



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.

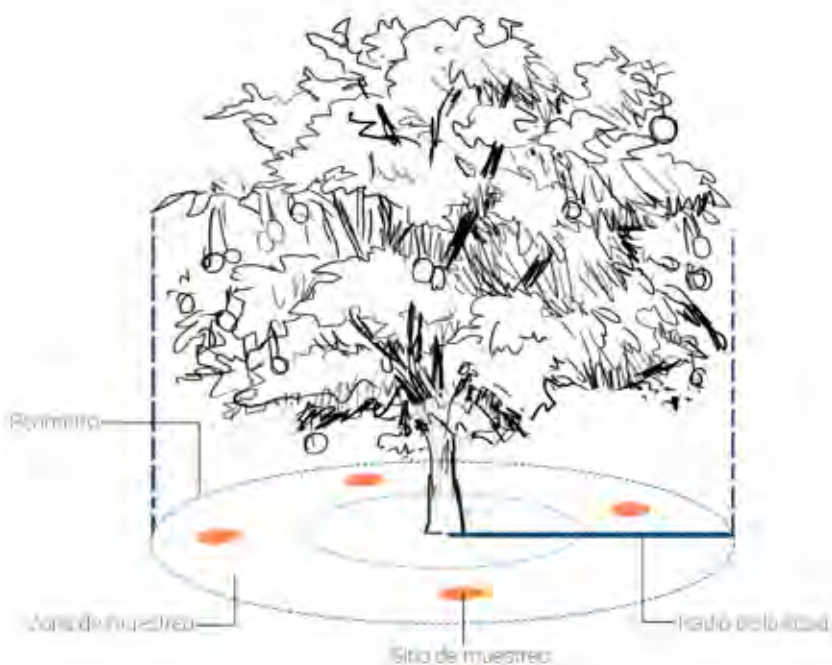
Aspectos generales

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.



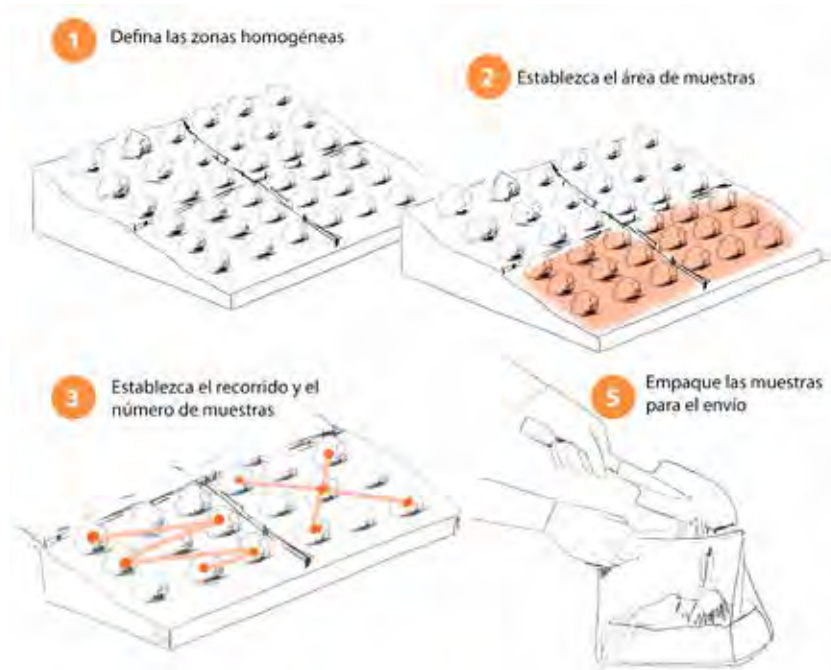
Fuente: Elaboración propia con base en Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica, 2013).

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 aérea, 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:

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

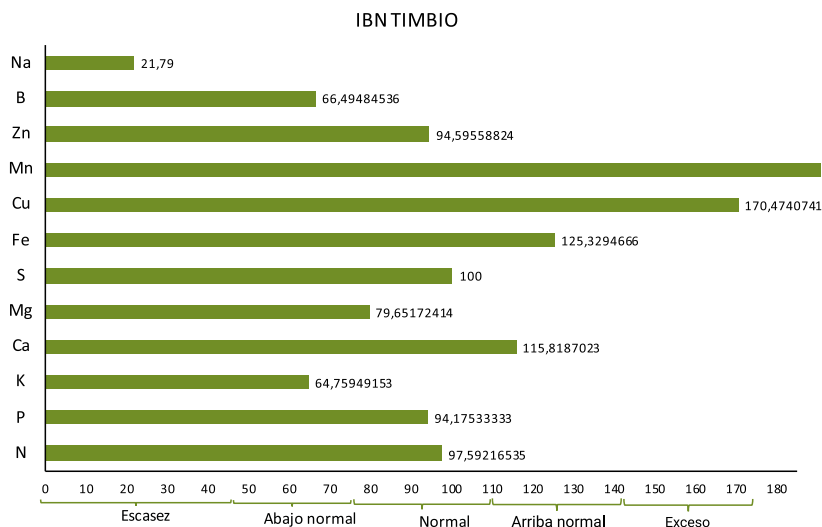
$$I = (119,08 - 100) * \left(\frac{17,1}{100}\right) = 19,08 * 0,171 = 3,263$$

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

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	Revisar relaciones entre nutrientes, fuentes de fertilizantes y pH del suelo, que pueden estar afectando su disponibilidad y absorción por la planta.
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

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 calcular 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

$x = 9,06$ 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:

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

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

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

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:

Si 0,02 meq de Ca – 100 kg suelo

X – 2.340.000 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.

Si 468 kg de Ca/ha – 1 meq de Ca

X – 2,74 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:

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

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 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:

Si 1.000.000 kg de suelo – 1,53 kg de Mn

2.340.000 kg de suelo/ha – X

X = 3,58 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 (K 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:

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

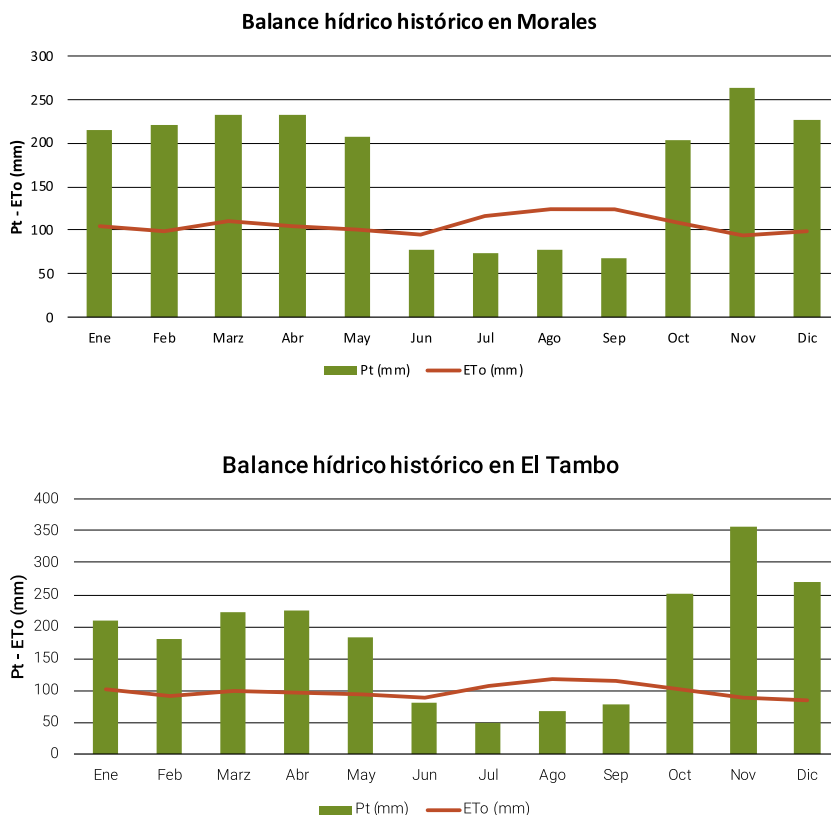
Cabe mencionar que los valores obtenidos para cada fertilizante representan la cantidad requerida por hectárea. Al dividirse por el número de plantas, se obtendría la cantidad requerida por planta. El procedimiento descrito aquí representa una guía para orientar los cálculos de los fertilizantes por 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.

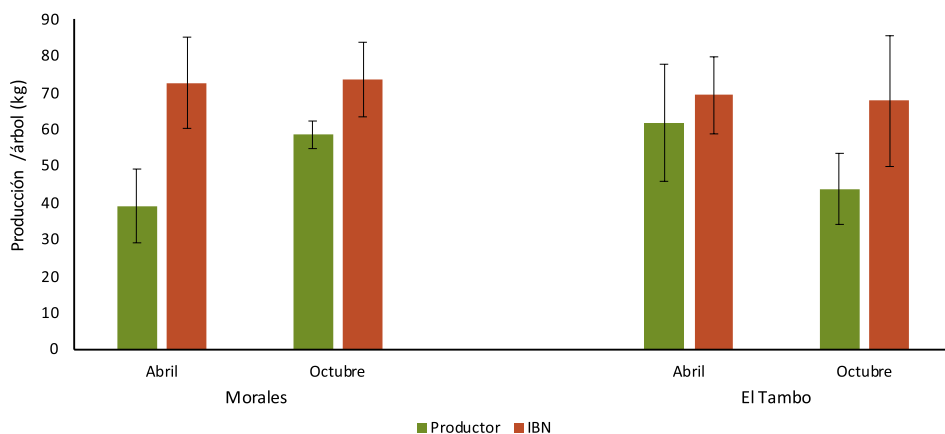
Figura 19. Niveles de concentración foliar basados en el índice de balance de nutrientes (IBN) propuesto por Kenworthy (1973). a y c. Manejo del productor; b y d. Manejo según el IBN.



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 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.

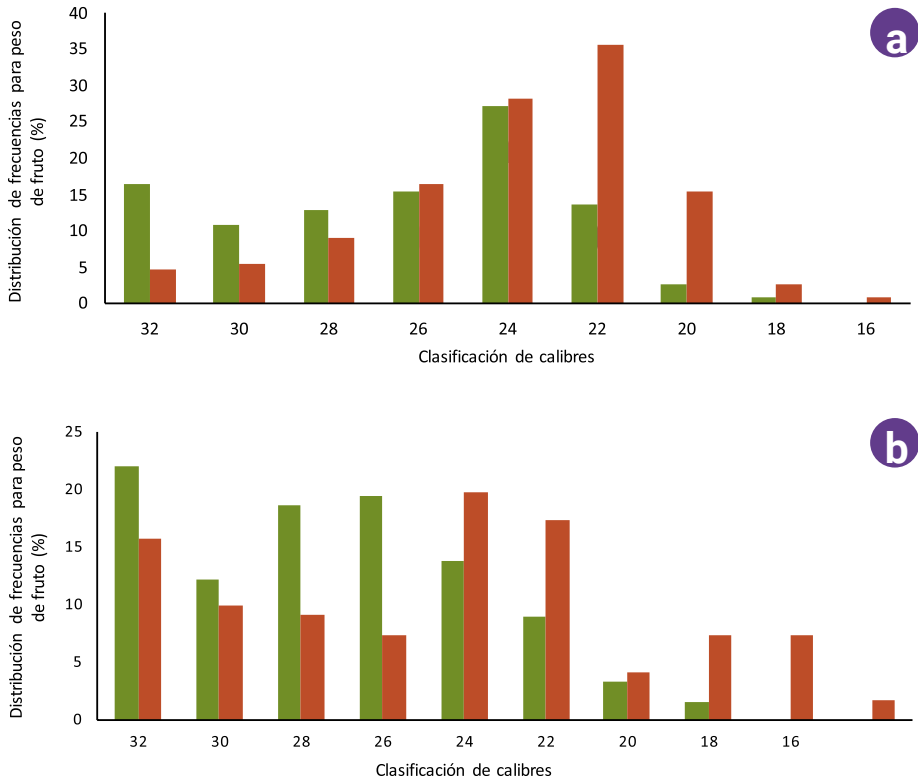
Figura 20. Producción por planta con el plan de manejo de la fertilización basado en el índice de balance de nutrientes (ibn) y con el manejo del productor, bajo las condiciones de Morales y el Tambo (Cauca), para aguacate Hass.



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 obtenidos 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.