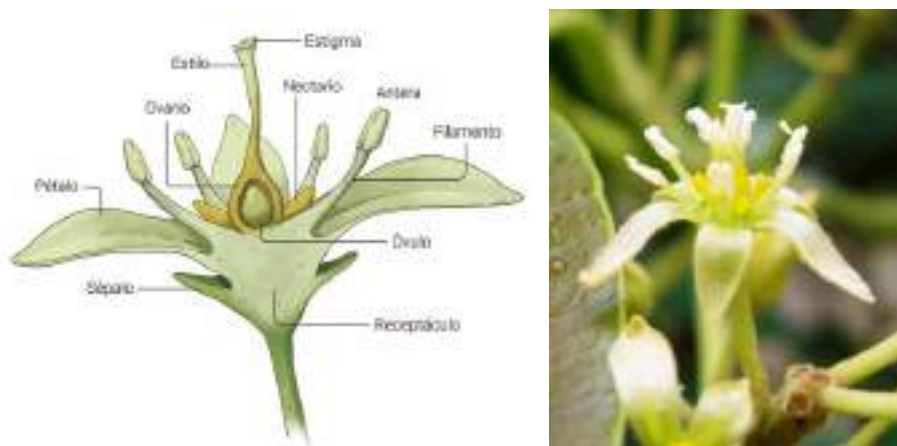
División Magnoliophyta: plantas con flores

De acuerdo con Takhtajan (2009), los rasgos característicos de la división Magnoliophyta (figura 1) son los siguientes:

1. Los óvulos se encuentran dentro de una cavidad más o menos cerrada, formada por uno o varios carpelos unidos o separados.
2. Los granos de polen no son depositados directamente sobre el micrófilo del óvulo, sino sobre la superficie del estigma, que no solo es capaz de recibir el polen, sino también de asistir en el desarrollo del tubo polínico.
3. Los gametofitos masculinos y femeninos están desprovistos de gametangios (anteridios y arquegonios) y son extremadamente simplificados y especializados.
4. Fusión triple: uno de los dos gametos masculinos se fusiona con la célula huevo (singamia), y el otro, con dos núcleos polares

libres o ya fusionados de la célula central del gametofito femenino; como resultado de la triple fusión, se forman un cigoto diploide y un núcleo primario triploide del endospermo. La triple fusión es un rasgo característico de las magnoliófitas, que se distinguen fuertemente de otras plantas.

Figura 1. Características de la flor de la división Magnoliophyta.



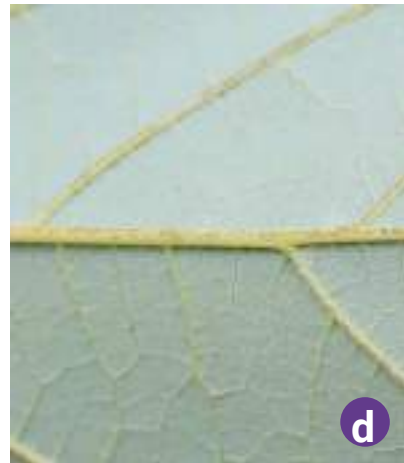
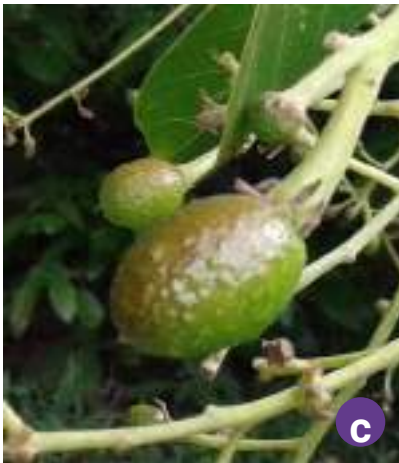
Fuente: Proyecto Biosfera (s.f.).

Foto: Alexander Rebolledo Roa

Familia Lauraceae

El aguacate pertenece a la familia de plantas Lauraceae (figura 2). Esta familia presenta árboles o arbustos en su mayoría de hoja perenne (de hoja caduca en las regiones templadas), a veces dioicas. La corteza y el follaje generalmente son aromáticos. Las hojas suelen ser alternas: opuestas o verticiladas, subopuestas o simples, y rara vez lobuladas.

Figura 2. Características de las plantas de la familia Lauraceae, especie *Persea americana*. a. Detalle de rama con inflorescencia indeterminada; b. Detalle de la flor en estado femenino, donde el pistilo se observa totalmente erguido; c. Detalle del fruto, con el cáliz persistente en el fruto; d. Detalle del lado abaxial de la hoja, con los nervios secundarios decurrentes sobre el nervio principal.



Fotos: Alexander Rebolledo Roa

Las flores, en general, son axilares y, con poca frecuencia, sub-terminales, dispuestas en inflorescencias cimosas o racimosas; además, son generalmente bisexuales, a veces unisexuales, actinomorfas. El perianto está formado por seis tépalos unidos, dispuestos en verticilos de tres. Los estambres (libres, definidos, dispuestos en verticilos de tres, con anteras erguidas, de dos a cuatro tecas y dehiscentes por valvas) pueden ser fértiles o parcialmente transformados en estaminodios. El gineceo es súpero, unilocular, uniovulado, de estilo simple, recto o curvado, y con estigma entero o lobulado.

El crecimiento del fruto presenta una curva sigmoidea simple (Robertson, 1971; Valmayor, 1964) y está dividido en tres fases, que incluyen el desarrollo del ovario, la formación de la semilla y el desarrollo y maduración del embrión.

El fruto es una baya o drupa, con una única semilla, muy variable en su tamaño (de 0,05 kg a 2 kg), forma (redondo, ovalado o periforme), cáscara (grosor, textura y color) y pulpa (tamaño, firmeza, etc.) (Scora et al., 2002). El crecimiento del fruto presenta una curva sigmoidea simple (Robertson, 1971; Valmayor, 1964) y está dividido en tres fases: la primera incluye el desarrollo del ovario y el cuajado inicial del fruto; en la segunda aún se presenta división celular, la formación de la semilla y el desarrollo temprano del embrión, y en la tercera se presenta la expansión celular y la maduración del embrión (Gillaspy et al., 1993).

En general, en aguacate se presenta una característica de crecimiento inusual, ya que la división celular continúa mientras el fruto se mantenga unido al árbol (Schroeder, 1953). En las primeras seis semanas, el crecimiento y desarrollo se caracteriza por presentar división celular muy rápida; posteriormente, se presenta elongación celular, que puede detenerse cuando el fruto ha alcanzado el 50 % de su tamaño final en madurez; después, el tamaño del fruto continúa en aumento, principalmente por división celular (Barmore, 1976; Cummings & Schroeder, 1942; Dixon et al., 2006).

Género *Persea*

Hay alrededor de cincuenta especies descritas de *Persea*. La mayoría de las especies de *Persea* se originaron en el Nuevo Mundo, pero *P. indica* al parecer se originó en las islas Canarias, Madeira y Azores. Algunas especies se originaron en el sudeste asiático. *Persea*, además, ha sido dividido aún en subgéneros que incluyen a *P. americana* —el aguacate comercial— y el subgénero *Eriodaphne*, un grupo de especies de las cuales la mayoría son inmunes a la pudrición de la raíz ocasionada por *Phytophthora cinnamomi*, pero desafortunadamente no son compatibles para injertar con aguacate (Shepherd & Bender, 2013).

En el subgénero *Persea*, tres especies han sido de interés para los productores de aguacate:

1. *Persea schiedeana*: el chinene (*Persea schiedeana* Nees.) es un árbol frutal nativo de México y Centroamérica que se distribuye hasta Colombia (Kopp, 1966). El contenido de ácidos grasos totales de los chinenes oscila entre el 24,7% y el 36%, valores que superan la concentración en aguacate de la raza antillana, que usualmente va del 4% al 7%, pero que son comparables con los de frutos de aguacate de las razas mexicana y guatemalteca o de híbridos entre ambas razas (Joaquín-Martínez et al., 2007). El fruto de *P. schiedeana* difiere del de *P. americana* en el color de la pulpa, pues el primero presenta una tonalidad *beige* o color crema (figura 3). También se lo conoce como aguacatea, chinini, chinín, aguacate de manteca o paga. El color de la cáscara de sus frutos puede ser verde, negro, café o morado. La pulpa es fibrosa o de textura similar a la del aguacate (Cruz-Castillo et al., 2007; Joaquín-Martínez et al., 2007). La morfología de los frutos de chinene en varias regiones de Veracruz es diversa en cuanto a longitud de la semilla, peso y diámetro distal. El patrón de crecimiento de los frutos de chinene corresponde al tipo simple sigmoidal (Cruz-Castillo et al., 2007). Esta especie es de interés, ya

que es uno de los padres de los portainjertos G755, un material con una mejor tolerancia a la enfermedad de la pudrición de la raíz.

Figura 3. Características de los frutos de *P. schiedeana*.



Fotos: Alejandro F. Barrientos-Priego

2. *Persea indica*: conocida como viñátigo, es una especie endémica de la Macaronesia presente en las islas Canarias, Madeira y Azores, por lo que el término “indica” no hace referencia a su lugar de procedencia. En Canarias está presente en las islas centrales y occidentales (Arechavaleta et al., 2010). La corteza lisa del tronco y de color gris bastante oscuro contrasta con el verde oscuro brillante del follaje. El árbol crece con un tronco recto que alcanza los 20 m de altura media, aunque puede tener hasta 30 m, y se utiliza como fuente de madera en su hábitat nativo. Las hojas son oblongas, glabras y de 6 cm a 13 cm de largo. Los frutos son apenas carnosos, crecen en sección longitudinal, hasta 2 cm, y se presentan en racimos. Los frutos inmaduros son verdes y se vuelven negros al madurar (figura 4). El follaje perennifolio y la fruta pequeña hacen de *P. indica* un árbol ornamental atractivo, además de que mejora el microclima durante todo el año (Schuch et al., 1992).

Figura 4. Características de hojas, flores y frutos de *P. indica*.



Foto: Juan Bibiloni

3. *Persea americana* (figura 5) es el aguacate comercial, que comprende tres razas: mexicana, guatemalteca y antillana. En regiones de América Central donde se encuentran las tres razas en la misma latitud, la raza antillana se adapta bien desde el nivel del mar hasta los 1.000 m s. n. m (tropical); la raza guatemalteca, de 1.000 a 2.000 m s. n. m (subtropical), y la mexicana, desde 1.500 hasta 3.000 m s. n. m (semitropical) (Lee, 1980). A continuación, se describen algunas de sus características (Bender, 2012, cap. 2; Bost, 2009):

- Raza mexicana [*Persea americana* Mill. var. *drymifolia* Blake (*Persea drymifolia* Schlecht. & Cham.)], originaria de las tierras altas de México. Los frutos de la raza mexicana tienen pieles finas y delicadas que se desgarran fácilmente cuando se transportan o se manipulan. El color de la piel de la fruta varía de verde oscuro a morado oscuro. Las hojas

tienen un olor característico a anís. Desde la floración hasta la madurez fisiológica, dura aproximadamente seis meses. Dentro de las variedades o cultivares de la raza mexicana, están las siguientes: Topa Topa, Mexicola, Duke y Mentone. Las semillas de la raza mexicana de aguacate han sido utilizadas en California como portainjertos desde el comienzo de la industria del aguacate. Los viveristas las prefieren por sus características, al ser semillas grandes y de crecimiento rápido para la producción de plántulas, y los productores han encontrado que dichas semillas suelen tener una mayor producción y consistencia como portainjertos que las que provienen de portainjertos guatemaltecos y antillanos. De las tres razas, la mexicana es la de mayor tolerancia al frío y a suelos calcáreos, condición que puede inducir clorosis en hojas por deficiencias de hierro. Por otro lado, la raza mexicana es la de menor tolerancia a una condición de salinidad en el suelo.

Por sus características agroecológicas, en Colombia no se encuentran variedades de esta raza cultivadas para producción de fruto con fines comerciales. Ha sido utilizada para la obtención de híbridos, como los cultivares Hass (un 85 % guatemalteco y un 15 % mexicano) y Fuerte. Dos de las principales características que le ha conferido la raza mexicana a la guatemalteca en estos híbridos son una mayor resistencia al frío y el adelanto en al menos medio año en la temporada de cosecha.

- Raza guatemalteca [*Persea nubigena* var. *guatemalensis* (L.) Wms.], originaria de las tierras altas de Guatemala. Sin olor a anís en las hojas, y con follaje joven, comúnmente rojizo, y frutos de pequeños a grandes, presenta un nivel intermedio de adaptación y tolerancia al suelo y el clima en comparación con la raza mexicana y americana. La piel del fruto es generalmente gruesa y de coriácea a leñosa, con un grosor de 6 mm. La semilla casi nunca se suelta en su cavidad. De la floración a la cosecha o a la madurez fisiológica pueden

durar quince meses. A esta raza pertenecen las variedades o cultivares Hass, Lamb-Hass, Hass Carmen, Reed, Edranol, Itzama, Nabal, Linda, Pinkerton y Mayapán.

- Raza antillana [*Persea americana* Mill. var. *americana* (*Persea gratissima* Gaertn.)], originaria de las tierras bajas centroamericanas, de donde fue llevada a las Antillas después de la conquista. Sin olor a anís en las hojas, es de fruto pequeño a grande, de piel coriácea, rara vez con más de 1,5 mm de grosor, y de semilla relativamente grande, a veces suelta en la cavidad locular. La pulpa es de textura acuosa, con menor contenido de aceite. Desde la floración hasta la madurez fisiológica del fruto tarda aproximadamente seis meses. Es la raza menos resistente a bajas temperaturas y humedad, pero la más tolerante a la salinidad del suelo. La forma del pedicelo presenta una configuración única, en forma de cabeza de clavo. A esta raza pertenecen las variedades Butler, Fuchs, Fucsia, Hulumanu, Lorena, Peterson, Pinelli, Pollock, Ruehle, Russell, Simmonds, Trapp, Villacampa y Waldin.

Figura 5. Frutos de aguacate de la variedad Hass de *P. americana*.



Foto: Alexander Rebolledo Roa

Especie *Persea americana* Miller

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es un árbol de hoja perenne nativo de las regiones tropicales y subtropicales de México, Guatemala y la costa del Pacífico de América Central.

El cultivo de aguacate se ha extendido rápidamente a muchas partes del mundo debido a su valor nutritivo, a la preferencia por la fruta en la alimentación y a usos cosméticos y medicinales.

El árbol alcanza una altura de entre 10 m y 15 m, para la raza mexicana, y hasta los 30 m para las razas guatemalteca y antillana (Scora et al., 2002). Sus hojas son alternas, de color verde oscuro y brillante en la superficie superior, y blanquecinas por el envés, con formas lanceoladas, elípticas, ovaladas u obovadas (Morton, 1987). El fruto tiene forma de pera y presenta un crecimiento continuo en el árbol, madurándose por completo después de que ha sido cosechado (Rural Agricultural Development Authority [RADA], 2013). La parte comestible de la fruta está conformada por una capa gruesa de pulpa de color amarillo verdoso, que contiene proporciones adecuadas tanto de aceite como de proteínas (Knight Jr., 2002). El cultivo de aguacate se ha extendido rápidamente a muchas partes del mundo, debido a su valor nutritivo y por la preferencia de la fruta en la alimentación y usos cosméticos y medicinales (Campbell & Malo, 1976; Morton, 1987; Verheij & Coronel, 1991).





CAPÍTULO II

Modelo fenológico



La fenología se define como el estudio de los eventos biológicos de las plantas que se presentan de manera periódica (por ejemplo: inducción floral, flujos de crecimiento vegetativo, floración, crecimiento del fruto, cuajado, abscisión, etc.), relacionados con el clima y, especialmente, con los cambios estacionales a los que se encuentran sometidas las plantas. En el subtrópico, por ejemplo, los cambios ambientales propios de cada estación (primavera, verano, otoño e invierno) determinan la transición en los ciclos de crecimiento vegetativo (formación de hojas) a reproductivo (formación de flores). En el trópico se sugiere que los periodos de floración están asociados con épocas secas, seguidas por periodos de lluvia (Southwick & Davenport, 1986; Wilkie et al., 2008; Wolstenholme & Whiley, 1990).

La descripción fenológica se puede convertir en una herramienta importante para desarrollar e implementar, de manera más ordenada, prácticas de manejo agronómico, así como para caracterizar el comportamiento de una especie en diferentes condiciones ambientales o diferentes condiciones experimentales. Para el aguacate, se han propuesto distintas escalas fenológicas que, si bien coinciden en la descripción de algunos estados tipo, presentan variaciones en la descripción detallada de estados intermedios y en la cobertura de las fases fenológicas asociadas al crecimiento vegetativo y reproductivo, desde yema en latencia, hasta la fase de maduración del fruto (Alcaraz et al., 2013; Aubert, 1972; Cabezas et al., 2003; Ish-Am & Eisikowitch, 1991; Salazar-García et al., 1998).

Escala fenológica con subfases del proceso dicogámico de la flor, propuesta por Cabezas et al. (2003)

La aplicación de una u otra escala dentro de esquemas de investigación dependerá del nivel de precisión que le aporte cada una, en función del objetivo con el que cada autor defina su alcance. Si lo que se busca es enfocar estudios de biología floral tendientes a caracterizar aspectos como el momento de antesis, la longevidad floral, la disposición espacial de estambres y el estigma, posiblemente se encuentre un mayor soporte en la escala de Cabezas et al. (2003), ya que esta considera con mayor precisión las fases femenina y masculina de la flor, desde su apertura individual hasta que vuelve a cerrar (figura 6).

Figura 6. Fases femenina y masculina de la flor de aguacate con definición de subfases.

Estado A

Yema en
latencia



Estado B

Yema
hinchada



Estado C

Aparece la
inflorescencia



Estado D₁

Botones
florales: eje
secundario
visible



Estado D₂

Botones
florales: eje
terciario visible



Estado E

Botón amarillo



Subestado F1f

Flor abriendo
en fase
femenina



Subestado F2f

Flor abierta en
fase femenina



Subestado F3f

Flor cerrando
en fase
femenina



Subestado F1c

Flor cerrada



Subestado F1m

Flor abriendo
en fase
masculina



Subestado F2m

Flor abierta en
fase masculina,
con anteras no
dehiscidas



Subestado F3m

Flor abierta en
fase masculina,
con primera
dehiscencia



Subestado F4m

Flor abierta
en fase
masculina, con
dehiscencia
completa



Subestado F5m

Flor cerrando
en fase
masculina

**Subestado F2c**

Flor cerrada de
forma definitiva



Fuente: Elaboración propia con base en Cabezas et al. (2003).

Fotos: Alexander Rebolledo Roa

Además de los diez subestados morfológicos de la floración, que resumen el proceso dicógamo de la flor, esta escala describe la secuencia progresiva desde la yema latente hasta la definición del fruto tierno, resumido en diez estados tipo.

En estudios previos desarrollados por Romero Sánchez (2012) se caracterizaron los estados fenológicos de aguacate de la variedad Lorena en las condiciones del departamento de Tolima. La variedad Lorena pertenece a la raza antillana y se desarrolla en zonas de bosque húmedo tropical y bosque húmedo premontano. Su rango de adaptación está entre 0 y 1.500 m s. n. m., a temperaturas entre 18°C y 26°C, con alta humedad relativa. Presenta un tiempo aproximado de floración a cosecha de 5 a 8 meses, y el peso del fruto está entre 250 g y 1.000 g (Bernal & Díaz, 2008; Scora et al., 2002).

En estas condiciones de desarrollo, se confirma la homologación de estados descritos en la variedad Lorena con los reportados para aguacate Hass por Cabezas et al. (2003). El estado A corresponde a yemas en latencia cerradas, de forma aguda, que pueden ser terminales o axilares (figura 7a). El estado B corresponde a yema hinchada y redondeada, con brácteas visibles que protegen la inflorescencia (figura 7b). En el estado C, los botones florales comienzan a ser visibles entre las brácteas de la inflorescencia (figura 7c). Los estados D₁ y D₂ describen la elongación de los ejes secundarios y terciarios, respectivamente (figuras 7d₁ y 7d₂), primero con botones florales diferenciados pero agrupados, y posteriormente separados con racimos diferenciados en la panícula. En el estado E, previo a la apertura floral, los ejes de la inflorescencia se encuentran totalmente expandidos, y las flores, diferenciadas con tépalos visibles (figura 7e).

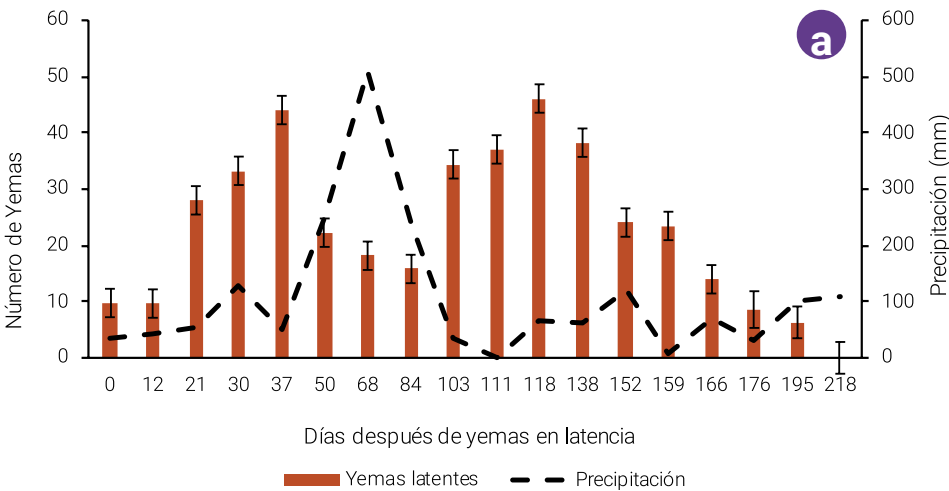
Figura 7. Estados fenológicos del desarrollo reproductivo de la variedad Lorena bajo las condiciones de San Sebastián de Mariquita (Tolima). a. Yema en latencia; b. Yema hinchada; c. Aparece la inflorescencia; d₁. Botones florales con eje secundario visible; d₂. Botones florales con eje terciario visible; e. Botón amarillo.

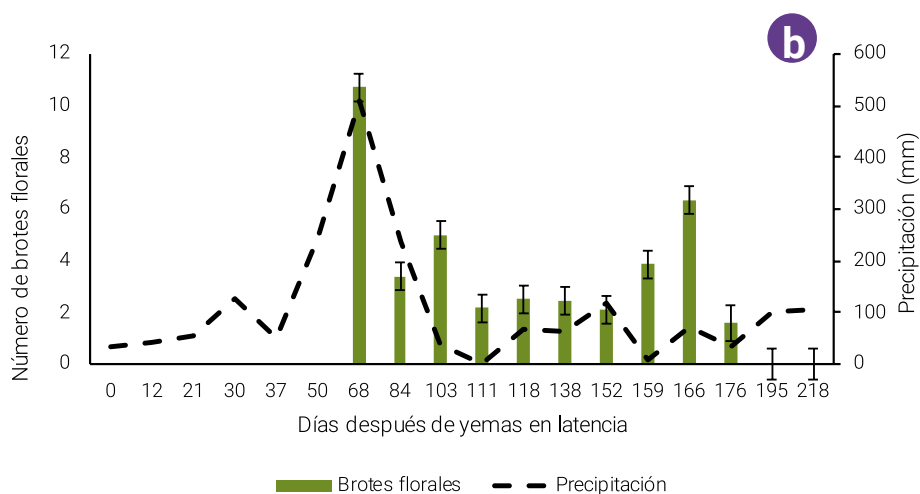


Fotos: Ronal Arturo Burbano

En estas condiciones de estudio, se logró establecer una posible relación entre el patrón de distribución de lluvias y los eventos que marcan la transición entre la yema en latencia (estado A) y su diferenciación en yema floral. La aparición de las yemas en latencia (estado A) aumentó hasta los 37 días después del inicio de brotación (DDIB), cuando se presentó el primer pico de máxima aparición, con 43 yemas en latencia/rama, periodo que coincidió con una baja precipitación, de 9 mm/día. La emisión de yemas en latencia disminuyó drásticamente hasta los 84 DDIB, cuando la precipitación diaria aumentó a 31,8 mm/día, alcanzando un máximo de 509,3 mm entre los puntos de muestreo (figura 8a). Posterior a este evento, a partir de los 68 DDIB se presentó la diferenciación de las flores en las panículas y la elongación de los ejes secundarios y terciarios (estado D) (figura 8b). Con el desarrollo de la inflorescencia, se presentó un incremento en el nivel de precipitación, lo que coincide con los resultados reportados por Whiley (1990), quien indica que los requerimientos de agua aumentan sustancialmente durante la floración debido a la formación de nuevas estructuras y a un incremento en el área susceptible de perder agua.

Figura 8. Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de la variedad Lorena, en función de la precipitación, en las condiciones de San Sebastián de Mariquita (Tolima). a. Yemas latentes; b. Brotes florales.





Fuente: Elaboración propia con base en Cabezas et al. (2003).

Escala fenológica del desarrollo floral propuesta por Salazar-García et al. (1998)

La escala propuesta por Salazar-García et al. (1998) (figura 9) plantea la descripción macroscópica y microscópica de once estados, desde yema en latencia, hasta la apertura floral (antesis). Esta escala relaciona el aspecto externo de las yemas con el grado de desarrollo del meristemo floral. Estos autores aportan la descripción de los cambios anatómicos que marcan la transición de la yema en latencia hasta el crecimiento reproductivo, y caracterizan al estado 4 como el que determina irreversiblemente la floración. En condiciones tropicales, donde existen pocos antecedentes sobre los factores ambientales asociados con los procesos de inducción floral, esta escala representa una herramienta importante para profundizar en el conocimiento del desarrollo fenológico del aguacate en las distintas zonas productoras del territorio colombiano.

Figura 9. Características macroscópicas del desarrollo de la inflorescencia.

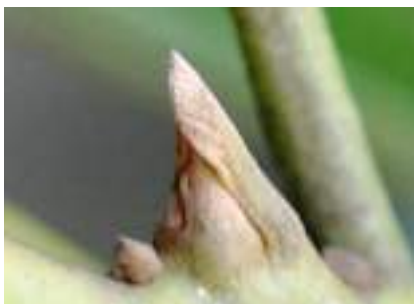
Estado 1

Yema cubierta por las hojas no expandidas del brote



Estado 2

Yema cubierta por dos hojas expandidas y maduras



Estado 3

Senescencia parcial de las escamas de la yema



Estado 4

Brácteas de la inflorescencia expandidas hacia todos los extremos del brote



Estado 5

Incremento en las dimensiones del brote.
Escamas separadas



Estado 6

Las brácteas encierran la inflorescencia



Estado 7

Apertura de las brácteas de la inflorescencia; la inflorescencia comienza a emerger



Estado 8

Elongación de ejes secundarios (estado de coliflor). Los ejes terciarios aún están cubiertos por brácteas. Se presentan pequeñas flores cerradas



Estado 9

Elongación del eje terciario. Brote vegetativo visible en el ápice de la inflorescencia

**Estado 10**

Flores completamente diferenciadas, pero cerradas

**Estado 11**

Flores en antesis. Brotación de yemas vegetativas en el ápice de inflorescencias indeterminadas. Inicio del flujo vegetativo de primavera



Fuente: Elaboración propia con base en Salazar-García et al. (1998).

Fotos: Alexander Rebolledo Roa

Con base en esta escala, se caracterizaron los estados fenológicos tipo de aguacate Hass en dos zonas productoras de Colombia: Rio-negro (Antioquia) y Morales (Cauca). Además, se relacionan los estados principales que determinan la transición de yema vegetativa a brote reproductivo, con el fin de establecer una posible asociación

entre los periodos secos y los de máxima precipitación. Del mismo modo, se relaciona el estado 8, o estado de coliflor, referenciado por diversos autores (Lovatt, 2010; Salazar-García et al., 1998) como el de mayor sensibilidad a la aplicación exógena de reguladores de crecimiento o fertilización foliar, ya que los ejes secundarios y terciarios aún se encuentran en proceso de crecimiento, y estos últimos con presencia de pequeñas flores cerradas, una en posición terminal y dos laterales.

De acuerdo con Salazar-García et al. (1998), la transición de la fase vegetativa a la reproductiva en muchas especies está asociada con los procesos de división celular presentes en la región aplanada del meristemo apical, que puede dar origen a la formación de hojas o flores. Si prevalecen condiciones ambientales que promueven el crecimiento vegetativo, el meristemo del eje primario conduce a la formación del nuevo primordio foliar. Sin embargo, en condiciones óptimas para la floración (estrés hídrico o bajas temperaturas), a partir de los meristemos laterales se estimula la actividad de división celular para originar las estructuras características de la inflorescencia. De acuerdo con estos autores, cualquier estrategia enfocada en manipular la iniciación de la inflorescencia debe realizarse antes del estado 4, cuando se presenta la transición del crecimiento vegetativo al reproductivo.

Estados fenológicos tipo en Rionegro (Antioquia)

En las condiciones de Rionegro, se caracterizaron los estados fenológicos del desarrollo floral en 144 yemas distribuidas en 36 árboles de aguacate Hass, y se monitorearon los registros climáticos (temperatura, precipitación, humedad relativa y brillo solar), con una estación climática portátil WatchDog instalada en la localidad del estudio, a una altura de 2.172 m s. n. m. Además, con base en los registros de la serie climática de la estación principal del Ideam del Centro de Investigación La Selva de AGROSAVIA,



ubicada en las coordenadas 6° 08' de latitud norte y 75° 25' de longitud oeste, se realizó la caracterización climática de la zona de estudio. En ella, se presenta una precipitación media multianual de 1.990 mm/año; la precipitación más baja se obtuvo en el mes de enero, con un valor promedio multianual de 60 mm. Los registros indican que la precipitación presenta un comportamiento bimodal, con dos temporadas de lluvia y de sequía distribuidas de la siguiente forma:

- Periodos de lluvias moderadas: junio, julio y agosto
- Periodos de lluvias intensas: abril y mayo; septiembre, octubre y noviembre
- Periodos moderadamente secos: marzo y diciembre
- Periodos secos: enero y febrero

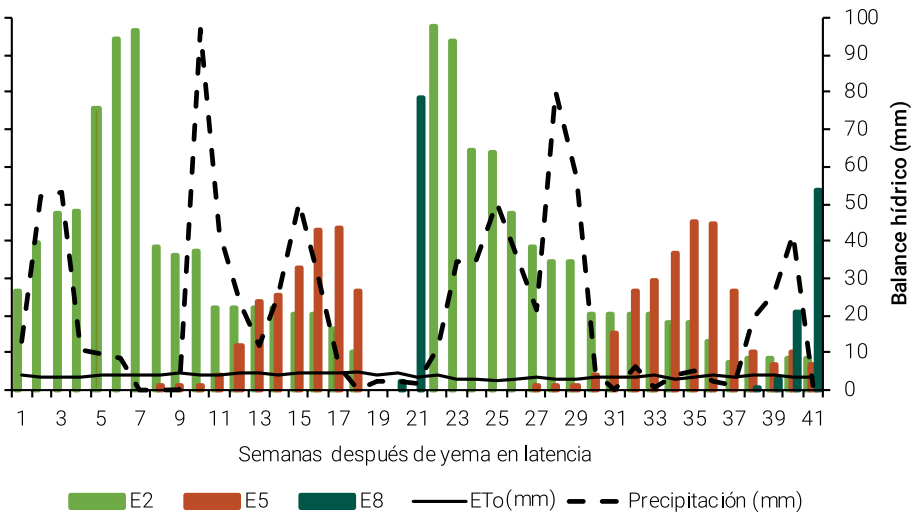
En relación con la temperatura, esta permanece casi constante, con una media de 17,1 °C, una máxima de 22 °C y una mínima de 12 °C. La humedad relativa tiene un comportamiento similar a la precipitación, siendo mayor en los meses de lluvia y disminuyendo en los meses secos, con un promedio anual del 76,9%. El brillo solar presenta un comportamiento inverso a la precipitación y la humedad relativa, pues disminuye en los meses de mayor precipitación y aumenta en los meses de sequía, con un promedio anual de 5 horas/día.

Aunque la zona se caracteriza por un balance hídrico anual positivo, con una precipitación promedio anual de 1.990 mm y una evaporación anual de 1.210 mm, el patrón de distribución de lluvias presenta meses con déficit hídrico: diciembre, enero y febrero.

En estas condiciones, se registraron dos flujos de crecimiento enfocados en la formación de brotes reproductivos. El estado 2, con yemas que aún se encuentran en latencia, presentó una mayor frecuencia entre las semanas 5 y 7, y la segunda lo presentó en las semanas

22 y 23 (figura 10). El primer periodo de mayor frecuencia de la yema en latencia coincide con un periodo de baja precipitación y un balance hídrico negativo, requerido como factor de estrés para estimular la transición de la yema en latencia a yema reproductiva. Pero este comportamiento no es consistente con lo observado en el segundo periodo de mayor frecuencia o estado predominante (yema en latencia), ya que se presenta un balance hídrico positivo, contrario al factor de estrés requerido como inductor de la floración.

Figura 10. Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de aguacate en la localidad de Rionegro (Antioquia).



Fuente: Elaboración propia con base en Salazar-García et al. (1998).

El estado 5, que representa la formación de brotes reproductivos, se presentó entre las semanas 15-17 y 35-37, después de la yema en reposo (figura 10). El primer periodo de mayor frecuencia de este estado coincide con un periodo de precipitación que alcanza los 50 mm. Para el segundo periodo, se registra baja precipitación, con un balance hídrico negativo, que no exhibe relación con los cambios asociados a esta fase fenológica. Las máximas frecuencias para el estado 8 se presentan en las semanas 21 y 41 (figura 10).

Estados fenológicos tipo en Morales (Cauca)

Además de Rionegro, también se caracterizaron estados fenológicos y se tomaron registros climáticos en la localidad de Morales, a una altura de 1.600 m.s.n.m., ubicada en un piso térmico altitudinal de altiplanicie templado muy húmedo, de acuerdo con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2009). Los registros para el análisis climático de la zona fueron tomados de la serie climática de la estación principal La Trinidad, perteneciente al Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) y ubicada en el municipio de Piendamó, a 1.671 m.s.n.m., geográficamente localizada en las coordenadas 2° 45' de latitud norte y 76° 35' de longitud oeste (Cenicafé, 2015).

La precipitación media multianual es de 1.800 mm/año; el mes con la precipitación más baja es septiembre, con un valor promedio multianual de 74,5 mm. El patrón de distribución de las lluvias denota un régimen bimodal, con dos temporadas de lluvia y de sequía, que se describen a continuación:

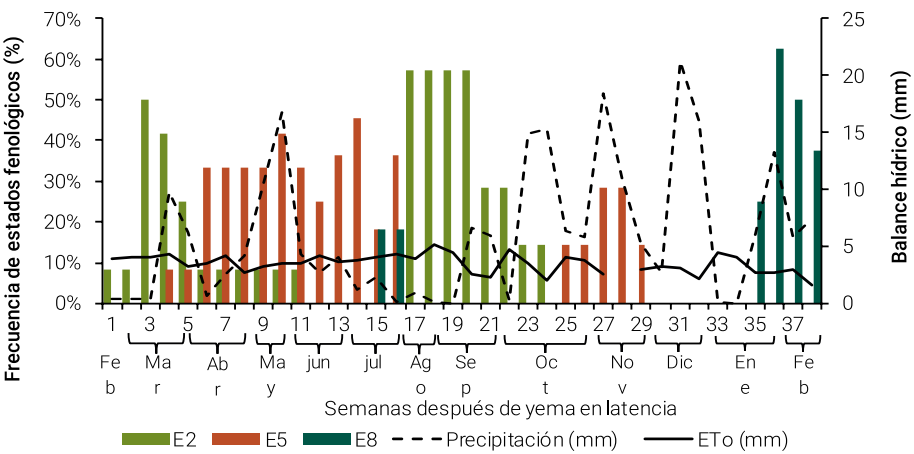
- Periodos de lluvias moderadas: febrero, marzo y segunda mitad de septiembre
- Periodos de lluvias intensas: abril, mayo, octubre y noviembre
- Periodos moderadamente secos: junio, diciembre y enero
- Periodos secos: julio, agosto y primera mitad de septiembre

La temperatura presenta un comportamiento constante casi lineal, con una media de 19°C, una máxima de 24,3°C y una mínima de 15°C. La humedad relativa oscila entre el 74% y el 84%, con una tendencia similar a la precipitación, siendo mayor en los meses de lluvia (abril, mayo, octubre y noviembre) y disminuyendo en los meses secos (julio, agosto y primera mitad de septiembre). El brillo solar se encuentra entre 3,1 h y 5,1 h, con un promedio anual de 4,1 horas/día, y presenta un comportamiento inverso a la precipitación

y la humedad relativa, disminuyendo en los meses de mayor precipitación y aumentando en los meses de sequía. En esta localidad también se presenta un balance hídrico anual positivo, siendo la precipitación promedio anual de 1.800 mm y la evaporación anual de 1.150 mm. Las lluvias no se distribuyen uniformemente a lo largo del año, con meses en los que es necesario aplicar riego, por presentar un balance hídrico negativo (junio, julio, agosto y septiembre).

En esta localidad también se registraron dos flujos de crecimiento reproductivo, en los que el estado 2 presenta una posible asociación con periodos de baja precipitación y un balance hídrico negativo. Los periodos de déficit hídrico se presentaron entre las semanas 1-3 y 14-24, y coinciden con los mayores porcentajes de frecuencia del estado 2 o de yema en latencia (figura 11). Cuando se presenta un aumento en las precipitaciones, con aproximadamente 20 mm, las yemas ya se encuentran diferenciadas al estado 5, caracterizado por un incremento en las dimensiones del brote y con una mayor frecuencia entre las semanas 10-14 y 32-33. El estado 8 se presenta en las semanas 15-16 y 35-38 (figura 11).

Figura 11. Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de aguacate en la localidad de Morales (Cauca).



Fuente: Elaboración propia con base en Salazar-García et al. (1998).

Escala fenológica del desarrollo reproductivo propuesta por Alcaraz et al. (2013)

Alcaraz et al. (2013) proponen, para la variedad Hass, una escala fenológica basada en la codificación Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie (BBCH), que considera siete de los diez estados de crecimiento principales, iniciando con la yema vegetativa en latencia (estado 010) y finalizando cuando el fruto alcanza su tamaño final y está listo para la cosecha comercial (estado 719). El fruto de aguacate no madura hasta después de ser cosechado, razón por la cual el estado 8 de maduración del fruto no se incluye en esta escala. La escala propuesta por estos investigadores considera la descripción del crecimiento vegetativo y del crecimiento reproductivo, en donde se incluye, además de los estados fenológicos del desarrollo floral, la descripción de los estados de desarrollo del fruto desde postantesis hasta cosecha (figura 12).

En las condiciones del sur de España (Málaga), en las que fue descrita esta escala, se presentan dos flujos de crecimiento vegetativo: el primero, en la estación primaveral, y el segundo, en verano. Las yemas florales se desarrollan en otoño, y la floración tiene lugar en primavera. La duración del periodo de floración depende del cultivar y también de las condiciones ambientales, principalmente la temperatura (Sedgley & Annells, 1981). La transición de la yema en latencia a crecimiento reproductivo se presenta durante el otoño y el invierno (octubre/febrero), y la brotación y emergencia de la inflorescencia ocurre en primavera (marzo/abril). Las yemas que se diferencian en crecimiento reproductivo se observan esféricas durante su desarrollo, mientras que las yemas vegetativas se mantienen elongadas. En las inflorescencias indeterminadas, el desarrollo del brote terminal vegetativo se presenta durante las últimas etapas del desarrollo de la inflorescencia (517-519) (Alcaraz et al., 2013).

Figura 12. Descripción de los estados fenológicos para aguacate Hass según la codificación BBCH.

**Estado 010.
Yema vegetativa
latente**

Las yemas vegetativas están cerradas y cubiertas por escamas de color verde-marrón



**Estado 019.
Finaliza el
rompimiento de la
yema**

Ápices de la hoja aproximadamente 3 mm por encima de las escamas del brote



**Estado 110.
Primeras hojas que
se separan**

Hojas desplegadas con los ápices foliares 10 mm por encima de las escamas



**Estado 115.
Hojas expandidas**

La primera hoja del flujo vegetativo alcanza el 50 % de su tamaño final. Pecíolos de las hojas extendidos



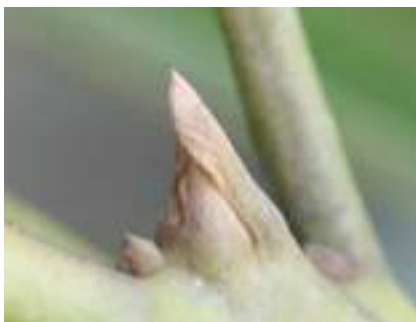
**Estado 119/315.
50 % de la longitud
final del brote**

Todas las hojas
expandidas



**Estado 510.
Yemas reproductivas
latentes**

Yemas cubiertas
con escamas de
color verde-pardo
sin signos de
crecimiento



**Estado 511.
El brote reproductivo
comienza a
hincharse**

Las escamas
de color marrón
comienzan a
separarse y la yema
se ve visiblemente
hinchada



**Estado 512.
Finalización del
hinchamiento del
brote**

Las escamas del
brote se encuentran
completamente
separadas. Sección
interna del brote de
color verde claro
visible entre las
escamas



**Estado 513.
Rompimiento del
brote reproductivo**

La inflorescencia se
hace visible entre el
eje de las escamas
del brote



**Estado 514.
Inflorescencia
compuesta y
separada**

La inflorescencia
individual se
encuentra separada
y comienza la
elongación de los
ejes



**Estado 515.
50 % de la
longitud final de la
inflorescencia**

Ejes secundarios
elongados y ejes
terciarios aún
cubiertos por
brácteas, flores
pequeñas y cerradas



**Estado 517/110.
70 % de la
longitud final de la
inflorescencia**

Ejes terciarios
elongados, flores
individuales
separadas y hojas
visibles en periodo
de expansión sobre
inflorescencias
indeterminadas



Estado 518/113.
Inflorescencia
80 % de la
longitud final de la
inflorescencia



Estado 610.
Primeras flores
abiertas
Estado femenino



Estado 610.
Primeras flores
abiertas
Estado masculino



Estado 617.
Flores abiertas
70 % de las flores
abiertas



**Estado 711.
Crecimiento inicial
del ovario**

Crecimiento posterior
a la fertilización y
cuajado del fruto



**Estado 712.
Primer periodo de
máxima abscisión de
frutos**

Ovarios verdes y
rodeados por sépalos
secos y frutos con
diámetro entre 5 y
10 mm



**Estado 715.
50 % del tamaño
final del fruto**

Segundo periodo de
máxima abscisión de
frutos



**Estado 719.
90 % o más del
tamaño final del
fruto**

Frutos listos para
cosecha comercial



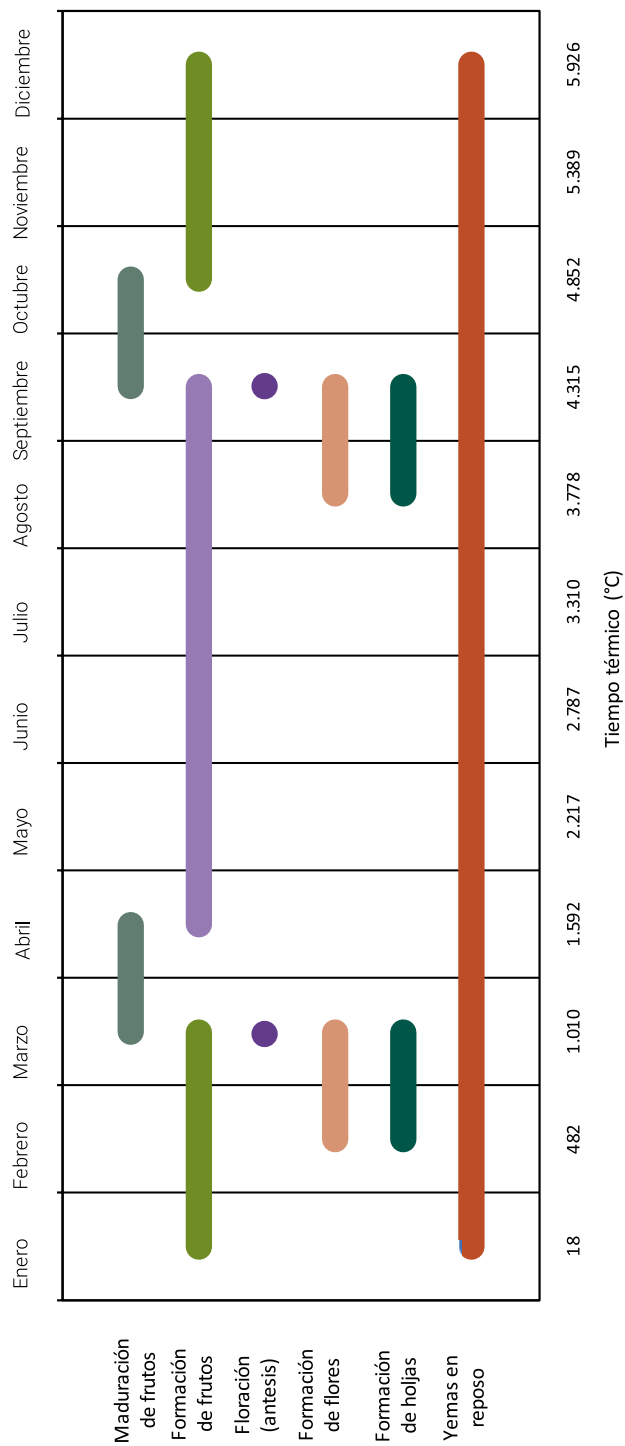
Fuente: Elaboración propia con base en Alcaraz et al. (2013).

Fotos: Alexander Rebolledo Roa

En los municipios de Morales y El Tambo (Cauca), se llevó a cabo el seguimiento de los estados fenológicos desde yema en latencia hasta cosecha, tomando como referencia la escala propuesta por Alcaraz et al. (2013). Se registraron dos periodos de floración, caracterizados como principal e intermedio. En todas las localidades se registra la presencia de yemas en latencia a lo largo del año, formación de brotes vegetativos y florales en los meses de enero-marzo y julio-septiembre, y el periodo de antesis en los meses de marzo, para la floración principal, y septiembre, para la intermedia. En todas las fincas se registran dos periodos de formación de fruto: la primera, entre los meses de abril y septiembre, que corresponde a la floración principal, y la segunda, entre octubre y marzo del siguiente año, que corresponde a la floración intermedia. El periodo de maduración del fruto se presentó entre septiembre y octubre en la floración principal, y entre marzo y abril en la floración intermedia (figura 13).



Figura 13. Calendario fenológico y tiempo térmico en las condiciones del Cauca.



Fuente: Elaboración propia con base en Alcaraz et al. (2013).



CAPÍTULO III

Función de los nutrientes en los procesos de crecimiento y desarrollo del fruto



La composición química típica de la materia seca de una hoja puede ser: 60 % de carbohidratos, 25 % de proteínas, 5 % de lípidos y 10 % de minerales. En general, se acepta que las plantas requieren 16 nutrientes esenciales que constituyen la base para la síntesis de estos componentes: hidrógeno, oxígeno y carbono (derivado del dióxido de carbono del aire y del agua), más 13 nutrientes minerales, la mayoría de los cuales son tomados del suelo. Los tres primeros constituyen los insumos básicos para la síntesis de carbohidratos durante la fotosíntesis y son elementos constitutivos de biomoléculas orgánicas como los lípidos. Los 13 elementos minerales se dividen en nutrientes primarios, secundarios y micronutrientes: los nutrientes primarios son nitrógeno, fósforo y potasio; los secundarios, calcio, magnesio y azufre, y los micronutrientes, zinc, hierro, manganeso, cobre, boro, molibdeno y cloro. El nitrógeno es la base para la síntesis de aminoácidos, que a su vez son las unidades estructurales de las proteínas. Si solo uno de estos elementos es deficiente, con el tiempo tal deficiencia afecta negativamente el crecimiento y rendimiento del cultivo.

Con respecto a los tejidos que componen el fruto, cada uno representa un aporte al contenido total de materia seca. En un estudio llevado a cabo por Salazar-García et al. (2011), se determinó el peso seco de cada tejido por separado en frutos de aguacate Hass, y se obtuvo la siguiente distribución:

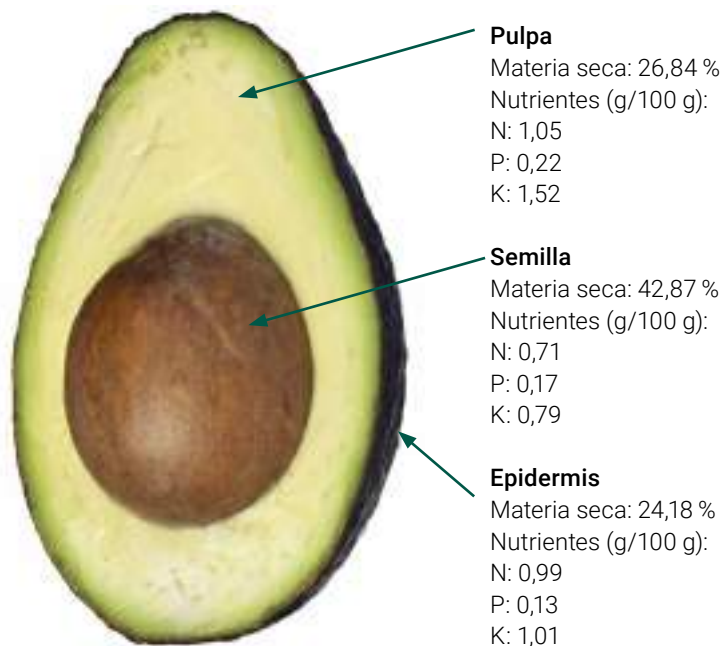
- Peso total del fruto: 57,56 g
- Semilla: 12,33 g
- Testa: 0,33 g
- Pulpa: 38,44 g
- Epidermis: 6,46 g

Con base en estos valores, la pulpa representa el mayor porcentaje del peso seco total del fruto (66,8%), pero, en términos de materia seca, la semilla representa un aporte del 42,87%, mientras que la pulpa tan solo representa el 26,84%. Considerando estos reportes, se esquematizó la distribución porcentual de materia seca en los distintos tejidos del fruto y la composición mineral de los elementos primarios.

En aguacate, la floración, el cuajado de frutos y la caída de junio son etapas fenológicas claves para dirigir estrategias que permitan retener en la planta el mayor número de frutos posible.

En la fenología de todas las plantas hay etapas que tienen una mayor demanda de algunos nutrientes que otras. En cultivos perennes como el aguacate, la floración, el cuajado de frutos (que incluye la caída masiva de flores y frutos recién cuajados) y la caída de junio (que se produce cuando se presenta en simultáneo el crecimiento exponencial del fruto, el crecimiento vegetativo en inflorescencias indeterminadas y el crecimiento de la raíz [Hamid et al., 1988]) son etapas fenológicas de alta demanda de nutrientes. Estas etapas son claves para dirigir estrategias que permitan retener en la planta el mayor número de frutos posible, ya que esto se va a reflejar en un mayor rendimiento. En la figura 14 se describe la participación de cada elemento, de acuerdo con los reportes bibliográficos.

Figura 14. Esquema de distribución de materia seca en tejidos del fruto de aguacate y composición mineral de elementos primarios.



Fuente: Elaboración propia con base en Rosecrance et al. (2012).

Nitrógeno

El nitrógeno es absorbido por las raíces de la mayoría de las plantas en forma de nitrato (NO_3^-), y muy poco en forma de amonio (NH_4^+). El nitrato es de movilidad alta en el suelo y se mueve fácilmente con el agua hacia las raíces, donde se produce la captación; además, puede ser absorbido rápidamente por las plantas, pero también puede ser lixiviado con facilidad en la zona radicular si se presenta una condición de exceso de humedad en el suelo. En contraste, la forma amoniacal se une a las superficies de las partículas del suelo y no lo hace mover fácilmente a las raíces de las plantas, hasta que es convertido en nitrato por bacterias del suelo en un proceso llamado “nitrificación”. Este proceso es dependiente de la temperatura: por ejemplo, a 24°C , la nitrificación se puede completar en

una-dos semanas, mientras que a 10°C puede tardar 12 semanas o más (Bender & Faber, 1999). La absorción de N por las plantas en forma de NO_3^- ocurre principalmente mediante flujo de masas (Matimati et al., 2014), debido a su forma aniónica, la cual no le permite adherirse a los minerales arcillosos, y, por lo tanto, permanece en la solución del suelo (Guerrero-Polanco et al., 2018).

El nitrato actúa como un fertilizante de liberación rápida para su uso inmediato por la planta, y los fertilizantes amoniacales son utilizados como fertilizantes de liberación lenta, disponibles para proveer a la planta durante un periodo más largo. Muchos productores utilizan una combinación de estas dos formas de nitrógeno para obtener las ventajas de ambos. Es bien conocido que la nitrificación del N en fertilizantes nitrogenados que contienen amonio (NH_4^+) puede generar acidez en el suelo, debido a la liberación de iones de hidrógeno (H^+). Por ejemplo, Adams (1984) menciona que cada mol de N proveniente del sulfato de amonio (SA) produce 4 moles de H^+ , mientras que cada mol de N proveniente de la urea o del nitrato de amonio (NA) produce solamente 2 moles de H^+ . Esto sugiere que el SA es dos veces más acidificante que el NA o la urea (Chien et al., 2008).

En las localidades de Rionegro (Antioquia), Herveo (Tolima) y Morales (Cauca), en donde se enfocó el plan de fertilización basado en el IBN en cultivos de aguacate Hass, se encuentra como característica común la presencia de suelos con pH fuertemente ácidos (5,1-5,5) y con contenidos altos de materia orgánica (18,71 %). Para que se dé la conversión del ion amonio (NH_4^+) en nitrato (NO_3^-), de manera general deben existir las siguientes condiciones (Sahrawat, 2008):

1. Presencia de bacterias nitrificantes.
2. Temperatura del suelo $>20^\circ\text{C}$.
3. pH del suelo entre 5,5 y 7,5.
4. Suficiente disponibilidad de humedad y oxígeno en el suelo.

En las zonas de estudio evaluadas (Rionegro, Herveo y Morales), la condición ácida del suelo puede reducir la presencia y actividad de bacterias nitrificantes, pero al mismo tiempo la presencia de altos contenidos de materia orgánica (MO) puede asegurar una alta disponibilidad de N, aunque con una posible liberación más lenta. En el suelo se registraron contenidos de MO del 11,5 % para Herveo, el 17,1 % para Morales y el 19,8 % para Rionegro. Los niveles de N en hojas, verificados con el análisis de tejidos, confirmaron contenidos normales del elemento en la planta (2,25%), de acuerdo con los valores propuestos por Embleton y Jones (1972) y verificados por Lovatt (2001) para aguacate Hass. Por otra parte, se verificaron contenidos de N en el fruto, con valores de extracción por hectárea de 54,6 kg de N para la localidad de Rionegro, 50,8 kg para Morales y 55,7 kg para Herveo, para un rendimiento de 20 t/ha, que se encuentra dentro de los rangos de extracción de N reportados por varios autores (Salazar-García & Lazcano-Ferrat, 2001; Maldonado-Torres et al., 2007).

Gardiazábal et al. (2007) llevaron a cabo un estudio comparativo en aguacate Hass para determinar si la fertilización completa, que incluye los nutrientes N, P, K, Ca, Mg, B y Zn, aplicados como fertilizantes solubles, tiene mejores resultados sobre el crecimiento, la producción, el calibre de frutas o la poscosecha que un programa de fertilización tradicional, que incluye N, B y Zn. Estos autores encontraron una sostenida y mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo con la fertilización completa, que no sigue la misma tendencia en el contenido de nutrientes verificados a nivel foliar. El N foliar, durante los cuatros años de evaluación (2002-2004), no permite correlacionar una posible participación en función de la cosecha, ya que para los años 2002 y 2003 se presentaron niveles de N entre el 1,7 % y el 1,9 %, pero los valores de cosecha para 2002 fueron del orden de 60-70 kg de fruta por árbol, mientras que para 2003 fueron del orden de 14-30 kg de fruta por árbol.

El fruto de aguacate no solo es rico en grasa y aceite, sino que también contiene una alta concentración de proteína en relación

con otras frutas. Por lo tanto, el fruto de aguacate es un fuerte sumidero de carbono y nitrógeno. Cuando el desarrollo del fruto y el crecimiento vegetativo ocurren al mismo tiempo, con lo que entran en competencia, se debe considerar la distribución, el transporte y la asignación de nitrógeno hacia ambos tipos de estructuras en el momento de orientar los planes de fertilización. La cantidad promedio de proteína en frutos de aguacate Hass en California es de 5,0 g a 7,5 g por fruto de aguacate, lo que representa más de 1 g de nitrógeno por fruta fresca (Lovatt, 1995). En contraste con el fruto de aguacate, las hojas presentan en promedio solo 4 mg de proteína por gramo de peso fresco, un valor 7,5 veces menor que el encontrado en hojas de cítricos.

Lovatt (2001) evaluó, en condiciones de California, el efecto de duplicar la dosis de N (56 kg/ha) sobre el rendimiento, en función de la fenología del árbol de aguacate Hass. Los momentos de aplicación incluidos corresponden con las siguientes etapas fenológicas:

- Fin del crecimiento del brote vegetativo: brote apical con cuatro o más meristemos de ejes secundarios de la inflorescencia (noviembre).
- Hinchamiento temprano de la yema: se forma el número total de ejes secundarios de las inflorescencias (10); los ejes que se desarrollaron primero comienzan a elongarse y a iniciar la formación de los órganos de la flor (enero).
- Hinchamiento de la yema: los ejes secundarios jóvenes de la inflorescencia están elongados; los ejes secundarios, que se desarrollaron primero, presentan flores completamente formadas con el gineceo en estado temprano de desarrollo (febrero).
- Antesis a cuajado inicial del fruto e iniciación del flujo vegetativo de primavera en el ápice de inflorescencias indeterminadas (abril).

- Final del estado 1 de desarrollo del fruto (fase inicial de división celular) e inicio del periodo de caída de junio (junio).
- Inicio del estado 2 de desarrollo del fruto (incremento rápido en tamaño) y final del periodo de caída de junio (julio).

El rendimiento acumulado por árbol durante los cuatro años del experimento indica que el N adicional aplicado en abril o noviembre produjo un mayor rendimiento de aguacate Hass, del 31 % y el 39 %, respectivamente, en comparación con los árboles control, que no recibieron el suplemento de N. Los rendimientos obtenidos con el tratamiento aplicado en noviembre fueron significativamente mejores (estadísticamente, $p = 0,05$) que los obtenidos en aquellos árboles que recibieron la dosis extra de N en enero, febrero o junio.

Los tratamientos que recibieron el nitrógeno extra en abril o noviembre también dieron lugar a una mayor producción de frutos de gran tamaño de importancia comercial (tamaños de 60 mm, 48 mm y 40 mm). De acuerdo con este estudio, Lovatt (2001) sugiere que el calendario de aplicación de fertilizantes es un criterio fundamental a la hora de orientar planes de fertilización. Más adelante se describen los planes de fertilización aplicados en la localidad de Timbío, como ejemplo para realizar su cálculo, así como los incrementos obtenidos en la producción.

En muchas áreas donde se cultiva aguacate, los productores tienden a aplicar grandes cantidades de N. En Israel, Lahav (1995) encontró que altos niveles de N (aplicado como NH_4NO_3) redujeron el pH del suelo, incrementaron la clorosis por Fe y no tuvieron efecto sobre la producción en árboles de aguacate de los cultivares Ardith y Ettinger. Sin embargo, se presentó un notable efecto negativo sobre la producción en árboles del cultivar Hass. Por otra parte, Meyer et al. (1992), en un experimento llevado a cabo en California, también evaluando dosis altas de N en combinación con láminas de riego en árboles del cultivar Hass, no obtuvieron efecto sobre la producción.

Newett et al. (2018) citan algunos ejemplos de dosis de fertilización aplicadas a cultivos de aguacate Hass, en distintos escenarios del mundo, que varían de acuerdo con las características edafoclimáticas y los factores de desarrollo del cultivo, como las distancias de siembra, la edad, los niveles de producción, etc. A continuación, se describen, para cada zona productora, las consideraciones planteadas por dichos autores en relación con las dosis de N aplicadas:

Australia: la recomendación estándar para árboles maduros con un nivel óptimo de nitrógeno foliar (2,2-2,6 % para Hass) es de aproximadamente 110 kg de N/ha/año, en plantaciones con una densidad de 278 árboles/ha y con el dosel cubriendo aproximadamente el 78 % del suelo total del huerto. En una encuesta realizada a productores de aguacate en Australia, se encontró una amplia variación en los rangos de aplicación de dosis de N, que oscilan entre 69 kg y 528 kg de N/ha/año, con solo el 18 % de la población encuestada, que corresponde a productores con mayor rentabilidad, con rangos de aplicación entre 85 kg y 140 kg de N/ha/año.

Brasil: según Cantuarias-Avilés (2018), citado por Newett et al. (2018), el Instituto Agronómico de Campinas (IAC) desarrolló las pautas para la producción de aguacate de acuerdo con las condiciones de desarrollo locales. El 90 % de los huertos de aguacate en Brasil son de secano, y la temporada de lluvias ocurre desde octubre hasta marzo. Para un rendimiento esperado de 10 t/ha a 25 t/ha, se recomienda aplicar de 60 kg/ha a 120 kg/ha de N cuando el N foliar está por debajo del 2 %, y que la tasa anual de fertilización, especialmente el nitrógeno y el potasio, se reparta en tres aplicaciones durante la temporada de lluvias.

California, Estados Unidos: las pautas para la aplicación de dosis de N se basan en la cantidad removida por la cosecha; por ejemplo, para un rendimiento de 10 t/ha, se recomienda aplicar 72 kg de N/ha, mientras que para un rendimiento de 20 t/ha se recomienda la aplicación de 100 kg de N/ha. Lovatt y Witney (2001) reportan

un requerimiento de 101 kg de N/ha/año para generar un rendimiento de 12,35 t/ha.

Chile: en plantaciones de ultra alta densidad, mayores a 1.100 árboles/ha (Gardiazabal et al., 2015), ubicados en la localidad de Llay Llay, con clima mediterráneo y suelo arcilloso o franco-arcilloso, el rango de N aplicado oscila entre 115 kg y 150 kg de N/ha/año, alcanzando rendimientos de 30 t/ha.

Fósforo

El fósforo es absorbido de la solución del suelo por las raíces de las plantas como ion ortofosfato, principalmente H_2PO_4^- , y en un grado menor como ion fosfato secundario HPO_4^{2-} . Los dos factores principales que controlan la disponibilidad de P para las raíces de las plantas son: la concentración de iones de fosfato en la solución del suelo y la capacidad del suelo para reponer estos iones cuando son absorbidos por las raíces de las plantas (Syers et al., 2008). La resistencia de un suelo particular a elevar sus contenidos de P-disponible cuando se incrementa la aplicación de fertilizantes fosfatados es conocida como capacidad tampón del suelo y corresponde a la cantidad de P que es necesario agregar como fertilizante para elevar el P disponible en 1 mg/kg (ppm) de fosfato por cada kilogramo de fósforo aplicado (Rojas, 2002).

La cantidad total de fósforo presente en la capa arable de los suelos oscila normalmente entre 200 mg/kg y 5.000 mg/kg. Tomando valores medios de 500 mg/kg para los horizontes subsuperficiales, esto equivaldría a valores del orden de 200-4.000 kg de P/ha. Esta cantidad sería, en principio, más que suficiente para abastecer de fósforo a cualquier cultivo, pero desafortunadamente solo menos del 1 % está disponible para la planta. La máxima disponibilidad se presenta en pH entre 6,5 y 7,5, pero es insoluble en pH muy altos (Mengel et al., 2001).

A través de varias reacciones químicas, el P se incorpora a compuestos orgánicos como ácidos nucleicos (ADN y ARN), fosfoproteínas, fosfolípidos, enzimas y compuestos fosfatados ricos en energía, como el adenosín trifosfato (ATP) (Afif, 2005). El fósforo influye en el desarrollo de las flores, el cuajado de frutos, la formación de brotes y yemas, y el crecimiento de raíces (Ataucusi, 2015); la baja disponibilidad en el suelo está asociada con la inhibición del crecimiento de yemas y la baja generación de brotes vegetativos (Ataucusi, 2015).

Como fuentes de fósforo disponibles, se tienen los siguientes productos, con los aportes de cada elemento (tabla 1).

Tabla 1. Productos comerciales utilizados como fuente de P para planes de fertilización

Productos comerciales	Porcentaje	
	N	P ₂ O ₅
Fosfato diamónico (dap)	18	46
Fosfato monoamónico (map)	10	48
Ácido fosfórico		50
Roca fosfórica		25-40

Fuente: Elaboración propia.

Para las localidades en estudio (Rionegro, Herveo y Morales), se registró un contenido de P disponible en el suelo de 6,6 ppm, 5,9 ppm y 6,4 ppm, respectivamente, y un contenido en hojas del 0,11 % para Rionegro y el 0,13 % para Herveo y Morales. Con estos contenidos, tanto a nivel de suelo como de planta, se obtuvieron valores de extracción por hectárea de 7,0 kg para Rionegro, 6,5 kg para Herveo y 7,5 kg para Morales, para un rendimiento de 20 t/ha.

La interacción entre nutrientes y las formas disponibles pueden favorecer o afectar de manera negativa su disponibilidad para las

plantas. En este sentido, Mengel et al. (2001) reportan que las plantas fertilizadas con amonio absorben más aniones que cationes, además de que liberan iones H^+ al suelo, lo que acidifica la rizosfera. Otros autores reportan evidencias sobre el estímulo en la liberación de fósforo y su mineralización después de cinco días, y la biodisponibilidad de fósforo hasta por 40 días tras la aplicación de urea (Ning et al., 2021). Igualmente, estudios llevados a cabo por Bar et al. (1997) reportan que la alta presencia de nitrato reduce los niveles de fósforo en plantas de aguacate.

Potasio

El potasio es absorbido por las plantas en grandes cantidades, más que cualquier otro elemento mineral, a excepción del nitrógeno (Guerrero-Polanco et al., 2018). Para el óptimo crecimiento, los niveles de potasio en las plantas pueden encontrarse entre el 2 % y el 3 % en base seca. Cuando el potasio es limitado, los procesos esenciales de la vida de las plantas, desde la fotosíntesis hasta la regulación estomática, pueden verse afectados. A diferencia del N y el P, el K no forma parte de ningún compuesto orgánico vital en las plantas; sin embargo, la presencia de este elemento es vital para su crecimiento, ya que es conocido como un activador enzimático que promueve el metabolismo (Uchida, 2000).

Solamente una fracción del potasio del suelo se encuentra disponible para ser tomada por las plantas. Aunque muchos suelos pueden contener grandes cantidades de este elemento, responderían a la fertilización adicional con potasio debido al incremento de su disponibilidad. El potasio existe en el suelo en tres formas: 1) no disponible o forma mineral, con una concentración de 5.000-25.000 mg/kg; 2) lentamente disponible o no intercambiable, con una concentración de 50-750 mg/kg, y 3) fácilmente disponible, que representa la forma intercambiable 40-600 mg/kg y en solución de 1-10 mg/kg (Havlin et al., 1998).

La forma no disponible representa entre el 90 % y el 98 % del potasio total de los suelos, y está contenida en minerales primarios (feldespatos, ortosa, microclina, muscovita, biotita). La forma lentamente disponible representa del 1 % al 10 % del potasio total, y puede ser gradualmente tomada por las plantas o fijada. La forma fácilmente disponible es una combinación entre el potasio intercambiable y el disponible en la solución del suelo. En algunos suelos se puede presentar una reversión a formas lentamente disponibles en el proceso de fijación en las arcillas. La forma fácilmente disponible representa solo una pequeña fracción del potasio total del suelo, pues se encuentra entre el 0,1 % y el 2 %, dependiendo del tipo de suelo.

Entre los factores que determinan la disponibilidad de K^+ , se encuentran la cantidad y tipo del mineral arcilloso, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el contenido de K^+ intercambiable, la capacidad del suelo para fijar el K^+ y la humedad, temperatura, aireación y pH del suelo (Havlin et al., 1998). Sin embargo, la fertilización en exceso de este mineral puede causar lixiviación o que sea tomada por la planta sin producir ningún efecto útil (Mengel et al., 2001).

Dentro de las funciones básicas del K, se conoce su papel regulador en la apertura y cierre estomáticos (Knight Jr., 2002), en el mantenimiento del balance de cargas eléctricas en los sitios de producción de ATP, en la promoción de la translocación de fotosintatos para el crecimiento de las plantas o su almacenamiento en frutos o raíces, y en la síntesis de proteínas (Salvo, 2017). Además, debido a su alta movilidad, este nutriente mantiene el pH de las células por la neutralización de ácidos orgánicos, lo que favorece la fotosíntesis (Mengel et al., 2001).

Como fuentes de potasio disponibles, se tienen los siguientes productos, con los aportes de cada elemento (tabla 2).

Tabla 2. Productos comerciales utilizados como fuente de K para planes de fertilización

Producto	Fórmula	kg de nutriente/100 kg de producto			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S
Cloruro de potasio	KCl			60-62	
Nitrato de potasio	KNO ₃	13-14		44-46	
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄			50-53	18
Carbonato de potasio	K ₂ CO ₃			27-52	

Fuente: Elaboración propia.

Para las localidades en estudio (Rionegro, Herveo y Morales), se registraron contenidos de K en el suelo de 0,26 cmol/kg para Herveo, 0,32 cmol/kg para Morales y 0,28 cmol/kg para Rionegro, y valores de extracción por el fruto de 83 kg/ha para Rionegro, 93,7 83 kg/ha para Herveo y 81,4 83 kg/ha para Morales. El contenido nutricional en hojas es del 0,75 % para Rionegro, el 1,37 % para Herveo y el 0,57 % para Morales. Los valores registrados para estas localidades se encuentran dentro de los intervalos de concentración nutrimental óptimos para aguacate Hass, reportando valores entre 0,5 % y 2,4 % por varios autores (Embleton & Jones, 1972; Bertin et al., 1976; Goodall et al., 1979).

Calcio

El Ca es un elemento requerido para el crecimiento del aguacate y es un componente importante de la pared celular y la superficie exterior de las membranas celulares. En la pared celular vegetal, el Ca estabiliza su estructura y controla el crecimiento, las propiedades de intercambio de iones y la actividad enzimática. En aguacate, los niveles de Ca afectan el rendimiento, el tamaño y la calidad

poscosecha. La maduración del fruto se hace más lenta por los altos niveles internos de Ca. En suelos de baja disponibilidad de este elemento, adiciones al suelo han mejorado el crecimiento de las plantas y el rendimiento de frutos cuando se utiliza en balance con otros nutrientes, como fósforo y nitrógeno (Messenger et al., 1997).

En aguacate se han demostrado fuertes correlaciones entre un mayor contenido de Ca en el fruto y una menor presencia de pudriciones (Hofman et al., 2002; Penter & Stassen, 2000) y de trastornos internos como pardeamiento vascular y manchas en la pulpa (Boyd et al., 2007; Eaks, 1985; Hofman et al., 2002; Kremer-Köhne et al., 1993; Penter & Stassen, 2000; Saucedo-Hernández et al., 2005; Thorp et al., 1997). Altos niveles de nitrógeno y bajos niveles de calcio en el exocarpo de frutos de aguacate pueden estar asociados con antracnosis y baja calidad de estos en poscosecha (Tomassini-Vidal & Pino-Huasacca, 2022). El Ca tiene poca movilidad dentro de la planta (Poovaiah et al., 1988), y una vez es transportado, se presenta competencia entre los órganos (hojas, brotes, frutos, raíces, etc.), especialmente intensa durante el crecimiento inicial del fruto, cuando se presenta un fuerte crecimiento vegetativo (Witney et al., 1990). En otros frutales, como los cítricos, se ha podido establecer un efecto de la carga de cosecha sobre el tamaño del fruto. En aguacate, Hofman et al. (2002) reportan una menor presencia de pudriciones en frutos de árboles con mayor rendimiento, y lo atribuyen a una mayor concentración de Ca debido al menor tamaño del fruto registrado en árboles con alta carga. De acuerdo con los hallazgos reportados por estos autores, es probable que el Ca sea un factor dominante que impulse la relación entre la calidad de la fruta y la nutrición del árbol.

Este elemento suele ser el catión más abundante en el complejo de cambio del suelo, pero la proporción utilizable depende del grado de saturación. En numerosos suelos, el calcio fijado en el complejo coloidal y el unido a los compuestos húmicos son las formas naturales más abundantes. Incluso en suelos ácidos casi siempre hay cantidades suficientes para la adecuada nutrición de las plantas

cultivadas, sobre todo cuando las especies son poco exigentes (Monge et al., 1994). El contenido de iones totales en la solución del suelo varía según el tipo de suelo; en la mayoría de los casos, entre el 60 % y el 80 % del total de estos iones se encuentra como Ca^{++} , y, aunque las raíces aprovechan menos del 3 % del calcio disponible, esta cantidad es suficiente para satisfacer las demandas que, por ejemplo, tienen los frutales (Barber et al., 1963).

En suelos ácidos casi siempre hay cantidades suficientes de calcio para la adecuada nutrición de las plantas cultivadas, sobre todo cuando las especies son poco exigentes.

El Ca es absorbido por las raíces y distribuido al resto de la planta, principalmente a través del xilema, por efecto de la transpiración. Las hojas totalmente expandidas, con tasas de transpiración más altas, tienden a acumular más Ca que otras hojas jóvenes y frutos. Los factores que afectan la acumulación de Ca en el fruto son la concentración en el suelo, la concentración de otros cationes (ya que compiten con el Ca en zonas de absorción de las raíces) (Tomassini-Vidal & Pino-Huasacca, 2022), la textura y humedad del suelo (Bonomelli et al., 2019), el vigor del crecimiento vegetativo, el manejo del agua y, posiblemente, el portainjerto. Para reducir la incidencia de desórdenes fisiológicos en poscosecha, la relación $\text{Ca}^+\text{Mg}/\text{K}$ en el porcentaje de saturación de bases del suelo debe mantenerse entre 4 y 5 (Salazar-García & Lazcano-Ferrat, 2001).

Varias formas de calcio se utilizan comúnmente como enmiendas del suelo, con efectos variados sobre los nutrientes y el pH del suelo. En general, el Ca soluble eleva el pH del suelo a una condición neutra, ya sea por aumento del pH en un suelo ácido o por reducción en un suelo sódico. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se utiliza a menudo para aumentar la permeabilidad del suelo, reducir la formación de costras y aflojar suelos duros. Su aplicación también puede disminuir el pH de un suelo alcalino por precipitación del bicarbonato, además de suministrar Ca y S, como nutrientes esenciales de las plantas.

El nitrato de calcio $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$ estabiliza el pH del suelo a aproximadamente 7 (neutro) y es una fuente importante de nitrógeno en su forma fácilmente asimilable. El carbonato de calcio (calcita o caliza calcítica) es aplicado con frecuencia para elevar el pH de suelos ácidos, que se ven afectados por el uso de sales de amonio, urea o amoníaco anhidro, con tendencia a acidificar el suelo.

Magnesio

El magnesio (Mg) es un elemento esencial para el crecimiento y el desarrollo de las plantas. La disponibilidad de Mg para las plantas depende de los siguientes factores (Mikkelsen, 2010):

1. Propiedades químicas del material parental de origen y su grado de meteorización.
2. Factores climáticos y antropogénicos específicos del lugar.
3. Prácticas de manejo agronómico, en donde se incluye las especies cultivadas, la rotación de cultivos y las prácticas de fertilización orgánica y mineral.

Debido a la gran variación en el contenido de Mg del material parental, su contenido total en los suelos varía considerablemente entre 0,05 % y 0,5 % (Maguire & Cowan, 2002). Se ha reportado que las concentraciones de Mg disponible para las plantas en la solución del suelo varían entre 125 μM y 8,5 mM (Barber, 1995). En suelos profundos de uso agrícola, una cantidad considerable del Mg total del suelo está ligado en forma intercambiable por la unión reversible del Mg a cargas permanentes y/o variables en los suelos. A diferencia de otros cationes como K, Ca y NH_4^+ , el Mg es altamente móvil en el suelo debido a que presenta una menor fuerza de adhesión a las cargas negativas que representan la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Gransee & Führs, 2012). Esta condición también puede resultar desfavorable en zonas productoras de aguacate del Cauca en donde la precipitación excede

la evapotranspiración durante periodos prolongados a lo largo del año, lo cual provoca pérdidas de Mg por lixiviación o lavado (Rebolledo-Roa & Burbano-Díaz, 2023).

Las plantas absorben el magnesio en su forma iónica Mg^{+2} , que es la forma de Mg disuelto en la solución del suelo. Esta absorción está dominada por dos procesos principales: 1) absorción pasiva, impulsada por la corriente de transpiración o flujo de masa, estimada en un 85 %; 2) difusión, que es el movimiento de iones de Mg desde zonas de alta concentración hacia zonas de menor concentración.

El magnesio tiene un número de funciones clave en las plantas. Los procesos metabólicos y las reacciones que son influidas por Mg incluyen:

1. Formación de ATP en los cloroplastos.
2. Fijación de dióxido de carbono (CO_2) para procesos fotosintéticos.
3. Síntesis de proteínas.
4. Formación de la clorofila.
5. Descarga del floema.
6. Partición y utilización de carbohidratos.
7. Generación de especies reactivas de oxígeno.
8. Fotooxidación en tejidos de las hojas.

La clorosis intervenal sobre hojas viejas es uno de los síntomas típicos de deficiencia de Mg. Se ha reportado que hasta el 35 % del Mg total en plantas está ligado a los cloroplastos. Sin embargo, esta condición de clorosis es altamente dependiente de la intensidad de luz; es decir, plantas que crecen en condiciones de alta intensidad lumínica parecen tener un mayor requerimiento que aquellas que crecen en condiciones de baja luminosidad (Zekri & Obreza, 2013). Navarro y Navarro (2003) explican que cuando la

relación Ca/Mg es mayor a 10, las deficiencias de Mg pueden ser realmente visibles debido a que el Ca desplaza el Mg adsorbido por el complejo coloidal del suelo. Se ha demostrado que el Mg en el aguacate promueve un mayor número de brotes nuevos, así como la floración temprana y el mayor cuajado de frutos, al disminuir el número de frutos que abscisan (Ataucusi, 2015; Chirinos, 1999). Además, este elemento contribuye al estatus hídrico de los tejidos (Cerdas et al., 2006).

Los contenidos de Mg y Ca presentan una relación directamente proporcional con el aumento en la calidad del fruto (Martínez et al., 2014). La deficiencia de Mg es nociva, sobre todo cuando el Ca también es deficiente (Cerdas et al., 2006). Hofman et al. (2002) mencionan que la relación $(Ca + Mg)/K$ se correlaciona positivamente con el contenido de Mg y Ca en la pulpa de los frutos, y estos tres nutrientes se correlacionan negativamente con la antracnosis.

Azufre

La absorción y asimilación de azufre y la de nitrógeno por parte de las plantas se encuentran estrechamente interrelacionadas, al punto de depender el uno del otro, debido a su presencia en aminoácidos y proteínas. El azufre es un constituyente esencial de numerosas proteínas, vitaminas y algunas hormonas vegetales. Como resultado de la deficiencia de azufre, se presenta una reducción en la síntesis de proteínas y en la producción de clorofila y aminoácidos (Zekri & Obreza, 2013).

Muchos productores suelen olvidar suministrar azufre a sus cultivos, sin considerarlo como elemento necesario y nutriente crítico para las plantas. En general, el análisis de tejidos es una herramienta importante para diagnosticar deficiencias nutricionales, pero lamentablemente su uso en cultivos de aguacate en Colombia ha sido bajo.

A continuación, se describen algunas características del azufre:

- El 90 % del azufre que se presenta naturalmente en los suelos está asociado con la MO. El humus del suelo contiene alrededor del 5 % de este elemento. Similar a lo que ocurre con el N, la liberación de S depende tanto de la cantidad como de la tasa de descomposición de la MO. El azufre orgánico liberado, combinado con el que proviene de otras fuentes, como la lluvia y el agua de riego, puede proveer este elemento en cantidades suficientes para las plantas.
- La forma disponible de azufre para las plantas es el ion negativo sulfato, que puede ser absorbido por las raíces, pero usualmente se presenta en zonas muy profundas que superan la zona de raíces de la mayoría de las plantas.
- El sulfato de calcio es un compuesto soluble utilizado como fuente de liberación lenta de Ca, pero además suministra S.

Considerando que el S está asociado con la formación de clorofila y proteínas, los síntomas de deficiencia son similares a la deficiencia de N, con la diferencia de que los primeros síntomas aparecen sobre el nuevo crecimiento. La clorosis es mucho más severa sobre el nuevo crecimiento, debido a que el S no se mueve desde hojas viejas hacia jóvenes. Las hojas se tornan de color verde pálido a amarillo. Los síntomas visuales no son fáciles de identificar, y, por lo tanto, se sugiere usar como herramienta de diagnóstico el análisis de tejidos.

Una condición que puede generar deficiencia de S se presenta cuando se utilizan altas tasas de fertilizantes nitrogenados. Si el suministro de N no es suplementado con adecuado S, el N disponible para ser usado por los cultivos puede ser excesivo en relación con el S. En condiciones altas de N y bajas de S, los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas pueden verse interrumpidos y las plantas pueden presentar síntomas de deficiencia de S. Las deficiencias de S eran más comunes en décadas pasadas, cuando era mayor el

uso de fertilizantes pobres en S, como nitrato de amonio, nitrato de potasio, urea, fosfato monoamónico (MAP) y fosfato diamónico (DAP) (Zekri & Obreza, 2013).

Las fuentes de fertilizantes más comunes para aplicación en suelos son:

- Sulfato de amonio.
- Sulfato de potasio.
- Sulfato de potasio-magnesio.
- Superfosfato.
- Sulfato de calcio.
- Azufre elemental.

Micronutrientes

Los micronutrientes son aquellos elementos que son esenciales para el crecimiento y reproducción de las plantas, pero solo se requieren en concentraciones muy bajas. La mayoría de los micronutrientes actúan como componentes de enzimas y otras estructuras orgánicas. Dos de estos elementos que representan un papel fundamental en las plantas son el zinc y el hierro. El zinc es un componente importante de un gran número de enzimas que participan en el metabolismo de las plantas, así como en la síntesis de proteínas, en el metabolismo de las auxinas y en la integridad de la membrana. El hierro tiene un papel clave en el proceso de respiración y en la molécula de clorofila para la fotosíntesis.

La mayoría de los micronutrientes están normalmente disponibles en el suelo en cantidades suficientes. Cuando se presentan deficiencias, por lo general es resultado de condiciones químicas en el suelo que hacen que dichos elementos se presenten en formas insolubles y que no estén disponibles para las plantas. Esto pasa

especialmente con el zinc y el hierro, que tienen una solubilidad muy limitada a pH de 6 o superior. La deficiencia de elementos menores también puede presentarse por ciertas reacciones químicas que se producen en suelos que contienen cal o que son regados con agua que contiene altas cantidades de bicarbonato. Suelos pobres en drenaje y la presencia de enfermedad de la raíz también pueden considerarse como factores limitantes que contribuyen a un pobre desarrollo de las raíces absorbentes, responsables de la captación de dichos nutrientes (Crowley et al., 2001).

Muy a menudo, las deficiencias de elementos menores se evidencian por la aparición de amarillamiento en las hojas o, en el caso del zinc, por malformaciones en el desarrollo del fruto. En el caso de deficiencia de Fe y Zn, las hojas presentan clorosis ocasionada por problemas con la síntesis de la clorofila. Para el zinc, los niveles normales de las hojas deben oscilar entre los 20 ppm y 40 ppm. Los síntomas de deficiencia ocurren cuando las concentraciones caen por debajo de 15 ppm o 20 ppm. Las deficiencias de hierro se presentan en concentraciones foliares por debajo de 35-50 ppm (Crowley et al., 2001).

La deficiencia de Mn solo ha sido reportada en árboles de aguacate en condiciones de crecimiento de cultivo en arena. Los síntomas incluyen clorosis intervenal, y, en casos extremos, las hojas se tornan de un color amarillento opaco (Barnard et al., 1991). Un incremento en la acidez del suelo causada por el uso de fertilizantes puede resultar en un aumento considerable en el contenido de Mn en hojas de aguacate. Las concentraciones tóxicas de Mn en las hojas pueden corregirse con una disponibilidad decreciente del elemento en el suelo, a través del incremento en el pH y mejorando el drenaje (Lahav & Whiley, 2002).

Las deficiencias de Fe normalmente no son un problema para los árboles de aguacate, a menos que crezcan en suelos calcáreos con pH mayores a 7 o en suelos ácidos con altos contenidos de Mn, ya que una excesiva concentración de este elemento puede suprimir

el consumo de Fe. La deficiencia de Fe se caracteriza por un amarillamiento intervenal, con estrechas líneas verdes oscuras que se presentan a lo largo de las venas. Una clorosis severa provoca que las hojas se tornen de color amarillo pálido a blanco, así como síntomas de quemaduras en los márgenes y ápices, y en casos extremos las hojas se llegan a caer (Lahav & Whiley, 2002). En suelos calcáreos se pueden remediar las deficiencias de Fe con la aplicación de quelato de Fe o mediante el incremento del pH. Granja y Covarrubias (2018) sugieren que la estrategia de fertilización basada en sulfato de amonio, más un inhibidor de la nitrificación ureico con la aplicación de urea puede ser una alternativa efectiva y sustentable para contrarrestar los síntomas de clorosis por hierro en árboles de aguacate, con una efectividad similar a la alcanzada con aplicaciones de quelatos de hierro.

Las deficiencias de Zn se encuentran comúnmente en suelos calcáreos con pH elevados, pero también pueden presentarse en zonas con altas precipitaciones, que lixivian sales y conducen a la acidificación del suelo. Los síntomas se presentan en hojas nuevas con moteados intervenales, reducción del tamaño de las hojas y crecimiento del brote en forma de roseta (Crowley, 1992; Wallihan et al., 1958). Las estrategias para corregir las deficiencias de Zn dependen en gran medida del pH del suelo y, tal vez, de la cantidad de Mo disponible para formar complejos metálicos (Srivastava & Sethi, 1981). El zinc está involucrado en diversas funciones de las plantas, como la fotosíntesis, la formación de sacarosa y almidón, el metabolismo de proteínas y auxinas, la integridad de las membranas, la floración y la producción de semillas (Alloway, 2004).

Cuando se presenta una deficiencia de cobre, las hojas se tornan de un color verde intenso, el crecimiento terminal es afectado, los entrenudos se hacen más cortos y se presenta una muerte progresiva del crecimiento terminal (Lahav & Whiley, 2002).

La captación de boro del suelo es en gran parte pasiva, y su transporte en la planta se hace a través de los tejidos del xilema (Mengel

& Kirkby, 1978), aunque en aguacate se mueve parcialmente por el floema y puede ser traslocado desde las hojas hacia tejidos en desarrollo de flores y frutos (Minchin et al., 2012). El boro en el suelo está disponible para las plantas en forma de ácido bórico $[B(OH)_3]$, que es la forma en la que es absorbido por las raíces y transportado vía xilema (Clarkson & Hanson, 1980; Raven, 1980). Algunas características del suelo, como un pH alto, elevados contenidos de calcio y bajos contenidos de humedad limitan la disponibilidad de boro e inducen deficiencias en cultivos que crecen en estas condiciones (Gupta, 1980; Gupta & MacLeod, 1981). El boro también es fácilmente lixiviado del suelo (Gupta et al., 1985) y, por lo tanto, debe ser sustituido periódicamente en un programa acorde con las condiciones climáticas, el contenido en el suelo y los requerimientos del cultivo (Harkness, 1960).

La deficiencia de B es uno de los desórdenes de nutrientes más comunes en cultivos de aguacate alrededor del mundo. Los síntomas se presentan cuando la concentración foliar está por debajo de 25 mg/kg (Whiley et al., 1996) y se caracterizan por presentar hinchazón de los nudos, lesiones corchosas y crecimiento horizontal en lugar de vertical, debido a la pérdida de la dominancia apical del brote. Algunos frutos de árboles deficientes pueden presentar una considerable distorsión del crecimiento, con formas desiguales. Los árboles injertados sobre patrones de la raza mexicana, por ejemplo Topa Topa y Duke 7, son más susceptibles a la deficiencia de B que aquellos injertados sobre patrones guatemaltecos.

Existen reportes previos, realizados en Sudáfrica (Robbertse et al., 1990), California (Jaganath & Lovatt, 1995) y Nueva Zelanda (Dixon et al., 2005), sobre la aplicación foliar de B para mejorar funciones reproductivas del aguacate. Estos trabajos indican que la viabilidad del polen, la fertilización del óvulo y el cuajado del fruto son procesos proclives a mejorar con la aplicación foliar de B en el estado fenológico de coliflor como predominante. En aguacate se presenta tanto polinización cruzada como autopolinización. En la autopolinización, los tubos polínicos a menudo crecen más



lentamente que los de polinización cruzada y, por lo tanto, pueden tardar más en llegar al óvulo, lo que reduce las posibilidades de autofecundación y cuajado (Williams & Reese, 2019). La aplicación de B podría mejorar el cuajado al estimular el desarrollo de los tubos polínicos en la autopolinización.

En un estudio realizado en Australia, Hapuarachchi et al. (2022) encontraron que la aplicación de B al suelo no incrementó el cuajado de los frutos, mientras dosis altas, de 30 g por árbol, provocaron una reducción del 56 % en el cuajado. Además, en este estudio se reporta un efecto del B sobre el aumento en el diámetro del fruto por un aumento directo de la masa de la pulpa entre el 8 % y el 9%.





A photograph of an avocado tree with several green, bumpy avocados hanging from the branches. The image has a dark, purple-tinted overlay.

CAPÍTULO IV

Propiedades químicas del suelo en zonas productoras de aguacate



Las propiedades químicas del suelo están determinadas por la interacción de varios constituyentes que tiene lugar entre las partículas y la solución del suelo. Estos constituyentes son afectados por propiedades físicas, como la textura, que a su vez determina la proporción de arcillas, limos y arenas como indicador de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), entendida como la cantidad de cationes que pueden ser retenidos por un suelo en una condición de pH determinada y que pueden ser intercambiados por otros nutrientes disponibles en la solución del suelo. A su vez, características climáticas locales, como la precipitación, pueden afectar las propiedades químicas del suelo, como el pH, lo cual condiciona la disponibilidad de nutrientes, o la temperatura, que, en combinación con la humedad del suelo, dinamiza la actividad biológica para la descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS). Las interacciones químicas que ocurren en el suelo son muy complejas, pero comprender ciertos conceptos básicos ayudará a gestionar el manejo de la fertilidad del suelo de una manera más eficiente.

En el departamento del Cauca, los suelos son originados a partir de depósitos de cenizas volcánicas y rocas ígneas, característicos de suelos ándicos; el departamento, según la clasificación climática de Koppen y Geiger (Beck et al., 2018), se ubica dentro del paisaje de altiplanicie con clima templado húmedo. Estos suelos son profundos, bien drenados, con texturas de moderadamente gruesas a moderadamente finas, de fuerte a moderadamente ácidos, con alta saturación de aluminio y fertilidad natural baja-moderada (IGAC, 2009).

De acuerdo con estas características generales, a continuación se presenta información relevante sobre la CIC, la MO y el pH, con el fin de tener una mayor comprensión sobre los procesos en que intervienen, para orientar de forma más adecuada la toma de decisiones en los planes de manejo nutricionales de los cultivos de aguacate Hass.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Como se mencionó, la química del suelo es la interacción de varios componentes químicos que tiene lugar entre las partículas y la solución del suelo (el agua retenida por el suelo). El tamaño de las partículas del suelo determina su textura y se relaciona estrechamente con las características químicas predominantes que puedan llegar a asegurar la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo de los cultivos. En la tabla 3 se relacionan las clases texturales según el sistema de clasificación de suelos más conocido: el triángulo de textura del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1951, 2017).

Tabla 3. Clasificación textural de los suelos según el USDA

Nombres vulgares de los suelos (textura general)	Arenoso (%)	Limoso (%)	Arcilloso (%)	Clase textural
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Arenoso franco
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
Suelos francos (textura mediana)	23-52	28-50	07-27	Franco
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso

Nombres vulgares de los suelos (textura general)	Arenoso (%)	Limoso (%)	Arcilloso (%)	Clase textural
Suelos francos (textura moderadamente fina)	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Fuente: FAO (s. f.).

De acuerdo con la clasificación textural general, los suelos pueden ser de textura gruesa, media y fina. Los de textura gruesa-moderadamente gruesa presentan más del 50% de arenas y menos del 20% de arcillas; los de textura media contienen menos del 27% de arcillas y menos del 52% de arena, y los de textura fina contienen más del 35% de arcillas y más del 20% de limos (tabla 4). Las partículas de arena son las más grandes, y varían de 2 mm a 0,05 mm de diámetro; las de limo son más pequeñas, pues oscilan entre 0,05 mm y 0,002 mm, y las de arcilla son menores de 0,002 mm (Abd-Elmabod et al., 2017). Las fracciones gruesas, gravas y arenas, compuestas principalmente por fragmentos de roca o minerales primarios, actúan como partículas individuales con un área superficial específica baja y relativamente no reactivas. En lo que respecta a las principales propiedades del suelo, la fracción arcillosa es la que controla la mayoría de sus propiedades. Las arcillas están formadas por minerales secundarios, llamados aluminosilicatos (cristalinos), con un área superficial altamente reactiva (Mandal UK, 2007). En la tabla 4 se relacionan las propiedades asociadas con el área superficial de distintos tamaños de partículas de suelos (King et al., 2003).

Tabla 4. Área superficial de distintos tamaños de partículas de suelos

Tipo de partícula	Diámetro (mm)	Partículas/g	Área superficial específica (cm ² /g)
Arena muy gruesa	2,00–1,00	90	11
Arena gruesa	1,00–0,50	720	23
Arena media	0,50–0,25	5.700	45
Arena fina	0,25–0,10	46.000	91
Arena muy fina	0,10–0,05	722.000	227
Limo	0,05–0,002	5.776.000	454
Arcilla	< 0,002	90.260.000.000	8.000.000

Fuente: King et al. (2003).

Los suelos arcillosos retienen más nutrientes y agua que los suelos gruesos/arenosos debido a su mayor número de sitios de intercambio catiónico y, por ende, a su mayor capacidad de absorción de nutrientes. La materia orgánica (MO) también tiene sitios cargados negativamente que atraen y retienen partículas cargadas positivamente (cationes). Por lo tanto, los suelos arenosos dependen del contenido de MO para aumentar la CIC. Las moléculas de nutrientes cargadas positivamente, llamadas “cationes básicos” (calcio, magnesio, potasio y sodio) y “cationes ácidos” (hidrógeno y aluminio), son atraídas por las cargas negativas de las partículas del suelo, y a esto se le llama “adsorción”. La CIC es una medida de esa carga negativa y, por lo tanto, de la capacidad de los suelos para equilibrarse y retener elementos con carga positiva, es decir, cationes intercambiables; es por esto que el número de cargas negativas está determinado por el tipo y la cantidad de arcilla presente. La CIC es un criterio importante para mantener cantidades adecuadas de calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺) y potasio (K⁺) disponibles para las plantas, y normalmente se expresa en unidades de carga por peso de suelo. Se utilizan dos conjuntos de unidades diferentes,

pero numéricamente equivalentes: meq/100 g (miliequivalentes de elemento por 100 gramos de suelo seco) o cmol/kg (centimoles de carga por kilogramo de suelo seco) (Local Land Service, 2020). Para interpretar los resultados de la CIC, en la tabla 5 se relacionan los rangos referenciados por varios autores (Huggett, 2005; Moorberg & Crouse, 2017; CUCE, 2007) para diferentes tipos de arcillas y valores reportados para la MO y diferentes clases texturales del suelo.

Tabla 5. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) para diferentes tipos de arcilla, materia orgánica (MO) y texturas del suelo

		meq/100 g
*Tipo de arcilla	Caolinita	3 – 18
	Haloisita	5 – 40
	Clorita	10 – 40
	illita	10 – 40
	Montmorillonita	60 – 150
	Vermiculita	100 – 215
Materia orgánica	MO	200 – 400
Textura del suelo	Arena	1 – 5
	Franco Arenoso	5 – 10
	Franco	5 – 15
	Franco Arcilloso	15 – 30
	Arcilloso	>30

* CUCE (2007)

Fuente: Huggett (2005).

Los suelos de los municipios de Morales y El Tambo, en el departamento del Cauca, presentan propiedades de suelos ándicos, originados a partir de depósitos de cenizas volcánicas y rocas ígneas. De acuerdo con el IGAC (2009), estos suelos se clasifican como Typic Hapludands

dentro de las unidades cartográficas asociación Typic Hapludands-Humic Pachic Dystrudepts (AQA) y asociación Typic Hapludands-Typic Dystrudepts-Typic Paleudults (AQC).

Estos suelos presentan una textura franco-arenosa en todos sus horizontes, con el $75,3\% \pm 1,9\%$ de arena, el $18\% \pm 1,5\%$ de limo y el $6,7\% \pm 0,3\%$ de arcilla. La CIC presenta valores de 5,6 meq/100 g, por lo cual se considera un suelo muy pobre para intercambiar nutrientes como calcio, magnesio, sodio y potasio, principalmente, característica que puede explicarse por la textura franco-arenosa de este tipo de suelos.

Los andisoles son un grupo de suelos derivados de ceniza volcánica que presentan densidad aparente $\leq 0,9 \text{ g/cm}^3$, retención de fosfatos $\geq 85\%$, y por la naturaleza de la fracción arcillosa amorfa y los complejos organominerales de aluminio y hierro, presentan alta superficie específica y abundantes sitios reactivos para la retención de fosfatos (Alcalá et al., 2009). El fósforo disponible, de alta demanda en la agricultura moderna, es muy bajo en los andisoles, ya que es fuertemente retenido por los materiales no cristalinos de aluminio y de hierro; de otra parte, el fósforo aplicado al suelo reacciona rápidamente con los citados materiales y termina formando componentes insolubles metal-fosforados. (Shoji et al., 2002). En los andisoles predominan las arcillas caolinita y esmectita, por lo general mal cristalizadas; sin embargo, la composición mineralógica como tal depende del grado evolutivo del andisol: esmectitas en etapa juvenil y caolinitas en estado maduro. Aunque no de forma frecuente, también se puede encontrar en la arcilla haloisitas, asociadas con climas en etapa de sequedad (Sánchez & Rubiano, 2015). De acuerdo con los rangos propuestos en la tabla 6, la caolinita y la haloisita son dos tipos de arcillas con menor CIC predominantes en los suelos del Cauca.

La MO presenta una CIC entre 200 y 400 meq/100 g (tabla 5), y en suelos de zonas productoras de aguacate del Cauca se presentan niveles altos de MO, con valores que alcanzan el 12%. Frente a la

baja CIC que se presenta en las arcillas del tipo caolinita y haloisita, la MO, al tener una alta CIC, puede contribuir a la disponibilidad de nutrientes, con diferencias en función del tipo de suelo. Por ejemplo, el nitrógeno, en los andisoles con altos contenidos de MO, se acumula en cantidades altas sobre el componente orgánico y es muy resistente a la descomposición microbial (mineralización); se ha encontrado que el porcentaje de nitrógeno mineralizable en suelos de cenizas volcánicas se reduce a la mitad en comparación con el que se encuentra en suelos no volcánicos con contenidos similares de MO (Shoji et al., 2002). En un estudio llevado a cabo en El Tambo (Cauca) (Bravo et al., 2016), se hizo un análisis cuantitativo de los alófanos presentes en estos suelos, y se encontró que los alófanos influyen negativamente en su nivel de fertilidad, lo cual se manifestó, principalmente, en una fuerte deficiencia de fósforo y boro, y en su fuerte acidez, con una alta retención aniónica, que predomina sobre la retención catiónica, provocando la fuerte deficiencia de bases de cambio. Por sus propiedades isoelectricas, el alófano puede adsorber cationes y aniones dependiendo del pH, que regula la ionización de sus grupos activos. A valores de pH superiores a 5,5, generan alta CIC, propiedad ventajosa para el suelo porque impide el lavado de nutrientes hacia horizontes más profundos, por lo que quedan disponibles para las plantas. En suelos ácidos, como la mayoría de los suelos del Cauca, se presenta alta retención de aniones como el fosfato, el sulfato, el molibdato y el borato, lo cual genera una fuerte deficiencia de estos nutrientes en los cultivos (Bravo et al., 2016).

Contenido de materia orgánica (MO)

La materia orgánica del suelo (MO) está influida por procesos de descomposición tanto bióticos como abióticos. Los procesos abióticos se presentan por acción mecánica que actúa sobre la hojarasca, y los bióticos hacen referencia a descomponedores bacterianos y fúngicos. La MO se define como la suma de residuos vegetales y animales en diversas etapas de descomposición (Brady & Weil,

2008). Los tres depósitos principales de MO, según su tiempo de descomposición completa, son los siguientes: activos (1-2 años), lentos (15-100 años) y pasivos (500-5.000 años) (Brady & Weil, 2008; McCauley et al., 2009). Los microorganismos descomponen continuamente tanto la MO activa como la lenta, retornando a la solución del suelo gran cantidad de nutrientes esenciales ligados orgánicamente, como N y P, entre otros. La MO se comporta como una esponja, con la capacidad de absorber y retener hasta el 90 % de su peso en agua; además, hace que el suelo se aglutine y forme agregados de suelo, lo que mejora su estructura (Overstreet, 2009). La MO activa se compone principalmente de residuos frescos de plantas y animales, y se descompone con bastante rapidez. La MO lenta, que consiste principalmente en detritos (células y tejidos de material descompuesto), es parcialmente resistente a la descomposición microbiana, y permanece en el suelo más tiempo que la MO activa. A diferencia de las MO activa y lenta, la MO pasiva, o humus, no es biológicamente activa y corresponde al reservorio responsable de influir sobre las propiedades químicas y físicas del suelo (McCauley et al., 2009).

Temperaturas altas estimularían la mineralización del nitrógeno del suelo a partir de la MO, lo que en teoría conduciría a la liberación de más N inorgánico, pero este proceso, a su vez, está restringido por limitaciones en el contenido de agua del suelo. Es de destacar que un aumento de 5 °C en ecosistemas forestales conduce a una producción adicional de N inorgánico de hasta 80 kg/ha, equivalente a ocho veces los aportes atmosféricos de nitrógeno observados en bosques vírgenes. Aunque la temperatura y la humedad son factores importantes que determinan la mineralización del nitrógeno del suelo, la calidad y cantidad total de sustrato y la actividad microbiana también son importantes. La velocidad de descomposición de la MO depende de la temperatura, la humedad y otras condiciones del suelo que influyen en la actividad microbiana (Campbell et al., 1993, 2009; Gómez-Guerrero & Doane, 2018). En la tabla 6 se relacionan los contenidos de MO en relación con el clima.

Tabla 6. Interpretación del porcentaje de materia orgánica (MO) del suelo

Clima	Bajo	Medio	Alto
Frío	< 5	5–10	> 10
Templado	< 3	3 – 5	> 5
Cálido	< 2	2-3	> 3

Fuente: ICA (1992).

El pH del suelo es reconocido como un importante regulador de la actividad y población microbiana que actúa sobre la MO (Haynes, 1986, cap. 2; Paul & Clark, 1996). Las bacterias son más activas en un rango de pH entre 6 y 8; los actinomicetos, entre 7 y 7,5, y los hongos prefieren condiciones ácidas, con pH que alcanzan valores de 4 (Zapata, 2004). Las reducciones en la velocidad de descomposición de la MO debido a la inhibición de la actividad microbiana inducida por la acidez del suelo probablemente se limitan a los suelos que soportan concentraciones tóxicas de Al (o Mn) soluble (Adams & Martin, 1984). Biederbeck et al. (1996) demostraron que, incluso cuando el pH se redujo de 5,2 a 4,3 mediante el uso prolongado de fertilizantes nitrogenados, la acidez no redujo las poblaciones de hongos y bacterias en suelos arcilloso-calcáreos (marga).

En los municipios de estudio en el Cauca, se encontraron niveles altos de MO, del 12,4%, como posible indicador de la disponibilidad de nitrógeno, y a nivel de planta se registra en promedio un nivel adecuado del 2,7% de N foliar. También se confirman niveles bajos de Al, con valores de 0,11 cmol/kg, que no representan problemas de toxicidad.

pH del suelo

El pH del suelo es un factor importante que afecta muchas reacciones químicas y biológicas, así como la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la toxicidad de algunos elementos. Se define como el

logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno (H^+); un suelo se considera ácido cuando el pH es inferior a 7, neutro con pH de 7 y alcalino con valores superiores a 7. La condición de acidez de un suelo está influida por el tipo de ion predominante para formar ácidos o bases. Los cationes formadores de ácido comunes (iones disueltos cargados positivamente) son hidrógeno (H^+), aluminio (Al^{3+}) y hierro (Fe^{2+} o Fe^{3+}), mientras que los cationes formadores de base comunes incluyen el calcio (Ca^{2+}), el magnesio (Mg^{2+}), el potasio (K^+) y el sodio (Na^+) (McCauley et al., 2009). En la tabla 7 se presenta la clasificación del pH del suelo de acuerdo con el USDA (1993).

Tabla 7. Clasificación del pH del suelo

Valor	Clasificación
< 3,5	Ultra ácido
3,5 – 4,4	Extremadamente ácido
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6,0	Moderadamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	Ligeramente alcalino
7,9 – 8,4	Moderadamente alcalino
8,5 – 9,0	Fuertemente alcalino
> 9,0	Muy fuertemente alcalino
	Vermiculita

Fuente: USDA (1993).

En Colombia, una alta proporción del aguacate se ha establecido en zonas productoras con tradición cafetera. Estas zonas presentan características como altas precipitaciones y baja evapotranspiración, con una consecuente lixiviación de cationes; suelos con predominancia de texturas francas a franco-arenosas, con rápido drenaje;

pH de moderado a fuertemente ácido, y material parental con predominancia de alófanas, con alta retención de aniones como el fosfato, el sulfato, el molibdato y el borato, lo cual genera una fuerte deficiencia de estos nutrientes en los cultivos (Bravo et al., 2016). El pH óptimo del suelo para el aguacate, como recomendación general, oscila entre 5 y 7 (Samson, 1986).

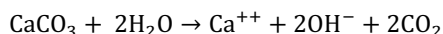
Cuando la lluvia cae sobre el suelo durante gran parte del año y es mayor que la evapotranspiración, provoca por lixiviación la salida del perfil del suelo de los iones más solubles, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , y permanecen los iones que confieren acidez por hidrólisis y que corresponden a los cationes metálicos Al^{3+} , Fe^{3+} y Mn^{4+} . Esta es la causa por la que, a mayores precipitaciones, menor es el pH del suelo (Bolan & Hedley, 2003; Zapata, 2004). En un estudio llevado a cabo por Ortíz-Escobar et al. (2004) en veinte andisoles de la zona cafetera, se encontró que, aunque existen altos contenidos de Al intercambiable ($\text{Al}^{3+} > 1,5 \text{ cmol/kg}$), estos no se encuentran dentro de niveles tóxicos. En las condiciones de Morales y El Tambo (Cauca), se encontraron niveles de concentración de aluminio de $0,14 \pm 0,03$, lo cual se clasifica dentro del rango de normalidad.

Además de los procesos naturales que actúan sobre la acidez del suelo, existen otros factores externos que también contribuyen a incrementarla, como la nutrición de las plantas, la descomposición de la MO , la fertilización y la contaminación química (lluvias ácidas). Por ejemplo, la absorción de nutrientes por las plantas trae consigo una transferencia de H^+ , OH^- y HCO_3^- desde la raíz hacia la solución del suelo, y la oxidación de las formas reducidas de azufre y nitrógeno genera acidez al oxidarse y producir una gran cantidad de protones (Zapata, 2004).

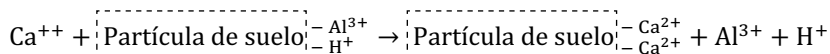
El manejo de la acidez del suelo implica el desarrollo de técnicas que van desde la obtención de plantas con adaptación a condiciones ácidas hasta la orientación de prácticas como el uso de enmiendas (cal y yeso) que modifiquen la condición de acidez hacia la neutralidad, de forma que las plantas puedan tener disponibles todos

los nutrientes necesarios para su desarrollo. Uchida y Hue (2000) describen las siguientes reacciones cuando se agrega a un suelo húmedo materiales comunes de encalado, como óxidos, hidróxidos, carbonatos y silicatos de Ca o mezclas de Ca y Mg:

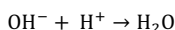
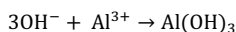
1. La cal se disuelve (lentamente) por la humedad del suelo para producir Ca^{2+} e hidróxido (OH^-).



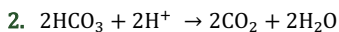
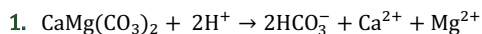
2. El Ca^{++} recién producido se intercambiará con Al^{3+} y H^+ en la superficie de los suelos ácidos:



3. El OH^- producido por la cal reaccionará con Al^{3+} para formar $\text{Al}(\text{OH})_3$ sólido, o reaccionará con H^+ para formar H_2O :



De esta forma, el encalado elimina los iones tóxicos de Al^{3+} y H^+ a través de las reacciones con OH^- . Cuando se usa cal dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ como material de encalado, se obtiene un beneficio adicional por el suministro de Ca^{2+} y Mg^{2+} , que suelen presentarse con baja disponibilidad en suelos ácidos. Las reacciones de neutralización de la acidez que se presentan con el uso de cal dolomita ocurren en dos pasos. En el primer paso, el Ca y el Mg en presencia de agua liberan grupos hidroxilo, además de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , quedando disponibles en los sitios de intercambio de las partículas de arcilla o mo cargadas negativamente, y formando HCO_3^- . En el segundo paso, el HCO_3^- reacciona con H^+ para formar CO_2 y H_2O (Fageria & Nascente, 2014; Sadeghian et al., 2016). A continuación, se describen las ecuaciones que resumen estos pasos:



De acuerdo con Alfaro y Bernier (2008), los andisoles (suelos derivados de cenizas volcánicas) son suelos de carga variable, lo que, sumado a su alta capacidad tampón (resistencia al cambio de pH) y a su moderada CIC, hace muy complejo determinar un método común para el cálculo de los requerimientos de cal. Existen ecuaciones empíricas propuestas en la literatura para determinar los requerimientos de cal. La siguiente ecuación propuesta por Cochrane et al. (1980) contempla el porcentaje que representa la saturación de Al de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), para calcular la cantidad de cal por aplicar:

$$\text{Dosis de CaMgCO}_3/\text{ha} = 1,5 [\text{Al} - \text{RSA} (\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg})/100]$$

Donde,

Al, Ca y Mg = cmol/kg de suelo de aluminio, calcio y magnesio.

RSA = porcentaje requerido de saturación de Al en relación con la CICE.

CICE = $\sum(\text{Al}, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{K}, \text{Na})$ en cmol/kg.

1,5 = un factor empírico que depende de las cantidades relativas de acidez del suelo intercambiable y no intercambiable.

El aluminio existe en los suelos en muchas formas minerales, incluidos óxidos hidratados, aluminosilicatos, sulfatos y fosfatos. En suelos ácidos se presenta una alta saturación de Al, y dado que su solubilidad depende en gran medida del pH, cuando un suelo ácido es encalado, el Al intercambiable y soluble se precipita en forma de especies de hidroxil-Al (Haynes & Mokolobate, 2001). Como alternativa para reducir los niveles de concentración de Al en el

suelo y su posible toxicidad, los productos de descomposición de la MO (ácidos húmicos y orgánicos) pueden formar complejos con Al .

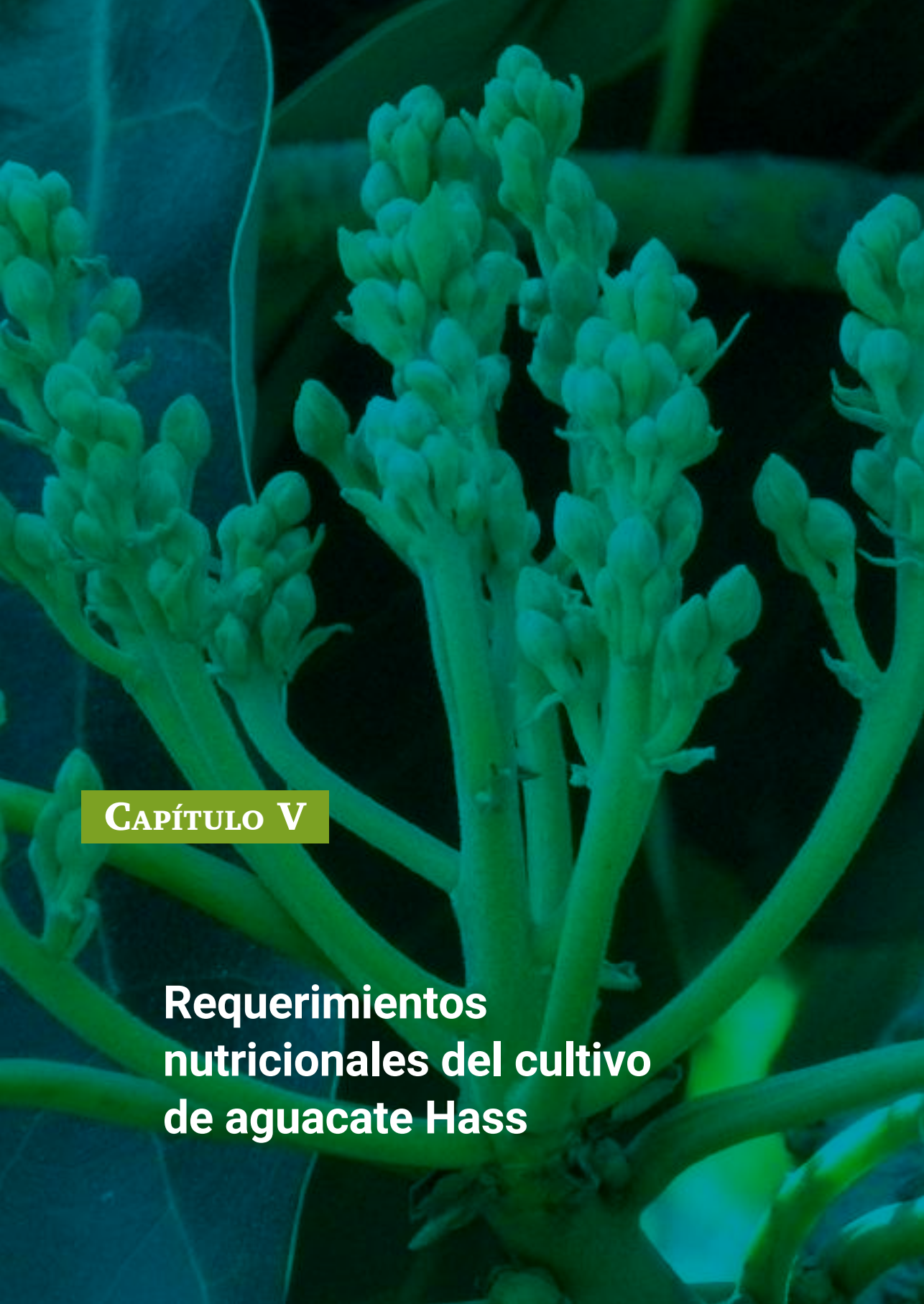
La efectividad del material calcáreo utilizado depende de su velocidad de reacción con el suelo, que a su vez está determinada por la finura de sus partículas, el pH inicial del suelo, el grado en que se mezcla con el suelo y su naturaleza química; por ejemplo, los óxidos e hidróxidos reaccionan más rápidamente que los carbonatos. En la tabla 8 se relacionan los materiales comúnmente utilizados, así como su valor relativo de neutralización (Uchida & Hue, 2000).

Tabla 8. Materiales utilizados para el encalado

Material	Nombre comercial	Valor relativo de neutralización
Caliza calcítica	Carbonato de calcio (CaCO_3)	100
Cal viva	Óxido de calcio (CaO)	150-175
Cal hidratada	Hidróxido de calcio Ca(OH)_2	120-135
Cal dolomita	Carbonato de calcio-magnesio	95-108

Fuente: Elaboración propia con base en Uchida y Hue (2000).



A close-up photograph of an avocado branch with several clusters of small, light green flower buds. The buds are arranged in dense, elongated panicles. The background is dark and out of focus, showing more of the plant's structure.

CAPÍTULO V

Requerimientos nutricionales del cultivo de aguacate Hass



La cantidad de nutrientes disponible en el suelo debe suplir los requerimientos del cultivo para el óptimo desarrollo de las distintas fases fenológicas que se presentan en cada ciclo productivo, y su disponibilidad depende de las características biofísicas y ambientales predominantes en cada tipo de suelo, que a su vez determinan la necesidad de suplir nutrientes con la aplicación de fuentes externas. Además, existen ciertos estados de desarrollo clave en las plantas para orientar los planes de fertilización, que representan fases fenológicas de mayor demanda y que requieren de un suministro adecuado de nutrientes:

1. El estado posterior a la cosecha o de yema en latencia, cuando las plantas han pasado por un periodo de extracción fuerte de nutrientes por parte del fruto.
2. El momento de apertura floral, que está acompañado de mayores tasas transpiratorias.
3. La primera fase de crecimiento del fruto, cuando se presenta una alta actividad de división para la construcción de tejidos.
4. La segunda fase de crecimiento del fruto, caracterizada por una mayor actividad de elongación celular y la acumulación de grasas y minerales.

En la figura 13 (Capítulo 2), donde se describe el calendario fenológico del aguacate en las condiciones de Morales y el Tambo (Cauca), se confirma la presencia de dos flujos de crecimiento

en el año, con estados fenológicos que coinciden en el árbol al mismo tiempo y que requieren del aporte de nutrientes mes a mes para garantizar su disponibilidad durante las fases de mayor sensibilidad y demanda. Además, por las características de los suelos arenosos o franco-arenosos (FA), es necesario restituir la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) con aportes de fuentes de fertilización externa.

Características de las muestras de suelo para análisis

AGROSAVIA generó una guía para la toma de muestras de suelo y estableció un convenio con puntos de Efecty-Servientrega, en 750 municipios del país, para la recepción y envío de muestras de análisis de suelos. Esta iniciativa busca mejorar el acceso a herramientas para la toma de decisiones, por parte de los productores, que les permitan mejorar los criterios para enfocar los planes de fertilización.

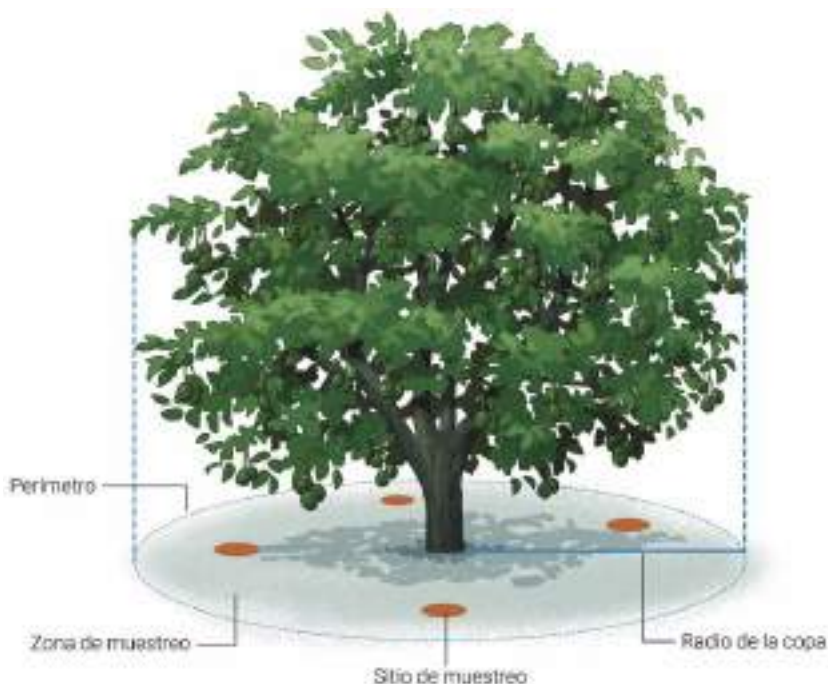
Aspectos generales

A continuación, se relacionan los puntos que se debe tener en cuenta para asegurar la homogeneidad en las muestras de suelos para análisis químico:

1. En general, las muestras se deben transportar de manera que se minimicen los cambios en el contenido del agua del suelo; además, se debe evitar las condiciones ambientales extremas. El suelo se debe mantener lo más fresco posible, y hay que evitar tanto la exposición a la luz durante periodos prolongados como la compactación física.
2. Las muestras no deben empacarse en bolsas o materiales que hayan contenido fertilizantes o sustancias químicas.

3. Debe evitarse la manipulación de las muestras cuando se esté fumando y se debe usar guantes para tomar las muestras, con el fin de evitar la contaminación por efecto de la sudoración de la persona.
4. Se recomienda tomar una muestra compuesta por 15-20 submuestras por hectárea. Dependiendo de la heterogeneidad del terreno (color, textura, relieve, manejo agronómico), puede aumentar o disminuir la intensidad del muestreo.
5. Para el caso de plantaciones de árboles, lo usual es seleccionar, al azar, entre 15 y 20 árboles por cada 10 ha y tomar las submuestras en la gotera del árbol (figura 15).

Figura 15. Zona de muestreo en árboles frutales, forestales, ornamentales, etc.



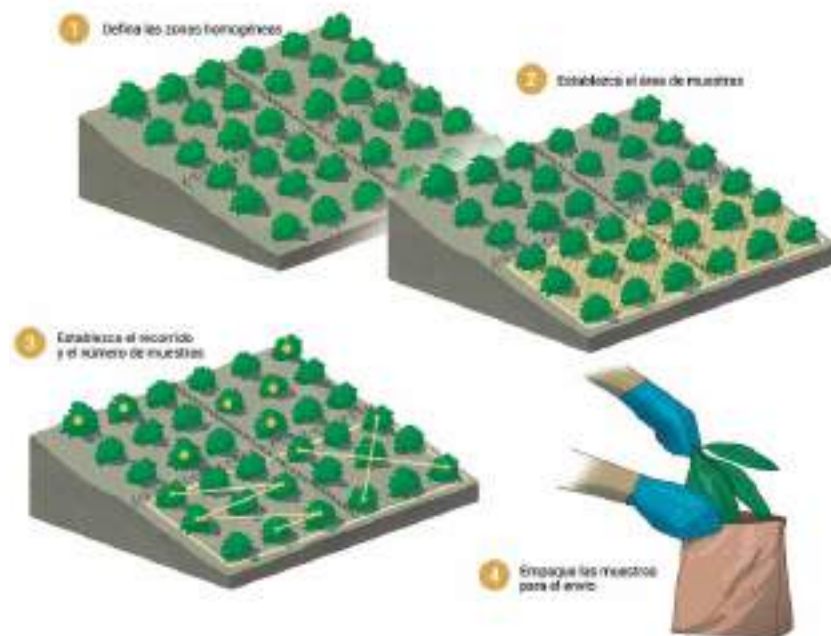
Fuente: Elaboración propia con base en Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica, 2013).

Proceso de muestreo

Con el fin de garantizar que los resultados de los análisis de suelos reflejen su estado nutricional como herramienta en la toma de decisiones para definir los planes de fertilización, a continuación se presentan algunos criterios que se deben tener en consideración en el momento de tomar las muestras para el análisis químico:

1. Definición o selección de áreas homogéneas de terreno en la finca (figura 16): un área homogénea de terreno se puede definir en campo por las siguientes características (Corpoica, 2013):
 - *Relieve*: se deben separar las áreas con distinto relieve, como las áreas planas de otras pendientes.
 - *Color*: se deben separar las áreas con distintos colores; por ejemplo, los suelos oscuros de los claros, rojos o amarillos.
 - *Textura*: se deben separar las áreas con texturas arcillosas de las arenosas.
 - *Drenaje*: se deben separar los suelos bien drenados de los mal drenados (los suelos bien drenados presentan condiciones de oxidación, mientras que los mal drenados presentan condiciones de reducción).
 - *Manejo agronómico*: se deben separar los suelos con cultivos diferentes o manejos diferentes. Es conveniente evitar aquellas áreas muy pequeñas, que difieren mucho del resto del campo y que, por su tamaño, no tienen significación en la producción de cultivos.

Figura 16. Separación de áreas homogéneas de terreno.



Fuente: Elaboración propia con base en Corpoica (2013).

2. *Definición de la profundidad del muestreo:* para cultivos perennes, como los árboles frutales, se puede muestrear de 40 a 60 cm de profundidad. También se debe tener en cuenta que la profundidad para todos los muestreos en el área homogénea de terreno debe ser la misma.
3. *Establecimiento del recorrido del terreno:* normalmente existen tres formas de recorrer el terreno: en zigzag, zeta o equis (muestreo recorriendo las diagonales del terreno). Se puede realizar cualquier recorrido, siempre y cuando se recorra muy bien el lote, para que las muestras que se tomen sean representativas. Asimismo, se debe evitar tomar muestras cerca de las cercas, vallados, saladeros, casas, carreteras, albercas y cualquier anomalía que pueda afectar las características por evaluar del terreno.

Características de las muestras de tejido foliar

Después de una cosecha, y dependiendo del nivel de carga del árbol, se requiere reponer al suelo al menos la misma cantidad de nutrientes extraídos por los frutos. En este sentido, las hojas de brotes vegetativos que darán inicio al crecimiento reproductivo del siguiente ciclo de producción pueden ser un indicador del estado nutricional en que queda la planta después de mantener una alta carga de cosecha. Si se realiza un muestreo posterior, es conveniente tomar hojas del flujo de crecimiento vegetativo que se desarrolla a partir de inflorescencias indeterminadas que forman parte de la floración principal, puesto que estas están asociadas con el aporte de nutrientes para los frutos en crecimiento.

El tamaño de una unidad de muestreo no debe superar las 2 ha. La parcela debe ser lo más uniforme posible en cuanto a la edad, el suelo, el cultivo y el desarrollo de los árboles. Las muestras incluyen lámina y peciolo de las hojas, y se deben tomar a una altura entre 1,5 m y 2,0 m. Se toman de seis a ocho hojas de cada uno de los diez árboles muestreados y se guardan en bolsas de papel para su posterior envío para análisis.

Índice de balance de nutrientes (IBN)

El suelo es la principal fuente de minerales para las plantas; estos pasan desde las raíces hacia la parte aéreas, a través del sistema vascular, por lo que el análisis de tejidos es un método utilizado tanto en prácticas agrícolas como en investigación para determinar el estado nutricional de la planta durante todas sus fases de crecimiento. Los suelos de las zonas experimentales evaluadas en los municipios de Morales y El Tambo (Cauca) se caracterizan por tener una baja *cic*. Estudios previos evidencian una relación directa entre

el estado nutricional de los árboles de aguacate y la disponibilidad de elementos en el suelo (García-Martínez et al., 2021), y algunas características, como pH ácido, bajos niveles de Mo y altos o muy altos niveles de Cu, Fe, K, Ca, B y Zn, condujeron a un desbalance nutricional en las hojas (Maldonado-Torres et al., 2007).

La técnica de IBN se considera apropiada para definir planes de fertilización en árboles frutales, ya que incluye, para su cálculo, dos criterios: por un lado, un valor estándar (óptimo) del contenido de cada nutriente, obtenido de árboles seleccionados por sus altos rendimientos; por otro lado, la variación fisiológica o desviación estándar del contenido de cada elemento existente en dicha población de árboles seleccionados. Los IBN desarrollados por Kenworthy (1973) han sido utilizados exitosamente en México para diagnosticar el estado nutrimental del aguacate Hass y Fuerte en Michoacán, Nayarit y Puebla (Hernández-Vélez et al., 2012; Maldonado-Torres et al., 2007; Núñez-Moreno et al., 1991; Palacios, 1986; Salazar-García & Lazcano-Ferrat, 1999, 2003), así como de mangos de las variedades Haden y Tommy Atkins en Nayarit (Salazar-García et al., 1993) y del limón mexicano en Michoacán (Maldonado et al., 2001).

Una vez se cuenta con los resultados de los análisis de tejidos, los cálculos se hacen con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1: si el valor reportado en el laboratorio (x) es menor que el valor estándar:

$$P = \left(\frac{x}{s}\right) * 100 \quad I = (100 - P) * \left(\frac{CV}{100}\right) \quad B = P + I$$

Ecuación 2: si el valor reportado en el laboratorio (x) es mayor que el valor estándar:

$$P = \left(\frac{x}{s}\right) * 100 \quad I = (p - 100) * \left(\frac{CV}{100}\right) \quad B = P - I$$

Donde,

s = valor estándar.

I = influencia de la variación.

P = porcentaje del estándar.

CV = coeficiente de variación.

B = índice de balance.

Varios autores han reportado valores estándar para aguacate Hass (Salazar-García & Lazcano-Ferrat, 1999; Maldonado-Torres et al., 2007). Con el fin de determinar los valores estándar en las zonas de estudio de Morales y El Tambo, en el mes de junio se tomaron muestras foliares provenientes de 80 árboles con una producción superior a 80 kg/árbol. Las muestras correspondieron a lámina más peciolo, completamente expandidas, maduras pero no senescentes, y provenientes de brotes terminales sin fruto orientados hacia los cuatro puntos cardinales. Se cuantificaron los elementos P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B y se utilizó la concentración nutrimental promedio para obtener los valores estándar y los coeficientes de variación (tabla 10).

Mickelbart et al. (2007) reportan diferencias en los niveles de nutrientes en hojas de aguacate Hass injertadas sobre diferentes razas de aguacate usadas como portainjertos. Por ejemplo, las hojas de árboles de aguacate injertados en portainjertos de la raza mexicana presentaron un mayor contenido de N que las de árboles injertados en portainjertos guatemaltecos, pero menores contenidos de Mg y Ca. Se observaron resultados similares cuando se compararon los portainjertos mexicanos con los de la raza antillana, pues aquellos arrojaron un mayor contenido de N y K y un menor contenido de

Ca y Mg (Willingham et al., 2006). Estos resultados indican que el patrón puede tener una influencia sobre los niveles de concentración de nutrientes a nivel foliar, lo que, sumado a las diferencias en las condiciones biofísicas de las diferentes zonas de estudio, puede explicar la variación en los valores estándar de elementos como B, Mn y Fe referenciados en la tabla 10.

Tabla 10. Valores estándar (S) y coeficientes de variación (CV)

Nutrimento	Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2003)		Maldonado et al. (2007)		Calculados para Cauca (2022)	
	S	CV (%)	S	CV (%)	S	CV (%)
Nitrógeno (%)	2,35	10,9	1,92	34,54	2,54	12,63
Fósforo (%)	0,14	11,1	0,15	13,66	0,15	12,63
Potasio (%)	1,37	15,9	0,93	15,38	1,18	21,54
Calcio (%)	1,86	17,6	1,92	34,54	1,31	17,11
Magnesio (%)	0,58	15,7	0,68	11,56	0,32	20,05
Azufre (%)	0,4	11	nr	nr	0,22	15,4
Hierro (ppm)	91	38,9	98,2	15,08	76,12	24,3
Cobre (ppm)	10	70,4	19,5	66,18	8,1	19,6
Manganeso (ppm)	240	38,9	134	35,73	113,3	53,1
Zinc (ppm)	27	32,8	34,9	43,98	34	26,5
Boro (ppm)	75	49,3	238,6	47,51	19,9	23,7
Sodio (%)	0.03	13,1	nr	nr	0,01	6,04

NR: no reportado

Fuente: Elaboración propia con base en Salazar-García y Lazcano-Ferrat (1999), Maldonado-Torres et al. (2007) e investigaciones ejecutadas en el Cauca.

De acuerdo con los resultados después de aplicar las ecuaciones 1 y 2, según fuera el caso, los valores se comparan con los siguientes rangos propuestos por Kenworthy (1973) (tabla 11):

Tabla 11. Rangos en términos de porcentaje del estado nutricional de hojas de aguacate, de acuerdo con el enfoque del índice de balance nutricional (IBN) propuesto por Kenworthy (1973)

Escasez	Debajo de lo normal	Normal	Arriba de lo normal	Exceso
15-49 %	>49-83 %	>83-117 %	>117-151 %	>151-185 %

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de facilitar la comprensión en el uso de las ecuaciones para realizar los cálculos a partir de los análisis de tejidos, y para tener una interpretación clara del estado nutricional de la planta, a continuación se toman como referencia los resultados de la localidad de Timbío (Cauca). El análisis de tejido que se generó se presenta en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados del análisis de tejidos de aguacate Hass para la localidad de Timbío (Cauca)

Nutriente	Resultado foliar (X)	Valor estándar (S)
Nitrógeno (%)	2,47	2,54
Fósforo (%)	0,14	0,15
Potasio (%)	0,65	1,18
Azufre (%)	0,22	0,22
Calcio (%)	1,56	1,86*
Magnesio (%)	0,44	0,58*
Hierro (ppm)	101,59	76,12
Cobre (ppm)	15,2	8,1
Manganeso (ppm)	652	113,3
Zinc (ppm)	31,5	34
Boro (ppm)	25,66	75,66*
Sodio (%)	0,003	0.03

* Valores estándar tomados como referencia de Salazar-García y Lazcano-Ferrat (1999).

Fuente: Elaboración propia con base en valores estándar obtenidos en investigaciones ejecutadas en el Cauca (2022).

De acuerdo con las ecuaciones para el cálculo del IBN, y teniendo en cuenta los valores de la tabla 12, los elementos menores Fe, Cu y Mn se encuentran por encima del valor estándar. Para estos elementos se aplicaría la ecuación 2; para los demás elementos, que se encuentran por debajo del valor estándar, correspondería la ecuación 1.

Ecuación 1: si el valor reportado en el laboratorio (x) es menor que el valor estándar:

$$P = \left(\frac{x}{s}\right) * 100 \quad I = (100 - P) * \left(\frac{CV}{100}\right) \quad B = P + I$$

Nitrógeno:

$$P = \left(\frac{2,47}{2,54}\right) * 100 = 97,24$$

$$I = (100 - 97,24) * \left(\frac{12,6}{100}\right) = 2,76 * 0,126 = 0,348$$

$$B = 97,24 + 0,348 = 97,59$$

Fósforo:

$$P = \left(\frac{0,14}{0,15}\right) * 100 = 93,33$$

$$I = (100 - 93,33) * \left(\frac{12,6}{100}\right) = 6,66 * 0,126 = 0,84$$

$$B = 93,33 + 0,84 = 94,18$$

Potasio:

$$P = \left(\frac{0,65}{1,18}\right) * 100 = 55,08$$

$$I = (100 - 55,08) * \left(\frac{21,5}{100}\right) = 44,91 * 0,215 = 9,66$$

$$B = 55,08 + 9,66 = 64,74$$

Con base en estos cálculos, para los elementos primarios, de acuerdo con la figura 17, donde se relacionan los rangos en términos de porcentaje del estado nutrimental de hojas de aguacate, el N y el P se encuentran dentro del rango normal, y el K en una condición de escasez.

Para el calcio, cuyo valor obtenido en el análisis de tejidos se encuentra por encima del valor estándar, se aplicaría la ecuación 2:

Ecuación 2: si el valor reportado en el laboratorio (x) es mayor que el valor estándar:

$$P = \left(\frac{x}{s}\right) * 100 \quad I = (P - 100) * \left(\frac{CV}{100}\right) \quad B = P + I$$

Calcio:

$$P = \left(\frac{1,56}{1,31}\right) * 100 = 119,08$$

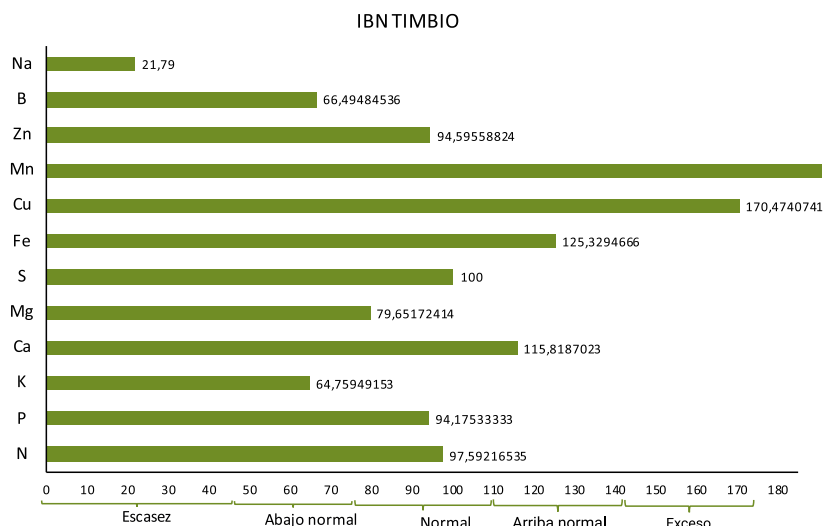
$$I = (119,08 - 100) * \left(\frac{17,1}{100}\right) = 19,08 * 0,171 = 3,263$$

$$B = 119,08 - 3,171 = 115,82$$

De acuerdo con la figura 17, el calcio se encuentra dentro del rango normal.

En la figura 17 se relaciona el resultado del estado nutrimental para cada elemento con base en el análisis de tejidos que se obtuvo en la localidad de Timbío (Cauca).

Figura 17. Índice de balance nutricional (IBN) para un cultivo de diez años de aguacate Hass ubicado en Timbío (Cauca).



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados, se observa que los elementos N, P, Ca, Zn y S se encuentran dentro del rango normal; los elementos K, Mg y B se encuentran debajo de lo normal, y el Na se encuentra en condición de escasez. Los microelementos Fe, Cu y Mn se encuentran por encima de lo normal o en exceso. Con base en estos datos, se debe tomar la decisión sobre qué cantidad de fertilizante aplicar, haciendo el respectivo análisis para cada elemento. Cabe recordar que, como se describió en el Capítulo 4, sobre las propiedades químicas del suelo, las características descritas en este estudio de caso son propias de suelos ándicos, caracterizados por ser profundos y bien drenados, con texturas moderadamente gruesas-moderadamente finas, moderado a fuertemente ácidos, con contenidos altos de aluminio y fertilidad natural baja-moderada, debido a su baja CIC (IGAC, 2009).

La ecuación general para calcular las necesidades de fertilización (Sastre-Decasa et al., 2018) considera la cantidad del elemento requerida por el cultivo; en otras palabras, la cantidad de cada

elemento extraída por cosecha, el contenido de cada elemento disponible en el suelo y la eficiencia de la aplicación. Los valores de referencia para la remoción de minerales por parte de los frutos se obtuvieron del estudio llevado a cabo en las condiciones del Cauca (tabla 16) y de trabajos reportados por Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2001) para aguacate Hass en México. Los valores de referencia para la eficiencia de los fertilizantes se tomaron de documentos publicados sobre la eficiencia del uso de fertilizantes en los trópicos y la nutrición vegetal para la seguridad alimentaria (Baligar & Bennett, 1986; Roy et al., 2006). En este trabajo se utilizaron eficiencias del 50 % para N, el 10 % para P, el 70 % para K y el 60 % para Ca y Mg. El análisis de tejidos y el enfoque del IBN para su interpretación son un complemento importante de esta ecuación, ya que permiten conocer la condición en que se encuentra cada elemento en la planta, con el fin de balancear los nutrientes presentes en el suelo, sin incurrir en excesos o deficiencias, y procurando un máximo rendimiento del cultivo.

Ecuación 3: cálculo de las necesidades de fertilización para cada elemento:

$$NF = \left(\frac{CRPC - CPS}{EA} \right) * 100$$

Donde,

NF = necesidad de fertilización.

CRPC = cantidad requerida por el cultivo.

CPS = cantidad presente en el suelo.

EA = eficiencia de la aplicación.

Para ello, se proponen algunas combinaciones de las posibles situaciones que se pueden llegar a encontrar en un cultivo, en

relación con los niveles de extracción de cada elemento por el fruto, la disponibilidad del elemento en el suelo y el contenido en hojas (tabla 13).

Tabla 13. Posibles combinaciones de relaciones entre la disponibilidad de elementos en el suelo y el contenido en la planta, para determinar la cantidad de fertilizante por aplicar

	Posibles combinaciones en nutrición mineral			Interpretación en análisis foliar	Observaciones
1	Extracción de nutrientes por el fruto (t/ha)	<	Disponibilidad de nutrientes en el suelo	Normal	Se sugiere aplicar al menos la cantidad extraída por la cosecha, con el fin de evitar su agotamiento.
2		>		Normal	Se sugiere aplicar el 100 % del valor correspondiente a la necesidad de fertilización, calculado con la ecuación 3. Revisar relaciones entre nutrientes, fuentes de fertilizantes y pH del suelo, que pueden estar afectando su disponibilidad y absorción por la planta.
3		>		Abajo de lo normal	
4		<		Abajo de lo normal	Revisar relaciones entre nutrientes, fuentes de fertilizantes y pH del suelo, que pueden estar afectando su disponibilidad y absorción por la planta.
5		<		Exceso	Verificar si dentro del plan de fertilización se están incluyendo aquellos nutrientes que por condición natural (material parental, tipo de arcillas, etc.) se encuentran en altas concentraciones y fácilmente disponibles para la planta. Revisar relaciones entre nutrientes o fuentes de fertilizantes que estén alterando la condición de pH del suelo y, por lo tanto, las condiciones químicas que puedan estar alterando su concentración en el suelo y en la planta.
6		>		Exceso	

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 13, por ejemplo, en la combinación 1, si la extracción del elemento es menor que la cantidad del elemento disponible en el suelo y, en el análisis de tejido, el contenido es normal según el IBN, se recomienda reponer al menos la cantidad de nutriente extraída por la cosecha como dosis de mantenimiento, con el fin de no agotar las reservas disponibles en el suelo.

Como criterio para incorporar el análisis de tejidos con base en el IBN en las decisiones para ajustar el plan de fertilización edáfico, se siguieron los lineamientos propuestos en el *Boletín de Fertilizantes y Nutrición Vegetal*, de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en los apartados sobre manejo de nutrientes vegetales y sus fuentes, y evaluación del estado de los nutrientes disponibles de suelos y plantas (Roy et al., 2006), tomando en consideración los siguientes aspectos:

1. Determinar si el manejo estándar por parte del productor está garantizando el suministro de nutrientes para la planta, manteniendo los nutrientes en el rango de concentración normal a nivel de tejidos.
2. Los nutrientes que se encuentren dentro del rango normal, debajo de lo normal y deficientes serán retornados al suelo en cantidades iguales a los nutrientes removidos por la cosecha, cuando estos valores sean inferiores a la capacidad de suministro de nutrientes por el suelo, con el fin de evitar el agotamiento de reservas.
3. Los minerales que se encuentren dentro de los rangos arriba de lo normal y en exceso a nivel foliar no serán incluidos dentro del plan de fertilización.

Necesidades de fertilización

Con el fin de facilitar la comprensión sobre la aplicación de las ecuaciones para llegar al cálculo de las necesidades de fertilización con fuentes externas, tomaremos como ejemplo el resultado del

análisis de suelo de la localidad de Timbío. Los valores para cada elemento obtenidos del análisis serán interpretados con base en las tablas propuestas en el documento “Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación”, del *Manual de asistencia técnica* del ICA (1992) (tabla 14).

Tabla 14. Valores propuestos en la “Quinta aproximación” del *Manual de asistencia técnica* del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)

Nutriente	Interpretación		
	Bajo	Normal	Alto
MO Clima frío (%)	<5	5-oct	>10
MO Clima templado (%)	<3	3-may	>5
MO Clima cálido (%)	<2	2-mar	>3
P Método Olsen (mg/kg)	<20	20-40	>40
P Método Bray (mg/kg)	<8	8-13	>13
Azufre (mg/kg)	<10	oct-20	>20
Calcio (cmol/kg)	<3	3-oct	>10
Magnesio cmol/kg)	<1,5	1,5-3,0	>3
Potasio (cmol/kg)	<0,2	0,2-0,4	>0,4
CICE	<10	oct-20	>20
CE (dS/m)	<2	2-abr	>4
Hierro (mg/kg)	<50	50-100	>100
Cobre (mg/kg)	<1,5	1,5-3	>3
Manganeso (mg/kg)	<5	5-oct	>10
Zinc (mg/kg)	<1,5	1,5-3	>3
Boro (mg/kg)	<0,2	0,2-0,4	>0,4

CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva; **CE:** Conductividad eléctrica.

Fuente: ICA (1992).

La interpretación inicial arroja como resultado los valores de la tabla 15, en la cual se especifica el rango en el que se encuentra cada elemento. A partir de esta información, utilizando la ecuación 3, se define la cantidad de fertilizante por aplicar de cada nutriente.

Tabla 15. Contenido nutricional del suelo en la localidad de Timbío (Cauca) y diagnóstico con base en los rangos de la “Quinta aproximación” del *Manual de asistencia técnica* del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)

Elemento	0-45 cm	Interpretación
pH	5,05	Fuertemente ácido
MO (%)	4,4	Normal
Fósforo (mg/kg)	3,87	Bajo
Azufre (mg/kg)	6,38	Bajo
Aluminio (cmol/kg)	0,74	
Sat. Al (%)	6,5	
Calcio (cmol/kg)	2,74	Bajo
Magnesio (cmol/kg)	1,18	Bajo
Potasio (cmol/kg)	0,37	Normal
Sodio (cmol/kg)	0,14	Normal
CICE	5,48	Baja
CE (dS/m)	0,16	Normal
Hierro (mg/kg)	140,28	Alto
Cobre (mg/kg)	3,74	Alto
Manganeso (mg/kg)	13,26	Alto
Zinc (mg/kg)	1,35	Bajo
Boro (mg/kg)	0,09	Bajo
Textura	FA	Franco arenosa

Fuente: Elaboración propia con base en ICA (1992).

Según la información que se requiere para la ecuación 3, se necesita conocer la cantidad de nutrientes presente en el suelo (CPS), expresada en kg/ha; para su cálculo, primero se debe conocer cuál es el peso de una hectárea de suelo, aplicando la ecuación 4:

Ecuación 4: cálculo para determinar el peso de una hectárea de suelo:

$$\text{Peso de suelo (kg/ha)} = \text{área (m}^2\text{)} * \text{prof (m)} * \text{DA (g/cm}^3\text{)} * 1.000$$

$$\text{PS} = 10.000 \text{ m}^2 * 0,45 \text{ m} * 0,52 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 1.000 = 2.340.000 \text{ kg de suelo/ha}$$

Esta información será retomada en el ejercicio para calcular el requerimiento de cada elemento.

Además de la cantidad de nutrientes presentes en el suelo, se requiere conocer la cantidad que requiere el cultivo. Este valor representa la cantidad de nutrientes que extrae la cosecha. Para el departamento del Cauca, se llevó a cabo el registro de producción por árbol en los municipios de Morales y El Tambo, con producciones superiores a 85 kg/árbol. A partir de los valores obtenidos en el análisis del contenido de elementos minerales del fruto provenientes de estos árboles, se generaron los niveles de extracción para cada elemento. En aquellos nutrientes en los que se presentaron grandes diferencias, se tomaron como referencia los reportados por Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2001) y Maldonado-Torres et al. (2007), también para un rendimiento de 20 t/ha (tabla 16):

Tabla 16. Valores de extracción de nutrientes en un cultivo de aguacate Hass para un rendimiento de 20 t/ha

Nutriente	Extracción (kg/ha)		
	Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2001)	Maldonado et al. (2007)	Calculados para Cauca (2022)
Nitrógeno	51,5	54,6	53,6
Fósforo	20,6	14,4	7,6
Azufre	6,9	nr	5,1
Calcio	1,7	4,6	2,8
Magnesio	5,9	30	4,9
Potasio	93,8	80	82,9
Hierro	0,12	0,19	0,13
Cobre	0,04	0,05	0,04
Manganeso	0,02	0,03	0,03
Zinc	0,08	0,08	0,1
Boro	0,08	0,11	0,23

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el resultado del análisis de suelos reportado en la tabla 15, y en general como condición natural de suelos con propiedades ándicas, los datos representan a un grupo de suelos derivados de ceniza volcánica que presentan densidad aparente $\leq 0,9 \text{ g/cm}^3$, retención de fosfatos $\geq 85 \%$, y por la naturaleza de la fracción arcillosa amorfa y los complejos organominerales de aluminio y hierro, tienen alta superficie específica y abundantes sitios reactivos para la retención de fosfatos, lo cual provoca baja disponibilidad (Alcalá et al., 2009). Con el fin de garantizar que el requerimiento —es decir, la cantidad de nutriente extraída— pueda suplir con suficiencia la condición de escasez que se pueda presentar a nivel de suelo o que represente un aporte sustancial frente al contenido existente en el suelo, para el fósforo se tomará como referencia el valor reportado por Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2001). Para el resto de los nutrientes, se tomarán como referencia los valores de extracción calculados para Morales (en 2022) y reportados en la tabla 16, con el fin de cuantificar la necesidad de fertilización (NF) en las siguientes ecuaciones.

Nitrógeno

Retomemos la ecuación 3, para calcular la necesidad de fertilización:

$$NF = \left(\frac{CRPC - CPS}{EA} \right) * 100$$

Donde,

NF = necesidad de fertilización

CRPC = cantidad requerida por el cultivo

CPS = cantidad presente en el suelo

EA = eficiencia de la aplicación

Para obtener la CPS, se calcula el aporte de nitrógeno a partir del contenido de MO que se reporta en el análisis de suelos. En la tabla 15 se encuentran los valores de MO para una profundidad de 0-45 cm, que abarca la profundidad efectiva de la raíz.

Dado lo anterior, el contenido de MO para una profundidad de 0-45 cm es del 4,4 %, lo que significa que en 100 kg de suelo hay 4,4 kg de MO. Con base en el resultado de la ecuación 4, se hace el cálculo para una hectárea de suelo:

$$\text{Si } 100 \text{ kg suelo} - 4,4 \text{ kg de MO}$$

$$2.340.000 \text{ kg de suelo/ha} - x$$

$$X = 102.960 \text{ kg de MO/ha}$$

La MO contiene el 5 % de N total (orgánico e inorgánico):

$$\text{N total} = 102.960 \text{ kg de MO} * 5 \% = 5.148 \text{ kg de N total/ha}$$

El coeficiente de mineralización de la MO es del 1,5 %:

$$\text{N inorg. disponible} = 5.148 * 1,5 \% = 77,22 \text{ kg de N inorg. disponible/año}$$

$$\text{N disponible/planta} = \frac{77,22 \text{ kg de N/ha}}{204 \text{ plantas/ha}} = 378,53 \text{ g de N/planta}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de N presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 53,6 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 77,22 kg de N/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 50 % (tomado de la tabla 16).

En este caso, la cantidad presente en el suelo excede el valor extraído por la cosecha, lo que significa que se debe aplicar al menos la cantidad de nitrógeno extraída por la cosecha. En capítulos anteriores se han descrito varios factores que pueden afectar la disponibilidad y utilización de nutrientes por las plantas. Además de las altas precipitaciones, el material parental y el tipo de arcilla, el uso de fuentes de fertilización nitrogenada puede contribuir a aumentar la acidificación del suelo. Cabe recordar que la nitrificación del N en fertilizantes nitrogenados que contienen amonio (NH_4^+) puede generar acidez en el suelo, debido a la liberación de iones de hidrógeno (H^+), y que cada mol de N proveniente del sulfato de amonio (SA) produce 4 moles de H^+ , mientras que cada mol de N proveniente de la urea o del nitrato de amonio (NA) produce solamente 2 moles de H^+ (Adams, 1984). Esto sugiere que el SA es dos veces más acidificante que el NA o la urea (Chien et al., 2008).

Tomando en consideración los efectos sobre el suelo de la fertilización con altas dosis de nitrógeno, ya que el contenido en el suelo es mayor que la cantidad extraída por la cosecha, y teniendo en cuenta que a nivel foliar el N se encuentra en condición de normalidad según la interpretación del IBN, se recomienda aplicar al menos la cantidad extraída por la cosecha, que para este caso es de 53,6 kg/ha, y, dividido por la eficiencia de la aplicación del fertilizante, correspondería a 107,2 kg/ha.



Fósforo

Para calcular las necesidades de P, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 3,87 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

Si 1.000.000 kg de suelo – 3,87 kg de P

2.340.000 kg de suelo/ha – X

$x = 9,06 \text{ kg de P/ha}$

Este valor corresponde a la forma elemental en que se encuentra el P en el suelo; para calcularlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor, que para este caso es 2,29:

$9,06 \text{ kg} * 2,29 = 20,7 \text{ kg de } P_2O_4 / \text{ha}$

Con el valor obtenido de la cantidad de P presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 20,6 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 20,7 kg de P/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 30%.

De acuerdo con la figura 17, que expresa la cantidad de nutrientes presentes en la planta con base en el IBN, el P presenta una condición de normalidad. Teniendo en cuenta que la cantidad requerida por el cultivo (20,6 kg/ha) es similar a la cantidad presente en el suelo (20,7 kg/ha), se aplica la cantidad extraída por la cosecha, que, teniendo en cuenta la eficiencia de la aplicación, correspondería a 68,7 kg/ha. Cabe recordar que, en una condición de acidez del

suelo, el fósforo reacciona con el aluminio, el hierro y el magnesio, fenómeno que conduce a la fijación o retención de fósforo. En este sentido, se sugiere el uso de fuentes de fósforo de baja reactividad. Es importante resaltar que las plantas absorben la mayor parte de P como H_2PO_4^- , es decir, en su forma monovalente, y en menor proporción como HPO_4^{2-} , en forma divalente.

Potasio

Para calcular las necesidades de K, el contenido en los primeros 45 cm de profundidad del suelo es de 0,37 cmol/kg, que equivalen a miliequivalentes de K por cada 100 kg de suelo.

$$1 \text{ meq de K} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia} * 1.000} = \frac{39}{1 * 1.000} = 0,039 \text{ meq de K/100 kg de suelo}$$

A partir de este valor, se calcula la cantidad de K para una hectárea de suelo:

$$\text{Si } 0,039 \text{ meq de K} - 100 \text{ kg de suelo}$$

$$X - 2.340.000 \text{ kg de suelo/ha}$$

$$X = 912,6 \text{ meq de K/ha}$$

Recordemos que este resultado de 912,6 meq de K/ha se obtuvo a partir de convertir 1 cmol/kg en miliequivalentes por cada 100 kg de suelo. A continuación, se hace el cálculo para el contenido de K reportado en el análisis de 0,37 cmol/kg o 0,37 meq/100 kg:

$$\text{Si } 912,6 \text{ meq de K/ha} - 1 \text{ meq de K}$$

$$X - 0,37 \text{ meq de K}$$

$$X = 337,7 \text{ kg de K/ha}$$

Este valor corresponde a la forma elemental en que se encuentra el K en el suelo; para calcularlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor, que para este caso es 1,2:

$$337,7 \text{ kg} * 1,2 = 405,24 \text{ kg de K}_2\text{O/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de K presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 82,9 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 405,24 kg de K/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 70%.

Teniendo en cuenta que en este caso el contenido presente en el suelo (405,24 kg de K/ha) es superior a la cantidad extraída (82,9 kg de K/ha), el plan de fertilización contempla devolver la cantidad extraída por la cosecha, que, teniendo en cuenta la eficiencia de la aplicación, correspondería a 118,4 kg/ha.

El contenido de K en la planta, de acuerdo con el IBN (figura 17), se encuentra debajo de lo normal, lo que indica que posiblemente, a pesar de existir un alto contenido del elemento en el suelo, se debe revisar las fuentes de fertilizantes utilizadas que están generando algún tipo de antagonismo con otro elemento para que pueda ser absorbido por la planta. Existen evidencias que indican que, con una aplicación elevada de amonio, se reduce la absorción de potasio por las raíces, debido a que ambos cationes son monovalentes, con un efecto antagónico entre las dos formas iónicas. Aunque el nitrógeno es fundamental en la producción de proteínas, las plantas con deficiencia de potasio no producirán proteínas a pesar de la abundancia de nitrógeno disponible. En esta condición, los aminoácidos, las amidas y los nitratos se acumulan en la célula debido a que la enzima nitrato reductasa, que cataliza la formación de proteínas, es activada por el potasio. Ranade-Malvi (2011) además menciona que los iones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ son muy similares

en tamaño y carga, por lo que los sitios de intercambio no pueden distinguir la diferencia entre ellos.

Calcio

Para calcular las necesidades de Ca, el contenido en los primeros 45 cm de profundidad del suelo es de 2,74 cmol/kg, que equivale a miliequivalentes de Ca por cada 100 kg de suelo:

$$1 \text{ meq de Ca} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia} * 1.000} = \frac{40}{2 * 1.000} = 0,02 \text{ meq de Ca/100 kg suelo}$$

A partir de este valor, se calcula la cantidad de Ca para una hectárea de suelo:

$$\text{Si } 0,02 \text{ meq de Ca} - 100 \text{ kg suelo}$$

$$X - 2.340.000 \text{ kg de suelo/ha}$$

$$X = 468 \text{ meq de Ca/ha}$$

Recordemos que este resultado de 468 meq de Ca/ha se obtuvo a partir de convertir 1 cmol/kg en miliequivalentes por cada 100 kg de suelo. A continuación, se hace el cálculo para el contenido de Ca reportado en el análisis de 2,74 cmol/kg o 2,74 meq/100 kg.

$$\text{Si } 468 \text{ kg de Ca/ha} - 1 \text{ meq de Ca}$$

$$X - 2,74 \text{ meq de Ca}$$

$$X = 1.282,3 \text{ kg de Ca/ha}$$

Este valor corresponde a la forma elemental en que se encuentra el Ca en el suelo; para calcularlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor, que para este caso es 1,2:

$$1.282,3 \text{ kg} * 1,2 = 1.538,8 \text{ kg de CaO/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Ca presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 2,8 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 1.538,8 kg de Ca/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 60%.

De acuerdo con el análisis de suelo, la cantidad de Ca presente en el suelo es evidentemente superior a la extraída por la cosecha. Para este elemento, se presenta una condición de normalidad (figura 17) a nivel foliar. En este caso, no se incluye al Ca dentro del plan de fertilización, aunque se recomienda monitorear su contenido en la planta a través del análisis de tejido, para verificar los niveles disponibles en el siguiente ciclo productivo. Recordemos que Monge et al. (1994) indican que, en numerosos suelos, el calcio fijado en el complejo coloidal y el unido a los compuestos húmicos son las formas naturales más abundantes; incluso, en suelos ácidos casi siempre hay cantidades suficientes para la adecuada nutrición de las plantas cultivadas, sobre todo cuando las especies son poco exigentes.

En general, la deficiencia de calcio como resultado de su baja disponibilidad en el suelo no es muy común (White & Broadley, 2003). Sin embargo, cuando se observan síntomas de deficiencia, estos ocurren con mayor frecuencia en tejidos en desarrollo, como hojas y frutos jóvenes, debido a la baja removilización a través del floema desde tejidos viejos hacia jóvenes. En efecto, esto conduce a una fuerte dependencia del suministro a través del xilema y por lo tanto de la transpiración, que tiende a ser baja en tejidos jóvenes (Thor, 2019).

Magnesio

Para calcular las necesidades de Mg, el contenido en los primeros 45 cm de profundidad del suelo es de 1,18 cmol/kg, que equivale a miliequivalentes de Mg por cada 100 kg de suelo:

$$1 \text{ meq de Mg} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia} * 1.000} = \frac{24}{2 * 1.000} = 0,012 \text{ meq de Mg/100 kg suelo}$$

A partir de este valor, se calcula la cantidad de Mg para una hectárea de suelo:

$$\text{Si } 0,012 \text{ Mg} - 100 \text{ kg suelo}$$

$$X - 2.340.000 \text{ kg de suelo/ha}$$

$$X = 280,8 \text{ meq de Mg/ha}$$

Recordemos que este resultado de 280,8 meq Mg/ha se obtuvo a partir de convertir 1 cmol/kg en miliequivalentes por cada 100 kg de suelo. A continuación, se hace el cálculo para el contenido de Mg reportado en el análisis de 1,18 cmol/kg o 1,18 meq/100 kg:

$$\text{Si } 280,8 \text{ kg de Mg/ha} - 1 \text{ meq de Mg}$$

$$X - 1,18 \text{ meq de Mg}$$

$$X = 331,3 \text{ kg de Mg/ha}$$

Este valor corresponde a la forma elemental en que se encuentra el Mg en el suelo; para calcularlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor, que para este caso es 1,7:

$$331,3 \text{ kg} * 1,7 = 563,2 \text{ kg de MgO/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Mg presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 4,9 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 563,2 kg de Mg/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 60%.

De acuerdo con el análisis de suelo, el Mg presenta una situación similar al Ca: el contenido presente en el suelo es evidentemente superior al extraído por la cosecha. El contenido de Mg en la planta, según el IBN, presenta una condición de normalidad (figura 17). Para este caso, no se incluye al Mg dentro del plan de fertilización por los altos contenidos disponibles en el suelo. No obstante, se recomienda monitorear su contenido en la planta a través del análisis de tejido y en el suelo, posterior a la cosecha, para verificar los niveles disponibles para el siguiente ciclo productivo y monitorear su posible agotamiento.

A diferencia de otros cationes como el K, Ca y NH_4^+ , el Mg es comparativamente móvil en los suelos, y su comportamiento se puede atribuir a las propiedades químicas de este catión. Por ejemplo, el Mg se une con menos fuerza a las cargas del suelo (CIC), lo que conduce a que se encuentren concentraciones más altas de este elemento en la solución del suelo y, en efecto, una mayor disponibilidad para las plantas en comparación con otros cationes (Gransee & Führs, 2013). De acuerdo con los resultados del análisis de suelos del ejercicio anterior, se confirma un contenido alto de Mg en el suelo (563,2 kg de Mg/ha). A pesar de esta condición, es importante mantener equilibrados los nutrientes del suelo para evitar que se presente competencia entre cationes por los sitios de absorción en la planta. Por ejemplo, en experimentos con soluciones nutritivas se ha demostrado que la alta disponibilidad de los cationes Ca, K y Mn puede conducir a fuertes disminuciones en la absorción de Mg (Marschner, 2012).



Azufre

Para calcular las necesidades de S, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 6,38 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg suelo} - 6,38 \text{ kg de S}$$

$$2.340.000 \text{ kg de suelo/ha} - X$$

$$X = 14,93 \text{ kg de S/ha}$$

Este valor corresponde a la forma elemental en que se encuentra el S en el suelo; para calcularlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor, que para este caso es 3,0:

$$14,93 \text{ kg} * 3,0 = 44,8 \text{ kg de SO}_4^{\text{4-}}/\text{ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de S presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 5,1 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 44,8 kg de S/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 80%.

En este caso, la cantidad presente en el suelo es mayor a la extraída por la cosecha y el contenido en la planta se encuentra por debajo de lo normal. Para evitar el agotamiento de las reservas de S en el suelo, se puede conseguir su aporte con el uso de fertilizantes que tengan el elemento en su composición.

Microelementos

Los micronutrientes son aquellos elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas requeridos en bajas concentraciones. La mayoría de los micronutrientes, o elementos traza, están involucrados como constituyentes de moléculas enzimáticas y otras estructuras orgánicas. Por ejemplo, el zinc es un componente importante de una serie de enzimas metabólicas clave, además de que influye en la síntesis de proteínas, el metabolismo de carbohidratos y auxinas, y la integridad de la membrana. El hierro tiene un papel clave en el proceso de respiración y en la fabricación de clorofila para la fotosíntesis (Crowley et al., 2001).

En la tabla 16 se especificaron los valores de extracción de cada elemento para una producción de 20 toneladas de fruta fresca. Esto indica que hay una proporción predeterminada de nutrientes que requiere la planta dependiendo de su ciclo de vida, de las condiciones biofísicas para su desarrollo y del material genético, para que puedan desarrollar su máximo potencial productivo. La mayoría de los oligoelementos normalmente están disponibles en el suelo en cantidades suficientes. Con base en los resultados del análisis de suelos y de tejidos (tabla 15 y figura 17), tomados como ejemplo para hacer el cálculo de la necesidad de fertilización, se confirma que, por la condición de acidez del suelo en el Cauca, el contenido de micronutrientes es alto en relación con los requerimientos del cultivo de aguacate; por lo tanto, a continuación se describe el ejercicio para despejar la ecuación 3, con la cual se calcula la necesidad de fertilizantes, pero se sugiere no incluirlos dentro del plan de fertilización edáfica por su alto contenido en el suelo.

Hierro

Para calcular las necesidades de Fe, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 140,28 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

Si 1.000.000 kg suelo – 140,28 kg de Fe

2.340.000 kg de suelo/ha – X

$X = 328,26 \text{ kg de Fe/ha}$

Este valor corresponde a la forma elemental en que se encuentra el Fe en el suelo; para calcularlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor, que para este caso es 1,4:

$328,26 \text{ kg} * 1,4 = 459,6 \text{ kg de Fe}_2\text{O}_3/\text{ha}$

Con el valor obtenido de la cantidad de Fe presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 0,13 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 459,6 kg de Fe/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 80%.

De acuerdo con el análisis de suelo, el Fe presenta un contenido evidentemente superior al extraído por la cosecha. A nivel foliar, se presenta una condición por encima de lo normal de acuerdo con la interpretación basada en el IBN (figura 17). Teniendo en cuenta la condición de acidez de los suelos del Cauca, existe un predominio de óxidos de aluminio y de hierro que reducen la solubilidad del P inorgánico a través de la fijación en superficies cargadas positivamente, con la consecuente formación de precipitados insolubles de Al y Fe.

En estas condiciones, se sugiere orientar el uso de enmiendas para neutralizar la acidez del suelo, como el carbonato de calcio (CaCO_3), sin llegar a incurrir en excesos, ya que esto puede conducir a la

formación de fosfatos de calcio y a que los iones de P no estén disponibles para la absorción por parte de la planta.

Existen reportes previos sobre el uso de enmiendas orgánicas, como el estiércol, el biocarbón y residuos agroindustriales, para reducir la condición de acidez del suelo e incrementar la disponibilidad de P (Asap et al., 2018; Ch'ng et al., 2014; Maru et al., 2020; Uzoma et al., 2011). Estudios recientes plantean el uso de carbón vegetal y cenizas de madera para mejorar la disponibilidad de P. El carbón vegetal tiene el potencial de aumentar el P disponible para las plantas porque tiene la capacidad de adsorber cationes como Al^{3+} , Fe^{3+} y Ca^{2+} , que forman complejos con el P en la solución del suelo. Además, la abundancia de poros en el carbón vegetal permite la retención de aire, creando así una condición aeróbica en los suelos para favorecer el desarrollo de la raíz (Johan et al., 2021).

Cobre

Para calcular las necesidades de Cu, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 3,74 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg suelo} - 3,74 \text{ kg de CuO}$$

$$2.340.000 \text{ kg de suelo/ha} - X$$

$$X = 8,75 \text{ kg de CuO/ha}$$

Este valor corresponde a la forma elemental en que se encuentra el Cu en el suelo; para calcularlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor, que para este caso es 1,3:

$$8,75 \text{ kg} * 1,3 = 11,38 \text{ kg de Cu/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Cu presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 0,09 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 11,38 kg de Cu/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 80%.

De acuerdo con el análisis de suelo, el Cu presenta un contenido superior al extraído por la cosecha. Para Cu se presenta una condición de exceso (figura 17) en su contenido en la planta, de acuerdo con el IBN, por lo que para este caso no se incluye al Cu dentro del plan de fertilización edáfica.

Manganeso

Para calcular las necesidades de Mn, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 1,53 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg de suelo} - 1,53 \text{ kg de Mn}$$

$$2.340.000 \text{ kg de suelo/ha} - X$$

$$X = 3,58 \text{ kg de Mn/ha}$$

Este valor corresponde a la forma elemental en que se encuentra el Mn en el suelo; para calcularlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor, que para este caso es 1,3:

$$3,58 \text{ kg} * 1,3 = 4,65 \text{ kg de MnO}_2/\text{ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Mn presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 0,06 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 4,65 kg de Mn/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 80 %.

De acuerdo con el análisis de suelo, el Mn presenta un contenido superior al extraído por la cosecha. Para Mn se presenta una condición normal (figura 17) en su contenido en la planta, de acuerdo con el IBN. Por tal razón, para este caso no se incluye al Mn dentro del plan de fertilización edáfica. El manganeso es un componente muy importante de la fotosíntesis, el metabolismo y la asimilación del nitrógeno, y activa las enzimas descarboxilasa, deshidrogenasa y oxidasa (Ranade-Malvi, 2011). En las condiciones de acidez características de los suelos del Cauca, donde se encuentra establecido el aguacate Hass, se sugiere orientar el uso de enmiendas para neutralizar la acidez del suelo, como el carbonato de calcio (CaCO_3), sin llegar a incurrir en excesos, ya que esto puede conducir a la formación de fosfatos de calcio y a que los iones de P no estén disponibles para la absorción de la planta.

Zinc

Para calcular las necesidades de Zn, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 1,35 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg de suelo} - 1,35 \text{ kg de Zn}$$

$$2.340.000 \text{ kg de suelo/ha} - X$$

$$X = 3,16 \text{ kg de Zn/ha}$$

Este valor corresponde a la forma elemental en que se encuentra el Zn en el suelo; para calcularlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor, que para este caso es 1,2:

$$3,16 \text{ kg} * 1,2 = 3,79 \text{ kg de ZnO/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Zn presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 0,135 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 3,79 kg de Zn/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 80%.

De acuerdo con el análisis de suelo, el Zn presenta un contenido superior al extraído por la cosecha. Para Zn se presenta una condición de normalidad (figura 17) en su contenido en la planta, de acuerdo con el IBN. Por tanto, para este caso no se incluye al Zn dentro del plan de fertilización edáfica, y se sugiere monitorear el contenido en la planta a través de análisis foliar.

Boro

Para calcular las necesidades de B, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 0,09 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg de suelo} - 0,09 \text{ kg de B}$$

$$2.340.000 \text{ kg de suelo/ha} - X$$

$$X = 0,21 \text{ kg de B/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de B presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: necesidad de fertilización.

CRPC: cantidad requerida por el cultivo = 0,111 kg/ha (tomado de la tabla 16).

CPS: cantidad presente en el suelo = 0,21 kg de B/ha.

EA: eficiencia de la aplicación = 80%.

De acuerdo con el análisis de suelo, el B presenta un contenido superior al extraído por la cosecha. Para B, a pesar de los altos contenidos del elemento en el suelo, se presenta una condición debajo de lo normal (figura 17) del contenido del elemento en la planta, de acuerdo con el IBN. Se sugiere aplicar al menos la cantidad de boro extraída por la cosecha, con el fin de no generar agotamiento de las reservas disponibles en el suelo. El boro y el potasio tienen funciones superpuestas en la fisiología de las plantas y, por lo tanto, son sinérgicos. Al igual que el potasio, el boro también está involucrado en algunos aspectos de los procesos de floración y fructificación, la germinación del polen, la división celular, el metabolismo del nitrógeno, el metabolismo de los carbohidratos, el movimiento y la acción de las hormonas, el metabolismo del agua y las relaciones hídricas en las plantas. Ambos actúan como amortiguadores y son necesarios para el mantenimiento de los tejidos conductores y para ejercer un efecto regulador sobre otros elementos (Ranade-Malvi, 2011).

Fuentes de fertilización externa

En capítulos anteriores se ha mencionado que la acidificación del suelo es un proceso natural en regiones con alta precipitación, donde se acumulan cationes de hidrógeno (H^+), lo cual conduce a la reducción del pH. Los suelos poseen cargas negativas en la superficie de sus partículas, y estas superficies atraen y retienen cationes básicos cargados positivamente, como calcio, manganeso, potasio, sodio, entre otros. De manera general, las partículas del

suelo retienen iones de hidrógeno con más fuerza que los demás cationes, lo cual implica que cualquier factor que contribuya a un aumento en la concentración de iones de hidrógeno en el suelo conducirá al desplazamiento de los demás cationes y a su posterior pérdida por lixiviación. Además, con las altas precipitaciones, se produce la liberación de sílice (Si^{4+}), hierro (Fe^{3+}) y aluminio (Al^{3+}), entre otros, lo que conduce a la formación de óxidos hidratados amorfos insolubles de aluminio y hierro, con predominancia en suelos ácidos. En esta condición, en la que los suelos se puedan encontrar desprovistos de iones básicos para el sostenimiento de los cultivos, estos deben ser sustituidos de manera natural por procesos de degradación de la MO o con fuentes de fertilizante externas.

También se ha descrito con anterioridad la predominancia de suelos ácidos, franco-arenosos (FA), con bajo contenido de arcillas, y altos contenidos de MO, en zonas productoras de aguacate del Cauca. En una condición de acidez, previo a decidir la fuente de fertilizante por utilizar, es necesario, entonces, tener en cuenta su efecto sobre los procesos de acidez del suelo. En la tabla 17 se resume el efecto de las distintas fuentes de fertilizantes en suelos ácidos.

Tabla 17. Efectos de diferentes fuentes de fertilizantes sobre la acidez del suelo

Nutriente	Fuente de fertilizante	Efecto sobre la acidez del suelo
Nitrógeno	N amoniacal	Cada mol de N proveniente del sulfato de amonio (SA) produce 4 moles de H^+ . A medida que las raíces de las plantas absorben N en forma amoniacal, secretan H^+ e incrementan su concentración en la zona rizosférica.
	Nitrato	Cada mol de N proveniente de la urea o del nitrato de amonio (NA) produce solamente 2 moles de H^+ .
Fósforo	Fosfato diamónico (DAP)	Tiene un efecto residual ácido sobre los suelos, aunque inicialmente tiene una reacción alcalina (debido al HPO_4^{2-}).
	Fosfato monoamónico (MAP)	Su uso está especialmente indicado en suelos con pH alcalinos, por su carácter acidificante.
	Ácido fosfórico	Es el fertilizante de fósforo más acidificante.

Nutriente	Fuente de fertilizante	Efecto sobre la acidez del suelo
Potasio	Cloruro de potasio KCl	Es una sal neutra, pero en suelos pobres en calcio puede generar acidez por la reacción del ion Cl con el Ca, muy soluble y fuertemente lixiviado.
	Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)	Tiene menor poder descalcificante que el KCl, ya que el SO ₄ ²⁻ , al reaccionar con el Ca, es menos soluble y por lo tanto su lixiviación es más lenta.
	Nitrato de potasio (KNO ₃)	Es un fertilizante que se considera de reacción prácticamente neutra.
Calcio	Nitrato de calcio [Ca (NO ₃) ₂]	Estabiliza el pH del suelo en aproximadamente 7 (neutro) y es una fuente importante de nitrógeno en su forma fácilmente asimilable.
	Carbonato de calcio (CaCO ₃)	Es aplicado con frecuencia para elevar el pH de suelos ácidos que se ven afectados por el uso de sales de amonio, urea o amoniaco anhidro, con tendencia a acidificar el suelo.
Magnesio	Sulfato de magnesio (Mg ₂ SO ₄)	El Mg se une con menos fuerza a las cargas del suelo (CIC), lo que conduce a que se encuentren concentraciones más altas de este elemento en la solución del suelo y, en efecto, una mayor disponibilidad para las plantas en comparación con otros cationes.

Fuente: Elaboración propia

Para elaborar el plan de fertilización, se toman como base los resultados del análisis presentado en el apartado anterior sobre el cálculo de los fertilizantes. Los cálculos realizados hasta el apartado anterior solo indican la necesidad de cada nutriente en su forma oxidada. A partir del valor recomendado para cada nutriente, se requiere saber la cantidad de fertilizante por aplicar. Entre las fuentes de fertilizantes, ya sea simples o compuestas, se encuentran detalladas las especificaciones del porcentaje que representa cada elemento. En la tabla 18 se relacionan algunas fuentes de fertilizantes.

Tabla 18. Fuentes de fertilizantes y composición porcentual de cada nutriente

Elemento	Producto comercial	Fórmula	N	P ₂ O ₅
Nitrógeno	Urea	CH ₄ N ₂ O	0,46	
	Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,21	
	Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	0,34	
Potasio	Cloruro de potasio	KCl		
	Nitrato de potasio	KNO ₃	0,13	
	Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄		
Fósforo	Fosfato de calcio	Ca(PO ₄)		0,21
	Fosfato diamónico (DAP)	(NH ₄) ₂ HPO ₄	0,18	0,46
Calcio	Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂	0,16	
	Carbonato de calcio	CaCO ₃		
Magnesio	Nitrato de magnesio	Mg(NO ₃) ₂	0,104	
	Sulfex Mg	MgSO ₄ ·7H ₂ O		
Manganeso	Quelato de manganeso			
Boro	Quelato de boro			
Hierro	Quelato de hierro			
Fertilizantes compuestos	Agrimins	CaO		
		N	0,08	
		P ₂ O ₅		0,05
		MgO		
		S		
		B		
		Cu		
		Zn		
Nitrógeno, fósforo y potasio	Triple 15	NPK	0,15	0,15

Fuente: Elaboración propia.

K ₂ O	SO ₄	Ca, CaO	Mg, MgO	Mn	B	Fe	Zn	Cu
	0,24							
0,62								
0,46								
0,53	0,18							
		0,32						
		0,27						
		0,48						
			0,15					
0,03	0,12		0,15					
				0,13				
					0,21			
						0,06		
		0,18						
			0,06					
	0,02							
					0,01			
								0,01
							0,03	
0,15								

Retomando los resultados del análisis sobre los nutrientes por incluir en el plan de fertilización, en función de la cantidad requerida por el cultivo, la cantidad presente en el suelo y la eficiencia de la fertilización, en este caso solo se contemplaría la aplicación de 53,6 kg/ha de N, 68,7 kg/ha de P_2O_4 , 118,4 kg/ha de K_2O y 0,14 kg/ha de B. Teniendo en cuenta las fuentes de fertilizantes con menor efecto sobre el aumento de la acidez del suelo (tabla 18), para suplir los requerimientos de P_2O_4 , se usará como fuente el DAP. Recordemos que de las tres fuentes de fósforo relacionadas en la tabla 18, el DAP presenta un efecto residual en la acidez del suelo.

El DAP tiene como fórmula $(NH_4)_2HPO_4$ y, de acuerdo con la tabla 18, contiene un 46 % de P y un 18 % de N. Como se requiere 68,7 kg/ha de P y el DAP solo aporta un 46 %, se divide el requerimiento por el contenido en porcentaje para conocer la cantidad total de fertilizante:

$$DAP = \frac{68,7}{46} * 100 = 149,35 \text{ kg}$$

Como el DAP además aporta N, determinamos, de 149,35 kg, cuánto contiene de N:

$$N = \frac{149,35 * 18}{100} = 26,9 \text{ kg}$$

El contenido en N que aporta el DAP se tendrá en cuenta en el momento de determinar el excedente por aplicar con una fuente de fertilizante simple, como la urea, con el fin de cubrir el requerimiento total de 53,6 kg/ha de N.

Para cubrir el requerimiento de K, se utilizará como fuente al cloruro de potasio (KCl), que contiene un 62 % de K. Recordemos que el KCl es una sal neutra que, en suelos pobres en calcio, puede generar acidez por la reacción del ion Cl con el Ca, muy soluble y fuertemente lixiviado. En este caso, de acuerdo con el análisis que se hizo para el Ca, la cantidad presente en el suelo es evidentemente superior a la extraída por la cosecha, y a nivel de tejidos

presenta una condición de normalidad. Para conocer la cantidad total de fertilizante, se divide el requerimiento por el contenido en porcentaje:

$$\text{KCl} = \frac{118,4}{62} * 100 = 191 \text{ kg}$$

Para cubrir el requerimiento de 53,6 kg/ha de N, descontamos el aporte que hace el fertilizante DAP, de 26,9 kg/ha N, y utilizamos la urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) como fuente para suplir el excedente que se requiere, con un aporte del 46 % en N. Para conocer la cantidad total de fertilizante, se divide el requerimiento por el contenido en porcentaje:

$$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O} = \frac{26,7}{46} * 100 = 58,04 \text{ kg}$$

Finalmente, para cubrir el requerimiento de 0,14 kg/ha de B, se utilizará como fuente el quelato de boro, con un aporte del 20,5 %. Para conocer la cantidad total de fertilizante, se divide el requerimiento por el contenido en porcentaje:

$$\text{B} = \frac{0,14}{20,5} * 100 = 0,68 \text{ kg}$$

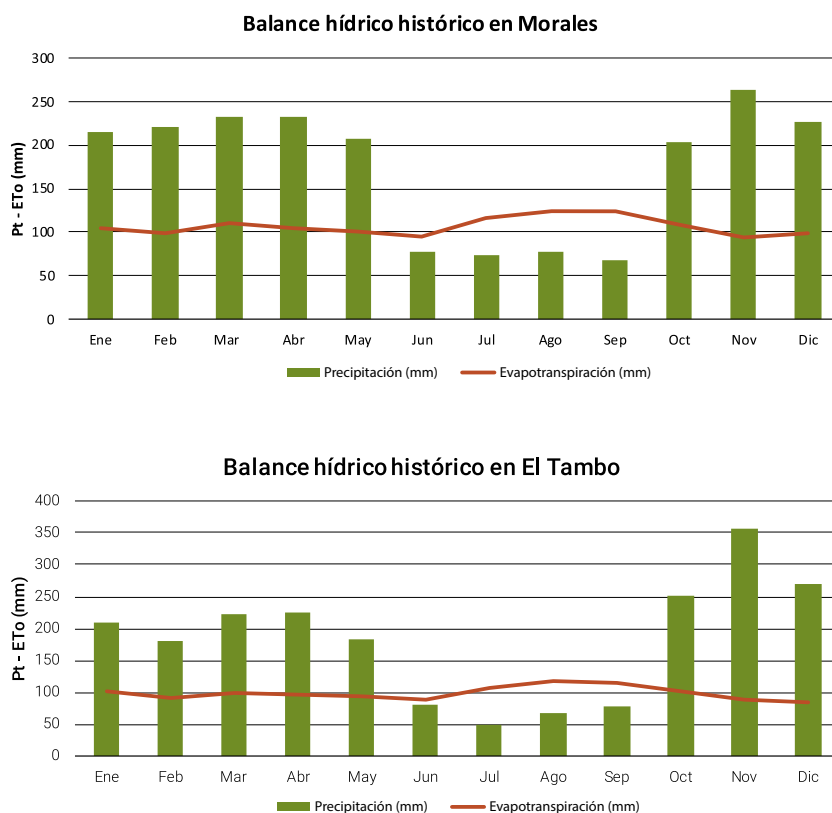
Cabe mencionar que los valores obtenidos para cada fertilizante representan la cantidad requerida por hectárea. Al dividirse por el número de plantas, se obtendría la cantidad requerida por planta. El procedimiento descrito aquí representa una guía para orientar los cálculos de los fertilizantes por aplicar, y además se aporta información sobre posibles interacciones entre nutrientes y sobre el efecto de algunas fuentes de fertilizantes en la acidez del suelo. Se expone la metodología para que sea aplicada de acuerdo con las características fisicoquímicas (textura, pH, CIC, MO) predominantes del suelo en donde se va a orientar un determinado plan de fertilización, y para que, en combinación con la experiencia del productor y de un técnico especializado, se llegue a tomar la mejor decisión sobre las fuentes y dosis de fertilizantes por aplicar.

Efecto de la fertilización basada en el IBN sobre las variables de producción de aguacate Hass

En el Capítulo 2, donde se reportan distintas escalas fenológicas que describen el desarrollo vegetativo y reproductivo del aguacate Hass, en el apartado relacionado con la escala propuesta por Alcaraz et al. (2013) se presenta el calendario de los estados fenológicos determinados en las condiciones de Morales y El Tambo (Cauca). Como característica común de las zonas productoras de aguacate en Colombia, en estas dos localidades se presenta un patrón de distribución de lluvias bimodal, con la temporada alta de lluvias de enero a mayo y de octubre a diciembre. Con el primer periodo de alta precipitación y con un balance hídrico positivo (la precipitación excede la evapotranspiración), se asegura el suministro de agua necesario para la movilidad de los nutrientes requeridos durante la floración principal, registrada en los meses de marzo-abril; sin embargo, la floración intermedia, registrada en los meses de agosto-septiembre, coincide con la temporada de baja precipitación y un balance hídrico negativo (la evapotranspiración excede la precipitación), que se presenta desde junio hasta septiembre (figura 18).

La fase de floración y el crecimiento inicial del fruto son muy exigentes en términos de agua y nutrientes, y los factores de estrés resultantes de estos dos recursos pueden aumentar la abscisión de flores y frutos, así como afectar el crecimiento del fruto (Cantuarias-Avilés et al., 2019; Whiley et al., 1998). En las condiciones experimentales del Cauca, el plan de manejo de la fertilización basado en el IBN contempló la aplicación de nutrientes con una periodicidad mensual, pero es importante asegurar la disponibilidad de agua durante el periodo de balance hídrico negativo, teniendo en cuenta que el recurso hídrico es el medio de transporte a través del cual las plantas toman los nutrientes.

Figura 18. Distribución anual del patrón de lluvias y de la evapotranspiración en las zonas de estudio. a. Morales; b. El Tambo.



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 19 se resumen las características del suelo encontradas en las zonas experimentales ubicadas en la región del Cauca, con textura *FA* y condiciones de pH moderadamente ácido. Los valores de conductividad eléctrica indican que se trata de suelos libres de sales, con altos contenidos de *MO*, como posible indicador de una alta disponibilidad de nitrógeno. La *cic* presentó valores menores de 10 meq/100 g, con baja capacidad del suelo para intercambiar nutrientes como Ca, Mg, Na y K, y que pueden explicarse por la textura *FA* predominante en este tipo de suelo.

Tabla 19. Características físicas y químicas del suelo de las zonas experimentales del Cauca

Característica	Morales	Tambo
Profundidad (cm)	0,45	0,45
pH	5,42 ± 0,10	5,50 ± 0,06
Conductividad eléctrica (CE) (dS/m)	0,33 ± 0,10	0,35 ± 0,06
MO (%)	12,36 ± 0,47	14,85 ± 0,88
P	4,69 ± 0,72	5,45 ± 0,70
S	67,03 ± 7,40	75,13 ± 7,90
Mg	0,97 ± 0,15	0,99 ± 0,04
Ca	2,87 ± 0,40	3,90 ± 0,50
K	0,62 ± 0,09	0,44 ± 0,12
Na	0,09 ± 0,003	0,08 ± 0,008
cic	4,64 ± 1,00	5,29 ± 0,6
B	0,22 ± 0,04	0,26 ± 0,03
Mn	2,39 ± 0,30	2,19 ± 0,20
Cu	2,49 ± 0,90	0,69 ± 0,20
Fe	101,95 ± 2,72	80,20 ± 5,60
Zn	1,54 ± 0,20	3,76 ± 1,20
Textura	Franco-arenosa (FA)	Franco-arenosa (FA)

Fuente: Elaboración propia.

A nivel de planta, en la figura 19 se relaciona el estado nutrimental de los árboles con la implementación de los planes de fertilización basados en el IBN (figura 19, b y d) y de los manejados con el plan de fertilización estándar del productor (figuras 19, a y c). En términos generales, se puede observar que, con el manejo basado en el IBN, se presenta una clara tendencia a contar con una condición de normalidad tanto en macro como en micronutrientes. Estudios previos han reportado, para aguacate Hass, una relación directa entre la condición nutricional de la planta y la disponibilidad de elementos en el suelo (García-Martínez et al., 2021), y algunas características, como pH ácidos, niveles bajos de MO y niveles altos-muy altos de Cu, Fe, K, Ca, B y Zn, conducen a concentraciones deficitarias de nutrientes en las hojas (Maldonado-Torres et al., 2007). El IBN es una herramienta ampliamente utilizada para diagnosticar el estado nutricional de los árboles de aguacate Hass.

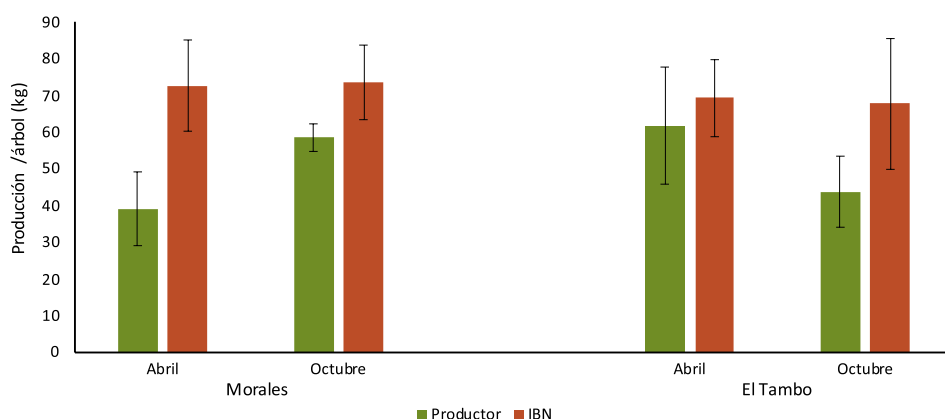
Figura 19. Niveles de concentración foliar basados en el índice de balance de nutrientes (IBN) propuesto por Kenworthy (1973). a y c. Manejo del productor; b y d. Manejo según el IBN.



Fuente: Elaboración propia.

Con los registros de cosecha para dos ciclos productivos se puede evidenciar una clara tendencia al incremento en la producción por planta con el manejo de la fertilización basada en el IBN, que puede llegar a representar más de 25 kg para las cosechas registradas en abril para la localidad de Morales y en octubre para El Tambo (figura 20). El error estándar amplio registrado en todos los tratamientos se puede deber a la variación en producción por planta, que a su vez es consecuencia de las variaciones en la intensidad de floración que se presentan por la condición de alternancia productiva característica de esta especie.

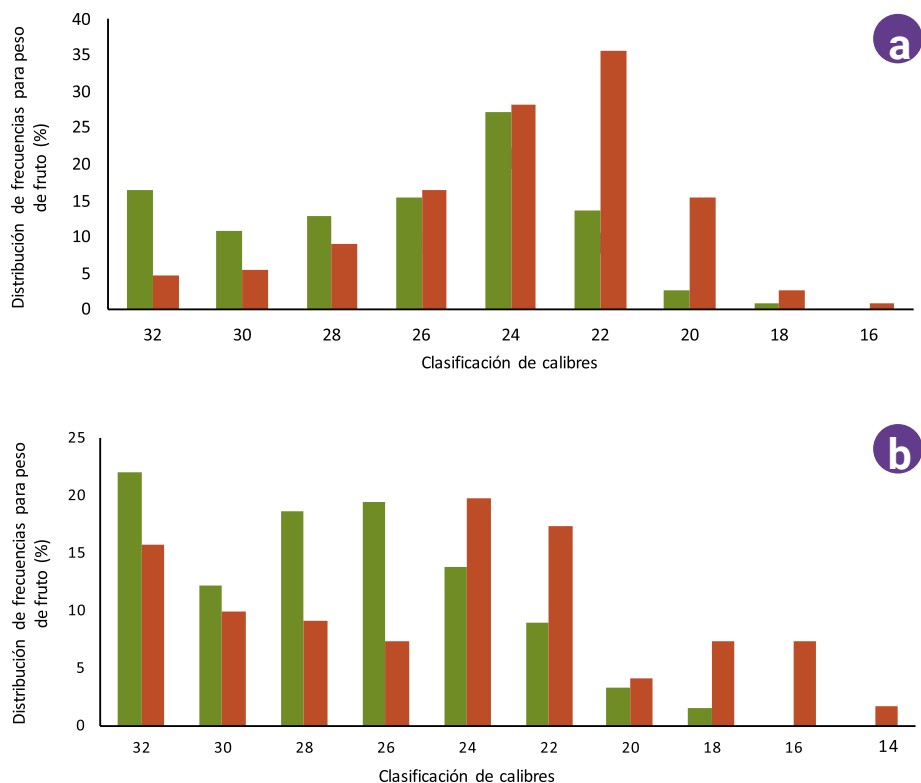
Figura 20. Producción por planta con el plan de manejo de la fertilización basado en el índice de balance de nutrientes (IBN) y con el manejo del productor, bajo las condiciones de Morales y el Tambo (Cauca), para aguacate Hass.



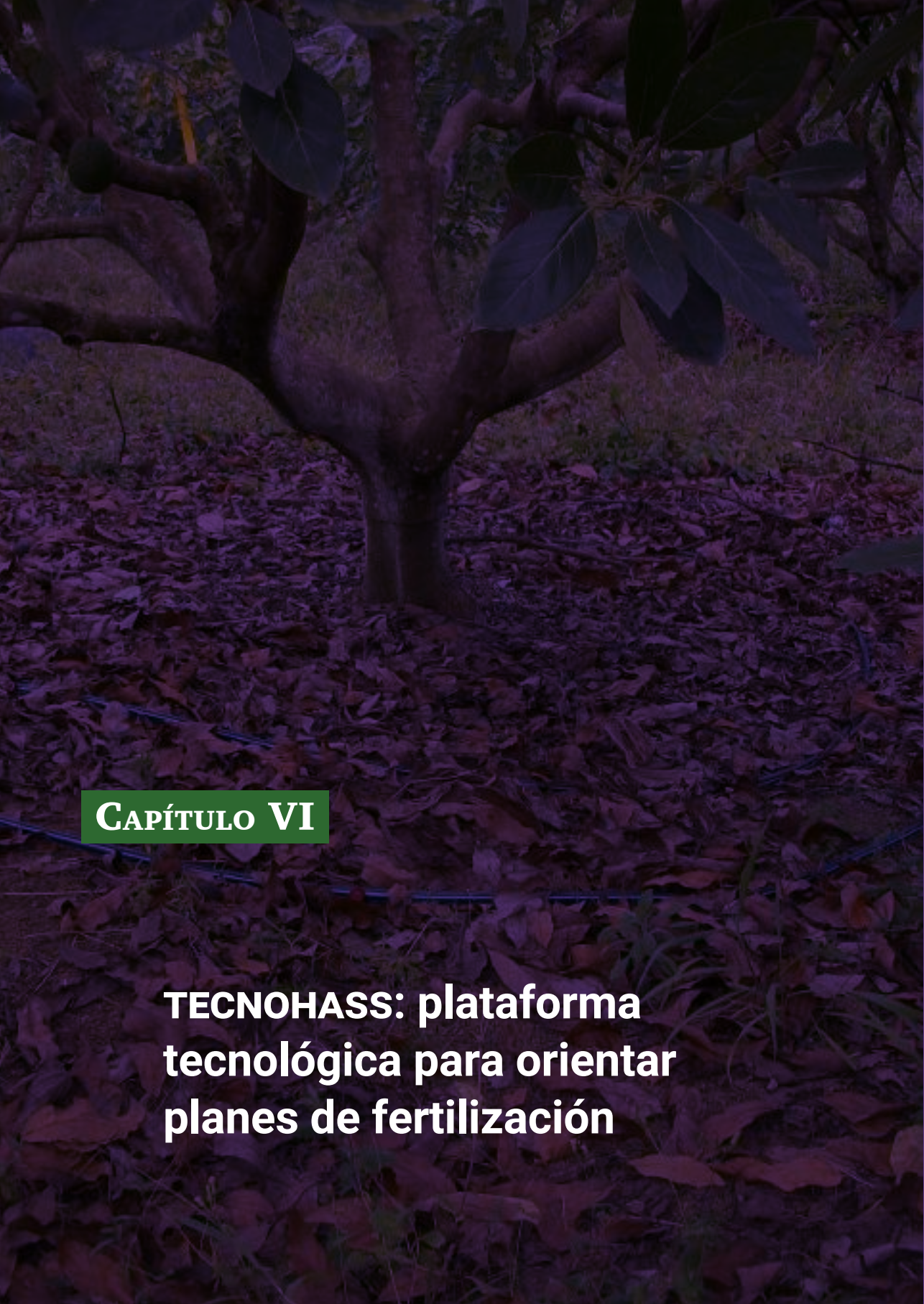
Fuente: Elaboración propia.

Además del incremento en producción por planta, y de acuerdo con la clasificación de calibres del *Codex Alimentarius* (FAO, 1995), con el tratamiento de fertilización basado en el IBN se observó una mayor proporción de frutos con pesos de 165-196 g (calibre 22) (figura 21). Los resultados en las condiciones del Cauca coinciden con estudios reportados por Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2003), quienes orientaron el manejo de la nutrición con base en la metodología del IBN e incrementaron los calibres de los frutos por encima de 170 g.

Figura 21. Diagrama de frecuencias del peso fresco del fruto de aguacate Hass en cosecha, con base en la clasificación de calibres del *Codex Alimentarius* (FAO, 1995), en las condiciones de Morales (a) y El Tambo (b) (Cauca).



Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO VI

**TECNOHASS: plataforma
tecnológica para orientar
planes de fertilización**

TECNOHASS es una plataforma tecnológica de apoyo para la toma de decisiones en el sistema productivo de aguacate Hass, con cobertura en once municipios del departamento del Cauca: Morales, Cajibío, Piendamó, Caldono, El Tambo, Timbío, Popayán, Sotaró, Caloto, Corinto y Toribío. La plataforma está conformada por tres aplicativos web:

En el primero, denominado “Nichos productivos”, se pueden consultar las zonas aptas para el desarrollo del cultivo según la información recopilada y procesada por AGROSAVIA; sirve para apoyar al usuario en la identificación de las condiciones edáficas y climáticas que influyen en el desarrollo del cultivo, en función de la información registrada del predio.

El segundo aplicativo, “Fertilización y riego”, sugiere la cantidad de fertilizante necesaria para cada elemento; muestra tres opciones de planes de fertilización, en función de algunas fuentes de fertilizantes predeterminadas, a partir de la información del análisis de suelos y de tejidos (foliar) registrada para cada predio, y calcula la cantidad de agua por aplicar en función de las variables climáticas registradas por cada usuario (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento), de acuerdo con el sistema de riego instalado en el predio.

El tercer aplicativo, “Control de plagas”, a partir de modelos generados por la correlación de variables climáticas y niveles de

población de *Heilipus lauri* y *Stenoma catenifer*, le permite al usuario predecir el riesgo estimado de aparición de estas dos plagas cuarentenarias a lo largo del año, en función de la ubicación del predio (coordenadas).

La información provista por esta plataforma no sustituye la opinión de un profesional o asistente técnico capacitado; corresponde a información generada a partir de procesos de investigación con un esquema metodológico, como una más de varias opciones que tienen las personas que acceden como usuarias, quienes asumen la responsabilidad y las implicaciones derivadas de la forma como usen la información obtenida de los tres aplicativos.

A continuación, se describe el paso a paso como guía para facilitar el proceso de navegación de los usuarios que quieran acceder al módulo de fertilización. En este módulo se recogen todas las ecuaciones y criterios de análisis detallados en este libro, como herramienta de ayuda para la definición de las dosis y fuentes de fertilizantes por aplicar, con base en la metodología descrita en el Capítulo 5, “Requerimientos nutricionales del cultivo de aguacate Hass”.

Ubicación

1. Para acceder a TECNOHASS, siga la siguiente ruta:
2. Ingrese a la página www.agrosavia.co.
3. En el menú de la izquierda, acceda al enlace “Productos y servicios”.
4. Seleccione la opción “Oferta tecnológica” (figura 22).
5. Seleccione la opción “Sistemas de información”.
6. Seleccione la opción TECNOHASS.

Figura 22. Acceso a la plataforma tecnológica TECNOHASS.





Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

Además del acceso por la página web de AGROSAVIA, la aplicación TECNOHASS podrá descargarse en su versión móvil en la App Store, para iOS, o en Google Play, para Android.

Registro

Una vez se ingresa a la plataforma, se selecciona la opción “Quiero registrarme”, donde aparece la opción “Nuevo registro” (figura 23); allí, se deben llenar las casillas correspondientes a nombres, apellidos, nivel de educación, correo electrónico, tipo de usuario (productor, técnico o investigador) y contraseña.

Figura 23. Registro como usuario para acceder a la plataforma tecnológica TECNOHASS.



NUEVO REGISTRO

1 Registro Usuario 2 Registro Productor

Nombres: *
Julian

Apellidos: *
Arango

Correo electrónico: *
jparango2023@gmail.com

Contraseña: *

Nivel de Educación: *
Tecnólogo

Tipo Usuario: *
Asesor Técnico

Confirmar contraseña: *

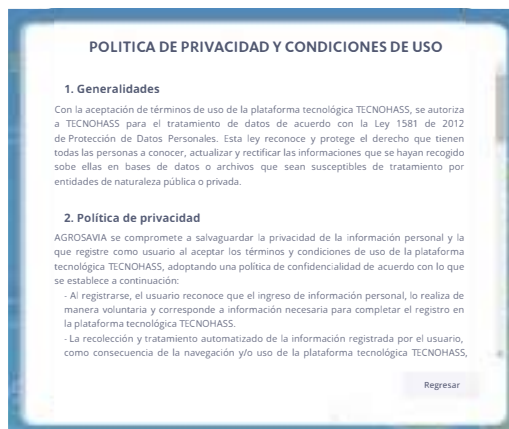
☒ Aceptar términos y condiciones

Salir Continuar

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

Para continuar, debe aceptar la política de privacidad y las condiciones de uso (figura 24). Con la aceptación de los términos de uso de TECNOHASS, se autoriza a AGROSAVIA para el tratamiento de datos de acuerdo con la Ley 1581 de 2012, sobre Protección de Datos Personales. Esta ley reconoce y protege el derecho que tienen todas las personas a conocer, actualizar y rectificar las informaciones que se hayan recogido sobre ellas en bases de datos o archivos que sean susceptibles de tratamiento por parte de entidades de naturaleza pública o privada.

Figura 24. Descripción de política de privacidad y condiciones de uso de la plataforma tecnológica TECNOHASS.



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

El segundo paso del registro corresponde a la información del predio (figura 25), relacionada con su ubicación (departamento, municipio, vereda y nombre del predio). El campo de coordenadas (latitud y longitud) también hace referencia a la ubicación del predio, y se deben registrar en formato decimal, separado por punto; si el usuario no cuenta con la información precisa del predio, se sugiere registrar las coordenadas del municipio, que pueden ser consultadas en un motor de búsqueda (p. ej., Google). Recuerde que la longitud debe registrarla con signo negativo (p. ej., Tambo-Cauca: Latitud: 2.45; Longitud: -76.817).

Figura 25. Segundo paso para el registro de información como usuario.

NUEVO REGISTRO

1 Registro usuario (no) 2 Registro Predio

Departamento: * Cauca Municipio: * El Tambo

Vereda: * El Zarsal Nombre del predio: * El Uvo

Latitud (Decimales): * 2.45 Longitud (Decimales): * -76.8

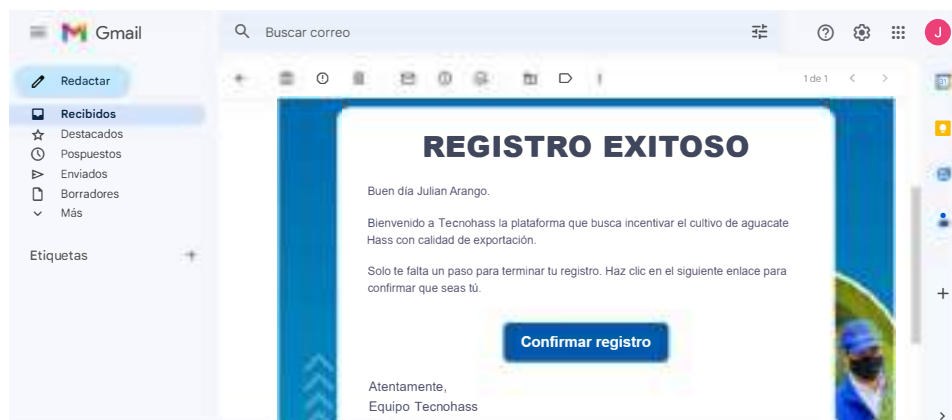
Altura sobre el nivel del mar: 1700 Área del predio (Hectáreas): * 2

Acceso al predio: ?
Via terciaria adelantada

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

Una vez finalizado este proceso (figura 26), se enviará un correo electrónico a la dirección suministrada por el usuario para completar la validación del registro. Tras confirmar el registro, será redirigido a la página principal de TECNOHASS para acceder a su contenido.

Figura 26. Confirmación de registro como usuario.



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

Uso del módulo sobre planes de fertilización

Información del predio

Al ingresar a TECNOHASS, se selecciona la opción “Fertilización y riego” (figura 27). Tras el ingreso, se activa un video introductorio con información sobre los criterios para orientar los planes de manejo de fertilización y riego. Sobre el video, el usuario tiene la opción de marcar “No volver a mostrar esta ventana” o cerrar, pero, si selecciona esta última opción, el video seguirá apareciendo cada vez que seleccione una opción para continuar con el registro de información. Por lo tanto, se sugiere marcar la opción de “No volver a mostrar esta ventana”; si se quiere acceder de nuevo al video, dentro del módulo de “Fertilización y riego” hay un acceso directo a su contenido.

Figura 27. Selección de opción para ingresar al módulo de fertilización y riego.



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

Una vez se ingresa al módulo de “Fertilización y riego”, se despliegan las siguientes opciones: “Información del predio”, “Planes de fertilización”, “Planes de riego” y “Video introductorio” (figura 28).

Figura 28. Inicio para la creación del plan de fertilización.



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

Como primera medida, se debe completar la información del predio, seleccionando el tipo de mano de obra que desarrolla las labores en el predio (familiar, jornal o mixta). En seguida, se debe agregar un lote presionando el botón  (figura 29). El usuario tiene la opción de agregar información para los lotes que considere necesarios dentro del mismo predio, de acuerdo con la distribución que tenga de su cultivo; por ejemplo, el usuario podrá indicar si dentro del predio una parte del cultivo de aguacate Hass se encuentra intercalada con otro cultivo, mientras que la otra parte está como monocultivo, o podrá establecer si su finca tiene un terreno plano y otro en pendiente. Si se trata de una condición general para todo el cultivo, se genera un solo lote.

Figura 29. Registro de información para la creación del plan de fertilización del/ los lotes en que se encuentra distribuido el predio.

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

Una vez seleccionada la opción de “Agregar lote”, se desplegará un formulario para agregar información sobre este; allí se pide el número de lote (como se mencionó, si el predio está distribuido en varios lotes, se sugiere numerarlos en orden consecutivo y registrar varios lotes), la producción en kilogramos por árbol (este valor se obtiene dividiendo la producción total del predio entre el número de árboles), la producción por hectárea (listado desplegable para seleccionar la unidad de medida de peso), los cultivos asociados (listado desplegable con varias opciones), el material de siembra (aunque se trata de aguacate Hass, se incluye esta opción para los usuarios que tengan identificado el patrón sobre el cual esta injertada la copa; de lo contrario, solo se ingresa la variedad Hass), las características del terreno (plano, pendiente u ondulado), el área en aguacate Hass, la latitud y longitud (decimales) (corresponde a la misma información diligenciada al registrarse como usuario), la distancia entre plantas (m), la distancia entre surcos (m), el número de plantas por hectárea, la edad del cultivo,

las épocas de cosecha (listado desplegable de selección múltiple de los meses correspondientes a los periodos de cosecha al año), las épocas de floración (listado desplegable de selección múltiple de los meses correspondientes a los periodos de floración al año), la temperatura media anual (°C) y la densidad aparente (g/cm³), que se obtiene con el análisis de las propiedades físicas del suelo. Al registrar toda la información, se selecciona la opción “Guardar” y luego “Finalizar”.

Además, se da la opción para que el usuario registre el plan de fertilización que aplica en su cultivo. Para ello, se selecciona la opción “Agregar plan de fertilización” y se diligencian los campos de nutriente, producto comercial, cantidad, unidad y frecuencia.

Con la información registrada por el usuario, se busca generar una base de datos que permita obtener información detallada sobre las variables de producción en los predios de aguacate Hass del departamento del Cauca, con el fin de contar con la trazabilidad del comportamiento productivo del cultivo con el uso de la herramienta tecnológica TECNOHASS.

Planes de fertilización

Una vez finalizado el proceso de registro del lote, se selecciona la opción “Planes de fertilización” y se presiona el botón , que aparece en la parte superior derecha de la pantalla. A partir de este momento, se inicia el proceso de registro de información para generar el plan de fertilización. Primero se despliega una ventana para que escriba el nombre con el que va a guardar el plan de fertilización; luego, se le pide que seleccione el lote que registró en el paso anterior, y se finaliza con la opción “Guardar” (figura 30).

Figura 30. Inicio de registro del/los lotes en que se encuentra distribuido el predio.

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

Al crear el nuevo plan de fertilización, se abre una ventana en la que aparecen seis pestañas: “General”, “Foliar”, “Suelos”, “Informe análisis”, “Requerimientos nutricionales” y “Planes recomendados”.

En la pestaña “General” se asigna un código de registro (ID) y aparece información relacionada con el nombre, la fecha de creación, el lote registrado, la temperatura media anual (°C), la clasificación del clima, la densidad aparente (g/cm³), el número de plantas por hectárea, y, en función de la densidad aparente registrada, se calcula el peso de una hectárea de suelo (figura 31).

Figura 31. Información general del lote registrado.

TECNOHASS

FERTILIZACIÓN Y RIEGO

Fertilización y Riego

Julian Arango
Médico
Técnico

Plan Fertilización - Plan Fertilización Lote 1

Informe

General Foliar Suelos Informe Análisis Requirimientos Nutricionales Planes Recomendados

ID: 164

Nombre: * Plan Fertilización Lote 1 Fecha Creación: 2023-03-21 8:51 PM

Lote: *

Temperatura media anual (°C): 22.00 Clima: Templado

Densidad aparente (Da) (g/cm3): 0.45 Número Plantas / ha: 204

Peso del suelo: 2,025,000 Kg suelo / ha

Cancelar Guardar

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

En la pestaña “Foliar”, en el campo “Información general”, se debe seleccionar, dentro de una lista desplegable, el laboratorio donde se hicieron los análisis, así como registrar la fecha de realización y el número de laboratorio. En el campo “Resultados” se registran los valores que arrojó el resultado del análisis foliar. Para realizar el cálculo de los planes de fertilización, se deben ingresar todos los valores en las unidades indicadas (figura 32). Si el usuario no cuenta con el resultado del análisis foliar, debe registrar todos los campos con cero (0) y seleccionar la opción de guardar. El plan de fertilización se generará solo con la información registrada en el análisis de suelos.

Figura 32. Registro de resultados del análisis foliar para el/los lotes registrados para cada predio.

Elemento	Valor	Unidad	Elemento	Valor	Unidad
Nitrogeno (N) +	1.50	%	Fósforo (P) +	0.05	%
Potasio (K) +	2.87	%	Magnesio (Mg) +	0.44	%
Fósforo (P) +	0.14	%	Sulfuro (S) +	0.003	%
Calcio (Ca) +	0.02	%	Manganeso (Mn) +	0.0234	ppm
Magnesio (Mg) +	0.15	ppm	Zinc (Zn) +	0.000	ppm
Hierro (Fe) +	111.00	ppm	Cobre (Cu) +	0.02	ppm

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

En la pestaña “Suelos”, en el campo “Información general” se debe seleccionar, dentro de una lista desplegable, el laboratorio donde se hicieron los análisis, así como registrar la fecha de realización y el número de laboratorio. En el campo “Resultados”, primero se debe seleccionar, de una lista desplegable, la profundidad a la cual se tomó la muestra de suelo; al hacer clic en el botón , se brinda la opción de agregar varias profundidades, en caso de que se haya tomado muestras a distintas profundidades (0-15, 15-30 o 30-45 cm); si solo se tomó a una profundidad, se selecciona la opción de 0-45 cm. Para el elemento fósforo, indique el método utilizado para su cuantificación, que se especifica en el resultado del análisis. Se debe registrar toda la información solicitada en el formulario, relacionada con las cantidades de cada elemento reportadas en el resultado del análisis (figura 33). Para el contenido de

nitrógeno, si el análisis no reporta este valor, se sugiere dividir el valor de materia orgánica (MO) en 20, ya que corresponde aproximadamente al 5 % de la MO. A partir de la información registrada, el sistema calcula las relaciones entre cationes. Una vez se registra toda la información, se selecciona la opción de guardar.

Figura 33. Registro de resultados del análisis de suelos para el/los lotes registrados para cada predio.



Nutriente	Unidad	Valor
Fósforo (P)	mg/kg	0.08
Nitrógeno (N)	mg/kg	0.01
Potasio (K)	mg/kg	0.02
Calcio (Ca)	mg/kg	0.01
Magnesio (Mg)	mg/kg	0.01
Zinc (Zn)	mg/kg	0.01
Hierro (Fe)	mg/kg	0.01
Cobre (Cu)	mg/kg	0.01
Boro (B)	mg/kg	0.01

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

En la pestaña “Informe análisis” se genera el resultado del análisis foliar, para el cual se aplican las ecuaciones descritas en la sección “Índice de balance de nutrientes (IBN)”, del Capítulo 5, “Requerimientos nutricionales del cultivo de aguacate Hass”. En el análisis se presenta la clasificación de cada nutriente, indicando si se encuentra en déficit, debajo de lo normal, normal, encima de lo normal o en exceso. Además, se genera una gráfica de la condición en que se encuentra cada nutriente (figura 34).

Figura 34. Informe del estado nutricional del cultivo basado en la metodología del índice de balance de nutrientes (IBN) para el/los análisis foliares registrados.



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

En la sección “Análisis de suelos” de este informe, se relaciona la condición en que se encuentra cada nutriente, tomando como referencia la tabla 14 (Capítulo 5), sobre los valores propuestos en el documento “Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación”, del *Manual de asistencia técnica* del ICA (1992), donde se indican los rangos (bajo, normal o alto) para cada nutriente. También se muestra la condición en que se encuentran el pH, la MO , la conductividad eléctrica y las relaciones catiónicas (figura 35).

Figura 35. Informe del contenido nutricional del suelo para el/los análisis de suelos registrados.

Variable	Unidad - Referencia	Explotación	Estado
Nitrogeno (N)	20%	1.5%	Alto
Fosforo (P)	10%	1.5%	Alto
Potasio (K)	10%	1.5%	Alto
Calcio (Ca)	10%	1.5%	Alto
Magnesio (Mg)	10%	1.5%	Alto
Sodio (Na)	10%	1.5%	Alto
Cloro (Cl)	10%	1.5%	Alto
Acidez (pH)	5.5-6.5	5.5	Alto
Alcalinidad (pH)	7.5-8.5	7.5	Alto
PH (pH)	5.5-6.5	5.5	Alto
Alcalinidad	7.5-8.5	7.5	Alto
Calcio (Ca)	10%	1.5%	Alto
Cloro (Cl)	10%	1.5%	Alto
Acidez (pH)	5.5-6.5	5.5	Alto
Alcalinidad (pH)	7.5-8.5	7.5	Alto
PH (pH)	5.5-6.5	5.5	Alto
Alcalinidad	7.5-8.5	7.5	Alto

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

En la pestaña “Requerimientos nutricionales” se aplican las ecuaciones descritas en la sección “Necesidades de fertilización”, del Capítulo 5, y se generan los valores requeridos para cada nutriente en relación con la cantidad presente en el suelo (CPS; kg/ha), los valores de extracción por la cosecha (kg/ha), la eficiencia de la aplicación (EA; %) y la necesidad de fertilización (NF; kg/ha) (figura 36). El valor que se reporta en la columna de NF corresponde a la forma oxidada de cada nutriente, y a partir de este valor se debe cuantificar su contenido en función de la fuente de fertilizante que se va a utilizar.

Figura 36. Información consolidada sobre los parámetros requeridos para calcular los planes de fertilización.



Requerimientos Nutricionales	Requerimiento (kg/ha)	Requerimiento (kg/ha)	Requerimiento (kg/ha)	Requerimiento (kg/ha)
Nitrogeno	100.00	100.00	100.00	100.00
Fosforo	50.00	50.00	50.00	50.00
Potasio	100.00	100.00	100.00	100.00
Magnesio	50.00	50.00	50.00	50.00
Zinc	10.00	10.00	10.00	10.00
Cobalto	5.00	5.00	5.00	5.00
Cu	5.00	5.00	5.00	5.00
Mn	10.00	10.00	10.00	10.00
B	5.00	5.00	5.00	5.00
Fe	10.00	10.00	10.00	10.00
Mo	5.00	5.00	5.00	5.00
Cl	10.00	10.00	10.00	10.00
S	10.00	10.00	10.00	10.00

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

En la pestaña “Planes recomendados” se sugieren tres planes de fertilización basados en productos comerciales disponibles en el mercado y calculados a partir de la información del análisis de suelos y foliar registrado para cada predio (figura 37). Si el usuario desea utilizar otras fuentes de fertilizantes, puede remitirse a la sección “Necesidades de fertilización”, del Capítulo 5, para hacer el cálculo de forma manual a partir de la información generada en la columna N_F de la pestaña “Requerimientos nutricionales” de TECNOHASS.

Figura 37. Planes de fertilización sugeridos a partir de los análisis foliares y de suelos registrados para el/los lotes de cada predio.

PLAN FERTILIZACIÓN 1

Producto Comercial	Marca	Concentración	Requerido	Nº LITROS PRODUCTO / hectárea	Costo / Hecto
Cloruro de Potasio	Arborea - 20%	0.00	115.00	59.50	0.00
Fosfato de Calcio	Verdeiro - 10%	0.00	0.00	0.00	0.00
Urea	Verdeiro - 10%	0.00	0.00	0.00	0.00
Cloruro de Sodio	Verdeiro - 10%	0.00	0.00	0.00	0.00
Cloruro de Sodio	Verdeiro - 10%	0.00	0.00	0.00	0.00
Cloruro de Sodio	Verdeiro - 10%	0.00	0.00	0.00	0.00

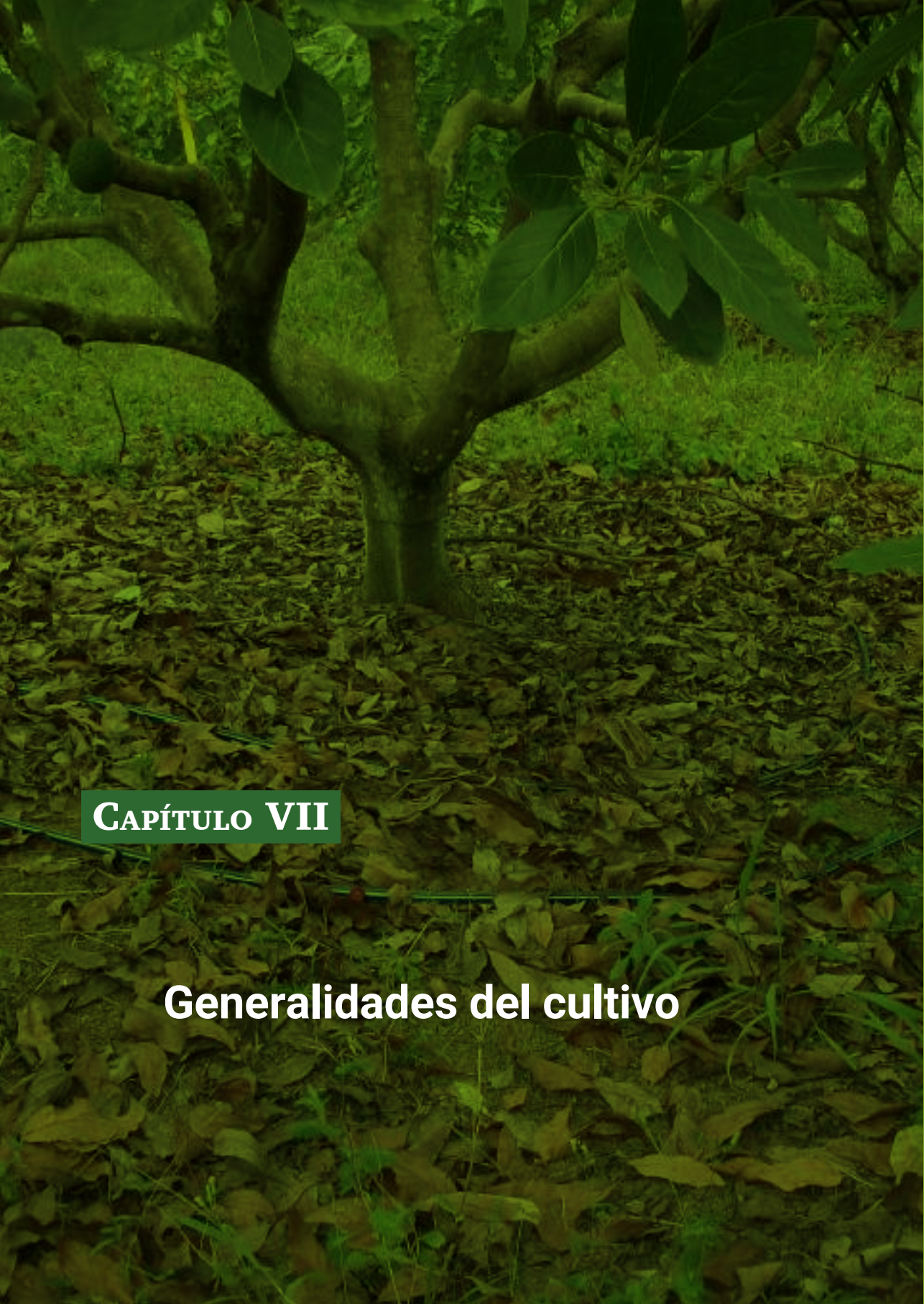
Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

A close-up photograph of a branch from an avocado tree. The branch is covered with large, dark green, glossy leaves. Several green, unripe avocados are hanging from the branch, some in small clusters. The background is blurred, showing more foliage and a hint of a bright light source.

UNIDAD II

Requerimientos hídricos y manejo del riego





CAPÍTULO VII

Generalidades del cultivo

Anivel mundial, Colombia es el segundo productor de aguacate, con 876.754 t/año, detrás de México (2.393.849 t/año) y delante de República Dominicana (676.373 t/año) (FAO, s.f.-a). En Colombia, el área total establecida en 2020 fue de 87.791 ha, y para 2021 se proyectó un incremento de 4.908 ha, lo cual sumaba un área total sembrada de 92.699 ha (DANE, 2019; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2021).

En cuanto a rendimiento, el promedio alcanzado en 2021 fue de 10 t/ha, siendo el departamento de Caldas el de mayor rendimiento (11 t/ha), aunque el de mayor aporte a la producción nacional fue Antioquia, con 48 %, seguido por los departamentos de Risaralda y Caldas, que representaron el 34,4 % de la producción nacional en el mismo año (MADR, 2021). Aproximadamente el 34 % del total del área sembrada de aguacate en el país corresponde a aguacates de la variedad Hass, y el 76 % restante a aguacates criollos y tipo papelillo, como Lorena, Choquette, Booth 8 y Trinidad, concentrados principalmente en la región Andina del país (MADR, 2021).

Requerimientos hídricos en aguacate

Dado que el manejo del agua en un cultivo es un factor que influye en su producción, se han realizado diversas investigaciones enfocadas en el estudio de los requerimientos hídricos del cultivo de

aguacate. Diferentes autores han evidenciado que la evaluación de láminas de riego, basadas en la evapotranspiración de referencia (ETO), permite tener una aproximación real al coeficiente del cultivo (K_c) y, por tanto, a sus requerimientos hídricos.

En el cultivo de aguacate, el sistema de riego más utilizado es el riego por goteo (AQUA4D, s.f.; iAgua, 2021), por ser el método más eficiente para suministrar agua en la cantidad correcta y en el momento adecuado para la planta. El uso de un sistema de riego localizado (goteo o microaspersión) proporciona un riego uniforme y permite mantener la humedad en la zona de raíces a capacidad de campo, con lo cual se puede obtener mejores rendimientos.

En Israel, mediante la evaluación de diferentes técnicas de riego localizado (goteo, microaspersión y la combinación de estos), se obtuvo, con el uso combinado de riego por goteo y microaspersión, una mejor respuesta en producción (63 kg/árbol) y, por lo tanto, un mayor rendimiento. Además, también se obtuvo un mayor tamaño y distribución de las raíces, así como mejor calidad de la fruta (tipo exportación), aunque la eficiencia en el uso del agua (EUA) fue mayor con el riego por goteo (Darwish & El-Metwalli, 2019).

De igual forma, en las condiciones de Tepic, México, la aplicación de riego por microaspersión y sin riego evaluada indica que los árboles con riego presentaron mayor peso y longitud de los frutos, con valores de 195,87 g y 93,81 mm, en comparación con los frutos sin riego, que presentaron valores de 181,16 g y 89,60 mm (Salazar-García et al., 2016).

Por otro lado, en un estudio realizado por Silber et al. (2019) se determinó, para las condiciones de Israel, que una lámina de riego correspondiente al 100 % de la ETC es adecuada para el cultivo de aguacate Hass, dado que es posible obtener un rendimiento de hasta 30 t/ha, además de disminuir la alternancia productiva en el siguiente ciclo. Por su parte, Durán-Zuazo et al. (2021) recomiendan para aguacate Hass, en condiciones de España, una lámina de riego

correspondiente al 75 % de la ETC, ya que permite ahorrar agua y tener una producción promedio de 43,8 kg/árbol.

En una investigación realizada por Sabando-García et al. (2022), se evaluó el bulbo húmedo del suelo mediante tratamientos de riego basados en la ETC. Con las láminas de riego con mayor ETC (100 % y 120 % de la ETC), se comprobó que el caudal de goteo y el tiempo de riego influyen en la profundidad y el radio del bulbo de humedecimiento; por lo tanto, se presenta un mayor volumen de suelo húmedo. Con una lámina de riego del 100 % de la ETC en las diferentes etapas fenológicas, se obtienen los mejores crecimientos verticales y horizontales del sistema radicular de la planta. Con una lámina de riego del 120 % de la ETC se obtiene un mayor número de raíces secundarias durante el desarrollo. Finalmente, con la aplicación de agua al 77 % de la ETC en una etapa inicial del cultivo, se presenta una mejor respuesta al desarrollo de raíces secundarias.





CAPÍTULO VIII

Manejo del riego en aguacate Hass

El suelo, la planta y la atmósfera constituyen un sistema continuo. La planta conduce el agua del suelo hacia las estomas, liberándola a la atmósfera, en un proceso llamado *transpiración*, el cual permite el ascenso de agua en las plantas, desde el suelo hasta las hojas, en respuesta al gradiente de potencial hídrico entre la atmósfera y la hoja, en tanto que el agua se mueve desde las zonas con mayor potencial hídrico hacia las zonas con menor potencial. Al darse simultáneamente la evaporación de agua desde la superficie del suelo, se ha definido el término *evapotranspiración* (ET) como el agua que regresa a la atmósfera desde las hojas de las plantas cuando es transpirada y la evaporada desde la superficie del suelo (Ferreyra & Sellés, 2011).

La evaporación, la transpiración y la evapotranspiración son fundamentales para estimar los requerimientos de riego y para programarlo. Para determinar las necesidades de riego, se debe estimar la evapotranspiración del cultivo (ETC) con mediciones directamente en el campo o utilizando datos meteorológicos. Las mediciones directamente en el campo son muy costosas y se utilizan sobre todo para calibrar los métodos que estiman la ET con datos climáticos.

Hay muchos factores que influyen en la magnitud de la ETC, como el tipo de suelo, el nivel de humedad, las prácticas culturales y el material genético. El conocimiento de la ETC es fundamental para establecer un manejo eficiente del riego, a partir de la aplicación

de la cantidad de agua (volumen) y la frecuencia del riego, ajustado a los requerimientos del cultivo. Un manejo adecuado del riego permite que la planta exprese su potencial productivo, con la obtención de altos rendimientos, haya mayor estabilidad de la producción entre cosechas y mejore la calidad de la fruta. Además posibilita un uso racional del agua mediante una gestión sostenible del recurso hídrico y la implementación de sistemas de riego eficientes (Puppo & García-Petillo, 2010).

Con el objetivo de tener herramientas tecnológicas que permitan instalar un sistema de riego eficiente y lograr la máxima eficiencia de aplicación (EA) —el porcentaje de agua aplicada que permanece en la zona radical y que está disponible para las plantas—, es necesario contemplar aspectos agronómicos, hidráulicos y energéticos en relación con los requerimientos del cultivo y las características particulares de cada zona productora y cada finca (estudio de agua, suelo, clima, orografía y topografía).

Diseño agronómico

Consiste en relacionar las características del cultivo (la edad y la profundidad efectiva radical) y del suelo (la textura, la estructura, la profundidad, el drenaje y la materia orgánica), así como las variables climáticas (la precipitación, la evaporación, la temperatura, la humedad relativa, el brillo solar y la velocidad del viento) con el sistema de riego elegido, para poder determinar la cantidad de agua que la instalación deberá soportar en las épocas de máxima demanda y los parámetros de riego. En síntesis, estos son el caudal de los emisores y el número de emisores por árbol, el tiempo de riego e intervalo entre riegos en el periodo de máximas necesidades y el caudal por unidad de superficie. Asimismo, esto permite realizar un primer planteamiento en cuanto a la posible sectorización de la explotación para lograr una buena eficiencia de la aplicación del riego (EA) en toda la superficie regable (figura 38).



Características climáticas

Precipitación, evaporación, temperatura máxima, media y mínima, brillo solar, humedad relativa y velocidad del viento registrados en estaciones climatológicas convencionales o automáticas.



Características del cultivo

Edad del cultivo, etapa fenológica, profundidad efectiva radicular, coeficiente del cultivo (K_c).



Características del suelo

El pH del suelo, humedad del suelo (CC y PMP), textura, estructura, materia orgánica, profundidad radicular máxima y drenaje.

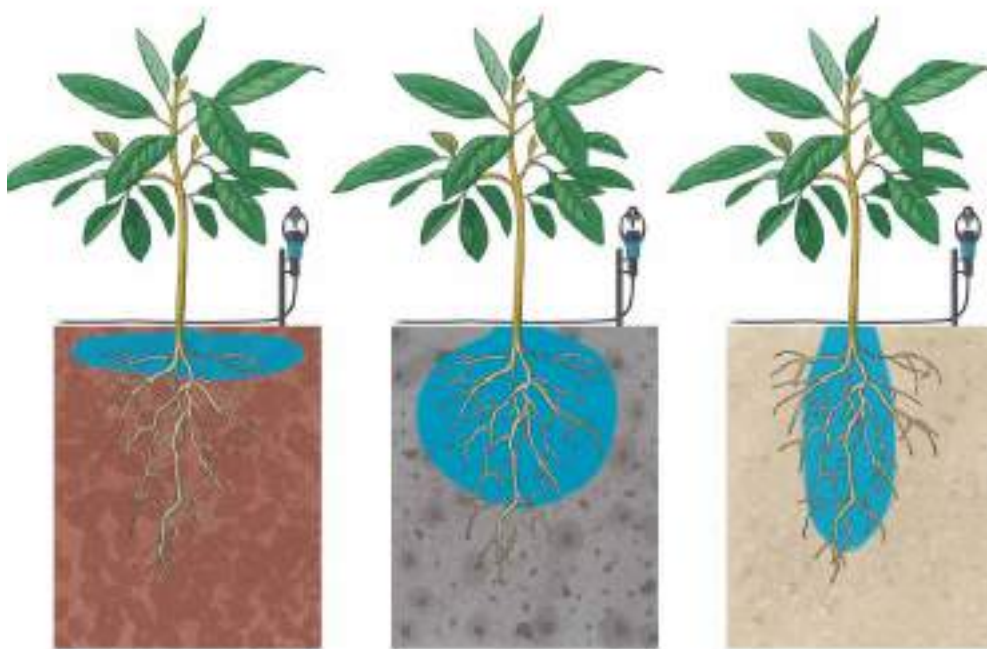
Figura 38. Principales características para tener en cuenta para el diseño agronómico de un sistema de riego.

Fuente: Elaboración propia

Fotos: Luis Carlos Grajales Guzmán y Ana María Trejos

Para decidir el caudal del gotero, así como su distanciamiento de otros y el tiempo en el que se alcanza la profundidad efectiva radical, es conveniente realizar una prueba de bulbo húmedo. En riego localizado aparece el término *bulbo húmedo* para designar los puntos del suelo que se mojan y donde se desarrollan las raíces. La textura del suelo va a determinar cómo se desplaza el agua y, en consecuencia, la forma y el tamaño del bulbo húmedo (figura 39). En el bulbo húmedo se desarrolla el sistema radical de las plantas.

Figura 39. Formación de bulbo de humedecimiento en zona de raíces.



Fuente: Elaboración propia.

En el estudio se realizaron pruebas de bulbo húmedo en las localidades de Herveo (Tolima), Rionegro (Antioquia) y Morales (Cauca), y se encontró que el gotero de 8 L/h es el que más se ajusta a los requerimientos y el tipo de suelo, pues a los 45 minutos de riego se alcanzó la profundidad efectiva del cultivo en las tres localidades, lo cual significa que el tiempo de riego no debe exceder esta duración, para no perder agua por infiltración.



Diseño hidráulico

El diseño hidráulico tiene como finalidad definir las dimensiones, la ubicación y el funcionamiento de los componentes del sistema de riego. Esto incluye determinar las longitudes y diámetros de las distintas tuberías que componen el sistema (tubería de conducción principal y secundaria, y líneas terciarias), con la finalidad de lograr una uniformidad de caudal mayor del 90 % y que la velocidad en las tuberías de la red no sea mayor de 2 m/s en todos los sectores y subunidades. Con ello se realiza el trazado y se dimensiona la red de transporte y distribución (figura 40).

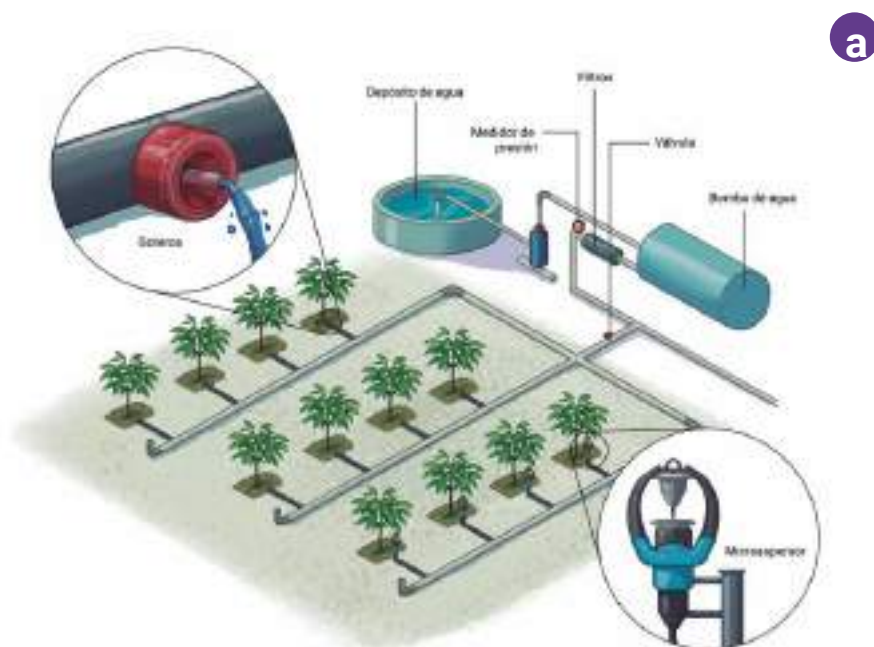


Figura 40. Diseño hidráulico y componentes de un sistema de riego localizado.

a. Esquema de un sistema de riego. b. Cabezal de riego y fuente de agua;
c. Tuberías de conducción; d. Cabezal de campo; e. Goteros; f. Esquema de un microaspersor.

Fuente: Elaboración propia.

Fotos: Luis Carlos Grajales Guzmán y Diana Yaritza Dorado Guerra



Componentes de un sistema de riego localizado

Como parte del diseño hidráulico de un sistema de riego localizado, se identifican los componentes principales para su correcto funcionamiento y garantizar la eficiencia en la aplicación del agua que sugiere este tipo de riego. A continuación, se enumera cada uno de los componentes.

Cabezal de riego

Se ubica después de la fuente de potencia (bomba) y está compuesto por el sistema de impulsión, el sistema de filtrado y el equipo de fertirrigación (opcional).

Sistema de impulsión

Se compone de una o más bombas, accionadas por un motor eléctrico o por combustible, dependiendo del acceso a la red eléctrica. Su función es impulsar el agua desde la fuente hídrica (río, lago, pozo), hacia la red de conducción y hasta los emisores de riego ubicados en las plantas. El dimensionamiento de la fuente de potencia dependerá de la superficie por regar y de la diferencia de cotas entre la fuente de agua y el punto más alto del huerto, con el fin de suministrar el caudal necesario, con la presión requerida por el sistema de riego.

Sistema de filtrado

Existen diversos equipos de filtrado, como el hidrociclón, los filtros de arena, el filtro de anillos y el filtro de malla; su uso depende de la calidad del agua de riego y del tipo de emisor utilizado. En el caso del riego localizado (goteo o microaspersión), es importante implementar un sistema de filtrado adecuado para disminuir las pérdidas de presión y la desuniformidad del riego por obturaciones debido a partículas que se transporten en el agua.

Equipo de fertirrigación

Son los equipos necesarios para la inyección de fertilizante, el lavado de tubería o la dosificación de productos en la conducción general del riego.

Sistema de conducción del agua

Se refiere a las tuberías que conducen el agua desde el cabezal de riego hasta los emisores en campo.

Tubería de conducción

Lleva el agua desde el cabezal de riego hasta los módulos de riego en campo. Esta tubería puede ser en policloruro de vinilo (PVC) o polietileno. El diámetro y la relación diámetro/espesor (RDE) de la tubería principal se determinan de acuerdo con la longitud por cubrir y la presión que debe soportar el sistema.

Tubería lateral

Es la encargada de distribuir el agua a los emisores de riego, goteros o microaspersores. Esta tubería generalmente es de polietileno de baja densidad, con diámetros de 16 mm o 20 mm, y su dimensión depende del caudal y la longitud de la línea de riego.

Cabezal de campo o módulo

Son válvulas que se instalan en campo en las diferentes unidades de riego y suministran el agua a los laterales. Pueden ser válvulas manuales tipo bola o compuerta o válvulas de acción eléctrica con mando a distancia para sistemas de riego automatizados. En el cabezal de campo generalmente también se instala una ventosa, que consiste en una válvula que libera el aire de la tubería de riego en ese punto.

Emisores de riego

Son los dispositivos ubicados en la tubería lateral por donde se emite el agua con un caudal y presión determinados. En riego localizado, los emisores de riego pueden ser goteros o microaspersores.

Goteros

En el mercado hay variadas opciones de goteros, cuya funcionalidad y escogencia dependen del cultivo, el diseño agronómico del riego, la cantidad y calidad de agua por aplicar, la presión de trabajo, entre otros aspectos. Los más utilizados son los goteros de laberinto, que constan de un conducto largo por el cual pasa el agua en flujo turbulento y poseen baja sensibilidad a los cambios de temperatura y a los taponamientos. Estos goteros vienen insertados a la manguera (lateral) desde la fábrica, con diferentes distancias entre emisores (0,2 m, 0,5 m o 1 m). También se utilizan los goteros tipo botón, que se instalan sobre la lateral mediante una perforación en la manguera en la que se insertan, y pueden ser desarmables, lo cual facilita su limpieza. En general, los diferentes tipos de goteros trabajan con caudales bajos, entre 1 L/h y 8 L/h, y con presiones entre 10 PSI y 30 PSI.

Microaspersores

El agua se aplica en forma de lluvia suave desde cerca de 30 cm de la superficie del suelo mediante unos elevadores que soportan los microaspersores, de manera que se humedece un rango de superficie de 2 m a 5 m de diámetro. Los caudales están entre 25 L/h y 120 L/h. Este tipo de emisores de riego localizado se dividen en dos grupos: los microaspersores, que tienen un accesorio sobre el cual golpea el agua proveniente de la lateral y van rotando sobre su eje, y los microjets, que emiten agua en forma de chorro y son estáticos (no rotan). Los microaspersores pueden

configurarse para humedecer el suelo en ángulos de 280°, 270°, 180°, 90°, 40°, entre otros.

Accesorios de control en la red de riego

Son dispositivos con los cuales se puede medir y controlar variables como el caudal y la presión del sistema en los diferentes puntos de control que se determinen en el diseño hidráulico del riego.

Medidores de presión

Comúnmente, se utiliza el manómetro de glicerina para medir la presión del sistema en puntos de control como la salida del equipo de bombeo y la salida del equipo de filtrado, con el fin de monitorear el correcto funcionamiento del sistema de riego y evitar daños.

Caudalímetro

Es un dispositivo usado para medir la cantidad de agua que fluye por la tubería de manera instantánea, aunque también es posible hacerlo de forma acumulada. Esto permite monitorear la uniformidad del riego.

En este sentido, para las zonas de estudio, de acuerdo con las características del bulbo húmedo, las propiedades físicas del suelo, la demanda y oferta hídrica de los huertos de estudio y las condiciones de los cultivos y ambientales, se instaló un sistema de riego por goteo. Los goteros instalados fueron autocompensados y antidrenantes, con un caudal de 8 L/h, para evitar que los cambios de presión generados en el sistema influyeran sobre la descarga de cada gotero. Por árbol se instalaron dos collares con diez goteros cada uno, distanciados a 1,0 m y 1,4 m del tronco y con una separación entre goteros de 0,6 m y 0,8 m, respectivamente, como se observa en la figura 41.



Figura 41. Sistema de riego instalado en campo.

Foto: Diana Yaritza Dorado Guerra

Programación de riego

El éxito de aplicar riego depende del conocimiento de la cantidad de agua que requiere un cultivo y del momento oportuno para aplicarla, lo cual permite aumentar los rendimientos del cultivo y la calidad del fruto, además de ahorrar agua y energía. Para ello, se requiere realizar la programación del riego de acuerdo con el requerimiento hídrico del cultivo, en la cantidad y con la frecuencia adecuadas. Para programar el riego, se deben tener en cuenta las condiciones climáticas, así como las características del cultivo, el suelo y el sistema de riego que se va a utilizar (Ferreya & Sellés, 2007).

Los requerimientos de agua de un cultivo o la ETC están en función de la ETO y el KC, para cada etapa de desarrollo fisiológico.

Experimentalmente, la E_{TC} se determina mediante dispositivos específicos y mediciones precisas de variables ambientales, incluido el balance de agua en el suelo. Las metodologías utilizadas en campo son 1) el balance de agua en el suelo, 2) el balance de energía y parámetros microclimáticos y 3) el método de transferencia de masa (Allen et al., 2006). Uno de los métodos utilizados para calcular los requerimientos hídricos de la planta es el balance hídrico, cuyos pasos para la programación del riego en aguacate Hass se describen en los siguientes apartados.

Registro de variables climáticas y cálculo de la evapotranspiración de referencia

El clima define la demanda evaporativa de la atmósfera, que puede ser determinada a partir de la evapotranspiración de referencia (E_{TO}). En consecuencia, la E_{TO} es independiente de las características de un cultivo particular. Para determinar la evapotranspiración directamente en campo se requieren mediciones precisas del balance de agua en el suelo o de parámetros microclimáticos, con los equipos indicados, además de personal capacitado en investigación. El cálculo directo de la E_{TO} en campo es dispendioso, pero se requiere para ajustar las estimaciones alcanzadas con métodos indirectos o modelos. Para su cálculo, se han desarrollado diferentes ecuaciones empíricas o semiempíricas, a partir del análisis de la información climática (Allen et al., 2006).

Existen estudios que comparan los métodos de campo con las diferentes ecuaciones para establecer cuál es la que más se ajusta a las condiciones locales. Algunas ecuaciones solo son válidas para condiciones específicas y no se pueden aplicar en zonas diferentes. Jensen et al. (1990) encontraron que la ecuación de Penman-Monteith y la de Hargreaves y Samani (1982, 1985) pueden ser empleadas con un buen ajuste en el cálculo de la E_{TO} en el trópico.

Santana-Peña y Peña-Peña (2010) reportaron que las fórmulas que mejor reflejaron el comportamiento real de la E_{TO} en un clima húmedo en el trópico fueron las de Hargreaves y Samani (1982, 1985), Penman-Monteith y Turc (1961) y Blaney y Morin (1942). Actualmente, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el método estándar para definir y calcular la E_{TO} (Allen et al., 2006).

A la ecuación de Penman-Monteith se vinculan las características del cultivo de referencia, y la ecuación queda definida como FAO Penman-Monteith (ecuación 5).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Donde,

E_{TO} : evapotranspiración de referencia (mm/día).

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ/m^2/día$).

G : flujo de calor del suelo ($MJ/m^2/día$).

T : temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}C$).

u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).

e_s : presión de vapor de saturación (kPa).

e_a : presión real de vapor (kPa).

$e_s - e_a$: déficit de presión de vapor (kPa).

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor (k/Pa/ $^{\circ}C$).

γ : constante psicrométrica (kPa/ $^{\circ}C$).

LA FAO ha desarrollado *software* libres que utilizan el modelo de Penman-Monteith para el cálculo de la ETO, como CropWat o ETo-Calculator. El modelo requiere datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (Allen et al., 2006). Las variables de entrada de los programas son las siguientes:

- *Localización*: el *software* EToCalculator requiere de la ubicación geográfica (latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar) del sitio donde se desarrolla el experimento para ajustar el cálculo de la radiación extraterrestre (R_a) y la duración máxima de la insolación (Allen et al., 2006).
- *Temperatura*: se requieren los datos de temperatura diaria (promedio), máxima y mínima. Cuando solo se tiene el promedio de la temperatura diaria, el *software* igual puede calcular la ETO, pero es posible que subestime su valor debido a que la relación entre la presión de vapor de saturación y la temperatura no es lineal (Allen et al., 2006).
- *Humedad*: el valor de la presión real (promedio) diaria de vapor (e_a), en kilopascales (kPa), se requiere como dato de entrada para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith. En caso de que los valores de presión real de vapor no estén disponibles, es posible utilizar los datos de la humedad relativa media (%) (Allen et al., 2006).
- *Radiación*: la radiación neta diaria (promedio) está expresada en megajulios por metro cuadrado por día ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa, pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) —medida con un pirómetro— o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas/día) —medida con el heliógrafo— (Allen et al., 2006).
- *Viento*: para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith, se requiere contar con la velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo (m/s), medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo. Es importante verificar la altura a la que se mide

la velocidad del viento, pues velocidades del viento medidas a diversas alturas sobre la superficie del suelo seguramente presentan valores diferentes (Allen et al., 2006).

Cálculo de la evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se define como el producto entre la ETo y el Kc (ecuación 6). El Kc describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la recolección (Doorenbos & Pruitt, 1977). En la tabla 20 se presentan Kc utilizados en aguacate en diferentes zonas productoras a nivel mundial.

$$ETc = ETo \times Kc$$

Tabla 20. Coeficientes del cultivo (Kc) determinados para aguacate

Procedencia de la investigación	Kc
Nueva Zelanda*	0,60-0,65
Lima, Perú**	1,125
Valle Central, Chile***	0,75

* Kaneko et al. (2022); ** Vásquez et al. (2015); *** Holzapfel et al. (2017).

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la precipitación efectiva

Solo una porción del agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo puede ser utilizada por las plantas. Hay una parte de la precipitación que se infiltra a través de la superficie del suelo y otra que fluye sobre él en forma de escorrentía superficial, dependiendo de las propiedades hidrofísicas del suelo. Cuando la lluvia cesa, parte del agua que se encuentra en la superficie del suelo se

evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se infiltra lentamente en el interior del suelo (Water Science School, 2019).

Del total del agua que se infiltra, parte de ella percola por debajo de la zona de raíces, mientras que el resto permanece almacenado en dicha zona y podría ser utilizado por las plantas; a esta porción de agua se la denomina *precipitación efectiva* (pe). Esta cantidad de agua es la que estará disponible para responder a las necesidades de agua de la planta (FAO, 2000). La pe se determina por experimentos en campo, por medio de ajustes de ecuaciones, o con ayuda de *software*, como Cropwat, diseñado por la FAO.

Control de agua en el suelo

La humedad en el suelo es uno de los factores que más condicionan el desarrollo normal de los cultivos. Un exceso o un déficit de esta en el suelo afecta el rendimiento de la mayoría de los cultivos. Cuando el problema es por exceso de humedad, el drenaje es la solución adecuada; cuando es por defecto de esta, la alternativa es el riego (Shaxson & Barber, 2005). Tanto la proporción en que se encuentran los materiales que componen el suelo como la distribución del tamaño de poros y de agregados son fundamentales en el movimiento del agua y su retención en el suelo (Jaramillo, 2002).

El agua queda adherida a las partículas del suelo y es sometida a la acción de una serie de fuerzas que afectan su retención (Jaramillo, 2002). El movimiento del agua en el suelo se da por el potencial hídrico, que se puede considerar como “la cantidad de trabajo que es preciso aplicar para transportar reversible e isotérmicamente la unidad de cantidad de agua desde una situación estándar de referencia hasta el punto del suelo considerado” (Pizarro, 1996). El potencial hídrico o la energía con la que el agua es retenida en el suelo varían para cada tipo de suelo, de manera que tienen valores diferentes para un mismo contenido de humedad; esta relación se conoce como *curva de retención de humedad* (Jaramillo, 2002).

La curva de retención de humedad sirve para realizar la conversión entre el contenido de humedad y la succión de humedad. El contenido de humedad es la base para los estudios de balance de agua. En la curva de retención se determina cuál es la humedad para la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La capacidad de campo es la máxima capacidad de retención de agua de un suelo sin presentar problemas de drenaje, y se alcanza, según la textura del suelo, entre 24 y 72 horas después de un riego pesado; esta agua está retenida en el suelo a una tensión de $-0,1$ bar para suelos de textura gruesa. Por su parte, el punto de marchitez permanente es el punto de humedad mínima en el que una planta no puede seguir extrayendo agua del suelo y no puede recuperarse de la pérdida hídrica; se estima que este punto se encuentra a una presión de -15 bar.

Es posible medir la retención de agua en el suelo o potencial hídrico con distintos métodos; los más utilizados son los tensiómetros y los bloques de yeso. Debido a que el rango de datos de estos sistemas es limitado (entre 0 bar y 0,8 bar), los datos de humedad serían aproximados. El requerimiento hídrico, dependiendo del tipo de suelo y cultivo, puede estar por encima de la capacidad de campo, por lo que es más conveniente realizar el control de humedad instantáneo del suelo con sensores.

Monitorear la humedad del suelo ayuda a igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada con el riego, bien para que no haya pérdidas de agua excesivas por percolación profunda o por escurrimientos, bien para evitar aplicar una cantidad insuficiente. El exceso de irrigación puede incrementar el consumo de energía y los costos de agua, así como aumentar el movimiento de fertilizantes por debajo de la zona radicular, producir erosión y generar transporte de suelo y partículas de químicos a los canales de drenaje. El riego insuficiente, por su parte, puede reducir la producción de las cosechas (Enciso et al., 2007). Existen diferentes métodos para medir la humedad del suelo: gravimetría, sonda de neutrones, sonda TDR y sonda FDR, entre otros, y cada uno plantea una serie de ventajas e inconvenientes.

Unos de los métodos utilizados para medir la humedad son los sensores electrónicos, que pueden ser:

- Tensiómetros electrónicos con punta de porcelana: indican el esfuerzo que han de realizar las raíces para extraer del suelo la humedad que necesita el cultivo.
- Sondas eléctricas de dos o tres varillas: generan una onda electromagnética que produce un campo electromagnético entre las varillas. A partir de la frecuencia resultante, el sensor mide la capacitancia (c) y la conductancia (g) del suelo que se encuentra entre las varillas, y de esta forma determina su humedad.

Necesidades de riego netas

Las necesidades de riego netas (NRN) se definen como la cantidad de agua necesaria para que los cultivos desarrollen su máximo potencial productivo, en función de la cantidad de agua necesaria para el desarrollo de sus procesos fisiológicos, manteniendo los otros factores de producción constantes. Al aplicar riego, se deben conocer las propiedades físicas del suelo (densidad aparente, conductividad hidráulica, profundidad efectiva, curva de retención de humedad, etc.); el comportamiento histórico de las variables climáticas para establecer los meses en los que es necesario regar y el comportamiento fisiológico del cultivo.

Para calcular las necesidades de riego se deben leer las variables climáticas (temperatura máxima y mínima, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y radiación solar) y usar sensores de humedad, temprano en la mañana, siempre a la misma hora. La NRN se define como la diferencia entre la ETC y la Pe (ecuación 7), cuyo cálculo se debe realizar diariamente. Si la ETC del cultivo es mayor al aporte de precipitación, se debe regar.

$$NRN = Pe - ETC$$

La necesidad de riego real (NRR) que se aplica depende del sistema de riego y del coeficiente de uniformidad (CU); para riego por goteo, se considera un CU del 90 %. La ecuación 8 presenta la forma como se calcula la NRR .

$$NRR = NRN/CU$$

Volumen y tiempo de riego

Se debe encontrar el volumen de agua requerido por la planta, a partir de las NRR , teniendo en cuenta el área de humedecimiento del sistema de riego que se esté usando, para lo cual se utiliza la ecuación 9. En la figura 42 se muestra el área de humedecimiento utilizando un sistema de riego por goteo instalado en forma de anillo.

$$V(L) = NRR \times 1 \left(\frac{L}{m^2/día} \right) \times \text{Área}_{\text{planta}}$$

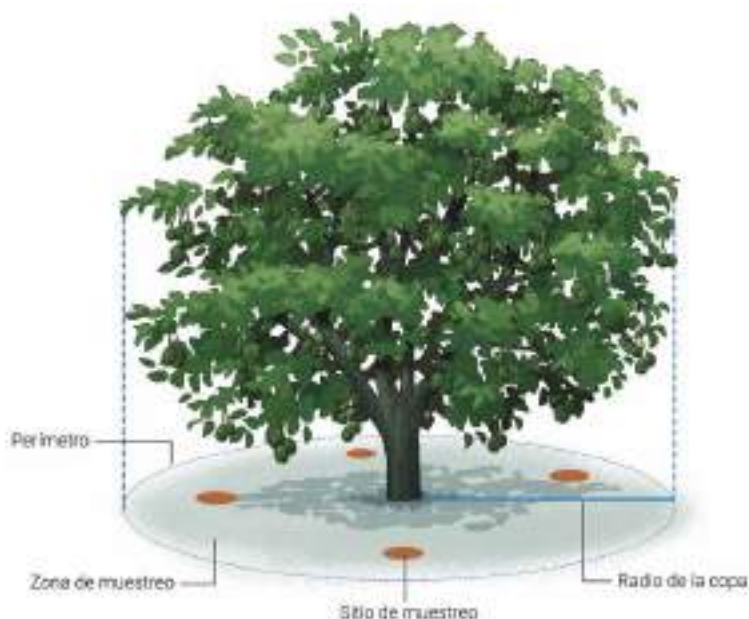


Figura 42. Área de humedecimiento utilizando un sistema de riego por goteo.

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de riego depende del volumen que se va a aplicar, así como del caudal y número de emisores por planta (ecuación 10).

$$t(\text{horas}) = \frac{V}{Q_{\text{Gotero}} \times \text{número goteros}_{\text{árbol}}}$$

Ejemplo de programación de riego

Para programar el riego en un cultivo de aguacate, se calcula la lámina neta, así como el volumen y el tiempo de riego, con una frecuencia diaria, utilizando la siguiente información:

- Coeficiente del aguacate (K_c) = 0,85 (Allen et al., 2006).
- Coeficiente de uniformidad (C_u) para riego por goteo = 0,9.
- Área efectiva de riego (A húmeda) = 4 m².
- Caudal de cada gotero (Q_{gotero}) = 8 L/h.
- Número de goteros por árbol = 20.

En la tabla 21 se muestran los datos de P_e y E_{To} .

Tabla 21. Valores diarios de P_e y E_{To}

Día	E_{To} (mm)	P_e (mm)
1	4,0	0
2	3,6	1
3	4,0	5
4	4,4	0
5	3,8	2

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se reemplazarán los valores expuestos en las ecuaciones dadas con anterioridad, con el fin de determinar el programa de riego para el ejemplo en cuestión.

Cálculo de evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) (ecuación 5):

$$E_{Tc} \text{ día 1} = 4 \text{ mm} \times 0,85 = 3,4 \text{ mm}$$

Cálculo de las N_{RN} (ecuación 7):

$$N_{RN} \text{ día 1} = 0 \text{ mm} - 3,4 \text{ mm} = -3,4 \text{ mm}$$

Si no se repone lo que consumió el cultivo en el día 1, se debe reponer en el día 2:

$$N_{RN} \text{ día 2} = (P_e \text{ día 2} - E_{Tc} \text{ día 2}) + \text{necesidades de riego día 1}$$

Después de reponer el agua que consumió el cultivo, se empieza el balance como el día uno.

N_{RR} (ecuación 8):

$$N_{RR} \text{ (mm) día 1} = 3,4 \text{ mm} / 0,9 = 3,78 \text{ mm}$$

Cálculo de volumen de riego (ecuación 9):

$$V \text{ (L)} = 3,78 \text{ mm} \times 4 \text{ m}^2 \times (1 \text{ L/m}^2) = 15,11 \text{ L}$$

Cálculo de tiempo de riego (ecuación 10):

$$t(\text{min}) = \frac{15,11 \text{ L}}{8 \text{ L/hora} \times 20} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}} = 6 \text{ min}$$

Con la información dada, y después de aplicar las ecuaciones en secuencia, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 22. En el día uno, para suplir una demanda de 15,11 L/día/árbol, teniendo un caudal de descarga de 160 L/h repartidos uniformemente en el plato del árbol en dos anillos de riego (figura 41), se debe dejar funcionando el riego por un lapso de 6 minutos. En el día tres no fue necesario regar porque el aporte de la precipitación fue mayor a los requerimientos hídricos de la planta.

Tabla 22. Resultados de balance hídrico

Día	ETo (mm)	Kc	ETo (mm/día)	Pe (mm)	NRN (mm)	Riego	NRR (mm)	V (L)	T (min)
1	4,0	0,85	3,40	0	-3,40	Sí	3,78	15,11	6
2	3,6	0,85	3,06	1	-2,06	Sí	2,29	9,16	3
3	4,0	0,85	3,40	5	1,60	No	0,00	0,00	0
4	4,4	0,85	3,74	0	-2,14	Sí	2,38	9,51	4
5	3,8	0,85	3,23	2	-1,23	Sí	1,37	5,47	2

Fuente: Elaboración propia



CAPÍTULO IX

Efecto del riego en la producción de aguacate Hass

Para evaluar el efecto del riego y llegar a la aproximación de los requerimientos hídricos en etapa productiva del cultivo de aguacate Hass en zonas productoras de Colombia, se establecieron tres tratamientos de riego definidos a partir de la ET_0 de los sitios evaluados, así: T1: $0,5ET_0$; T2: $0,75ET_0$; T3: $1,0ET_0$, y el testigo (sin riego). Con el fin de determinar las necesidades de riego, se realizó un balance hídrico con la metodología utilizada por Doorenbos y Pruitt (1977). Para medir la ET_0 diaria se utilizó el método FAO Penman-Monteith. Además, se instaló un sistema de riego por goteo con dos líneas de riego en forma de collar alrededor del árbol; cada collar contó con diez goteros con caudal de 8 L/h, teniendo en total un caudal de descarga de 160 L/h/árbol.

Caracterización de las zonas de estudio

La investigación se desarrolló en tres zonas productoras de aguacate Hass en Colombia: Morales (Cauca), Herveo (Tolima) y Rionegro (Antioquia). Los criterios para seleccionar las parcelas experimentales fueron el área mínima representativa del cultivo (una hectárea), los registros del manejo agronómico y la producción, el buen estado fitosanitario y que los árboles estuvieran en edad productiva, de mínimo seis años desde su establecimiento, para garantizar una producción estable (tabla 23).

Tabla 23. Generalidades de los huertos experimentales

Caracterización	Morales	Herveo	Rionegro
Vereda	Carpintero	Tesoritos	Cabeceras
Ubicación geográfica	W 76° 37' 15,8"	W 75° 12' 10,5"	W 75° 24' 14,7"
	N 02° 48' 34,5"	N 05° 02' 44,6"	N 06° 05' 56,9"
Altitud (m s. n. m.)	1.600	1.943	2.169
Área del predio (ha)	4	3	14

Fuente: Elaboración propia.

Suelos

La relación entre los materiales sólidos, líquidos y gaseosos que componen el suelo es fundamental en el movimiento del agua y su retención, lo cual determina una serie de propiedades conocidas como *propiedades físicas del suelo*. Antes de tomar las muestras para el análisis físico, se realizó una calicata en cada lote experimental con el fin de conocer el perfil del suelo, determinar a qué profundidad hay cambios en este y decidir cuántas muestras tomar (Jaramillo, 2002). La formulación de los planes de fertilización se realizó con base en el análisis de suelos, el índice de balance y la extracción de elementos reportada por Salazar-García (2002).

Para el análisis químico del suelo, se realizó un muestreo aleatorio en varios puntos de los lotes experimentales, y después se mezclaron por profundidad, se empacaron y se rotularon. En el análisis físico, se tomaron muestras con anillos de 5 cm de largo en áreas contrastantes del lote experimental; después, las muestras se extrajeron, se sellaron y se marcaron para enviar al laboratorio. Los análisis físicos y químicos de suelos se realizaron en el Laboratorio de Química Analítica de AGROSAVIA.

Herveo

Los suelos de la parcela experimental de Herveo se clasifican dentro del orden Andisol, desarrollados a partir de materiales volcánicos (cenizas, magma, rocas, etc.). El material parental de los suelos andisoles les otorga características únicas y distintivas, llamadas *propiedades ándicas*, que se manifiestan en una baja densidad aparente, una alta carga variable y una alta capacidad de retención de fosfatos y de humedad (Arnalds & Stahr, 2004). Los suelos del predio se ubican dentro de la unidad MKBf1, una consociación Alic Hapludands, que se conforma con los suelos Alic Hapludands y Hydric Hapludands, caracterizados por ser de profundos a superficiales, con alto contenido de materia orgánica, excesivo drenaje, texturas medias y ligeramente ácidos, ubicados en un relieve de fuertemente quebrado a escarpado, de pendientes largas y empinadas (IGAC, 2004).

En cuanto a las condiciones químicas del suelo, el pH es clasificado como fuertemente ácido (5,5-5,9). Bisonó y Hernández (2008) mencionan que el rango óptimo de pH para el desarrollo del cultivo es entre 5,5 y 7,5. El suelo presenta altos niveles de hierro, debido, principalmente, al material parental del que se origina este suelo, lo que a su vez ocasiona su acidez. A estos valores de pH se inhibe la solubilidad de fósforo y se disminuye la disponibilidad de calcio, magnesio y potasio, aunque se encuentren en niveles normales en el suelo. Además, se reduce la actividad microbiana del suelo, lo que puede llegar a afectar la nitrificación de la materia orgánica y, por lo tanto, disminuir la cantidad de nitrógeno disponible para las plantas. Estos macronutrientes son de vital importancia en la producción de aguacate, debido a que son los principales formadores de estructuras, componentes de enzimas y nucleoproteínas (Salazar-García, 2002).

También se presentan contenidos altos de Zn y materia orgánica, y contenidos normales de K, Ca, Cu y B, aunque con bajos contenidos de Mg, S y Mn. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es de 5,43 cmol(+)/kg, considerada como baja, lo cual indica que el suelo posee una baja capacidad para el suministro y reserva de

bases. La saturación de Ca y K son altas, mientras que la de Mg es normal. Las relaciones iónicas entre las bases indican que existe una carencia inducida de Mg por el K. El cultivo de aguacate Hass es especialmente sensible a la salinidad del suelo, sobre todo a los complejos formados por el Na (Dubrovina & Bautista, 2014); sin embargo, debido al pH y a los altos contenidos de materia orgánica, no hay riesgo de salinidad y el contenido de Na es menor de 1 cmol(+)/kg, por lo que no hay riesgos de sodicidad.

Para el reconocimiento de las propiedades físicas del suelo, se realizó una calicata en el lote, en la que se observó que el horizonte A tiene una profundidad aproximada de 35 cm, presenta un alto contenido de materia orgánica y tiene una textura al tacto franco arenosa (FA), lo cual indica una alta porosidad. Al profundizar en el perfil, se notó un horizonte de transición A1, en el que se evidenció presencia de materia orgánica procedente del primer perfil, que por el movimiento del agua se transloca en profundidad. También hay concentración iluvial de arcillas en profundidad (mayor de 50 cm), lo que disminuye la porosidad y, en consecuencia, reduce la velocidad con la que el agua se mueve en el suelo y ocasiona una mayor retención de humedad (figura 43).

Figura 43. Perfiles de suelo en cada localidad. a. Herveo; b. Rionegro; c. Morales.



Fotos: Diana Yaritza Dorado Guerra

De acuerdo con los resultados de las muestras, el suelo donde se encuentra el huerto experimental es de textura franco arenosa, en el primer perfil del suelo, y se vuelve más gruesa a medida que se profundiza. La densidad aparente se encontró entre 0,9 g/cm³ y 1,09 g/cm³, lo cual indica que el suelo tiene una alta porosidad y permeabilidad, propiciadas por los altos contenidos de materia orgánica. Los valores de porosidad total son superiores al 40 %, lo cual se considera muy alta y favorece la relación aire/agua en la zona de raíces de aguacate Hass (tabla 24).

Tabla 24. Resultados de los análisis físicos de suelos en la parcela de Herveo

Característica física	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	Clasificación
Textura	FA	FA	AF	—
Densidad aparente (g/cm ³)	0,93	1,03	1,09	—
Densidad real (g/cm ³)	2,45	2,53	2,59	—
Porosidad total (%)	62,2	59,3	58,1	Muy alta*
Conductividad hidráulica (cm/h)	6,64	4,69	4,93	Media-moderadamente alta**

* FAO (2009) y ** Castellanos (2000)

FA: franco arenoso; AF: areno francoso

Fuente: Elaboración propia.



Rionegro

Los suelos del oriente antioqueño (altiplano), incluido el municipio de Rionegro, son andisoles, que evolucionaron a partir de material volcánico, principalmente cenizas y piroclastos, caracterizado por las propiedades ya descritas para este orden de suelos. Los suelos donde se ubica el experimento pertenecen a la asociación Guadua (GDd1), conformada principalmente por suelos Typic Hapludands. El municipio se localiza en el paisaje de altiplanicie, en un tipo de relieve de lomas y colinas disectadas, a veces masivas; el relieve es fuertemente ondulado, con cimas redondeadas y agudas, y pendientes generalmente cortas, convexas y cóncavas en las partes inferiores, entre el 7 % y el 25 % (IGAC, 2007).

El pH del suelo es clasificado como fuertemente ácido, con un valor de 5,5, en el límite del rango establecido. Valores de pH por debajo de 5,4 aumentan la probabilidad de que el aluminio forme parte del complejo de intercambio y eleve la saturación de este, haciéndolo más disponible para las plantas, lo que a su vez puede ocasionar toxicidad por este elemento (Casierra-Posada & Aguilar-Avenidaño, 2007).

El suelo presenta contenidos altos de Fe, lo cual ocasiona la limitante del pH. También tiene un alto contenido de materia orgánica, lo que le proporciona una mayor estabilidad y mejora la actividad microbiana, además de que genera la presencia de contenidos normales de K, Cu y Zn. Contiene niveles bajos de P, ocasionados posiblemente por la capacidad fijadora de la alófana —mineral propio de suelos originados de cenizas volcánicas— sobre este elemento (Maldonado-Torres et al., 2007).

Los niveles de Ca, Mg, S, Mn y B son bajos, característica propia de suelos de este tipo. La CIC es de 2,83 cmol/kg, considerada muy baja, por lo cual se infiere que el suelo tiene muy baja capacidad para suministrar y reservar bases. El porcentaje de saturación de Ca es alto, mientras que el de Mg es medio y el de K es bajo. Las

relaciones iónicas entre las bases indican una carencia inducida de Ca. La conductividad eléctrica es de 0,15 dS/m, lo cual permite afirmar que no hay problemas de salinidad, que, como se mencionó antes, es una de las principales limitantes del cultivo. En general, este suelo presenta bajos niveles de disponibilidad de nutrientes. En la tabla 25 se relacionan los resultados del análisis de suelo del huerto experimental.

En cuanto a la identificación de características físicas del suelo, en el perfil realizado se evidenció una capa orgánica en los primeros 20 cm, con una textura al tacto FA, lo que implica una alta porosidad. Después de los 25 cm se evidencia un perfil de color pardo oscuro, de textura franca, con un poco más de arcilla y menor contenido de materia orgánica, por lo cual se puede inferir que, a medida que se profundiza en el perfil del suelo, el contenido de arcilla es mayor, disminuyendo la capacidad de drenaje interno del suelo. De los análisis realizados a las muestras se obtuvo en general una textura FA; la densidad aparente fue menor de 0,9 g/cm³, cualidad propia de los suelos ándicos. La porosidad total es muy alta, lo cual favorece los procesos de drenaje, el movimiento de agua en el suelo y la relación aire/agua en la zona de raíces de la planta (tabla 25).

Tabla 25. Resultados de los análisis físicos de suelos en el predio experimental de Rionegro

Característica física	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	Clasificación
Textura	FA	FA	FA	—
Densidad aparente (g/cm ³)	0,52	0,52	0,48	—
Densidad real (g/cm ³)	2	2,09	2,17	—
Porosidad total (%)	74,1	74,9	77,7	Muy alta*
Conductividad hidráulica (cm/h)	0,19	0,11	0,15	Muy baja**

* FAO (2009) y ** Castellanos (2000)

Fuente: Elaboración propia.

Morales

Al igual que en las otras dos zonas, los suelos de la localidad de Morales presentan propiedades de suelos ándicos, originados a partir de depósitos de cenizas volcánicas y rocas ígneas. El municipio se ubica dentro del paisaje de altiplanicie, en clima templado-húmedo. De acuerdo con el IGAC (2009), estos suelos se clasifican como Typic Hapludands, dentro de las unidades cartográficas asociación Typic Hapludands-Humic Pachic Dystrudepts (AQA) y asociación Typic Hapludands-Typic Dystrudepts-Typic Paleudults (AQC). Estos suelos son profundos, bien drenados, con texturas de moderadamente gruesas a moderadamente finas y finas, así como de fuertes a moderadamente ácidos, con alta saturación de Al y con fertilidad natural de baja a moderada.

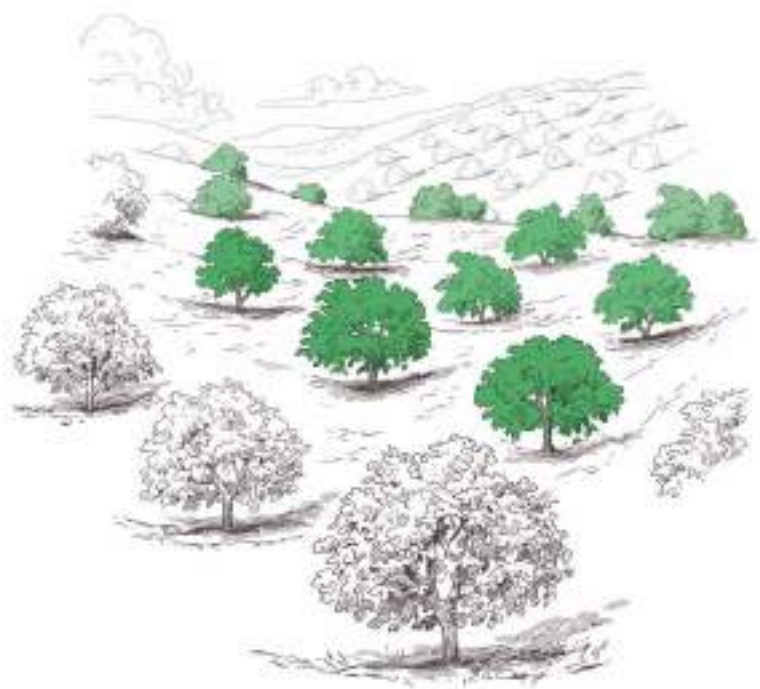
En cuanto a las condiciones químicas del suelo, el pH es clasificado como fuertemente ácido, con un valor de 5,33, desfavorable para la actividad microbiana, por lo cual la nitrificación de la materia orgánica se ve afectada. La asimilación del P disminuye por la formación de combinaciones insolubles de este elemento con el Fe y el Al. De acuerdo con Casierra-Posada y Aguilar-Avendaño (2007), con estos valores de pH comienzan a presentarse limitaciones para el desarrollo de las plantas por la saturación de Al, lo cual inhibe la absorción de otros nutrientes como el P y bases como el Mg y Ca. El suelo presenta una concentración de 0,26 cmol/kg de Al, correspondiente al 6,5 % del Al intercambiable en los primeros 15 cm de profundidad. Según Salazar-García (2002), el Al intercambiable por encima de 15 % afecta el rendimiento.

El contenido de materia orgánica es alto entre los 0 cm y 30 cm de profundidad del suelo, y normal entre los 30 cm y 45 cm, para las condiciones de la zona, lo cual favorece algunas condiciones del suelo, como la disminución del riesgo de afectación por Al, ya que este forma complejos no tóxicos con los compuestos húmicos (Casierra-Posada & Aguilar-Avendaño, 2007). Los niveles de elementos menores como Fe y Cu son altos en todo el perfil, y

se presentan, en general, contenidos normales de K y contenidos bajos de los demás nutrientes asociados al análisis.

La CIC es de 4,08 cmol/kg de 0 cm a 15 cm, y disminuye hasta 1,13 cmol/kg a los 45 cm, lo cual se considera como baja e indica que el suelo tiene baja capacidad para el suministro y reserva de bases. El porcentaje de saturación de K, Ca y Mg es alto. Las relaciones iónicas entre las bases están por debajo de lo normal, lo que indica una carencia de Mg. La conductividad eléctrica es de 0,33 dS/m, que se encuentra dentro del rango apropiado. El contenido de Na es normal (0,04 cmol/kg), por lo que no hay riesgo de sodicidad.

En general, este suelo presenta problemas de solubilidad de nutrientes y exceso de Fe y Al, propios de su tipo. Las acciones correctivas para mejorar tales condiciones incluyen la aplicación de cal para disminuir el nivel de Al y elevar el pH; sin embargo, esta práctica debe ser realizada de tal forma que el balance de nutrientes para la planta no se altere, debido a que puede ocasionar fluctuaciones inadecuadas de pH (Serna et al., 2012).



Se realizó una calicata en el huerto (figura 43) y se encontró que el primer horizonte (A), con una profundidad de 30 cm, presentó un alto contenido de materia orgánica y textura al tacto F_A , lo cual indica una buena distribución de poros. En el horizonte B, a una profundidad superior a los 35 cm, se observó concentración de arcilla y disminución en el contenido de materia orgánica, lo que se hace más notorio a medida que se profundiza, y la textura pasó de franca (F) a franco arcillosa (F_{AR}), de manera que disminuye la capacidad de drenaje interno y el movimiento del agua en el suelo.

Los resultados mostraron que la textura del suelo va de F a F_A , y la densidad aparente es menor de $0,6 \text{ g/cm}^3$ debido principalmente al contenido de materia orgánica. Esta condición permite que la porosidad del suelo sea muy alta, lo cual favorece los procesos de drenaje interno y aireación del suelo, aspectos que garantizan una adecuada relación aire/agua en la zona de raíces de la planta (tabla 26).

Tabla 26. Resultados de los análisis físicos de suelos en el predio experimental de Morales

Característica física	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	Clasificación
Textura	F	F_A	F_A	—
Densidad aparente (g/cm^3)	0,61	0,38	0,35	—
Densidad real (g/cm^3)	2,15	2,36	2,44	—
Porosidad total (%)	79,48	77,14	71,12	Muy alta*
Conductividad hidráulica (cm/h)	15,44	11,28	12,22	Alta**

* FAO (2009) y ** Castellanos (2000)

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, a continuación la tabla 27 sintetiza los resultados en las tres parcelas de estudio.

Tabla 27. Resultados de los análisis químicos de suelos en las fincas experimentales

Característica	Herveo	Clasificación*	Morales	Clasificación*	Rionegro	Clasificación*
pH	5,5	Moderadamente ácido	5,2	Fuertemente ácido	5,5	Moderadamente ácido
Conductividad eléctrica (dS/m)	0,2	No salino	0,4	No salino	0,2	No salino
Materia orgánica (%)	8,5	Alta	14,8	Alta	12,5	Alta
Al intercambiable (cmol/kg)	—	—	3,5	Alto	1,1	Alto
Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE; cmol/kg)	5,7	Media	4,3	Baja	3,0	Baja
K (cmol/kg)	0,2	Medio	0,3	Medio	0,2	Medio
Ca (cmol/kg)	4,4	Medio	2,4	Bajo	1,5	Bajo
Mg (cmol/kg)	1,0	Bajo	1,1	Bajo	0,9	Bajo
P (mg/kg)	17,21	Bajo	7,08	Bajo	4,14	Bajo
Fe (mg/kg)	87	Alto	105	Alto	171,5	Alto
B (mg/kg)	0,2	Bajo	0,3	Medio	0,4	Medio
Cu (mg/kg)	2,8	Ideal	4,8	Alto	1,3	Medio
Zn (mg/kg)	6,3	Alto	4,5	Alto	2,2	Medio

* Peña (2013).

Fuente: Elaboración propia.

Caracterización hidrodinámica del suelo

Al comparar los predios de las tres localidades, se observa que en Herveo el bulbo de humedecimiento es mayor, lo cual se explica por la topografía con pendientes del 60 % en este huerto. Sin embargo, se corroboró en campo que la pendiente no distorsiona el perfil de humedecimiento que forma el gotero. La profundidad efectiva del cultivo (45 cm) se alcanza a los 45 minutos de riego en todas las localidades (tabla 28).

Tabla 28. Resultados de la prueba de bulbo húmedo en las tres localidades

Tiempo (min)	Morales		Herveo		Rionegro	
	dh (cm)	Profundidad (cm)	dh (cm)	Profundidad (cm)	dh (cm)	Profundidad (cm)
15	24,5	20	24,5	20	19,1	33
30	30,6	38	30,6	30	29,6	40
45	37,9	45	41,4	45	33,7	44
60	38,2	53	43,6	60	38,5	47

dh: diámetro húmedo.

Fuente: Elaboración propia.

Clima

La temperatura es uno de los principales factores que interfieren en el cambio de fase vegetativa a reproductiva en el cultivo de aguacate (Gandolfo-Wiederhold, 2008). Cortez et al. (2007) han establecido que temperaturas diurnas entre 25 °C y 30 °C, junto con temperaturas nocturnas entre 15 °C y 20 °C, son adecuadas para que no se afecte la apertura floral, la polinización y el cuajado de frutos. Por una parte, temperaturas superiores a 35 °C pueden afectar severamente la fertilización de la flor y la fructificación,

además de ocasionar abscisión de los frutos, mientras que, por otra parte, temperaturas inferiores a 12 °C pueden retardar la sincronía floral (Dixon & Sher, 2002; Rebolledo & Romero, 2011; Southwick & Davenport, 1986). Sin embargo, Cossio-Vargas et al. (2007) observaron que, a temperaturas inferiores a 10 °C, para las condiciones del estado de Nayarit (México), no hubo efectos negativos sobre la floración y amarre de frutos.

Las condiciones ideales de humedad relativa para un óptimo prendimiento y cuaje de la flor se encuentran entre el 75 % y el 80 %. El exceso de humedad relativa puede ocasionar el desarrollo de enfermedades que afectan el follaje, la floración, la polinización y el desarrollo de los frutos, mientras que el déficit de humedad en el ambiente afecta la fecundación, provocando la formación de un menor número de frutos. El rango de precipitaciones adecuado para el cultivo de aguacate Hass se encuentra entre los 1.200 y 2.000 mm/año (Alfonso, 2008).

Para realizar la caracterización climática histórica, se utilizó información de estaciones meteorológicas con influencia en las zonas de estudio que se encontraran a una altitud similar y dentro de la misma zona climática. Se tomaron series históricas de diez años de observaciones, realizando un análisis multianual de las variables climáticas: temperatura, brillo solar, humedad relativa y precipitación. Con las series históricas de las variables de temperatura máxima y mínima, brillo solar y humedad relativa, se calculó la ETO con el modelo FAO Penman-Monteith, en el programa ETToCalculator de Raes (2009).

En Herveo (Tolima) se usó la información de la estación climática El Cedral, del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), localizada en el municipio de Pereira, a 2.120 m s. n. m., dentro de la zona de influencia del Nevado del Ruiz —al igual que la zona de estudio—, con ubicación geográfica de 4° 42' de latitud norte y 75°

32' de longitud oeste. Por otra parte, en Morales (Cauca) se utilizó la información de la estación La Trinidad, también perteneciente a Cenicafé, ubicada en el municipio de Piendamó, a 1.671 m s. n. m., a 2° 45' de latitud norte y 76° 35' de longitud oeste. Finalmente, en Rionegro (Antioquia) se tomaron los datos de la serie climática de la estación principal del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) del Centro de Investigación La Selva de AGROSAVIA (Rionegro); este centro se encuentra a 5 km lineales de la finca, a 2.120 m s. n. m., con ubicación geográfica de 6° 08' de latitud norte y 75° 25' de longitud oeste.

Según el análisis de la información climática histórica, la zona donde se desarrolló el experimento en Herveo tiene una temperatura promedio de 15,1 °C, con temperatura máxima de 20,1 °C y mínima de 11,2 °C. La humedad relativa promedio es del 88 %, mientras que el brillo solar presenta una media anual de 2,2 h/día. Con estos registros, la región donde se ubica el huerto se clasifica como bosque muy húmedo premontano (Bh-PM), según la clasificación de zonas de vida de Holdridge et al. (1971).

En Rionegro, la temperatura media es de 17,1 °C, la máxima es de 22 °C y la mínima es de 12 °C. La humedad relativa presenta un promedio anual del 76,3 %, y el brillo solar, un promedio anual de 5 h/d. Con la información obtenida, la zona donde se encuentra establecida la parcela de estudio se clasifica como Bh-PM, según la clasificación de zonas de vida de Holdridge et al. (1971).

Para Morales, la temperatura media es de 19 °C, la máxima es de 24,2 °C y la mínima es de 15 °C. La humedad relativa se encuentra en un rango entre el 74 % y el 84 %, con un promedio anual del 80,2 %. El brillo solar se encuentra entre 3,1 h/d y 5,1 h/d, y el promedio anual es de 4,1 h/d. Al igual que las demás zonas, esta se clasifica como Bh-PM. En la tabla 29 se muestran las características climáticas de las zonas de estudio.

Tabla 29. Características climáticas históricas de las tres zonas de estudio

Característica	Herveo	Rionegro	Morales
Temperatura media (°C)	15,1	17,1	19,0
Temperatura máxima (°C)	20,1	22,0	24,2
Temperatura mínima (°C)	11,2	12,0	15,0
Humedad relativa (%)	88,0	76,3	80,2
Brillo solar (h/día)	2,2	5,0	4,1
Precipitación media (mm/año)	2.908,8	2.013,7	2.322,8
Evaporación media (mm/año)	851,1	1.210,3	1.149,2

Fuente: Elaboración propia.

Las tres zonas presentan regímenes de lluvia adecuados para el cultivo de aguacate Hass, de acuerdo con los requerimientos del cultivo, de 1.200 a 2.000 mm/año (Alfonso-Bartoli, 2008); sin embargo, las lluvias no se distribuyen uniformemente, pues se presentan meses con déficit hídrico, de manera que el cultivo necesita riego. Según el balance hídrico multianual, se presenta déficit hídrico en los meses de julio, agosto y septiembre, para Herveo; diciembre, enero y febrero, para Rionegro, y junio, julio, agosto y septiembre, para Morales (figura 44).



Figura 44. Balance hídrico multianual en las zonas de estudio. a. Herveo; b. Rionegro; c. Morales.



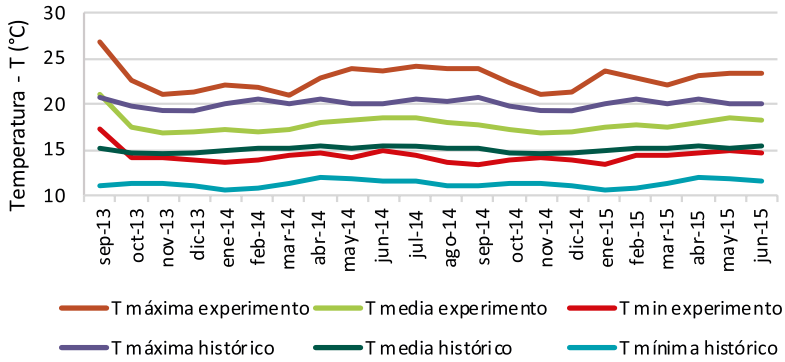
Fuente: Elaboración propia.

En el estudio realizado se hizo un seguimiento continuo durante dos ciclos de evaluación de las condiciones climáticas. Con este propósito se instalaron estaciones climáticas automatizadas marca WatchDog, serie 2000, modelo 2450, con las cuales se registraron las variables de temperatura (°C), humedad relativa (%), radiación solar (W/m^2) y precipitación (mm), y se midió la velocidad del viento (m/s) con un anemómetro automatizado WindLog.

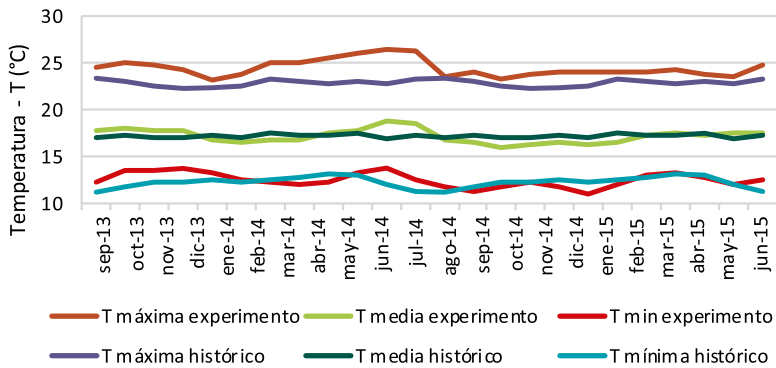
La temperatura media en Herveo registrada por la estación climática fue de 17 °C, la temperatura máxima fue de 22 °C y la mínima de 14 °C; la humedad relativa en promedio fue del 76 %. En Rionegro, la temperatura media fue de 17,1 °C, la máxima de 24,7 °C y la mínima fue de 12,3 °C; la humedad en promedio durante el periodo evaluado fue del 80 %. En Morales, se registró una temperatura promedio de 19,6 °C; la temperatura máxima fue de 25,3 °C y la mínima de 15,5 °C; la humedad relativa en promedio para esta región fue del 79,6 %, disminuyendo en los meses con las más altas temperaturas (figura 45).

La velocidad del viento en Rionegro y Herveo no supera el rango de vientos suaves a moderados (3 m/s), según Allen et al. (2006). Sin embargo, en Morales, para el primer ciclo de evaluación, la velocidad del viento estuvo por encima de los 6 m/s, considerados como vientos fuertes (figura 46), lo cual incrementó la caída de flores y frutos, de acuerdo con lo observado en el huerto experimental y los cultivos aledaños. Esto coincide con lo reportado por Chaveli López (2020), quien afirma que el cultivo de aguacate Hass es susceptible a vientos fuertes porque disminuyen la fructificación y promueven el daño y la caída de estructuras como hojas, ramas, flores y frutos.

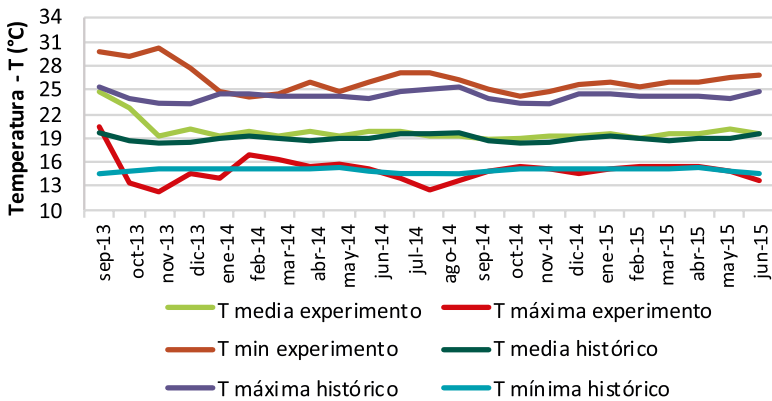
Herveo



Rionegro



Morales



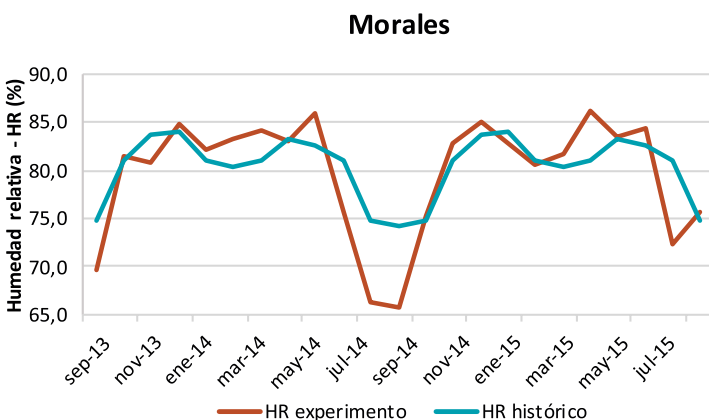
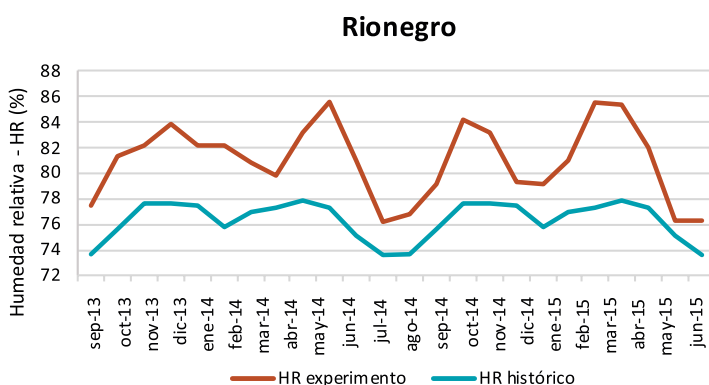
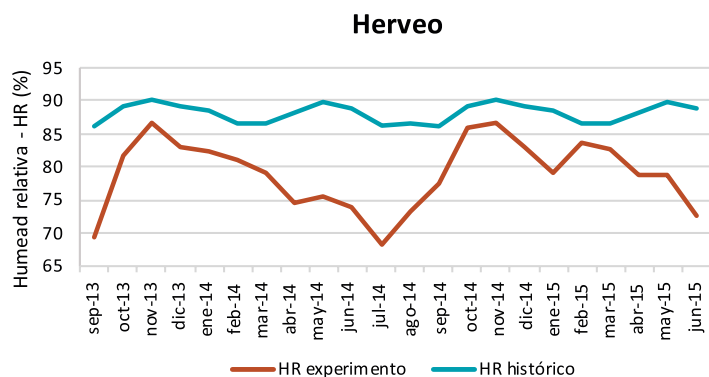
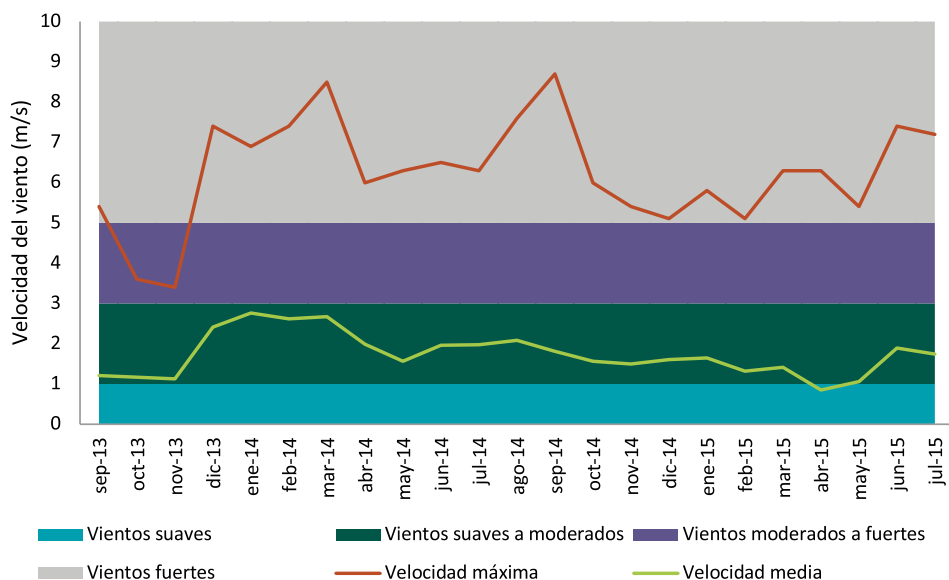


Figura 45. Comparación de las variables climáticas (temperatura y humedad relativa) obtenidas en el análisis multianual y las registradas por las estaciones en los huertos experimentales de las tres localidades.

Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Comportamiento de la velocidad del viento en el predio ubicado en el municipio de Morales (Cauca).

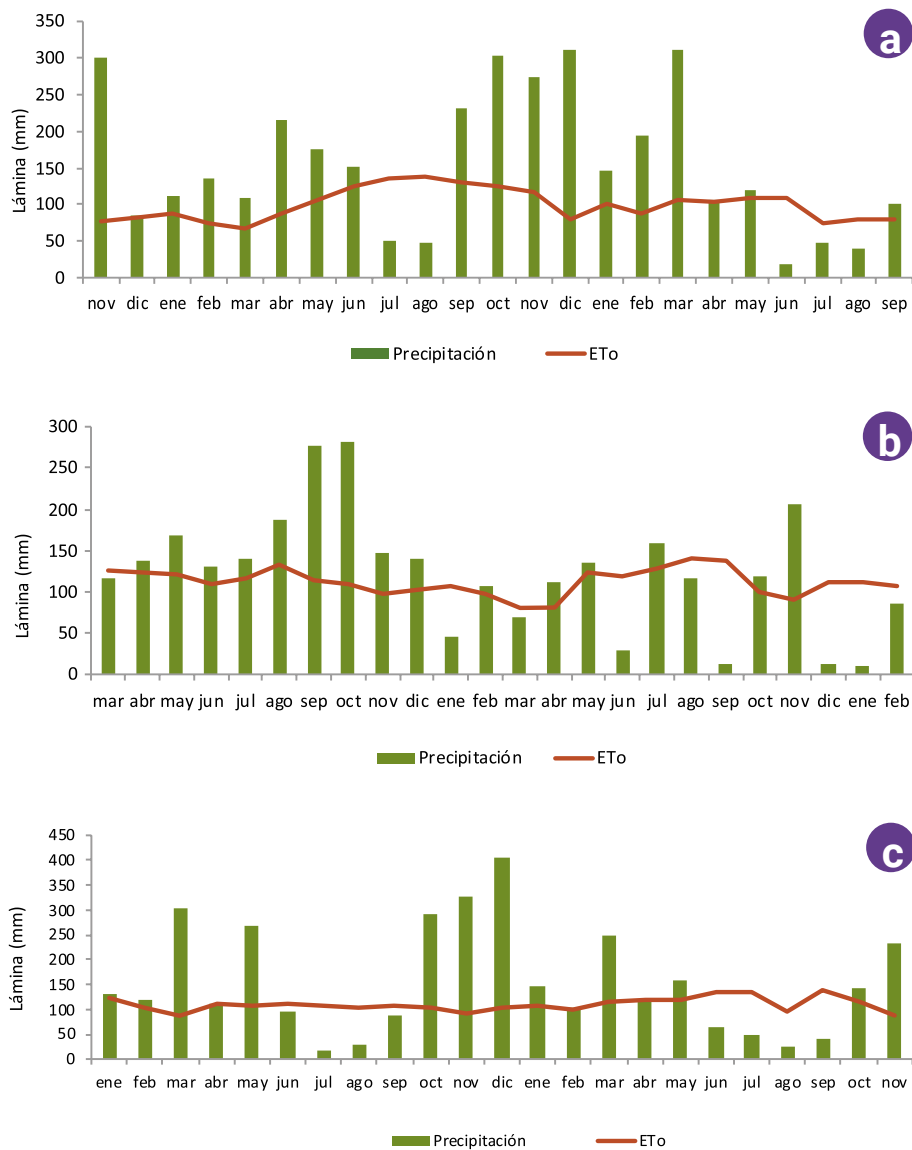


Fuente: Elaboración propia.

Balance hídrico climático y cálculo de láminas de riego

El comportamiento del régimen hídrico para el primer ciclo de evaluación fue similar al multianual, con dominancia de un balance hídrico positivo en las tres zonas de estudio. En el segundo ciclo, por efectos del fenómeno de El Niño —que se presentó en el país durante ese ciclo, reportado por el Ideam (2015)—, se observó una disminución de la precipitación (p) y periodos de déficit más asentados en las tres zonas de estudio, por lo cual fue necesario aplicar una lámina mayor para suplir las necesidades del cultivo (figura 47).

Figura 47. Balance hídrico mensual en las tres localidades durante el desarrollo del experimento. a. Herveo; b. Rionegro; c. Morales.



Fuente: Elaboración propia.

El cultivo se desarrolla en las tres zonas sin un sistema de riego o algún mecanismo que permita el aporte adicional de agua a las plantas, por lo que, durante los periodos secos, que a su vez coinciden con las etapas fenológicas de floración y cuajado de fruto, se debe garantizar que haya suficiente humedad en el suelo para evitar que la planta se estrese. De acuerdo con análisis realizados por Erazo-Mesa et al. (2021) mediante la modelación y mapeo de las dinámicas locales de los regímenes de precipitación locales y los requerimientos de riego en las zonas actuales y potenciales de producción de aguacate Hass en todo el país, el cultivo requiere la aplicación de riego al menos un mes al año, especialmente entre los meses de junio a septiembre, meses en los cuales decrecen las precipitaciones en la región productora de Colombia. Esto, sumado a las características de los suelos de los huertos donde se desarrolló la investigación, descritas en apartados anteriores, eleva el requerimiento de suministro de riego para mantener la disponibilidad de agua para la planta.

En este sentido, se evaluaron tres tratamientos de riego (T1: 0,5 ETO; T2: 0,75 ETO; T3: 1,0 ETO) en los huertos experimentales. La cantidad de agua, expresada en lámina y volumen aplicados por tratamiento, localidad y ciclo productivo, se presenta en la tabla 30. En la localidad de Herveo se registró información para un ciclo, ya que para el siguiente ciclo hubo bajo desarrollo de la floración y se retrasó significativamente el nuevo ciclo por cosecha tardía; por esta razón, los árboles emitieron nuevos brotes vegetativos y no reproductivos.

Tabla 30. Láminas de riego y volumen aplicados por árbol para los ciclos evaluados en las tres localidades

Localidad	Tratamientos	Ciclo 1			Ciclo 2		
		T1 (0,5 ETo)	T2 (0,75 ETo)	T3 (1,0 ETo)	T1 (0,5 ETo)	T2 (0,75 ETo)	T3 (1,0 ETo)
Herveo	ETc (mm)	571,1	867,0	1.149,4	—	—	—
	Lr (mm)	161,6	249,7	317,8	—	—	—
	Vr (L/planta/día)	59,8	92,2	126,2	—	—	—
	Vr acumulado (m³/ha)	1.616	2.497	3.178	—	—	—
Morales	ETc (mm)	625,5	1.013,6	1.352,3	554,6	837	1.113
	Lr (mm)	146,3	204,8	333,5	284,4	500,1	796,9
	Vr (L/planta/día)	51,1	83,4	115,5	94,9	173,8	265,7
	Vr acumulado (m³/ha)	1.463	2.048	3.335	2.844	5.001	7.969
Rionegro	ETc (mm)	629,4	944,1	1.258	714,3	1.071,5	1.428
	Lr (mm)	55,1	144	243,9	214,6	341,2	515,4
	Vr (L/planta/día)	29,15	56,2	87,6	109,7	167,1	253,6
	Vr acumulado (m³/ha)	551	1.440	2.439	2.146	3.412	5.154

Lr: lámina de riego; Vr: volumen de riego.

Fuente: Elaboración propia.

En Herveo (Tolima) se presentó una precipitación acumulada anual en el ciclo evaluado de 2.147,7 mm y una E_{TO} de 1.072,4 mm. De acuerdo con el balance hídrico realizado en esta localidad, los meses de mayor déficit hídrico y cuando fue necesario aplicar riego fueron enero, marzo, junio, julio y agosto. En este sentido, en agosto, mes de mayor demanda hídrica, se aplicaron los mayores volúmenes de agua, así: T1: 161 L/mes; T2: 241 L/mes; T3: 257 L/mes.

En Morales (Cauca), la precipitación acumulada en el primer ciclo evaluado fue de 2.323,7 mm, y la E_{TO} fue de 1.260 mm; es decir, el balance hídrico es positivo. Sin embargo, se evidencia que la demanda evaporativa fue mayor que en las otras localidades, debido principalmente a dos aspectos: en primer lugar, las condiciones de vientos fuertes, lo cual influye en la demanda de agua de la atmósfera porque disminuye la humedad (figura 45 y 46), y, en segundo lugar, los factores ambientales regulados por la altitud (1.600 m.s.n.m.), lo que hace que la temperatura en Morales sea mayor. Por estas razones, las láminas de riego aplicadas fueron ligeramente más altas en esta zona (figura 48).

El volumen más alto aplicado en el ciclo 1 fue de 238 L/mes, 350 L/mes y 558 L/mes para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente. Para el ciclo 2, la precipitación acumulada fue de 1.497 mm, y la E_{TO} fue de 1.447 mm; se evidenció una disminución en la precipitación y un aumento en la E_{TO} con respecto al análisis multianual, por lo que aumentó la demanda hídrica atmosférica y el número de eventos de riego (tabla 30). Fue necesario regar la mayor parte del tiempo, con excepción de noviembre; el mes en el que se aplicó el volumen más alto fue agosto, con 261 L/mes, 429 L/mes y 609 L/mes para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente (figura 48).

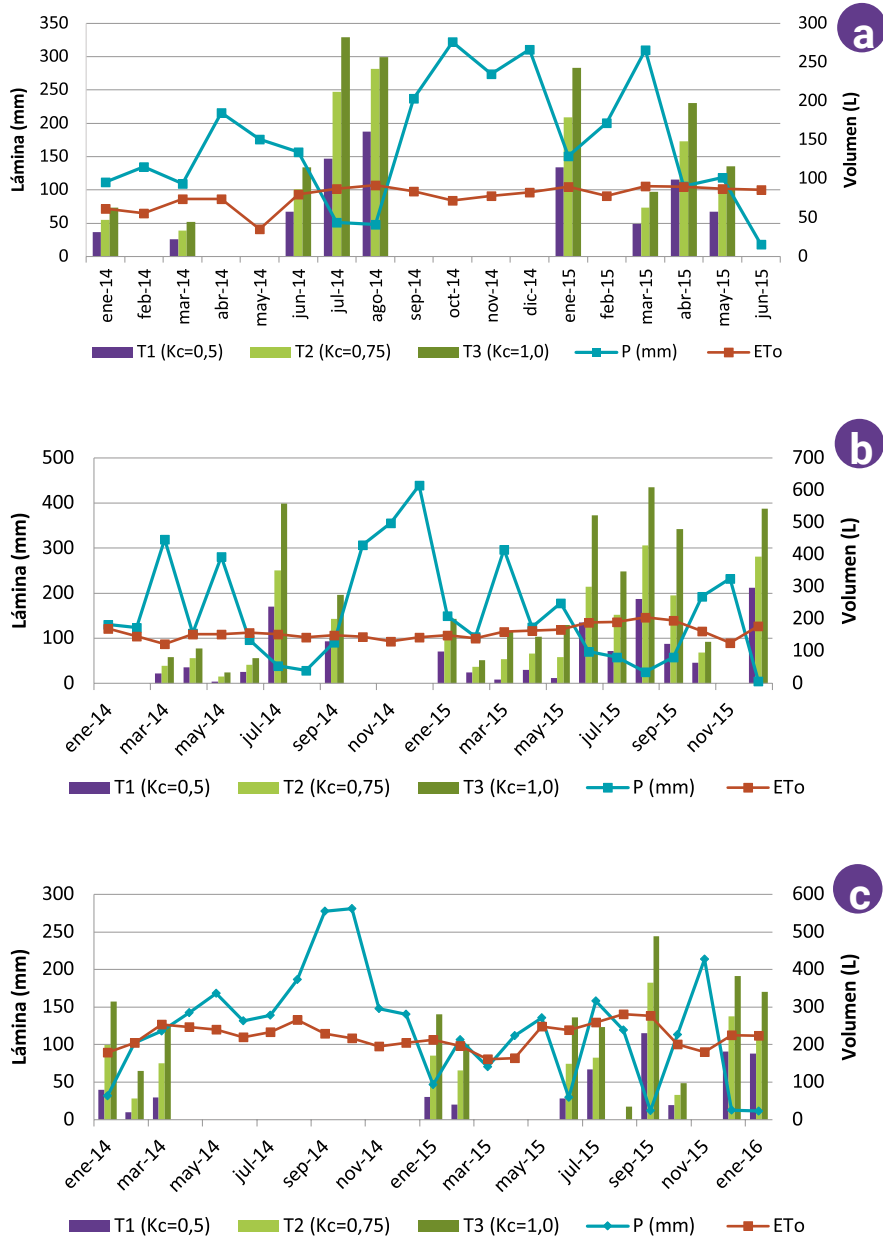


Figura 48. Momentos de aplicación de riego para cada zona de estudio.
a. Huevo; b. Morales; c. Rionegro.

Fuente: Elaboración propia.

Para el huerto experimental ubicado en Rionegro (Antioquia), se registró una precipitación acumulada en el ciclo 1 de 1.896,8 mm, y la ETO fue de 1.344,5 mm. Se observó que el acumulado de precipitación en Rionegro es menor que el de Herveo y Morales; por lo tanto, el volumen de riego aplicado es menor (tabla 30), debido a que la precipitación tiene una distribución más uniforme. En este ciclo, el aporte de agua adicional mediante riego se realizó en los meses de enero, febrero y marzo.

Para el ciclo 2, la precipitación y la ETO acumulados fueron de 1.230 mm y 1.321 mm, respectivamente, de manera que se trata de un balance hídrico negativo. Por esta razón, la lámina de riego aplicada aumentó considerablemente y se regó durante la mayor parte del año, siendo septiembre el mes de mayor déficit hídrico, con un volumen aplicado de 231 L/mes, 366 L/mes y 488 L/mes para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente (figura 48).

El régimen hídrico en las zonas es bimodal, por lo que durante una época del año hay un periodo seco en condiciones normales de comportamiento del clima, y se intensifica con la ocurrencia de eventos como el fenómeno de El Niño, tal como se observó en el ciclo 2 de evaluación en las localidades de Morales y Rionegro.

De acuerdo con los resultados en cada localidad y el análisis de la información recopilada durante los ciclos evaluados, en el cultivo de aguacate Hass en las zonas productoras estudiadas es necesario implementar un sistema de riego eficiente y una metodología clara y sencilla para la programación y aplicación de las láminas de riego, como parte de un plan de manejo integrado del cultivo, que les permita a los productores hacer sus sistemas productivos más eficientes y resilientes al cambio climático.

Comportamiento de la humedad del suelo

Para medir la humedad del suelo y observar el comportamiento de los tratamientos de riego como método de control, en este trabajo se usó el equipo medidor de humedad ML3 TethaProbe, con un Datalogger GP2 de Delta T Device, para el almacenamiento de datos (figura 49).

Para la instalación en campo, se verificó que los canales por donde se transmite la señal de cada sensor estuvieran identificados adecuadamente; luego, se procedió a cavar un hoyo en el suelo de aproximadamente 50 cm de profundidad, cercano a un emisor de riego que no tuviera interferencia de flujo de agua, para no confundir las mediciones. Los sensores se insertaron en la pared de suelo, donde hay continuidad en el flujo de agua y hubo menor alteración del suelo. En un árbol de cada tratamiento se instalaron tres sensores, a 15 cm, 30 cm y 45 cm de profundidad (figura 49): los dos primeros se instalaron para realizar seguimiento a la humedad del suelo disponible para el cultivo, mientras que el último se instaló para verificar que no se perdiera agua en el riego por debajo de la profundidad efectiva.

Figura 49. Instalación de sensores de humedad.



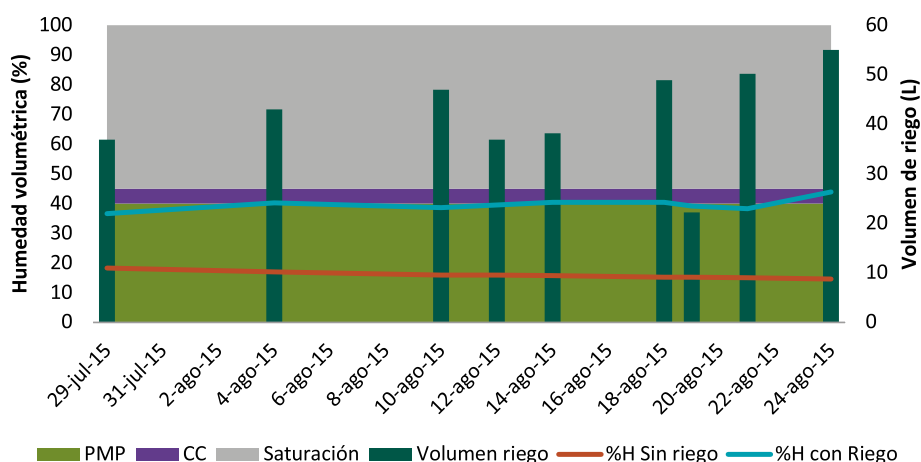
Fotos: Diana Yaritza Dorado Guerra

Con los sensores de humedad de suelo instalados, se realizó el seguimiento al comportamiento de la humedad en todos los tratamientos de riego y el testigo, debido a que se regó con base en la demanda hídrica atmosférica y no en el almacenamiento de humedad en el suelo. El comportamiento de la humedad coincide con el balance hídrico: cuando se presenta déficit hídrico, la humedad disminuye; cuando la precipitación excede a la demanda hídrica atmosférica, la humedad aumenta y se mantiene por encima de la capacidad de campo (cc). Aunque los sensores se encuentran instalados en campo en un mismo bloque y en árboles continuos, debido a la variabilidad del suelo cambia la curva de retención entre un punto y otro, por lo cual hay diferencias entre los tratamientos aplicados. En las tres localidades, con independencia de la variabilidad del suelo, la humedad del testigo es siempre menor en comparación con los tratamientos de riego.

En la figura 50 se muestra la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre un tratamiento de riego y el testigo para uno de los meses más críticos en cuanto a disponibilidad de agua, en el segundo ciclo de evaluación, asociado a la curva de retención, en la localidad de Morales. La curva de retención de humedad para este suelo arrojó que la humedad volumétrica a una tensión de 0 bar, punto conocido como saturación, es del 55,3 %; a 0,3 bar, indicando cc, es del 44,68 %, y a 15 bar, punto de marchitez permanente (PMP), es del 40 %. La condición ideal para el cultivo es que la humedad del suelo se encuentre entre cc y PMP (franja de color violeta en la figura 50). El porcentaje de humedad del suelo en el tratamiento con riego (%H con riego) se mantiene cerca de cc, donde la planta puede tomar el agua a una tensión de 0,3 bar, mientras que en los árboles sin riego el porcentaje de humedad (%H sin riego) se encuentra por debajo del 20 % (figura 50), demasiado baja, pues la planta tiene que hacer mucho esfuerzo para tomar el agua.

Los requerimientos de agua del aguacate Hass dependen de factores como la localización, la edad del árbol, el tipo de suelo y las

Figura 50. Comportamiento de la humedad del suelo con riego y testigo en Morales (Cauca).



Fuente: Elaboración propia.

condiciones climáticas. Por lo tanto, el uso de sistemas de riego eficientes, que se basen en metodologías como la determinación de la ETC, complementada con el uso de sensores de humedad del suelo, permite disminuir el uso del agua, reducir la lixiviación de nutrientes y potenciar la respuesta productiva del cultivar (Kourgialas et al., 2019; Minhas et al., 2020).

En relación con lo observado durante los ciclos que se evaluaron en las zonas de producción, se evidenciaron las épocas del año en las que se presenta un déficit hídrico marcado, en las cuales es necesario aplicar riego suplementario, especialmente en las etapas fenológicas de floración y crecimiento de fruto. En este sentido, según Carr (2013), cuando el agua en el suelo es insuficiente, se pueden generar trastornos fisiológicos en el desarrollo del fruto y afectar su calidad, además de aumentar la caída de estos. Por otra parte, en la etapa de floración, cuando el área del dosel aumenta y hay una mayor demanda hídrica por el árbol, el aporte de agua es fundamental para obtener un mayor cuajado de frutos y, por lo tanto, una mayor producción (Kourgialas & Dokou, 2021).

Variables fisiológicas

Los factores climáticos influyen en la demanda de la atmósfera por evaporación y son responsables de las variaciones en el uso del agua durante la temporada de crecimiento. La disponibilidad hídrica, conjugada con otras variables climáticas, determina los ciclos productivos, lo cual afecta los ciclos fisiológicos (Avilán et al., 2007).

Abscisión de flores y frutos

En cada huerto, debajo del dosel de los árboles, se ubicó una tela de polipropileno negra (polisombra con porcentaje de sombra del 60 %) con el fin de recolectar, semanalmente, las estructuras vegetativas y reproductivas que caen del árbol. En el laboratorio, del material recolectado se seleccionaron tres alícuotas para hacer el conteo del número de flores/frutos, así como para medir sus respectivos pesos frescos y secos. En las tres localidades se encontró que el patrón de comportamiento de la abscisión de flores y frutos muestra diferencias a través del tiempo (figura 51). Para la localidad de Rionegro, se observó que el comportamiento de la abscisión de flores es similar entre los tratamientos de riego; además, se presenta un pico máximo de caída de estructuras florales a los 75 días después de anthesis (DDA), diferenciándose en la magnitud, y con una duración aproximada de 35 días. Por otra parte, en el testigo se observan dos picos: uno a los 21 DDA y otro a los 55 DDA, siendo más prolongados, con una duración de 75 días. El pico máximo de abscisión para los tratamientos de riego y el testigo se presenta a los 75 DDA, cuando el fruto tiene un diámetro promedio de 10,1 mm.

En Herveo, la abscisión relativa de flores tuvo un comportamiento similar en los árboles con tratamiento de riego, con un pico a los 57 DDA. El testigo, por su parte, presenta un pico adelantado a los 35 DDA, con una magnitud mayor que la de los tratamientos de riego, lo cual indica una temprana y elevada abscisión de flores; este comportamiento es análogo al que se presenta en Rionegro. La abscisión de

frutos es similar entre los tratamientos de riego y el testigo, en los cuales se presentan dos picos: a los 63 DDA y a los 112 DDA, cuando el fruto tiene un diámetro de 10,2 mm y 25,2 mm, respectivamente.

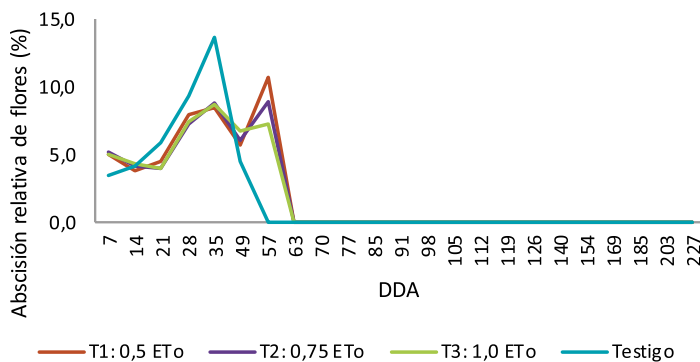
Para el caso de Morales, se observó que la abscisión de los tratamientos T1 y T3 es más prolongada, presentando dos picos: a los 105 DDA y a los 130 DDA, respectivamente. En la abscisión relativa de frutos, se observó en el testigo una magnitud mayor que los demás tratamientos. Los picos de abscisión se presentan a los 105 DDA y 126 DDA, con diámetros de 4,1 mm y 4,6 mm, respectivamente.

En Rionegro, la mayor caída de flores se presenta con el tratamiento T2, con picos máximos a los 7 DDA y a los 47 DDA, con un máximo de 30.000 estructuras caídas. El testigo y el tratamiento T3 presentaron un menor número de flores caídas. El pico máximo de caída de frutos fue a los 75 DDA, pero la magnitud fue diferente entre los tratamientos, siendo mayor en el T1 y el T2 (figura 52).

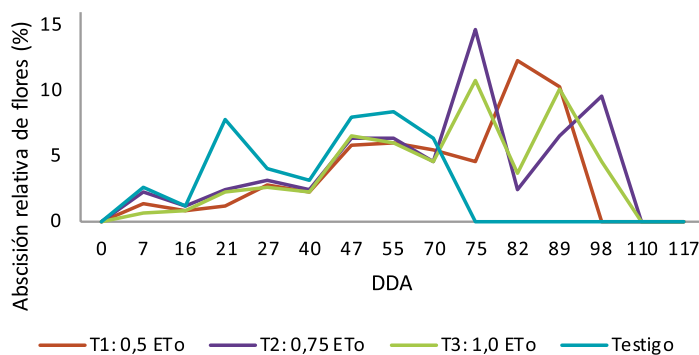
En Herveo, la caída de flores y frutos tuvo un comportamiento similar entre tratamientos, pero de diferente magnitud, siendo mayor en T3 y más baja en T2. La caída de flores presentó dos picos: a los 7 DDA y a los 28 DDA, con un máximo de caída de 172.032 flores, a los 7 DDA, con el tratamiento T3. El número de frutos también presentó dos picos: a los 28 DDA y a los 40 DDA, con una diferencia de 6.000 frutos caídos entre los tratamientos T3 y T2. Debido a que el tratamiento T2, correspondiente a la aplicación de 0,75 ETO, presentó una menor caída de estructuras reproductivas, se esperaba que su potencial productivo fuera mayor, lo cual se corroboró en los resultados de producción, pues estos árboles presentaron los rendimientos más altos (figura 52).

En Morales, la caída de flores solo presentó un pico, a los 91 DDA, con un comportamiento similar entre los tratamientos y el testigo. El número de frutos caídos es similar para T1 y T2, mientras que para T3 es de baja magnitud. El testigo tiene una magnitud más baja, pero más prolongada que en los tratamientos de riego (figura 52).

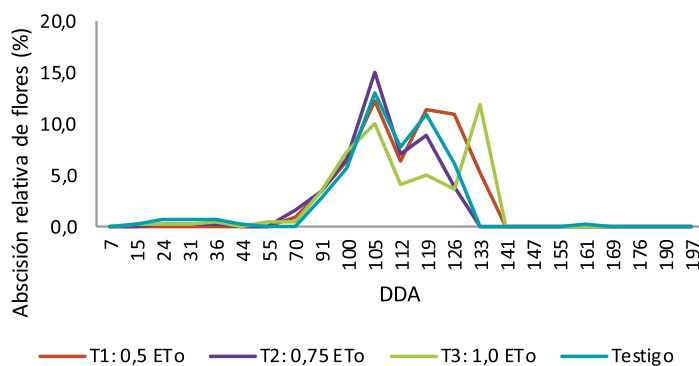
Herveo



Rionegro



Morales



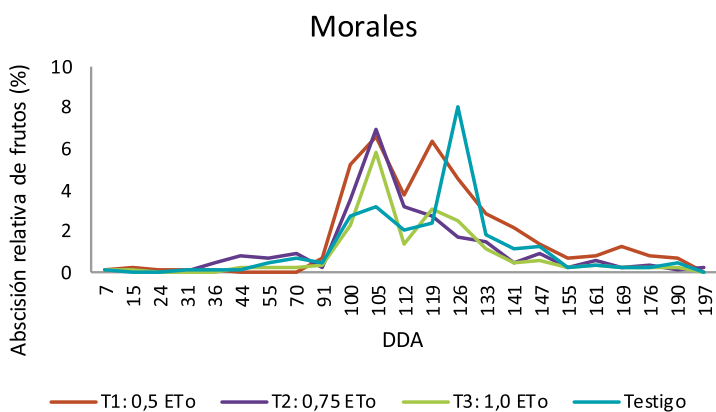
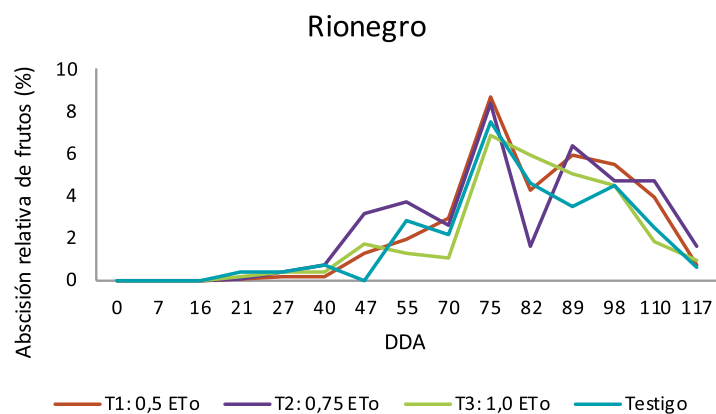
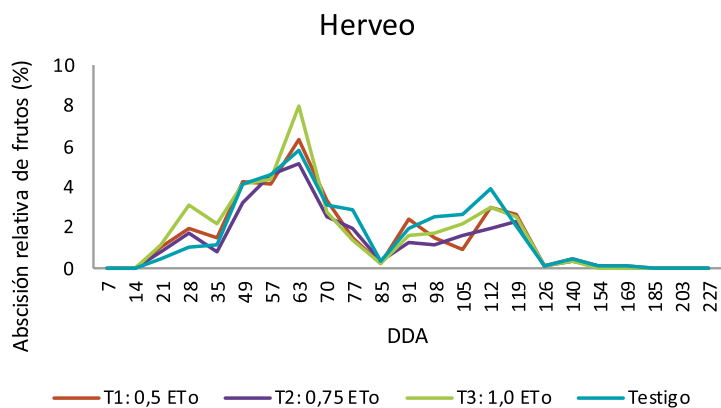
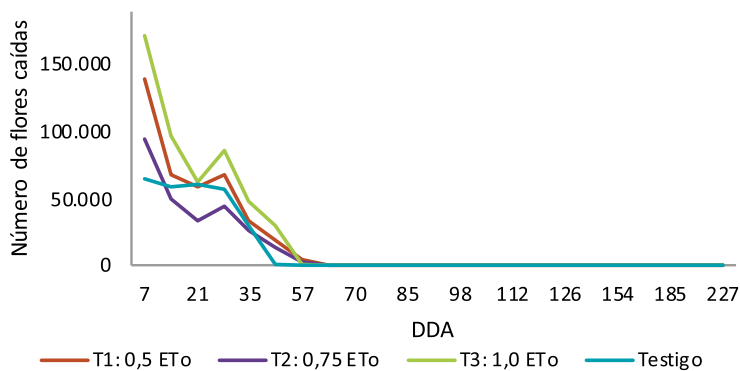


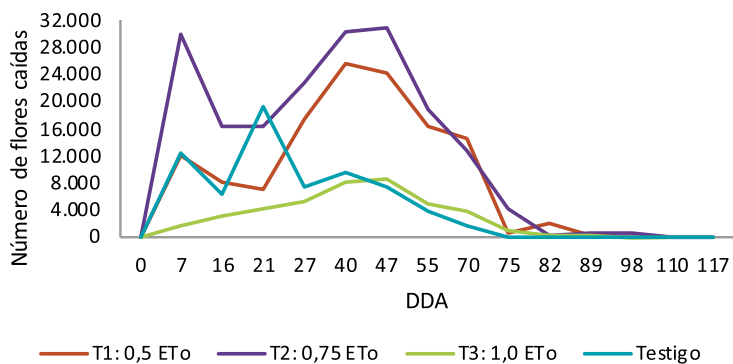
Figura 51. Abscisión de flores y frutos en las tres zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

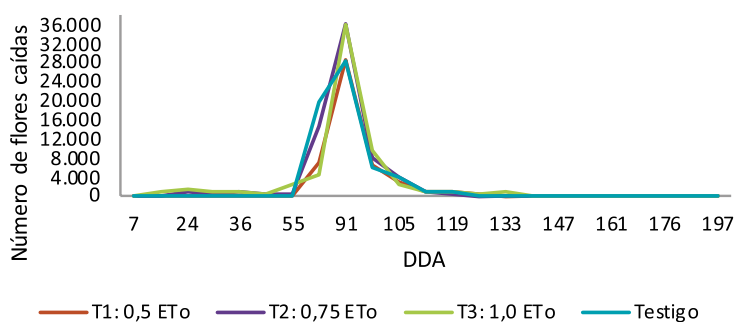
Herveo

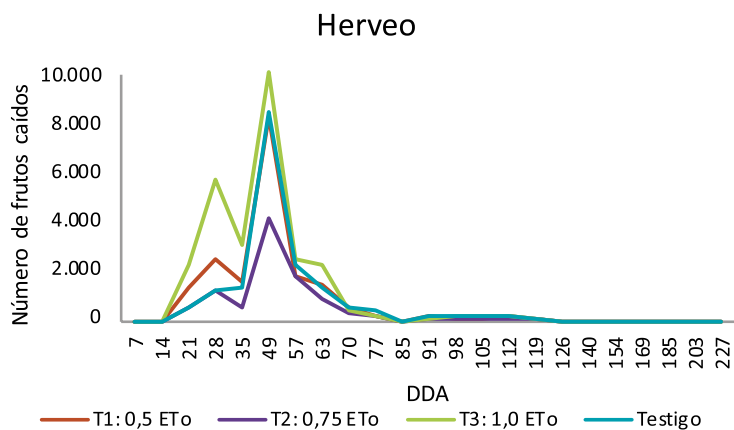


Rionegro



Morales



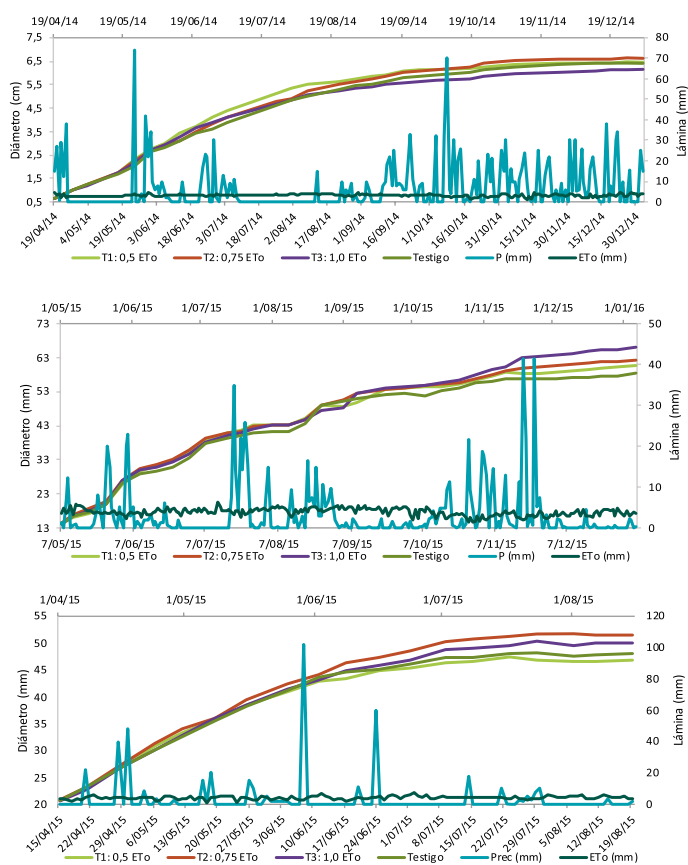


Crecimiento del fruto

En las tres localidades, el diámetro del fruto muestra un crecimiento continuo desde el periodo de antesis hasta alcanzar su madurez fisiológica y presenta un crecimiento sigmoide con distinción de tres fases: la fase inicial corresponde a un crecimiento lineal, en la segunda el crecimiento es exponencial y, por último, en la fase de maduración el fruto continúa aumentando su diámetro, pero a una tasa progresivamente menor (figura 53).

Figura 53. Crecimiento del fruto en las tres zonas de estudio.

a. Herveo; b. Rionegro; c. Morales.



Fuente: Elaboración propia.

En Herveo, la fase inicial empezó desde los 0 hasta los 37 días, alcanzando un diámetro promedio de 15,2 mm, sin presentar diferencias entre los tratamientos y con un balance hídrico positivo. La fase de crecimiento exponencial empezó a partir del día 37 hasta los 134 DDA, con un balance hídrico negativo, en el que se observó un efecto de los tratamientos sobre la variable respuesta; con T1 se tuvieron frutos de mayor diámetro (56,5 mm) en comparación con el testigo (53 mm). Finalmente, la fase de maduración se presentó desde los 134 DDA hasta los 293 DDA; con la lámina de 0,75 ETO, se obtuvo un mayor diámetro (69,2 mm).

En Rionegro, la fase lineal se extendió hasta los 26 días, cuando el fruto alcanzó los 16 mm, sin diferencias entre los tratamientos y con un balance hídrico positivo. El crecimiento exponencial se dio a partir de los 26 días hasta los 146 DDA, con un comportamiento similar entre los tratamientos, un diámetro promedio de 51,5 mm y un balance hídrico positivo. En la fase de maduración, hasta los 287 DDA, con T3 hubo una mejor respuesta en diámetro (65 mm) en comparación con el testigo (57 mm).

En Morales, la fase de crecimiento lineal fue hasta los 28 días, cuando el fruto alcanzó un diámetro promedio de 22,5 mm, sin que se observaran diferencias entre los tratamientos, y el balance hídrico fue positivo. El crecimiento exponencial empezó de los 28 DDA hasta los 85 DDA; con T2 se obtuvo un diámetro mayor. En la fase de maduración, en la que se presentó un balance hídrico negativo, se vio más acentuada la diferencia entre el diámetro obtenido con los tratamientos de mayor aplicación de agua y el logrado con el testigo y los tratamientos de menor aplicación, con diámetros de 54,2 mm, 55,3 mm, 50,7 mm y 51,0 mm para T3, T2, T1 y el testigo, respectivamente. La fase de maduración se dio de los 85 DDA a los 224 DDA.

Producción

En Herveo, con el testigo —que solo recibe como aporte hídrico el agua de lluvia— se obtuvo un rendimiento de 13,4 t/ha, mientras que con la lámina de riego del 0,75 ETo, el rendimiento fue de 19,2 t/ha, con una producción aproximada de 5,75 toneladas más (tabla 31). En general, con los tres tratamientos de riego aplicados, se obtuvieron rendimientos más altos en comparación con el testigo, con diferencias significativas. De acuerdo con lo reportado en Agronet (2022), los productores de Tolima tienen un rendimiento promedio de 8,2 t/ha, mientras que en cultivos tecnificados se obtienen rendimientos de hasta 17 t/ha. Los rendimientos obtenidos en esta investigación son más altos que el promedio regional, e incluso se alcanza a superar las 17 t/ha. Salazar-García (2002) reporta un rendimiento potencial de 32,5 t/ha, pero en condiciones edafoclimáticas diferentes a las de Colombia.

En Morales, es importante resaltar que las limitantes más importantes para que el cultivo no expresara todo su potencial productivo en el ciclo 1 fueron los eventos climáticos extremos sucedidos en la zona durante la etapa de floración —aumento de la velocidad del viento y granizadas—, con lo cual se vieron afectadas las estructuras reproductivas y vegetativas. El rendimiento promedio de los productores del Cauca es de 6,93 t/ha (Agronet, 2022), el cual fue superado solo con T2, con un rendimiento de 7,7 t/ha, a pesar de los eventos climáticos presentados. En el ciclo 2, el mejor rendimiento se obtuvo con el tratamiento T3 (28,6 t/ha), con el cual se cosecharon 11 toneladas más que con el testigo (tabla 31) y se superó ampliamente el promedio regional.

En Rionegro, el rendimiento más alto en los ciclos 1 y 2 se obtuvo con el tratamiento T2, el cual presentó diferencias estadísticas significativas con los tratamientos T1 y T3. El rendimiento promedio para esta zona fue de 9,9 t/ha, superado por todos los tratamientos, con excepción del T1 en el primer ciclo. Para las localidades de

Herveo y Rionegro, con el tratamiento T2 (0,75 ETO) se obtuvieron los rendimientos más altos (tabla 31).

Tabla 31. Efecto de los tratamientos de riego en el rendimiento del cultivo de aguacate Hass en las tres zonas de estudio, utilizando la prueba de Duncan

Localidad	Tratamiento	Línea base	Ciclo 1	Ciclo 2
		Rendimiento (t/ha)		
Herveo	0,5 ETO (T1)	7,5	16,9 ^c	—
	0,75 ETO (T2)		19,2 ^a	—
	1,0 ETO (T3)		17,8 ^b	—
	Testigo		13,4 ^d	—
Morales	0,5 ETO (T1)	7,6	1,3 ^d	24,1 ^a
	0,75 ETO (T2)		7,7 ^a	19,1 ^a
	1,0 ETO (T3)		6,0 ^b	28,6 ^a
	Testigo		4,1 ^c	17,6 ^a
Rionegro	0,5 ETO (T1)	12,8	8,8 ^b	4,6 ^c
	0,75 ETO (T2)		15,4 ^a	7,8 ^a
	1,0 ETO (T3)		11,1 ^{ab}	6,8 ^{ab}
	Testigo		14,6 ^a	5,3 ^{bc}

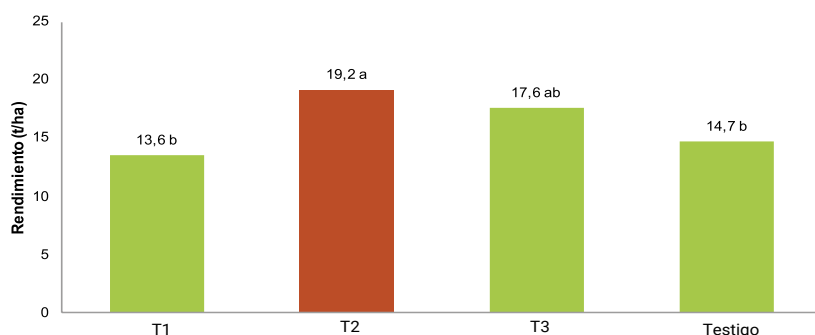
Nota: Los números con la misma letra entre columnas no difieren estadísticamente ($p < 0,05$), según la prueba de separación de medias de Duncan.

Fuente: Elaboración propia.

El tratamiento de riego T2 tuvo el mejor promedio en rendimiento, con un valor de 19,2 t/ha, seguido por T3, con 17,6 t/ha, difiriendo estadísticamente de los tratamientos T1 y el testigo, como se muestra en la figura 54. Es importante resaltar que en las tres zonas de estudio el tratamiento T2 superó los rendimientos promedio reportados por región y las producciones promedio registradas por los productores en ciclos anteriores.

Las láminas aplicadas en los tratamientos de riego del experimento se calcularon con base en el porcentaje de la ETO, buscando aproximarse al κ c. Con los resultados de crecimiento del fruto y rendimiento de las tres localidades, donde los mejores comportamientos

Figura 54. Rendimiento promedio entre localidades y ciclos evaluados.



Fuente: Elaboración propia.

se presentaron cuando se aplicó una lámina de 0,75 ETO (T2), se sugiere que el cultivo de aguacate Hass tiene su mejor respuesta productiva con un κ de 0,75. Este coeficiente es similar al encontrado por autores como Durán-Zuazo et al. (2021) y Holzapfel et al. (2017) en condiciones mediterráneas y de Chile.

Análisis de costos

Para maximizar la eficiencia de los recursos, se requiere implementar tecnologías que se adapten al medio y los recursos disponibles. Dado que este trabajo buscó la evaluación del uso eficiente del agua, aplicando mediante un sistema de riego por goteo diferentes láminas de riego (tratamientos) para la producción de aguacate Hass (en términos de nivel y calidad), en comparación con el sistema productivo habitual, sin uso de sistema de riego —donde la producción depende directamente del medio ambiente y de un manejo agrícola básico—, el objetivo fundamental del estudio fue ofrecer al agricultor recomendaciones adaptadas a sus condiciones.

Para este fin se aplicó el método costo/eficiencia (C/E), usual en la evaluación de alternativas de proyectos (en este caso, alternativas de manejo sostenible del riego en el cultivo de aguacate Hass) en los que la cuantificación de los beneficios es compleja y se admite

que las alternativas proporcionen el mismo o un similar beneficio (mejoramiento en la producción, medida en número de frutos y calidad). Por tanto, se puede establecer la comparación según los costos: se procede cuantificando el costo por unidad beneficiada (área sembrada de aguacate Hass) y seleccionando aquella alternativa de menor costo o costo mínimo (Cruz-Cerón, 2005).

Definiendo la eficiencia en términos económicos, y para la aplicación de este trabajo, según Just et al. (1981), la eficiencia económica se refiere al máximo nivel posible de producción y de consumo con los recursos de los que se dispone.

Para conocer la eficiencia de un proyecto, es necesario estimar el valor presente neto (VPN) de los beneficios y de los costos totales. Para ello, es necesario determinar el número de periodos durante los cuales se percibirán beneficios y durante los que se incurrirá en costos; adicionalmente, se debe escoger una tasa de descuento (r) (Uribe et al., 2003).

Mediante la ecuación 11, se calcula el VPN de los beneficios totales, definidos para este caso como ingresos brutos o totales:

$$VPN(IT) = \sum_{t=1}^T \frac{Ingresos\ Totales}{(1+r)^t}$$

Donde,

VPN: valor presente neto.

IT: ingresos totales.

t y T : periodos durante los cuales se recibirán ingresos.

r : tasa de descuento.

Para estimar el VPN de los costos totales del proyecto, se procede de la misma manera, aplicando la ecuación 12:

$$VP(IN) = VPN(IT)_t - VPN(CT)_t > 0$$

Donde,

VP: valor presente.

IN: ingresos netos.

VPN: valor presente neto.

IT: ingresos totales.

t: periodos durante los cuales se recibirán ingresos.

CT: son los costos totales.

En general, un proyecto será viable si los beneficios totales que se generan son mayores a los CT, en VP, es decir, si el valor presente de los beneficios o ingresos netos (VPN) —estimado como la diferencia entre el VPN de los beneficios o ingresos totales y los CT— es mayor a cero para el periodo determinado (Uribe et al., 2003).

Este indicador permitió definir y evaluar cada una de las alternativas de riego aplicadas en términos netamente monetarios. Así, se tendrán en cuenta los flujos de ingresos y egresos que se distribuyen a lo largo de cada ciclo —dado que la producción del aguacate se tiene en ciclos— y del proyecto, considerando la extensión en tiempo de cada periodo fraccionado.

Para definir la tasa de descuento, se tuvo en cuenta la proporcionada por el Banco Mundial, dado que Colombia se basa en la tasa de interés real del capital; la tasa de descuento del Banco Mundial para Colombia en 2014 fue del 8,9 %, y la tasa de descuento usada por agencias externas de financiamiento correspondía al 12 % para proyectos sociales.

En la tabla 32 se describen las variables escogidas para evaluar cada alternativa y el cálculo del VPN.

Tabla 32. Variables para la evaluación económica

Ítem	Descripción
IT = número de frutos (calidad) × precio de mercado	• Número de frutos por alternativa aplicada. • Selección de calidades del fruto. • Precio por cada una de las calidades del fruto en el mercado.
CT = costos de instalación + costos fijos + costos variables + otros costos	• Los costos fijos son aquellos independientes al nivel de producción, teniendo en cuenta el periodo de amortización (maquinaria y mejoras, gastos de estructura, etc.). • Los costos variables son los insumos que influyen en los niveles de producción (ya sea en aumento o disminución de estos), mano de obra (número de jornales y su precio en la zona, usados para diferentes actividades de manejo del cultivo; dado que el trabajo se realizó con árboles ya establecidos, no se tienen en cuenta los costos de mano de obra en el terreno) y manejo de plagas y enfermedades (insumos aplicados, cantidad y precio).

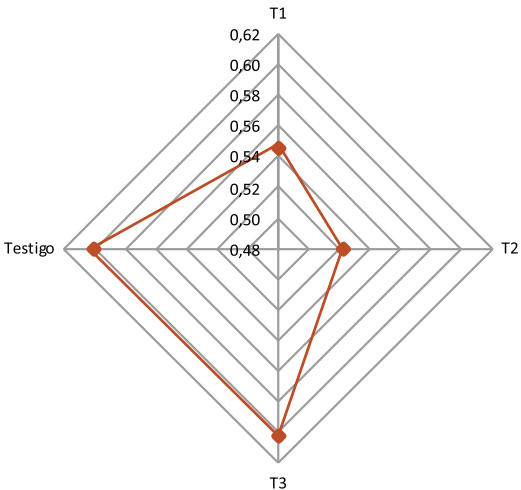
Fuente: Elaboración propia.

Para el siguiente análisis, se muestra el cálculo del VPN para un periodo de cinco años, dada la vida útil del sistema de riego, y se proyecta el incremento en los ingresos y costos monetarios con una tasa promedio de inflación calculada para el periodo 2011-2015.

Herveo

Calculando una producción constante durante el periodo, se tiene la maximización de los ingresos por cada tratamiento de riego aplicado dado el VPN, donde todos los valores calculados se encuentran mayores a cero. Según estos resultados, el tratamiento T2 presenta una mayor maximización de los ingresos netos. Asimismo, para el cálculo de la relación C/E, se tiene que todas las láminas usadas tienen valores < 1, lo cual indica que los ingresos netos siempre fueron mayores a la inversión realizada; sin embargo, los resultados muestran que, para esta localidad, T2 tiene una mayor eficiencia con un mínimo de costos monetarios, como se indica en la figura 55, donde el punto más cercano a cero representa una mayor eficiencia respecto a un mínimo de costos.

Figura 55. Relación c/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Herveo.



Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre los tratamientos T1, T2, T3 y el testigo reside en la aplicación de láminas de agua y su costo por m³. Se observó que con la aplicación de T2 se presentan ingresos netos mayores que con la aplicación de T1, T3 y el testigo, en los cuales la producción no fue proporcional a la cantidad de agua aplicada por tratamiento evaluado (tabla 33). En este sentido, aplicar riego al cultivo de aguacate con $K_c = 0,75$ en las condiciones de Herveo genera una mejor relación c/E, lo que implica mejores ingresos para el productor.

Tabla 33. VPN y relación c/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Herveo

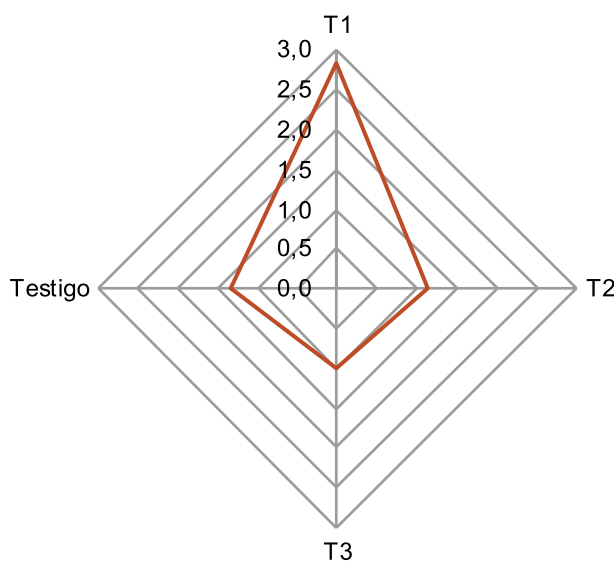
Tratamiento	VPN (COP)	Comparativo	c/E	Comparativo
T1	36.518.187	> 0	0,55	< 1
T2	44.077.801	> 0	0,52	< 1
T3	33.765.997	> 0	0,60	< 1
Testigo	24.923.950	> 0	0,60	< 1

Fuente: Elaboración propia.

Morales

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 34, se observa que para el tratamiento T2 se tiene un decremento en los ingresos, dado que el VPN es negativo; si bien los demás valores calculados son positivos, la aplicación de cada lámina no explica la factibilidad total, por lo que, al analizar el comparativo C/E , se encontró que todos los valores calculados son > 1 ; por lo tanto, se muestra que con cada tratamiento aplicado, incluyendo el testigo, los costos superan los ingresos promedio en el periodo calculado, por lo cual no presentan eficiencia, dados los costos incurridos. La figura 56 muestra, por tratamiento, los puntos de la relación C/E , donde el más cercano a cero indica una mayor eficiencia respecto a un mínimo de costos.

Figura 56. Relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Morales.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. VPN y relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Morales

Tratamiento	VPN (COP)	Comparativo	C/E	Comparativo
T1	8.465.863	> 0	2,88	> 1
T2	-3.726.786	< 0	1,13	> 1
T3	32.596.723	> 0	1,00	> 1
Testigo	139.328	> 0	1,34	> 1

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia radica en la producción del ciclo 1, en el que los ingresos netos fueron negativos; aunque en el ciclo 2 los ingresos aumentaron, estos no alcanzaron a cubrir los costos de producción del ciclo 1. Además, se observó que, a partir del año 2, se obtuvieron valores de C/E menores a uno, dado el incremento en los ingresos por producción de los tratamientos T1 y T3, siendo T3 el que registró menores costos respecto a los demás. El testigo reportó los costos más bajos, pero reflejó menores ingresos, por lo que sus ingresos netos calculados reflejaron el VPN más bajo respecto a los demás tratamientos y una C/E calculada mayor, junto con T2.

Rionegro

En esta localidad, el tratamiento T2 presenta mayor maximización de los ingresos netos respecto a T1 y T3; sin embargo, se evidencia que el testigo muestra una maximización del ingreso mayor a las láminas aplicadas. Asimismo, para el cálculo de la relación C/E, se tiene que todos los tratamientos evaluados presentan valores < 1, lo cual indica que siempre los ingresos netos fueron mayores que los costos ocasionados. En este sentido, como se muestra en la tabla 35, el uso de un $K_C = 0,75$ tiene una mayor eficiencia con un mínimo de costos; aunque el testigo cuenta con un valor de C/E más bajo que T2, es importante resaltar que cuando se presente época seca se requerirá aplicar agua, y la mejor opción es el tratamiento T2 ($K_C = 0,75$), de acuerdo con los resultados de rendimiento y económicos.

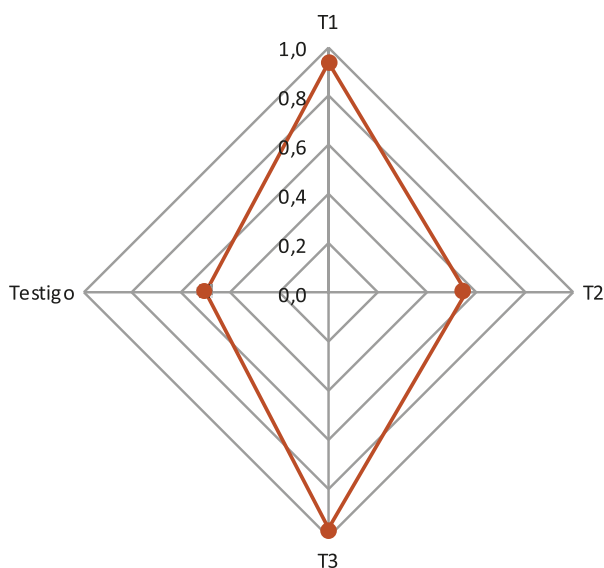
Tabla 35. VPN y relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Rionegro

Tratamiento	VPN (COP)	Comparativo	C/E	Comparativo
T1	1.357.377	> 0	0,94	< 1
T2	32.008.682	> 0	0,56	< 1
T3	595.168	> 0	0,97	< 1
Testigo	34.634.361	> 0	0,50	<1

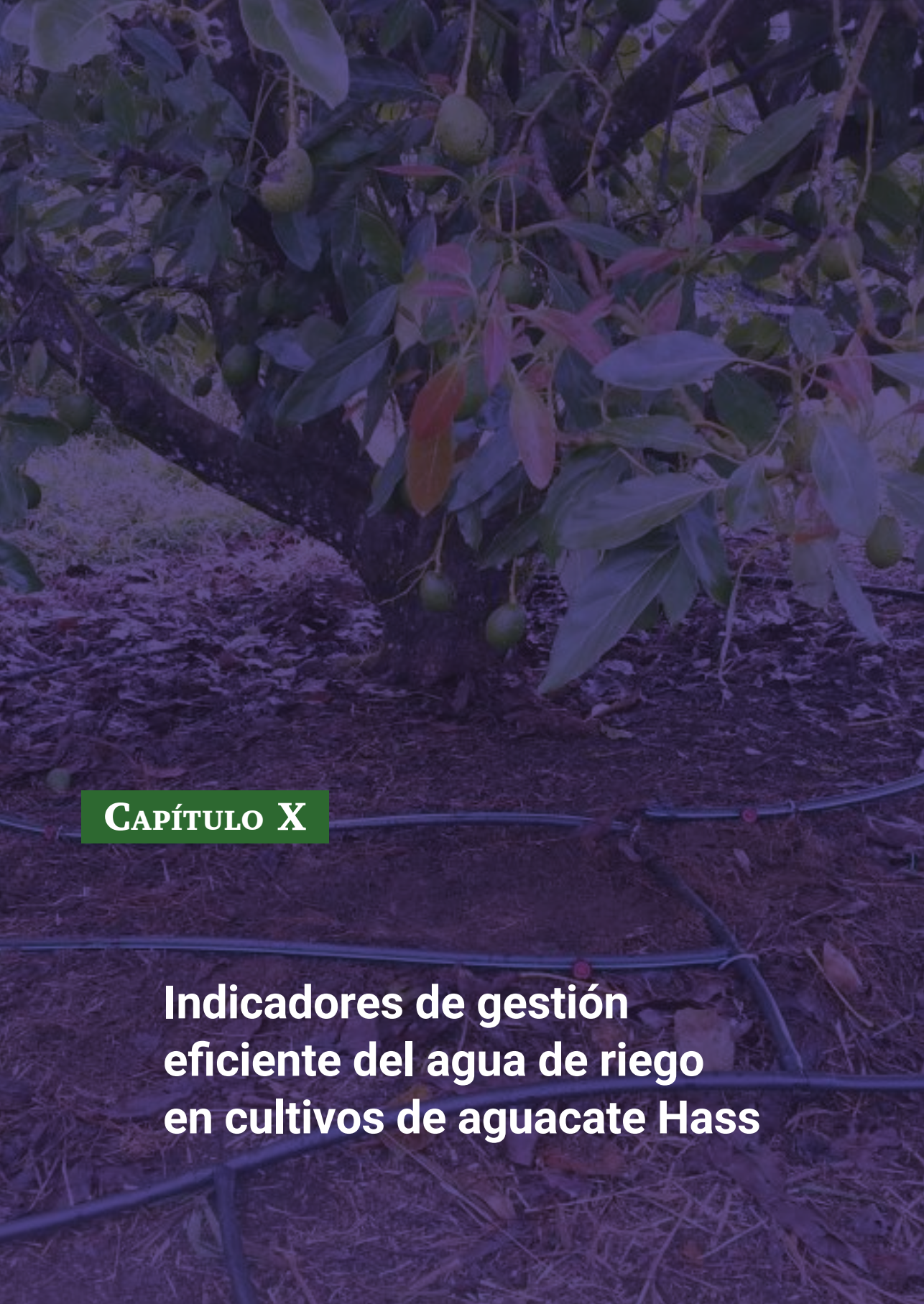
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 57 se resume el comportamiento de los tratamientos en cuanto a la relación C/E, siendo el punto más cercano a cero el que indica una mayor eficiencia respecto a un mínimo de costos.

Figura 57. Relación C/E para los tres tratamientos y el testigo en la localidad de Rionegro.



Fuente: Elaboración propia.

The background image shows a Hass avocado tree with several green, unripe fruits hanging from its branches. The leaves are dark green and glossy. In the foreground, a black drip irrigation system is visible, with lines running across the ground. The ground is covered with dry leaves and mulch. The overall lighting is soft, suggesting an overcast day or shade.

CAPÍTULO X

Indicadores de gestión eficiente del agua de riego en cultivos de aguacate Hass

Se han desarrollado diversas metodologías para determinar si el aporte de agua mediante riego suple las necesidades de los cultivos. Una de las primeras aproximaciones fue el uso de índices de eficiencia para evaluar el manejo del riego y la productividad derivada de este (Smith, 2000; Wolters & Bos, 1990). Desde entonces, se han empleado algunos indicadores de gestión que cuentan con distintos parámetros que permiten medir la eficiencia del riego (Pérez et al., 2009).

Diversos autores han sugerido distintas clasificaciones para los indicadores. Específicamente, los utilizados para relacionar la aplicación de agua con los requerimientos del cultivo se han agrupado en una categoría llamada *indicadores de adecuación* (Gorantiwar & Smout, 2005). Este tipo de indicadores miden la capacidad de un sistema para aportar la cantidad de agua necesaria para satisfacer las demandas de riego (Oad & Sampath, 1995). El intento de ajustar la demanda del agricultor a los requerimientos reales de los cultivos supondría un uso más racional del agua, aplicándola solo cuando sea necesaria, sin ocasionar reducciones en la productividad de los cultivos, lo cual mejoraría la economía del agricultor.

Indicador de eficiencia en el uso del agua

La productividad del agua (WUE, por sus siglas en inglés), o la eficiencia en el uso del agua (EUA), se define como la relación entre los beneficios netos de los cultivos o cualquier otro sistema de

producción y la cantidad de agua utilizada para producir esos beneficios. En un sentido más amplio, este indicador refleja el enfoque actual de la producción agrícola, según el cual se requiere mayor producción de alimentos con una menor cantidad de agua consumida por unidad productiva (Molden et al., 2010).

Este parámetro es ampliamente utilizado en las investigaciones referentes al manejo eficiente del agua, en diferentes cultivos de importancia comercial a nivel mundial. Grajales-Guzmán (2017) y Cantuarias-Avilés et al. (2019) usaron este indicador para medir la eficiencia en el uso del agua de distintos regímenes de riego sobre la productividad del cultivo de aguacate Hass.

Perry et al. (2009) reportan que este indicador permite entender mejor cómo distintos escenarios agroclimáticos y prácticas de manejo pueden influir en la relación entre la producción agrícola y el consumo de agua, con lo que la *EUA* de un cultivo se define como la relación entre la cantidad de producción de biomasa y la cantidad de agua consumida para obtener dicha producción. En el caso de este estudio, la biomasa son los frutos cosechados, en términos de producción (kg/árbol), al final del ciclo productivo. La medición se realizó al final del ciclo, con los datos de cosecha, y se relacionaron la producción y la cantidad de agua consumida durante todo el ciclo por cada tratamiento. Mediante la metodología propuesta por Perry et al. (2009), se definió el indicador con la ecuación 13:

$$EUA = [\text{producción (kg/árbol)}] / (\text{volumen de agua aplicada por tratamiento})$$

De acuerdo con lo anterior, se calculó el indicador *EUA* para los tres tratamientos de riego establecidos (T1: 0,5 ETO; T2: 0,75 ETO; T3: 1,0 ETO) y el testigo (T4), para el cual se utilizó la cantidad de agua aportada por la precipitación. En la tabla 36 se muestran los resultados del comportamiento del indicador respecto a la producción y la lámina y el volumen aplicados por árbol para las tres localidades.

Tabla 36. EUA en las tres zonas productoras de aguacate evaluadas

Localidad	Variable	Ciclo I				Ciclo II			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Herveo	Producción (kg/ha)	16.947,5	19.106,8	17.852,0	13.360,9	*	*	*	*
	LR (mm)	177,4	276,5	378,5	2.210,9	*	*	*	*
	EUA (kg/m ³)	9,55	6,91	4,72	0,6	*	*	*	*
Morales	Producción (kg/ha)	1.328,1	7.804,4	5.741,3	4.061,3	24.098,3	19.114,0	28.585,5	17.635,2
	LR (mm)	80,2	154,5	240,8	2.431,2	329	543,2	824,1	1.076,4
	EUA (kg/m ³)	0,74	2,48	1,29	0,17	8,06	4,97	3,46	1,64
Rionegro	Producción (kg/ha)	16.813,4	28.713,0	20.659,7	29.809,0	8.443,4	15.027,4	12.603,0	9.675,0
	LR (mm)	180,3	315,1	444,9	1.771	250,6	433,6	645	1.176,3
	EUA (kg/m ³)	19,96	18,18	8,44	1,51	2,57	2,77	1,53	0,82

* No se registró información; LR: lámina de riego.

Fuente: Elaboración propia.

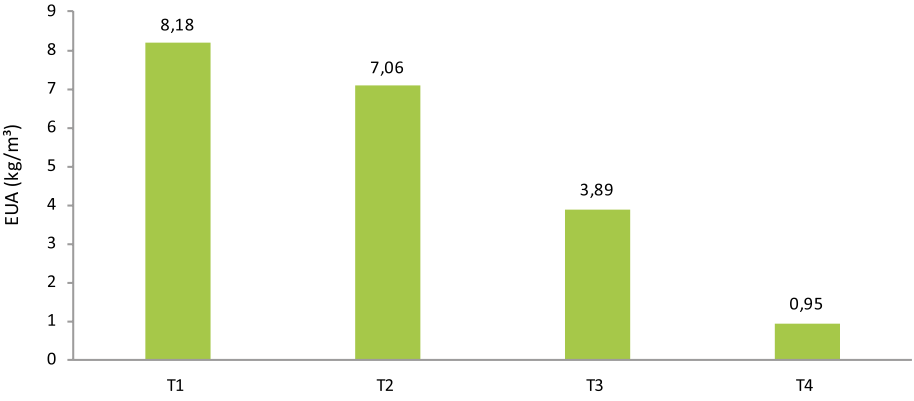
En Herveo, T1 obtuvo la mejor EUA , con un valor de $9,55 \text{ kg/m}^3$, seguido por T2, con un valor de $6,91 \text{ kg/m}^3$. Con el tratamiento testigo (T4), se tuvo el valor más bajo. Asimismo, aunque la producción con los tratamientos T1 y T3 no fue diferencial, la EUA fue mayor para T1, tratamiento con una menor aplicación de agua ($0,5 \text{ ETO}$), lo cual indica que la aplicación de volúmenes de agua de riego por encima de los requeridos por el cultivo no garantiza un incremento en la producción; por el contrario, no contar con herramientas para medir la EUA en el cultivo puede elevar los costos de producción y la sobreexplotación del recurso.

En el huerto experimental de Morales, para el ciclo 1 de evaluación, se obtuvo una mejor respuesta del indicador EUA con el tratamiento T2 en comparación con los demás tratamientos aplicados, con un valor de $2,48 \text{ kg/m}^3$, mientras que en el ciclo 2 el valor más alto fue con T1 ($8,06 \text{ kg/m}^3$), seguido por T2 ($4,97 \text{ kg/m}^3$). Con el tratamiento testigo (T4), los valores fueron significativamente más bajos para los dos ciclos productivos, lo cual está asociado a la baja producción registrada con este tratamiento. Esto indica que aplicar una mayor lámina de agua no garantiza un incremento en la producción; por el contrario, se estaría utilizando una cantidad de agua no requerida, lo que eleva los costos de producción y la sobreexplotación del recurso.

En la localidad de Rionegro, al igual que en Morales, para el ciclo 1 el tratamiento T1 tuvo el valor más alto del indicador EUA , seguido estrechamente por T2, con valores de $19,96 \text{ kg/m}^3$ y $18,18 \text{ kg/m}^3$, respectivamente. De igual forma, para el ciclo 2, el indicador fue mayor con T2, con un valor de $2,77 \text{ kg/m}^3$. También se observó que entre los ciclos 1 y 2 hubo una disminución del indicador en todos los tratamientos debido a la disminución de la producción que genera la alternancia productiva, fenómeno fisiológico propio de plantas como el aguacate (Lovatt, 2010). Los tratamientos T3 y T4 presentaron los valores más bajos en los dos ciclos de producción evaluados.

En general, con el tratamiento T1 se obtuvo una mejor respuesta para el indicador EUA en las zonas productoras de aguacate Hass estudiadas, con un valor promedio de $8,18 \text{ kg/m}^3$, seguido por el tratamiento T2, cuyo valor promedio fue de $7,06 \text{ kg/m}^3$, mientras que con T4 se obtuvieron valores por debajo de 1 kg/m^3 (figura 58).

Figura 58. EUA promedio para las tres zonas productoras estudiadas.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados del indicador EUA , con la aplicación de los tres tratamientos de riego se obtuvieron valores superiores a los reportados en la literatura. Carr (2013) menciona que para aguacate la mejor estimación de EUA se encuentra entre 1 kg/m^3 y 2 kg/m^3 . Por otro lado, en estudios realizados en zonas productoras de aguacate en Brasil, Cantuarias-Avilés et al. (2019) reportaron una EUA por debajo de la registrada para las zonas productoras de Colombia, con valores menores de 3 kg/m^3 para una aplicación de volúmenes de agua entre $2.500 \text{ m}^3/\text{ha}$ y $5.000 \text{ m}^3/\text{ha}$, mientras que, en el caso evaluado, con T1 se aplicó un volumen de agua menor de $2.500 \text{ m}^3/\text{ha}$. En este sentido, es posible establecer la importancia de implementar un manejo del riego en los huertos de aguacate de las zonas productoras evaluadas, debido a que la aplicación oportuna de riego puede aumentar la producción de fruta fresca.

Con herramientas como el indicador EUA es posible determinar, en términos económicos y ambientales, que se puede ahorrar hasta el 36 % del agua en comparación con T3, sin afectar negativamente el rendimiento y el calibre de los frutos, lo cual a su vez implica mejores ingresos para el productor.

Indicadores de gestión del agua de riego

Como insumo para determinar el manejo eficiente del riego en el cultivo de aguacate Hass en zonas productoras de Colombia, se evaluó la metodología para la aplicación de los indicadores de suministro relativo de agua (RWS, por sus siglas en inglés), suministro relativo de riego (RIS) y suministro relativo de agua de lluvia (RRS). Estos indicadores están en función de los aportes de agua al sistema y los requerimientos hídricos de los cultivos. Las variables requeridas para su evaluación son agua aplicada mediante el riego (R), la precipitación efectiva (Pe) y los requerimientos hídricos del cultivo (ET_c) (Grajales-Guzmán, 2017).

Con los datos recopilados en los estudios realizados en las zonas productoras del Cauca, Tolima y Antioquia, se evaluaron los indicadores con registros acumulados mensuales de las variables requeridas, de acuerdo con lo expuesto por autores como Roldán-Cañas et al. (2010) y Pérez et al. (2009), quienes manifiestan que para tener datos comparativos es mejor evaluar con esta periodicidad y, de esta forma, establecer relaciones entre la oferta y la demanda hídrica de cada región. Así, se usaron las ecuaciones 14, 15 y 16 para calcular los indicadores.

$$RWS_{mes} = \frac{\sum_{i=30}^{i=d} R_i + \sum_{i=30}^{i=d} Pe_i}{\sum_{i=30}^{i=d} ET_{ci}}$$

$$RIS_{mes} = \frac{\sum_{i=30}^{i=d} R_i}{\sum_{i=30}^{i=d} Pe_i - \sum_{i=30}^{i=d} ET_{ci}}$$

$$RRS_{mes} = \frac{\sum_{i=30}^{i=d} Pe_i}{\sum_{i=30}^{i=d} ET_{ci}}$$

La estimación de estos indicadores permitió establecer la relación entre las necesidades hídricas del cultivo de aguacate Hass y la oferta de agua para suplir esa demanda. En promedio se obtuvieron, para Herveo, Morales y Rionegro, valores de 2,44, 1,48, 2,05 para RWS , RIS y RRS , respectivamente (tabla 37). Respecto a los tratamientos de riego evaluados, se hallaron valores de 2,3, 1,6 y 1,9 para RWS , RIS y RRS , respectivamente (tabla 38).

Levine (1982) señala como umbral mínimo del indicador RWS un valor de 1,5, pues valores inferiores a este indican una disponibilidad limitada de agua. Sin embargo, Molden et al. (2010) reportan que valores por encima de 2 evidencian que la oferta hídrica puede suplir los requerimientos de agua del cultivo. Se observó que en los promedios por huerto experimental y tratamiento evaluado, el indicador RWS es mayor a 1,5, lo cual implica que la disponibilidad de agua para suplir los requerimientos hídricos del cultivo de aguacate Hass en las tres localidades es adecuada y no hubo una sobreexplotación del recurso; asimismo, esto permite inferir que el riego complementario fue una práctica eficiente incluso para el tratamiento con mayor demanda hídrica (T3).

En cuanto al indicador RIS , que determina si las necesidades hídricas de los cultivos no cubiertas por las lluvias son suplidas, en Herveo y Rionegro se obtuvieron valores cercanos a la unidad (1,05 y 0,91, respectivamente), lo cual significa, de acuerdo con Roldán-Cañas et al. (2010), que los requerimientos hídricos del cultivo fueron cubiertos por el riego aplicado. En Morales, el RIS fue de 2,49, lo que indica que el agua aplicada excede, en cierta medida, la demanda evaporativa del cultivo (tabla 37). En cuanto a la comparación de RIS en los tratamientos de riego aplicados, se observó que con T2 y T1 los valores presentados se encuentran cercanos a 1 (tabla 38); sin embargo, autores como Roldán-Cañas et al. (2010) y Pérez et al. (2009) consideran que valores de RIS por debajo de 1, como el arrojado por T2 (0,8), indican un déficit hídrico, y también mencionan que cuando el RWS supera la unidad significa que la demanda evaporativa del cultivo es suplida.

Tabla 37. Valores promedio de RWS, RIS y RRS para las tres localidades

Localidad	RWS	RIS	RRS
Herveo	3,05	1,05	2,70
Morales	2,29	2,49	1,84
Rionegro	1,97	0,91	1,62
Promedio	2,44	1,48	2,05

Fuente: Elaboración propia,

Tabla 38. Valores promedio de RWS, RIS y RRS para los tres tratamientos de riego

Tratamiento	RWS	RIS	RRS
T1 (0,5 ETo)	3,0	1,3	2,7
T2 (0,75 ETo)	2,2	0,8	1,8
T3 (1,0 ETo)	1,8	2,6	1,3
Promedio	2,3	1,6	1,9

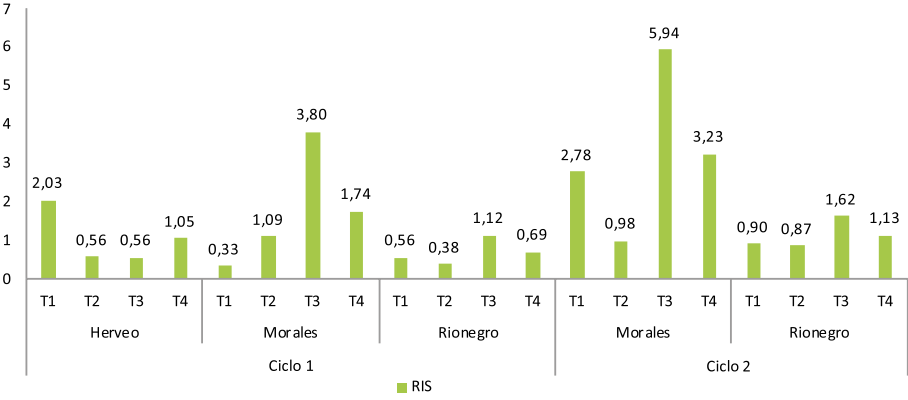
Fuente: Elaboración propia.

Respecto al análisis por localidad, en Morales se observó que, aunque el promedio general del indicador de gestión del riego RIS fue superior a 1, para el tratamiento T2 (0,75 ETo) entre ciclos, este indicador estuvo dentro de los límites establecidos (ciclo 1: 1,09; ciclo 2: 0,98). De esta manera, se encontró que el manejo del riego con este tratamiento se hace de manera eficiente y el agua aplicada suple correctamente los requerimientos del cultivo. A su vez, esto coincide con los resultados de rendimiento, en los cuales T2 presentó los valores más destacados para esta localidad (figura 59).

Asimismo, para la localidad de Rionegro, en el ciclo 1 el tratamiento T3 (1,0 ETo) presentó un valor de RIS de 1,12, mientras que para el ciclo 2 se hallaron valores cercanos a la unidad con los tres tratamientos evaluados (figura 59), lo cual se explica principalmente por la disminución de las precipitaciones en la región. Esto permitió

identificar que durante las evaluaciones se realizó un manejo eficiente del riego, aunque, igual que en Morales, el tratamiento T2 arrojó los resultados más destacados en cuanto a producción. En Herveo, con los tratamientos T2 y T3, se presentó un RIS de 0,56 (figura 59), lo cual evidencia, de acuerdo con la literatura, que hubo déficit hídrico, pero sin que la producción se viera afectada. Por el contrario, en T2 el rendimiento fue mayor en esta localidad, lo que hizo posible inferir que las precipitaciones durante el periodo de evaluación en este huerto experimental suplieron el 40 % de la demanda hídrica de la plantación.

Figura 59. RIS para las zonas de estudio y los tratamientos de riego evaluados.



Fuente: Elaboración propia.

El uso de estos indicadores de gestión sostenible del riego en sistemas productivos como el aguacate Hass en Colombia, donde no se aplica riego, permite identificar, según el régimen hídrico de cada zona, si el aporte de agua de las lluvias suple la demanda hídrica del cultivo. Con los resultados de cada zona estudiada se evidenció que las precipitaciones no son suficientes para satisfacer las necesidades de agua de los huertos, lo que hace necesario generar herramientas que les permitan a los productores establecer sistemas de riego eficientes, con los cuales logren aportar el agua requerida por las plantas para no afectar su rendimiento. Por lo

tanto, estos indicadores son clave ante la situación actual del uso del recurso hídrico, ya que se convierten en insumos relevantes para medir su eficiencia en relación con la producción de fruta fresca (Grajales-Guzmán, 2017).

Huella hídrica en el cultivo de aguacate

La huella hídrica (HH) es un indicador multidimensional del uso de agua dulce; puede ser de uso directo o indirecto, medido a lo largo de la cadena de suministro. Este indicador determina el volumen de agua utilizado para elaborar productos y servicios consumidos por un individuo, un grupo de personas o un país; además, muestra los volúmenes de consumo de agua por fuente extraída y por tipo de contaminación. Todos los componentes de una HH total pueden ser especificados a nivel espacial (global, nacional, regional o pre-dial) y temporal (anual, mensual o diario) (Hoekstra et al., 2021).

La HH se expresa comúnmente como el volumen de agua usado para producir una unidad de producto (m^3/t o L/kg) o como el volumen de agua usado por año en un área delineada (nación, provincia, cuenca), individual o comunitaria ($m^3/año$) (Lovarelli et al., 2016). Este indicador está conformado por tres componentes, codificados por color: HH verde, HH azul y HH gris, y cada una representa un elemento esencial del uso del agua (Hoekstra et al., 2011).

La huella hídrica verde (HHV) se refiere al consumo total de agua lluvia en la producción de un cultivo que no se convierte en escorrentía. La huella hídrica azul (HHA) es el consumo de agua de los cursos de agua superficial, ríos, lagos y fuentes de agua subterránea para fines productivos o riego, referida como la pérdida hídrica (evaporación) de una masa de agua disponible en una zona de captación o una cuenca hidrográfica. La huella hídrica gris (HHG) se define como el volumen de agua dulce requerido para asimilar la carga de contaminantes hasta alcanzar concentraciones naturales del ambiente, asociada como contaminación (Hoekstra & Hung, 2002).

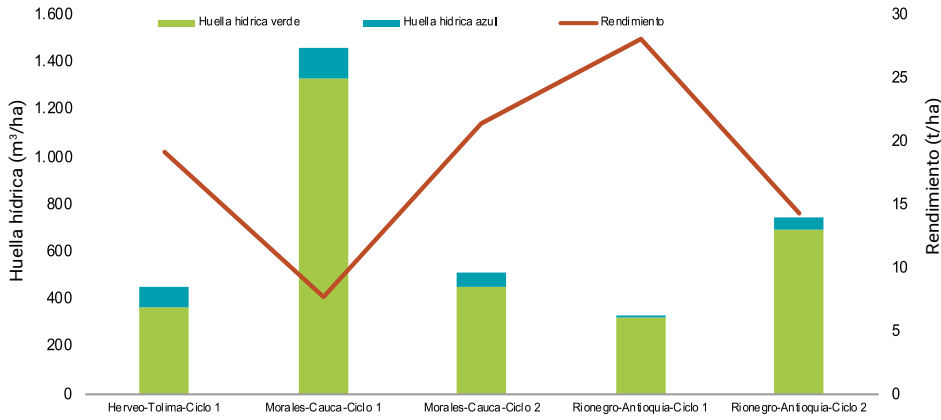
Como parte de las estrategias para determinar el uso eficiente del recurso hídrico para riego en el cultivo de aguacate Hass, se estimaron la HHV y la HHA en tres zonas de Colombia, con cuatro tratamientos de riego, en los cuales se obtuvo la mejor respuesta en cuanto a productividad con la lámina de riego del 0,75 ETo (T2).

En el municipio de Herveo (Tolima), con una precipitación efectiva (Pe) de 2.211 mm, con un rendimiento promedio de 19,2 t/ha, en un ciclo de producción, la huella hídrica total (HHT) fue de 451,56 m³/t, de la cual el 81 % correspondió a HHV y el 19 % a HHA (figura 60); con el testigo (sin riego), la HHV fue de 2.134 m³/t, con un rendimiento promedio de 13,4 t/ha (figura 61).

Para Morales (Cauca), en un primer ciclo de producción evaluado, el rendimiento promedio fue de 7,7 t/ha y la Pe fue de 2.301 mm, con la cual se determinó una HHT de 1.463 m³/t, de la cual el 91 % correspondió a HHV y el 9 % a HHA; en el tratamiento testigo, la HHV fue de 11.445 m³/t, con un rendimiento promedio de 2,9 t/ha. Para el ciclo 2 se presentó una Pe de 1.099,2 mm y el rendimiento fue de 21,4 t/ha; con esta información se definió una HHT de 514,01 m³/t, de la cual el 88 % correspondió a HHV y el 12 % a HHA (figura 60); en el caso del tratamiento sin riego, la HHV fue de 1.536 m³/t, con un rendimiento de 17,6 t/ha (figura 61).

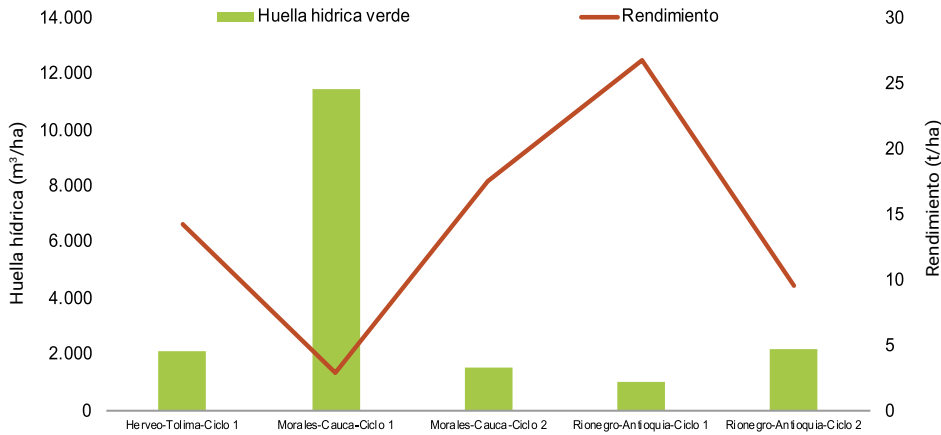
En Rionegro (Antioquia), la HHT fue de 335,98 m³/t para el ciclo 1 de producción evaluado, expresada en el 96 % de HHV y el 4 % de HHA, con una Pe de 1.176,4 mm y un rendimiento promedio de 28,1 t/ha; para el tratamiento testigo, la HHV fue de 1.040,6 m³/t, con un rendimiento promedio de 26,8 t/ha. Durante el ciclo 1, se presentó una Pe de 1.176,4 mm, con lo cual se estimó una HHT de 749,25 m³/t, de la cual el 93 % correspondió a HHV y el 7 % a HHA, para un rendimiento promedio de 14,3 t/ha (figura 60); para el tratamiento testigo, el rendimiento fue de 9,6 t/ha y la HHV fue de 2.207,4 m³/t (figura 61).

Figura 60. Huella hídrica para el cultivo de aguacate Hass con tratamiento de riego del 0,75 ETo en las tres localidades estudiadas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 61. Huella hídrica para el cultivo de aguacate Hass con tratamiento testigo (sin riego), en las tres localidades estudiadas.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican que la HH_T media de la producción de aguacate Hass para las zonas productoras en Colombia es de $550 \text{ m}^3/\text{t}$, para un rendimiento promedio entre 14 t/ha y 28 t/ha , considerada baja en comparación con otros estudios realizados para el cultivar en Colombia, en los cuales se estimó un valor de HH_T de $4.945 \text{ m}^3/\text{t}$ y no hubo aplicación de riego (Naranjo & Reyes, 2021). Esto indica que con la aplicación de riego en el momento oportuno y con la frecuencia apropiada se incrementa la producción de fruta, mediante un uso sostenible del recurso. Si se comparan los resultados con información obtenida en otras latitudes, se encuentra que la HH_T , en el caso de las zonas productoras evaluadas, sigue siendo baja; un ejemplo es México, donde, en condiciones de riego, la HH_T fue de $1.071,4 \text{ m}^3/\text{t}$ (Gómez-Tagle et al., 2022). Mientras tanto, en Perú, la HH_T determinada fue de $416,84 \text{ m}^3/\text{t}$, menor a la reportada en este estudio; sin embargo, en la zona productora de aguacate Hass en Perú el cultivo es regado y las producciones promedio son mayores (19 t/ha) (Rojas-Falconi, 2019). La HH estimada puede estar influida por la producción del cultivo y por condiciones climáticas favorables, principalmente por la precipitación y por el riego aplicado al cultivo, según el requerimiento hídrico.

De la HH_T estimada en la etapa productiva del cultivo de aguacate en zonas productoras de Colombia, en promedio el 89 % corresponde a HH_V , es decir, a la precipitación efectiva, y el 11 % corresponde a la HH_A , como contribución del agua superficial o subterránea. El aporte de agua lluvia distribuida de manera uniforme durante el ciclo, disminuye las horas de riego y el volumen de agua que se debe aplicar, lo cual genera un ahorro económico para los productores. Sin embargo, el uso eficiente del agua azul aplicada a través de sistemas de riego por goteo brinda un equilibrio y una ganancia para el cultivo, lo que se refleja en el aumento de la producción y en el mejoramiento de la calidad de la fruta.



CAPÍTULO XI

**TECNOHASS: plataforma
tecnológica para la
programación de riego**

Como se ha descrito, la plataforma tecnológica TECNOHASS es una herramienta que permite realizar la planificación del cultivo con criterios técnicos, de acuerdo con la información recopilada y procesada del sistema productivo. A continuación, se describe el paso a paso para el ingreso y el uso del módulo de riego, para facilitar el proceso de interacción con la plataforma. El módulo de riego integra las ecuaciones, variables y criterios descritos en esta unidad para realizar la programación de riego de manera tecnificada y eficiente.

Planes de riego

Cuando el proceso de registro del lote se haya realizado, de acuerdo con las indicaciones suministradas en la unidad de fertilización (véase página 158), se continúa con los pasos descritos a continuación:



1. Seleccione la opción “Planes de riego” (figura 62).

Figura 62. Ingreso al módulo de planes de riego en plataforma TECNOHASS.



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

2. Seleccione el ícono  para agregar un nuevo registro (figura 63).

Figura 63. Registro de nuevo plan de riego.



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

3. Ingrese la información general del plan de riego: al seleccionar nuevo registro, se despliega una ventana con una pestaña denominada “General”, en la cual debe escribir la información del nombre de la finca o del plan de riego y el número del lote definido en el registro en el inicio del módulo. Luego, seleccione el método de cálculo de la evapotranspiración de referencia (E_{TO}), el cual se define según la información de clima disponible en el momento de ingresar al aplicativo.

Cuando disponga del dato de la E_{TO} diaria, seleccione el método de cálculo “Manual”, y cuando no, elija “Calculado”. Si la opción escogida es “Calculado”, se despliega una ventana donde debe verificar la disponibilidad de información de las variables climáticas de velocidad del viento y humedad relativa. Cuando cuenta con datos de estas dos variables, el método de cálculo de la E_{TO} será el FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006); si no se posee alguna de las dos variables, el método de cálculo será el de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) (figura 64).



TECNOHASS

Información del cultivo

Planes de Fertilización

Planes de Riego

Video tutoriales

FERTILIZACIÓN Y RIEGO

Fertilización y Riego

LG

Luis Grajales

Asesor Técnico

Nuevo plan de riego

Informe

General

Nombre: *

La Lorena

Lote: *

Cálculo ETc: *

Tipo Emisor: *

Manual

Calculado

Radio copa árbol: 0 metros

Radio copa árbol: 0 metros

Caudal de cada gotero: *

0 L/h

Área efectiva de riego: 0 m2

Número de goteros por árbol: *

0

Caudal de descarga: 0 L/h

TECNOHASS

Información del cultivo

Planes de Fertilización

Planes de Riego

Video tutoriales

FERTILIZACIÓN Y RIEGO

Fertilización y Riego

LG

Luis Grajales

Asesor Técnico

Nuevo plan de riego

Informe

DEFINIR MÉTODO CÁLCULO

¿Tiene acceso a la siguiente información?

Humedad Relativa: *

☒ Si
 ☐ No

Velocidad del viento: *

☐ Si
 ☒ No

Cancelar

Continuar

Caudal de cada gotero: *

0 L/h

Área efectiva de riego: 0 m2

Número de goteros por árbol: *

0

Caudal de descarga: 0 L/h

TECNOHASS

Información del cultivo

Planes de Fertilización

Planes de Riego

Video tutoriales

FERTILIZACIÓN Y RIEGO

Fertilización y Riego

LG

Luis Grajales

Asesor Técnico

Nuevo plan de riego

Informe

General

Nombre: *

La Lorena

Lote: *

Cálculo ETc: *

Calculado

Tipo Emisor: *

Manual

Calculado

Radio copa árbol: 0 metros

Radio copa árbol: 0 metros

Caudal de cada gotero: *

0 L/h

Área efectiva de riego: 0 m2

Número de goteros por árbol: *

0

Caudal de descarga: 0 L/h

Método Cálculo: Penman - Monteith

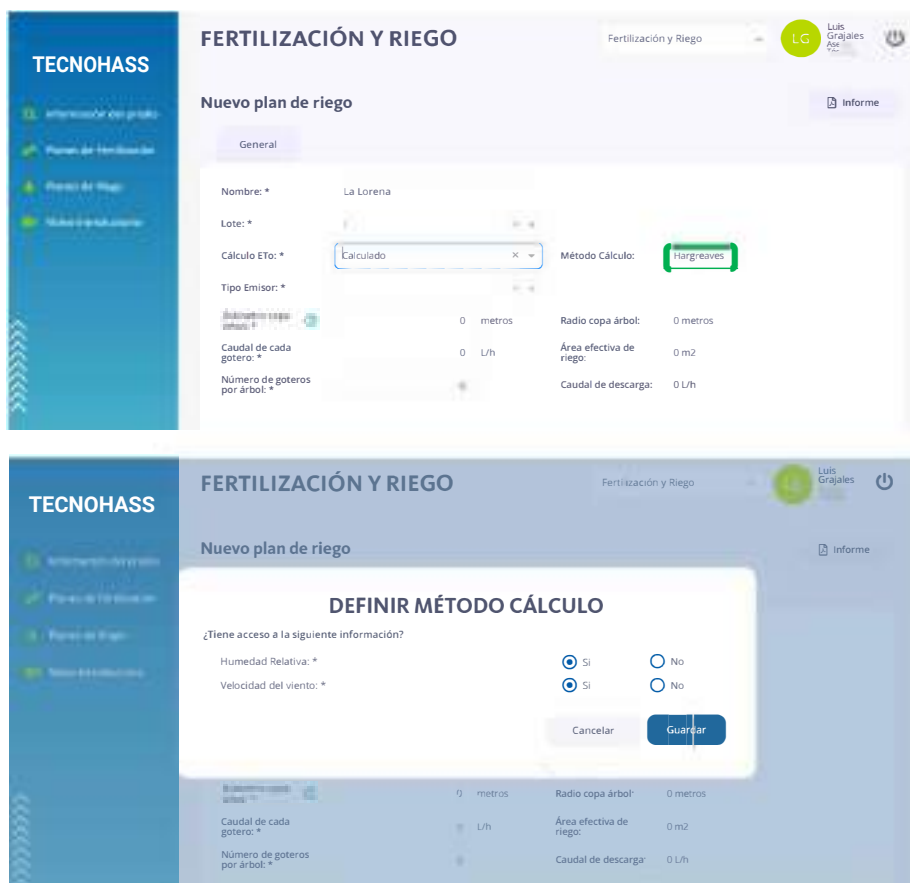


Figura 64. Selección de método de cálculo de ETO de acuerdo con información disponible del usuario.

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

4. Registre los datos de humedecimiento: después de seleccionar el método de cálculo de la ETO, diligencie los datos requeridos para determinar el área de humedecimiento, correspondiente al área de la copa del árbol, por lo cual es necesario que escriba el diámetro de la copa en metros. Luego, seleccione el tipo de emisor (gotero o microaspersor), el caudal del emisor (L/h) y, por último, el número de emisores por árbol, que se refiere a la cantidad de goteros o microaspersores dispuesto por árbol. Una vez haya ingresado la información, guarde el plan de riego (figura 65).

Figura 65. Registro de información para calcular el área de humedecimiento y finalización de registro de plan de riego

The figure consists of two screenshots of a web application interface for creating a new irrigation plan. The top screenshot shows the 'Nuevo plan de riego' form with the following fields: 'Nombre' (text), 'Cultivo' (text), 'Especie' (text), 'Cantidad' (text), 'Además de' (text), 'Ingeniero' (text), 'Evaluación' (text), 'Cálculo de área' (text), and 'Cálculo de volumen' (text). The bottom screenshot shows a confirmation message: 'Plan Riego Guardado' with a green checkmark and a 'Fin' button.

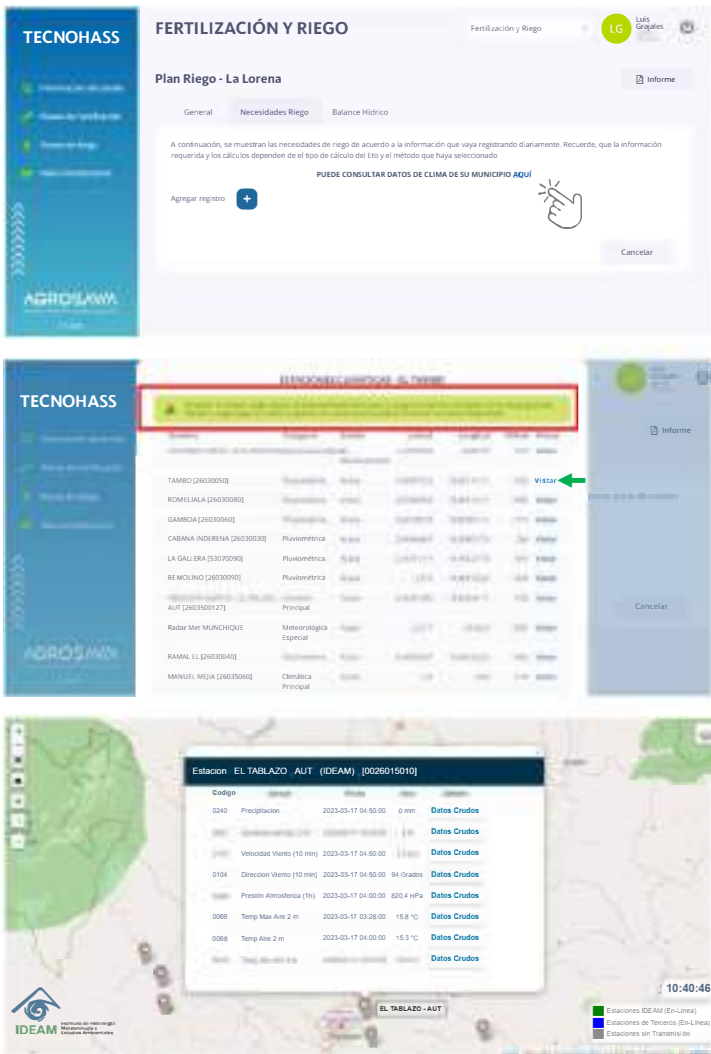
Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

5. Defina las necesidades de riego y balance hídrico: cuando el plan de riego se guarda, aparecen dos nuevas pestañas: “Necesidades de riego” y “Balance hídrico”. En la pestaña “Necesidades de riego”, se determina la programación de riego del cultivo y es donde se registran los datos meteorológicos diarios, con los cuales se definirán la frecuencia de riego, la lámina y volumen de aplicación y el tiempo de riego.

Como insumo para los usuarios, se dispone de un enlace de consulta de información climática diaria de estaciones meteorológicas ubicadas en los municipios priorizados, al que es posible acceder

libremente, para lo cual debe dar clic en “Puede consultar datos de clima de su municipio AQUÍ”. Al hacerlo, se abrirá una ventana con el listado de estaciones cercanas al municipio de interés y posteriormente se podrá dar clic en el enlace que redirige a los sitios web del Ideam o Cenicafé, donde se encuentra la información (figura 66).

Figura 66. Consulta de información climática disponible en área de influencia de la plataforma.

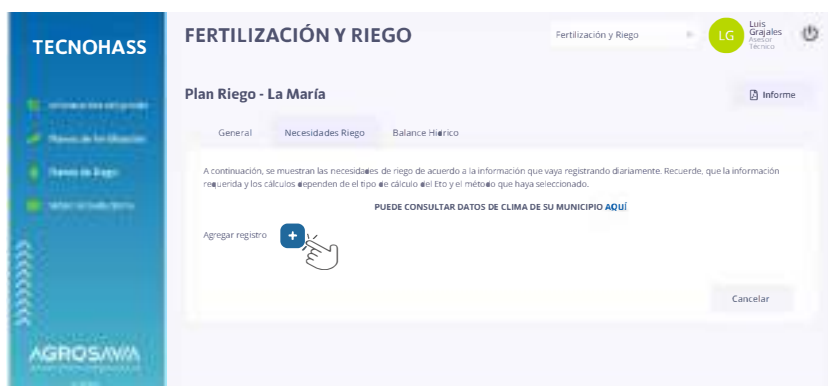


Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

6. Registre los datos de balance hídrico diario y programación de riego: una vez haya identificado la estación y tomado la información requerida, ingrese el registro de los datos para definir el balance hídrico diario y la programación de riego, de acuerdo con la información ingresada. Para esto, seleccione el botón “Agregar registro ” y luego se activará una ventana de “Nuevo registro”, en la cual debe escribir la fecha de cálculo (actual), y, dependiendo del método, ingrese los datos climáticos correspondientes:

- **Hargreaves:** temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), temperatura media (°C) y precipitación total diaria (mm).
- **FAO Penman-Monteith:** temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), temperatura media (°C), humedad relativa media (%), velocidad del viento (m/s) y precipitación total diaria (mm).
- **Manual:** evapotranspiración de referencia (ET₀) y precipitación total diaria (mm).

Cuando finalice el registro de los datos climáticos, en la pestaña de “Necesidades de riego” aparecerá el balance hídrico para ese día, y, si es necesario regar, se mostrarán la lámina y el volumen para aplicar, así como el tiempo de riego. De la misma manera, continúe ingresando la información durante todos los días y podrán observar los días de riego, los días de lluvia y el comportamiento del régimen hídrico durante la semana o el mes. Es importante aclarar que también se pueden registrar datos meteorológicos obtenidos de otras fuentes, como estaciones climáticas propias, de la Corporación Autónoma Regional, entre otras (figura 67).



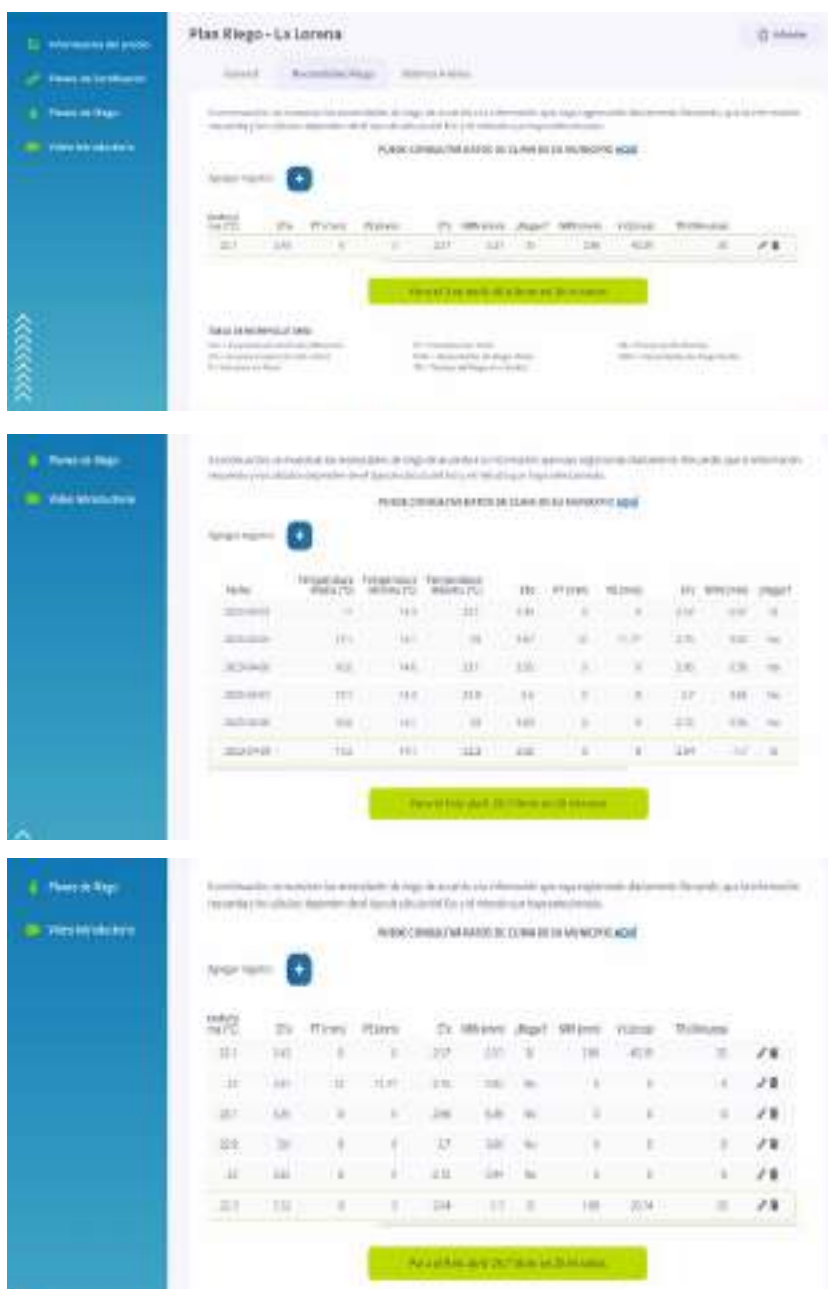


Figura 67. Registro de datos para determinar las necesidades de riego de acuerdo con el método de cálculo de ETO.

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

7. Visualice el balance hídrico: en la pestaña “Balance hídrico” podrá observar gráficamente el comportamiento del régimen hídrico de los últimos treinta días para la programación de riego. A su vez, puede revisar el balance hídrico histórico del municipio, con el cual podrá realizar comparaciones con las condiciones actuales, además de planificar actividades de manejo del cultivo, según el régimen de lluvias de la zona (figura 68).

Figura 68. Representación gráfica de balance hídrico diario realizado por la plataforma y balance hídrico histórico de los municipios priorizados.



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

8. Descargue el informe diario del balance hídrico y la programación de riego: a partir de los registros que ha ingresado a la plataforma tecnológica, en el módulo de riego puede descargar un informe con los datos del balance hídrico diario y la programación de riego. Este informe se descarga en formato PDF y se puede guardar dentro de los registros técnicos del cultivo. Para ello, es necesario que dé clic en el botón “Informe”, ubicado en la parte superior derecha de la pantalla, y el documento se descargará automáticamente (figura 69).

Figura 69. Descarga de informe del plan de riego registrado (balance hídrico y necesidades de riego).



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

Consulte la información histórica disponible: cada vez que ingrese a la plataforma tecnológica, en el módulo de riego, el plan de riego quedará guardado y disponible en la pantalla principal para que pueda continuar con el registro de datos y alimentar el balance hídrico (figura 70).

Figura 70. Ingreso y consulta de plan de riego registrado.



Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

También, si requiere ingresar un nuevo plan, solo debe dar clic en “Agregar nuevo plan” y seguir los pasos 1-8 (figura 71).



Figura 71. Creación de nuevo plan de riego.

TECNOHASS

FERTILIZACIÓN Y RIEGO

Fertilización y Riego

Lista de planes de riego

Nombre	Lote	Cálculo Eto	Fecha Creación
La Lorena		Calculado - Hargreaves	2023-09-04 10:10

Nuevo plan de riego

General

Nombre: * La María

Lote: *

Cálculo Eto: * Calculado

Método Cálculo: Penman - Monteith

Tipo Emisor: * Microaspersor

7 metros

Radio copa árbol: 3.5 metros

Caudal de cada gotero: * 60 L/h

Área efectiva de riego: 19.242 m2

Número de goteros por árbol: *

Caudal de descarga: 60 L/h

Cancelar Guardar

TECNOHASS

FERTILIZACIÓN Y RIEGO

Fertilización y Riego

Plan Riego - La María

General Necesidades Riego Balance Hídrico

A continuación, se muestran las necesidades de riego de acuerdo a la información que vaya registrando diariamente. Recuerde, que la información requerida y los cálculos dependen de el tipo de cálculo de Eto y el método que haya seleccionado.

PUEDEN CONSULTAR DATOS DE CLIMA DE SU MUNICIPIO AQUÍ

Agregar registro +

Cancelar

Fuente: Captura de pantalla de TECNOHASS.

La plataforma permite a los productores y asistentes técnicos tener una herramienta tecnológica ajustada a las condiciones de los sistemas productivos para tomar decisiones sobre el manejo eficiente del recurso hídrico. Gracias a la estimación de los requerimientos hídricos del cultivo de aguacate Hass, es posible generar una programación de riego que apunte a su aplicación oportuna, en el momento y con la frecuencia apropiados, lo que a su vez permite disminuir la dependencia del cultivo de las precipitaciones y hacer que este sea más resiliente ante la ocurrencia de eventos climáticos extremos.





Conclusiones

En la primera fase de investigación en los departamentos de Antioquia, Tolima y Cauca, así como en la fase de validación en zonas productoras del departamento del Cauca, se determinó el porcentaje de extracción de nutrientes por el fruto, para un rendimiento promedio de 20 t/ha, que coincide con reportes bajo condiciones de estudio en México (Salazar-García & Lazcano-Ferrat, 2001; Maldonado-Torres et al., 2007). De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana 947-1 de 2018, adaptada del *Codex Alimentarius* (FAO, 1995), con el tratamiento de fertilización basado en la metodología del índice de balance de nutrientes (IBN), se incrementó en 20 puntos el porcentaje de frutos con pesos superiores a 196 g, como indicador del mejoramiento de la calidad del fruto, lo que a su vez se vio reflejado en un aumento en el rendimiento de 3 t/ha.

En esta publicación se documentan procesos de investigación basados en la descripción de estados fenológicos tipo y en el enfoque del IBN en el cultivo de aguacate Hass bajo condiciones de zonas productoras de Colombia, y con su divulgación se busca contribuir con la implementación de bases conceptuales bajo un mismo criterio, con una mayor cobertura. Como complemento de esta publicación, se generó la plataforma tecnológica TECNOHASS, donde se incluyen dos módulos de fertilización y riego y se condensan

todas las ecuaciones y criterios de análisis detallados en este libro, como herramienta de ayuda para la toma de decisiones.

Tecnificar el cultivo de aguacate Hass con un sistema de riego por goteo incrementa la producción en al menos un 23 %, aplicando la lámina adecuada, lo que permitiría, en al menos dos ciclos de producción, recuperar la inversión y mejorar las ganancias y la calidad de vida de los productores, más aún teniendo en cuenta la apuesta exportadora que tiene este producto.

Con el uso de los indicadores RWS, RIS y RRS fue posible establecer que la mejor alternativa de manejo del riego para el cultivo de aguacate Hass en las zonas de estudio es aplicar una lámina de agua equivalente al 0,75 ETO, dado que la eficiencia en el uso del agua fue mejor bajo este enfoque de riego, lo que a su vez permite que se dé un manejo racional del agua al comparar la oferta hídrica ambiental con las demandas de agua del cultivo y el efecto sobre la producción.

Calcular el consumo de agua del cultivo de aguacate según su composición (verde o azul), por medio de tecnologías apropiadas, permite tomar decisiones y realizar acciones para garantizar la conservación del recurso hídrico y brindar recomendaciones de manejo integrado a los agricultores.

Finalmente, se observó cómo las zonas se vieron afectadas por el fenómeno de El Niño, época durante la cual fue indispensable contar con un sistema de riego y una metodología clara para la aplicación de las láminas. Si los agricultores de aguacate empiezan a implementar estas metodologías, podrán hacer que sus sistemas sean más eficientes y resilientes al cambio climático.

Referencias

- Abd-Elmabod, S. K., Jordán, A., Fleskens, L., Phillips, J. D., Muñoz-Rojas, M., Van der Ploeg, M., Anaya-Romero, M., El-Ashry, S., & De la Rosa, D. (2017). Modeling agricultural suitability along soil transects under current conditions and improved scenario of soil factors. En P. Pereira, E. C. Brevik, M. Muñoz-Rojas, & B. A. Miller (Eds.), *Soil mapping and process modeling for sustainable land use management* (pp. 193-219). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805200-6.00007-4>
- Adams, F. (1984). Crop response to lime in the southern United States. En F. Adams (Ed.), *Soil acidity and liming* (pp. 211-265). American Society of Agronomy.
- Adams, F., & Martin, J. B. (1984). Liming effects on nitrogen use and efficiency. En R. D. Hauck (Ed.), *Nitrogen in crop production* (pp. 417-426). American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America.
- Afif, E. (2005). *Dinámica del fósforo en suelos cálcicos de áreas mediterráneas: trabajo experimental*. Universidad de Oviedo.
- Agronet. (2019). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA 2019)*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). <https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge>

- Agronet. (2022). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA)*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). <https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge>
- Alcaraz, M. L., Thorp, T. G., & Hormaza, J. I. (2013). Phenological growth stages of avocado (*Persea americana*) according to the BBCH scale. *Scientia Horticulturae*, 164, 434-439. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.051>
- Alfaro, M., & Bernier, R. (2008). *Enmiendas calcáreas y estimación de dosis de aplicación*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7206/NR35147.pdf?sequence=6>
- Alfonso Bartoli, J. A. (2008). *Manual técnico del cultivo de aguacate Hass* (*Persea americana* L.). Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. <https://www.avocadosource.com/books/AlfonsoJose2008.pdf>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio fao Riego y Drenaje*, (56). <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Alloway, B. J. (2004). *Zinc in soils and crop nutrition*. International Fertilizer Industry Association; International Zinc Association.
- AQUA4D. (s.f.). El riego de precisión del aguacate aumenta la eficiencia hídrica y la productividad. <https://www.aqua4d.com/news/es/avocado-precision-irrigation-boosts-water-efficiency-and-productivity/>
- Arechavaleta, M., Rodríguez, S., Zurita, N., & García, A. (Coords.). (2010). *Lista de especies silvestres de Canarias: hongos, plantas y animales terrestres*. 2009. Gobierno de Canarias.

- Arnalds, O., & Stahr, K. (2004). Volcanic soil resources: Occurrence, development, and properties. *Catena*, 56(1-3), 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.10.001>
- Asap, A., Haruna, A. O., Ab. Majid, N. M., & Ali, M. (2018). Amending triple superphosphate with chicken litter biochar improves phosphorus availability. *Eurasian Journal of Soil Science*, 7(2), 121-132. <https://doi.org/10.18393/ejss.376250>
- Ataucusi, S. (2015). *Manejo técnico del cultivo del palto*. Cáritas del Perú. <https://draapurimac.gob.pe/sites/default/files/revistas/Manual%20Palta%20F.pdf>
- Aubert, B. (1972). Considérations sur la phénologie des especes fruitieres arbustives. *Fruits*, 27(3), 193-198. https://agritrop.cirad.fr/424725/1/document_424725.pdf
- Avilán, L., Soto, E., Pérez, M., Rodríguez, M., & Ruiz, J. (2007). Fenología de cultivares e híbridos de aguacate de la raza mexicana en la región centro-norte costera de Venezuela. *Agronomía Tropical*, 57(2), 89-98. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2007000200002
- Baligar, V., & Bennett, O. (1986). Outlook on fertilizer use efficiency in the tropics. *Fertilizer Research*, 10, 83-96. <https://doi.org/10.1007/BF01073907>
- Bar, Y., Apelbaum, A., Kafkafi, U., & Goren, R. (1997). Relationship between chloride and nitrate and its effect on growth and mineral composition of avocado and citrus plants. *Journal of Plant Nutrition*, 20(6), 715-731. <https://doi.org/10.1080/01904169709365288>
- Barber, S. A., Walker, J. M., & Vasey, E. H. (1963). Mechanisms for movement of plant nutrients from soil and fertilizer to plant

root. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 11(3), 204-207. <https://doi.org/10.1021/jf60127a017>

Barmore, C. R. (1976). Avocado fruit maturity. En J. W. Sauls, R. L. Phillips, & L. K. Jackson (Eds.), *Proceedings of the First International Tropical Fruit Short Course: The Avocado* (pp. 103-109). Florida University Press. http://www.avocadosource.com/Journals/ITFSC/PROC_1976_TOC.htm

Barnard, R. O., Cillié, G. E. B., & Kotzé, J. M. (1991). Deficiency symptoms in avocados. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 14, 67-71. https://www.avocadosource.com/Journals/SAAGA/SAAGA_1991/SAAGA_1991_PG_67-71.pdf

Bender, G. S. (2012). *Avocado production in California: A cultural handbook for growers*. University of California Cooperative Extension.

Bender, G. S., & Faber, B. (1999). *Avocado fertilization*. University of California Cooperative Extension.

Bernal, J. A., & Díaz, C. A. (Comps.). (2008). *Tecnología para el cultivo del aguacate*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13459>

Bertin, Y., Blondeau, J. P., & Dormoy, M. (1976). Premiers résultats d'une étude d'analyse foliaire sur l'avocatier Lula à la Martinique. *Fruits*, 31(7-8), 459-471. <https://agritrop.cirad.fr/414670/>

Biederbeck, V. O., Bouman, O. T., Campbell, C. A., Winkleman, G. E., & Bailey, L. D. (1996). Nitrogen benefits from four green-manure legumes in dryland cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 76(2), 307-315. <https://doi.org/10.4141/cjps96-053>

Bisonó, S. M., & Hernández, J. R. (2008). *Guía tecnológica sobre el cultivo del aguacate*. Consejo Nacional de Competitividad. <https://unaltreblogdehorts.files.wordpress.com/2013/04/guia-tecaguacate.pdf>

Blaney, H. F., & Morin, K. V. (1942). Evaporation and consumptive use of water empirical formulas. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 23(1), 76-83. <https://doi.org/10.1029/TR023i001p00076>

Bonomelli, C., Gil, P. M., & Schaffer, B. (2019). Effect of soil type on calcium absorption and partitioning in young avocado (*Persea americana* Mill.) trees. *Agronomy*, 9(12), artículo 837. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120837>

Bost, J. B. (2009). *Edible plants of the Chinantla, Oaxaca, Mexico with an emphasis on the participatory domestication prospects of Persea schiedeana* [tesis de maestría, University of Florida].

Bower, J. P. (1988). Pre-and postharvest measures for long-term storage of avocados. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 11, 68-72. https://www.researchgate.net/publication/240622648_Pre-_and_Postharvest_measures_for_long-term_storage_of_avocados

Boyd, L. M., Hancock, A. A., Woolf, A. B., De Silva, N., Thorp, T. G., & Ferguson, I. B. (2007). Comparison of sampling strategies for determining fruit mineral concentrations in 'Hass' avocado (*Persea Americana* Mill.). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 82(4), 611-621. <https://doi.org/10.1080/14620316.2007.11512281>

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (14.^a ed.). Pearson.

- Bravo, I., Campo, E., & Arboleda, C. A. (2016). Alófanos causa de indisponibilidad de aniones en suelos del departamento del Cauca - Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, 46(1 y 2), 13-30. http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuatoriales/article/view/57
- Cabezas, C., Hueso, J. J., & Cuevas, J. (2003). Identificación y descripción de los estados fenológicos-tipo del aguacate (*Persea americana* Mill.). En *Actas del V Congreso Mundial del Aguacate* (pp. 237-242). https://www.avocadosource.com/WAC5/Papers/WAC5_p237.pdf
- Cameron, S. H., Mueller, R. T., & Wallace, A. (1952). Nutrient composition and seasonal losses of avocado trees. *California Avocado Society Yearbook*, 36, 201-209. http://www.avocadosource.com/cas_yearbooks/cas_37_1952/cas_1952_pg_201-209.pdf
- Campbell, C. W., & Malo, S. E. (1976). A survey of avocado cultivars. En J. W. Sauls, R. L. Phillips, & L. K. Jackson (Eds.), *Proceedings of the First International Tropical Fruit Short Course: The Avocado* (pp. 20-24). Florida University Press. http://www.avocadosource.com/Journals/ITFSC/PROC_1976_TOC.htm
- Campbell, J. L., Rustad, L. E., Boyer, E. W., Christopher, S. F., Driscoll, C. T., Fernandez, I. J., Groffman, P. M., Houle, D., Kiebusch, J., Magill, A. H., Mitchell, M. J., & Ollinger, S. V. (2009). Consequences of climate change for biogeochemical cycling in forests of northeastern North America. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(2), 264-284. <https://doi.org/10.1139/X08-104>
- Can-Alonzo, C., Quezada-Euán, J. J., Xiu-Ancona, P., Moo-Valle, H., Valdovinos-Núñez, G. R., & Medina-Peralta, S. (2005). Pollination of 'criollo' avocados (*Persea americana*) and the behaviour of associated bees in subtropical Mexico. *Journal of*

Apicultural Research, 44(1), 3-8. <https://doi.org/10.1080/00218839.2005.11101138>

Cantuarias-Avilés, T., Da Silva, S. R., Angolini, S. F., Brogio, B. do A., Baptista, E. G., & Micheletti, L. B. (2019). Water status and productivity of 'Hass' avocado trees in response to supplemental irrigation during winter. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 54, artículo e00237. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00237>

Carr, M. K. V. (2013). The water relations and irrigation requirements of avocado (*Persea americana* Mill.): A review. *Experimental Agriculture*, 49(2), 256-278. <https://doi.org/10.1017/S0014479712001317>

Casierra-Posada, F., & Aguilar-Avendaño, O. E. (2007). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246-257. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/download/8701/7243/25892

Castellanos, J. Z. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Intagri.

Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). (2015). *Archivos de información climática 2005-2015*.

Cerdas Araya, M. del M., Montero Calderón, M., & Díaz Cordero, E. (2006). *Manual de manejo pre y poscosecha de aguacate* (*Persea americana*). Ministerio de Agricultura y Ganadería; Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-9029.pdf>

- Chaveli López, E. (2020). *Efecto de la reducción de la floración con ácido giberélico sobre la producción del aguacate* [tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].
- Chien, S. H., Gearhart, M. M., & Collamer, D. J. (2008). The effect of different ammonical nitrogen sources on soil acidification. *Soil Science*, 173(8), 544-551. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31817d9d17>
- Chirinos, H. (1999). Fertilización del aguacate. *Informaciones Agronómicas*, 3(6), 11-12.
- Clarkson, D. T., & Hanson, J. B. (1980). The mineral nutrition of higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 31, 239-298. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.31.060180.001323>
- Cochrane, T. T., Salinas, J. G., & Sanchez, P. A. (1980). An equation for liming acid mineral soils to compensate crop aluminium tolerance. *Tropical Agriculture*, 57(2), 133-140. <https://journals.sta.uwi.edu/ojs/index.php/ta/article/view/2882>
- Cortez, A., Núñez, M. C., & Rodríguez, M. F. (2007). Adaptabilidad agroecológica del cultivo del aguacate en el estado Aragua, Venezuela. *Bioagro*, 19(2), 85-90. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612007000200004
- Cossio-Vargas, L. E., Salazar-García, S., González-Durán, I. J., & Medina-Torres, R. (2007, 12-16 de noviembre). *Algunos aspectos reproductivos del aguacate 'Hass' en clima semicálido* [presentación en congreso]. VI World Avocado Congress, Viña del Mar, Chile. <https://www.avocadosource.com/WAC6/es/Extenso/3d-151.pdf>
- Crowley, D. E. (1992). *Soil fertility and the mineral nutrition of avocado: Physical, chemical, and biological properties of soil and their importance in the culture of avocado*. California Avocado Development Organization; California Avocado Society.

- Crowley, D. E., Smith, W., Faber, B., & Arpaia, M. L. (2001). Trace metal nutrition of avocado. *AvoResearch*, 1(3), 5-7. http://www.avocadosource.com/journals/avoresearch/avoresearch_01_03_2001_crowley_trace.pdf
- Cruz Cerón, G. (2005). *Economía aplicada a la valoración de impactos ambientales*. Editorial Universidad de Caldas.
- Cruz-Castillo, J. G., Del Ángel-Coronel, O. A., De La Cruz-Medina, J., & Joaquín-Martínez, M. C. (2007). Características morfológicas y bioquímicas de frutos de chinene (*Persea schiedeana* Nees.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(2), 141-147. <https://www.redalyc.org/pdf/609/60913280005.pdf>
- Cummings, K., & Schroeder, C. A. (1942). Anatomy of the avocado fruit. *California Avocado Society Yearbook*, 27, 56-64. http://www.avocadosource.com/cas_yearbooks/cas_27_1942/cas_1942_pg_056-064.pdf
- Darwish, W. M., & Elmetwalli, A. H. (2019). Influence of irrigation method and fertilization type on avocado yield and quality. *MISR Journal of Agricultural Engineering*, 36(1), 141-156. <https://doi.org/10.21608/mjae.2019.94445>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (1951). *Soil survey manual*.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (1993). *Soil survey manual*.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (2017). *Soil survey manual*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>
- Dixon, J., Lamond, C. B., Smith, D. B., & Elmlsy, T. A. (2006). Patterns of fruit growth and fruit drop of 'Hass' avocado trees in the

Western Bay of Plenty, New Zealand. *New Zealand Avocado Growers' Association Annual Research Report*, 6, 47-54. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=671EF04EE5CB-41F80CF15927CDA9EAE5?doi=10.1.1.551.2425&rep=rep1&type=pdf>

Dixon, J., & Sher, D. (2002). Pollination of avocados. *Annual Research Report of New Zealand Avocado Growers Association*, 2, 31-40. https://www.avocadosource.com/Journals/NZAGA/NZAGA_2002/NZAGA_2002_01.pdf

Dixon, J., Smith, D., Elmsly, T., & Fields, F. (2005). The impact of foliar applications of nitrogen and boron on 'Hass' avocado fruit set in 2004. *New Zealand Avocado Growers' Association Annual Research Report*, 5, 27-34.

Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, (24).

Dubrovina, I. A., & Bautista, F. (2014). Analysis of the suitability of various soil groups and types of climate for avocado growing in the state of Michoacán, Mexico. *Eurasian Soil Science*, 47, 491-503. <https://doi.org/10.1134/S1064229314010037>

Durán Zuazo, V. H., Lipan, L., Cáceres Rodríguez, B., Sendra, E., Franco Tarifa, D., Nemés, A., Gálvez Ruiz, B., Carbonell-Barrachina, Á. A., & García-Tejero, I. F. (2021). Impact of deficit irrigation on fruit yield and lipid profile of terraced avocado orchards. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00731-x>

Embleton, T. W., & Jones, W. W. (1972). Development of nitrogen fertilizer programs for California avocados. *California Avocado Society Yearbook*, 56, 90-96. http://avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_55_1971/CAS_1971-72_PG_090-096.pdf

- Enciso, J. M., Porter, D., & Périès, X. (2007). *Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego*. El Sistema Universitario Texas A&M. https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87470/pdf_2437.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Erazo-Mesa, E., Ramírez-Gil, J. G., & Echeverri Sánchez, A. (2021). Avocado cv. Hass needs water irrigation in tropical precipitation regime: Evidence from Colombia. *Water*, 13(14), artículo 1942. <https://doi.org/10.3390/w13141942>
- Ferreira, R., & Sellés van Sch. (Eds.). (2007). Manejo del riego y suelo en palto. *Boletín INIA*, (160). <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/7110>
- Ferreira, R., & Sellés van Schouwen, G. (2011). Algunas consideraciones para el manejo de riego en cítricos. *Tierra Adentro*, (94), 66-74. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/68398/NR38036.pdf?sequence=18&isAllowed=y>
- Gandolfo Wiederhold, S. P. (2008). *Factores ecofisiológicos relacionados con el crecimiento vegetativo, floración y desarrollo del fruto del aguacate* [tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/3441/tesisUPV2868.pdf>
- García-Martínez, R., Cortés-Flores, J. I., López-Jiménez, A., Etchevers-Barra, J. D., Carrillo-Salazar, J. A., & Saucedo-Veloz, C. (2021). Yield, quality and post-harvest behavior of 'Hass' avocado fruits of orchards with different fertilization. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(2), 205-218. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2232>
- Gardiazábal, F., Mena, F., & Magdahl, C. (2007). Efecto de la fertilización en base a N-P-K-Ca-Mg-B-Zn en palto (*Persea americana* Mill.) cv. Hass sobre su desarrollo, productividad y postcosecha

de la fruta. En *Actas del VI Congreso Mundial del Aguacate*. <http://www.avocadosource.com/wac6/es/extenso/3a-98.pdf>

Gardiazabal, F., Mena, F., Torres, J., & Pinto, A. (2015). Plantaciones de muy alta densidad (2,5 x 1,25m y 1,25 x 1,25m) en paltos (*Persea americana* Mill.) cv. Hass logran en su primer año de producción más de 40 t/ha. En *Actas del VIII Congreso Mundial de la Palta 2015* (pp. 305-309). https://www.avocadosource.com/WAC8/Section_04/GardiazabalFrancisco2015b.pdf

Garner, L., Klein, G., Zheng, Y., Khuong, T., & Lovatt, C. J. (2011). Response of evergreen perennial tree crops to gibberellic acid is crop load-dependent: II. GA₃ increases yield and fruit size of 'Hass' avocado only in the on-crop year of an alternate bearing orchard. *Scientia Horticulturae*, 130(4), 753-761. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.08.033>

Garner, L. C., & Lovatt, C. J. (2016). Physiological factors affecting flower and fruit abscission of 'Hass' avocado. *Scientia Horticulturae*, 199, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.009>

Garner, L. C., & Lovatt, C. J. (2008). The relationship between flower and fruit abscission and alternate bearing of 'Hass' avocado. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 133(1), 3-10. <https://doi.org/10.21273/JASHS.133.1.3>

Gelvez Pardo, I. M., Moreno Rodríguez, J. M., & Santos Díaz, A. M. (2020). *Guía de muestreo de suelo para análisis microbiológico*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7404098>

Gillaspy, G., Ben-David, H., & Gruissem, W. (1993). Fruits: A developmental perspective. *The Plant Cell*, 5(10), 1.439-1.451. <https://doi.org/10.1105%2Ftpc.5.10.1439>

- Gómez-Guerrero, A., & Doane, T. (2018). The response of forest ecosystems to climate change. En W. R. Horwath, & Y. Kuzyakov (Eds.), *Developments in soil science* (vol. 35: *Climate change impacts on soil processes and ecosystem properties*, pp. 185-206). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63865-6.00007-7>
- Gómez-Tagle, A. F., Gómez-Tagle, A., Fuerte-Velázquez, D. J., Barajas-Alcalá, A. G., Quiroz-Rivera, F., Alarcón-Chaires, P. E., & Guerrero-García-Rojas, H. (2022). Blue and green water footprint of agro-industrial avocado production in central Mexico. *Sustainability*, 14(15), artículo 9664. <https://doi.org/10.3390/su14159664>
- Goodall, G. E., Embleton, T. W., & Platt, R. G. (1978). *Avocado fertilization*. University of California Cooperative Extension. http://www.avocadosource.com/papers/research_articles/goodallgeorge1978.pdf
- Gorantiwar, S. D., & Smout, I. K. (2005). Performance assessment of irrigation water management of heterogeneous irrigation schemes: 1. A framework for evaluation. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 1-36. <https://doi.org/10.1007/s10795-005-2970-9>
- Grajales-Guzmán, L. C. (2017). *Uso racional del agua de riego en cultivos de aguacate Hass (Persea americana) en tres zonas productoras de Colombia* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62000?show=full>
- Granja, F., & Covarrubias, J. I. (2018). Evaluation of acidifying nitrogen fertilizers in avocado trees with iron deficiency symptoms. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(1), 157-172. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005000702>

- Guerrero-Polanco, F., Alejo-Santiago, G., Sánchez Hernández, R., Bugarín-Montoya, R., Aburto-González, C. A., & Isiordia-Aquino, N. (2018). Respuesta del cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill.) variedad Hass a la aplicación de nitrato de potasio. *Acta Agronómica*, 67(3), 425-430. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122018000300425
- Gupta, U. C. (1980). Boron nutrition of crops. *Advances in Agronomy*, 31, 273-307. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60142-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60142-X)
- Gupta, U. C., Jame, Y. W., Campbell, C. A., Leyshon, A. J., & Nicholaichuk, W. (1985). Boron toxicity and deficiency: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 65(3), 381-409. <https://doi.org/10.4141/cjss85-044>
- Gupta, U. C., & MacLeod, J. A. (1981). Plant and soil boron as influenced by soil pH and calcium sources on podzol soils. *Soil Science*, 131(1). https://journals.lww.com/soilsci/abstract/1981/01000/plant_and_soil_boron_as_influenced_by_soil_ph_and.3.aspx
- Hamid, G. A., Van Gundy, S. D., & Lovatt, C. J. (1988). Phenologies of the citrus nematode and citrus roots treated with oxamyl. En *Proceedings of the Sixth International Citrus Congress: Middle-East, Tel Aviv, Israel, 6-11 March, 1988* (vol. 2, pp. 993-1.004). Margraf Scientific Publishers.
- Hapuarachchi, N. S., Kämper, W., Wallace, H. M., Hosseini Bai, S., Ogbourne, S. M., Nichols, J., & Trueman, S. J. (2022). Boron effects on fruit set, yield, quality and paternity of Hass avocado. *Agronomy*, 12(6), 1-15. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061479>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3). <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001390>

- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773t>
- Harkness, R. W. (1960). Boron deficiency and alternate bearing in avocados. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 72, 311-317.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (1998). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (6.^a ed.). Prentice Hall.
- Haynes, R. J. (1986). *Mineral nitrogen in the plant-soil system*. Academic Press.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual. Setting the global standard*. Earthscan.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2021). *Manual de evaluación de la huella hídrica. Establecimiento del estándar mundial*. Aenor Internacional.
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). *Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade (Value of Water Research Report Series No. 11)*. IHE Delft.
- Hofman, P. J., Vuthapanich, S., Whiley, A. W., Klieber, A., & Simons, D. H. (2002). Tree yield and fruit minerals concentrations influence 'Hass' avocado fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 92(2), 113-123. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423801002862>

Holdridge, L. R., Tosi, J. A., Grenke, W. C., Hatheway, W. H., & Liang, T. (1971). *Forest environments in tropical life zones: A pilot study*. Pergamon Press.

Holzapfel, E., Alves de Souza, J., Jara, J., & Guerra, H. C. (2017). Responses of avocado production to variation in irrigation levels. *Irrigation Science*, 35, 205-215. <https://doi.org/10.1007/s00271-017-0533-0>

Huggett, J. M. (2005). Clay minerals. En R. C. Selley, L. R. M. Cocks, & I. R. Plimer (Eds.), *Encyclopedia of geology* (pp. 358-365). Elsevier.

iAgua. (2021, 8 de abril). Solución integral de riego y control climático en el cultivo del aguacate. <https://www.iagua.es/noticias/regaber/solucion-integral-riego-y-control-climatico-cultivo-aguacate>

Inoue, H., & Takahashi, B. (1990). Studies on the bearing behavior and yield composition of the avocado tree. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 59(3), 487-501. <https://doi.org/10.2503/jjshs.59.487>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (1992). Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. *Manual de Asistencia Técnica* (25). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/14124/27733_16902.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2015). *Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de “El Niño” y “La Niña”*.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras*. Departamento de Tolima.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2007). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Antioquia.*

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2009). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento del Cauca.*

Ish-Am, G., & Eisikowitch, D. (1991). New insight into avocado flowering in relation to its pollination. *California Avocado Society Yearbook*, 75, 125-137. <https://eurekamag.com/research/002/441/002441612.php>

Jaganath, I., & Lovatt, C. J. (1995). Efficacy studies on prebloom canopy applications of boron and/or urea to 'Hass' avocados in California. En *Proceedings of The World Avocado Congress III* (vol. 181, pp. 184).

Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.

Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE.

Joaquín Martínez, M. C., Cruz Castillo, J. G., De La Cruz Medina, J., & Del Ángel Coronel, Ó. (2007). Distribución ecogeográfica y características del fruto de *Persea schiedeana* Nees. en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4), 403-410. <https://www.redalyc.org/pdf/610/61030407.pdf>

Johan, P. D., Haruna Ahmed, O., Omar, L., & Hasbullah, N. A. (2021). Phosphorus transformation in soils following co-application of charcoal and wood ash. *Agronomy*, 11(10), artículo 2010. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102010>

Just, R. E., Hueth, D. L., & Schmitz, A. (1981). *Applied welfare economics and public policy*. Prentice Hall.

- Kaneko, T., Gould, N., Campbell, D., Snelgar, P., & Clearwater, M. J. (2022). The effect of soil type, fruit load and shaded area on 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) water use and crop coefficients. *Agricultural Water Management*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107519>
- Kenworthy, A. L. (1973). Leaf analysis as an aid in fertilizing orchards. En L. M. Walsh, & J. D. Beaton (Eds.), *Soil testing and plant analysis* (pp. 381-392). Soil Science Society of America.
- King, L. D., Kleiss, H. J., & Thompson, J. A. (2003). *SSC 200: Soil science laboratory manual*. North Carolina State University.
- Knight Jr., R. J. (2002). History, distribution and uses. En B. Schaffer, B. N. Wolstenholme, & A. W. Whiley (Eds.), *The avocado: Botany, production and uses* (pp. 1-14). CABI. <https://doi.org/10.1079/9780851993577.0001>
- Kopp, L. E. (1966). A taxonomic revision of the genus *Persea* in the Western Hemisphere (*Persea*-Lauraceae). *Memoirs of the New York Botanical Garden*, 14(1), 1-120.
- Kourgialas, N. N., & Dokou, Z. (2021). Water management and salinity adaptation approaches of avocado trees: A review for hot-summer Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*, 252, artículo 106923. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106923>
- Kourgialas, N. N., Koubouris, G. C., & Dokou, Z. (2019). Optimal irrigation planning for addressing current or future water scarcity in Mediterranean tree crops. *Science of The Total Environment*, 654, 616-632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.118>
- Kremer-Köhne, S., Köhne, J. S., & Schutte, J. M. (1993). Effect of potassium, magnesium and nitrogen soil applications on Fuerte

avocado fruit quality. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 16, 33-36. http://avocadosource.com/Journals/SAAGA/SAAGA_1993/SAAGA_1993_PG_33-36.pdf

Lahav, E., & Whiley, A. W. (2002). Irrigation and mineral nutrition. En B. Schaffer, B. N. Wolstenholme, & A. W. Whiley (Eds.), *The avocado: Botany, production and uses* (pp. 259-297). CABI. <https://doi.org/10.1079/9780851993577.0259>

Lee, B. W. (1980). *Avomation. Horticultural races*. University of California Cooperative Extension.

Local Land Service. (2020). *Fact Sheet 4: Cation exchange capacity*. State of New South Wales. https://www.lls.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/1270524/4-Cation-Exchange-Capacity_FINAL.pdf

Lovarelli, D., Bacenetti, J., & Fiala, M. (2016). Water Footprint of crop productions: A review. *Science of The Total Environment*, 548-549, 236-251. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.022>

Lovatt, C. J. (1995). Nitrogen nutrition of the 'Hass' avocado: Where does all the N go? En *Proceedings of The World Avocado Congress III* (pp. 152-159). http://www.avocadosource.com/WAC3/wac3_p152.pdf

Lovatt, C. J. (2001). Properly timed soil-applied nitrogen fertilizer increases yield and fruit size of 'Hass' avocado. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(5), 555-559. http://www.avocadosource.com/journals/ashs/ashs_2001_126_5_pg_555-559.pdf

Lovatt, C. J. (2010). Alternate bearing of 'Hass' avocado: A summary of basic information to assist growers in managing their orchards. *California Avocado Society Yearbook*, 93, 125-140.

http://www.avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_93_2010/CAS_2010_V93_PG_125-140.pdf

Lovatt, C. J. (2015). Optimizing 'Hass' avocado tree nutrient status to increase grower profit - An overview. En *Actas del VIII Congreso Mundial de la Palta 2015* (pp. 17-23). http://www.avocadosource.com/wac8/section_01/lovattcarol2015b.pdf

Lovatt, C. J., & Witney, G. (2001). Nitrogen fertilization of the 'Hass' avocado in California. *AvoResearch*, 1(3), 1-4. http://www.avocadosource.com/journals/avoresearch/avoresearch_01_03_2001_lovatt_n%20fert.pdf

Maldonado, R., Etchevers, J. D., Alcántar, G., Rodríguez, J., & Colinas, M. T. (2001). Estado nutrimental del limón mexicano en suelos calcimórficos. *Terra Latinoamericana*, 19(2), 163-174. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319207.pdf>

Maldonado-Torres, R., Álvarez-Sánchez, M. E., Almaguer-Vargas, G., Barrientos-Priego, A. F., & García-Mateos, R. (2007). Estándares nutrimentales para aguacatero 'Hass'. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1), 103-108. <https://www.redalyc.org/pdf/609/60913114.pdf>

Marschner, H. (Ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3.^a ed.). Academic Press.

Martínez, J. P., Muenza, V., & Ruiz, R. (2014). Nutrición y fertilidad en paltos. *Boletín INIA* (283). <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7768/Bolet%20adn%20INIA%20N%20b0%20283?sequence=1&isAllowed=y>

Maru, A., Haruna, A. O., Asap, A., Abd. Majid, N. M., Maikol, N., & Jeffary, A. V. (2020). Reducing acidity of tropical acid soil to improve phosphorus availability and *Zea mays* L. productivity

- through efficient use of chicken litter biochar and triple super-phosphate. *Applied Sciences*, 10(6), artículo 2127. <https://doi.org/10.3390/app10062127>
- Matimati, I., Verboom, G. A., & Cramer, M. D. (2014). Nitrogen regulation of transpiration controls mass-flow acquisition of nutrients. *Journal of Experimental Botany*, 65(1), 159-168. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert367>
- McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2009). Soil pH and organic matter. *Nutrient Management Module*, (8), 1-12. <https://www.certifiedcropadviser.org/files/certifications/certified/education/self-study/exam-pdfs/38.pdf>
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (1978). *Principles of plant nutrition*. International Potash Institute.
- Mengel, K., Kirkby, E. A., Kosegarten, H., & Appel, T. (2001). *Principles of plant nutrition* (5.^a ed.). Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Messenger, B. J., Menge, J. A., Amrhein, C., & Faber, B. (1997). The effects of calcium on avocado growth and root health. *California Avocado Society Yearbook*, 81, 69-78. https://www.avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_81_1997/CAS_1997_PG_069-078.pdf
- Meyer, J. L., Yates, M. V., Stottlemeyer, D. E., Takele, E., Arpaia, M. L., Bender, G. S., & Witney, G. W. (1992). Irrigation and fertilization management of avocados. En *Proceedings of the Second World Avocado Congress* (pp. 281-288). http://www.avocadosource.com/WAC2/WAC2_p281.pdf
- Mickelbart, M. V., Bender, G. S., Witney, G. W., Adams, C., & Arpaia, M. L. (2007). Effects of clonal rootstocks on 'Hass' avocado yield components, alternate bearing, and nutrition. *The Journal of*

Horticultural Science and Biotechnology, 82(3), 460-466. <https://doi.org/10.1080/14620316.2007.11512259>

Minchin, P. E. H., Thorp, T. G., Boldingh, H. L., Gould, N., Cooney, J. M., Negm, F. B., Focht, E., Arpaia, M. L., Hu, H., & Brown, P. (2012). A possible mechanism for phloem transport of boron in 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) trees. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 87(1), 23-28. <https://doi.org/10.1080/14620316.2012.11512825>

Minhas, P. S., Ramos, T. B., Ben-Gal, A., & Pereira, L. S. (2020). Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agricultural Water Management*, 227, artículo 105832. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105832>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2021). *Cadena productiva aguacate*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A., & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4), 528-535. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023>

Monge, E., Val, J., Sanz, M., Blanco, A., & Montañés, L. (1994). El calcio nutriente para las plantas. Bitter pit en manzano. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei*, 21(3), 189-201. <http://hdl.handle.net/10261/4247>

Moorberg, C. J., & Crouse, D. A. (2017). Soils laboratory manual, K-State Edition. *NPP eBooks*, (15). <https://newprairiepress.org/ebooks/15>

Morton, J. F. (1987). *Fruits of warm climates*. Echo Point Books & Media.

Naranjo, J. F., & Reyes, H. (2021). Huella hídrica del cultivo de aguacate cv. Hass (*Persea americana* Mill.), en el Distrito de Conservación de Suelos Barbas-Bremen, Quindío, Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 15(29), 63-70. <https://doi.org/10.31908/19098367.1813>

Navarro, S., & Navarro, G. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal* (2.^a ed.). Mundi-Prensa.

Newett, S., Rigden, P., & Carr, B. (2018). *Avocado plant nutrition review*. Department of Agriculture and Fisheries.

Núñez-Moreno, J. H., Cortés-Flores, J. I., Salazar-García, S., & Landois Palencia, L. L. (1991). Evaluación del método DRIS para diagnosticar el estado nutrimental del aguacate (*Persea americana* Mill). cv. Fuerte. *Agrociencia, Serie Agua-Suelo-Clima*, 2(3), 39-57.

Oad, R., & Sampath, R. K. (1995). Performance measure for improving irrigation management. *Irrigation and Drainage Systems*, 9(4), 357-370. <https://doi.org/10.1007/BF00881621>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s.f.-a). FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/es>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s.f.-b). Textura del suelo. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1995). *Codex Alimentarius. Norma para el aguacate cxs-197-1995*. https://www.fao.org/fao-who-codex-alimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B197-1995%252FCXS_197s.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2000). *Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia*. <https://www.fao.org/3/ai128s/ai128s00.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2009). *Guía para la descripción de suelos* (4.^a ed.). <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>

Ortíz-Escobar, M. E., Zapata-Hernández, R. D., Sadeghian Khala-jabadi, S., & Franco Alvarez, H. F. (2004). Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad. *Cenicafé*, 55(2), 101-110. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/165>

Overstreet, L. F., & DeJong-Huges, J. (2009). *The importance of soil organic matter in cropping systems of the northern Great Plains*. <https://www.certifiedcropadviser.org/files/certifications/certified/education/self-study/exam-pdfs/154.pdf>

Palacios, J. M. (1986). *Dinámica y balance nutrimental en árboles de aguacate* (Persea americana Mill.) cv. Hass, con alto y bajo rendimiento en la región de Uruapan, Michoacán [tesis de maestría, Colegio de Postgraduados].

Paul, E. A., & Clark, F. E. (1996). *Soil microbiology and biochemistry*. Academic Press.

- Paz-Vega, S. (1997). Alternate bearing in the avocado (*Persea americana* Mill.). *California Avocado Society Yearbook*, 81, 117-148. http://www.avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_81_1997/CAS_1997_PG_117-148.pdf
- Penter, M. G., & Stassen, P. J. C. (2000). The effect of pre- and postharvest calcium applications on the postharvest quality of Pinkerton avocados. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 23, 1-7. http://avocadosource.com/Journals/SAAGA/SAAGA_2000/SAAGA_2000_PG_001-007.pdf
- Pérez, L., Camacho, E., Rodríguez, J., & López, R. (2009). *Gestión sostenible del agua de riego*. Analistas Económicos de Andalucía.
- Perry, C., Steduto, P., Allen, R. G., & Burt, C. M. (2009). Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. *Agricultural Water Management*, 96(11), 1.517-1.524. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.05.005>
- Pizarro, F. (1996). *Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF)*. Mundi-Prensa.
- Poovaiah, B. W., Glenn, G. M., & Reddy, A. S. N. (1988). Calcium and fruit softening: Physiology and biochemistry. En J. Janick (Ed.), *Horticultural reviews* (vol. 10, pp. 107-152). Timber Press. <https://doi.org/10.1002/9781118060834.ch4>
- Puppo, L., & García-Petillo, M. (2010). Determinación del consumo de agua del duraznero por lisimetría. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(1), 25-31. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000100004>
- Raes, D. (2009). *The ETo Calculator. Reference manual. Version 3.1*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

- Ranade-Malvi, U. (2011). Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 24(1), 106-109. <https://www.1stfruits.co.za/wp/wp-content/uploads/2019/09/Interaction-of-micro-nutrients-with-major-nutrients-with-special-reference-to-potassium.pdf>
- Raven, J. A. (1980). Short-and long-distance transport of boric acid in plants. *The New Phytologist*, 84(2), 231-249. <https://www.jstor.org/stable/2431719>
- Rebolledo, A., & Romero, M. A. (2011). Avances en investigación sobre el comportamiento productivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) bajo condiciones subtropicales. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 12(2), 113-120. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num2_art:220
- Robbertse, P. J., Coetzer, L. A., Stewart, N. G. N., Bezuidenhout, J. J., & Vorster, L. (1990). The influence of boron on fruit set in avocado. *Acta Horticulturae*, 275, 587-594. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1990.275.73>
- Robertson, B. L. (1971). Fruit growth of the Fuerte avocado. *Farming in South Africa*, 47, 12-13.
- Rojas Falconi, C. L. (2019). *Huella hídrica en la obtención de palta (Persea americana) variedad Hass para exportación*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Roldán Cañas, J., Pérez Arellano, R., Díaz Jiménez, M., & Moreno Pérez, M. F. (2010). Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1), 107-124. <https://www.redalyc.org/pdf/3828/382837646007.pdf>

- Romero Sánchez, M. A. (2012). *Comportamiento fisiológico del aguacate (Persea americana Mill.) variedad Lorena en la zona de Mariquita, Tolima* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9437>
- Rosecrance, R., Faber, B., & Lovatt, C. (2012). Patterns of nutrient accumulation in ‘Hass’ avocado fruit. *Better Crops*, 96(1), 12-13. [http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/F2E59118B155B269062579AC005AE171/\\$FILE/Better%20Crops%202012-1%20p.12-13.pdf](http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/F2E59118B155B269062579AC005AE171/$FILE/Better%20Crops%202012-1%20p.12-13.pdf)
- Rossouw, T., & Robbertse, P. J. (2001). Effect of gibberellic acid treatments on flower development of avocado. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 24(4), 1-2. https://www.avocadosource.com/Journals/SAAGA/SAAGA_2001/SAAGA_2001_PG_01-04.pdf
- Roy, R. N., Finck, A., Blair, G. J., & Tandon, H. L. S. (2006). Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* (16).
- Rural Agricultural Development Authority (RADA). (2013). *Postharvest management: Avocado*.
- Sabando-García, Á. R., Delgado-Sabando, W. M., Chavarría-Párraga, J. E., & Sabando-García, B. X. (2022). Láminas de riego sobre el comportamiento del bulbo húmedo y desarrollo radicular del tomate. *Revista Ingeniería Agrícola*, 12(2). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586272858001/html/>
- Sahrawat, K. L. (2008). Factors affecting nitrification in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(9-10), 1.436-1.446. <https://doi.org/10.1080/00103620802004235>

Salazar-García, S. (2002). *Nutrición del aguacate: principios y aplicaciones*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; Instituto de la Potasa y el Fósforo.

Salazar-García, S., González-Durán, I. J. L., & Tapia-Vargas, L. M. (2011). Influencia del clima, humedad del suelo y época de floración sobre la biomasa y composición nutrimental de frutos de aguacate ‘Hass’ en Michoacán, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(2), 183-194. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000200011

Salazar-García, S., Gutierrez Camacho, G., Becerra Bernal, E., & Gómez Aguilar, J. R. (1993). Diagnóstico nutricional del mango en San Blas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 16, 190-202.

Salazar-García, S., & Lazcano-Ferrat, I. (1999). Diagnóstico nutricional del aguacate ‘Hass’ bajo condiciones de temporal. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 173-184. http://avocadosource.com/WAC4/WAC4_p173.pdf

Salazar-García, S., & Lazcano-Ferrat, I. (2001). Identifying fruit mineral removal differences in four avocado cultivars. *Better Crops International*, 15(1), 28-31. [http://www.ipni.net/publication/bci.nsf/0/9FBCC1516904582285257BBA0068AC11/\\$FILE/Better%20Crops%20International%202001-1%20p28.pdf](http://www.ipni.net/publication/bci.nsf/0/9FBCC1516904582285257BBA0068AC11/$FILE/Better%20Crops%20International%202001-1%20p28.pdf)

Salazar-García, S., & Lazcano-Ferrat, I. (2003). La fertilización en “sitio específico” incrementa los rendimientos y el tamaño de la fruta del aguacate en México. En *Actas del V Congreso Mundial del Aguacate* (pp. 373-379). https://www.avocadosource.com/WAC5/Papers/WAC5_p373.pdf

Salazar-García, S., Lord, E. M., & Lovatt, C. J. (1998). Inflorescence and flower development of the ‘Hass’ avocado (*Persea americana* Mill.) during “on” and “off” crop years. *Journal of the American*

Society for Horticultural Science, 123(4), 537-544. https://www.academia.edu/22943934/Inflorescence_and_Flower_Development_of_the_Hass_Avocado_Persea_americana_Mill_during_On_and_Off_Crop_Years

Salazar-García, S., & Lovatt, C. J. (2002). Flowering of avocado (*Persea americana* Mill.): II. Manipulation with GA₃. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 8(1), 77-82. http://www.avocadosource.com/papers/research_articles/01026-7.pdf

Salazar-García, S., Medina-Carrillo, R. E., & Álvarez-Bravo, A. (2016). Irrigation and solar radiation influence on content of phytochemicals in peel of 'Hass' avocado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(13), 2.565-2.575. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342016000902565&script=sci_abstract&tlng=en

Salvo, J. (2017). Fertilización en huertos de paltos. En A. Torres (Ed.), *Manual del cultivo del palto*. Boletín INIA (378), 11-23.

Sánchez Espinosa, J. A., & Rubiano Sanabria, Y. (2015). Procesos específicos de formación en andisoles, alfisoles y ultisoles en Colombia. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 12(2), 85-97. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372015000300008

Santana Peña, L., & Peña Peña, E. (2010). Obtención de modelos para la determinación de la evapotranspiración de referencia en condiciones de clima subhúmedo seco en Las Tunas, Cuba. *Idesia (Arica)*, 28(1), 55-59. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292010000100008>

Sastre-Decasa, A., Flores-Trejo, A., Almaguer-Vargas, G., Hernández, J., & Aguilar-Hernández, M. (2018). Study soil analysis in Alamo, Temapache and Veracruz, to generate doses of fertilization

in orange. *Agroindustrial Science*, 8(2), 89-94. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6817631>

Saucedo-Hernández, L., Martínez-Damián, M. T., Colinas-León, M. T., Barrientos-Priego, A. F., & Aguilar-Melchor, J. J. (2005). Aplicaciones foliares de nitrato de calcio en la maduración y daños por frío en aguacate 'Fuerte'. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(1), 149-157. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60912502022>

Scholefield, P. B., Sedgley, M., & Alexander, D. M. (1985). Carbohydrate cycling in relation to shoot growth, floral initiation and development and yield in the avocado. *Scientia Horticulturae*, 25(2), 99-110. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(85\)90081-0](https://doi.org/10.1016/0304-4238(85)90081-0)

Schroeder, C. A. (1953). Growth and development of the Fuerte avocado fruit. En *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* (vol. 61, pp. 103-109). http://www.avocadosource.com/Journals/ASHS/ashs_1953_61_pg_103-109.pdf

Schuch, U. K., Scora, R. W., Nothnagel, E. A., & Campbell, S. D. (1992). Properties of *Persea indica*, an ornamental for Southern California. En C. J. Lovatt, P. A. Holthe, & M. Lu (Eds.), *Proceedings of II World Avocado Congress* (pp. 191-198). University of California. http://www.avocadosource.com/temp/old%20wac%20ii/wac2_p191.htm

Scora, R. W., Wolstenholme, B. N., & Lavi, U. (2002). Taxonomy and botany. En B. Schaffer, B. N. Wolstenholme, & A. W. Whiley (Eds.), *The avocado: Botany, production and uses* (pp. 25-38). CABI. <https://doi.org/10.1079/9780851993577.0015>

Sedgley, M. (1987). Flowering, pollination and fruit-set of avocado. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 10, 42-43. https://www.avocadosource.com/WAC1/WAC1_p042.pdf

- Sedgley, M., & Annells, C. M. (1981). Flowering and fruit-set response to temperature in the avocado cultivar 'Hass'. *Scientia Horticulturae*, 14(1), 27-33. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(81\)90075-3](https://doi.org/10.1016/0304-4238(81)90075-3)
- Serna, S., Montoya, B., & Osorio, W. (2012). Monitoreo del pH y fósforo soluble en la rizosfera de árboles de aguacate en el norte y oriente Antioqueño. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 186-190. https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH%20y%20P%20soluble%20rizosfera%20aguacate_0.pdf
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. *Boletín de Suelos de la FAO*, (79). <https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s.pdf>
- Shepherd, J. S., & Bender, G. S. (2013). History of avocado industry in California. En G. S. Bender (Ed.), *Avocado production in California: A cultural handbook for growers* (pp. 1-17). University of California Cooperative Extension.
- Shoji, S., & Takahashi, T. (2002). Environmental and agricultural significance of volcanic ash soils. *Global Journal of Environmental Research*, 6(2), 113-135.
- Silber, A., Naor, A., Cohen, H., Bar-Noy, Y., Yechieli, N., Levi, M., Noy, M., Peres, M., Duari, D., Narkis, K., & Assouline, S. (2019). Irrigation of 'Hass' avocado: Effects of constant vs. temporary water stress. *Irrigation Science*, 37(4), 451-460. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00622-w>
- Smith, M. (2000). *Optimizing crop production and crop water management under reduced water supply* [presentación en congreso]. 6th International Micro-Irrigation Congress, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), Cape Town, Sudáfrica.

- Southwick, S. M., & Davenport, T. L. (1986). Characterization of water stress and low temperature effects on flower induction in citrus. *Plant Physiology*, 81(1), 26-29. <https://doi.org/10.1104/pp.81.1.26>
- Srivastava, O. P., & Sethi, B. C. (1981). Contribution of farm yard manure on the build up of available zinc in an aridisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 12(4), 355-361. <https://doi.org/10.1080/00103628109367156>
- Syers, J. K., Johnston, A. E., & Curtin, D. (2008). *Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/3/a1595e/a1595e00.pdf>
- Takhtajan, A. (2009). *Flowering plants* (2.^a ed.). Springer.
- Thorp, T. G., Hutching, D., Lowe, T., & Marsh, K. B. (1997). Survey of fruit mineral concentrations and postharvest quality of New Zealand-grown 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 25(3), 251-260. http://www.avocadosource.com/Journals/NZJCHS/nzjchs_1997_25_251-260_thorp.pdf
- Tomassini-Vidal, L. R., & Pino-Huasacca, N. M. (2022). Macro-nutrient dynamics in avocado (*Persea americana* Mill.) 'Hass' under the central Peruvian coast conditions. *Peruvian Journal of Agronomy*, 6(1), 53-77. <https://doi.org/10.21704/pja.v6i1.1758>
- Turc, L. (1961). Évolution des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour. *Annuaire Agronomie*, 12(1), 13-49. <https://www.scirp.org/%28S%28351jmbntvnsjt1aadkposzje%29%29/reference/referencespapers.aspx?referenceid=3030926>

- Uchida, R. (2000). Essential nutrients for plant growth: Nutrient functions and deficiency symptoms. En J. A. Silva, & R. S. Uchida (Eds.), *Plant nutrient management in Hawaii's soils* (pp. 31-55). University of Hawaii at Manoa. <https://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/pnm3.pdf>
- Uchida, R., & Hue, V. N. (2000). Soil acidity and liming. En J. A. Silva, & R. S. Uchida (Eds.), *Plant nutrient management in Hawaii's soils* (pp. 101-111). University of Hawaii at Manoa. https://www.researchgate.net/publication/249010679_Soil_acidity_and_liming
- Uribe, E., Mendieta, J., Rueda, H., & Carriazo, F. (2003). *Introducción a la valoración ambiental, y estudios de caso*. Universidad de los Andes.
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27(2), 205-212. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>
- Valmayor, R. V. (1964). *Cellular development of the avocado from blossom to maturity* [tesis de doctorado, University of Florida]. <https://ufdcimages.uflib.ufl.edu/AA/00/04/71/36/00001/cellulardevelopm00valm.pdf>
- Vásquez, K., Díaz, O., Escobedo, J., & Rodríguez, A. (2015). Estudio preliminar del efecto de diferentes volúmenes de riego sobre el crecimiento y el rendimiento del palto var. Hass, bajo condiciones salinas, Perú. En *Actas del VIII Congreso Mundial de la Palta 2015* (pp. 403-408). https://www.avocadosource.com/WAC8/Section_04/VasquezK2015.pdf
- Verheij, E. W. M., & Coronel, R. E. (1991). *Edible fruits and nuts*. Pudoc.

Wallihan, E. F., Embleton, T. W., & Printy, W. (1958). Zinc deficiency in avocado. *California Agriculture*, 12(6), 4-5.

Water Science School. (2019, 12 de octubre). USGS. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish>

Whiley, A. (1990). *Interpretación de la fenología y fisiología del palto para obtener mayores producciones*. http://www.avocadosource.com/Journals/civdmchile_1990/civdmchile_1990_pg_06.pdf

Whiley, A. W., Chapman, K. R., & Saranah, J. B. (1988). Water loss by floral structures of avocado (*Persea americana* cv. Fuerte) during flowering. *Australian Journal of Agricultural Research*, 39(3), 457-467. <https://doi.org/10.1071/AR9880457>

Whiley, A. W., Smith, I. E., Wolstenholme, B. N., & Saranah, J. B. (1996). Boron nutrition of avocados. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 19, 1-7. http://www.avocado-source.com/journals/saaga/saaga_1996/saaga_1996_pg_1-7.pdf

White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487-511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>

Wilkie, J. D., Sedgley, M., & Olesen, T. (2008). Regulation of floral initiation in horticultural trees. *Journal of Experimental Botany*, 59(12), 3.215-3.228. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern188>

Williams, J. H., & Reese, J. B. (2019). Evolution of development of pollen performance. En U. Grossniklaus (Ed.), *Current topics in developmental biology* (vol. 131, pp. 299-336). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2018.11.012>

Willingham, S. L., Pegg, K. G., Anderson, J. M., Cooke, A. W., Dean, J. R., Giblin, F. R., & Coates, L. M. (2006). Effects of rootstock

- and nitrogen fertiliser on postharvest anthracnose development in Hass avocado. *Australasian Plant Pathology*, 35(6), 619-629. <https://doi.org/10.1071/AP06062>
- Witney, G. W., Hofman, P. J., & Wolstenholme, B. N. (1990). Mineral distribution in avocado trees with reference to calcium cycling and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 44(3-4), 279-291. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(90\)90128-2](https://doi.org/10.1016/0304-4238(90)90128-2)
- Wolstenholme, B. N. (1986). Energy costs of fruiting as a yield-limiting factor with special reference to avocado. *Acta Horticulturae*, 175, 121-126. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1986.175.18>
- Wolstenholme, B. N., & Whiley, A. W. (1990). Prospects for vegetative-reproductive growth manipulation in avocado trees. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 13, 21-24. http://www.avocadosource.com/Journals/SAAGA/SAAGA_1990/SAAGA_1990_PG_21-24.pdf
- Wolters, W., & Bos, M. G. (1990). Irrigation performance assessment and irrigation efficiency. En International Institute for Land Reclamation and Improvement, *Annual report* (pp. 25-37).
- Zekri, M., & Obreza, T. (2013). Calcium (Ca) and sulfur (S) for citrus trees. *Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida*. <http://edis.ifas.ufl.edu/ss584>
- Zilkah, S., Klein, I., Feigenbaum, S., & Weinbaum, S. A. (1987). Translocation of foliar-applied urea 15N to reproductive and vegetative sinks of avocado and its effect on initial fruit set. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 112(6), 1.061-1.065. https://www.avocadosource.com/Journals/ASHS/ASHS_1987_112_PG_1061-1065.pdf





Los autores

Alexander Rebolledo Roa

arebolledor@agrosavia.co

<https://orcid.org/0009-0006-6484-6699>

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, y Ph.D. en Biología Vegetal con énfasis en fisiología vegetal de la Universidad Politécnica de Valencia (España). Sus trabajos de investigación profundizan en el estudio de los factores externos (edafoclimáticos) e internos (relación fuente-sumidero, contenido mineral y hormonal endógeno, relaciones hídricas, etc.) que determinan el comportamiento productivo de especies frutales (cítricos, aguacate y pitaya) en diferentes zonas productoras del país. Ha sido profesor del área de fisiología vegetal de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Actualmente se desempeña como investigador Ph.D. en AGROSAVIA.

Diana Yaritza Dorado Guerra

diadogue@doctor.upv.es

<https://orcid.org/0000-0001-8662-0160>

Ingeniera agrícola de la Universidad del Valle y magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Cuenta con experiencia en investigación en la relación suelo-agua-planta-atmósfera, en manejo del recurso hídrico, en valoración química y física de suelos y en fertilización de frutales y cultivos transitorios (maracuyá, cítricos, melón, aguacate, praderas y papa) en las regiones Pacífica y Andina de Colombia. Actualmente es candidata a doctora en la Universidad Politécnica de Valencia (España).

Luis Carlos Grajales Guzmán

lgrajales@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0002-8762-4806>

Ingeniero agrícola con maestría en Ingeniería Ambiental, con línea de investigación en monitoreo, modelación y gestión de recursos naturales. Cuenta con experiencia en formulación, planeación operativa y administración técnica-financiera de proyectos de investigación agrícola, con enfoque en el manejo sostenible de los recursos naturales agua y suelo, principalmente en diseño e implementación de sistemas de riego, evaluación de indicadores de gestión del recurso hídrico y manejo eficiente del agua en sistemas productivos agrícolas, diseño y evaluación de programas de fertilización y estimación de requerimientos nutricionales de plantas. Actualmente participa en proyectos de investigación en valoración biofísica de tierras para la producción de aguacate, manejo de suelos y recurso hídrico en guayaba y establecimiento de esquemas de producción de semilla de calidad en plátano y guayaba.

Ana María Trejos Arana

atrejos@agrosavia.co

[https://orcid.org/ 0000-0002-1793-5668](https://orcid.org/0000-0002-1793-5668)

Ingeniera agrícola del convenio entre la Universidad del Valle y la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, y estudiante de la Maestría en Ingeniería Ambiental, con énfasis en monitoreo, modelación y gestión de recursos naturales, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Desde 2011 se desempeña como profesional de apoyo a la investigación para AGROSAVIA, en el Centro de Investigación Palmira, en el área de manejo y conservación de suelos y aguas, con enfoque en diseño e implementación de sistemas de riego en cultivos y ambientes protegidos, evaluación de indicadores de gestión del recurso hídrico y manejo eficiente del agua en cultivos frutales (guayaba, piña, cítricos y aguacate) y perennes (cacao).

Adriana Katherine Rodríguez-León

arodriguezl@agrosavia.co

Ingeniera agrónoma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, con experiencia en las áreas de ecofisiología y fitopatología en cultivos de palma de aceite, pasifloras, aguacate Hass y cultivos de clima frío moderado. Ha estado vinculada en proyectos de investigación en Cenipalma, la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) y AGROSAVIA, en los centros de investigación La Selva y Palmira.

