



CONCEPTOS DE FERTILIZACIÓN PARA EL CULTIVO **DE AGUACATE**

VERSIÓN 2

Producto derivado del Proyecto de Innovación
“Determinación de parámetros agronómicos para aguacate CV “Hass”
mediante el uso de tecnologías digitales en el Oriente Antioqueño”.

Proyecto Financiado por el Sistema de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e Innovación – SENNOVA del SENA.

2020

Catalogación en la publicación. SENA Sistema de Bibliotecas

Conceptos de fertilización para el cultivo de aguacate / Pedro Andrés Rengifo Mejía [y otros 3]. -- Versión 2. -- Rionegro : Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Centro de la Innovación, la Agroindustria y la Aviación , 2020.

1 recurso en línea (69 páginas : PDF).

Referencias bibliográficas: página 65.

Contenido: Fertilización para el cultivo del aguacate "hass" -- Interpretación de análisis de suelos, foliar en aguacate -- El muestreo de suelos -- El perfil del suelo y su importancia en la evaluación de los suelos para aguacate -- El Plan de Fertilización para el Cultivo de Aguacate 'Hass' -- Cálculos a partir de los datos registrados en un análisis de suelos -- Análisis de fertilidad de suelos -- Análisis de laboratorio de suelos.

ISBN: 978-958-15-0612-5.

1. Aguacate--Abonos y fertilizantes 2. Química de suelos--Análisis 3. Fertilidad del suelo I. Rengifo Mejía, Pedro Andrés II. Londoño Zuluaga, José David III. Díez Moreno, Deisy IV. Vásquez Yepes, Gloria Elena.

CDD: 634.653



Carlos Mario Estrada Molina

Director General

Juan Felipe Rendón Ochoa

Dirección Regional Antioquia

Jorge Antonio Londoño

Subdirector Centro de la Innovación la Agroindustria y la Aviación

Conceptos de fertilización para el cultivo de aguacate versión 2

Autores

Pedro Andrés Rengifo Mejía

Jose David Londoño Zuluaga

Deisy Díez Moreno

Gloria Elena Vásquez Yepes

ISBN: 978-958-15-0612-5.

© Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA

Diseño y diagramación:

Divergraficas S.A.S.

Hecho el depósito que exige la ley

Este libro, salvo las excepciones previstas por la Ley, no puede ser reproducido por ningún medio sin previa autorización escrita del autor.

Los textos publicados son de propiedad intelectual de los Autores y pueden utilizarse con propósitos educativos y académicos, siempre que se cite al autor y la publicación. Las opiniones aquí contenidas son de responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente el pensamiento del editor ni del SENA.

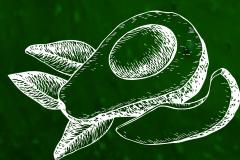
Rionegro, Colombia. Noviembre, 2020





CAPÍTULO I

Fertilización para el cultivo del aguacate 'Hass'





Interpretación de Análisis de Suelos-Foliar en Aguacate

Las buenas prácticas agrícolas incluyen dentro del manejo de los cultivos y con referencia al aguacate, la implementación de planes de fertilización acordes a los requerimientos de los árboles y una adecuada nutrición, no cometiendo aplicaciones excesivas de fertilizantes que contaminen los cuerpos de agua. En este capítulo se observarán las metodologías para el correcto uso de un análisis químico de suelos y cómo conjugarlo con los análisis foliares, para emplearlos en la elaboración del plan de fertilización del capítulo siguiente.

El conocimiento de la forma como las plantas realizan su nutrición y el planificar ésta en el desarrollo de una explotación agrícola, bien sea desde el punto de vista orgánico, químico o de ambos, parte del establecimiento inicial de como se encuentra el suelo y de las necesidades del cultivo, en este caso trabajaremos con el aguacate ‘Hass’, en un estudio de caso.

En la evaluación de la fertilidad del suelo el método más práctico es el del análisis químico del suelo, el cual es una herramienta importante para identificar, no solamente la dosis del fertilizante, sino el plan de fertilización más apropiado para cada caso. La identificación del nivel de fertilización como resultado del diagnóstico de la fertilidad se logra mediante la interpretación del análisis, la cual debe ser realizada por un Ingeniero Agrónomo capacitado y con base en los criterios desarrollados para cada cultivo por los programas de investigación (Barrera et al., 2010).

El análisis foliar (cada especie vegetal tiene su metodología para la toma de las muestras de hojas) sigue el mismo principio, donde se compara la concentración de éste a nivel foliar y se confronta con rangos óptimos de la presencia de cada elemento en la planta.

Se debe recordar que adicional a la información adquirida como un análisis de suelos y foliar, se debe tener conocimiento del suelo y de las plantas en el campo, su variabilidad, la realización de calicatas para evaluar el suelo en su

comportamiento espacial, la anotación de la productividad por hectárea, para con estos elementos y otros, hacer una correcta valoración de las necesidades nutricionales del cultivo, según Ibañez (2011) “el suelo es un recurso natural esencial para el desarrollo de cualquier civilización. Sin embargo, como todos los demás, resulta ser un ente complejo, es decir multidimensional”.

En la actualidad, los participantes en la cadena productiva de diferentes cultivos emplean muy poco el análisis de suelos y en menor medida el foliar dentro de las recomendaciones de fertilización para sus cultivos.

La norma GlobalGAP (y normas internas en cada país) así lo establece en sus parámetros de evaluación, si el predio de carácter agrícola desea su implementación, como lo podemos ver a continuación:

¿Se elabora el compost con los residuos orgánicos y se reciclan los mismos? (Toda granja 6.2.4)... ¿Cuenta el productor con un plan de gestión del suelo? (Cultivos Base 3 y 4)... y al respecto amplía: El productor deberá demostrar que ha considerado las necesidades nutricionales del cultivo y necesidad de mantener la fertilidad del suelo. Se deberá disponer de los registros de los análisis y/o literatura específica del cultivo, como evidencia. (Nota: también aspectos sobre las competencias, registros, aplicaciones y riesgos de los fertilizantes orgánicos son establecidas en los numerales de cultivos base 3, 4 y frutas-hortalizas 4.2.1) (GlobalGAP Ver. 5.2, 2019).

El presente capítulo aborda el muestreo de suelos, la importancia de la calicata en la evaluación de los suelos y la interpretación del análisis de suelos y foliar. Nota: aspectos sobre el muestreo foliar para el aguacate, se encuentran en la cartilla uno de la presente serie.

Actualmente se establece el concepto de las 4R's, por sus palabras en inglés right source, right rate, right time, right place y que significan establecer una fuente correcta de fertilizante, dosis correcta, tiempo y lugar correctos, la investigación ha establecido esto como principios para la sustentabilidad de los agroecosistemas (Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura, s.f.), de allí la importancia de la integración del análisis de suelos y foliar en los planes de fertilización.





El muestreo de suelos

El estudio del suelo parte de un muestreo, que debe ser representativo del área muestreada y debe facilitar la interpretación de los resultados. En esta acción se presentan muchos errores que llevan a un mal diagnóstico de la fertilidad del suelo, además en las determinaciones químicas cuando la muestra se lleva a un laboratorio, se usa una cantidad de suelo muy pequeña comparada con el peso total del área muestreada, de ahí la importancia de obtener muestras verdaderamente relevantes.

Durán (s.f.) establece los siguientes pasos preliminares para la toma de la muestra de suelo:

- Seleccionar los sitios de muestreo considerando la razón del análisis de suelo.
- Identificar áreas con características semejantes en cuanto a color del suelo, desarrollo de los árboles, pendientes, humedad, tipo y desarrollo de las malas hierbas, etc.

En las figuras 1 y 2 se observan esos primeros pasos.



Figura 1. Identificación de zonas a muestrear en un lote aguacate.

Fuente: Foto propia.

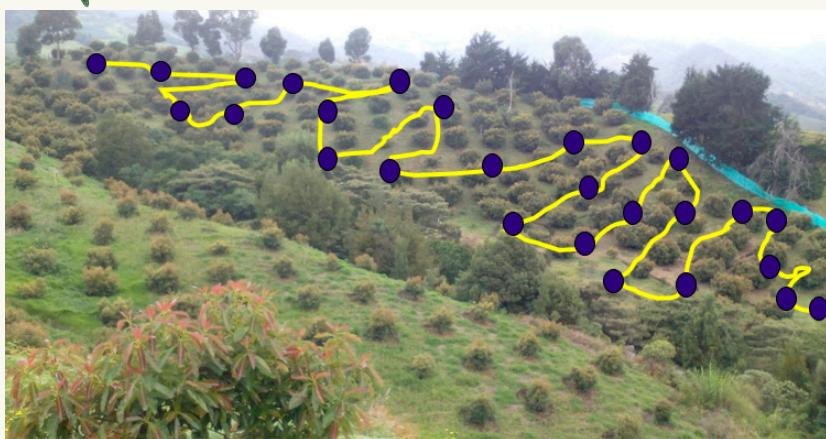


Figura 2. Toma de submuestras en zigzag.

Fuente: Foto propia.

Tome entre 20-30 submuestras siguiendo las indicaciones técnicas generales, como el uso de herramientas limpias, no fumar y no tomar las submuestras cerca a linderos, carreteras y sitios en el campo muy diferentes a la zona del cultivo. En la figura 3 se observan los pasos en el procedimiento:

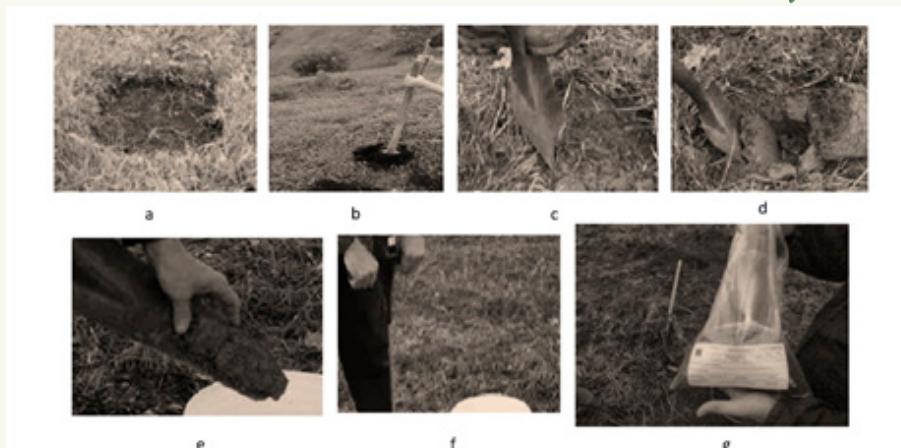


Figura 3. a) Raspar aproximadamente 3 cm de la superficie del terreno en cada punto con el fin de limpiar y eliminar los residuos frescos de materia orgánica, arvesnes, residuos sólidos, polvo de la carretera u otros contaminantes artificiales. b), c) y d) con pala (o barreno) cavar un hueco en forma de “V” del ancho de esta y la profundidad requerida según el cultivo. e) y f) depositar cada muestra de suelo en un balde plástico limpio de impurezas como fertilizantes, cales, estiércoles, entre otros. Repetir esta operación para cada uno de los puntos del zigzag y mezclar bien el suelo extraído. Si la cantidad de muestra tomada es demasiado grande reduzca la porción hasta obtener un (1) Kilogramo de muestra. g) depositar la muestra en doble bolsa plástica, colocar la identificación entre bolsa y bolsa y sellarla de manera segura, diligenciando correctamente el formato de solicitud de análisis por muestra.

Fuente: Elaboración propia.

La herramienta más apropiada para el muestreo es el barreno, con él puede mantenerse una cantidad y profundidad de muestra por punto bastante homogénea. Sin embargo, si no se cuenta con un barreno, el muestreo puede hacerse con una pala o palín y un balde limpio y procurando tomar una cantidad similar de suelo en cada punto y a la misma profundidad (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, s.f.).

Para el aguacate entonces se hace necesario suministrar en la etiqueta, la mayor información posible sobre el cultivo, bien sea si se va a establecer o si ya está establecido, además de la información de ubicación del predio

debe ir información como: altura sobre el nivel del mar, profundidad de la muestra, superficie aproximada del lote, el drenaje interno (bueno, regular, malo), topografía (plana, ondulada, pendiente), enmiendas (cal) agregadas en el último año (dato en t.ha⁻¹), último cultivo o cultivo actual, rendimiento de la última cosecha y fertilizantes agregados al último cultivo.

En la figura 4 se observa la zona de muestreo para el aguacate.



Figura 4. Zona de toma de muestras para análisis de suelos en aguacate.

Fuente: Elaboración propia.

Es importante en la toma de estas porciones enviar una muestra de la composición de un buen número de submuestras, no se pueden enviar cantidades muy pequeñas de toda la masa del suelo o que en la selección, las muestras no representen al suelo del sitio, así según Tasistro (s.f.), la pauta general para el número de muestras a tomar es de 20 a 30 submuestras por unidad de muestreo en áreas menores a 8 hectáreas y mayor a 30 submuestras por unidad de muestreo en áreas mayores a 8 hectáreas.

En la ilustración 1, se puede observar el porque la toma de muestras del análisis de suelo para aguacate se debe realizar a los 30 cm, ya que en esa franja del perfil del suelo las plantas tienen el mayor porcentaje de sus raíces.

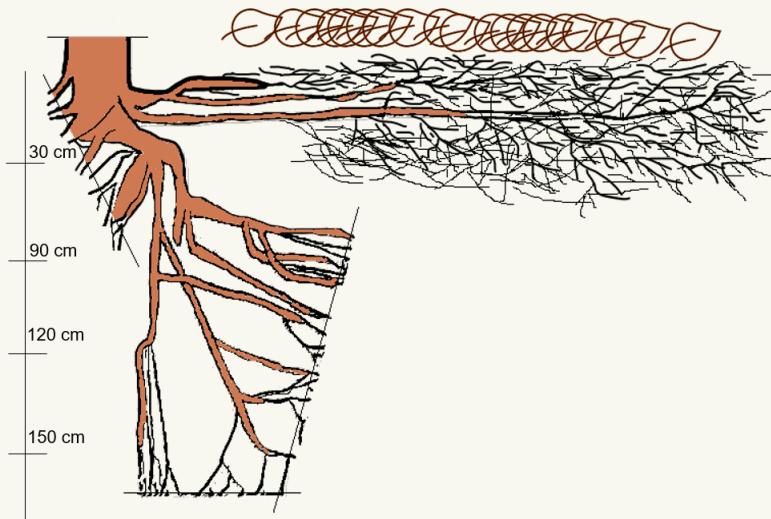


Ilustración 1. Distribución espacial de las raíces en el aguacate. Sistema de raíces de un árbol de aguacate Fuerte de 8 años.
Adaptado de: Blakey y Wolstenholme (2014).

El perfil del suelo y su importancia en la evaluación de los suelos para aguacate

El perfil del suelo o corte vertical permite describir y analizar las propiedades físicas, químicas y biológicas de las diferentes capas u horizontes de este, mediante una calicata (palabra del latín, chalare “penetrar”, “atravesar” y del griego, cata “hacia abajo” (Gardi et al., 2014), en agricultura y antes de establecer el cultivo, debe ser una práctica necesaria, con el fin de conocer y obtener información valiosa, antes de la siembra de un cultivo.

El estudio de estas propiedades en el aguacate es importante en la medida que este, por ejemplo, presenta un sistema radicular superficial y puede alcanzar una profundidad de hasta 1,5 m por tanto se debe evaluar que no se presenten formaciones de costras por altos contenidos de carbonatos, que impidan el crecimiento de las raíces, además el aguacate, es susceptible al encharcamiento y al ataque de organismos fitopatógenos. La principal limitante del suelo para el aguacate es el predominio de arcillas y drenaje deficiente, por su sensibilidad a la asfixia radicular (Figura 5).

Castro et al. (2007) identificaron la especialización de las raíces por su diámetro y grado de lignificación. Las raíces finas estarían más relacionadas con la absorción y las más gruesas estarían más relacionadas con el transporte.



Figura 5. Calicata para el estudio del perfil del suelo en predios agrícolas.

Fuente: Foto propia.

Recomiendan Salazar-García y Cortés-Flores (1986), para la toma de muestras el rango de 0 a 60 cm donde se encuentran la mayoría de las raíces finas (Figura 6).



Figura 6. Raíces de aguacate ‘Hass’ en los primeros 60 cm.

Fuente: Foto propia.

En la tabla 1, se presentan algunos parámetros sobre propiedades del suelo, enfocados al cultivo de aguacate ‘Hass’.

Tabla 1. Oferta suelo en la producción de aguacate ‘Hass’

| Parámetro | Unidad |
|--------------------------------------------|--------------------------|
| Pendiente | < 30 % |
| Profundidad | > 1 m |
| Densidad aparente | 1,2 g.cm ⁻³ |
| Porosidad | 45-50 % |
| Textura | Franco - Franco arenosa |
| Estructura | Granular |
| Conductividad hidráulica (medida en campo) | 10 cm.h ⁻¹ |
| Drenaje | Bueno |
| pH | 5,5-6,5 |
| Conductividad eléctrica | < 1,0 dS.m ⁻¹ |
| Materia orgánica | 6-8 % |

Fuente: Elaboración propia.

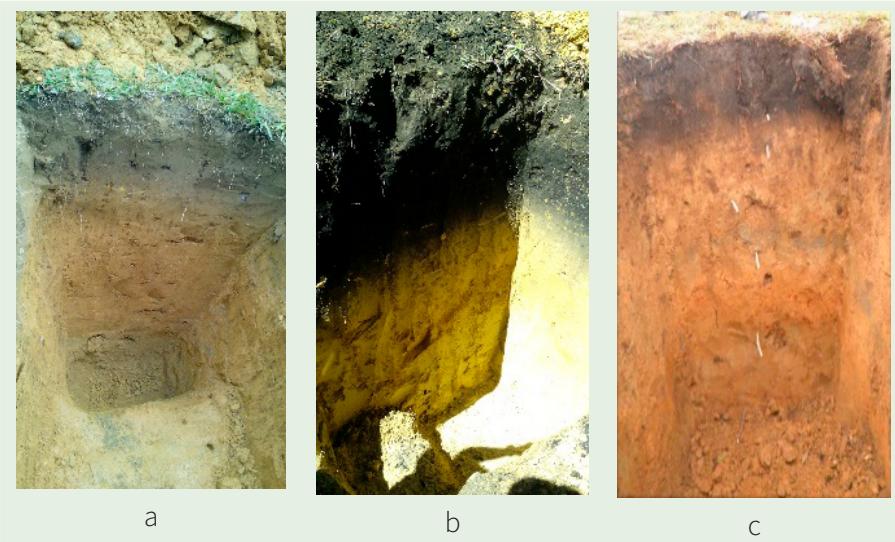


Descripción del perfil del suelo

Campos (2012) establece un procedimiento para describir perfiles, que puede emplearse para determinar el nivel de productividad de un suelo:

- 1.** Ubique un perfil seleccionado
- 2.** Encima del sitio seleccionado determine en un área de una hectárea: rocosidad, pedregosidad, pendiente, relieve, vegetación, profundidad efectiva.
- 3.** Frente al perfil proceda a diferenciar horizonte, determinando color y textura cada 5 cm.
- 4.** Mida cada horizonte.
- 5.** Determine límites entre horizontes.
- 6.** Defina el color de cada horizonte utilizando la tabla de colores de Munsell.
- 7.** Determine la profundidad efectiva.
- 8.** Determine textura organolépticamente.
- 9.** Determine estructura por tipo, clase y grado.
- 10.** Determine consistencia en seco, húmedo y mojado.
- 11.** Determine el pH (peachímetro de campo)
- 12.** Tome muestras de la capa arable (20 cm superiores) para determinar en el laboratorio materia orgánica y pH con el potenciómetro.

En las figuras 7, 8 y 9; se observan diferentes perfiles de suelos de municipios ubicados en el oriente Antioqueño, Colombia.



Figuras 7, 8 y 9. Perfiles de suelos en a) municipio de Sonsón, b) municipio de Rionegro y c) municipio de Abejorral.

Fuente: Fotos propias.

Interpretación del análisis de suelos con enfoque hacia el aguacate 'Hass'

Si bien la interpretación que se realice de un análisis de suelos, en su mayoría se orienta a contrastar esta desde el punto de vista de los requerimientos generales o ideales de un suelo para los cultivos, es posteriormente, donde se ajusta esto a las necesidades o requerimientos de las plantas.

Por tanto, se observarán aquí primero, en un estudio de caso para un suelo real y de forma “general”, como se puede encontrar el suelo para nutrir los árboles de aguacate, este paso a paso se realizará partiendo de un suelo con un área de una hectárea, en aguacate ‘Hass’ establecido de 7 años a 6 metros

entre calles y entre plantas, en un arreglo de siembra en triángulo o tresbolillo. Segundo, se realizará la interpretación de su correspondiente análisis foliar.

Entonces tenemos los resultados de un análisis de suelos fisicoquímico completo, provisto por un laboratorio certificado (Tabla 2).

Tabla 2. Ejemplo real de un análisis fisicoquímico de suelos

| Arena (%) | Limo (%) | Arcillas (%) | Densidad aparente (g.cm ⁻³) | pH | CE (dS.m ⁻¹) | MO (%) |
|------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 58 | 30 | 12 | 0,7 | 4,75 | 0,23 | 5,28 |
| Acidez Intercambiable (me.100g ⁻¹) | Al (me.100g ⁻¹) | Ca (me.100g ⁻¹) | Mg (me.100g ⁻¹) | K (me.100g ⁻¹) | Na (me.100g ⁻¹) | CICe (me.100g ⁻¹) |
| 1,39 | 1,33 | 0,74 | 0,3 | 0,17 | 0,1 | 2,7 |
| P (ppm) | S (ppm) | Fe (ppm) | Mn (ppm) | Zn (ppm) | Cu (ppm) | B (ppm) |
| 5,55 | 10,86 | 640,93 | 5,15 | 1,63 | 2 | 0,13 |

Fuente: Análisis del autor.

La interpretación se realizará, basándose en las condiciones establecidas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Tabla 3) y las tablas 4 y 5 (Gómez, 2006 citado por Peña, 2013), esta se puede realizar con otras tablas y documentos de autores producto de la investigación, se recomienda emplear información propia de cada país.

Tabla 3. Consideraciones generales para interpretar el análisis de suelos.

| | | P | K | % MO | | | % N Total | | | CIC | Saturación de bases (SB) | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------|----------|-----------|--------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| pH 1:1 (H ₂ O) | Apreciación | ppm | | Clima | | | Clima | | | | | | | | | | | |
| | | (Bray II) | meq/100g | Frio | Medio | Cálido | Frio | Medio | Cálido | meq/100g | % | | | | | | | |
| <4,5 | Bajo | <15 | <0,2 | <5 | <3 | <2 | <0,25 | <0,15 | <0,1 | <10 | <35 | | | | | | | |
| Extremadamente ácido | Medio | 15-40 | 0,2-0,4 | 5,0-10,0 | 3,0-5,0 | 2,0-4,0 | 0,26-0,5 | 0,16-0,3 | 0,1-0,2 | 10,0-20 | 35-50 | | | | | | | |
| 4,6-5,0 | Alto | >40 | >0,4 | >10 | >5 | >4 | >0,5 | >0,3 | >0,2 | >20 | >50 | | | | | | | |
| Muy fuertemente ácido | Apreciación | Relaciones | | | | Clasificación de acuerdo con sales y sodio | | | S AL % (saturación de aluminio) | Apreciación | | | | | | | | |
| 5,1-5,5 | | Ca/Mg | Mg/K | Ca/K | (Ca+Mg)/K | | | | | | | | | | | | | |
| Fuertemente ácido | Relación ideal | 2,0-4,0 | 3 | 6 | 10 | CE mmohs/cm (dS/m) | Porcentaje Saturación Sodio | Clase | <15 | Sin problemas en general | | | | | | | | |
| 5,6-6,0 | | K deficiente | >18 | >30 | >40 | 0-2 | Inferior A 15% | Normal | | Limitante para cultivos susceptibles | | | | | | | | |
| 6,1-6,5 | | | | | | 2,0-4,0 | | Límite | 15 a 30 | Limitante para cultivos moderadamente tolerantes | | | | | | | | |
| Ligeramente ácido | Mg deficiente | >10 | <1 | | | 4,0-8,0 | | Salino 1 | | | | | | | | | | |
| 6,6-7,3 | | | | | | 8,0-16 | | Salino 2 | | | | | | | | | | |
| Neutro | Contenido óptimo | Elementos menores* (ppm) | | | | >16 | Inferior A 15% | Salino 3 | 30 a 60 | Limitante para cultivos tolerantes | | | | | | | | |
| 7,4-7,8 | | Zn | Cu | Mn | Fe | 0 a 4 | | Sódico | | | | | | | | | | |
| Ligeramente alcalino | Suelo | 3,0-6 | 1,5-3 | 15-30 | 20-30 | 4 a 8 | Superior A 15% | Sódico 1 | | | | | | | | | | |
| 7,9-8,4 | | | | | | 8 a 16 | | Sódico 2 | | | | | | | | | | |
| Medianamente alcalino | Planta | 30-100 | 5,0-25 | 30-200 | 60-500 | >16 | | Sódico 3 | >60 | Niveles tóxicos para la mayoría de cultivos | | | | | | | | |
| 8,5-9,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fuertemente alcalino | * Extractables con DTPA en suelos; digestión húmeda en tejido vegetal | | | | | | | Instituto Geográfico Agustín Codazzi | | | | | | | | | | |
| >9,0 | Boro en suelos (extractable en agua caliente): 0,6-1,0 ppm | | | | | | | Laboratorio de Suelos | | | | | | | | | | |
| Extremadamente alcalino | Boro en tejido vegetal: 30-80 ppm | | | | | | | Área de Química | | | | | | | | | | |

Nota: NC (nivel crítico): 25 ppm NO₃; 20 ppm NH₄ NC: 0,2 ppm B (fósforo de calcio); NC: 12 ppm P (Olsen modificado); NC: 20 ppm S disponible (fósforo de calcio).

Concentración normal en tejido vegetal (Handbook of Reference Methods for Plant Analysis, 1998): N (%): 2,5-4,5; P (%): 0,2-0,75; K (%): 1,5-5,5; Ca (%): 1,0-4,0;

Mg (%): 0,25-1,0; S (%): 0,25-1,0; B (ppm): 10-200; Cu (ppm): 5-30; Fe (ppm): 100-500; Mn (ppm): 20-300; Zn (ppm): 27-100; Mo (ppm): 0,1-0,2; Cl (ppm): 100-500.

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi-Subdirección de Agrología, citados en Peña, (2013). Nota: Los colores fueron agregados para facilitar su lectura.

Tabla 4. Niveles generales de interpretación del análisis de suelos

| Parámetro | Unidad | Bajo | Medio | Ideal | Alto |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------|-----------|----------|--------|
| | Clima | | | | |
| Carbono orgánico (Walkey Black) | Frío (%) | <2,9 | 3,0-5,7 | 5,8-7,0 | >7,0 |
| | Medio (%) | <1,7 | 1,8-2,9 | 3,0-4,0 | >7,1 |
| | Cálido (%) | <1,1 | 1,2-2,3 | 2,4-2,5 | >7,2 |
| Materia orgánica = carbono orgánico X 1,724 | | Bajo | Medio | Ideal | Alto |
| P(Bray II) | | <15 | 15-25 | 25-40 | >40 |
| S (SO_{4-2}) | | <10 | 10,0-15,0 | 15-20 | >20 |
| CICE | | <5 | 5,0-15 | 15-20 | >20 |
| Cationes intercambiables (acetato de amonio 1N, absorción atómica) | | | | | |
| K | $\text{cmol}(+) \times \text{kg}^{-1}$ | <0,2 | 0,2-0,3 | 0,3-0,4 | >0,4 |
| Ca | $\text{cmol}(+) \times \text{kg}^{-1}$ | <3,0 | 3,0-5,0 | 5,0-10,0 | >10 |
| Mg | $\text{cmol}(+) \times \text{kg}^{-1}$ | <1,5 | 1,5-2,5 | 2,5-3,0 | >3,0 |
| Na | $\text{cmol}(+) \times \text{kg}^{-1}$ | | | <1,0 | >1,0 |
| Al (KCL, 1 N) | $\text{cmol}(+) \times \text{kg}^{-1}$ | | | < 1,0 | >1,0 |
| Saturación de cationes | | Deficiente | Medio | Ideal | Exceso |
| Al | % | | | <20 | >20 |
| K | % | <3,0 | 3,0-4,0 | 4,0-5,0 | >5,0 |
| Ca | % | <50 | 50-60 | 60-70 | >70 |
| Mg | % | <10 | 10,0-15 | 15-20 | >20 |
| Na | % | | 5,0-7,0 | <5,0 | >15 |
| Elementos menores (Olsen/AA) | | | | | |
| Fe | $\text{ppm (mg X kg}^{-1}\text{)}$ | <20 | 20-50 | 50-100 | >100 |
| Mn | $\text{ppm (mg X kg}^{-1}\text{)}$ | <10 | 10,0-15 | 15-20 | >20 |
| Cu | $\text{ppm (mg X kg}^{-1}\text{)}$ | <1 | 1,0-2 | 2,0-3 | >3 |
| B | $\text{ppm (mg X kg}^{-1}\text{)}$ | <0,3 | 0,3-0,4 | 0,4-0,6 | >0,6 |
| Zn | $\text{ppm (mg X kg}^{-1}\text{)}$ | <2 | 2,0-3 | 3,0-4 | >4 |

| Parámetro Clima | Unidad | Bajo | Medio | Ideal | Alto |
|------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| Salinidad y sodicidad | | Suelo normal | Suelo salino | Suelo sódico | Suelo salino-sódico |
| CE | ds x m ⁻¹ | <2,0 | >4,0 | <4,0 | >4,0 |
| Na | % | <5,0 | <7,0 | >7,0 | >7,0 |

Fuente: Gómez (2006) citado en Peña (2013).

Tabla 5. Niveles de interpretación de relaciones iónicas en resultados de análisis de suelos

| Relaciones iónicas | Ideal | Rango crítico | Deficiencia |
|---------------------------|--------------|----------------------|---------------------|
| Ca/Mg | 3,0-6 | <3 | Calcio |
| | | >6 | Magnesio |
| Mg/K | 8,0-10 | >10 | Potasio |
| | | <8 | Magnesio |
| Ca/K | 15-30 | >30 | Potasio |
| | | <15 | Calcio |
| (Ca + Mg)/K | 20,0-40 | >40 | Potasio |
| | | <20 | Calcio y/o Magnesio |
| Ca/B | 2000 | >2000 | Boro |
| | | <1000 | Calcio |
| Fe/Mn | 5,0-10,0 | >10 | Manganese |
| | | <5 | Hierro |
| P/Zn | 10 | >12 | Zinc |
| | | <8 | Fósforo |

Fuente: Gómez (2006) citado en Peña (2013).

El análisis e interpretación se reporta en la tabla 6.

Tabla 6. Interpretación de diferentes parámetros en un suelo

| Parámetro | Valor | Interpretación |
|-------------------------------|--------|-------------------------------|
| Textura | | Franco-arenoso |
| pH | 4,75 | Muy fuertemente ácido |
| CE (dS.m ⁻¹) | 0,23 | Suelo normal |
| MO (%) | 5,28 | Alta |
| Al (me.100g ⁻¹) | 1,33 | Alto |
| Ca (me.100g ⁻¹) | 0,74 | Bajo |
| Mg (me.100g ⁻¹) | 0,3 | Bajo |
| K (me.100g ⁻¹) | 0,17 | Bajo |
| Na (me.100g ⁻¹) | 0,1 | Ideal |
| CICe (me.100g ⁻¹) | 2,7 | Baja |
| P (ppm) | 5,55 | Bajo |
| S (ppm) | 10,86 | Medio |
| Fe (ppm) | 640,93 | Alto |
| Mn (ppm) | 5,15 | Bajo |
| Zn (ppm) | 1,63 | Bajo |
| Cu (ppm) | 2 | Medio |
| B (ppm) | 0,13 | Bajo |
| Carbono orgánico | 3 | Ideal |
| Ca/Mg | 2,46 | Deficiencia calcio |
| Mg/K | 1,76 | Deficiencia potasio |
| Ca/K | 4,35 | Deficiencia calcio |
| (Ca+Mg)/K | 6,11 | Deficiencia calcio y magnesio |
| Ca/B | 5,69 | Deficiencia calcio |
| Fe/Mn | 124,45 | Deficiencia de manganeso |
| P/Zn | 3,4 | Deficiencia fósforo |



La interpretación sugiere que elementos como el calcio, magnesio, potasio y fósforo son los más deficientes en este suelo, además el aluminio alto y el bajo pH, sugieren la aplicación de enmiendas, para adecuar el pH, eliminar el aluminio que es tóxico para las plantas y hacer más disponibles los elementos nutritivos.

Las raíces absorben alrededor de 60 elementos del suelo, pero no todos son necesarios para el crecimiento de las plantas. Los nutrientes o elementos necesarios para el crecimiento o completar el ciclo de vida de una planta se consideran elementos esenciales. Solo 16 elementos son esenciales para la mayoría de las plantas. Los criterios para descubrir la esencialidad de los microelementos son difíciles. Los criterios de esencialidad de los elementos son los siguientes:

- La deficiencia de elementos esenciales evita la finalización del ciclo de vida y produce síntomas de deficiencia en la planta.
- No pueden ser reemplazados por otro elemento con propiedades similares.
- Están directamente involucrados en el metabolismo de las plantas.
- En ausencia de elementos esenciales, las plantas no pueden producir semillas viables.
- Los elementos esenciales deben ser componentes de algunos metabolitos esenciales de las plantas. Por ejemplo, el Mg^{2+} es un componente de la molécula de clorofila (Bhatla y Lal, 2018).



La importancia de tablas como la de pH y su interpretación, radica en que permiten relacionar la disponibilidad de los nutrientes para las plantas de aguacate y tomar decisiones con referencia a qué elementos reforzar en un plan de fertilización, qué niveles de cal aplicar para hacer más disponibles los nutrientes y a su vez para eliminar el efecto de la toxicidad por el aluminio en pH muy bajo.

La toxicidad de nutrientes puede ocurrir en suelos ácidos cuando el pH es de 4.8 o menor. Las dos toxicidades más importantes en los suelos ácidos son las de aluminio (Al) y manganeso (Mn). En suelos fuertemente ácidos ($pH < 4.3$), el aluminio y el manganeso están más disponibles en la solución del suelo y son

perjudiciales para las raíces de las plantas. La toxicidad del aluminio es el síntoma más común de las plantas en suelos ácidos y causa retraso en el crecimiento de las raíces. La reducción del crecimiento de las raíces impide la absorción de nutrientes y agua y produce una disminución de la producción (Slattery et al. 1999-2000, mencionado por Osman, 2014, p.134).

Troug, E. (1946) relacionado en The Potash Development Association (2011), fué el primero en conectar la disponibilidad de los nutrientes para las plantas con el nivel de pH presente en un suelo (figura 10).

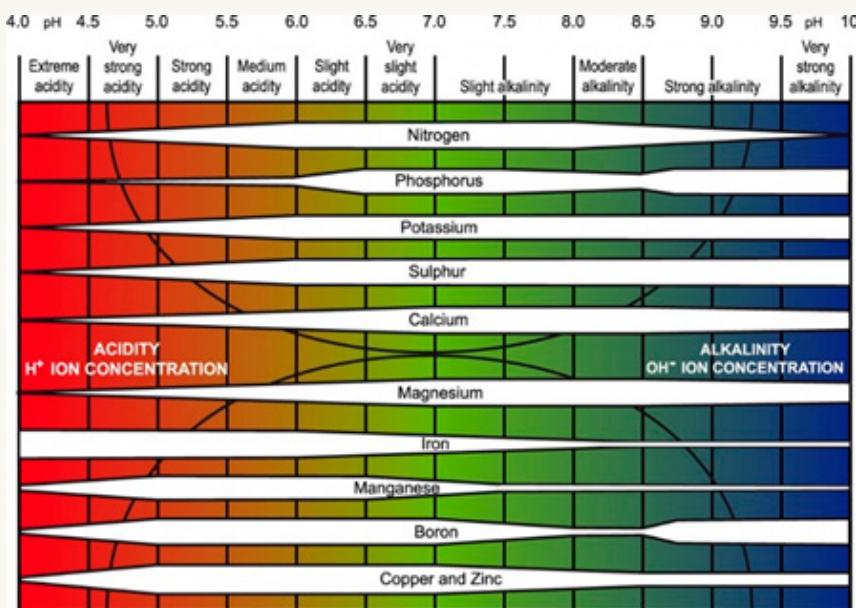


Figura 10.

Fuente: Rediseño del original en The Potash Development Association (2011) de Troug, E. (1946). Influencia de la reacción del suelo sobre la disponibilidad de nutrientes para las plantas presentado por Troug en la Soil Science Society of America Proceedings 11, 305-308.

En la tabla 5 donde se presentaron unos niveles de interpretación de relaciones iónicas entre elementos nutريentes, para resultados de análisis de suelos del Instituto Agustín Codazzi en Colombia, se debe tener presente que estas interpretaciones, están relacionadas con los sinergismos (interacciones positivas) y antagonismos (interacciones negativas) que puedan establecerse entre los elementos nutricionales.

El primer estudio que se realizó sobre la interacción entre los nutrientes fue el realizado por Mulder, D. en (1953) y aún se emplea en la actualidad. (Figura 11).

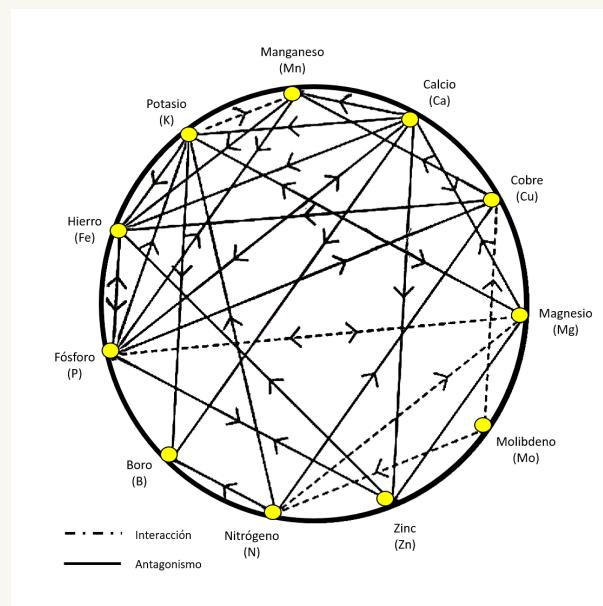


Figura 11. Carta de Mulder.

Fuente: Adaptación de Bariya y Ahish (2014) nutrient content.

Se presenta la interacción entre iones de una fuente reciente en la figura 12.

| | | B | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------------|----|-----------------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | Fe | | | Fe | | | Mg | | | | | |
| Estimulación | Antagonismo | Mg | Mn | N | P | Mo | Ca | Mn | Zn | Fe | B | P | |
| | | N | NH ₄ | NO ₃ | K | Cu | Mo | Mg | Ca | Mn | Zn | Fe | B |
| | Cu | K | | | Mn | Cu | | K | Fe | Cu | Mn | | K |
| | B | Ca | | | Fe | | | Cu | | Fe | | | Cu |
| | P | | | | | | | Mg | | | | | Ca |
| | | | | | | | | Zn | | | | | Zn |

Figura 12.

Fuente: Haifa Group (s.f.)



Interpretación del análisis foliar con enfoque hacia el aguacate 'Hass'

El análisis foliar o de tejidos vegetales es una herramienta empleada en el diagnóstico nutricional de cultivos. Consiste en medir el contenido total de los nutrientes presentes en las hojas u otra parte de la planta (flores, tallos, raíces), a través de procedimientos químicos específicos en laboratorios certificados.

Para aguacate en general se propone la siguiente forma de muestreo:

Asegurar una muestra representativa para efectuar un buen análisis y diagnóstico. Se deben llevar 300 g de muestra, dado que la hoja es el órgano

en donde se realiza la mayor actividad de la planta, generalmente constituye el mejor tejido para reflejar el estado nutricional de planta. Tomar siempre el mismo tejido en una ubicación determinada en la planta y a una edad específica. En general para el aguacate la época de muestreo es antes de la floración, la parte de la planta son hojas recién maduras y por muestra 30 a 40 hojas (Bio-sistemas, s.f.).

La absorción de nutrientes por el aguacate, se dá principalmente y en su mayoría por la raíz, Mora y Téliz (2007) establecen esto mediante: “el flujo de nutrientes junto con el movimiento del agua del suelo hacia la superficie radical (flujo de masa o convección) y por difusión por el cual los iones se mueven de áreas de alta concentración a áreas de baja concentración”.

Las concentraciones de nutrientes en las hojas son referentes del estado nutrimental de los huertos frutales como el aguacate. En estudios adelantados en Michoacán se observan los cambios en la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio, planteándose que se deben a la dinámica en la concentración nutrimental en el suelo (Figura 13).

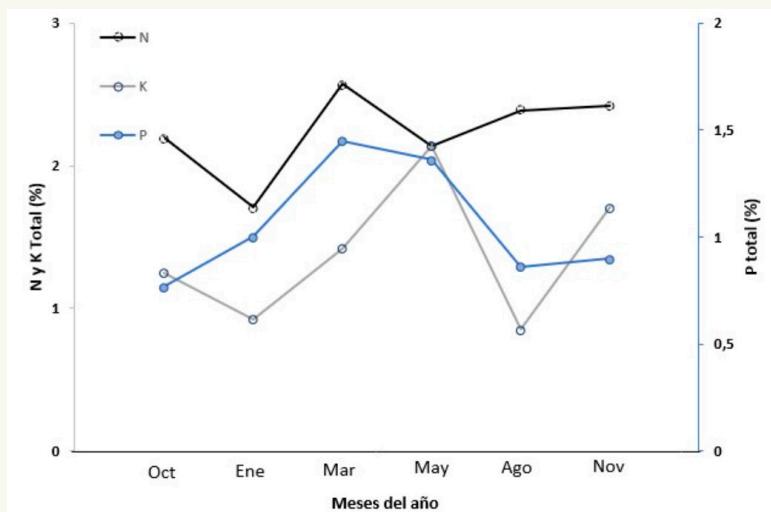


Figura 13. Dinámica de la concentración nutrimental foliar en aguacate en Michoacán. Mora y Téliz (2007).

En la figura 14, se observa la actividad presentada en hojas de aguacate 'Hass' en el municipio de San Vicente Ferrer, oriente de Antioquia.

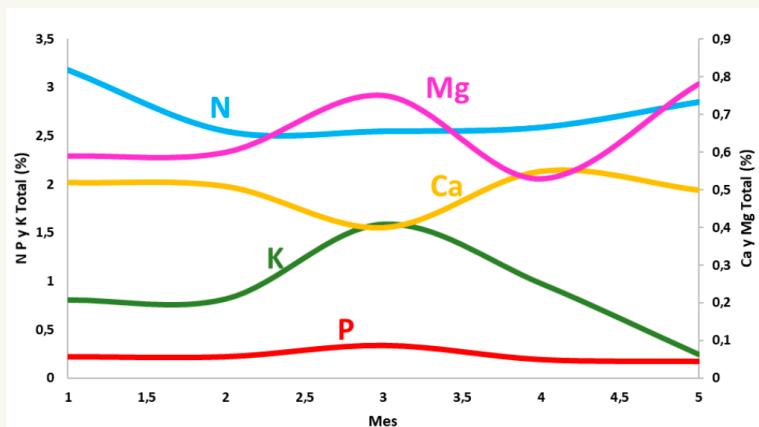


Figura 14. Comportamiento de la concentración de nutrientes en hojas de aguacate 'Hass'. Proyecto de Innovación "Optimización de planes de fertilización mediante el uso de programación lineal y sensores de variables agronómicas y climáticas, de los productores de aguacate en el oriente Antioqueño" (2019).

Desde el punto de vista del diagnóstico nutricional de las plantas, las hojas son de enorme utilidad. Por un lado, la relación entre el contenido de nutrientes en los tejidos (foliares) y el rendimiento es clara. Representa el fundamento científico del análisis químico de los tejidos para diagnosticar el estado nutricional de las plantas, pero requiere de investigación previa para determinar la reacción del rendimiento ante cambios en la concentración de nutrientes en los tejidos (Meléndez y Molina, 2002).

Los mecanismos de absorción de nutrientes por las hojas en las plantas, aún siguen siendo investigados todavía, al respecto se plantea por Fernández et al. (2015). Lo siguiente:



- Las superficies de las plantas son permeables a las soluciones nutritivas.
- La facilidad con la que una solución nutritiva puede penetrar al interior de la planta dependerá de las características de la superficie vegetal en cuestión, que pueden variar en función del órgano, la especie, la variedad y las condiciones ambientales durante el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como debido a las propiedades fisicoquímicas de las formulaciones de fertilizantes foliares.
- Las superficies de las plantas están generalmente cubiertas por una capa de ceras epicuticulares.
- El micro y nano relieve asociado a la estructura de las células epidérmicas y las ceras epicuticulares depositadas sobre las superficies vegetales, junto con la composición química de estas ceras, determinará la polaridad e hidrofobicidad de la superficie de cada planta/órgano en particular.
- Las estructuras epidérmicas como las estomas, tricomas o lenticelas, que están presentes en las superficies de hojas y frutos, son permeables a las disoluciones aplicadas a la superficie y pueden desempeñar un papel significativo en cuanto a la absorción de agroquímicos.
- Las sustancias lipofílicas atraviesan la cutícula mediante un proceso de disolución - difusión.



- Los mecanismos de penetración cuticular de los compuestos polares (por ejemplo, el agua o fertilizantes foliares en solución acuosa) no están aún bien caracterizados.
- La contribución de la vía estomática al proceso de absorción foliar debe ser aún mejor esclarecida, así como el papel de otras estructuras epidérmicas como los tricomas o las lenticelas.

- Mejorar la efectividad de los fertilizantes foliares requerirá una mejor comprensión de los fenómenos de contacto en la interfase entre el líquido (i.e. la formulación de fertilizantes foliares) y el sólido (i.e. la superficie de la planta).
- La efectividad de los tratamientos con nutrientes foliares mejorará una vez que los mecanismos de absorción foliar sean mejor entendidos en el futuro.



Oportunidades

- Múltiples experimentos científicos y estudios aplicados llevados a cabo en el siglo pasado han demostrado que las superficies de la planta son permeables a los fertilizantes foliares.
- Esta permeabilidad presenta la oportunidad de suministrar nutrientes a los tejidos y órganos de la planta como método complementario a la absorción radicular y que permite sortear los mecanismos de translocación que pueden limitar el suministro de nutrientes a las plantas bajo ciertas condiciones de crecimiento y en relación con los elementos inmóviles.
- La fertilización foliar tiene un gran potencial y debe ser más explorada y explotada en el futuro, como requisito indispensable para la optimización de los tratamientos.

El análisis foliar, se constituye en una herramienta que complementa los estudios de absorción-extracción de las plantas y forma parte integrante de planes de fertilización eficientes para determinar el éxito de la fertilización edáfica, las deficiencias nutrimentales que se puedan presentar y los planes de fertilización foliar que se implementen.

Lovatt (2013) menciona que los nutrientes específicos aplicados al follaje, incluidas las flores, puede satisfacer eficientemente la demanda de nutrientes del cultivo y estimular procesos metabólicos y fisiológicos específicos que resultan en un aumento de la producción de fruta y / o tamaño y calidad de la fruta y el ingreso del productor. Las estrategias de fertilización foliar (...) son rentables y tienen el potencial de reducir



la acumulación de nutrientes en el suelo, el agua de escorrentía, el agua superficial y el agua subterránea. Con el costo cada vez más alto de los fertilizantes, la sustitución de los fertilizantes aplicados en el suelo en parte por fertilizantes foliares debidamente cronometrados proporciona a los productores una herramienta para reducir el uso y el gasto de los fertilizantes al tiempo que aumenta el rendimiento y los ingresos y protege el medio ambiente.

En la tabla 7 se establecen rangos de suficiencia para resultados en los análisis foliares para el cultivo de aguacate y el aguacate ‘Hass’ y que pueden ser de utilidad para la interpretación de estos y su integración junto a los análisis de suelos en un programa de fertilización en una explotación agrícola con este cultivo.

Se hace necesario implementar investigaciones para Colombia, donde se obtengan esta información para sus zonas aguacateras y los cultivares para exportación, para efectos del estudio de caso, se emplearán los rangos promedio de la revisión.

Schaffer et al. (2013), establecen que siendo varios los factores, independientes del suministro de nutrientes, los que influyen en la concentración de minerales en las hojas son: posición de las hojas en el árbol, lluvia, riego, carga de cultivo (año “on” o “off”), anillado, cultivares, portainjertos, enfermedades y residuos de plaguicidas... estos factores y la magnitud de sus efectos sobre las concentraciones de nutrientes de las hojas depende mucho de las condiciones locales.



La fenología reproductiva de muchos cultivares de aguacate, incluyendo Hass, está caracterizada por la alternancia de cosechas, conduciendo a una elevada carga de cosecha en un ciclo de producción (año “on”) y una baja carga de cosecha en el siguiente ciclo (año “off”) (PazVega, 1997; Lovatt, 2006). Un año “on” está determinado por una intensa floración, alto porcentaje de cuajado y alto rendimiento, mientras que un año “off” se caracteriza por una baja floración, bajo porcentaje de cuajado y bajo rendimiento (Paz-Vega, 1997; Lahav y Zamet, 1999; Bruwer y Robbertse, 2003; Dixon et al., 2007 mencionados en Rebolledo R. y Romero 2011).

Tabla 7. Rangos de suficiencia para análisis de hojas en aguacate

| Parámetro (rango óptico) | Jones y Embleton (1972)* mencionado por Maldonado-Torres et al,2007 | Berlín et al. (1976)* mencionado por maldonado Torres et al. 2007 | Goodall et al. (1979)* mencionado por Maldonado - Torres et al., 2007 | Midwest Laboratories, 2001 | Barker & Pilbeam 2007 | Maldonado - Torres et al., 2007* | Arpaia et al., 2012 | Schaffer et al., 2013 | Promedio Revisión |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|
| N (%) | 1,60-2,0 | 1,80-2,20 | 1,60-2,0 | 1,60-2,20 | ND | 1,94-2,31 | 2,0-2,2 | 1,60-2,80 | 1,73-2,24 |
| P (%) | 0,08-0,25 | 0,10-0,30 | 1,10-0,25 | 0,10-0,25 | 0,10-0,15 | 0,15-0,18 | 0,10-0,25 | 0,14-0,25 | 0,10-0235 |
| K (%) | 0,75-2,0 | 0,50-2,40 | 1,75-2,0 | 1,0-2,0 | ND | 0,81-1,09 | 0,75-2,0 | 0,90-2,0 | 0,78-1,92 |
| S (%) | ND | ND | ND | 0,20-0,60 | ND | ND | 0,20-0,60 | 0,20-0,60 | 0,2-0,60 |
| Ca (%) | 1,0-3,0 | 1,0-3,0 | 1,0-3,0 | 1,0-3,0 | ND | 1,28-2,59 | 1,0-3,0 | 1,0-3,0 | 1,04-2,94 |
| Mg (%) | 0,25-0,80 | 0,30-0,50 | 0,25-0,80 | 0,30-0,80 | 0,25-0,80 | 0,62-0,77 | 0,25-0,80 | 0,25-0,80 | 0,3-0,75 |
| Na (%) | ND | ND | ND | 0,01-0,15 | ND | ND | <0,25 | <0,25 | <0,25 |
| Cl (%) | ND | ND | ND | ND | 1,5-4,0 | ND | <0,25 | <0,25 | <0,25 |
| Fe (ppm) | 50-200 | ND | 50-200 | 50-150 | ND | 85-114 | 50-200 | 50-200 | 55,83-177,3 |
| Mn (ppm) | 30-500 | ND | 30-500 | 30-80 | ND | 20-51 | 30-500 | 30-500 | 28,33-355,16 |
| Zn (ppm) | 30-150 | ND | 30-150 | 30-50 | ND | 87-182 | 40-80 | 40-80 | 41,14-127 |
| Cu (ppm) | 5,0-15,0 | ND | 5,0-15,0 | 5,0-15,0 | ND | 7,0-35 | 5,0-15,0 | 5,0-15,0 | 5,33-17,83 |
| B (ppm) | 50-100 | ND | 50-100 | 50-100 | ND | 126-352 | 40-60 | 40-60 | 61-135,3 |
| Mo (ppm) | ND | ND | ND | ND | 0,05-1,0 | ND | ND | ND | 0,05-1,0 |
| Li (ppm) | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | <50 |

* Datos para aguacate 'Hass'

** Datos basados en Embleton y Jones (1964), Lahav y Kadman (1980), Reuter y Robinson (1986) y Whiley et al. (1996)

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes consultadas.

En la figura 15 se observa un ejemplo de los niveles de NPK (nitrógeno, fósforo y potasio) en el tejido de las hojas de aguacate ‘Hass’ frente a su cosecha y como estos se concentran en un rango.

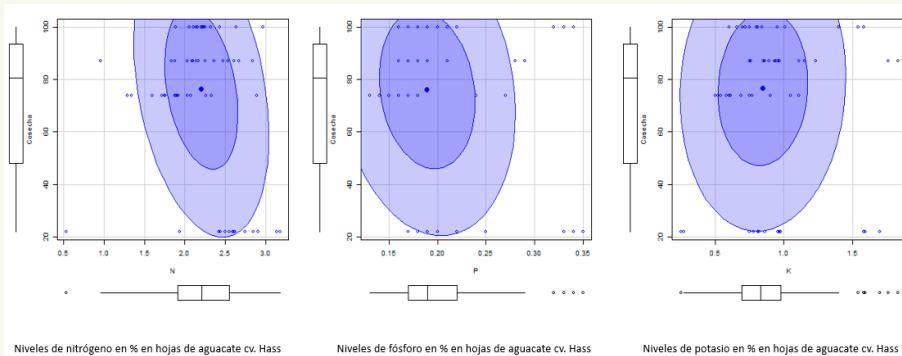


Figura 15. Comparación entre diferentes niveles de nitrógeno, fósforo y potasio en hojas de aguacate ‘Hass’ frente a la cosecha.

Fuente: el autor.



Interpretación del análisis foliar con enfoque hacia el aguacate ‘Hass’

Tenemos los resultados de un análisis foliar completo, provisto por un laboratorio certificado y su análisis con base en los rangos de la revisión obtenidos en la tabla 7 (Tabla 8).



Tabla 8. Ejemplo real de un análisis foliar en aguacate ‘Hass’ de 7 años y su interpretación

| Parámetro | Valor | Rango | Interpretación |
|-----------|-------|--------------|----------------|
| N (%) | 1,63 | 1,73-2,24 | Bajo |
| P (%) | 0,26 | 0,10-0,235 | Alto |
| K (%) | 1,02 | 0,78-1,92 | Suficiente |
| Ca (%) | 0,51 | 1,04-2,94 | Bajo |
| Mg (%) | 0,42 | 0,3-0,75 | Suficiente |
| S (%) | 0,12 | 0,2-0,60 | Bajo |
| Fe (ppm) | 43,28 | 55,83-177,3 | Bajo |
| Cu (ppm) | 0,12 | 5,33-17,83 | Bajo |
| Mn (ppm) | 98,17 | 28,33-355,16 | Suficiente |
| Zn (ppm) | 15,29 | 41,16-127 | Bajo |
| B (ppm) | 61,96 | 61-135,3 | Suficiente |

Fuente: Análisis del autor.

Así para el momento del presente cultivo, en un principio, se observan deficiencias en elementos como el nitrógeno, calcio, azufre, hierro, cobre y zinc.

Los rangos de suficiencia permiten relacionar el estado nutricional de la planta, con los procesos de fertilización edáficos realizados, en el cultivo del aguacate ‘Hass’ algunas veces las plantas presentan situaciones nutrimetales como el “Hambre escondida” donde por múltiples factores, las plantas no presentan síntomas visuales de deficiencias o estas particularmente son incipientes, de allí la importancia del análisis foliar como herramienta para corroborar esto. En el siguiente capítulo, se integrará el análisis de suelos y el foliar para con ellos elaborar un plan de fertilización básico.



El Plan de Fertilización para el Cultivo de Aguacate 'Hass'

La fertilización es un rubro que representa altos costos en los cultivos, estudios sobre costos en el aguacate en México adelantados por Franco et al. (2018) corroboran “La alta proporción guardada por los costos variables, constituidos en su mayoría por plaguicidas y fertilizantes”.

En Colombia López (2018), determina en un lapso de 15 años, costos en el rubro de fertilización desde el 8% en el año 1 hasta el 32% en el año 15, con un promedio del 27%.

El objeto fundamental de la fertilización es suplir a la planta los nutrientes para los cuales el suministro por parte del suelo es insuficiente, a los menores costos posibles, buscando siempre aumentar la rentabilidad. Esto implica gran precisión tanto en el cálculo de la dosis de fertilizantes y enmiendas, como en la selección de la fuente o tipo de fertilizante que se utilice (Peña, 2013).

Con los datos del análisis de suelos, para cada elemento mediante un paso a paso donde se obtienen las cantidades expresadas en el análisis en ppm o miliequivalentes por 100 gramos de suelo se convierten a la cantidad presente en el suelo en kilogramos por hectárea y luego a estas cantidades se restan los requerimientos del cultivo del aguacate, para obtener la cantidad requerida por el cultivo expresada en kilogramos de nutriente puro por hectárea. A continuación, se puede convertir esa cantidad a un fertilizante, teniendo en cuenta la eficiencia de este (Ruiz & Rengifo, 2018).

Requerimientos nutricionales del aguacate 'Hass'



Existe poca información actual sobre los requerimientos del aguacate y específicamente sobre el aguacate 'Hass', la que existe en general es de otras latitudes y se enfoca en cereales, oleaginosas y hortalizas.

El diagnóstico de fertilidad de los cultivos requiere de un conocimiento previo de los niveles de absorción y extracción en el órgano cosechable para el logro de un rendimiento objetivo. Es importante tener siempre presente la diferencia de forma terminológica que existe entre el significado de las palabras, "absorción" y "extracción" de los cultivos.

Se entiende por absorción la cantidad total de nutrientes absorbidos por el cultivo durante su ciclo de desarrollo. El término extracción, es la cantidad total de nutrientes en los órganos cosechados: grano, forraje u otros.

La diferencia entre los términos es significativa al momento de las recomendaciones de fertilización bajo el criterio de reposición. La reposición utilizando la absorción del cultivo implica la aplicación de todos los nutrientes que fueron tomados por el cultivo y que se encuentran presentes en todos sus tejidos y órganos, cosechables y no cosechables. Sin embargo, la práctica de fertilización por los niveles de extracción de los cultivos, generalmente la más utilizada, sólo busca reponer los nutrientes que son absorbidos y depositados en tejidos y órganos cosechables, y que por lo tanto no son reciclados debido a que no vuelven a ingresar al sistema suelo (Ciampitti & García, s.f.).

A continuación, se presentan los datos de extracción recopilados de literatura (los cuales se condensan como promedio al final, aclarando que son datos de otras regiones e implican la mezcla de varios cultivares, otro tipo de condiciones tanto edafoclimáticas, como de manejo agronómico y cultural) y los datos de absorción-extracción obtenidos del estudio: Proyecto de Innovación "Optimización de planes de fertilización mediante el uso de programación lineal y sensores de variables agronómicas y climáticas, de los productores de aguacate en el oriente Antioqueño" 2019 (Tabla 9).



Tabla 9. Extracción total de nutrientes en las plantas de aguacate ‘Hass’ para una producción de 10 ton/ha vs. la extracción de los frutos.

| Extracción del aguacate ‘Hass’ para una producción de 10t en Kg. (277 plantas.ha ⁻¹ a 6X6) ⁽¹⁾ | | | | Extracción en fruto para 10 toneladas . ha ⁻¹ en Kg | | | | | | | Promedio revisión de literatura |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------|-------------|-------|---------------------------------------|
| Nutriente puro (Kg.ha ⁻¹) | San vicente, Antioquia Colombia Rengifo y Londoño, 2019 | Cundinamarca, Colombia Rebolledo y Dorado, 2017* | Antioquia Colombia Tamayo V.A. et al (2018)** | México Maldonado et al (2007)*** | Rosecreance et al., (2012)**** | Estados Unidos (California)***** | Venezuela ***** | Francia ***** | Brasil***** | | |
| N | 2430 | 94,56 | 33 | 13,65 | 22 | 13,8 | 31,52 | 28 | 28,48 | 33,13 | |
| P | 231 | 22,8 | 4,8 | 1,57 | 4 | 4 | 7,36 | 3,5 | 3,01 | 6,29 | |
| K | 1081 | 105,9 | 40 | 16,6 | 27 | 27 | 35,3 | 45,3 | 20,27 | 40,05 | |
| Ca | 421 | 14,22 | 3,1 | 0,82 | 14 | 1,4 | 5,47 | 1,3 | 0,79 | 3,51 | |
| Mg | 401 | 5,49 | 5,1 | 1,38 | 0,46 | 0,46 | 4,74 | 2 | 1,68 | 2,98 | |
| S | 134 | 16,41 | 5,6 | SD ⁽²⁾ | 1,1 | 1,1 | SD | SD | 1,83 | 5,99 | |
| Fe | 6,40 | 0,222 | 0,0045 | 0,046 | 0,07 | 0,07 | SD | SD | 0,037 | 0,07 | |
| Cu | 0,30 | 0,09 | 0,003 | 0,0123 | 0,04 | 0,009 | SD | SD | 0,03 | 0,03 | |
| Mn | 15,00 | 0,06 | 0,001 | 0,0077 | 0,009 | 0,009 | SD | SD | 0,07 | 0,03 | |
| Zn | 2,90 | 0,135 | 0,0011 | 0,0203 | SD | SD | SD | SD | 0,02 | 0,05 | |
| B | 7,90 | 0,111 | 0,002 | 0,02735 | SD | SD | SD | SD | 0,0002 | 0,07 | |

Fuente. Elaboración a partir de: Adaptación de Rengifo y Londoño, (2019), Rebolledo y Dorado, (2017) *; Tamayo V. et al. (2018)**; Maldonado-Torres et al. (2007)***; Rosecreance et al. (2012) and matching fertilizer applications to those patterns can maximize yields, improve fruit quality, increase nutrient uptake, and reduce the potential for nutrient loss. Avocado fruit is unique because it remains on the tree for 15 to 18 months after spring bloom (i.e. two growing seasons**** Bartoli, (2008) *****

(1) Para todas las partes de la planta (2) SD: Sin dato.

Para el estudio de caso se emplearán los datos del estudio de suelos y foliar del estudio de caso anteriormente planteado, siendo estos tanto de extracción de frutos promedio de varias fuentes de literatura, como los datos de absorción-extracción para el municipio de San Vicente Ferrer ubicado en el departamento de Antioquia, Colombia.

Se anota que, ante el uso de información previa para la construcción de un plan de fertilización lo ideal es que esta sea de la zona donde se realizará el cultivo, esto hará este más preciso en sus recomendaciones.



Dosis de fertilizante a partir de la extracción por el fruto y por el cultivo

Según Yagodin *et al.* (1986) mencionado por Calaña (2008) en el método de balance elemental se utilizan las extracciones de sustancias nutritivas por tonelada de producción principal, considerando también la secundaria, los coeficientes de aprovechamiento de las sustancias nutritivas del suelo, los fertilizantes y el N de los residuos de rastrojos y radiculares de los cultivos leguminosos.

Este método ha sido llevado a una fórmula general para cada elemento nutritivo, como lo expresa la fórmula de requerimiento nutricional (ecuación 1):

$$NF = \frac{RNE - DNS}{E} \times 100 \quad (1)$$

Ecuación 1. Recomendación de fertilizantes

Fuente: Peña V., (2013)

Donde:

NF: Necesidad de fertilización, en kg.ha⁻¹

RNE: Requerimiento nutricional de la especie, en kg.ha⁻¹

DNS: Disponibilidad de nutrientes en el suelo, en kg.ha⁻¹

E: Eficiencia de la fertilización, en porcentaje

100: Constante porcentual

Para conocer las necesidades de fertilización es necesario transformar la información brindada por el análisis de suelos a Kg.ha⁻¹. Siendo necesario tener en cuenta el peso de la hectárea, peso que varía dependiendo de la densidad aparente y de la profundidad de las raíces, en general para especies como hortalizas y pastos, es de 10 cm; para especies de tipo arbustivo 20 cm y para especies frutales de 30 cm.

Para el cálculo del peso de la hectárea, se emplea la siguiente fórmula (ecuación 2):

$$P(ha) = 10.000.000 \times Pr \times Da \quad (2)$$

Ecuación 2. Cálculo del peso de la hectárea de suelo en Kg.

Fuente: El autor

Donde:

P(ha): Peso de una hectárea en Kg

10.000.000: Constante

Pr: Profundidad de raíces del cultivo en m (para el aguacate= 0,3 m).

Da: Densidad aparente del suelo en g.cm⁻³ o t.m⁻³

Así, para el ejemplo, si tenemos una densidad aparente de 0,7 g.cm⁻³. Y una profundidad de 30 cm, el peso de la hectárea será de: 2 ´ 100.000 Kg.

Los datos que suministran los análisis de suelos vienen expresados en las siguientes unidades (Tabla 10).

Tabla 10. Agrupación de unidades de expresión de los diferentes parámetros en un análisis de suelos.

| Parámetro | Unidad |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------|
| Materia orgánica (MO) | % |
| K | me.100 g ⁻¹ de suelo o cmol.kg ⁻¹ de suelo |
| Ca | me.100 g ⁻¹ de suelo o cmol.kg ⁻¹ de suelo |
| Mg | me.100 g ⁻¹ de suelo o cmol.kg ⁻¹ de suelo |
| P | mg.kg ⁻¹ o ppm (partes por millón) |
| S | mg.kg ⁻¹ o ppm (partes por millón) |
| Fe | mg.kg ⁻¹ o ppm (partes por millón) |
| Cu | mg.kg ⁻¹ o ppm (partes por millón) |
| Mn | mg.kg ⁻¹ o ppm (partes por millón) |
| Zn | mg.kg ⁻¹ o ppm (partes por millón) |
| B | mg.kg ⁻¹ o ppm (partes por millón) |

Nota: me.100 g⁻¹ de suelo = cmol.kg⁻¹ de suelo y mg.kg⁻¹ = ppm. La información del nitrógeno se obtiene de la materia orgánica.

Fuente: *El autor.*



Cálculos a partir de los datos registrados en un análisis de suelos

Los cálculos del estudio de caso se harán por unidad de parámetro a modo de ejemplo, al final se compilarán y contrastarán los datos tanto para la extracción (fruto), como para la planta, se anota que los datos de extracción por la planta son para una producción de 10 t.ha⁻¹ el asistente ingeniero agrónomo puede ajustar estos mediante regla de tres a la producción requerida, según la edad del cultivo o producción esperada.



a. Conversión de porcentaje (%) a Kg.ha⁻¹ (Caso del nitrógeno asimilable a partir de la materia orgánica)

“Para calcular el contenido de materia orgánica (MO), se asume que el 58% de la MO está compuesta por C y por ende es necesario emplear el factor de conversión 1,724” propuesto por Van Bemmelen en Tabatabai (1996) referenciado por Lis Gutiérrez (2015).

Barrera et al. (2010) calculan el Nitrógeno total (%) y establece que a partir del dato del carbono orgánico también se puede obtener, i) como el cual equivale a la cantidad de materia orgánica MO del suelo dividida por 20. Veinte es una constante (por definición, de 100 partes de MO en el suelo, 20 corresponden al N total).

%MO=%CO x 1,724 (factor de Van Bemmelen el cual considera que la materia orgánica contiene en promedio 58% de carbono).

$$\% \text{ } N \text{ total} = \frac{\% \text{ } MO}{20}$$

Calcular el Nitrógeno asimilable (N asimilable)

N (Nitrógeno) asimilable (%) = % N total (0,015)

El nitrógeno (N) del suelo tiene dos componentes, N orgánico y N inorgánico. Los microorganismos del suelo hacen la conversión de la forma orgánica a inorgánica, que es la que absorben las plantas. Se estima que entre 1,5 % y 3,0 % del N total del suelo corresponde a N inorgánico; usualmente se trabaja con 1,5 % ó (0,015).

La cantidad de N por hectárea equivale a N asimilable (%), multiplicada por el peso de una hectárea, dividido por 100.

$$Kg.ha^{-1} \text{ de Nitrógeno} = N \text{ asimilable (\%)} \times \frac{\text{Peso hectárea}}{100}$$

Así para el caso del nitrógeno, cuyo resultado en el análisis de suelos se toma a partir de la materia orgánica es:

$$MO = 5,28\%$$

$$\% N \text{ total} = \frac{\% MO}{20} = 5,28 \quad \text{entonces} \quad \frac{5,28}{20} = 0,264 \%$$

$$\% N \text{ asimilable} = 0,264 \times (0,015) = 3,96 \times 10^{-3}$$

$$Kg.ha^{-1} \text{ de Nitrógeno} = N \text{ asimilable} \times \frac{2'100.000}{100} = 83,16 \text{ Kg de Nitrógeno.ha}^{-1}$$



b. Conversión de me.100g⁻¹ de suelo=cmol.Kg⁻¹ de suelo a Kg.ha⁻¹

Para realizar esta conversión es necesario entender los siguientes conceptos para llegar a los contenidos de los elementos expresados en estas unidades en Kg.ha⁻¹, como lo explica, Peña V (2013):

Equivalente-gramo: es también conocido como peso equivalente y se halla dividiendo el peso molecular de un elemento entre la valencia. Se expresa en gramos y con el símbolo “Eq”.

Miliequivalente: Es igual a la milésima parte de un equivalente-gramo de una sustancia. Se expresa con el símbolo “meq”.

Mol: Dado que la materia tiene un número excesivamente grande de átomos, nunca podremos trabajar con ellos. El mol es una unidad mayor que el átomo o la molécula. Cada mol tiene $6,02 \times 10^{23}$ partículas o átomos de la sustancia.

Centimol: Centésima parte de un mol (cmol).

Estos términos se pueden expresar de la siguiente forma:

- Miliequivalente (meq)
- Equivalente gramo= $\frac{\text{Masa atómica}}{\text{Valencia}}$
- 1 miliequivalente = $\frac{\text{Peso equivalente}}{1000}$
- Centimol (cmol)
- Mol= $\frac{\text{Masa atómica}}{\text{Valencia}}$
- 1 cmol = $\frac{\text{Peso equivalente}}{1000}$

Como ejemplo para el estudio de caso, tomaremos el Potasio (K), cuyo contenido en el suelo es de $0,17 \text{ me} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$

Primero obtendremos cuánto tendría el suelo, si hubiese un (1) miliequivalente, en el análisis de suelos:

K (Potasio) Peso atómico= 39 Valencia= 1

Equivalente-gramo = $\frac{39}{1} = 39$ gramos-equivalentes

1 miliequivalente de K = $\frac{39}{1000} = 0,039$ miliequivalentes-gramo

$$0,039 \frac{\text{gramos}}{100 \text{ g de suelo}} \times 1 \frac{\text{kilo}}{1000 \text{ gramos}} \times 1000 \frac{\text{gramos}}{1 \text{ kilo de suelo}} = \frac{39}{100.000} = 0,00039 \text{ kilos de K / kilo de suelo}$$

Nota: Todas esas multiplicaciones se pueden condensar por medio de un factor:

$$\text{Factor} = \frac{(1 \times 1000)}{(100 \times 1000 \times 1)} = 0,01$$

Aplicando la fórmula mediante el factor se obtiene, igual resultado:

$$0,039 \times 0,01 = 3,9 \times 10^{-4} = 0,00039 \text{ kilos de K/ kilo de suelo}$$

Entonces:

$$\left[\text{Si } 1 \text{ meq - gramo de K pesa } 0,00039 \frac{\text{kilos de K}}{\text{kilo de suelo}} \right] \quad \text{¿cuánto pesan } 0,17 \text{ meq?}$$

$$0,17 \text{ meq - gramo de K} \times \frac{0,00039 \text{ kilos de K}}{1 \text{ meq - gramo de K}} = 0,0000663 \text{ gramos-equivalente}$$

$$\text{Kg de K} = 6,63 \times 10^{-5} \times 2'100.000 \text{ Kg de suelo} = 139,23 \text{ Kg de K.ha}^{-1}$$

De igual forma se realiza para elementos como el calcio y el magnesio.



c. Conversión de mg.kg⁻¹ = ppm de suelo a Kg.ha⁻¹

La fórmula es la siguiente:

$$\text{Kg del elemento.ha}^{-1} = \frac{\text{ppm o mg.Kg}^{-1}}{1'000.000} \times \text{Peso de la hectárea}$$

Como ejemplo para el estudio de caso tomaremos el Fósforo (P), cuyo contenido en el suelo es de 5,55 ppm

$$\text{Kg de Fósforo.ha}^{-1} = \frac{5,55 \text{ ppm}}{1'000.000} \times 2'100.000 = 11,65 \text{ Kg de P.ha}^{-1}$$

De igual forma se realiza para elementos como el azufre, hierro, cobre, manganeso, zinc y el boro.



Operaciones para conocer las dosis a aplicar en el cultivo de aguacate 'Hass'

Para este estudio de caso se realizará la aplicación de la ecuación 1, anteriormente relacionada, tanto con el requerimiento de fertilizante promedio, como con el hallado en el municipio de San Vicente Ferrer, Antioquia.

La eficiencia en el uso de los fertilizantes, como fertilizantes inorgánicos, aplicados al suelo, se presenta en la tabla 11.

Tabla 11.

Eficiencia del uso de fertilizantes inorgánicos aplicados al suelo

| Elemento | Eficiencia | Fuente |
|----------------|------------------------|--------------------------------------------------------|
| N | 50-70% (60% promedio) | Isherwood, 1990 en Stewart, 2007 |
| | 50-65% (55% promedio) | Bertsch en Centro de investigaciones Agronómicas, 2001 |
| P | 10-25% (15% promedio) | Isherwood, 1990 en Stewart, 2007 |
| | 50-60% (55% promedio) | Isherwood, 1990 en Stewart, 2007 |
| K | 60-80% (70 % promedio) | Bertsch en Centro de investigaciones Agronómicas, 2001 |
| | 30-40% (35% promedio) | Ramírez D., s.f. |
| Ca | 60-80% (70% promedio) | Bertsch en Centro de investigaciones Agronómicas, 2001 |
| | 30-40% (35% promedio) | Ramírez D., s.f. |
| Mg | 60-80% (70 % promedio) | Bertsch en Centro de investigaciones Agronómicas, 2001 |
| | ND (Se propone 70%) | Ramírez D., s.f. |
| Microelementos | 5-50% (27,5% promedio) | Ramírez D., s.f. |

ND: No dato

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes.

La eficiencia de la fertilización dependerá de múltiples parámetros como las características del suelo, fuente del fertilizante, método (figura 16) y época de aplicación (el fertiriego es más eficiente, así como la incorporación del fertilizante al suelo), condiciones climáticas, características fenogenotípicas de la planta. Para la toma de la decisión de estas pérdidas de fertilizante, se propone tomar como guía la tabla 11 y los criterios del ingeniero agrónomo producto del conocimiento del suelo en el predio.



Figura 16. Cultivo de aguacate ‘Hass’ fertilización en media luna.

Fuente: Foto propia.

En general, la información obtenida de cada elemento es tomada como base elemental, ésta se convierte a como vienen expresados los fertilizantes comercialmente (como óxidos), en la tabla 12, se encuentran los factores de conversión, empleados para su obtención.

Tabla 12. Factores de conversión de la expresión en base elemental a óxido y viceversa

| | | | |
|-------------------------------|----------|---|-------------------------------|
| P ₂ O ₅ | x 0,4364 | = | P |
| P | x 2,2914 | = | P ₂ O ₅ |
| K ₂ O | x 0,8302 | = | K |
| K | x 1,2046 | = | K ₂ O |
| CaO | x 0,7147 | = | Ca |
| Ca | x 1,3992 | = | CaO |
| MgO | x 0,6030 | = | Mg |
| Mg | x 1,6582 | = | MgO |
| SO ₄ | x 0,3333 | = | S |
| S | x 3,00 | = | SO ₄ |
| B | x 3,22 | = | B ₂ O ₅ |

Fuente: Adaptado de Peña (2013), de International Fertilizer Development Center IFDC (1998).

En la tabla 13, se presenta los requerimientos del aguacate ‘Hass’ a diferentes edades, la información se tomó a los 7 años para el estudio de caso que se está realizando.

Tabla 13. Absorción-extracción de elementos por el aguacate ‘Hass’ con respecto a su edad en años

| Nutriente (kg.ha ⁻¹) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| N | 103,62 | 379,70 | 662,62 | 952,38 | 1248,98 | 1552,42 | 1868,70 | 2179,82 | 2503,78 | 2834,58 | 3172,22 | 3516,70 | 3868,02 | 4226,18 | 4591,18 |
| P | 9,16 | 34,66 | 60,97 | 88,10 | 116,05 | 144,81 | 174,39 | 204,79 | 236,00 | 268,03 | 300,88 | 334,54 | 369,02 | 404,31 | 440,42 |
| K | 29,31 | 151,08 | 274,64 | 400,00 | 527,15 | 65,608 | 786,81 | 919,34 | 1053,65 | 1189,76 | 1327,66 | 1467,35 | 1608,48 | 1752,11 | 1897,18 |
| Ca | 22,85 | 62,30 | 107,13 | 157,32 | 212,90 | 273,84 | 340,16 | 411,86 | 488,92 | 571,37 | 659,18 | 752,37 | 850,94 | 954,87 | 1064,19 |
| Mg | 5,21 | 12,10 | 34,35 | 71,96 | 124,92 | 193,25 | 276,94 | 375,99 | 490,40 | 620,16 | 765,29 | 925,78 | 1101,63 | 1292,84 | 1499,40 |
| S | 2,83 | 8,76 | 18,37 | 31,67 | 48,66 | 69,33 | 93,70 | 121,76 | 153,50 | 188,94 | 228,06 | 270,87 | 317,37 | 367,56 | 421,43 |
| Fe | 0,25 | 1,14 | 1,99 | 2,80 | 3,56 | 4,28 | 4,96 | 5,59 | 6,18 | 6,73 | 7,70 | 7,70 | 8,12 | 8,49 | 8,83 |
| Cu | 0,01 | 0,04 | 0,07 | 0,10 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,27 | 0,32 | 0,37 | 0,47 | 0,47 | 0,53 | 0,59 | 0,66 |
| Mn | 0,42 | 2,84 | 5,07 | 7,10 | 8,93 | 10,57 | 12,02 | 13,27 | 14,33 | 15,20 | 16,34 | 16,34 | 16,62 | 16,71 | 16,60 |
| Zn | 0,15 | 0,47 | 0,79 | 1,13 | 1,74 | 1,83 | 2,20 | 2,58 | 2,98 | 3,38 | 4,22 | 4,22 | 4,66 | 5,11 | 5,57 |
| B | 0,23 | 1,03 | 1,88 | 2,78 | 3,73 | 4,72 | 5,76 | 6,84 | 7,98 | 9,16 | 11,66 | 11,66 | 12,98 | 14,34 | 15,76 |

Fuente: Proyecto de Innovación “Optimización de planes de Fertilización mediante el uso de programación lineal y sensores de variables agronómicas y climáticas de los productores de aguacate en el oriente Antioqueño”.



En la tabla 14 se resumen los cálculos, donde primero se colocan los resultados del contenido de cada nutriente por hectárea en el suelo, luego los requerimientos del aguacate ‘Hass’ a la edad de 7 años, se aplica la ecuación 1, para cada uno de ellos y por último se multiplica por un factor que expresa los nutrientes como nitrógeno elemental, pentóxido de fósforo (P_2O_5), óxido de potasio (K_2O), calcio y magnesio como óxidos ($CaO-MgO$) y los demás como base elemental.

Tabla 14. Estimación del nivel de nutrientes para fertilización en aguacate ‘Hass’

| Elemento | Contenido en el suelo (Kg.ha ⁻¹) | Absorción - Extracción del nutriente por el fruto (Kg.ha ⁻¹) dato promedio de la consulta bibliográfica A | Absorción - Extracción del nutriente por la planta (Kg. ha ⁻¹) B | Eficiencia del fertilizante (%) | Ecuación 1 para A | Ecuación 1 para B | Factor de conversión | Dosis a aplicar por extracción del fruto (Kg. ha ⁻¹) A | Dosis aplicar por extracción de la planta a la edad de 7 años (Kg. ha ⁻¹)B |
|----------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| N | 83,16 | 33,13 | 1862,7 | 60 | -83,38 | 2965,90 | Igual | -83,38 | 2965,90 |
| P | 11,65 | 6,29 | 174,3949 | 25 | -21,44 | 650,98 | 2,2914 | -49,13 | 1491,65 |
| K | 139,23 | 40,05 | 786,8145 | 70 | -141,69 | 925,12 | 1,2046 | -170,67 | 1114,40 |
| Ca | 310,8 | 3,51 | 340,161 | 70 | -438,99 | 41,94 | 1,3992 | -614,23 | 58,69 |
| Mg | 75,6 | 2,98 | 276,939 | 70 | -103,74 | 287,63 | 1,6582 | -172,03 | 476,94 |
| S | 22,8 | 5,99 | 93,7017 | 70 | -24,01 | 101,29 | 3 | -72,04 | 303,86 |
| Fe | 1345,95 | 0,07 | 4,95728 | 50 | -2691,76 | -2681,99 | Igual | -2691,76 | -2681,99 |
| Cu | 4,2 | 0,03 | 0,222721 | 50 | -8,34 | 1,51 | Igual | -8,34 | 1,51 |
| Mn | 11,55 | 0,03 | 12,02081 | 50 | -23,04 | -22,65 | Igual | -23,04 | -22,65 |
| Zn | 3,42 | 0,05 | 2,20289 | 50 | -6,74 | 17,20 | Igual | -6,74 | 17,20 |
| B | 0,27 | 0,07 | 5,75726 | 50 | -0,40 | 3,87 | 3,22 | -1,29 | 12,45 |

Fuente: Elaboración propia.



Valores negativos indican que “teóricamente” no se necesitan reponer mediante la fertilización debido a que se encuentran con buena disponibilidad en el suelo. Se resalta en tono verde los valores a aplicar como fuente en base elemental.

Se observa un mayor requerimiento de nutrientes, cuando se emplea el nivel de extracción por toda la planta de aguacate ‘Hass’, lo que indica que emplear sólo la extracción del fruto, podría llevar a recomendaciones que no cubran las necesidades de la especie, ya que, para el estudio de caso, no se informa algún requerimiento, mientras que con la extracción de la planta los cálculos permiten que el asistente ingeniero agrónomo, encuentre deficiencias reales, acordes con los requerimientos de una especie como el aguacate, que demanda nutrientes para la producción de proteínas y aceites.

Debido a su alto potencial de rendimiento, el aguacate requiere una gran cantidad de nutrientes. El bajo estado de fertilidad del suelo y el suministro inadecuado de nutrientes afectan el crecimiento y el desarrollo del cultivo y reducen el rendimiento del cultivo (Selladurai & Awachare, 2020).

Así para el estudio de caso, se hace necesario la aplicación de fertilizantes como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, cobre, zinc y boro.

La dosis de fertilizante, el tipo, forma de aplicación, las determina el ingeniero agrónomo, distribuyéndola en porcentajes a lo largo del ciclo fenológico, según la especie, en general para especies perennes como el aguacate, esta se realiza anualmente, luego se debe dividir por el número de árboles de aguacate por hectárea, para obtener la dosis de los fertilizantes por árbol (Figura 17).



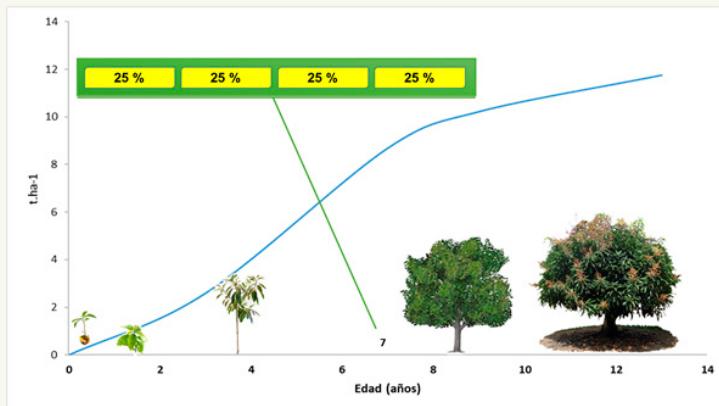


Figura 17. Ejemplo de la distribución de la dosis de fertilización en el séptimo año para aguacate 'Hass'.

Fuente: Elaboración propia.

Un paso más allá, integrando el análisis foliar con el análisis de suelos para la toma de decisiones en la fertilización del aguacate 'Hass'

La Integración entre el análisis foliar y el de suelos es posible, existen varias herramientas de interpretación del análisis de la hoja, pese a que en el pasado el diagnóstico sólo se refería a una etapa del crecimiento debido a la influencia fuerte que tiene la edad de la hoja, como relaciona Kumar (2012): Concentración crítica de nutrientes (Terblanche & Du Plessis 1992; Srivastava et al. 1999); rango de concentración de nutrientes (Padres & Dafir, 1992); balance de nutrientes usando el método factorial (Cantarella et al. 1992), el índice de balances de Kenworthy (Kenworthy, 1973), concepto de equilibrio de Moller-Nielson (Moller Nielson & Friis Nielson, 1976b); carga del cultivo (Abaev, 1977); y línea o frontera límite (Walworth et al., 1986) - todos sugieren un solo valor

de concentración y el sistema integrado de diagnosis y recomendación (DRIS) que considera la relación de nutrientes (Walworth & Sumner, 1987; Beverly, 1987).

Sobre el mecanismo de acción de los nutrientes en las hojas y en el caso de la fertilización foliar en aguacate, este es establecido como:

La absorción de nutrientes vía foliar ocurre como resultado de un gradiente que se establece entre la concentración de la disolución aplicada sobre la superficie de la hoja y la correspondiente en el interior de la epidermis (células). Cuando la cutícula seca se humedece, las moléculas de agua interactúan, mediante puentes de hidrógeno, con los grupos ionizables de las cadenas carbonadas, con lo cual provocan que estas últimas se separen formando canales, poros y cavidades que permiten el transporte de nutrientes, desde la superficie de la hoja hacia las células epidermales (Murillo et al., 2013).

Las utilidades del análisis vegetal pueden ser diversas tales como:

- Verificar síntomas de deficiencias nutricionales.
- Identificar deficiencias asintomáticas (“hambre oculta”).
- Indicar interacciones entre nutrientes.
- Localizar zonas del lote que se comportan en forma diferente.
- Evaluar el manejo nutricional de los cultivos (Correndo & García, 2012).

En las figuras 18 y 19 se observan ejemplos de árboles de aguacate uno mostrando deficiencias y otro sin síntomas.





Figura 18. Árbol de aguacate presentando síntomas de deficiencias visuales (hierro).
International Plant Nutrition Institute IPNI Brasil (s.f.).



Figura 19. Árbol de aguacate 'Hass' sin mostrar deficiencias visuales.
Fuente: Foto propia.

Para el estudio de caso, se realizará la evaluación de los niveles en las hojas del cultivo de aguacate 'Hass' con los datos de la tabla 8 y los rangos promedio de suficiencia de la tabla 7.

La metodología a emplear será el índice de balance de Kenworthy (1973), cuyo procedimiento es mencionado por Kumar (2012):

Se calcula el índice de balance de Kenworthy por el siguiente procedimiento:

1. Si un valor simple (X) es menor que los valores estándar (S), entonces el índice de balance se calcula mediante:

$$B = (P + I)$$

$$P = (X / S) \times 100$$

$$I = (100 - P) \times (V / 100)$$

donde B = índice de balance; I = influencia de la variación;

P = porcentaje del estándar; V = coeficiente de variación;

S = valor estándar; X = valor de la muestra foliar.

2. Si el valor de la muestra (X) es mayor que el valor estándar (S), entonces el cálculo será:

$$B = (P - I)$$

$$P = (X / S) \times 100$$

$$I = (P-100) \times (V / 100)$$

Estos cálculos tienden a mover el valor porcentual hacia un índice de balance de 100, basado en el coeficiente de variación para cada nutriente.

El índice de equilibrio ha sido utilizado por Awasthi et al. (1979) para calcular dosis de nutrientes para la manzana en Himachal Pradesh. Es posible entender el concepto de equilibrio de nutrientes cuando los valores del balance se convierten en porcentaje de los valores estándar. Por lo tanto, se necesita una forma de ajustar el porcentaje de los valores estándar para tener en cuenta la variación normal.

Esto se puede hacer con el uso de coeficientes de variación normales para las plantas para desarrollar un índice de equilibrio. Awasthi et al. (1979) transformaron el índice de equilibrio en el estado nutricional de las manzanas como se indica a continuación:

Escasez: índice del 17–50%; debajo de lo normal: índice de 50–83%; índice normal u óptimo: - 83–117%; índice por encima de lo normal: 117–150%; índice de exceso: 150–183%.



En la tabla 15 se presenta un resumen de los cálculos realizados para el índice de balance de Kenworthy, se emplea este índice, ya que ha dado buenos resultados para los cultivos de aguacate en la zona de Michoacán, México, según relaciona Rebolledo y Dorado, (2017):

La técnica de índices de balance de nutrientes (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 (Palacios, 1986; Núñez-Moreno et al., 1991; Salazar-García & Lazcano-Ferrat, 1999), así como en mangos de las variedades ‘Haden’ y ‘Tommy Atkins’ en Nayarit (Salazar-García et al., 1993) y limón mexicano en Michoacán (Maldonado et al., 2001).



Tabla 15. Resumen del cálculo de los índices de balance de Kenworthy para el estudio de caso.

| Parámetro análisis de tejido | Valor estándar (S) medida de los rangos de suficiencia de literatura (tabla 7) | Coef. de variación (V) (Desv. estándar/ media promedio) | RESULTADO FOLIAR (X) | Regla de decisión (si resultado foliar < valor estándar = “es menor que el estándar”)(si resultado foliar > valor estándar = “es mayor que el estándar”) | % del estandar (P) (RESULTADO DEL FOLIAR / VALOR ESTÁNDAR) X100 | Influencia de la Variación (I) ($I=(100-P) X (V/100)$) | Índice de Balance (si es menor =PH y si es mayor= P-I Se multiplica por 100 para convertirlo a %) | Rangos para decisión -Escasez (<50%) -Deabajo de lo normal (50-83%) -Óptimo (83-117%) -Encima de lo normal (117-150%) -Exceso (150-183%) |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| N (%) | 1,98 | 0,21 | 1,63 | Es menor que el estándar | 82% | 0,208271212 | 103,15033535 | Normal |
| P (%) | 0,16 | 0,26 | 0,26 | Es menor que el estándar | 163% | -0,255775 | 188,0775 | Exceso |
| K (%) | 1,35 | 0,29 | 1,02 | Es menor que el estándar | 76% | 0,287808889 | 104,3364444 | Normal |
| Ca (%) | 1,99 | 0,2 | 0,51 | Es menor que el estándar | 26% | 0,199487437 | 45,57688442 | Escasez |
| Mg (%) | 0,52 | 0,43 | 0,42 | Es menor que el estándar | 81% | 0,426526923 | 123,4219231 | Arriba de lo normal |
| S (%) | 0,4 | 0,25 | 0,12 | Es menor que el estándar | 30% | 0,24925 | 54,925 | Deabajo de lo normal |
| Fe (ppm) | 116,56 | 0,2 | 43,28 | Es menor que el estándar | 37% | 0,199257378 | 57,0568291 | Deabajo de lo normal |
| Cu (ppm) | 11,58 | 1,39 | 0,12 | Es menor que el estándar | 1% | 1,389855959 | 140,0218653 | Arriba de lo normal |
| Mn (ppm) | 191,74 | 0,23 | 98,17 | Es menor que el estándar | 51% | 0,228822411 | 74,0817821 | Deabajo de lo normal |
| Zn (ppm) | 84,08 | 0,16 | 15,29 | Es menor que el estándar | 18% | 0,159709039 | 34,15596575 | Escasez |
| B (ppm) | 98,15 | 0,19 | 61,96 | Es menor que el estándar | 63% | 0,188800571 | 82,00792257 | Deabajo de lo normal |

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del estudio de caso. Nota: en color se resaltan los resultados con escasez y debajo de lo normal.

Al considerar entonces la fertilización edáfica para nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, cobre, zinc y boro; también se establecen para el aguacate necesidades para el calcio, hierro, manganeso, zinc y se corroboran las de azufre y boro a nivel de la planta, esto tiene que ser confirmado con inspecciones visuales al huerto.



Análisis de fertilidad de suelos

La productividad de los suelos que usualmente está definida como la capacidad de producción de suelos de diferentes cultivos, es de gran importancia para el desarrollo de la economía rural, ya que, permite mejorar los ingresos con respecto a los costos de producción, y una de las partes más importantes a tener en cuenta en la investigación de la productividad de suelos, es el estudio de la fertilidad que hace referencia a la capacidad que tiene el suelo para aportar nutrientes en cantidades y proporciones adecuadas a las plantas.

Por lo anterior, no es raro que uno de los temas que comúnmente despierta interés es la fertilidad de los suelos, pero no se debe olvidar que una alta fertilidad no necesariamente se traducirá en una alta productividad, ya que, existen ciertos factores que pueden hacer improductivo el suelo, como lo son suelos compactados y suelos salinos, por ejemplo, algunas suelos tienen un alta capacidad de intercambio catiónico, pero al tener problemáticas de salinidad, presentan dificultad con la mayoría de cultivos.

El conocimiento de algunas propiedades y la fertilidad del suelo, nos permite intervenir de manera más efectiva en el manejo de los suelos, para mejorar sus propiedades y disminuir riesgos como erosión y salinización; igualmente es importante reconocer que estos análisis se deben realizar de forma periódica, ya que, los suelos se encuentran en constante cambio por diversos factores,

entre los que tenemos el intercambio de nutrientes entre el suelo y la planta, que puede generar algún tipo de agotamiento o deterioro del suelo, en caso de que no se recuperen los minerales absorbidos por la planta.

Los análisis realizados a los suelos nos deben permitir tomar decisiones que disminuyan la incertidumbre en su manejo y nos permita una mayor fertilidad a un menor costo, sin degradar las propiedades de los suelos a largo plazo. Otro tema que es importante tener en cuenta es que es bueno realizar anotaciones de la respuesta de los cultivos a diferentes tratamientos que recibió el suelo.

Dentro del análisis de fertilidad de suelos se pueden identificar tres etapas, la primera es el muestreo de suelos, la cual, es fundamental permitiendo garantizar la calidad del resultado analítico junto con el proceso de análisis, que es la segunda etapa. Por ultimo tenemos la interpretación de resultados, esta es esencial en el manejo de los suelos, ya que, permite tomar decisiones para mejorar la fertilidad y disminuir los riesgos a largo plazo de degradación y salinización de suelos, entre otros. Es importante realizar anotaciones de los resultados de laboratorio, medidas implementadas en las parcelas y respuestas de los cultivos frente a las medidas implementadas, todo lo anterior teniendo cuenta que la fertilidad es solo un factor dentro de la productividad.

Recordemos, que los programas de fertilización pueden ayudar en gran medida a aumentar la producción de los diferentes cultivos y que es importante que se realice de manera eficiente y evitando posibles daños a largo plazo, ya que, el suelo es el capital que nos permite la producción sostenible, por lo que es necesario que reconozcamos el suelo como factor fundamental en la producción y desarrollo de las comunidades, y se implementen buenas prácticas agrícolas, que impidan el deterioro del suelo.



Los análisis de suelos se deberían realizar periódicamente, ya que, el suelo cambia constantemente, por lo que sus contenidos de minerales y nutrientes también lo hacen, es aconsejable realizar estudios de suelos para el establecimiento de un cultivo, elaboración de terrazas y otras obras que cambiaran permanentemente el uso del suelo, o para las diferentes

etapas de producción de cultivos.



Análisis de laboratorio de suelos

Cuando se requiere conocer los componentes del suelo para la agricultura, debemos tener claros diferentes puntos para enviar y solicitar un análisis de suelos en el laboratorio.

El primer concepto a tener en cuenta es la disponibilidad de nutrientes, ya que, en el suelo existen muchas sustancias, pero dependiendo de las condiciones de cada suelo es posible que se encuentren en su estado disponible o no, o sea que es posible que el nutriente se encuentre en el suelo, pero que no pueda ser aprovechado por la planta bajo las condiciones actuales, ya que, no se encuentra disponible para la planta. Por esto es muy importante que cuando se requieren un análisis de suelos para determinar las necesidades para un cultivo, se requieran análisis de nutrientes disponibles en plantas y no sus totales, es también de tener en cuenta que en la parte de toxicidad se siguen las mismas reglas que para nutrientes, no necesariamente el hecho de que la sustancia tóxica exista significa que esta está disponible para la planta; pero hay una condición adicional; al realizar cambios en el pH, esto puede alterar la disponibilidad de nutrientes y sustancias tóxicas para la planta.

Acidez intercambiable: La acidez intercambiable en los suelos está dada principalmente por la presencia de aluminio e hidrógeno, la USDA encontró que la acidez intercambiable se encuentra a pH inferiores de 5,5; por lo que cuando tenemos pH superiores a este valor, la acidez intercambiable es posible que en los suelos se encuentre aluminio e hidrógeno, pero no de la forma intercambiable, por lo que muchos laboratorios reportarían no detectada o cero.

La acidez intercambiable para la mayoría de los cultivos entre los que encontramos el del aguacate no es considerada buena, ya que, la acidez intercambiable tiene que ver en gran medida con la disponibilidad de los

nutrientes, la mayoría presentan valores más bajos y el otro problema radica en que el aluminio intercambiable es tóxico para muchas de las plantas.

El aluminio intercambiable presenta problemáticas de toxicidad, pero de acuerdo con investigaciones experimentales realizadas, se ha encontrado que la mayor parte de la acidez intercambiable es dada por el aluminio intercambiable, por lo que para efectos agronómicos se aproxima el valor de acidez intercambiable al del Aluminio intercambiable, por lo que para procesos de enmiendas se ha aceptado que es suficiente trabajar con la acidez intercambiable.

Fosforo disponible: Existen diversos análisis de fosforo disponible y todos nos arrojarían muy seguramente resultados diferentes, lo cual no se debe a errores del laboratorio sino más bien a la disponibilidad de este nutriente, ya que puede estar en valores totales considerables, pero su disponibilidad varía mucho de acuerdo al pH, siendo así los métodos más utilizados para determinar fosforo disponible en suelos los métodos de BRAY II, para suelos ácidos y neutros y el método OLSEN para suelos alcalinos. Para determinar cuál de los dos se debe realizar, se puede verificar datos históricos de los suelos a analizar o utilizar literatura que nos diga en la región que pH se suele tener.

Capacidad de intercambio aparente: Es la cantidad de cationes que tiene el suelo y que es capaz de intercambiar con las plantas, se suele hallar como la suma de Aluminio (Al^{3+}), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Potasio (K^+) y Sodio (Na^+), es de tener en cuenta que estas bases incluyen tanto cationes que se consideran benéficos para la mayoría de las plantas, así como cationes que no lo son.

Capacidad de intercambio cationica: Es la capacidad que tiene el suelo para retener cationes, este concepto está íntimamente ligado con la capacidad de intercambio catiónico. Si lo miráramos como una metáfora, la capacidad de intercambio catiónico aparente es el alimento que hay para las plantas, mientras la capacidad de intercambio catiónica es la capacidad que tienen los suelos para adherir estos nutrientes a sus estructuras, se comportarían en la metáfora como la nevera o donde se almacenan los nutrientes, no tiene sentido comprar muchos nutrientes cuando no se tiene el lugar adecuado



para almacenarlo, resulta que en los suelos ocurre igual, una cosa es lo que tienen los suelos (nutrientes) y otra cosa es la capacidad de mantener y colocar en disponibilidad esos nutrientes para las plantas. Existen suelos que están agotados por falta de nutrientes pero que tienen muy buena capacidad de almacenamiento, por otra parte, existen suelos que no tienen nutrientes, pero tampoco están en la capacidad de almacenarlos y colocarlos a disposición de las plantas.

Bases intercambiables: al igual que en el fosforo disponible tienen diferentes extractantes como el acetato de amonio, acetato de sodio, pero en Colombia se trabaja usualmente el método de acetato de amonio 1N pH 7, ya que es el método normalmente utilizado para la clasificación de los suelos. Las bases que normalmente leemos son Potasio, Calcio y Magnesio que tienen una gran importancia en el crecimiento de la planta.

Materia orgánica: Los suelos son muy variables con respecto a la materia orgánica y su contenido es bajo en la mayoría de los suelos minerales de la superficie terrestre (0,5 - 5%) pero su comportamiento coloidal activo de la fracción orgánica ejerce una gran influencia en las propiedades químicas y físicas de los suelos (Hinrich et al., 1979).

La fracción orgánica está conformada por diferentes organismos vivos, plantas secas y residuos de origen animal, donde se almacenan varios de los elementos esenciales en los cultivos, se regula el pH y se mejoran las relaciones entre aire, agua y suelo.



La materia orgánica es un requisito fundamental en el manejo de los suelos, por un lado, porque la existencia de materia orgánica mejora las propiedades de los suelos en cuanto retención de humedad y de nutrientes, así como que la existencia de esta disminuye la probabilidad de erosión de los suelos. Dentro de los elementos esenciales en la materia orgánica encontramos el carbono y el nitrógeno orgánico.

El carbono orgánico se puede determinar por dos métodos, entre los que tenemos métodos de digestión húmeda, más conocida como el método de Walkley-Black y método de digestión seca. En Colombia se ha venido

utilizando el método de Walkley Black, para la determinación de carbono orgánico, por otra parte, en el país han llegado analizadores conocidos como CHN, y CHNS, y cuando se desea trabajar con estos métodos se debe verificar que el carbono analizado sea el orgánico y no el carbono total, ya que en la mayoría de las muestras de suelos se hace difícil constatar los valores reales de carbono orgánico o se utilizan relaciones empíricas las cuales no han sido comprobadas para los suelos en Colombia.



El papel de los microorganismos del suelo en la nutrición del cultivo del Aguacate Hass

Los microorganismos en el suelo aportan al sostenimiento y la salud del mismo al estar involucrados en el ciclo de los nutrientes y al dinamizar la materia orgánica del suelo, dentro de algunas otras funciones que cumplen se encuentra el desdoblaje de elementos (minerales), también contribuyen al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo como la estructura, al favorecer la agregación de las partículas, disminuyen la densidad aparente del suelo, aumentando el contenido de poros, mejorando la retención de agua y por ende el mejoramiento del rendimiento de los cultivos.

Los cultivos agrícolas en la zona conocida como rizosfera donde abundan la biomasa y la actividad microbiana, establecen relaciones específicas con los microorganismos del suelo que les permiten la toma de nutrientes, dentro de estos microorganismos se incluyen bacterias fijadoras de nitrógeno, hongos como las micorrizas. Algunos microorganismos pueden presentar un comportamiento patogénico pero una gran mayoría son de carácter benéfico y en estos últimos se enfocará el presente capítulo.

La rizosfera de las plantas está altamente colonizada por microorganismos. De todos ellos, entre el 1 y el 35% de los cultivables muestran antagonismo contra patógenos, mientras que dos terceras partes promueven el crecimiento



vegetal (Singh et al., 2011). Estos últimos pueden proveer tanto macro como micronutrientes, liberar fósforo de compuestos orgánicos como fitatos, modificar el pH del suelo, sobre todo del que rodea a la raíz, aumentando de ese modo la disponibilidad de fósforo y otros elementos, producir sideróforos que facilitan la captación de hierro, y hasta mejorar el «flavor» en frutillas.

El papel de los microorganismos se ha visto limitado debido a la alta presión que sufre los sistemas productivos con el uso de agroquímicos como insecticidas, fertilizantes, herbicidas y pesticidas en general, además de prácticas de adecuación del terreno como la labranza excesiva y el uso de maquinaria pesada.

En la mayoría de los sistemas productivos no se tiene en cuenta la relación planta microorganismos, por la rapidez posiblemente con que funcionan los fertilizantes de síntesis química, hoy que la humanidad está volcando su mirada a la conservación y preservación de los recursos naturales y se habla en términos de sustentabilidad y sostenibilidad ambiental, se están adoptando modelos de producción más amigables con el ambiente, profundizando en el estudio de los microorganismos del suelo, sus funciones, las relaciones que tejen en los ecosistemas y su contribución con la recuperación de suelos degradados.

Debería dedicarse una mayor atención al estudio de las interacciones planta-microorganismos, Garg y Chadel (2010) afirman que de esta manera se podría lograr un manejo sustentable de la fertilidad del suelo y la producción de los cultivos





El papel bioquímico de los microorganismos

La bioquímica es una ciencia que se encarga de estudiar los procesos químicos que ocurren en los seres vivos de esta manera Berg (2009) asegura que los microorganismos del suelo degradan moléculas complejas de materia orgánica, formando humus. El humus se asocia con las arcillas para formar el complejo arcillo-húmico, que favorece la aireación, el almacenamiento de agua y la fertilidad. El humus será mineralizado posteriormente, lentamente, liberando el nitrógeno y otros elementos, que se vuelven así disponibles para las plantas.

Dentro de otras funciones bioquímicas estarían la solubilización de los minerales. Los elementos contenidos en los minerales del suelo (K, Ca, Mn, Mg, etc.) pueden también ser solubilizados por los microorganismos edáficos y volverlos asimilables para las plantas, algunas bacterias participan también en la fijación de nitrógeno de nitrógeno atmosférico.



Microorganismos fijadores de Nitrógeno



Micorrizas

Las raíces de los vegetales pueden ser colonizadas por un gran número de especies de hongos, tanto en superficie como en su interior. A esta asociación de un hongo filamentoso con la raíz de una planta se denomina “micorriza”. El término micorriza se aplica a cerca de 6.000 hongos diferentes, que establecen relaciones con las raíces de las plantas. El número y la variedad de plantas que pueden asociar sus raíces a un hongo es muy grande. La relación establecida



entre hongo y raíz es también muy variable. Son posibles todos los grados de interdependencia y de especificidad (algunas especies de hongo sólo pueden asociarse con una sola especie de vegetal) (Johansson, 2004).

Las micorrizas se clasifican en dos grandes grupos, si las hifas de los hongos permanecen en el exterior de la raíz son ectomicorrizas y si penetran en el interior son endomicorrizas.



Ectomicorrizas

Son de pequeña talla, generalmente carnosas y en que las radículas de la planta huésped pueden llegar a desaparecer en favor de estructuras engrosadas de formas características y de coloración variable (gris, blanco, rojo, azulado, amarillo, ocres, negro, etc). El micelio del hongo sólo penetra parcialmente los espacios intercelulares de los tejidos corticales sin penetrar dentro de las células.



Endomicorrizas

El aspecto exterior es poco indicativo de su existencia. Aunque hay escasez de pelos absorbentes, las raíces jóvenes presentan opacidades y son más carnosas. Aquí el micelio penetra y se instala en el interior de las células del parénquima de la raíz y en su interior. Las endomicorrizas aparecen en diversidad de plantas, herbáceas, leñosas, etc.



Las micorrizas son muy importantes, sobre todo para los árboles, para los que no sólo intervienen como aporte de fósforo sino también de otros elementos, incluso de agua. El fósforo es un elemento poco móvil dentro del suelo. Las micorrizas aumentan considerablemente el volumen de suelo explorado por las raíces. Se ha estimado que la inoculación con micorrizas puede reducir un 80% las aplicaciones de fertilizantes fosfóricos (Johansson, 2004).

Existen numerosos estudios que demuestran cómo la presencia de micorrizas aumenta la tolerancia de la planta a la presencia de ciertos microorganismos patógenos. Se ha demostrado para *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Verticillium*,

Thievalopsis, *Aphanomyces*, *Phytophthora* y *Pythium* y también para nematodos del género *Heterodera*, *Meloidogyne*, *Pratylenchus* y *Radopholus* (Richardson et al., 2009).

Tabla 16 Principales servicios ecosistémicos que ofrecen las micorrizas arbusculares.

| Función de las micorrizas arbuculares (MA) | Servicio ecosistémico que realizan |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modificación de la morfología de las raíces y creación de una red de micelio en el suelo. | Aumenta la adherencia planta/suelo y la estabilidad del suelo (mejora de la estructura del suelo). |
| Aumento del agua y los minerales disponibles para la planta. | Aumento del crecimiento de las plantas y disminución del uso de fertilizantes. |
| Amortiguación del efecto del estrés abiótico. | Aumenta la resistencia de las plantas a sanidad contaminación por metales pesados y niveles bajos de nutrientes minerales. |
| Secreción de glomalina en el suelo. | Aumento de la estabilidad del suelo y la retención de agua. |
| Protección contra patógenos de las raíces. | Aumenta la resistencia de las plantas al estrés biótico y reduce el uso de pesticidas. |
| Modificación del metabolismo y fisiología de las plantas. | Bioregulación del desarrollo de la planta y aumento de la calidad de la planta para la salud humana. |

Fuente: Gianinazzi, et al. (2010)



Hongos del género trichoderma.

El género Trichoderma está compuesto por hongos que se encuentran presentes en forma natural, en casi todos los suelos y hábitats del planeta. se caracteriza porque se desarrolla rápidamente por ser un microrganismo dominante y agresivo; emite gran cantidad de esporas de color verde. Es un hongo que frecuentemente se encuentra sobre madera y tejidos vegetales en descomposición.



Al introducir en el suelo algún producto con este hongo, las cepas de *Trichoderma* germinarán y desarrollarán un micelio con las condiciones óptimas y necesarias para actuar frente a los patógenos que estén presentes en el suelo o que pudieran llegar a aparecer (Cervantes s.f.).

Zamora (2014) asegura que este hongo es muy territorial y donde se establece no permite el desarrollo de muchos otros hongos especialmente patógenos de los géneros *Fusarium spp*, *Phytophtora spp*, *Rhizoctonia spp* y varios tipos de hongos más, así mismo, inhibe el desarrollo de muchas especies de nematodos que parasitan las raíces.



Hongos solubilizadores de fosfato

Este grupo funcional de microorganismos está involucrado en un amplio rango de procesos que afectan la transformación del fósforo, siendo un componente integral del ciclo edáfico de este nutriente (Beltrán, 2014).

Dos cepas de hongos pertenecientes a los géneros *Scopuraliopsis sp.* y *Penicillium* son ácidotolerantes; por esta razón tienen un mejor potencial para ser usados como agentes que convierten fósforo inorgánico e insoluble a formas solubles utilizables por las plantas en suelos ácidos y poseen un alto potencial para la fabricación de biofertilizantes (Chuang, 2007, citado en Beltrán, 2014).



Los hongos del género *Aspergillus*, *Penicillum* y *Rhizopus* degradan ácidos nucleicos y glicerofosfatos o fosfatos simples. Las levaduras del género *Sacharomyces* y *Rhodotorula* cumplen la misma función que los hongos. El actinomiceto *Streptomyces* destruye las moléculas orgánicas fosfatadas liberando así el fosforo (Zamora, 2014).



Bacterias Fijadoras de Nitrógeno

La fijación de nitrógeno se da por medio de una relación simbiótica (relación estrecha) de bacterias del tipo *Rhizobium* que viven en los nódulos radiculares de las leguminosas. Cuando los pelos absorbentes de una raíz entran en contacto con una de estas bacterias, los pelos se ensortijan (unen) y forman un nódulo. Una vez dentro del nódulo la bacteria obtiene los nutrientes necesarios (compuestos del carbono) y el oxígeno de la planta; a su vez la planta recibe compuestos nitrogenados producidos por la bacteria. Esta relación estrecha se ve afectada por fertilizaciones excesivas de nitrógeno, luz, encharcamiento, presencia de herbicidas y productos de síntesis química en general.

Las Bacterias fijadoras de nitrógeno también actúan en las hojas y tallos de las plantas. La mayor actividad de las fijadoras de nitrógeno se alcanza con la humedad adecuada en el suelo y con una fuente de carbono accesible como material vegetal en descomposición (pajás, socas o subproductos de cosecha) (Zamora, 2014).

Hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) (nutrición), *Trichoderma* spp y *Paecelomyces* spp (incidencia de pudriciones radiculares) mejoran la nutrición de las plantas y actúan como controladores biológicos contra *Fusarium* sp y *Phytophtora cinnamomi* su biofertilización al momento del trasplante le otorga al material vegetal tolerancia frente a condiciones de estrés biótico y abiótico (Bolaños & Sáenz, 2009).

Investigaciones estratégicas y aplicadas han demostrado el interés de ciertas actividades de cooperación microbiana para ser explotadas como una biotecnología de bajo impacto y costo para contribuir con prácticas agro-tecnológicas sustentables y amigables con el ambiente (Richardson et al., 2009).

Actualmente Agrosavia adelanta estudios en la identificación y clasificación de microorganismos descomponedores de hojarasca, micorrizas y bacterias solubilizadoras de fosfatos específicamente para aguacate “Hass” ya que la información sobre este tema en particular es escasa para este cultivo, la investigación la encabeza el ingeniero agrónomo Álvaro Tamayo.

Estos son algunos de los microorganismos utilizados en prácticas de biofertilización que consiste en inocular el suelo con cepas de diferentes microorganismos y de esta manera aumentar su contenido y optimizar el proceso de fertilización química.



Biofertilizantes

Los biofertilizantes son productos a base de microorganismos que viven en el suelo, aunque en poblaciones bajas, al incrementar su contenido por medio de la inoculación y por su actividad biológica son capaces de poner a disposición de las plantas, una parte importante de las sustancias nutritivas que necesitan para su desarrollo, así como suministrar sustancias hormonales o promotoras del crecimiento (Castilla, 2006).

Según la red de acción en alternativas al uso de agroquímicos (RAAA, 2006, citado por Castilla, 2006) la biofertilización consiste en el uso de microorganismos para mejorar la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas en la solución del suelo.

Se espera contribuir con el presente documento para que el productor sea eficiente en el establecimiento y posterior manejo de su cultivo de aguacate ‘Hass’, logrando la mejora constante de sus producciones, tanto para la producción local como para la exportación.

Referencias

- Alfonso Bartoli, J. A. (2008). Manual técnico del cultivo del aguacate Hass. In *Fundación Hondureña de Investigación Agrícola*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Apuntes elaborados por: Asociación Vida Sana (s.f.). *Microorganismos del suelo y biofertilización*. Recuperado de: https://cultivos-tradicionales.com/upload/file/dossier-5_microorganismos-del-suelo-y-biofertilizacion-2.pdf
- Bariya, H., y Ahish, P. (2014). Boron: A Promising Nutrient for Increasing Growth and Yield of Plants. *Plant Ecophysiology*, 10(September 2014), 287. https://www.researchgate.net/publication/269070969_Boron_A_Promising_Nutrient_for_Increasing_Growth_and_Yield_of_Plants
- Barrera, J., Cruz, M., & Melgarejo, L. M. (2010). Nutrición mineral. In L. M. Melgarejo (Ed.), *Experimentos en fisiología y bioquímica vegetal* (1st ed., p. 277). Universidad Nacional de Colombia. http://bdigital.unal.edu.co/8545/14/07_Cap05.pdf
- Bhatla, S. C., & Lal, M. A. (2018). *Plant physiology, development and metabolism*. Springer.
- Beltrán, M. E. (2014). Hongos solubilizadores de fosfato en suelo de páramo cultivado con papa (*Solanum tuberosum*). *Revista Ciencia en Desarrollo*, 5, (2). Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v5n2/v5n2a09.pdf>
- Berg, G., Alavi, M., Schmid, M. & Hartmann, A. (2013). The rhizosphere as a reservoir for opportunistic human pathogenic bacteria. *Molecular Microbial Ecology of the Rhizosphere*, 1 & 2, 1, 1209-1216. doi: 10.1002 / 9781118297674.ch116
- Bio-sistemas, C. de. (s.f.). *Guía para la toma de muestra foliar*. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Recuperado Junio 25, 2020, de https://www.utadeo.edu.co/sites/tadeo/files/node/wysiwyg/muestreo_para_analisis_foliares.pdf
- Blakey, R., y Wolstenholme, N. (2014). 35 Years of the SAAGA Yearbook : A Review. *Saags, November*, 1-155. <https://doi.org/10.13140/2.1.4156.7040>
- Bolaños, M., & Sáenz, E. (2010). Efecto de hongos benéficos sobre la nutrición y sanidad de aguacate. En: *Memorias del III Congreso Latinoamerica del Aguacate*. Medellín, Colombia (pp. 48-58).
- Bohn, & Hinrich, L. (1993). *Química del suelo*. México: Editorial Limusa, Noriega Editores

Calaña N., J. M. (2008). *Comparación de dos métodos de cálculo para la determinación de las dosis de N, P2O5 y K2O a aplicar en la fertilización del cultivo de la caña de azúcar (Saccharum sp.)* [Universidad de la Habana]. <http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/2842/2/Comparacion%20de%20m%C3%A9todos%20de%20c%C3%A1lculo%20para%20determinaci%C3%B3n%20de%20N%2C%20P2O5%20y%20K2O%20en%20fertilizaci%C3%B3n%20del%20cultivo%20de%20ca%C3%A1na%20de%20az%C3%BCcar.pdf>

Campos S, R. (2012). *Manual de suelos guías de laboratorio y campo*. Universidad de la Salle.

Castro, M., Darrouy, N., & Mamani, J. (2007). Anatomical and morphological characterization of roots of seedling and clonal avocado (*Persea americana* Mill) rootstocks. *VI World Avocado Congress*, 11.

Castilla, L. A. (2006). La biofertilización en el manejo integrado de nutrientes para la nutrición vegetal. En A. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. *Biofertilización: Alternativa viable para la nutrición vegetal* (pp. 7-16). Tolima, Colombia.

Cervantes, M., (s.f.). Beneficial microorganisms for soil

Ciampitti, I. A., y García, F. O. (s.f.). *Requerimientos Nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios*. Retrieved June 28, 2020, de [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/1C1039297E6D798603257967004A2A-8C/\\$FILE/AA 11.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/1C1039297E6D798603257967004A2A-8C/$FILE/AA 11.pdf)

Correndo, A. A., y García, F. O. (2012). Archivo Agronómico # 14. *Archivo Agronómico # 14*, 1-8. [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/DDBAEC0992C9039F-852579B3005ACE5D/\\$FILE/AA 14.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/DDBAEC0992C9039F-852579B3005ACE5D/$FILE/AA 14.pdf)

Durán Ramírez, F. (s.f.). *Cultivo de aguacate o palta*. Grupo Latino Editores S.A.S. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1001699/1/ATLASLAC.pdf>

Fernández, V., Sotiropoulos, T., y Brown, P. (2015). *Fertilización foliar: Principios científicos y práctica de campo*. https://www.researchgate.net/publication/283908842_Fertilizacion_Foliar_Principios_Cientificos_y_Practicas_de_Campo

Franco, M., Leos, J., Salas, J., Costa, M., y García, A. (2018). Análisis de costos y competitividad en la producción de aguacate en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 391–403. <http://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/editorial/index.php/agricolas/article/view/1080/908>

Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M. L., Montanarella, L., Muñiz

- Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M. I., Vargas, R., & Olmedo, G. F. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. <https://doi.org/10.2788/37334>
- Garg, N., & Chandel., S. (2010). Redes de micorrizas arbusculares: procesos y funciones. Una revisión. *Agron. Sostener. Dev.* 30, 581–599 (2010). Doi: 10.1051/agro/2009054
- Gianinazzi, S., Gollotte, A., Binet, M., Tuinen, D., Redecker, D., Wipf, D. (2010). Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza* 20, 519–530.
- GlobalGAP Ver.5.2. (2019). INTEGRATED FARM ASSURANCE All Farm Base-Crops Base-Fruit and Vegetables CONTROL POINTS AND COMPLIANCE CRITERIA INTEGRATED FARM ASSURANCE All Farm Base CONTROL POINTS AND COMPLIANCE CRITERIA (Issue 1). https://www.globalgap.org/.content/.galleries/documents/190201_GG_IFA_CPCC_FV_V5_2_en.pdf
- Haifa Group. (s.f.). *How to identify and handle plant nutrient deficiencies - Part 2* -. Recuperado Agosto 3, 2020, from <https://www.youtube.com/watch?v=EfbAuheegic>
- Ibañez, J. J. (2011). El concepto de suelo, su clasificación y representaciones canónicas. *Suelos Ecuatoriales*, 41(1), 19–22. https://www.researchgate.net/publication/254256356_El_Concepto_de_Suelo_Su_Clasificacion_y_Representaciones_Canonicas
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (s.f.). GUÍA DE MUESTREO. In IGAC. Recuperado Junio 21, 2020, from <https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/guiaudemuestreo.pdf>
- Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura. (s.f.). *Las 4R's para el Manejo Responsable de la Fertilización | Intagri S.C.* Las 4R's Para El Manejo Responsable de La Fertilización. Recuperado Junio 21, 2020, de <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/las-4rs-para-el-manejo-responsable-de-la-fertilizacion>
- International Plant Nutrition Institute IPNIBrasil. (s.f.). *Figura 13. Aguacate con deficiencia de hierro* (p. 90). <https://www.facebook.com/IPNIBrasil/photos/a.548290018573493/1979443328791481>
- Johansson, J., Paul, L., & Finlay, R. (2004). Interacciones microbianas en la micorrizosfera y su importancia para la agricultura sostenible. *FEMS Microbiology Ecology*, 48, 1-13. doi: 10.1016/j.femsec.2003.11.012

- Kumar, S. A. (2012). *Advances in Citrus Nutrition*. Springer.
- Gutiérrez, M. (2015). *Carbono como indicador de degradación de la calidad del suelo bajo diferentes coberturas en el páramo de Guerrero*. <http://bdigital.unal.edu.co/50818/1/53120928.2015.pdf>
- López, C. L. (2018). *Diseño de un plan de negocios para la producción, distribución y comercialización de aguacate Hass a Estados Unidos* [Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6887/1/5131543-2018-II-GE.pdf>
- Lovatt, C. J. (2013). Properly Timing Foliar-applied Fertilizers Increases Efficacy: A Review and Update on Timing Foliar Nutrient Applications to Citrus and Avocado. *HortTechnology*, 23(5), 536–541. <https://journals.ashs.org/horttech/view/journals/horttech/23/5/article-p536.xml>
- Maldonado-Torres, R., Álvarez-Sánchez, M., Almaguer-Vargas, G., Barrientos-Priego, A., y García-Mateos, R. (2007). Estandares Nutricionales para Aguacatero 'HASST'. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1), 103–108. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60913114>
- Meléndez, G., & Molina, E. (2002). *Fertilización foliar: Principios y aplicaciones*.
- Mora, A., & Téliz, D. (2007). *El Aguacate y su Manejo Integrado* (2 ed.). Mundi-Prensa.
- Murillo Castillo, R. G., Piedra Marín, G., & León, R. G. (2013). Absorción de nutrientes a través de la hoja. *Uniciencia*, 27(1), 232–244.
- Osman, K. T. (2014). *Soils principles, properties and management*.
- Peña V., R. A. (2013). *Manual técnico para la interpretación de análisis de suelos y fertilización de cultivos*.
- Rebolledo, A., & Dorado, D. (2017). Criterios para la definición de planes de fertilización en el cultivo de aguacate Hass con un enfoque tecnificado. In *Criterios para la definición de planes de fertilización en el cultivo de aguacate Hass con un enfoque tecnificado*. <https://doi.org/10.21930/978-958-740-237-7>
- Rebolledo R., A., & Romero, M. A. (2011). Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 12(2), 113–120. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945031004>
- Richardson, A. E., Barea J. M., McNeill, A. M., & Col (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil* 321, 305-339. doi 10.1007/s11104-009-9895-2.

- Rosecrance, R., Faber, B., y Lovatt, C. (2012). Patterns of nutrient accumulation in Hass avocado fruit. In *Better Crops* (Vol. 96, Issue 1). <http://info.ipni.net/BCADDENDA>.
- Ruiz, D. A., & Rengifo M., P. A. (2018). Optimización de la fertilización del cultivo de aguacate cv. Hass (*Persea americana Mill.*). *Revista Encuentro SENNOVA Del Oriente Antioqueño*, 4ta Ed., 23–35. https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/5111/1/iv_encuentro_sennova_oriente_2018.pdf
- Salazar-Garcia, S., & Cortés-Flores, J. I. (1986). Root Distribution of Mature Avocado Trees Growing in Soils of Different Texture. In *California Avocado Society* (Vol. 70).
- Schaffer, B., Wolstenholme, N. B., & Whiley, A. W. (2013). The avocado: botany, production and uses. In B. Schaffer, N. B. Wolstenholme, & A. W. Whiley (Eds.), *CPI Group (UK) Ltd* (2nd ed.).
- Selladurai, R., & Awachare, C. M. (2020). Nutrient management for avocado (*Persea americana miller*). *Journal of Plant Nutrition*, 43(1), 138–147. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659322>
- Singh, S., Kushwaha, B., Nag, S., Mishra, A., Bhattacharya, S., Gupta, P., & Singh, A. (2011). In vitro methane emission from Indian dry roughages in relation to chemical composition. *Current science*, 101 (1), 57-65. Recuperado de: <https://www.currentscience.ac.in/cs/Volumes/101/01/0057.pdf>
- Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2013). *Ciencia del Suelo: principios básicos*. Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Tamayo V., Á., Bernal E., J. A., & Díaz D., C. A. (2018). Composition and removal of nutrients by the harvested fruit of avocado cv. Hass in Antioquia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 71(2), 8511–8516. <https://doi.org/10.15446/rfna.v71n2.71929>
- Tasistro, A. S. (s.f.). *Muestreo de Suelos*. International Plant Nutrition Institute (IPNI). Recuperado Junio 21, 2020, de [http://mca.ipni.net/ipniweb/region/mca.nsf/0/E175BE252981B16385257FA9005320C2/\\$FILE/Muestreo de Suelos_web.pdf](http://mca.ipni.net/ipniweb/region/mca.nsf/0/E175BE252981B16385257FA9005320C2/$FILE/Muestreo de Suelos_web.pdf)
- The Potash Development Association. (2011). Soil Analysis Key to Nutrient Management Planning. In *The Potash Development Association*. <https://www.pda.org.uk/wp/wp-content/uploads/2015/12/PDA-If24.pdf>
- Zamora, S. (2014). Manual de microbiota en la remineralización de suelos en manos campesinas.



The logo for SENNOVA consists of the word "SENNova" in a bold, white, sans-serif font. The letter "N" has a circular swirl graphic integrated into its upper loop. A thin vertical line is positioned to the left of the text.

