

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMIA



**Estado nutricional de los principales suelos agrícolas de la
ceja de selva del distrito de Santa Rosa, provincia La Mar,
Región Ayacucho.**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRONOMO

PRESENTADO POR:

Edward Arce Moreyra

**Ayacucho – Perú
2017**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMIA

TESIS

**Estado nutricional de los principales suelos agrícolas de la
ceja de selva del distrito de Santa Rosa, provincia La Mar,
Región Ayacucho**

Expedido : 28 de diciembre 2017

Sustentado : 11 de enero 2018

Calificación : Bueno

Jurados :

M.SC. JOSÉ ANTONIO QUISPE TENORIO
Presidente

M.SC. ALEX LÁZARO TINEO BERMÚDEZ

ING. JUAN BENJAMÍN GIRÓN MOLINA

DR. RAÚL JOSÉ PALOMINO MARCATOMA
Asesor

A mis padres Alfonso Arce Palomino
y María Moreyra Gutiérrez por el
enorme sacrificio realizado en lograr
mi profesión.

A mi esposa Hilda y mi hija Mariam
Ángeles, por brindarme su cariño y amor
en los momentos difíciles, que han
fortalecido en el cumplimiento de mis
metas.

A mis hermanos Efraín, Rayda,
Roger, Jaqueline, Julio, Máximo
y María.

A todos los agricultores del VRAEM.
dedicados al cultivo de cacao y café.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga alma mater de mi formación Profesional.

A la Facultad de Ciencias Agrarias por acogerme en sus ambientes hasta culminar mi formación Profesional.

Al programa de Investigación en Pastos y Ganadería – área de suelos, por brindarme sus ambientes para la realización de esta investigación.

Al Dr. Raúl José Palomino Marcatoma, por su asesoramiento y brindarme su tiempo para la realización y culminación de este trabajo.

A los docentes de la Facultad de Ciencias Agrarias por transmitir sus conocimientos y concejos.

Agradecer el apoyo moral y constante del Sr. Faustino Enciso Cisneros y Sra. Benigna Huamán Vega.

Al Técnico Agropecuario y amigo Ramón Loayza Yauli por su apoyo incondicional en el presente trabajo.

INDICE GENERAL

	Pag.
Dedicatoria.....	i
Agradecimiento.....	.ii
Índice general.....	.iii
Índice de cuadros.....	iv
Índice de figuras.....	iv
Índice de gráficos.....	v
Índice de anexos.....	v
Resumen.....	.vii
Introducción.....	1
CAPITULO I: MARCO TEORICO.....	3
1.1. Conceptos de Fertilidad y productividad del suelo.....	3
1.2. Nutrición mineral de las plantas.....	7
1.3. Evaluación de la fertilidad del suelo.....	33
CAPITULO II: METODOLOGIA	45
2.1. Ubicación	45
2.2. Técnica del elemento faltante.....	54
2.3. Interpretación de los niveles de nutrientes de los suelos.....	58
2.4. Diseño experimental y análisis estadístico.....	58
2.5. Correlación entre el R.R. de M.S. y las propiedades químicas de los suelos...60	60
2.6. Determinación del nivel crítico	61
CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSION	65
3.1. Estado nutricional de los suelos.....	65
3.2. Determinación de los niveles críticos mediante el ajuste a los modelos continuos y discontinuos	80
3.3. Interpretación de los niveles de nutrientes del análisis foliar.....	98

	Pag.
CONCLUSIONES	108
RECOMENDACIONES	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXOS	116

INDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1.	Algunas características de los suelos estudiados.....	49
Cuadro 2.2.	Variables y metodología de análisis de laboratorio.....	51
Cuadro 2.3.	Tratamientos para técnica del elemento faltante.....	55
Cuadro 2.4.	Niveles y fuentes de los elementos.....	57
Cuadro 2.5.	Análisis de Variancia en el DCR.....	59
Cuadro 2.6.	Relaciones entre tratamientos y contenido de nutrientes.....	61
Cuadro 3.1.	Análisis de caracterización de las muestras de los suelos estudiados.....	66
Cuadro 3.2.	Análisis de variancia del rendimiento de materia seca (g/maceta)...	74
Cuadro 3.3.	Análisis de variancia de los efectos simples del rendimiento de materia seca (g/maceta).....	76
Cuadro 3.4.	Coefficiente de determinación (R^2) del ajuste a 6 modelos matemáticos entre el análisis químico de suelos y el % de R.R. de los suelos.....	81
Cuadro 3.5	Concentración de nutrientes absorbidos por las plantas (%).....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Modelo del plástico transparente que sobre puesta al grafico se usa para determinar los valores críticos del análisis de suelo.....	63
-------------	--	----

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pag.
Gráfico 3.1. Prueba de Tukey del rendimiento de M.S. (g/maceta) de los suelos en los tratamientos.....	77
Gráfico 3.2. Prueba de Tukey del rendimiento de M.S. (g/maceta) de los tratamientos en los suelos.....	79
Gráfico 3.3 Tendencia del R.R. (%) en relación al contenido de M.O.....	82
Gráfico 3.4. Tendencia del R.R. (%) en relación al contenido de P.....	84
Gráfico 3.5. Tendencia del R.R. (%) en relación al contenido de K.....	85
Gráfico 3.6. Nivel crítico del N-total en los suelos.....	88
Gráfico 3.7. Nivel crítico del P en los suelos.....	89
Gráfico 3.8. Nivel crítico del K en los suelos.....	92
Gráfico 3.9. Nivel crítico del S en los suelos.....	94
Gráfico 3.10 Nivel crítico del Ca en los suelos.....	95
Gráfico 3.11 Nivel crítico del Mg en los suelos.....	98
Gráfico 3.12 Absorción de N (%) por la planta.....	100
Gráfico 3.13 Absorción de P (%) por la planta	101
Gráfico 3.14 Absorción de K (%) por la planta	103
Gráfico 3.15 Absorción de S (%) por la planta	104
Gráfico 3.16 Absorción de Ca (%) por la planta	106
Gráfico 3.17 Absorción de Mg (%) por la planta.....	107

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 01. Rendimiento de M.S. (g/maceta) en los suelos y tratamientos	117
Anexo 02. Fotografías del experimento del elemento faltante	120

RESUMEN

El presente trabajo de tesis se realizó en el invernadero del programa de investigación en pastos y ganadería – área de suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNSCH. Con la finalidad de evaluar el estado nutricional de los suelos agrícolas de ceja de selva de distrito Santa Rosa, provincia La Mar, identificando los nutrientes deficientes, relacionar las propiedades químicas de los suelos y su estado nutricional a través de la producción de materia seca y determinar los niveles críticos de los principales nutrientes mediante el ajuste a los modelos continuos y discontinuos. Los suelos estudiados provienen de 10 comunidades del distrito de Santa Rosa, provincia La Mar, distribuidos en zonas (baja, media y alta), la investigación se realizó en etapas de campo, laboratorio e invernadero, utilizando la metodología del elemento faltante, empleando el Diseño de Bloques Completamente Randomizado (DCR) con un arreglo factorial de 9 tratamientos por 10 suelos y tres repeticiones.

En los resultados de la comparación de las medias, el tratamiento completo es la que reporta mayor rendimiento y la producción de materia seca en los suelos de Anteccasa, Rinconada Baja y la Victoria. En la determinación de los niveles críticos mediante el ajuste de los modelos continuos con respecto al contenido de materia seca fue 2.2%, de Fosforo, 5.1 ppm. para el Potasio 26.9 ppm. para los modelos discontinuos el Nivel Crítico de Nitrógeno hallado es 0.175 de N-total, para el Fosforo 10.0 ppm. para el Potasio 42.5 ppm. para el Azufre 2.4 ppm. Para el Calcio 5.8 $\text{Cmol}_{(+)} \text{Kg}^{-1}$ de Ca., y para el Magnesio 2.6 $\text{Cmol}_{(+)} \text{Kg}^{-1}$ de Mg. En la interpretación de los niveles de nutrientes del análisis foliar del Nitrógeno fue en los suelos de Unión Luisiana y San Cristóbal, para el Fosforo los suelos de Unión Luisiana, Unión Mejorada y Huantachaca con mayor porcentaje de absorción, para el Potasio no existen grandes diferencias entre los tratamientos considerados. Para el Azufre tiene similar tendencia al Nitrógeno, con respecto al Calcio no se ha observado síntomas perceptibles de carencia y para el Magnesio tiene la misma tendencia al de Calcio, la aportación a los suelos deficientes en este elemento ha repercutido favorablemente en la absorción de la planta.

INTRODUCCIÓN

El suelo es el producto de la descomposición de las rocas substrato llevada a cabo por la meteorización y la erosión. Pero aunque, el suelo sea el resultado de la descomposición, es también un medio de crecimiento y como fuente del suministro de casi todos los alimentos, resulta para la humanidad el más valioso y el menos privilegiado de todos sus bienes naturales.

Después de muchos siglos de usar y abusar de los suelos, en la actualidad se reconoce el papel que juega en el ambiente y su importancia para el mantenimiento de la vida de la mayoría de los organismos. Tal vez se puede afirmar que los suelos son el más grande recurso natural, ya que de ahí provienen directa o indirectamente, los alimentos y las materias primas. La mayoría de los suelos tardan miles o, inclusive, millones de años en formarse; esto significa que es casi imposible recuperarlos después de que han sufrido desgaste por la erosión. Así, es de vital relevancia conservarlos sanos y fértiles a través de las generaciones (Brady y Weil, 2008).

Tal como reconoce Brown (1987), en la actualidad, hay un gran interés en la explotación de los suelos, pero para que puedan utilizarse adecuadamente, es necesario reconocerlos como sistemas con elementos físicos, químicos y biológicos altamente organizados, además de conocer a fondo su naturaleza, propiedades y participación en el ambiente, con lo que se facilitará su manejo adecuado a partir de la integración de los sistemas suelo, planta y animal.

Los suelos del Perú presentan una enorme variabilidad de caracteres morfológicos, probablemente tan amplia como ningún otro país del mundo. Las características medio ambientales de país varían enormemente como resultado de la interacción compleja del clima, vegetación, topografía y rasgos geomorfológicos. En este contexto, la evaluación de la fertilidad de un suelo constituye un problema por la diversidad de condiciones físicas, químicas y biológicas inmersas. Debido a estos problemas ha sido necesario el progreso de técnicas de diagnóstico como los análisis de suelos y de plantas, incluyendo la identificación de los síntomas de deficiencias que constituyen una gran ayuda para determinar el momento en que es necesario un abonado (Zavaleta, 1998).

La elección de las proporciones adecuadas de los nutrientes para las plantas depende del conocimiento que se tenga de los requerimientos en nutrientes del cultivo y de la riqueza en elementos nutrientes del suelo en el cual deba crecer el cultivo. Cuando el suelo no proporciona las cantidades adecuadas de elementos necesarios para el desarrollo normal de las plantas, es imprescindible que las cantidades requeridas sean suministradas (Tisdale y Nelson, 1980). Ello implica que se halle un método que permita identificar estos elementos deficientes. De las diversas técnicas que se emplean, las pruebas biológicas tienen mucha importancia para medir el estado de fertilidad de los suelos; éstas son simples y rápidas que implican a las plantas superiores pero usan pequeñas cantidades de suelo. Estos métodos han hallado gran aceptación en el ámbito científico internacional (Domínguez, 1997).

Con estas consideraciones se ha propuesto la realización de la presente investigación con los siguientes objetivos:

1. Evaluar el estado nutricional de los suelos agrícolas de ceja de selva del distrito de Santa Rosa, provincia La Mar, identificando los nutrientes deficientes.
2. Relacionar las propiedades químicas de los suelos y su estado nutricional a través de la producción de materia seca.
3. Determinar los niveles críticos de los principales nutrientes mediante el ajuste a los modelos continuos y discontinuos.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1. Conceptos de fertilidad y productividad del suelo

El suelo es el medio en el cual las plantas crecen para alimentar y vestir al mundo. El entender la fertilidad del suelo es entender una necesidad básica de la producción de cultivos (Ramírez, 1997).

La fertilidad es vital para que un suelo sea productivo. Al mismo tiempo, un suelo fértil no es necesariamente un suelo productivo. Factores como mal drenaje, insectos, sequía etc pueden limitar la producción, aun cuando la fertilidad del suelo sea adecuada. Para entender completamente la fertilidad del suelo se deben conocer estos otros factores que mantienen o limitan la productividad.

Según López (2002), conceptualmente debemos de decir que la fertilidad de un sistema (del suelo, el mar, un lago o una río) es la capacidad del mismo para permitir la aparición y el desarrollo de un ser vivo. Si lo referimos a la biología del suelo, o del mar, en general sería “la capacidad de producir más (en número y variedad) de seres vivos”. Consecuentemente, la fertilidad de un suelo se relaciona con su biodiversidad potencial, referida, fundamentalmente, a seres vegetales, sin excluir directa o indirectamente al resto de los seres vivos que configuran las estructuras tróficas del edafón.

Oliveira et al.(2006) manifiestan que la fertilidad del suelo es su capacidad de suministrar a la planta el conjunto de elementos nutritivos que le son necesarios. Aquí cabe distinguir, la fertilidad física que se refiere a la misión del suelo como soporte de las raíces y a su capacidad de almacenar y permitir el paso del agua y el aire. Estos aspectos vienen indicados por características como: textura, estructura, porosidad, permeabilidad, etc.; fertilidad química, que viene definida por las propiedades químicas y mineralógicas del suelo, que condicionan su capacidad de reserva de elementos asimilables. Este aspecto viene condicionado por características como: pH, CIC, % de saturación de bases, etc. Por último, la fertilidad biológica, que hace referencia a la actividad de los microorganismos del suelo que determinan, sobre todo, el estado de la materia orgánica del suelo.

La fertilidad es vital para la productividad, pero un suelo fértil no es necesariamente un suelo productivo. Ello es debido a que condiciones de mal drenaje, plagas, enfermedades, sequías y otros factores pueden limitar la producción, aun cuando la fertilidad del suelo es adecuada. Para comprender completamente la fertilidad del suelo, precisamos conocer también otros factores que favorecen o limitan la productividad (Ibáñez, 2007).

Las características y funciones físicas y químicas, la materia orgánica y la actividad biológica del suelo son fundamentales para la producción agrícola sostenida y determinan, en su complejidad, la fertilidad y productividad del suelo. Una gestión adecuada del suelo tiene por objeto mantener y mejorar su productividad aumentando la disponibilidad y la ingestión por las plantas de agua y nutrientes mediante un mejoramiento de la actividad biológica del suelo, la reposición de la materia orgánica y la humedad del suelo, y la reducción al mínimo de las pérdidas de suelo, nutrientes y sustancias agroquímicas debido a la erosión, la escorrentía y la lixiviación en el agua de superficie o subterránea. Aunque se suele proceder al condicionamiento de suelos a nivel de campo o de la explotación agrícola, esta actividad afecta a la zona circundante o a la cuenca hidrográfica debido a las repercusiones fuera del lugar en la escorrentía, los sedimentos, la transmisión de nutrientes y el desplazamiento del

ganado y de las especies conexas con inclusión de los predadores, las plagas y los agentes de control biológico (López, 2002).

Las buenas prácticas relacionadas con el suelo incluyen el mantenimiento o mejoramiento de la materia orgánica del suelo por medio de la utilización de acumulación de carbono en el suelo mediante rotaciones de las cosechas adecuadas, la aplicación de fertilizantes, la gestión de los pastizales y otras prácticas de uso de la tierra, las prácticas racionales mecánicas y/o de trabajo del suelo de conservación; el mantenimiento de la cobertura del suelo para proporcionar un hábitat que favorezca la biota del suelo, reduciendo al mínimo las pérdidas debidas a la erosión causada por el viento y/o el agua; y la aplicación de fertilizantes orgánicos y minerales y otros productos agroquímicos en cantidades y en épocas y por medio de métodos adecuados a las necesidades agronómicas, ambientales y de la salud humana.

Para entender la productividad del suelo, precisamos conocer las relaciones suelo planta. Existen ciertos factores externos que controlan el crecimiento de las plantas, como son el aire, calor (temperatura), luz, soporte mecánico, nutrientes y agua. Cada uno de estos factores afecta directamente el crecimiento de la planta y se encuentran relacionados entre ellos (Ramírez, 1997). La productividad del suelo es un factor clave en los sistemas agrícolas de las regiones áridas y semiáridas. Es definida como la capacidad del suelo para producir un cultivo específico o secuencia de cultivos bajo unas prácticas definidas. Se mide en términos de producción obtenida (“outputs”) con relación a los “inputs” de factores de producción, para un tipo específico de suelos y en un sistema definido de cultivo. Por lo general, en los ambientes áridos y semiáridos los problemas más serios que afectan a la productividad del suelo son la erosión, y la pérdida asociada de nutrientes, y el agotamiento de la materia orgánica (López, 2002). En los mejores suelos agrícolas, con pendientes suaves, textura media, buena estructura y de un perfil profundo y bien drenado, se puede mantener un alto nivel de productividad con relativamente pocas, aunque esenciales, prácticas de conservación, que contrarresten los procesos de degradación. Por el contrario, en los suelos marginales con limitada capacidad, con pendientes pronunciadas, textura arenosa, pobre estructura, escasez de nutrientes y

perfil superficial y deficientemente drenado, las prácticas de conservación deben ser máximas para evitar que aumente la degradación. Los residuos orgánicos son los que ofrecen la mejor posibilidad de restaurar la productividad de estos suelos, en los que la materia orgánica es el componente vital.

La productividad se aplica a una forma de medida del desarrollo del cultivo de plantas de uso agrario. Inicialmente quedó definida como la biomasa generada en unas condiciones determinadas para un suelo y cultivo determinados. Se aplicaba únicamente a la cantidad en peso de productos con interés alimentario humano obtenidos por Ha de cultivo (de grano de trigo o mazorca de maíz, por ejemplo). Luego se incluyó de forma diferenciada el resto de la planta, porque este apartado se usaba en alimentación animal, o en la producción de materiales para otros usos, como el carbón vegetal, madera para construcción, etc. (Navarro, 2003).

La “globalización” de la productividad, tiene mucho que ver el desarrollo de la Ecología en las décadas 60 y 70 del siglo pasado, y permitió aplicar este concepto a sistemas forestales y a los ecosistemas (ya fueran terrestres, acuáticos o mixtos). Así la productividad como un apartado en la evaluación de los ciclos biogeoquímicos de los elementos. Sin querer, hablamos de ello, cuando discutimos sobre cultivos agroenergéticos o hacemos un seguimiento del CO₂ o de la materia orgánica del suelo, como componentes del cambio climático (López, 2002).

Volviendo los ojos a los cultivos agrícolas, la productividad natural de los suelos dejó de tener actualidad con la aparición de la teoría de la nutrición mineral, expuesta por von Liebig a mediados del siglo XIX. Esta teoría permitió creer que el suelo era un soporte pasivo, que no había que tener en cuenta. Pero permitió el desarrollo de las estrategias de síntesis, producción y uso generalizado de fertilizantes, plaguicidas y un largo etcétera que encierra parte de la historia negra de la Química Agrícola respecto a la degradación y contaminación de los suelo (Navarro, 2003).

Y en esa historia andamos todavía, aunque en retroceso (gracias a la Agricultura Ecológica y otros manejos del suelo y de las producciones), por la exigencia social de conservar la biodiversidad en los suelos y derivada de la capacidad tóxica de las

moléculas empleadas, en la salud de animales y del hombre. Veremos lo que ocurre con cultivos no alimentarios (agroenergéticos), donde se aprecia una tentación a liberar a determinados herbicidas de la cláusula de prohibición o limitación de uso.

Desde los conocimientos de la Química Agrícola y de la Fisiología Vegetal, hoy se exige un conocimiento claro de las necesidades nutricionales y acciones hormonales, en cada momento fenológico (germinación, enraizamiento, emergencia, entallado, floración, polinización, fecundación de la planta y formación, maduración y abscisión (momento de recogida) del fruto. Y estos conocimientos deben de tener una respuesta, hoy todavía lenta, en las estrategias de abonado de los suelos agrícolas.

La Química Agrícola nos indica que, dosis inadecuadas o desequilibradas de conjuntos de nutrientes afecta al desarrollo vegetal y disminuye la productividad y desde un criterio más actual, la calidad del producto alimentario. Hoy hay criterios que nos indican que el suelo es un recurso limitado y degradable, y los tiempos que precisa para su recuperación frente a impactos como el manejo mecánico o la aplicación de fertilizantes inorgánicos es muy lenta. Esto hay que aceptarlo, y ante ello, los edafólogos debemos de establecer estrategias adecuadas para conservar la calidad y salud de los suelos o la calidad y el uso racional del agua y del aire en ambos casos (Ibáñez, 2007).

1.2. Nutrición mineral de las plantas

Se entiende por nutrición vegetal al proceso mediante el cual, la planta absorbe del medio que le rodea las sustancias que le son necesarias para su metabolismo, crecimiento y desarrollo (Baeyens, 1970). Generalmente, se distingue dos clases de nutrición de las plantas:

- La que proporciona materia orgánica (vía fotosíntesis) llamada por algunos especialistas “nutrición carbonácea”.

- Nutrición mineral o inorgánica, que viene a ser la incorporación de los minerales del suelo en el vegetal.

Los nutrientes esenciales requeridos por las plantas superiores, son de naturaleza exclusivamente inorgánica. Así, ellas difieren en tal sentido del hombre y los animales, por cuanto estos necesitan compuestos adicionales, como alimento. Según Arnon y Stout mencionados por Brady y Weil (2008), un elemento es esencial cuando cumple las siguientes condiciones:

- a) Debe ser requerido para completar el ciclo normal de vida de la planta.
- b) Sus funciones no pueden ser sustituidos por otros elementos químicos.
- c) Debe estar involucrado directamente en la nutrición de las plantas, ya sea como constituyente de un metabolito esencial o por participar en la actividad de un sistema enzimático esencial.
- d) Debe ser esencial para la mayoría de las plantas.

Estos criterios de esencialidad (principalmente b y c) actualmente son algo restringidos o demasiado rígidos, debido a que trabajos recientes de investigación, han demostrado por ejemplo, que el cloruro, que es esencial para el crecimiento de las plantas superiores, puede ser sustituido por el bromuro; el estroncio que parcialmente puede reemplazar al calcio, el molibdeno por el vanadio, el potasio por el sodio. Por otro lado, se ha detectado que el silicio es esencial para el arroz y el cobalto para la fijación simbiótica del nitrógeno atmosférico. Se ha determinado también, que el sodio es esencial solamente para algunas especies de betarraga, pero aumenta las cosechas de la remolacha azucarera y de mesa, del apio, etc.; más no puede considerársele esencial según los criterios de Arnon y Stout.

Una de las consideraciones que sirven para calificar a un elemento como “esencial” es que éste sea imprescindible para que la planta pueda completar su ciclo vital. Hoy en día se consideran esenciales un total de 17 elementos distintos gracias a los cuales, y en presencia de luz solar, la mayoría de plantas puede llegar a sintetizar cualquier compuesto que necesiten. Estos elementos esenciales son: Molibdeno, Níquel,

Cobre, Zinc, Manganeso, Boro, Hierro, Cloro, Azufre, Fósforo, Magnesio, Calcio, Potasio, Nitrógeno, Oxígeno, Carbono e Hidrógeno (Ramírez, 1997).

Además de estos elementos algunas especies concretas pueden llegar a necesitar otros como por ejemplo puede ser el sodio. También hay que tener en cuenta que si bien no han sido incluidos en la categoría de esenciales, hay elementos cuya presencia favorece en gran medida determinados procesos en el desarrollo vegetal. Un ejemplo es el silicio que parece favorecer el crecimiento. Otro el cobalto, que resulta esencial en multitud de bacterias y estas a su vez esenciales para la planta en procesos como la fijación del nitrógeno. El selenio parece ser otro elemento importante en el desarrollo vegetal que incluso está provocando discusiones por si debe o no ser incluido en la lista de elementos esenciales (Brady y Weil, 2008).

En resumen: en la actualidad se catalogan 17 elementos distintos cuya ausencia está demostrado que impide el desarrollo del ciclo vital de la planta, y también se catalogan toda una serie de elementos de lo más diverso que sin ser esenciales resultan beneficiosos directa o indirectamente para la planta. Evidentemente la lista de elementos esenciales no está cerrada ni mucho menos; con el paso de los años y los diferentes estudios ha ido creciendo, y muy posiblemente continúe haciéndolo.

En función de las cantidades consumidas por la planta de cada uno, estos elementos esenciales se suelen englobar en dos grandes categorías; “Macroelementos” incluyendo aquellos consumidos en grandes cantidades y “Microelementos” formada por aquellos necesarios en cantidades muchísimo menores. Dentro de la categoría de Macroelementos, o macronutrientes, se engloban los siguientes elementos: carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, azufre, y magnesio. Los Microelementos, o micronutrientes, son: hierro, boro, zinc, manganeso, cobre, molibdeno, cloro y níquel.

1.2.1. El N en el suelo y en la planta

Para los suelos, el nutriente que en mayor medida condiciona el crecimiento y rendimiento de los cultivos, es el nitrógeno (N). El N debe estar bien provisto en cantidad y oportunidad como para asegurar un óptimo estado fisiológico de los cultivos durante los períodos críticos, momentos durante los cuales se define el rendimiento de los cultivos. Para efectuar un manejo racional del N, es necesario conocer los requerimientos por parte de los cultivos y su dinámica de acumulación y redistribución en los vegetales. Por otra parte, a fin de lograr altos rendimientos con un uso eficiente de N, es necesario conocer la magnitud y la dinámica de la liberación de N y de los diferentes procesos de pérdida desde el sistema suelo. Estos son consecuencia de la interacción de factores edáficos, climáticos y de manejo, que rigen las transformaciones del N en el suelo (García, 2002).

En este acápite, se presentará la distribución geobiológica del N y los distintos procesos que constituyen el ciclo biológico del N. Se pondrá énfasis en los procesos y en los factores relevantes que los controlan, a fin de permitir explicar causalmente la disponibilidad de N para los cultivos. Para finalizar se presentarán las características relevantes de los fertilizantes nitrogenados y su efecto sobre el sistema suelo.

La masa total del N en el planeta asciende a $1,94 \times 10^{17}$ t, de las cuales la gran mayoría (98 %) se encuentra alojado en la litosfera. Este compartimiento se distribuye en las rocas de tipo ígneo (97,8 %) y sedimentario (0,2 %). Una fracción muy pequeña de esto es liberada por intemperización, lo que no representa una fuente de importancia para la biosfera y por lo tanto no participa activamente en el ciclo del N (Tisdale y Nelson, 1982).

El N en la atmósfera representa solo el 1,9 % de la masa total de N y se encuentra en su gran mayoría en la forma molecular N_2 . Esta forma de N posee un triple enlace covalente ($N \equiv N$), lo que le confiere elevada estabilidad. El N_2 es el mayor constituyente de los gases (78,1 %) que componen la atmósfera. Otros gases que

contienen N también constituyen la atmósfera (N_2O , NO , NO_2 , NO_3^- , NH_3 , NH_4^+), pero en mucha menor cantidad. No obstante, en algunos casos, pequeños cambios en los contenidos de estos pueden tener consecuencias relevantes en los ecosistemas.

El N retenido en la biosfera, constituye un escaso porcentaje de la masa total (0,01 %) y en su mayoría está constituido por N_2 gaseoso disuelto en los océanos (22×10^{12} t). En la tierra (Figura 1b), el mayor compartimiento corresponde a las formas orgánicas de N (55×10^{10} t), las que por acción de los microorganismos, convierten el N orgánico en formas minerales (NO_3^- , NH_4^+). Estas formas de N constituyen el sustento de la biomasa en crecimiento (plantas y animales). Si no consideramos el N insoluble y en el carbón, la mayor proporción del N en la tierra (98,7%) se encuentra en la materia orgánica del suelo (Figura 1b). Un compartimiento de relevancia está constituido por los vegetales y sus residuos (1,77%) y una muy pequeña fracción corresponde a los organismos (0,17%) y a las formas disponibles de N (0,17%) (Díaz, 2002).

El Nitrógeno (N) es uno de los elementos más ampliamente distribuidos en la naturaleza. Es muy dinámico: circula entre la atmósfera, el suelo y los organismos vivos. El átomo de N presenta diferentes estados de oxidación y en el pasaje entre ellos intervienen los organismos del suelo (Gutiérrez, 1995).

Barceló y otros (1980) manifiestan que entre los elementos que el vegetal toma del suelo, el N es el de mayor importancia cuantitativa. Los principales roles del N en la nutrición de las plantas son:

- Componente de la molécula de clorofila.
- Componente de los aminoácidos, unidad estructural de las proteínas.
- Componente de las moléculas de enzimas, vitaminas, hormonas y ácidos nucleicos.
- Esencial en la utilización de carbohidratos.
- Estimula el desarrollo y la actividad radicular.

Las deficiencias de N se pueden presentar en todo tipo de suelo, manifestándose en los vegetales por la aparición de color amarillento en las hojas más viejas o color amarillo-verdoso con tendencia a la caída de las mismas.

La fuente principal de N es la atmósfera, donde es el gas predominante (79 % del volumen). El N atmosférico (N_2) es un gas diatómico muy inerte debido a su alta energía de enlace. Las plantas superiores no pueden utilizar el N del aire (Fassbender y Bornemisza, 1987).

El proceso de convertir el N atmosférico en formas usables por las plantas se llama fijación. La fijación es efectuada por ciertos microorganismos y fenómenos atmosféricos como los rayos. La mayor parte del nitrógeno del suelo se encuentra formando compuestos orgánicos quedando disponible para las plantas a través del proceso de mineralización (Tamhane, 1983).

Según Rice y Havlin (1994), las reservas de N en el suelo están constituidas por:

- Materia orgánica de descomposición rápida
- Compuestos húmicos de mineralización más lenta
- Una pequeña fracción se encuentra en combinaciones inorgánicas como NH_4^+ y NO_3^- . Formas que son aprovechables por las plantas con más importancia en el NO_3^- .

El nitrógeno orgánico representa entre el 85 al 95 % del N total. Esta fracción está constituida por:

- 20 - 40 % aminoácidos.
- 5 - 10 % aminoazúcares.
- 1 - 2 % bases púricas y pirimídicas.
- Formas difíciles de identificar. Integran heterociclos de las moléculas húmicas.

Las reservas mineralizables en un plazo relativamente corto están constituidas por:

- Materia orgánica fresca fácilmente descomponible.
- Materia más lábiles de humus (ácidos fúlvicos)
- Humina microbiana.
- Biomasa muerta.
- Cadenas peptídicas unidas a núcleos aromáticos.

Según Urbano (2002), el nitrógeno inorgánico, es la fracción realmente disponible para las plantas y su contenido es generalmente menor al 10 % del total. Se encuentra principalmente bajo la forma aniónica (NO_3^-) y catiónica (NH_4^+). El NO_3^- es la principal forma de absorción por las plantas. Es muy móvil, fácil de lavarse con el agua de lluvia y riego en virtud de la ausencia de mecanismos de retención como adsorción y precipitación. Son compuestos muy solubles. El NH_4^+ es absorbido principalmente por los microorganismos y algunos vegetales como el arroz. El NH_4^+ intercambiable no supera el 2% del N total. Muchos suelos pueden contener cantidades de NH_4^+ no intercambiable en horizontes inferiores, con lo cual se podría retener cantidades importantes de NH_4^+ aportados por la fertilización.

En muy pequeñas cantidades y difíciles de detectar están las formas gaseosas del N:

- **N_2O** : óxido nitroso
- **NO** : óxido nítrico
- **NO_2** : dióxido de nitrógeno
- **NH_3** : amoníaco
- **N_2** : nitrógeno molecular presente en la atmósfera del suelo.

Respecto al nitrógeno en las plantas superiores, es necesario referir que éstas son organismos autotróficos que pueden sintetizar sus componentes moleculares orgánicos a partir de nutrientes inorgánicos obtenidos del medio ambiente. Para muchos nutrientes minerales, este proceso involucra la absorción por las raíces desde el suelo y la incorporación en compuestos orgánicos que son esenciales para el crecimiento y desarrollo. Esta incorporación de nutrientes minerales en sustancias

orgánicas tales como pigmentos, enzimas, cofactores, lípidos, ácidos nucleicos o aminoácidos se denomina asimilación de nutrientes (Barceló y otros, 1980).

La asimilación del nitrógeno requiere una serie compleja de reacciones bioquímicas con un alto costo energético. En la asimilación del nitrato (NO_3^-), el nitrógeno del NO_3^- es convertido en una forma de energía superior, nitrito, (NO_2^-), luego en una mayor forma de energía, amonio, (NH_4^+) y finalmente en nitrógeno amídico en la glutamina. Este proceso consume 12 equivalentes de ATPs por molécula de nitrógeno. Por otra parte, las leguminosas que presentan una forma simbiótica con bacterias que transforman el nitrógeno atmosférico (N_2) en amonio; proceso denominado, fijación biológica del nitrógeno junto con la subsecuente asimilación del amonio en los aminoácidos, consume 16 ATPs por nitrógeno.

La mayoría de los compuestos presentes en las células vegetales contienen nitrógeno, tales como: aminoácidos, nucleósidos fosfatos, componentes de fosfolípidos, clorofila. Solamente el oxígeno, carbono, y el hidrógeno son elementos más abundantes en las plantas que el nitrógeno. La mayoría de los ecosistemas naturales y agrícolas, al ser fertilizados con nitrógeno inorgánico, muestran importantes incrementos en la productividad, poniendo en evidencia la importancia de este elemento.

1.2.2. El P en el suelo y en la planta

Ciampitti y otros (2008), manifiestan que el fósforo a menudo aparece como un nutriente limitante en los suelos agrícolas, cualquiera sea su forma de manejo. No es posible capturarlo biológicamente desde el aire, como ocurre con el nitrógeno, y su ciclo natural involucra larguísimos períodos, lo que en términos de manejo agrícola equivale a decir que no podemos depender del ciclo del fósforo, sino de la posibilidad de generar determinados flujos y sub-ciclos de él al interior de los sistemas suelo-agua-organismos vivos. Sin embargo, los sub-ciclos se ven dificultados por el hecho que los equilibrios de reacción del fósforo tienden a

mantener la mayor parte de él en condiciones no disponibles para las plantas o microorganismos.

Las plantas absorben fósforo en estado soluble, pero cuando se introduce fósforo al suelo, más del 90% de él pasa rápidamente a formas solubles, no disponibles. Así, gran parte de los fertilizantes fosfatados que se aplican no son utilizados por las plantas, sino que se almacenan en el suelo. Por ejemplo, algunos suelos volcánicos de sur de Chile -con gran capacidad de inmovilizar fósforo- han acumulado más de 2 ton/ha de fósforo total (Fixen y Grove, 1990), pero los niveles de fósforo soluble pueden continuar cercanos a los 15 ppm. La situación anterior se agrava cuando el uso agrícola disminuye los niveles de materia orgánica del suelo o induce cambios hacia los extremos de la escala de pH; la ineficiencia de uso aumenta y se hace necesario elevar aún más las dosis de fertilización. Esto ha llevado a que la fertilización fosfatada óptima sea inalcanzable para un número creciente de agricultores. Si consideramos además que las reservas mundiales de fósforo son limitadas, no es difícil prever masivos problemas de sustentabilidad a corto y mediano plazo, ya sea por encarecimiento significativo de la fertilización fosfatada, o directamente por agotamiento de los depósitos de este nutriente. Un manejo de fertilidad de suelos racional y sustentable, entonces, hace indispensable aumentar la eficiencia de utilización, la que no depende mayores tasas de aplicación de fertilizantes, sino de fomentar procesos de reciclaje y de solubilización del fósforo en el suelo. A continuación se discuten algunos de los mecanismos más efectivos para lograr los procesos de solubilización.

El fósforo es un elemento esencial para la vida. Las plantas lo necesitan para crecer y desarrollar su potencial genético. Lamentablemente, el fósforo no es abundante en el suelo. Y lo que es peor, mucho del fósforo presente en el suelo no está en formas disponibles para la planta. La disponibilidad de este elemento depende del tipo de suelo, según este, una pequeña o gran parte del fósforo total puede estar “fijado” (no disponible) en los minerales del suelo. Esto significa que la planta no puede absorberlo. En la naturaleza, el fósforo forma parte de las rocas y los minerales del suelo. Las fuentes de fósforo como nutrimento para las plantas son los fertilizantes

minerales y los fertilizantes orgánicos. Los fertilizantes minerales son compuestos inorgánicos de fósforo que se extraen de los grandes yacimientos de “roca fosfórica”. Estos compuestos minerales, son tratados para hacerlos más solubles para que así, sean disponibles para las plantas y puedan ser utilizados por estas en la formación de tejidos y órganos vegetales (Gutiérrez y otros, 2005).

El fósforo se encuentra en los suelos tanto en forma orgánica y forma inorgánica y su solubilidad en el suelo es baja. Existe un equilibrio entre el fósforo en la fase sólida del suelo y el fósforo en la solución del suelo. Las plantas pueden adsorber solamente el fósforo disuelto en la solución del suelo, y puesto que la mayor parte del fósforo en el suelo existe en compuestos químicos estables, sólo una pequeña cantidad de fósforo está disponible para la planta en cualquier momento dado (Barceló y otros, 1980).

El fósforo del suelo se presenta casi exclusivamente como orto fosfatos derivados del ácido fosfórico, H_3PO_4 , Ca y Al. Los compuestos formados pueden encontrarse en forma de sales en solución, sales cristalinas o sales absorbidas por los coloides del suelo. El ion fosfato puede, además, ser directamente absorbido por los coloides del suelo o puede formar enlaces de gran estabilidad con los hidróxidos de Fe, Al o Mn que forman parte de los coloides del suelo. Estos últimos constituyen el "fósforo fijado".

Las principales formas de fosfatos orgánicos son el fosfato de inositol y los ácidos nucleicos. Tanto el inositol como los ácidos nucleicos parecen tener origen principalmente microbiano. El nivel de fósforo orgánico en los suelos puede variar entre un 3 y un 85% del fósforo total. La abundancia relativa de cada uno de estos compuestos variará de acuerdo al origen del suelo, a los niveles de materia orgánica y al pH.

Brady y Weil (2008), indican que al adsorber el fósforo de la solución del suelo por las raíces, parte del fósforo adsorbido a la fase sólida del suelo es liberado a la solución del suelo, para mantener un equilibrio químico. Los tipos de compuestos de fósforo que existen en el suelo son principalmente determinados por el pH del suelo

y por el tipo y la cantidad de los minerales en el suelo. Por lo general, los compuestos minerales que forma el fósforo son compuestos de aluminio, hierro, manganeso y calcio.

En suelos ácidos el fósforo tiende a reaccionar con aluminio, hierro y manganeso, mientras que en suelos alcalinos, la fijación dominante es con el calcio. El rango de pH óptimo para disponibilidad máxima de fósforo es de 6.0-7.0. En muchos suelos la descomposición de materia orgánica y los residuos de cultivos contribuyen al fósforo disponible (Fassbender y Bornemisza, 1987).

En el ciclo del P, es posible verificar pérdidas del fósforo en la naturaleza y por la intervención del hombre en el mismo. Se puede observar que se pierde fósforo por: escurrimiento, erosión, lavado y extracción en la cosecha. Por otro lado se regresa fósforo al suelo por medio de adición de fertilizantes minerales (que es la más importante y significativa), retorno de residuos de animales y plantas y por deposición atmosférica (Ramírez, 1997).

Las plantas absorben únicamente el fósforo que está en la solución del suelo en forma de HPO_4^{-2} (ión fosfato monoácido) y $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ (ión fosfato diácido). Cualquier fertilizante ya sea de origen orgánico o mineral debe transformarse primero en esas especies (formas químicas) antes de ser utilizado por el cultivo. Las diferencias entre los residuos orgánicos y los fertilizantes minerales son principalmente dos: 1) velocidad de disponibilidad para el cultivo (los residuos orgánicos tienen que ser primero descompuestos por los microbios, mientras que los abonos minerales ya tienen los compuestos en la forma que la planta los utiliza) y 2) concentración (los residuos orgánicos tiene concentraciones más bajas de fósforo que los compuestos minerales).

Para garantizar una producción rentable y devolver al suelo el fósforo que ha sido extraído por la cosecha, los agricultores deben aplicar fósforo a sus cultivos. Es esta la forma de asegurar la fertilidad y la calidad del recurso suelo. Es importante estar consciente de la responsabilidad que tenemos de conservar nuestros recursos para las nuevas generaciones. La materia, como todos sabemos, no se crea ni se destruye, al

cosechar estamos extrayendo fósforo del suelo e integrándolo a nuestras dietas por lo que es necesario devolver lo extraído, de lo contrario, estaremos empobreciendo nuestros suelos y gastando un recurso no renovable. Recordemos que el suelo que cultivamos actualmente será el mismo que cultivaran nuestros hijos, nuestros nietos y bisnietos. Es nuestra responsabilidad resguardar lo que la naturaleza nos ha prestado. Las plantas absorben el fósforo de la solución del suelo como ion ortofosfato: HPO_4^{-2} o H_2PO_4^- . La forma en que el fosforo es absorbido es afectado por el pH. En pH más alto predomina la forma H_2PO_4^- . La movilidad de fósforo en el suelo es muy limitada y por lo tanto, las raíces pueden absorber el fósforo solamente de su entorno inmediato (Díaz, 2002).

Desde que la cantidad del fósforo en la solución del suelo es baja, la mayor parte de la absorción del fósforo es activa, contra del gradiente de concentración (es decir, la concentración de fósforo es mayor en las raíces que en la solución del suelo). La absorción activa es un proceso que consume energía, así que las condiciones que inhiben la actividad de las raíces, tales como las bajas temperaturas, el exceso de agua, etc., inhiben la absorción de fósforo (Barceló, 1980).

1.2.3. El K en el suelo y en la planta

El potasio es uno de los tres nutrientes minerales que necesitan las plantas en mayor cantidad. Muchos cultivos como por ejemplo el banano, el tomate y la papa requieren más potasio que cualquier otro nutriente mineral. Las plantas absorben el potasio que se encuentra en la solución del suelo en forma del catión K^+ . La cantidad de K en la solución del suelo está en función (controlada por) de la liberación del potasio intercambiable, generalmente localizado alrededor de las partículas (micelas) de arcilla. Los cultivos extraen grandes cantidades de potasio del suelo para su crecimiento y desarrollo y como es de esperarse, la falta de éste elemento, influye negativamente en el rendimiento y calidad del cultivo. Además, la deficiencia de potasio aumenta la vulnerabilidad del cultivo a enfermedades y lo hace menos resistente a condiciones de "stress" tales como sequías, heladas etc. (Fageria, 2001).

El abastecimiento de K en el suelo es limitado, aun los suelos que contienen arcillas ricas en este mineral no pueden suplirlo indefinidamente. Es un error creer que en suelos que por naturaleza son ricos en K (ej. Vertisoles), adicionar este elemento a los cultivos es innecesario. El potasio extraído por los cultivos debe de regresarse al suelo para no disminuir la fertilidad del mismo; cuando el agricultor saca de la parcela o campo la cosecha, se está llevando consigo el K fuera del sistema agrícola. Las vías de remoción influyen en el reciclaje natural del potasio en el suelo. Se pierde potasio al sacar la cosecha, por lavado, especialmente en suelos arenosos y lugares de alta precipitación pluvial, por escurrimiento y/o erosión en sitios donde la pendiente y el manejo del agua y drenaje son deficientes (Fassbender y Bornemisza, 1987).

En los sistemas de agricultura moderna, la cosecha es probablemente la forma en la cual se extrae mayor cantidad de K del suelo. Así, el no regresar lo que se extrae o se pierde durante el ciclo del K ocasiona que el suelo pierda fertilidad y por ende productividad potencial. Las formas de incorporación del potasio al suelo son: adición de residuos vegetales, estiércoles, residuos animales sólidos y fertilizantes minerales. Algunos fertilizantes minerales como el cloruro de potasio (KCl) y el sulfato de potasio y magnesio ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$), son extraídos de yacimientos de silvinita y silvita (el primero) y langbeinita (el segundo). Estos fertilizantes no son elaborados por síntesis química, simplemente por medios físicos se limpian y acondicionan para ser utilizados en agricultura. Tienen la ventaja que son solubles por lo que son de rápida disponibilidad a los cultivos. El buen agricultor y técnico agrícola responsable, deben de asegurar que el ciclo del potasio sea sustentable y que pueda ser heredado a las siguientes generaciones en suelos más fértiles y productivos (García, 2007).

El K cumple funciones trascendentes en la fisiología de las plantas. Actúa a nivel del proceso de la fotosíntesis, en la traslocación de fotosintatos, síntesis de proteínas, activación de enzimas claves para varias funciones bioquímicas, mejora la nodulación de las leguminosas, etc. etc. Asimismo, una buena nutrición potásica aumenta la resistencia a condiciones adversas como sequías o presencia de enfermedades (Barceló, 1980).

Las deficiencias de K no solo pueden determinar pérdidas de rendimiento, sino también pueden afectar la calidad de los productos cosechados. En términos generales, para la mayoría de las especies cultivadas, los síntomas de deficiencia se presentan como clorosis (y en casos severos de carencia, necrosis) en los márgenes y puntas de las hojas. Debido a la movilidad de este nutriente dentro de la planta, es común que los síntomas se evidencien sobre todo en las hojas más viejas (López, 1990).

1.2.4. El S en el suelo y en la planta

Puede decirse que el azufre es un elemento olvidado. A pesar de ser requerido por las plantas en cantidades parecidas a las del fósforo (Tisdale y Nelson, 1982) no se le considera un macroelemento; a pesar de ser tan importante como el nitrógeno en la determinación de la cantidad y calidad de la biomasa de un cultivo (Brady y Weil, 2008) se le clasifica aún en muchos textos como "elemento secundario". El azufre es también, en sus diferentes formas gaseosas, un elemento importante en la regulación del nivel de O₂ en la atmósfera (López, 2002).

El azufre es uno de los elementos más abundantes sobre la Tierra y es un elemento esencial para los seres vivos. El azufre pertenece al grupo VIA del sistema periódico en donde se encuentra junto con el oxígeno, el selenio, el telurio y el polonio; en forma natural el azufre es una mezcla de los cuatro isótopos ³²S, ³³S, ³⁴S y ³⁵S. La abundancia natural de cada uno de ellos es de 95.1%, 0.74%, 4.2% y 0.016%, respectivamente (Ferraris y otros, 2004). El azufre se encuentra en estados de oxidación que van desde +6 hasta -2, siendo el estado más oxidado (SO₄⁼) el generalmente utilizado por las plantas como fuente de azufre del suelo.

Para estar disponibles para las plantas las formas reducidas de azufre deben ser primero oxidadas; este cambio en el estado de oxidación del azufre desde el extremo

reducido hasta el oxidado es una actividad realizada principalmente por microorganismos del suelo (que pueden ser especialistas o no), presentando el conjunto de reacciones un esquema análogo al encontrado para el nitrógeno (Barceló, 1980).

En términos de las reacciones microbianas reductivas y oxidativas las formas más importantes del azufre son el sulfuro, el tiosulfato, el sulfito, el sulfato y los politionatos ditionato y ditionito (Barceló, 1980).

Las formas y cantidades de azufre presentes son muy variables de un suelo a otro y las condiciones encontradas van desde deficiencia hasta exceso. Como regla general, un suelo con menos de $14 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm) de SO_4^{-2} soluble se considera un suelo deficiente en azufre disponible para las plantas (Ferraris y otros, 2004). El azufre en forma inorgánica es generalmente mucho menos abundante que el azufre en forma orgánica en la mayor parte de los suelos agrícolas, a excepción de los suelos secos, en donde puede ocurrir lo contrario.

Los compuestos biológicos en donde se involucra el azufre son diversos en tipo y complejidad; van desde moléculas pequeñas a medianas (muchas de ellas con olores y sabores característicos), hasta proteínas y otros polímeros. Se sabe que aproximadamente un 40% de las enzimas (entre ellas ferredoxinas, nitrogenasas, etc.) dependen para su actividad catalítica de la presencia de grupos sulfidrilo (SH). Dichos grupos SH proporcionan sitios de unión para metales tóxicos o fisiológicamente importantes, se relacionan con la detoxificación de drogas diversas y se ven involucrados en numerosas reacciones redox debido a su relativa facilidad de oxidación. También se sabe que la estructura terciaria y cuaternaria de muchas proteínas es resultado de la presencia de puentes disulfuro (-S-S-) formados por la oxidación de grupos SH de la cisteína, un aminoácido azufrado que, junto con la metionina, es factor clave en determinar el valor nutricional de las plantas (Barceló, 1980) así como elemento central en el metabolismo del azufre en todos los organismos (Gutiérrez, 1995).

Si no se toma en cuenta la absorción de dióxido de azufre (SO_2) de la atmósfera, actividad que puede representar un aporte importante de azufre para muchas plantas (Fassbender y Bornemisza, 1987), la mayor parte del, azufre tomado por las plantas del suelo es absorbido en forma de SO_4^{-2} e incorporado al aminoácido cisteína en los tejidos fotosintéticos. La reducción asimilativa del azufre del sulfato es un proceso dependiente de la luz llevado a cabo en los cloroplastos (Barceló y otros, 1980).

En las plantas se ha encontrado una estrecha relación entre el estado nutricional del nitrógeno y el del azufre (Rodríguez, 1992), y esto no es sorprendente si se considera que aproximadamente el 80% del nitrógeno y azufre incorporados en compuestos orgánicos de las plantas lo hacen en las proteínas cuando ambos elementos se encuentran en proporciones adecuadas.

La absorción de sulfato por las raíces es, en su mayor parte, un proceso metabólico mediado por proteínas acarreadoras las cuales son sujetas a un control negativo de su actividad por medio del monitoreo de la concentración intracelular de sulfato y de los productos del metabolismo del azufre. Sin embargo, tal parece que dichos mecanismos regulatorios son incapaces de evitar la presencia de SO_4^{-2} intracelular en exceso (Urbano, 2002). Como resultado de esto las plantas presentan mecanismos alternos de regulación en forma de un ciclo intracelular del azufre el cual, tendría como función la regulación de la cantidad de cisteína libre en las células.

Los requerimientos de azufre por los cultivos son variables de acuerdo al tipo de suelo en que crecen así como a la cantidad de biomasa acumulada por las plantas. Además de los incrementos en el rendimiento la fertilización con azufre puede dar lugar a los siguientes efectos favorables (Ferraris y otros, 2004):

- Incremento en la concentración de proteína cruda en forrajes.
- Disminución en el valor del cociente N:S así como en la concentración de nitrato libre en los forrajes.
- Mejoramiento de la calidad harinera de los cereales.
- Incremento en el contenido de aceite en oleaginosas.

- Mayor uniformidad y calidad de hortalizas.
- Mayor vida útil de parcelas de leguminosas forrajeras.
- Aumento en la calidad comercial de árboles de navidad.
- Incremento en la resistencia al frío.
- Incremento en la tolerancia a la sequía.
- Control de ciertos patógenos del suelo.
- Aumento en la tasa de descomposición de los residuos vegetales y abono verde.

1.2.5. El Ca y Mg en el suelo y en la planta

Todos los suelos agrícolas contienen calcio procedente de las rocas originarias, dominando entre los demás cationes. La mayor o menor cantidad se refleja en el grado de saturación de la arcilla, cuyo indicador es el pH del terreno (Ibáñez, 2007).

El calcio es absorbido por las plantas en su forma catiónica Ca^{++} y es parte constituyente de las sales en la solución del suelo. En el interior de la planta es un elemento poco móvil interviniendo en la forma de los pectatos de calcio de la laminilla media de las células que intervienen en el proceso de absorción de los elementos. El calcio forma sales con los ácidos orgánicos e inorgánicos del interior de las células regulando la presión osmótica de la misma. Interviene en la formación de la *lecitina*, que es el fosfolípido importante en la membrana celular, siendo un factor importante en la permeabilidad de estas membranas. Igualmente actúa en la división mitótica de las células, en el crecimiento de los meristemos y en la absorción de nitratos (Ramírez, 1997).

La absorción del calcio por la planta es pasiva y no requiere una fuente de energía. El calcio se transporta por la planta principalmente a través del xilema, junto con el agua. Por lo tanto, la absorción del calcio, está directamente relacionada con la proporción de transpiración de la planta.

Dado que la movilidad del calcio en las plantas es limitada, la deficiencia de calcio aparece en las hojas más jóvenes y en la fruta, porque tienen una tasa de

transpiración muy baja. Por lo tanto, es necesario tener un suministro constante de calcio para un crecimiento continuo.

La deficiencia del calcio es generalmente causada debido a una baja disponibilidad del calcio o debido a un estrés hídrico que tiene como resultado bajas tasas de transpiración. Los síntomas de deficiencia del calcio aparecen primero en las hojas y tejidos jóvenes e incluyen hojas pequeñas y deformadas, manchas cloróticas, hojas ajadas y partidas, crecimiento deficiente, retraso en el crecimiento de raíces y daños a la fruta (Brady y Weil, 2008). El calcio es un nutriente esencial para las plantas. Algunos de sus funciones son:

- Promueve el alargamiento celular.
- Toma parte en la regulación estomática.
- Participa en los procesos metabólicos de absorción de otros nutrientes
- Fortalece la estructura de la pared celular - el calcio es una parte esencial de la pared celular de las plantas. Este forma compuestos de pectato de calcio que dan estabilidad a las paredes celulares de las células.
- Participa en los procesos enzimáticos y hormonales.
- Ayuda a proteger la planta contra el estrés de temperatura alta - el calcio participa en la inducción de proteínas de choque térmico.
- Ayuda a proteger la planta contra las enfermedades - numerosos hongos y bacterias secretan enzimas que deterioran la pared celular de los vegetales.
- Investigaciones demostraron que un nivel suficiente de calcio puede reducir significativamente la actividad de estas enzimas y proteger las células de la planta de invasión de patógenos.
- Afecta a la calidad de la fruta.

El calcio forma compuestos insolubles con otros elementos en el suelo, tales como el fósforo. El calcio que se encuentra en la forma de compuesto insoluble no está disponible para la planta.

Dado que el calcio es un ion con carga positiva, es absorbido en el suelo a la superficie de arcilla y a las partículas orgánicas que están cargadas negativamente. Los iones con carga positiva que se absorben a las partículas del suelo son llamados "iones intercambiables", ya que pueden ser intercambiados por otros iones presentes en la solución del suelo (Teuscher, 1980).

Una reacción importante ligada al calcio, es la precipitación con el fósforo. Cuando el calcio libre se acumula en la solución del suelo (por ejemplo, cuando el pH del suelo es alto), el calcio tiende a formar compuestos insolubles con el fósforo. En consecuencia, la disponibilidad del fósforo como la del calcio se reduce significativamente (Baeyens, 1970). De otro lado, el calcio estabiliza la estructura del suelo. Cuando el calcio es absorbido al suelo, ayuda a la estabilización de la estructura del mismo. El sodio absorbido al suelo puede provocar un daño a la estructura del suelo. Un suelo dañado por el efecto de sodio se desmenuza y se agrieta cuando se seca y se hincha cuando se moja. El calcio reemplaza el sodio absorbido y previene daños a la estructura del suelo.

El magnesio (Mg) como parte del grupo de nutrientes esenciales para las plantas, es el elemento constituyente principal de la molécula de clorofila, fundamental en la fotosíntesis. Importante en el llenado de granos y frutos, favorece la absorción de fósforo, está muy asociado con el calcio y el potasio y participa como activador enzimático.

Su naturaleza es mineral, las principales fuentes de magnesio en el suelo son los minerales como la biotita, hornblenda, dolomita y clorita (ferro-magnesianos). Otra fuente de minerales secundarios son: clorita, illita, montmorillonita y vermiculita. Se adsorbe en las superficies de las arcillas y la materia orgánica. Se encuentra en la solución del suelo como catión intercambiable Mg^{2+} en menor cantidad que el Calcio (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Su ciclo es similar al del Potasio pero no es fijado por las arcillas, por esta razón puede lixiviarse fácilmente, sobre todo en texturas medias y gruesas.

Según Díaz (2002), el magnesio es muy móvil en el suelo, llega hasta la raíz principalmente por difusión pero también por flujo en masa. La planta lo absorbe como (Mg^{2+}). La cantidad de magnesio que se mueve por difusión está relacionada con la intensidad del elemento en la solución del suelo, con las propiedades físicas (textura, porosidad), temperatura, humedad del suelo, pH y la capacidad de intercambio catiónico.

La asimilación del magnesio por las plantas también está influenciada por la concentración de otros nutrientes cationes como calcio y potasio. Es fundamental en un programa de fertilización propiciar y conservar una adecuada relación calcio/magnesio, magnesio/potasio y calcio magnesio/potasio. Estas relaciones contribuyen a un adecuado balance en el suelo para brindar un óptimo equilibrio nutricional a las plantas y por consiguiente excelentes producciones y calidades en las cosechas (Gutiérrez, 2005).

Sus síntomas de deficiencia aparecen primero en hojas inferiores (viejas) debido a la alta movilidad del elemento dentro de la planta. Se presentan inicialmente como una leve decoloración amarillenta, pero las nervaduras permanecen verdes. En cultivos como maíz se forman fajas de color amarillento o verde claro en las hojas, mientras que las venas permanecen verdes. En algunos cultivos a medida que la deficiencia progresa, se desarrolla un color rojizo-púrpura, pero las nervaduras permanecen verdes. En palma de aceite comienza una leve decoloración desde la punta de sus folíolos hasta el centro de la hoja dejando las nervaduras verdes. En cítricos se caracteriza por un amarillamiento intervenal en las hojas dejando una porción de tejido color verde en forma de V invertida en la base de la hoja. Pueden presentarse deficiencias de Mg^{2+} en suelos ácidos y arenosos, o en suelos con altos contenidos de amonio (NH_4^+) o altas dosis de potasio (K) (Gutiérrez, 1995).

Las fuentes de magnesio que se utilizan normalmente según el tipo de suelos son los carbonatos de magnesio (dolomita), óxidos y sulfatos de magnesio, que además de ser un suministro del nutriente, contribuyen a disminuir la acidez causada principalmente por el aluminio intercambiable Al^{3+} y los iones H^+ (suelos ácidos). Existen otras fuentes como los fertilizantes NPK-Complejos o de reacción química que además de contener nitrógeno, fósforo y potasio, incluyen magnesio, calcio,

azufre y elementos menores, todos en un solo grano. Estos últimos fertilizantes son fórmulas balanceadas ideales para cada etapa de los diferentes cultivos como siembra, crecimiento, desarrollo y producción (Havlin y otros, 2005).

1.2.6. Los Microelementos en el suelo y en la planta

Mortvedt y otros (1972) manifiestan que los suelos normalmente reciben sus oligoelementos principalmente de las rocas mediante los procesos de meteorización de sus minerales constituyentes. Los productos de la descomposición de plantas y animales, así como las aguas naturales, los materiales de la atmósfera, fertilizantes, agroquímicos, son recursos secundarios.

Las variaciones relativas del contenido total de micronutrientes en los suelos son mucho mayores que las de los principales elementos nutritivos. El contenido de los mismos en el suelo depende de varios factores (Mortvedt y otros, 1991):

- Composición mineralógica del material original: la resistencia a la meteorización está relacionada con la textura y el contenido de oligoelementos de los suelos. Los suelos de texturas finas, principal fuente de estos elementos, derivan, generalmente de minerales de fácil alteración. Fracciones gruesas, con bajo contenido de micronutrientes, proceden de minerales como el cuarzo, que son resistentes a la meteorización.
- Materia orgánica: es reservorio de nutrientes, dado su papel concentrador. Existe la posibilidad de que estos elementos se inmovilicen, formando combinaciones orgánicas complejas no aprovechables, pero también se da la situación inversa, a través de la formación de complejos o quelatos solubles que son aprovechables por el vegetal, siendo una de las vías más adecuadas para corregir deficiencias.

Brady y Weil (2008), indican que la distribución de los elementos menores depende, fundamentalmente, de los procesos formadores del suelo. En los suelos poco evolucionados, la distribución en el perfil es pareja. A medida que avanza la evolución, tienden a enriquecerse los horizontes ricos en materia orgánica o material fino.

Los micronutrientes se encuentran constituidos por especies químicas conocidas y otras desconocidas, de allí que prefiera hablarse de formas funcionales de los mismos. Un elemento dado puede estar:

- **Soluble:** se encuentran combinaciones inorgánicas y principalmente orgánicas, en concentraciones ínfimas.
- **Adsorbido:** las cantidades dependen de varios factores, como tipo de coloide, característica del elemento, pH, etc.
- **Complejado:** con fracciones orgánicas solubles e insolubles.
- **Precipitado:** como óxidos, fosfatos complejos, etc.
- **Estructural:** es el que compone la red cristalina de los minerales.

La forma aprovechable por los vegetales es la soluble, tanto orgánica como inorgánica, cuyo nivel se recupera por el aporte de las otras formas, según el equilibrio de cada suelo.

García (2007) manifiesta que la cantidad de oligoelementos extraída anualmente por los cultivos, no supera generalmente el 1% de las cantidades totales de los mismos existentes en el suelo. Pero su disponibilidad depende principalmente de su solubilidad, la cual está determinada por varios factores:

- **Textura:** se registran en general, menos contenidos solubles cuanto más gruesa es la textura.
- **pH:** en general cuando la acidez aumenta, lo hace también la disponibilidad de micronutrientes, a excepción del molibdeno, cuya solubilidad aumenta con el incremento de pH. En suelos ácidos, los oligoelementos, al estar muy solubles pueden lavarse fácilmente.
- **Materia orgánica:** debe considerarse su influencia sobre la disminución el pH, aumentando la solubilidad. Otro efecto importante es la formación de quelatos, especialmente con cobre y cobalto.
- **Ambiente reductor:** el exceso de humedad puede aumentar la disponibilidad hasta valores de toxicidad.

- También influyen la actividad microbiana y las variaciones estacionales con efectos variables.

Según Urbano (2002), los micronutrientes no deben ser usados anualmente como los macronutrientes, ya que se gastan menos, pudiendo permanecer varios años en el suelo. Una fertilización anual puede provocar toxicidad. Las cantidades en las plantas manifiestan deficiencias distan muy poco de las cantidades que son tóxicas. Por ej, en los casos de boro y molibdeno, la aplicación de pequeñas cantidades (3 a 4 Kg/ ha) de nutriente disponible a un suelo inicialmente deficiente en esos elementos, puede resultar en una severa toxicidad. A continuación se describen de manera resumida sus principales características.

Hierro

Este elemento está situado en tercer lugar en abundancia en la superficie terrestre. Sin embargo, en la nutrición mineral actúa como oligoelemento. Se presenta en los suelos en forma de óxidos, hidróxidos, fosfatos, y formando parte de la estructura de silicatos primarios y minerales arcillosos (Rodríguez, 1992).

La cantidad de Fe disponible para las plantas depende del potencial redox del suelo. La reducción del Fe se realiza especialmente en condiciones de drenaje pobre, produciéndose coloraciones verde- grisáceo- azuladas. Con buenas condiciones de aireación pasa rápidamente al estado férrico.

Los problemas de deficiencia de Fe corresponden con mucha frecuencia a suelos derivados de materiales calcáreos, en parte por un pH elevado, pero además porque hay falta de actividad del Fe en la planta debido a la abundancia de calcio o de calcio y fósforo. El Fe es indispensable en la síntesis de clorofila y es componente de enzimas de la cadena respiratoria. La deficiencia se manifiesta como clorosis.

Manganeso

Se considera que existe en el suelo en tres estados de oxidación: Mn^{2+} ; Mn^{3+} y Mn^{4+} . Las dos últimas formas son muy insolubles, siendo el Mn^{2+} el aprovechable. Este se encuentra disponible en medio reductor. La reversibilidad entre los distintos estados de oxidación es menos probable que en el caso del Fe. En suelos ácidos y mal aireados su concentración puede llegar a ser tóxica para los animales. En extrema acidez también es tóxico para los cultivos (Sims, 2000).

Las deficiencias se dan en suelos alcalinos o neutros y también en aquellos con altos contenidos de materia orgánica con la que formarían complejos insolubles. Interactúa negativamente con el Fe y el Co. Es esencial en la fotosíntesis y constituyente de enzimas.

Zinc

Forma parte de los minerales ferro-magnesianos y de sales. Generalmente está más disponible en los suelos ácidos que en los alcalinos. Su disponibilidad será tanto menor cuanto menos meteorizado esté el material, característica de los climas áridos, con pH en el rango de neutro a alcalino. Con valores más altos de pH se forman Zincatos de calcio insolubles, y en suelos alcalinos aumenta un poco la disponibilidad por la existencia de Zincatos de sodio relativamente solubles. Las deficiencias de Zn se dan con más frecuencia en suelos arenosos y en suelos calcáreos. Altos niveles de P provocan deficiencias de Zn.

Actúa en las plantas como activador de enzimas. El maíz y los frutales, especialmente los cítricos son altamente susceptibles a las deficiencias de Zn, produciéndose cambios en la morfología de las hojas (Mortvedt y otros, 1991).

Boro

Está presente en los suelos tanto en forma orgánica como inorgánica. La mayor parte se encuentra presente en forma de turmalina (borosilicato muy insoluble de meteorización lenta). Los compuestos de B son solubles y en suelos podzólicos puede haber deficiencia. En regiones áridas y semiáridas los niveles son altos. También poseen altos contenidos de B los suelos afectados por agua de mar.

La toxicidad de B está asociada a suelos de regiones áridas y semiáridas, donde puede ser particularmente importante en las aguas de riego. El B está relacionado con la actividad meristemática, las auxinas, las paredes celulares, el metabolismo de proteínas, el mantenimiento correcto de las relaciones del agua dentro de la planta, la translocación de azúcares y los procesos de fructificación (Barceló, 1980).

Cobre

Se presenta en los suelos principalmente como ion Cu^{2+} , adsorbido por los minerales arcillosos y ligados por la materia orgánica que tiene una gran capacidad para combinarse fuertemente con el metal. El 98% del Cu en solución está en combinaciones orgánicas. Los suelos orgánicos son deficientes en Cu, debido a su elevada capacidad de fijación. Dentro de límites razonables de pH, se cree que es un factor que no influye en la disponibilidad. Se han señalado interacciones antagónicas con el Fe, P, Mo y Zn (Mortvedt, 1991).

Es importante en el crecimiento de las plantas como activador enzimático, en el metabolismo de proteínas, y tal vez en la formación de clorofila. Su deficiencia en animales provoca despigmentación de pelo y lana, anemia, crecimiento reducido, enfermedades óseas, y crecimiento anormal de la lana.

Molibdeno

Según Malavolta (1997), se encuentra en el suelo como anión molibdato. El pH es el principal regulador de la disponibilidad de Mo. Se hace cada vez más disponible al aumentar el pH. Su exceso puede causar toxicidad en animales de pastoreo. La deficiencia es corriente en suelos arenosos de reacción ácida.

Es componente esencial de algunas enzimas. Es muy importante en la producción de cultivos forrajeros, debido a la incidencia en el ciclo del N y por sus efectos tóxicos en animales.

Níquel

Ha sido recientemente adicionado a la lista de elementos esenciales para las plantas superiores. Es esencial para el funcionamiento de varias enzimas, incluyendo la ureasa, que descompone la urea en amonio y CO₂. Las leguminosas deficientes en níquel acumulan niveles tóxicos de urea en sus hojas, las semillas de los cereales no son viables y fallan en la germinación (Ibáñez, 2007).

Cloro

Su rol es todavía poco claro, sin embargo, se conoce que interviene en la fotosíntesis y en el desarrollo de las raíces. Es absorbido por las plantas en mayores cantidades que cualquier otro micronutriente, a excepción del hierro. La mayor parte del cloro en el suelo está como ion Cl⁻, que se lava fácilmente en los suelos de las regiones húmedas. Excepto en los suelos salinos que tienen cantidades tóxicas de cloro, en los suelos normales no hay condiciones que reduzcan su disponibilidad. El incremento de cloro de la atmósfera más el proveniente de las sales fertilizantes (como el cloruro de potasio), son suficientes para las necesidades de las plantas (Brady y Weil, 2008).

1.3. Evaluación de la fertilidad del suelo

La evaluación de la fertilidad del suelo es muy compleja, por la diversidad de condiciones químicas, físicas, y biológicas que interactúan. A pesar de que no es posible medir de manera absoluta el nivel de fertilidad de un suelo, el desarrollo progresivo de técnicas, procedimientos y la interpretación de los resultados de los análisis de suelos, hace posible predecir, con cierto grado de seguridad, la probabilidad de respuesta a la aplicación de cal y fertilizantes. Diversas técnicas que se emplean comúnmente tiene como indicador del grado de fertilidad de un suelo (Tisdale y Nelson, 1982):

Síntomas de deficiencia de Nutrientes en las plantas

- a. Análisis foliar o de los tejidos de las plantas que crecen en el suelo.
- b. Análisis biológicos
- c. Análisis químico del suelo.

1.3.1. Síntomas de deficiencia de nutrientes en las plantas

Muchos de los métodos para la evaluación de la fertilidad de un suelo se basan en las observaciones o en las medidas del crecimiento de las plantas. Estos métodos tienen un mérito considerable porque las plantas actúan como integradoras de todos los factores de crecimiento y son los productos que interesan al agricultor.

Las anomalías en el crecimiento de las plantas pueden deberse a deficiencia de uno o más elementos nutritivos. Si una planta carece de un elemento determinado, deben aparecer síntomas característicos, en mayor o menor número. Además las deficiencias en Nutrientes tienen un efecto notable sobre la extensión y el tipo de crecimiento de la raíz (Tisdale y Nelson, 1977).

La deficiencia de un elemento no produce síntomas directamente. Más bien los procesos normales de la planta sufren un desequilibrio, con el resultado de que existe una acumulación de ciertos compuestos orgánicos intermedios y una deficiencia de

otros. Esto conduce a las condiciones anormales consideradas como síntomas y tiene una relación definida con las deficiencias de elementos. Por ejemplo, la diamina putrescina se forma en algunas plantas deficientes en potasio y causa síntomas característicos. De hecho, una planta que contiene el potasio adecuado presentará síntomas si se le inyecta este compuesto (Ramírez, 1997).

La evaluación de la fertilidad de un suelo por el método de síntomas de deficiencia es el único método que no requiere un equipo caro y especializado y puede ser utilizado como un suplemento de las técnicas para el diagnóstico de síntomas que se basan en las observaciones o en las medidas del crecimiento de las plantas.

1.3.2. Análisis de los tejidos de las plantas que crecen en el suelo

Se han empleado dos tipos generales de análisis de plantas:

a. Análisis del tejido

Suele hacerse en tejidos frescos en el campo, es una prueba muy rápida para la determinación de los elementos nutritivos en la savia de la planta o en los tejidos frescos en cual se analiza el nitrógeno, fósforo y el potasio no asimilados.

Para la prueba de los tejidos es de mucha importancia la época adecuada de muestreo en general, el estado más crítico del crecimiento para los tests de tejidos se presenta en la época de floración, o desde la floración hasta el principio de la aparición de frutos. Durante este período la utilización de los nutrientes será detectada con más facilidad (Tisdale y Nelson, 1977).

b. Análisis total

Se realiza sobre toda la planta o sobre diversas partes de la misma. Se emplean técnicas analíticas precisas para medir los diversos elementos después que el material

vegetal se ha secado, triturado e incinerado. Los métodos químicos son sustituidos progresivamente por técnicas espectrográficas, con las cuales se pueden determinar simultáneamente los diecisiete elementos, y de este modo se ahorra una considerable cantidad de tiempo.

Evidentemente, con estos métodos cuantitativos se pueden detectar muchas más diferencias pequeñas que con los análisis de tejidos. Se incluyen los nutrientes asimilados y los no asimilados con el análisis total se pueden determinar muchos elementos, como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, manganeso, cinc, boro, cobre, hierro, molibdeno, cobalto, sílice y aluminio. Como en los análisis de tejidos, la parte de la planta seleccionada es de primordial importancia. Las pruebas indican que es preferible el material que haya madurado recientemente (Brown, 1987).

1.3.3. Pruebas biológicas

El empleo del conocimiento del crecimiento de las plantas tiene mucha importancia en el estudio de los requerimientos de fertilizantes, y se ha dedicado una gran atención a este método para medir el estado de fertilidad de los suelos.

La evaluación de la fertilidad del suelo es el proceso mediante el cual se hace un diagnóstico de los problemas de nutrición y se hacen recomendaciones de fertilización. Actualmente en los trópicos se usan varios procedimientos así como en el resto del mundo. Los más difundidos se basan en el análisis de suelos, análisis de plantas, técnicas de elementos faltantes, ensayos de fertilización simples, y con frecuencia combinaciones de ellos (Oliveira y otros, 2006).

Un programa de evaluación de la fertilidad del suelo tiene ver principalmente con los elementos nutritivos de las plantas y con las condiciones del suelo, con métodos apropiados para evaluar los análisis de suelos, análisis de plantas, reconocimientos de suelos, condiciones climáticas. El mejoramiento incluye la adición al suelo de fertilizantes: cal, abonos orgánicos y otras enmiendas para la producción de cultivos,

por lo tanto un programa de evaluación de la fertilidad y mejoramiento del suelo específico en cuanto al sitio y en cuanto a la situación. Para un campo específico se consideran factores que afectarán el rendimiento, la capacidad de los agricultores y disponibilidad del capital (Díaz, 2002).

Los aspectos más difíciles del proceso de evaluación de fertilidad del suelo son la correlación, interpretación y las recomendaciones de fertilizantes debido a la complejidad del fenómeno involucrado. Un análisis de suelo por sí no tiene valor; es una cifra empírica que puede reflejar o no la disponibilidad de un nutrimento en forma indirecta. El valor de análisis de suelo se torna útil solamente cuando se correlaciona con la respuesta del cultivo. Tales correlaciones son generalmente a dos niveles (Walsh y Beaton, 1973).

Un exploratorio en el invernadero con un número grande de suelos ampliamente divergentes; y uno más definitivo en el campo, con un número menor de suelos, pero cuidadosamente seleccionados.

El propósito principal de la correlación a nivel de invernaderos es comparar diferentes métodos de extracción y determinar los niveles críticos tentativos. El objeto de las correlaciones a nivel de campo es establecer los niveles críticos definitivos para un método de extracción seleccionado (Villalbí y Vidal, 1988).

Sin embargo cuando el rendimiento absoluto, la respuesta de rendimiento, la absorción de nutrimento u otros parámetros de crecimiento se grafiquen en función de los valores analíticos del suelo ocurre una considerable dispersión de puntos. La continuidad de puntos se divide corrientemente en varias categorías arbitrarias, tales como "baja" "media" y "alta". Las recomendaciones de dosis se basan en el fertilizante necesario para elevar el nivel del análisis de suelos a "alta". Cuando se usa rendimiento relativo en lugar de rendimiento absoluto, la variabilidad se reduce considerablemente (Porta, 1986).

Las correlaciones de análisis de suelo no pueden predecir rendimientos ni aún respuesta de rendimiento absoluto debido a las muchas otras variables involucradas.

Un avance muy importante en este tema tuvo lugar con el desarrollo del método Cate-Nelson (Cate y Nelson, 1965). El método gráfico simple consiste en marcar con puntos los rendimientos relativos (porcentajes del máximo). En función del análisis de suelo, en vez de intentar adecuar una función matemática continua a través de los puntos diseminados, se usa una hoja transparente de superposición dividida en cuadrantes por líneas horizontales y verticales (X - Y). Esta se superpone sobre los datos de manera que el mayor número de puntos caigan en los cuadrantes inferior izquierdo y superior derecho y derecho inferior.

El punto en que la línea vertical corta el eje "X" se considera que es el nivel crítico para el método de análisis de suelo bajo consideración. El punto en que la línea horizontal corta el eje "Y" separa a los suelos de respuesta baja. Por tanto, el nivel crítico divide los puntos con probabilidad de una respuesta de rendimiento grande, de los con poca probabilidad de que se obtenga respuesta.

El método Cate-Nelson menciona que cada punto representa una parcela de campo. En comparación con las técnicas convencionales de correlación, el método Cate-Nelson tiene algunas ventajas fundamentales y prácticas. Al separar los puntos de los datos en dos poblaciones, sigue la ley del mínimo de Leibig, por cuanto el nivel crítico es el punto más allá del cual el nutrimento de que se trata deja de ser un factor limitante. La ventaja principal del procedimiento Cate-Nelson es que reconoce la limitación básica de las pruebas de suelo.

La validez estadística de la técnica también ha sido comprobada adecuando un modelo de regresión lineal discontinua y comparándolo con los modelos curvilíneos convencionales (Cate y Nelson, 1965).

Las recomendaciones de fertilizantes sólo se obtienen mediante ensayos de campo. Como los ensayos de campo son caros, los suelos deben seleccionarse cuidadosamente el número de experimentos debe ser realmente pequeño para poder manejarlos con todo cuidado. Como en el caso de las correlaciones, dos métodos principales de interpretación de pruebas de suelos se usan en los trópicos: el método continuo (curvilíneo), y el discontinuo (lineal). Los modelos continuos clásicos se basan en la ley del rendimiento decreciente y con el modelo continuo las

recomendaciones óptimas de fertilizantes varían con las razones de precio - costo que son característicamente más erráticas en los trópicos que en los países desarrollados. Dichas recomendaciones son tan buenas como los precios pronosticados.

El modelo discontinuo lineal en la mayoría de los casos las curvas de respuestas a fertilizantes puede caracterizarse por un marcado aumento lineal seguido por una línea recta horizontal. La curva de respuesta de rendimiento construida de esa manera consiste de tres puntos principales:

- 1) El "umbral de rendimiento" rendimiento al nivel cero.
- 2) Rendimiento (plateau) rendimiento en el punto en que el elemento deja de ser un factor limitante.
- 3) Rendimiento relativo. Umbral de rendimiento dividido entre el rendimiento (plateau).

El rendimiento plateau final es el efecto de limitaciones genéticas, radiación solar, y otras variables no controladas (Tisdale y Nelson, 1982).

Cualesquiera que sea la forma en que se determinan las recomendaciones sobre fertilizantes, éstas carecen de valor si el agricultor no los pone en práctica. Su aplicación eficaz depende de los aspectos educativos y de promoción dirigidos en atraer la atención del agricultor. Generalmente este esfuerzo incluye días de campo, parcelas demostrativas, programas radiales, y ayudas audio visual. Una vez familiarizado con el programa, aceptarán o rechazarán las recomendaciones (Sims, 2000).

Los programas satisfactorios de evaluación de la fertilidad del suelo también resumen su información por regiones o sub divisiones políticas para cada cultivo de mayor importancia (Sims, 2000).

Las recomendaciones específicas sobre fertilizantes deben ser claras y correctas. Deben incluir no sólo las dosis recomendadas para cultivos y suelos específicos, sino

también los mejores fuentes de los fertilizantes, método de colocación y fechas de aplicación (Ramírez, 1991).

Aunque una correlación no significa una relación causa-efecto, los buenos análisis de suelos y el aumento en el consumo de fertilizantes marcha a la par. La última fase de la evaluación de la fertilidad del suelo es la investigación para mejorar la calidad de las recomendaciones.

Otros sistemas de evaluación de la fertilidad del suelo se basan en el análisis de plantas que tiene una ventaja fundamental: integra los efectos del suelo, la planta, el clima, y el manejo. En esta forma constituye la mejor medida de la disponibilidad de los nutrientes. Sin embargo el análisis foliar tiene una desventaja fundamental: en el momento en que el análisis señala un problema nutritivo, es ya muy tarde para corregirlo sin que se produzca una considerable pérdida de rendimiento.

Cuando se toman muestras de plantas de la misma parte anatómica y en la misma etapa de crecimiento, pueden establecerse ciertos niveles críticos, más arriba de las cuales la planta cuenta con un buen suministro del nutrimento y más abajo el suministro es insuficiente. Se necesita una segunda serie de niveles críticos para nutrimentos presentes en cantidades tóxicas, tales como boro, hierro, y manganeso.

Los niveles críticos en los análisis de plantas sigue a ley del mínimo y esencialmente el mismo procedimiento del concepto de Cate-Nelson. La forma de datos de concentración de nutrimentos versus datos de rendimiento relativo El nivel crítico de toxicidad es un factor adicional que comúnmente no se toma en cuenta en los análisis de suelos (López, 1990).

Un procedimiento muy importante se basa en la identificación de diferencias de elementos nutritivos por medio de la técnica del elemento faltante. Esto involucra el uso de plantas indicadoras en el invernadero o en campo en un suelo al que se le agrega un fertilizante completo, y una serie de tratamientos en los cuales se deja de

agregar uno de los elementos. Generalmente las plantas se cosechan antes de su madurez.

Según Porta (1986) los experimentos en macetas con la técnica del elemento faltante dan tres tipos de información:

- a) Cuales elementos son deficientes.
- b) La importancia relativa de las deficiencias.
- c) La fase a que se agota la fertilidad.

Los investigadores consideran que las deficiencias son serias sí la producción de materia seca baja al 40% o menos del tratamiento completo.

Las técnicas del elemento faltante tienen la desventaja de que sólo se obtienen datos a principio del crecimiento de las plantas, de que las deficiencias nutritivas pueden resultar exageradas por el poco volumen de suelo, y que el esfuerzo que se requiere excluye su uso para gran número de suelos en los campos de los agricultores. Su valor está en la selección preliminar en proyectos de investigación o para la obtención de información adicional necesaria sobre los suelos con los cuales las pruebas de respuesta de rendimiento dieron conclusiones diferentes.

El nivel crítico depende del extractante usado así como del cultivo involucrado. En la práctica el diagrama de dispersión de Cate-Nelson provee una técnica simple, pero altamente efectiva, para evaluar los métodos analíticos de los suelos. Un buen extractante del suelo para cualquier nutriente deberá proveer una división casi perfecta entre las categorías diferentes de suelo cultivo. Cuando se realizan correlaciones con estudios en macetas, todos los rendimientos relativos generalmente son más bajos, que los adquiridos a través de experimentos en el campo.

Hasta la actualidad no se han establecido reglas para determinar la clase de modelo de respuesta que es la más apropiada para usar en la interpretación de respuestas a fertilizantes en ensayos de campo (Tisdale y Nelson, 1982).

En lo que respecta a una planta indicadora lo más adecuado sería emplear una especie de cultivo habitual en la zona o lugar donde se ha tomado la muestra, pero se corre el riesgo de que dicha planta sea poco exigente en nutrimentos y para manifestar deficiencias se requiere más de un cultivo en la unidad experimental; ante este inconveniente y considerando que cuando se estudian muchos suelos simultáneamente es mejor hacerlo en un invernadero, se utiliza una planta que es exigente en elementos nutritivos y manifiesta con claridad los síntomas de deficiencias. Esos requisitos los cumple el tomate, que ha sido utilizado por muchos investigadores con resultados satisfactorios (Porta, 1986).

Las soluciones extractoras de los elementos nutritivos disponibles deben satisfacer tres criterios:

- a. Extraer todas las formas disponibles o una parte proporcional, del nutrimento en suelos con propiedades ampliamente diferentes.
- b. El procedimiento debe ser rápido y preciso.
- c. Las cantidades extraídas deben estar correlacionados con el crecimiento y respuesta de cada cultivo bajo diversas condiciones

1.3.4. Análisis Químico del Suelo

Según Navarro (2003), por los problemas de muestreo de los suelos se menciona "El análisis no puede ser mejor que la muestra" para ello hay que tomar las siguientes consideraciones:

- a. Hay que tomar muestras en toda el área a analizar bajo consideración.
- b. La precisión de una determinación puede ser aumentada al aumentar el número de muestras o determinaciones.
- c. Los sistemas agroforestales principalmente afectan las características del suelo superficial y muestreo a una profundidad de 15cm. es adecuado para medir efectos sobre fertilidad.

El análisis de suelo o "las pruebas de los suelos" es la columna vertebral del programa de evaluación de la fertilidad (Ramírez, 1997), que complementa la

descripción de la morfología del suelo en el campo, dando mayor precisión a la propiedades físicas tales como textura y la fracción de arcilla que no puede ser estimada en el examen de campo. Los test de los suelos es esencialmente el examen en el laboratorio de los suelos, por tanto, es distinto del examen de campo (Oliveira y otros, 2006).

El análisis de suelos como método de diagnóstico de deficiencias de nutrientes en el suelo, está en función a la eficacia de extracción del reactivo químico empleado sobre los nutrientes disponibles para las plantas. Si hay correlación entre la cantidad de nutrientes determinada por el método químico y la cantidad requerida por la planta se puede estimar la necesidad de aplicar o no los fertilizantes (López, 1990).

La tendencia actual en la que está invirtiendo bastante tiempo y dinero es en las pruebas de suelos que permiten de manera rápida medir el estado de un elemento nutritivo para las plantas, al mismo tiempo que sirve para predecir necesidades reales y estar en condiciones de poder dar recomendaciones de fertilización o enmiendas, a esto se denomina la "Prueba de Suelos" y su uso debe hacerse antes de que se siembre el cultivo, justamente para trabajar con alta probabilidad de éxito (Junta de Extremadura, 1992).

Los objetivos más importantes del análisis de suelo son:

- Agrupar los suelos en clases para poder hacer las sugerencias pertinentes de cal y fertilizantes.
- Predecir las probabilidades de lograr resultados beneficiosos mediante la aplicación de nutrientes a las plantas.
- Ayudar a evaluar la productividad del suelo.
- Determinar condiciones específicas del suelo que puedan mejorarse mediante la adición de enmiendas y prácticas de cultivo.

La escasez de nutrientes en el suelo puede intensificarse en condiciones anormales del tiempo y pueden estar presentes en cantidades suficientes cuando las condiciones

son ideales, pero en caso de sequía, de excesiva humedad o de temperatura anormal, puede ser que la planta no sea capaz de obtener un suministro adecuado. Por ejemplo, con temperaturas bajas, los tomates toman menos nitrógeno, fósforo y potasio (Tisdale y Nelson, 1977).

Según Brady y Weil (2008) tal programa de análisis de suelos tiene seis facetas interrelacionadas:

1. Muestreo (suelo y planta).
2. Análisis de laboratorio (suelo y planta).
3. Correlación entre análisis y respuestas de rendimiento.
4. Interpretación y recomendaciones.
5. Poner la información en uso
6. Investigación.

El programa completo de análisis de suelos tiene componentes de laboratorio, invernadero y campo; asimismo el análisis de suelos es un medio para obtener recomendaciones sobre fertilizantes.

El alcance del análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad es limitado por la variabilidad observada en las relaciones entre el rendimiento o la respuesta de los cultivos y el nivel de nutriente “disponible” en el suelo. En general, los niveles de un nutriente en suelo explican un 40-60% del rendimiento o respuesta del cultivo., Este escenario ocurre debido a que el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo dependen de numerosos factores más allá de la disponibilidad de un único nutriente (ej.: radiación, temperatura, otros nutrientes, agua, etc).

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, las experimentaciones de correlación y calibración de análisis de suelos con fines de diagnóstico se redujeron notablemente en los últimos 20-30 años, tanto en el país como a nivel internacional. Estas experimentaciones de correlación y calibración son esenciales para poder

generar las interpretaciones y recomendaciones correspondientes. En este aspecto, las investigaciones realizadas en los últimos años en el país han sido escasas y generalmente en trabajos de iso-dosis (dosis única) en los cuales se pueden definir, como en el caso de P, solamente umbrales críticos. En el caso de N, las investigaciones en el uso del contenido de N-nitratos a 0-60 cm permiten generar calibraciones y facilitan la formulación de interpretaciones y recomendaciones (Ramírez, 1997).

Si se pretende utilizar el análisis de suelos con fines de diagnóstico, deberían ampliarse las investigaciones de calibración, evaluando los agro-ecosistemas de las principales áreas productoras. Sería de interés aprovechar las tecnologías actuales imágenes satelitales, mapas de rendimiento, mapas de suelos y topográficos, para lograr una mejor definición de ambientes contrastantes en el agrupamiento sitios con condiciones similares que puedan responder de manera similar a un determinado nivel de nutriente en suelo y/o a la aplicación de fertilizante. Obviamente, los costos y recursos que involucran los estudios de calibración son una limitante. En este aspecto, las alternativas que se han utilizado en los últimos años y que se discuten en el próximo punto pueden ser válidas para simplificar el trabajo experimental de calibración complementándolo con información que contribuye a un diagnóstico de fertilidad adecuado (Navarro, 2003).

CAPITULO II

MATERIALES Y METODOS

2.1. UBICACIÓN

El experimento fue conducido en el invernadero del Programa de Investigación en Pastos y Ganadería - Área de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias, en el período comprendido del 15 de enero del 2009 hasta el 18 de abril del mismo año.

La ubicación geográfica del lugar experimental es la siguiente:

Latitud : 13° 09' 56"

Longitud : 74° 13' 40"

Altitud : 2,750 msnm.

2.1.1. Fases del trabajo

2.1.2 Fase de campo

a. Características generales de la zona en estudio

Los suelos estudiados proceden del distrito de Santa Rosa, provincia de La Mar, Región Ayacucho y se encuentran situados en la ceja de selva con características geográficas peculiares y pertenecen a la zona de vida bosque húmedo – Montano Sub tropical (bh – MS). Esta se distribuye entre los 800 y 1500 msnm y corresponde

según el mapa ecológico del departamento, a las localidades de Cimariva, Huayrapata, Anteccasa, Huantachaca, Mejorada, Luisiana, Rinconada baja, La Victoria, San Cristóbal y San Pedro. La biotemperatura media anual máxima es de 21 °C; el promedio máximo de precipitación total por año es de 2000 mm y el promedio mínimo, de 1000 mm. Se ubica a esta zona en la provincia de humedad húmeda.

El relieve es predominantemente empinado y escarpado, ofrece superficies llanas en algunos sectores. Por lo general, aquí dominan suelos relativamente profundos, arcillosos de reacción ácida, tonos rojizos a pardos y que se asimilan al grupo edafogénico de Phaeozems (Mollisoles); en las áreas muy empinadas, aparecen suelos delgados dando paso a los litosoles (Entisoles) y algunas formas de Rendzinas, así como grupos transicionales pertenecientes a los cambisoles (Inceptisoles).

b. Breve descripción de los lugares estudiados

Los suelos del presente trabajo se recolectaron de algunas comunidades cuyos cultivos son predominantemente café, cacao, cítricos y especies forestales. La selección del área y la toma de muestras se realizaron considerando la importancia agrícola, la ecología de la zona, y la topografía; es decir, teniendo en cuenta el tipo de vegetación natural y el tipo de cultivos predominante tratando de seleccionar en cada zona un suelo representativo. Las muestras se tomaron de la capa arable de terrenos cultivados a una profundidad de 20 cm.

Muestra 01: Rinconada Baja

Está ubicada en la margen izquierda del Río Apurímac. Corresponde a la parte baja de la ceja de selva. La topografía de la zona es plana con un relieve ondulado y con ligeras inclinaciones. Los suelos son profundos, de clase textural franco. Se ha muestreado en una extensión aproximada de 1.5 has donde existe predominantemente el cultivo de cacao y también plátanos, yuca y maíz amarillo. La vegetación predominante son las palmeras.

Muestra 02: Luisiana

Ubicado al margen izquierdo del Río Apurímac. Se ha muestreado aproximadamente 2 has cuyos suelos son profundos y arenosos. El cultivo actual que se encuentra es cacao, caña de azúcar y diversas especies forestales. La topografía es plana con ligeras ondulaciones donde se forman cochas o pequeños mojadales. La vegetación predominante es la caña brava (sabolo), árboles de mediana estatura y con arbustos diversos. El suelo es de naturaleza aluvial. Los cultivos predominantes son el cacao, plátanos, diversos cítricos, yuca, maíz, caña de azúcar, etc.

Muestra 03: Unión Mejorada

Está ubicado en la margen izquierda del Río Apurímac y corresponde a la parte baja de la ceja de selva. Se muestreó un área aproximada de 1.5 has donde se encontraba implantado el cultivo de cacao. Presenta una topografía plana, son suelos aluviales, profundos, de clase textural franco arenosa, con buen drenaje superficial. La vegetación está conformada por caña brava, huilca, palmera, arbustos diversos y con cultivos predominantes como el cacao, plátano, diversos cítricos, coco, yuca y maíz amarillo.

Muestra 04: Huantachaca

Está ubicado en la parte baja de la ceja de selva. Se ha muestreado un área aproximada de 1.5 has. El cultivo predominante es el cacao no abonado. Presenta una topografía plana con suelos poco profundos y pedregosos. La vegetación predominante es el pacaé, huilca y palmeras. El cultivo de mayor importancia en la zona es el cacao seguido por cítricos, palto, coco, maíz amarillo, yuca, etc.

Muestra 05: Cimariva

Corresponde a la zona media de la ceja de selva. Son tierras que presentan una topografía desde ligeramente inclinada a empinada. La vegetación es diversa en las

que resaltan árboles maderables como el cedro, roble, huillca, nogal y arbustos diversos. Se ha muestreado aproximadamente 1.5 has donde los cultivos que predominan son el barbasco, el achiote, cacao y cultivos de pan llevar.

Muestra 06: Huayrapata

Corresponde a la zona media de la ceja de selva. Se ha muestreado en una extensión aproximada de 2 has donde se encontraban cultivos de cacao y maíz amarillo. Las tierras presentan un relieve ligeramente accidentado y empinados. Los suelos son ligeramente profundos. La vegetación está constituida por árboles maderables como huillca, cedro y roble. Existen árboles frutales como el paca, palto y diversos cítricos. Se cultiva predominantemente barbasco seguido por el cacao y café.

Muestra 07: La Victoria

Corresponde a la zona media de la ceja de selva. Se ha muestreado una área aproximada de 1 ha donde existía plantaciones de cacao. Las tierras presentan un relieve ondulado con topografía ligeramente inclinada. Los suelos son profundos. La vegetación de la zona está conformada por árboles maderables como el cedro, roble, huillca y diversos arbustos. Como cultivos, predominan el cacao, barbasco, Palillo, plátanos, yuca y frijoles.

Muestra 08: Antecasa

Corresponden a la zona alta de la ceja de Selva. Se ha muestreado un área aproximada de 1.5 has. El cultivo dominante en la zona es el café. Las tierras presentan un relieve accidentado con una topografía ligeramente empinada. Los suelos son regularmente profundos. La vegetación arbórea está constituida por diversos árboles maderables en las que resaltan el roble, kinacho, huillca, palo de acero. Se ha verificado que existen algunos frutales como el palto, paca silvestre, mango y arbustos diversos; sin embargo, en la zona el cultivo principal es el café.

Muestra 09: San Pedro

Corresponde a la zona alta de la ceja de selva. Las tierras presentan un relieve ondulado con una topografía moderadamente empinada. Se ha muestreado un área aproximada de 1.5 has. La zona presenta una vegetación diversa entre las cuales resaltan los árboles maderables como el kinacho, palo de acero, huilca, cítricos y arbustos diversos y el cultivo principal es el café.

Muestra 10: San Cristóbal

Corresponde a la parte alta de la ceja de selva. Se ha muestreado una área aproximada de 1 hectárea. Los suelos presentan una topografía fuertemente inclinada, con un relieve accidentado y empinado. El cultivo más importante es el café seguido por cultivos de pan llevar con una vegetación predominante de monte alto conformado por diversos árboles que llegan a medir hasta 30 m de altura donde destacan el palo de acero, roble blanco y amarillo, huilca, cedro y nogal. Existen frutales como el palto, paca silvestre, etc.

En síntesis, tres de los suelos pertenecen a llanuras aluviales de la zona baja y el resto, son suelos de ladera coluviales ubicados en la parte media y alta de Santa Rosa. En el cuadro 2.1 se presenta información complementaria de los suelos estudiados.

Cuadro 2.1. Algunas características de los suelos estudiados

Nº	Procedencia	Distrito	Altitud msnm.	Pendiente
01	Rinconada Baja	Santa Rosa	638	4
02	Unión Luisiana	Santa Rosa	627	2
03	Unión Mejorada	Santa Rosa	621	3
04	Huantachaca	Santa Rosa	680	2
05	Cimariva	Santa Rosa	848	22

06	Huayrapata	Santa Rosa	936	30
07	La Victoria	Santa Rosa	905	25
08	Anteccasa	Santa Rosa	1165	26
09	San Pedro	Santa Rosa	1177	21
10	San Cristóbal	Santa Rosa	1340	31

2.1.3. Fase de laboratorio

Preparación de la Muestra

Luego de la descripción y recolección de muestras debidamente embolsados y etiquetados fueron transportadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas “Nicolás Roulet” del Programa de Investigación en Pastos y Ganadería de la UNSCH; en una cantidad aproximada de 2 a 4 Kg. por muestra. De la capa arable, con el fin de contar con tierra suficiente se extrajo aproximadamente entre 70 a 80 kg para la prueba biológica. En el laboratorio se procedió sucesivamente a las labores de secado, molienda, tamizado, embolsado, etiquetado y almacenado para facilitar su posterior análisis.

El secado se efectuó en un lugar bien ventilado por espacio de cinco días; la molienda con un mortero de porcelana y su respectivo pilón; el tamizado con una malla de 2 mm de diámetro; el embolsado en recipientes herméticos de polietileno; el etiquetado mediante códigos para fácil identificación en una cantidad de 2 a 2.5 kg y, finalmente, se almacenó en costales plásticos al interior del invernadero.

Determinaciones Generales del Suelo

Tanto el análisis físico como químico, se realizó utilizando las técnicas convencionales y los procedimientos analíticos que han sido calibrados para nuestra zona por el laboratorio de suelos del Programa de Investigación en Pastos y Ganadería. De manera resumida, se indica en el siguiente cuadro.

Cuadro 2.2. Variables y metodología de análisis de laboratorio

Parámetro	Metodología
Físicos Textura Densidad aparente Color Capacidad de Campo	Hidrómetro de Bouyoucus Método del cilindro Tabla de colores Munsell Gravimetría
Químicos pH Conductividad eléctrica Carbonatos Materia Orgánica Fósforo disponible Potasio Disponible Capacidad de Intercambio catiónico Cationes cambiables: Calcio y Magnesio Potasio y sodio Hidrógeno y Aluminio	Potenciometro Conductímetro Gasometría Método de Walkley - Black Método de Olsen Modificado Espectrofotometría de absorción Atómica Método del Acetato de Amonio Espectrofotometría de absorción Atómica Espectrofotometría de absorción Atómica Titulación

2.1.4. Fase de invernadero - Estudio del estado nutricional

a) Prueba biológica

Muestreo y preparación de los suelos

Se tomaron muestras de la capa arable en 10 lugares con vocación productora de cultivos, cultivos industriales y frutales propias de la zona de ceja de selva del distrito de Santa Rosa, en los lugares más representativos y a una profundidad de 0.20 m recogiendo aproximadamente 70 a 80 kg de tierra en cada lugar. Estas muestras fueron trasladadas a la ciudad de Ayacucho y se procedió a secarlos al aire

libre por un espacio de cinco días. Seguidamente se realizó la molienda triturando las partículas y separando todas las piedras y restos vegetales. El tamizado se realizó con una malla de 4mm de diámetro, luego se homogenizaron para ser colocadas en cada maceta.

Instalación de las macetas

Se emplearon macetas de 2 Kg de capacidad cuyo fondo tiene cuatro agujeros en su parte central con la finalidad de poder eliminar el agua en exceso; luego se colocaron aproximadamente 100 g de grava fina previamente lavada con una solución de HCl 0.02 N y enjuagado repetidas veces con agua desionizada. Posteriormente se colocó 1.8 Kg de suelo seco al aire corregido por la determinación de la humedad higroscópica. Finalmente se colocaron las etiquetas respectivas a todas las unidades experimentales para su respectiva identificación por suelos y tratamientos.

Planta Indicadora

Se empleó como planta indicadora, el tomate (*Lycopersicon esculentum*), variedad "Big Rio" por ser esta sensible a la deficiencia de Nutrientes y manifestar síntomas característicos a la carencia de elementos esenciales de la fertilidad del suelo, además se consideró la capacidad del cultivo para obtener un buen crecimiento bajo condiciones restringidas de suelo especialmente cuando crecen varias plantas por maceta.

Instalación y Conducción del Experimento

Almácigo

La siembra de las semillas de tomate se realizó en una cama de almácigo, previa preparación del sustrato que ha consistido en 1/3 de tierra agrícola, 1/3 de arena fina y 1/3 de humus de lombriz. Esta labor se realizó el 15 de enero de 2009, a una humedad del suelo equivalente a la capacidad de campo.

Se depositaron las semillas a una profundidad de 1cm. La germinación se manifestó a los 10 - 12 días. Se tuvo problemas con la enfermedad de la chupadera (*Rhizoctonia sp*), lo que determinó el recalce con el trasplante respectivo.

Trasplante

El trasplante se realizó a los 30 días posteriores al almacigado una vez asegurada la germinación y cuando las plántulas tuvieron aproximadamente 15 cm. de altura. Se trasplantaron 6 plantas por maceta los más desarrollados y uniformes posible sobre un suelo con humedad próxima a capacidad de campo.

Riegos

Se asumió como base para el riego la humedad próxima a capacidad de campo, utilizando agua desionizada de acuerdo a los requerimientos del cultivo.

Cosecha

El corte de la planta de tomate se realizó el 18 de abril de 2009, a los 63 días de la siembra. Se procedió a cosechar las plantas al nivel del suelo para luego ser lavadas y enjuagadas repetidas veces con agua desionizada a fin de eliminar la tierra y polvo adheridos; seguidamente las muestras fueron secadas al aire en el ambiente del invernadero y luego se colocaron en bolsas de papel con sus códigos respectivos.

El secado se completó en una estufa con circulación de aire caliente a una temperatura de 65 °C durante 48 horas hasta obtener peso constante. Estas muestras posteriormente se pesaron en una balanza analítica para obtener el rendimiento de la materia seca y por último se procedió con el análisis foliar.

Técnicas analíticas utilizadas en el análisis de plantas

La determinación de los elementos minerales en las plantas se basa en un ataque a la muestra del tejido vegetal por vía húmeda, por acción de los agentes fuertemente

oxidantes (HNO_3 y HClO_4), se realizaron por etapas hasta obtener una solución extracto, luego de haber oxidado todos los componentes.

Después de obtener el extracto, producto de la digestión, se determinó los siguientes elementos:

- Calcio y magnesio por método de complexometría.
- Potasio y Sodio por fotometría de llama.
- Fósforo por método colorimétrico Bray - Kurtz I.
- Nitrógeno, por el método Kjeldahl.
- Azufre, por el método turbidimétrico

2.2. Técnica del Elemento Faltante

Un método rápido y sencillo propuesto por Martini para evaluar la fertilidad de los suelos es la del elemento faltante. Este método fue uno de los primeros diseños experimentales empleados en la caracterización de la fertilidad de los suelos. Desde que Salm Horstmar, la utilizó en el invernadero en 1849 y Georges Ville la puso en práctica en el campo en 1870; muchos otros investigadores han hecho uso extensivo en esta técnica con bastante éxito. En vista de que en la técnica del elemento faltante se aplican todos los nutrientes menos el elemento en estudio, este diseño se presta para trabajar en el invernadero, donde el volumen de suelo utilizado es pequeño y las deficiencias nutricionales suelen aparecer con facilidad. Además, se aplican muy bien a suelos pobres donde las deficiencias y desbalances nutricionales también son comunes.

En el presente trabajo se empleó la técnica del elemento faltante como un método biológico rápido para evaluar, mediante un experimento en maceta, la fertilidad de los suelos comparando los rendimientos del cultivo cuando hemos hecho disponible un elemento en ese suelo mediante la fertilización versus los rendimientos del mismo cultivo, cuando sólo se ha empleado la fertilidad natural de ese suelo (Ibáñez y Aguirre, 1983).

2.2.1. Tratamientos

En el presente experimento para la técnica del elemento faltante, se han asignado 9 tratamientos distribuidos al azar con tres repeticiones. Estos tratamientos se indican en el cuadro 2.4.

Cuadro 2.3. Tratamientos para la técnica del elemento faltante

Símbolo	Características
T	Control o testigo, sin abonamiento
- N	Con todos los nutrimentos, menos el Nitrógeno
- P	Con todos los nutrimentos, menos el Fósforo
- K	Con todos los nutrimentos, menos el Potasio
- S	Con todos los nutrimentos, menos el Azufre
- Ca	Con todos los nutrimentos, menos el Calcio
- Mg	Con todos los nutrimentos, menos el Magnesio
- ME	Con todos los nutrimentos, menos el Cobre, Cinc, Fierro, Molibdeno y Boro
C	Con todos los nutrimentos: Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Azufre, Calcio, Magnesio, Cobre, Cinc, Fierro, Molibdeno y Boro.

2.2.2. Niveles de abonamiento

La aplicación de los nutrientes se efectuó a partir de reactivos químicos en solución en lugar de abono comercial para evitar en lo posible contaminaciones y aumentar su solubilidad, una vez establecido el equilibrio de los nutrientes con el suelo. Para obtener la solución acuosa se disolvieron los reactivos en 2 lt. de agua destilada que permitió aplicar 10 ml a cada maceta. Esta operación se efectuó 1 día antes del

transplante con el fin de establecer un período de equilibrio entre el fertilizante y el suelo. Cabe mencionar que el Ca, Mg y S se incorporó en forma de polvo mezclados uniformemente con el suelo. Los niveles y fuentes de Nutrientes utilizados se indican en el cuadro 2.5, cuyas dosis se establecieron de acuerdo al resultado del análisis químico de los suelos.

Cuadro 2.4. Niveles y fuentes de los nutrientes

Nutrientes	Niveles			Reactivo	g/maceta	Fuente
	Kg. ha ⁻¹	ppm	g/maceta			
N	300	150	0.150	CO(NH ₂) ₂	0.3214	Urea
P	360	180	0.180	NaH ₂ PO ₄ .H ₂ O	0.8017	Fosfato de sodio
K	200	100	0.100	KCl	0.1907	Cloruro de potasio
S	200	100	0.100	S°	0.1000	Flor de azufre
Ca	500	250	0.250	CaCO ₃	0.6250	Carbonato de calcio
Mg	60	30	0.030	MgCO ₃	0.1041	Carbonato de magnesio
Micro Elementos						
Fe	10	5	0.005	EDDHA-Fe	0.0833	Secuestrene
Cu	2	1	0.001	CuCl ₂ .2H ₂ O	0.0027	Cloruro de cobre
Zn	10	5	0.005	ZnCl ₂	0.0104	Cloruro de zinc
Mo	10	5	0.005	(NH ₄) 6Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	0.0092	Molibdato de amonio
B	3	1.5	0.0015	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	0.0070	Borato de sodio

2.3. Interpretación de los niveles de nutrientes de los suelos

El problema principal en el análisis de suelos y de plantas es la interpretación de los resultados obtenidos; en ésta se debe tener presente el uso que se pretenda dar a los resultados. Aunque las pruebas químicas presentan algunas dificultades, la preocupación mayor es quizás, en un programa de testificación, la calibración de las pruebas. Es esencial que los resultados de los test del suelo y del tejido vegetal, sean calibrados frente a la respuesta del cultivo por la aplicación de los nutrientes en cuestión.

Mediante el análisis se pretende conocer, sus características físico-químicas, y de otro determinar del modo más aproximado posible, la capacidad del suelo, para suministrar a los diferentes cultivos distintos elementos fertilizantes, es decir, su estado de fertilidad. Por otra parte, los análisis de plantas se basa que la cantidad de un elemento dado en una planta es una indicación del suministro de ese nutriente particular y por tanto se relaciona directamente con la cantidad presente en el suelo (Tisdale Y Nelson, 1977).

La correlación entre la absorción de nutrientes por la planta expresados en términos de incremento en mgr/maceta y el contenido de nutrientes en el suelo, han sido relacionados para la interpretación de nutrientes mediante el diagrama de probabilidad de respuesta propuesto por (Tisdale Y Nelson (1977), teniendo en cuenta que la fertilidad del suelo es tan sólo uno de los factores que influye en el crecimiento de las plantas, pero en general, habrá una mayor probabilidad de obtener una respuesta por un elemento dado, si el suelo es pobre en este elemento.

2.4. Diseño experimental y Análisis estadístico

El análisis estadístico de los rendimientos de materia seca corresponde al de un Diseño Completamente Randomizado (DCR) con arreglo factorial de 9 tratamientos x 10 suelos y con 3 repeticiones que hacen un total de 270 unidades experimentales. El modelo matemático es el siguiente:

$$Y_{ij} = u + A_i + B_j + (AB)_{ij} + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Variable de respuesta o rendimiento de materia seca

u = Media general

A_i = Efecto del suelo

B_j = Efecto de los tratamientos

$(AB)_{ij}$ = Efecto de la interacción suelo x tratamiento

E_{ij} = Variable aleatoria o error experimental.

El análisis de varianza (ANVA) corresponde a un modelo mixto, debido al muestreo realizado al azar y los tratamientos fueron predeterminados; por tanto, son fijos. El esquema del ANVA se muestra en el cuadro 2.6. La comparación de las medias de los tratamientos, se realiza mediante la prueba de Tukey con una probabilidad del 99%.

Cuadro 2.5. Análisis de varianza en el DCR

F. de V.	G.L.	C.M.	Fc
Tratamientos A	$a - 1$	$\frac{\sum \alpha_i^2}{P - 1}$	$C.M.A/CM_{AB}$
Suelos B	$b - 1$	$\alpha^2 + r\beta$	$C.M.A/CM_{AB}$
A x B	$(a - 1)(b - 1)$	$\alpha^2 + r\alpha_{\beta}$	$C.M.B/CM_e$
Error	$ab(r - 1)$	α^2	$C.M.AB/CM_e$
Total	$abr - 1$		

Para evaluar si los rendimientos relativos de materia seca y el contenido de los elementos nutritivos del suelo, se ajustan a los modelos continuos, se probaron los siguientes modelos matemáticos:

- Lineal : $Y = a + Bx$
- Logarítmico : $Y = a + b\text{Ln } X$
- Polinómico
- Cuadrático : $Y = a + bX + cX^2$
- Cúbico : $Y = a + bX + cX^2 + dX^3$
- Exponencial : $Y = a e^{bX}$
- Potencial : $Y = a X^b$

La elección del mejor modelo es de acuerdo al coeficiente de determinación (R^2) más alto.

2.5. Correlación entre el rendimiento relativo de la materia seca y propiedades químicas de los suelos.

El rendimiento relativo tiene la propiedad de disminuir la variabilidad, por lo tanto es apreciable su ventaja en lugar de usar en términos de rendimiento absoluto. Los cálculos para obtener el rendimiento relativo es dividiendo el rendimiento de materia seca de los tratamientos en estudio, según la técnica del elemento faltante, entre el rendimiento del tratamiento completo; este resultado en porcentaje está expresado en la siguiente relación matemática:

$$\text{Rendimiento Relativo (\%)} = \frac{\text{Tratamiento del elemento faltante}}{\text{Tratamiento del abonamiento completo}} \times 100$$

El cálculo de las correlaciones será en base a la relación de los rendimientos relativos de materia seca de cada uno de los 9 tratamientos con el respectivo contenido de nutrientes de los suelos, cuyo resultado reflejará la predicción de la situación suelo cultivo existente en la respuesta del tratamiento. El ajuste a las ecuaciones continuas de los modelos mencionados, se resolverá para las relaciones que se indican en el cuadro 2.7.

Cuadro 2.6. Relaciones entre tratamientos y contenido de nutrientes

R.R. (%)	Concentración de nutrientes en el suelo
T	pH, M.O., P, K, S, Ca y Mg
- N	N – total
- P	P ppm
- K	K ppm
- S	S ppm
- Ca	Ca Cmol (+) kg ⁻¹
- Mg	Mg Cmol (+) kg ⁻¹

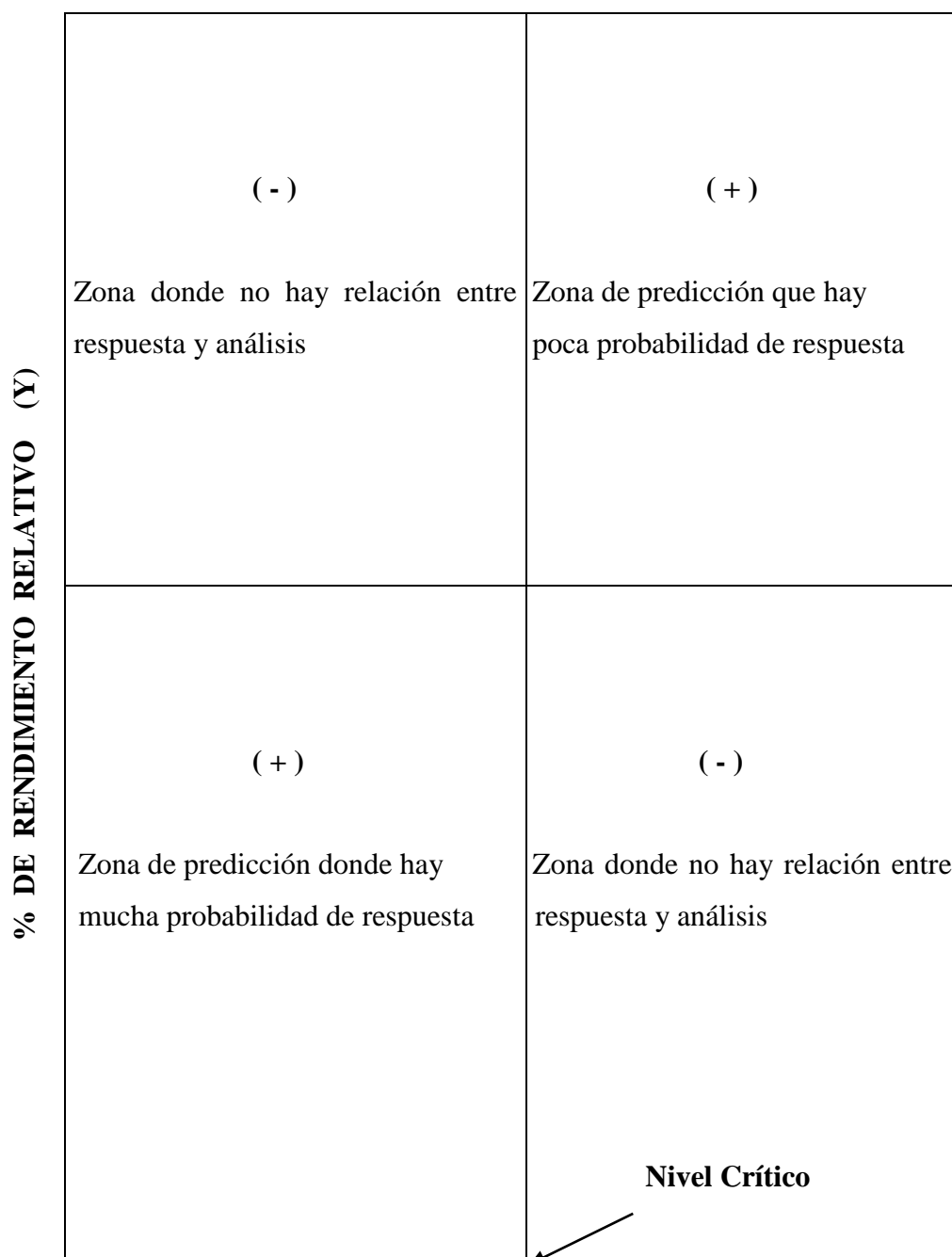
2.6. Determinación del nivel crítico

El nivel crítico para cualquier elemento, puede determinarse siguiendo la metodología descrita por (Cate y Nelson, 1977), que consiste en relacionar los datos del Análisis de Suelo con los rendimientos relativos. (figura 2.1).

Para este método, se debe preparar un gráfico con el porcentaje de rendimiento relativo en el eje Y versus los valores del análisis de suelo en el eje X. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- a.** Sobre una hoja de papel transparente y/o plástico del tamaño aproximadamente 1 y 1/2 veces de las dimensiones del gráfico, se traza un par de líneas perpendiculares, en tal forma que el plástico sea dividido en cuatro sectores tal como se muestra en la figura 2.1.

- b.** El plástico se mueve sobre el gráfico en forma horizontal y vertical manteniendo siempre las líneas paralelas a los ejes del gráfico, hasta que el número de puntos percibidos a través del plástico en los dos cuadrantes positivos (superior derecho e inferior izquierdo), sea el máximo, o, a la inversa, cuando el número de puntos en los cuadrantes negativos (superior izquierdo e inferior derecho) sea el mínimo.



NIVELES DE LOS NUTRIENTES DEL SUELO (X)

Figura 2.1. Modelo del plástico transparente que sobrepuesta al gráfico se usa para determinar los valores críticos del análisis de suelo.

- c. El punto donde la línea vertical del plástico intersecta al eje X, dividiendo los datos en dos clases se denomina "Nivel crítico". Este valor indica que los suelos, cuyos contenidos del elemento considerado estén por debajo de esa concentración, tienen alta probabilidad de respuesta a este elemento, mientras que aquellos suelos, con contenidos superiores al valor establecido por el nivel crítico, la probabilidad de respuesta es mínima.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Estado nutricional de los suelos

3.1.1. Interpretación del análisis de caracterización de los suelos

En el cuadro 3.1, se muestran los resultados del análisis de caracterización de los suelos en estudio. La interpretación tendrá mayor énfasis en la capa arable y se hace sobre la base de lo indicado por Ibáñez y Aguirre (1983) complementado por la de Guerrero (1998).

Respecto al pH en el horizonte superficial, los cinco suelos presentan una reacción que fluctúa de fuertemente ácida a ligeramente ácida y ello incluye a las 04 localidades que están ubicados en llanuras aluviales y en la parte baja de la zona en estudio. Esta propiedad química tiene un efecto indirecto sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas al afectar de modo notable la asimilación de los nutrimentos y ejercer una poderosa influencia en la estructura del propio suelo (Teuscher et al. 1980).

La acidez de estos suelos puede deberse a una o más de las razones siguientes:

1. Lixiviación a causa de lluvia intensa
2. Origen del suelo de material ácido
3. Empleo de fertilizantes formadores de ácido y
4. Acción microbológica

Cuadro 3.1. Análisis de caracterización de las muestras de los suelos estudiados

Número de muestra		pH (1:2.5)	C.E. dS.m ⁻¹	CO ₃ ⁼ %	Nt %	MO %	P ppm	K ppm	S ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					% Sat. De Bases
Lab	Campo									Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺	
										Cmol (+).kg ⁻¹										
1	San Cristóbal	4.62	0.03	0.0	0.16	3.22	2.11	26.79	2.27	30.2	28.6	41.2	Arc	15.32	4.29	2.36	0.12	0.21	5.26	45.56
2	Rinconada Baja	5.24	0.01	0.0	0.11	2.15	2.11	13.94	1.56	46.5	27.8	25.7	Fr	10.78	2.58	1.64	0.41	0.18	2.67	44.62
3	Anteccasa	5.33	0.13	0.0	0.13	2.58	9.76	10.97	1.74	30.0	28.7	41.3	Arc	18.25	4.89	2.17	0.26	0.37	3.55	42.14
4	La Victoria	5.08	0.13	0.0	0.05	0.97	2.96	42.61	0.52	33.8	28.7	37.5	FArc	18.35	5.56	1.88	0.32	0.19	4.47	43.32
5	Huantachaca	5.49	0.19	0.0	0.17	3.33	4.66	33.71	2.41	45.6	30.4	24.0	Fr	15.37	5.14	1.44	0.27	0.34	2.08	46.78
6	Huayrapata	5.27	0.20	0.0	0.11	2.15	2.11	41.62	1.63	38.3	27.5	34.2	FArc	18.81	5.65	1.87	0.28	0.26	4.65	42.85
7	Cimariva	4.35	0.12	0.0	0.12	2.47	2.11	11.96	1.59	35.6	29.4	35.0	FArc	20.51	6.54	2.37	0.13	0.25	6.21	45.29
8	Unión Luisiana	5.64	0.15	0.0	0.21	4.29	8.91	37.67	3.68	48.8	25.6	25.6	Fr	16.82	5.13	2.56	0.21	0.36	2.21	49.11
9	Unión Mejorada	6.05	0.11	0.0	0.08	1.61	11.45	38.66	0.64	44.4	28.4	27.2	Fr	15.76	4.35	1.89	0.29	0.45	2.36	44.29
10	San Pedro	4.90	0.19	0.0	0.09	1.82	2.11	34.70	1.85	33.6	26.8	39.6	FArc	19.31	5.25	2.15	0.27	0.38	5.66	41.69

Fuente: Laboratorio de Análisis Agrícola – Agrolab

La magnitud de la lixiviación es el factor principal involucrado al determinar si el suelo formado será, o no, ácido. La lluvia transporta las bases cambiabiles hacia abajo más allá del alcance de las raíces de las plantas. Así en aquellas regiones que tienen una lluvia anual cercana o mayor a 1000 mm, tienen un porcentaje elevado de suelos ácidos. Los datos meteorológicos ratifican nuestro razonamiento al reportar precipitaciones altas (superior a los 1500 mm).

Según Tamhane et al. (1983) los efectos que ejerce la acidez del suelo sobre las plantas pueden ser directos e indirectos. Las influencias directas son a) efectos tóxicos de los iones de H sobre los tejidos de la raíz; b) influencia de la acidez del suelo sobre la permeabilidad de las membranas de la planta para los cationes, y c) perturbación en el equilibrio entre los constituyentes básicos y ácidos a través de las raíces. Estos hechos se ven atenuados al cultivarse en estos suelos plantas tolerantes o resistentes a la acidez que mayormente no afectan el potencial productivo; estas plantas son el maíz amarillo duro, cacao y plátanos en la parte baja, árbol maderable y café en la parte media y alta de la zona en estudio.

Las influencias indirectas que tienen correlación con el potencial productivo de estos suelos son, en primer lugar, la disponibilidad de nutrimentos diversos; por ejemplo, nitrógeno, fósforo, azufre, calcio y magnesio como demostraremos en la prueba biológica desarrollada. Respecto a la materia orgánica, se reporta valores que oscilan entre 0.97 a 4.29% que se interpretan como bajos a altos; estos datos armonizan con el tenor bajo a muy alto de nitrógeno total. Sin embargo, este elemento no se encuentra en cantidades suficientes para satisfacer la demanda de los cultivos; en la prueba biológica se vislumbra síntomas características de carencia. Si bien el nitrógeno proviene de la materia orgánica, bajo condiciones ácidas las actividades beneficiosas de los microorganismos del suelo son afectados desfavorablemente. Tal como mencionan Fassbender y Bornemisza (1987), las transformaciones más importantes en los procesos de la mineralización y la Humificación son de naturaleza bioquímica. Después de la destrucción mecánica y física de los restos vegetales y animales se produce el ataque de

los microorganismos, los que por medio de sus jugos digestivos y enzimas, destruyen los compuestos orgánicos y dan lugar a la liberación de minerales. Un factor externo importante en estos procesos es el pH; según nuestros datos, es de esperar limitadas actuaciones de las bacterias y actinomicetes aunque los hongos presentan un buen desarrollo dentro de límites de pH más amplios. La temperatura podría tener un rol determinante en la descomposición y mineralización ya que se encuentran próximos al ideal o superior de los valores óptimos.

El contenido de fósforo disponible oscila de 2.11 a 11.45 ppm que según las tablas de interpretación se califican como bajo a medio. Este reporte no es novedoso ya que los pocos trabajos de investigación realizados en la zona, han demostrado que este elemento es uno de los factores limitantes más importantes en los suelos de ceja de selva del departamento de Ayacucho. Si bien la materia orgánica sirve como un depósito de elementos químicos que son esenciales para el desarrollo de las plantas, la mayor parte del fósforo existe en formas orgánicas. Aún con las condiciones ambientales favorables (temperatura y humedad), el pH condiciona una muy lenta entrega de nutrimentos de la materia orgánica.

Si bien nuestros suelos presentan contenidos apreciables de materia orgánica (a excepción de tres suelos), la mineralización que se desarrolla es muy limitada. Fassbender y Bornemisza (1987) reportan que la mineralización de P orgánico es óptimo con pH altos (entre 5.5 y 7.0), con una temperatura entre 25 y 45°C y en condiciones intermedias de humedad. Algunas de estas condiciones no son las que reportan nuestros análisis de suelos y datos de clima.

Un proceso importante de mencionar es la adsorción de fosfatos, que se trata de un proceso de transformación de P que ocurre junto con el de la precipitación de fosfatos, los que analíticamente y matemáticamente no se pueden diferenciar. En el caso de los suelos en estudio adquiere mayor importancia la capacidad de fijación del P que correlaciona significativamente con el contenido de materia orgánica que explica finalmente los valores tan bajos de P disponible para las plantas.

Acerca del azufre, el contenido de los suelos es variable. Se reporta de manera general como de un nivel bajo en todos los suelos. Estos resultados son previsibles ya que existen reportes de la deficiencia de este nutrimento en suelos de ceja de selva debido a la lixiviación por las lluvias intensas estacionales que aunado a las pendientes escarpadas ha determinado erosión. En cuatro suelos que tienen características fluviales el azufre elemental se encuentra disponible condicionado preferentemente a la presencia de materia orgánica. Cuando el azufre es proveniente de la materia orgánica; ésta en primera instancia es descompuesta por los microbios del suelo y separa la fracción portadora del azufre, ya sea porque la asimilan los microorganismos o porque ciertas bacterias la descomponen rápidamente hasta la etapa de sulfuro de hidrógeno inorgánico. (Ferraris y otros, 2004).

El eterno ciclo del azufre, que comienza con las etapas inorgánicas sencillas y termina en los compuestos orgánicos complejos, volviendo al punto de partida una y otra vez, resulta así más comprensible; en él intervienen reacciones de oxidación, reducción, síntesis y descomposición de las proteínas que contienen azufre. Las condiciones edáficas que favorecen la secuencia de estos procesos son prácticamente las mismas que hacen posibles la amonificación y la nitrificación, es decir: presencia de materia orgánica, buena aireación, temperaturas adecuadas y dotación de agua a un máximo del 50% de saturación. Si bien las condiciones del clima podrían ser favorables, el pH ácido de los suelos, es la causa del bajo contenido de este nutriente que interviene de manera principal en los procesos vitales de la división celular, que en último término equivale al desarrollo activo de los animales y las plantas. Esto explica la importancia de los sulfatos como nutrimentos para los vegetales; su comportamiento en el suelo y los factores que hacen posible su aprovechamiento por las plantas superiores, adquieren así el mayor interés (García, 2002).

El Potasio disponible es bajo en todos los suelos. El comportamiento y tenor de potasio de los suelos ácidos de selva alta es regularmente bajo debido a que su contenido está controlado especialmente por las condiciones climáticas; es decir, se reporta percolación a través del perfil del suelo, pérdidas por erosión y subsiguiente escorrentía

superficial que es característico en las zonas de vida con pendiente fuerte. Todos los perfiles poseen un perfil incipiente o regularmente desarrollado; se estima que la iluviación ha permitido el lavado y arrastre del K hacia las capas más profundas tal como se puede apreciar en la distribución de este elemento en los horizontes del perfil.

Se ha demostrado por observaciones de campo, que el contenido de potasio asimilable del suelo permanece en un nivel francamente constante año tras año, a pesar de la continua extracción que realizan las plantas en crecimiento y de las pérdidas por lixiviación debidas a la lluvia. Se acepta que este comportamiento peculiar del potasio del suelo, obedece al equilibrio que se establece entre las formas asimilable e inprovechable, cuyo equilibrio se alcanza y mantiene automáticamente; en estas condiciones, tan pronto como algo de potasio disponible se pierde por consumo o por lavado, queda en solución una fracción que se ha denominado “potasio inprovechable” (proveniente de los minerales silíceos finamente dispersos) principalmente por la acción del agua y del anhídrido carbónico; este potasio aparece en la solución del suelo o bien es adsorbido por los coloides del propio suelo (Gutiérrez, 1995).

En los suelos, la mayor cantidad de potasio se encuentra asociada con silicatos en los feldespatos (ortosa u ortoclasa), en las micas (moscovita, leucita y biotita) y en los minerales arcillosos (illita, vermiculita y glauconita). Los suelos de la parte media y alta del distrito, muestran el predominio de material coluvial compuesto mayormente por rocas ígneas tales como el granito; ésta es una roca ácido-plutónica (SiO_2 mayor a 66%) que se caracteriza por sus altos contenidos de elementos alcalinos (K, Na) y escasos en alcalinotérreos (Mg, Ca). La distribución del contenido total de potasio en los suelos sigue un esquema geomorfológico relacionado con la presencia y la meteorización de feldespatos y micas en los materiales parentales; pero como en muchos otros elementos nutritivos, el contenido de K total en los suelos no da mayor información acerca de su disponibilidad y su dinámica; para conocer estos aspectos es necesario considerar las diferentes formas en que este elemento se presenta en el suelo y las relaciones entre las mismas. Sin embargo, los valores bajos se deben probablemente a la posibilidad de pérdidas de potasio por la percolación del agua a través del suelo y/o el arrastre de las partículas superficiales del suelo, como consecuencia de la erosión hídrica. Estos

procesos son de gran importancia para el balance de los elementos nutritivos, especialmente de las bases K, Ca y Mg (Havlin y otros, 2005).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos estudiados varía de medio a alto. La CIC está determinada por los coloides del suelo y comprende tanto a los coloides orgánicos como a los inorgánicos o minerales. Conviene recordar esto porque en cualquier suelo fértil ambos tipos están presentes y desempeñan funciones de interés vital (Rodríguez, 1992). La presencia de regular contenido de materia orgánica en la mayoría de los suelos, resultan en una CIC media debido al predominio del coloide orgánico; en cambio en los suelos de la parte media y alta, la presencia de arcilla garantiza la abundancia de la fracción inorgánica; es decir las arcillas que generalmente están compuestas de las del tipo 2:1 (p.e. vermiculita, illita y montmorillonita).

Conocemos que la CIC es una de las propiedades más importante e intrigantes por la importancia vital de las reacciones que intervienen en este proceso tan complejo. La absorción de los iones por las plantas, están determinados por la CIC; cualquier ion que se encuentre libre en la solución del suelo, de inmediato puede ser empleado para la nutrición vegetal, pero es un hecho bien conocido que las raíces de las plantas, de ningún modo dependen exclusivamente de las influencias externas para poder hacer que los nutrimentos sean aprovechables por ellas. Experimentos cuidadosamente realizados han demostrado que las plantas pueden extraer los elementos nutritivos del suelo en cantidades que, en definitiva, exceden a las que están presentes en la solución del suelo. Esto puede explicarse tan solo si uno acepta la teoría de que las raíces de las plantas en desarrollo, a causa de su íntimo contacto con los coloides del suelo, entran directamente al intercambio catiónico. Es un hecho bien conocido que durante la respiración se forma ácido carbónico. El hidrogenión (H^+) del ácido carbónico se considera como intercambiable, y es plausible suponer que podrá sustituir a otros cationes retenidos por los coloides del suelo, siempre que el contacto entre la raíz y los coloides sea bastante íntimo. En la actualidad se ha logrado dejar bien establecido que las raíces en pleno desarrollo (especialmente en la zona de crecimiento de la raíz), son portadoras de cationes intercambiables (además del H^+) en su superficie externa, y que el intercambio catiónico entre la superficie de la raíz y el suelo, que tiene lugar efectivamente, no

depende tan solo de la respiración de la raíz u otros procesos metabólicos dentro de la planta. Esta propiedad también tiene importancia en la práctica de la fertilización que si bien en la zona en estudio, no se ha determinado su realización intensiva y técnica, adquiere especial atención en la lixiviación de nitratos, principalmente, resultantes de la disociación de sales fertilizantes.

El análisis del contenido de bases cambiables lo constituye las relaciones catiónicas; enfatizamos en las relaciones Ca/Mg, Ca/K y Mg/K cuyos rangos normales son 5 – 8 14 – 16 y 1.8 a 2.5 respectivamente. De manera general, se observa que todos los suelos no guardan equilibrio entre estos cationes que son los más abundantes en los suelos. Este hecho demuestra que se producen antagonismos o competencia en la absorción de nutrientes y trae consigo deficiencias de algunos de ellos. Algunas prácticas agronómicas son necesarias en estos suelos para restablecer el equilibrio catiónico mediante la práctica del encalado y la fertilización. No se ha podido averiguar acerca de estas labores lo que implica investigar en este rubro.

Es también importante comentar acerca de algunas propiedades físicas, entre ellas de la textura; se ha podido verificar que la mayoría de los suelos ubicados en la parte media y alta de la zona bajo estudio, tienen una clase textural fina variando de franco arcillosa a arcillosa. Esta aptitud condiciona algunos aspectos de labranza, manejo y conservación de suelos y características físico-químicas. Por ejemplo, en las mismas condiciones de mineralización de la materia orgánica, la composición granulométrica puede influir sobre este proceso; así resultaría que, bajo condiciones similares, un suelo arcilloso tendría mayor contenido de materia orgánica. Esto se debe a la formación de complejos organominerales y a la mayor posibilidad de que se presenten malas condiciones de aireación que no favorezcan la mineralización (Urbano, 1989). En los suelos de la parte baja que son llanuras aluviales, la clase textural predominante es la franco arenosa producto del arrastre y posterior deposición de materiales gruesos por el río. Estos suelos son de fácil labranza aun cuando presentan deficiencias marcadas de elementos nutritivos.

La densidad aparente tiene correlato con la clase textural y por ello los valores son bajos oscilando de 1.1 a 1.2 g/cc que es propio de suelos minerales de granulometría fina. En

los suelos aluviales, los valores son más altos que registran Rinconada baja, Huantachaca, Luisiana y Unión Mejorada.

3.1.2. Evaluación del rendimiento de materia seca

Antes de centrarnos al análisis estadístico del rendimiento de materia seca producto del experimento de invernadero, conviene hacer un breve comentario del crecimiento y desarrollo de la planta indicadora y los síntomas visuales de deficiencia observados. Ha sido resaltante detectar una deficiencia generalizada respecto a los nutrientes nitrógeno y fósforo en todos los suelos. Desde las dos primeras semanas los efectos han sido notorios lo que se ha manifestado por un retardo en el crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate. La debilidad de los tallos (delgados) y la escasa formación de hojas, se ha manifestado con mayor énfasis en aquellos tratamientos sin N y sin P; sin embargo en el tratamiento sin S, sin Ca, sin Mg y sin ME, las plantas no han mostrado un evidente retraso en el crecimiento y desarrollo a pesar que el análisis del suelo mostraba tenores bajos de estos nutrientes. Estos hechos probablemente han influenciado en los rendimientos de materia seca de la planta.

Para el caso del tratamiento sin nitrógeno (-N), se ha podido advertir una deficiencia clorofílica que se ha manifestado en una pérdida del color verde que pasaron a una coloración amarillenta pálida inclusive con tonos purpúreos, sobre todo en las hojas más adultas. La totalidad de plantas con el tratamiento sin fósforo (-P) se presentaron, por lo general, pequeñas y mostraron una coloración verde – rojiza y purpúrea que ha mermado grandemente los rendimientos. En el resto de los tratamientos aplicados se ha podido observar un desarrollo casi normal.

Aunque los síntomas de deficiencia de nutrientes no son un buen medio de juzgar las necesidades de fertilizantes, permite diferenciar los distintos síntomas característicos a la carencia de elementos en los cuales las plantas responden de una manera particular. El crecimiento promedio de materia complementado por el nivel de nutrientes en el suelo, es el que con mayor seguridad nos permite diferenciar el heterogéneo grado de fertilidad de los suelos.

En el cuadro 1 del anexo se presentan en forma resumida los resultados de los rendimientos de materia seca para los 10 suelos. Con estos datos se realizó el análisis de variancia (cuadro 3.2) y las pruebas de significación respectivas a fin de lograr interpretar las respuestas a los tratamientos aplicados.

Cuadro 3.2. Análisis de variancia del rendimiento de materia seca (g/maceta)

F. de V.	G. L.	S.C.	C.M.	Fc
Suelos (S)	9	60.6018	6.7335	479.80**
Tratamientos (T)	8	88.2576	11.0322	786.10 **
S x T	72	46.3935	0.6444	45.91 **
Error	180	2.5261	0.0140	
Total	269	197.7789		

$R^2 = 0.9872$

C.V. = 8.76%

Se observa diferencias altamente significativas para los efectos principales (suelos y tratamientos) y en la interacción suelo por tratamiento adquiriendo la mayor importancia, esta última. Existe, por tanto, suficiente base estadística para afirmar que la producción de materia seca probablemente se deba al efecto de los tratamientos y que es diferente en cada uno de ellos interactuando con el rendimiento de materia seca en cada uno de los suelos. En otras palabras, los tratamientos y los suelos no actúan en forma independiente; al contrario, ambas influyen positivamente en la producción de materia seca.

El coeficiente de variabilidad es de 8.76% lo que demuestra que el experimento se encuentra dentro del margen de error aceptable según las consideraciones vertidas por Calzada (1982). Por otro lado el coeficiente de determinación nos revela que el 98% del rendimiento de materia seca obtenido se debe fundamentalmente a los tratamientos aplicados a los suelos.

Como resultado de la significación alcanzada en la interacción, se ha desarrollado análisis de variancia complementarios que corresponden a los efectos simples, siendo de importancia averiguar y obtener conclusiones que se deduzcan de los tratamientos en cada uno de los suelos y del estado nutricional de los suelos en cada uno de los tratamientos. Los resultados se exhiben en el cuadro 3.3.

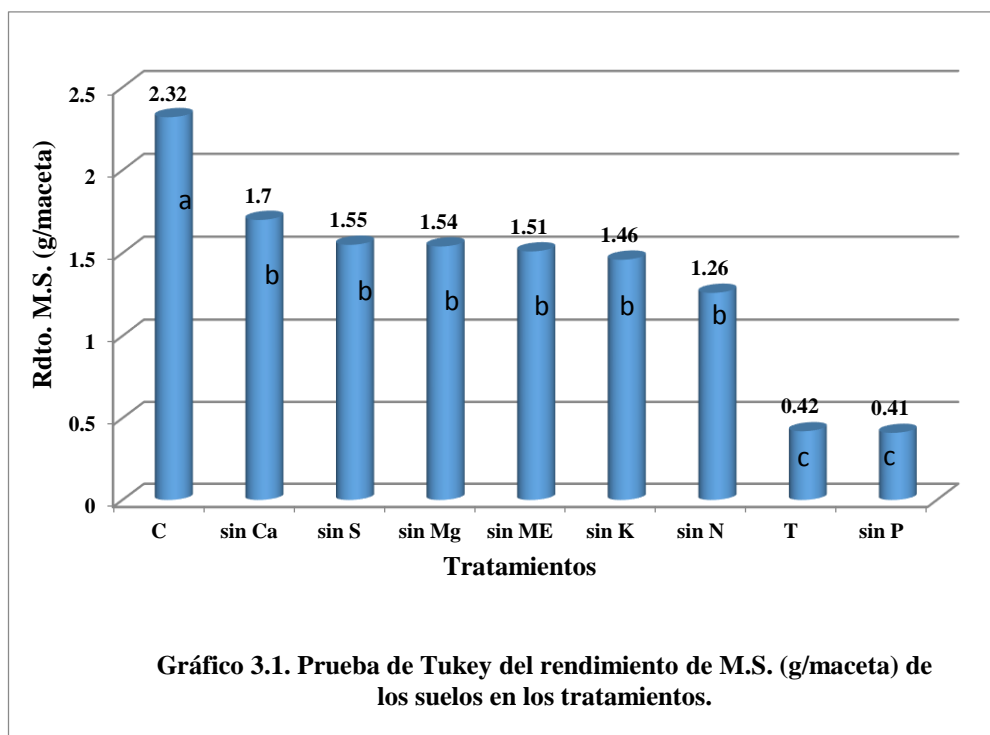
De este cuadro se puede deducir que existen diferencias en cuanto al rendimiento de materia seca de los suelos en cada uno de los tratamientos; así como, de los tratamientos en cada uno de los suelos estudiados. Esto es explicable atendiendo a los diferentes contenidos de elementos nutritivos expresados en el análisis del suelo, donde ha sido posible identificar carencia en los principales macronutrientes, con énfasis en el nitrógeno, fósforo y azufre; de igual manera, la reacción ácida de los suelos limita enormemente la mineralización de la materia orgánica de los suelos afectando la disponibilidad de los micronutrientes. Por otro lado, los tratamientos aplicados contienen nutrientes diversos en concentraciones diseñadas por el investigador por lo que su efecto es de esperar que sea diferente tal como lo ratifica el ANVA respectivo.

Barceló y otros (1980), refieren que la carencia de nutrientes en el suelo, se expresa en el crecimiento y desarrollo de los cultivos; tal es así, que se considera que una planta es deficiente en un elemento cuando su concentración en los tejidos cae por debajo de los niveles que permiten un crecimiento óptimo. Una deficiencia puede desarrollarse cuando la concentración del elemento en cuestión en el suelo es baja, o bien si el elemento está presente en una forma química que no puede ser utilizada por la planta. A veces puede también desarrollarse una deficiencia debido a los efectos antagónicos entre distintos elementos, de tal forma que la presencia de un elemento en una determinada concentración puede impedir la absorción de otro. Cuando un tejido es deficiente en un elemento esencial, se producen una serie de alteraciones metabólicas que pueden retrasar o incluso interrumpir los procesos de crecimiento y desarrollo.

Cuadro 3.3. Análisis de variancia de los efectos simples del rendimiento de materia seca (g/maceta)

F. de V.	G. L.	S.C.	C.M.	Fc
Suelos en los tratamientos				
Suelos en el tratamiento (-N)	9	5.3744	0.5972	42.55**
Suelos en el tratamiento (-P)	9	2.0366	0.2263	16.12**
Suelos en el tratamiento (-K)	9	15.0368	1.6708	119.05**
Suelos en el tratamiento (-S)	9	14.5653	1.6184	115.32**
Suelos en el tratamiento (-Ca)	9	20.0839	2.2315	159.01**
Suelos en el tratamiento (-Mg)	9	14.6327	1.6258	115.85**
Suelos en el tratamiento (-ME)	9	18.0793	2.0088	143.14**
Suelos en el completo (C)	9	14.1164	1.5685	111.76**
Suelos en el testigo (T)	9	3.0696	0.3411	24.30**
Tratamientos en los suelos				
Tratamientos en el suelo Cimariva	8	9.1335	1.1417	81.35**
Tratamientos en el suelo Huayrapata	8	17.6803	2.2100	157.48**
Tratamientos en el suelo Anteccasa	8	20.2984	2.5373	180.80**
Tratamientos en el suelo Huantachaca	8	23.4823	2.9353	209.15**
Tratamientos en el suelo Mejorada	8	9.9888	1.2486	88.97**
Tratamientos en el suelo Luisiana	8	5.8998	0.7375	52.55**
Tratamientos en el suelo Rinconada	8	22.5939	2.8242	201.24**
Tratamientos en el suelo La Victoria	8	18.9276	2.3659	168.59**
Tratamientos en el suelo San Cristóbal	8	3.1801	0.3975	28.33**
Tratamientos en el suelo San Pedro	8	3.4662	0.4333	30.87**

A continuación se ha realizado la comparación de medias mediante la prueba de Tukey para poder establecer el orden de mérito del comportamiento de los suelos en cada uno de los tratamientos. Los resultados se exhiben en el gráfico 3.1.



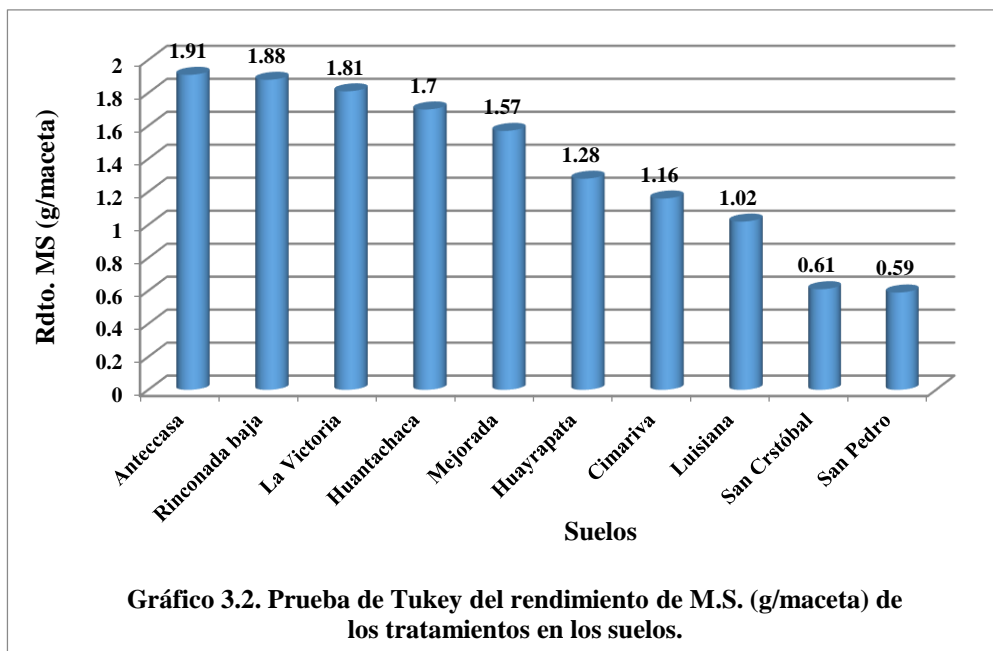
El gráfico muestra que el tratamiento completo es aquel que reporta el mayor rendimiento de materia seca y difiere estadísticamente con los demás tratamientos. Existe un grupo que ocupa el segundo lugar cuyos rendimientos son similares no existiendo diferencias estadísticas entre ellas; involucra a todos los tratamientos a excepción del testigo (T) y el sin P. Se advierte que estos dos últimos ocupan el último lugar sin diferenciarse en su producción de materia seca. Algo inusual se verifica respecto al tratamiento sin nitrógeno (-N) cuya producción de materia seca no difiere con los demás tratamientos excluyendo al C, T y sin P. Esta respuesta podría deberse a que la prueba involucra las respuestas de todos los suelos cuyos contenidos de materia orgánica y N-total son variables pero que en la mayoría de ellos es media salvo tres localidades que muestran valores bajos. Por otro lado cabe señalar que las plantas de tomate desarrollaron en condiciones de invernadero con temperaturas por encima de los 25°C y aportaciones de humedad adecuadas las que favorecieron su mineralización y consecuentemente la aportación de nitrógeno y otros macro y microelementos esenciales.

Los tratamientos que varían desde el sin calcio (-Ca), hasta el sin nitrógeno (-N), son los que ocupan sucesivamente un grupo medio sin mostrar rendimientos que difieran estadísticamente. Parece ser que la materia orgánica del suelo ha aportado los nutrientes que la planta indicadora necesitaba para qué en el lapso de conducción del experimento, hayan producido una masa foliar que no ha mostrado mayores perturbaciones por su no incorporación en las soluciones nutritivas aplicadas según la prueba del elemento faltante. Es evidente la posición del tratamiento (-P) que ocupa el último lugar y demuestra así la importancia de su incorporación al suelo con fines productivos. Baeyens (1970), refiere que su papel fisiológico consiste probablemente en una fosforilación de las sustancias orgánicas: el ácido fosfórico se combina temporalmente a un grupo carbonilo, enólico o nítrico para formar un compuesto rico en energía: adenosinatrifosfato (ATP) que, descomponiéndose en ADP, libera esta energía utilizada en los procesos metabólicos. Cuando se presentan carencias de fósforo se manifiesta un estado benigno y otro agudo. El estado benigno se caracteriza por una disminución general del crecimiento: la planta es más esbelta, los peciolos se alargan, las hojas son delgadas y erectas, las nervaduras poco pronunciadas y la planta toma el carácter típico de umbría (Fontanetto, 2004). En estado agudo, las hojas amarillean y se necrosan, con un pardeamiento rojizo (no bronceado como la carencia potásica).

Era de esperar la producción de biomasa en el tratamiento Testigo (T); las plantas desarrollaron limitadamente y a expensas de la fertilidad natural de los suelos.

El cuadro 3.3 revela también las diferencias estadísticas en referencia a los tratamientos en los diez suelos en estudio considerando las producciones de materia seca. Para poder visualizar los contrastes correspondientes se ha elaborado el gráfico 3.2 mediante la prueba de Tukey.

La mayor producción de materia seca se registra en el suelo de Antecasa pero sin evidencias de superioridad estadística con los suelos de Rinconada baja y La Victoria. Por otro lado, el menor rendimiento se reporta en los suelos de San Pedro y San Cristóbal.



Los tres suelos que ocupan el primer lugar, poseen un contenido medio de materia orgánica y son bajos en P, K y S. Es probable que el proceso de mineralización coadyuvado por las condiciones especiales del invernadero haya permitido satisfacer a las plantas de los principales macro y microelementos. Por otro lado, debido a un medio fuertemente ácido, los suelos presentan una fuerte adsorción de aniones lo que se traduce en el bajo tenor de fósforo en los suelos tal como lo muestra el cuadro de resultados del análisis de caracterización. En el caso de los suelos de Huantachaca y Mejorada se identifica condiciones moderadamente ácidas con tenores medios en materia orgánica y nitrógeno total, pero deficientes en fósforo, potasio y azufre. Estos hechos han determinado que como producto de las aportaciones de nutrientes a los suelos según los tratamientos, se hayan producido alteraciones en las concentraciones de los elementos nutritivos causando, probablemente, antagonismos que traen como consecuencia la inhibición en la absorción de algunos de ellos.

La menor producción de biomasa vegetal se registra en San Cristóbal y San Pedro como producto de la reacción muy fuertemente ácida de los suelos. Fassbender y Bornemisza (1987) manifiestan el efecto de altas concentraciones de H^+ sobre la permeabilidad de

las membranas de las raíces. Se ha constatado que niveles muy bajos de pH reducen la absorción de Ca, Mg, Mn, Zn y Cu. Estas reducciones en conjunto con una disminución en el crecimiento de las raíces y de los pelos radiculares, generalmente conducen a la disminución de las cosechas. El pH es también un factor importante en la determinación de las especies, el número y las actividades de los microorganismos en los suelos. Si bien ambos suelos reportan niveles adecuados de materia orgánica, la reacción ácida limita el grado de la mineralización en los suelos y, de ese modo, la disponibilidad de N, S, P y de oligoelementos.

3.2. Determinación de los niveles críticos mediante el ajuste a los modelos continuos y discontinuos

En el cuadro 6 del anexo se presenta la producción de materia seca promedio contenida en cada uno de los tratamientos y para cada uno de los suelos expresados como rendimiento relativo (R.R.). Para su obtención se ha tomado como 100% la producción de materia seca del tratamiento completo.

Una de las ventajas de utilizar la respuesta de la planta en términos de rendimiento relativo es que se obvia las diferencias de rendimientos entre suelos, porque a todos en el tratamiento completo se considera como 100% mientras que en términos absolutos pueden haber diferencias de producción de materia seca; en consecuencia, el rendimiento para cada tratamiento de un mismo suelo está en función del obtenido en el completo.

3.2.1. Ajuste a los modelos continuos

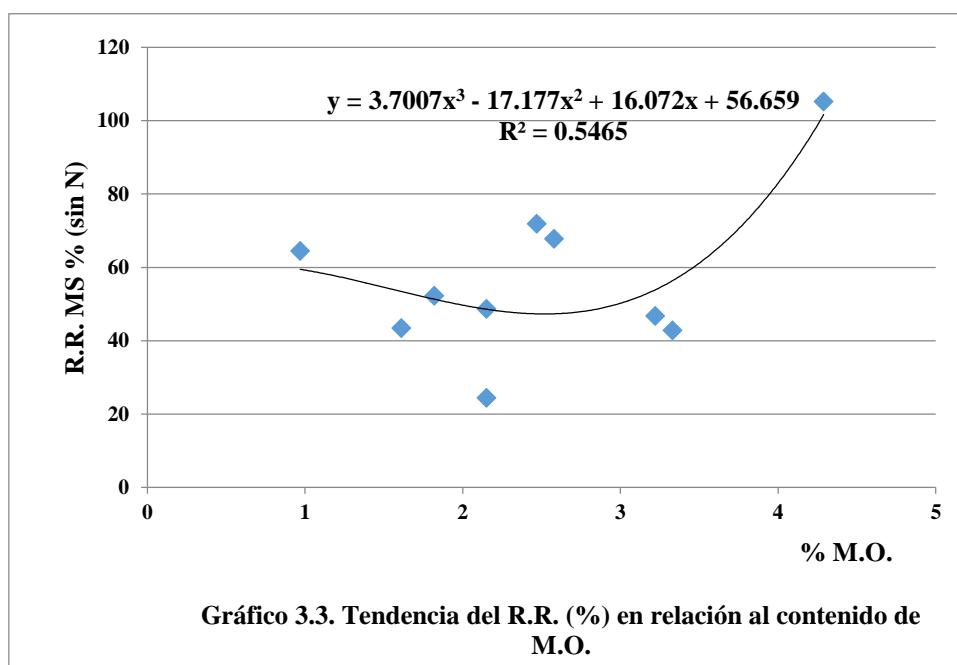
El ajuste a los modelos continuos se ha hecho tomando como criterio base, de que el crecimiento de las plantas sigue funciones matemáticas exponenciales, cuadráticas o lineales según el elemento nutritivo del que se trate. En el cuadro 3.4 se muestran los 6 modelos probados con sus respectivos coeficientes de determinación. Es necesario precisar que en la función polinómica se ha considerado la cuadrática y la cúbica.

Cuadro 3.4. Coeficiente de determinación (R^2) del ajuste a 6 modelos matemáticos entre el análisis químico de suelos y el % de R.R. de los suelos.

Modelo matemático	% MO VS R.R. (T)	% MO VS R.R. (-N)	P ppm VS R.R. (-P)	K ppm VS R.R. (-K)	S ppm VS R.R. (-S)	Ca cmol /kg VS R.R. (-Ca)	Mg cmol/kg VS R.R. (-Mg)
$Y = a + bX$	0.024	0.204	0.330	0.013	0.001	0.055	0.005
$Y = a + b \ln X$	0.021	0.096	0.259	0.035	0.020	0.053	0.000
$Y = a + b_1X + b_2X^2$	0.030	0.520**	0.513**	0.354	0.136	0.059	0.337
$Y = a + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	0.096	0.546**	0.531**	0.420*	0.206	0.196	0.355
$Y = a e^{bX}$	0.000	0.119	0.203	0.035	0.002	0.035	0.015
$Y = a X^b$	0.001	0.046	0.153	0.063	0.009	0.037	0.004

a. Tendencia del R.R. respecto al contenido de Materia Orgánica

La función polinómica cúbica es la que representa mejor el rendimiento relativo de materia seca del tratamiento sin N respecto al contenido de materia orgánica de los suelos. Existe un 54.6% de certeza en la respuesta obtenida de acuerdo al coeficiente de correlación que es altamente significativo ($r=0.7389$).

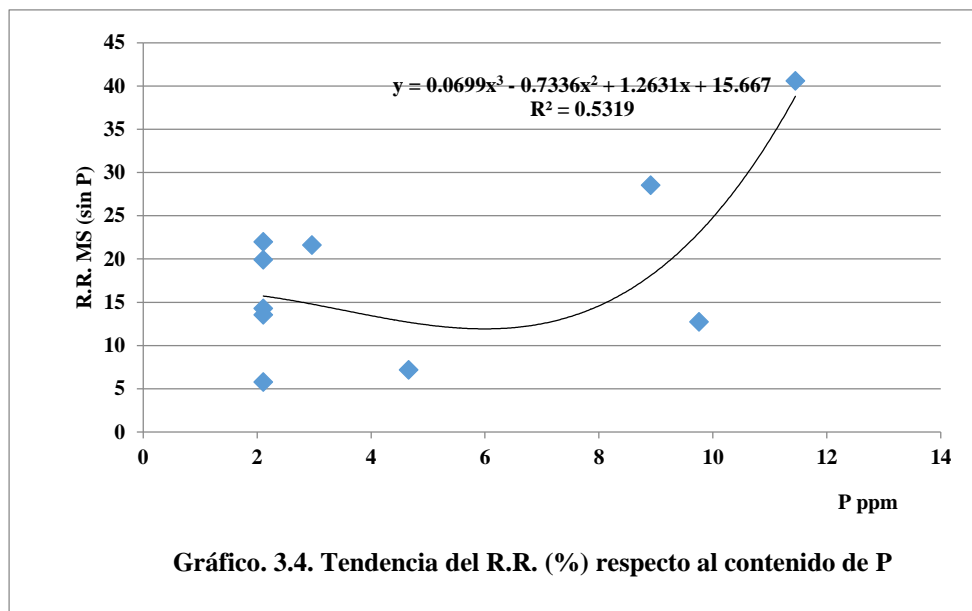


Al derivar la ecuación, se obtiene que el nivel crítico es de 2.2% de materia orgánica, lo que significa que aquellos suelos que poseen menos de este valor, su crecimiento y desarrollo se verá afectado fuertemente debido a la carencia de este componente y la respuesta será muy favorable a su incorporación mediante las fuentes existentes en el mercado. Por el contrario, valores mayores a 2.2%, las plantas no tendrán una respuesta evidente que se manifieste en el crecimiento y desarrollo. Sin embargo, es necesario precisar, que el tenor de materia orgánica en la mayoría de los suelos estudiados, es medio y bajo las condiciones edáficas con limitaciones importantes sobre todo del pH, su mineralización es baja aun cuando las condiciones climáticas suelen ser favorables. Tal como mencionan Tisdale y Nelson (1984), la materia orgánica es esencial para la

fertilidad y la buena producción agropecuaria. Los suelos sin materia orgánica son suelos pobres y de características físicas inadecuadas para el crecimiento de las plantas. Cualquier residuo vegetal o animal es materia orgánica, y su descomposición lo transforma en materiales importantes en la composición del suelo y en la producción de plantas. La materia orgánica bruta es descompuesta por microorganismos y transformada en materia adecuada para el crecimiento de las plantas y que se conoce como humus. Rice y Havlin, (1994) indican que el humus es un estado de descomposición de la materia orgánica, o sea, es materia orgánica no totalmente descompuesta. Tiene esencialmente las siguientes características: Es insoluble en agua y evita el lavado de los suelos y la pérdida de nutrientes. Tiene una alta capacidad de absorción y retención de agua. Absorbe varias veces su propio peso en agua y la retiene, evitando la desecación del suelo. Mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos. Los suaviza; permite una aireación adecuada; aumenta la porosidad y la infiltración de agua, entre otros. Es una fuente importante de nutrientes, a través de los procesos de descomposición con la participación de bacterias y hongos, especialmente. Absorbe nutrientes disponibles, los fija y los pone a disposición de las plantas. Fija especialmente nitrógeno (NO_3^- , NH_4^+), fósforo (PO_4^-) calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), potasio (K^2), sodio (Na) y otros. Mantiene la vida de los organismos del suelo, esenciales para los procesos de renovación del recurso. Aumenta la productividad de los cultivos en más del 100 % si a los suelos pobres se les aplica materia orgánica.

b. Tendencia del R.R respecto al contenido de fósforo disponible

El modelo polinomial cúbico ajusta y representa de mejor manera el crecimiento del cultivo mediante los modelos continuos con un coeficiente de correlación altamente significativo y nos permite fácilmente derivar la ecuación a fin de obtener el nivel crítico del nutriente. Del mismo modo el coeficiente de determinación igual a 0.531 nos indica que el 53.1% de la respuesta en rendimiento relativo de materia seca en el tratamiento sin fósforo (-P) es debido al contenido de este nutriente en forma natural en el suelo. La curva de tendencia se exhibe en el gráfico 3.4.



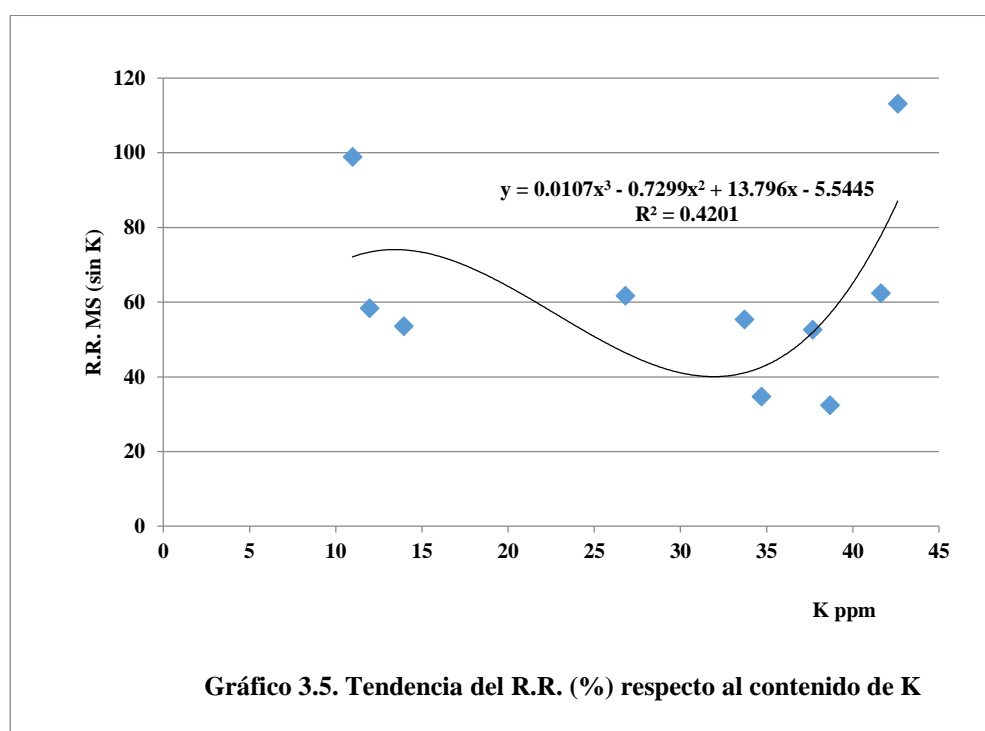
Al derivar la ecuación se ha determinado que el nivel crítico del fósforo para los suelos estudiados es de 5.1 ppm. Este valor indica que aquellos suelos que se encuentran por debajo de este nivel, responderán favorablemente a las aplicaciones de fósforo vía fertilizantes y se traducirá en incrementos importantes en la cosecha de los principales cultivos, especialmente en el cacao que es el más importante en los suelos estudiados.

El fósforo en el suelo se encuentra básicamente en forma orgánica asociada a la materia orgánica del suelo (Ciampitti y otros, 2008). Es importante mencionar que la reacción del suelo influye en el contenido de materia orgánica. Por lo general se ha encontrado que en suelos ácidos, con un pH menor que cinco, se produce una acumulación de la materia orgánica. Esto se debe a diferentes razones; por un lado, el pH incide en el contenido y composición de los microorganismos de los suelos: en condiciones ácidas se limita la acción bacteriana y de la microflora y se favorece la reproducción de hongos, lo que da por resultado una menor eficiencia en la mineralización y Humificación con la consecuente acumulación de la materia orgánica; por otro lado, la reacción del suelo determina la saturación del complejo de intercambio de los suelos; en condiciones ácidas aumenta el Al cambiante lo que conlleva un efecto de

estabilización de los complejos organominerales y se producen deficiencias en la disponibilidad de Ca y Mg para los microorganismos, conduciendo igualmente a una acumulación de C (Fassbender y Bornemisza, 1987).

c. Nivel crítico del Potasio

El ajuste a los modelos continuos mediante la verificación del valor del coeficiente de correlación nos indica que se adecua al modelo polinomial cúbico. Así mismo el coeficiente de determinación nos advierte que el 42% del rendimiento relativo obtenido en el tratamiento sin potasio (-K), es debido a la aportación de potasio natural del suelo. El análisis químico correspondiente reporta niveles bajos de este nutriente lo cual ha determinado que el rendimiento de materia seca, no sea apropiado aún cuando no han mostrado los síntomas de carencia característicos. La tendencia de la curva se muestra en el gráfico 3.5.



Al derivar la ecuación de regresión nos permite calcular el nivel crítico que resulta 26.9 ppm lo cual indica que aquellos suelos de la zona de estudio que muestran valores inferiores a este nivel, responderán a la aplicación de este nutriente en los programas de fertilización; por otro lado, por encima del nivel crítico, la probabilidad de respuesta será mucho menor. Este dato es muy importante ya que de acuerdo a los niveles encontrados mediante el análisis de suelos, en muchos casos en el cálculo de las fórmulas de abonamiento, se obvia la aportación de potasa y se incorpora solamente una dosis de mantenimiento. Los agricultores deben tener presente la importancia de este macro nutriente y su rol en la planta y por tanto aplicar a los suelos de acuerdo al nivel crítico hallado.

Teuscher y Adler (1980), refieren que el potasio es muy común en la naturaleza y se encuentra en estado de combinación con el granito, gneis y la mayoría de las rocas ígneas. En consecuencia, el suelo mineral promedio contiene unas 56 t ha⁻¹ o más de potasio, principalmente incluido en los feldespatos, micas y otros minerales silíceos. Estos minerales al descomponerse bajo la influencia de las reacciones químicas, convierten al potasio y otros elementos en sustancias solubles, que por ese hecho se vuelven asimilables por las plantas.

Sin embargo, tal como menciona Domínguez (1997), la fertilidad del suelo en potasio depende de la capacidad de suministro de dicho elemento, de acuerdo con las necesidades de los cultivos a lo largo de todo su ciclo. La planta utiliza el potasio que se halla en solución en la rizósfera alrededor de las raíces activas y que están en equilibrio con el potasio cambiante.

El factor capacidad puede considerarse al potasio cambiante que está en situación de máxima disponibilidad para la planta. Así pues, en la mayor parte de los casos se califica a esta fracción como potasio asimilable. El factor intensidad es la concentración del suelo especialmente importante en cuanto a su mantenimiento. Los cultivos pueden absorber potasio en cantidad suficiente para cubrir sus necesidades aun a muy bajas concentraciones de la solución, a condición de que ésta se mantenga estable, es decir, que el suelo tenga la capacidad o poder amortiguador necesario para reponer las pérdidas.

3.2.2. Ajuste a los modelos discontinuos

Este modelo ha sido desarrollado por Cate y Nelson (1965) tomando en cuenta la dificultad que presenta el cálculo de una curva por los modelos continuos. Una ventaja que es particularmente importante de este modelo, es que no se requieren de equipos complejos de cómputo y gráficamente es posible determinar lo que se denomina el “nivel crítico”.

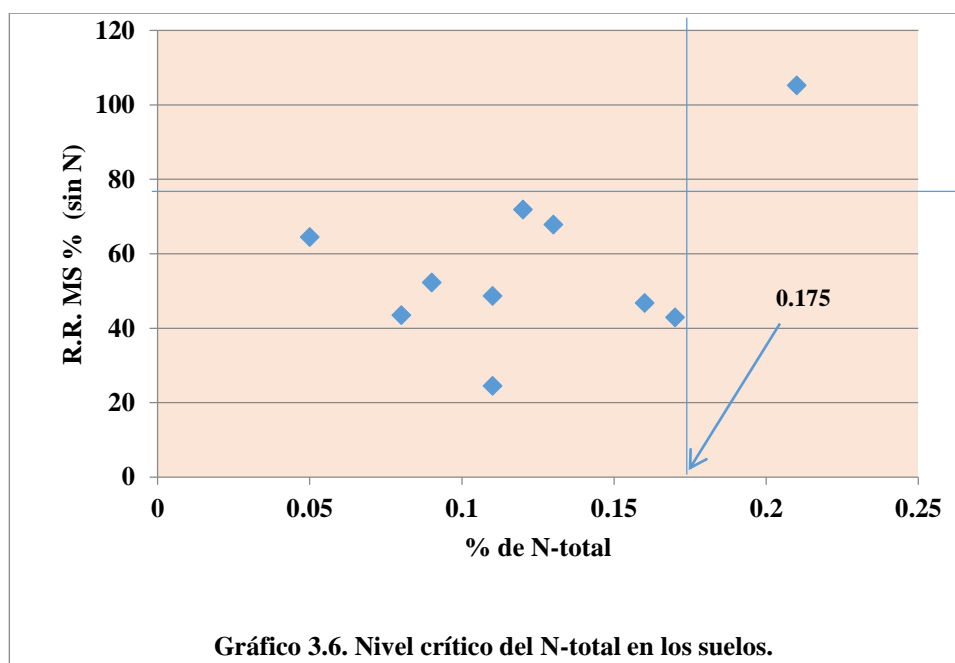
El definir el nivel crítico con bastante precisión sirve para dar un valor de predicción considerable, aunque esto no da la suficiente base para hacer recomendaciones de aplicación de fertilizantes pero sí, permite decir lo siguiente: “debajo del nivel del suelo, la probabilidad de una respuesta económica o fertilizantes, es alta (valores de análisis de suelos bajos); mientras que por encima del nivel crítico hay solo una oportunidad de obtener una respuesta amplia (valores de análisis de suelos altos).

a. Nivel crítico del N

El gráfico 3.6, nos muestra el valor crítico de 0.175% de N – total. Este valor significa que aquellos suelos cuyo valor es menor al porcentaje indicado, la respuesta a la adición de este nutriente vía fertilizantes tendrán efectos favorables en la planta. El nitrógeno (N) es necesario para la síntesis de la clorofila y, como parte de la molécula de clorofila, tiene un papel en el proceso de fotosíntesis. La falta de nitrógeno (N) y clorofila significa que el cultivo no utilizará la luz del sol como fuente de energía para llevar a cabo funciones esenciales como la absorción de nutrientes. El nitrógeno (N) es también un componente de las vitaminas y sistemas de energía de la planta.

Barceló y otros (1985) mencionan que el elemento más importante en el desarrollo de las plantas es el nitrógeno (N). Existiendo una deficiencia del mismo en el suelo, próximo a las raíces, el crecimiento de la planta se puede encontrar severamente limitado. Las plantas obtienen el nitrógeno principalmente del suelo, donde se encuentra bajo la forma orgánica, la que no es disponible inmediatamente para la planta, sino después de un proceso de mineralización catalizada por los

microorganismos del suelo, el cual procede en la dirección siguiente: nitrógeno orgánico \rightarrow amonio \rightarrow nitrito \rightarrow nitrato, la cantidad de nitrato producida finalmente depende de la disponibilidad de material carbonáceo descomponible. Si la relación carbono: nitrógeno (C/N) es alta aparece muy poco o casi nada de nitrógeno como nitrato.



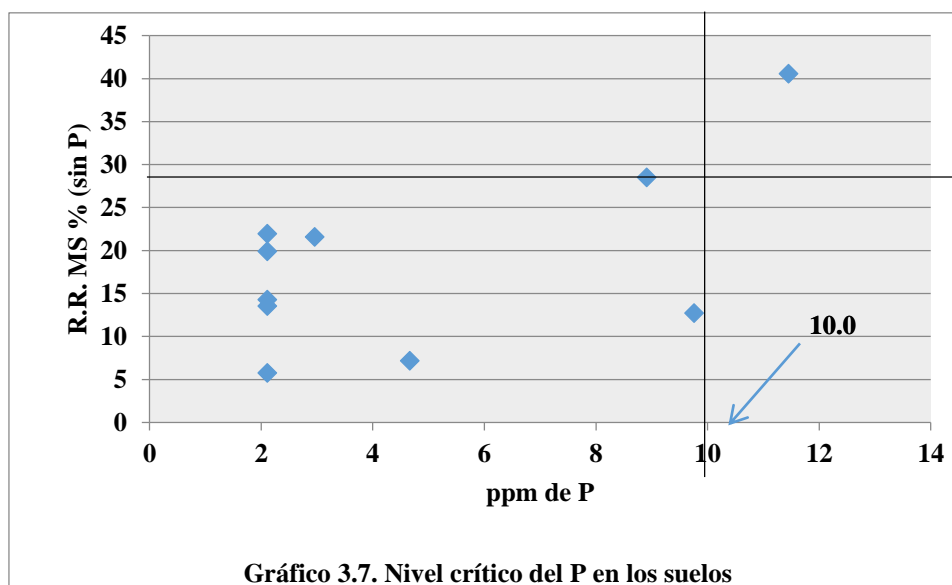
Las cantidades de nitrógeno en los suelos minerales son bastante pequeñas, variando desde trazas hasta 0,5% en los suelos superficiales, disminuyendo con la profundidad. La cantidad de nitrógeno depende también del tipo de suelo, de la temperatura y pluviosidad (Rice y Havlin, 1994). El clima juega un papel dominante en la determinación del estado de nitrógeno de los suelos. En regiones de condiciones de humedad uniforme y vegetación comparable, el contenido promedio de nitrógeno y de materia orgánica del suelo decrece exponencialmente a medida que aumenta la temperatura anual.

El nitrógeno disponible en el suelo se encuentra principalmente como nitrato (NO_3^-). La capa arable del suelo puede tener un contenido de nitrógeno bajo la forma de nitrato entre 2 a 60 ppm. Este contenido de NO_3^- varía con la estación, ya que es muy soluble en agua y las aguas de lluvia o riego lo pueden arrastrar hacia el subsuelo.

Las plantas pueden absorber el nitrógeno también bajo la forma de ión amonio (NH_4^+). El nitrógeno absorbido como NO_3^- es rápidamente reducido a ión nitrito (NO_2^-) mediante la acción de la enzima nitrato reductasa que contiene molibdeno (Mo). La transformación del nitrato a ión amonio (NH_4^+) es catalizada por la enzima nitrito reductasa (Sims, 2000).

b. Nivel crítico del P

El gráfico 3.6 nos muestra el nivel crítico hallado para el fósforo con un valor de 10 ppm que se diferencia sustancialmente con el hallado mediante el modelo continuo.



El fósforo es un elemento esencial para la vida. Las plantas lo necesitan para crecer y desarrollar su potencial genético. Lamentablemente, el fósforo no es abundante en el suelo. Y lo que es peor, mucho del fósforo presente en el suelo no está en formas disponibles para la planta. La disponibilidad de este elemento depende del tipo de suelo, según este, una pequeña o gran parte del fósforo total puede estar “fijado” (no disponible) en los minerales del suelo (Fixen y Grove, 1990). Esto significa que la planta no puede absorberlo. En la naturaleza, el fósforo forma parte de las rocas y los minerales del suelo. Las plantas absorben únicamente el fósforo que está en la

solución del suelo en forma de HPO_4^{2-} (ión fosfato monoácido) y $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ (ión fosfato diácido). Cualquier fertilizante ya sea de origen orgánico o mineral debe de transformarse primero en esas especies (formas químicas) antes de ser utilizado por el cultivo. Las diferencias entre los residuos orgánicos y los fertilizantes minerales son principalmente dos: 1) velocidad de disponibilidad para el cultivo (los residuos orgánicos tienen que ser primero descompuestos por los microbios, mientras que los abonos minerales ya tienen los compuestos en la forma que la planta los utiliza) y 2) concentración (los residuos orgánicos tienen concentraciones más bajas de fósforo que los compuestos minerales).

Para garantizar una producción rentable y devolver al suelo el fósforo que ha sido extraído por la cosecha, los agricultores deben aplicar fósforo a sus cultivos. Es esta la forma de asegurar la fertilidad y la calidad del recurso suelo. El fósforo es un componente esencial de los vegetales, cuya riqueza media en P_2O_5 es del orden del 0,5 al 1 % de la materia seca (Walsh y Beaton, 1973). Se encuentra, en parte, en estado mineral, pero principalmente formando complejos orgánicos fosforados con lípidos, prótidos y glúcidos, como la lecitina, las nucleoproteínas (componentes del núcleo celular) y la fitina (órganos de reproducción).

El fósforo interviene activamente en la mayor parte de las reacciones bioquímicas complejas de la planta que son la base de la vida: respiración, síntesis y descomposición de glúcidos, síntesis de proteínas, actividad de las diastasas, etc. El papel fundamental del fósforo en las transferencias de energía ha sido bien comprobado. Los iones fosfóricos son capaces de recibir energía luminosa captada por la clorofila y transportarla a través de la planta.

También tiene una gran importancia en el metabolismo de diversas sustancias bioquímicas (Rodríguez, 1992). El ácido fosfórico es uno de los elementos fertilizantes más importantes para el agricultor. Como el nitrógeno, el ácido fosfórico es un *factor de crecimiento* muy importante, debiendo señalarse la fuerte interacción que existe entre este elemento y el nitrógeno, sobre todo durante la primera fase del crecimiento. El desarrollo radicular, en particular, se ve favorecido por una buena

alimentación de fósforo al principio del ciclo vegetativo (interesa localizar una pequeña cantidad de P_2O_5 , con la semilla, especialmente en suelos pobres).

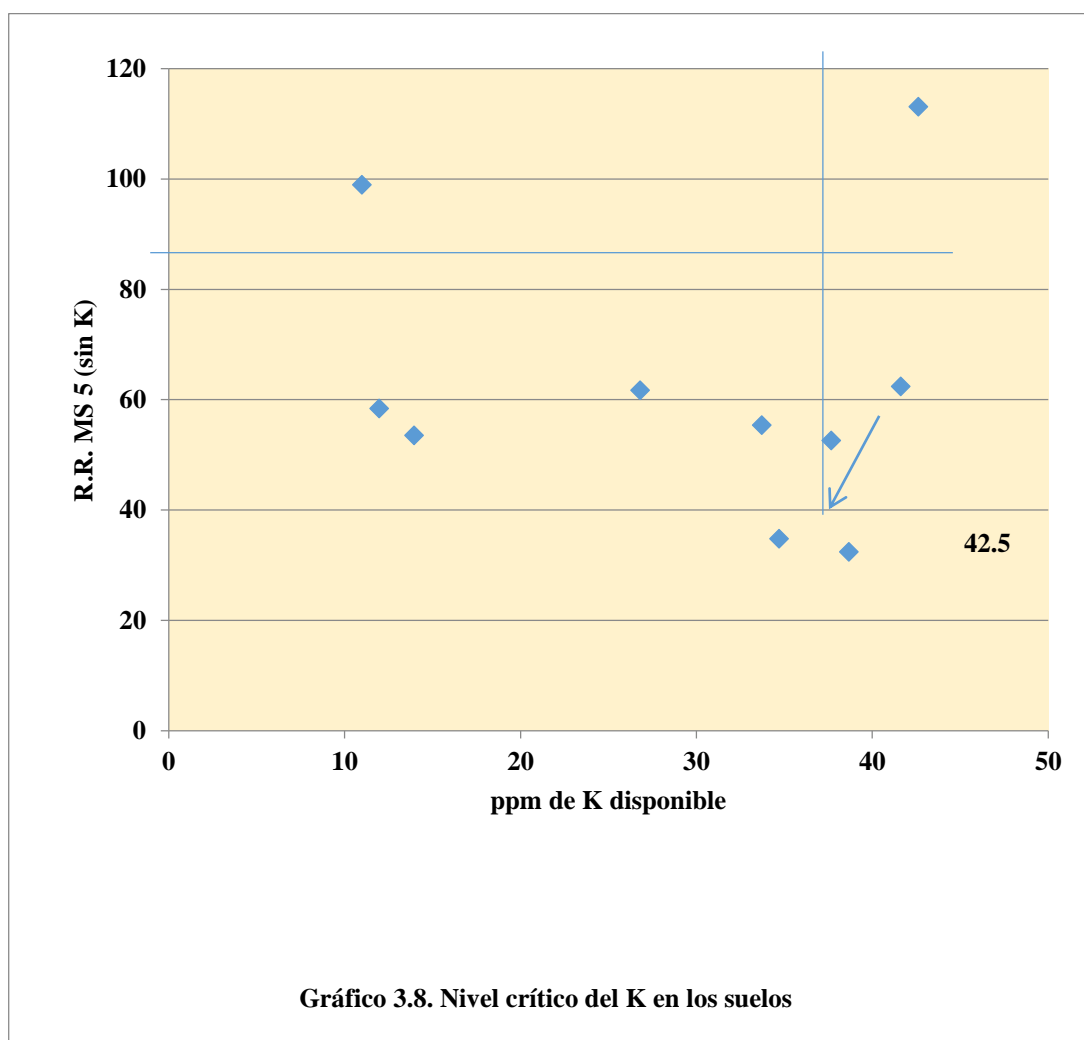
El ácido fosfórico es un factor de precocidad, ya que activa el desarrollo inicial y tiende a acortar el ciclo vegetativo, favoreciendo la maduración. Resulta, pues, importante para los cultivos tempranos y los que se hallan en el límite septentrional de su área geográfica (maíz). Aumenta la resistencia de la planta al frío y a las enfermedades, al igual que la potasa (Barceló y otros, 1980).

En términos generales, puede decirse que es un elemento regulador de la vegetación y, por tanto, un factor de calidad. Favorece precisamente los periodos de vegetación que son críticos para el rendimiento del cultivo: fecundación, maduración y movimiento de las reservas. Una alimentación insuficiente en fósforo se manifestará en el análisis de la planta por un contenido menor de fósforo en los órganos verdes y en el grano. Para el agricultor supondrá un retraso del crecimiento, fecundación defectuosa, movimiento anormal de las reservas y retraso de la maduración, lo que determina en conjunto una reducción más o menos pronunciada de la cosecha y menor calidad de la misma. Las carencias de P_2O_5 se ponen de manifiesto por un follaje de color verde oscuro, casi azulado, y por el amarilleamiento y secado de la punta de las hojas. Estas presentan una ondulación característica, mostrando, a veces, manchas púrpuras

Nivel crítico del K

En el gráfico 3.8 se muestra el nivel crítico hallado para el K disponible y que corresponde a 42.5 ppm. Este valor parece estar más acorde a la realidad en comparación al valor obtenido mediante el ajuste a modelos continuos. El potasio es uno de los tres nutrientes minerales que necesitan las plantas en mayor cantidad. Muchos cultivos como por ejemplo el banano, el tomate y la papa requieren más potasio que cualquier otro nutriente mineral. Las plantas absorben el potasio que se encuentra en la solución del suelo en forma del catión K^+ . La cantidad de K en la solución del suelo está en función (controlada por) de la liberación del potasio intercambiable, generalmente localizado alrededor de las partículas (micelas) de

arcilla. Los cultivos extraen grandes cantidades de potasio del suelo para su crecimiento y desarrollo y como es de esperarse, la falta de éste elemento, influye negativamente en el rendimiento y calidad del cultivo. Además, la deficiencia de potasio aumenta la vulnerabilidad del cultivo a enfermedades y lo hace menos resistente a condiciones de "stress" tales como sequías, heladas etc.



El abastecimiento de K en el suelo es limitado, aun los suelos que contienen arcillas ricas en este mineral no pueden suplirlo indefinidamente. En los sistemas de agricultura moderna, la cosecha es probablemente la forma en la cual se extrae mayor

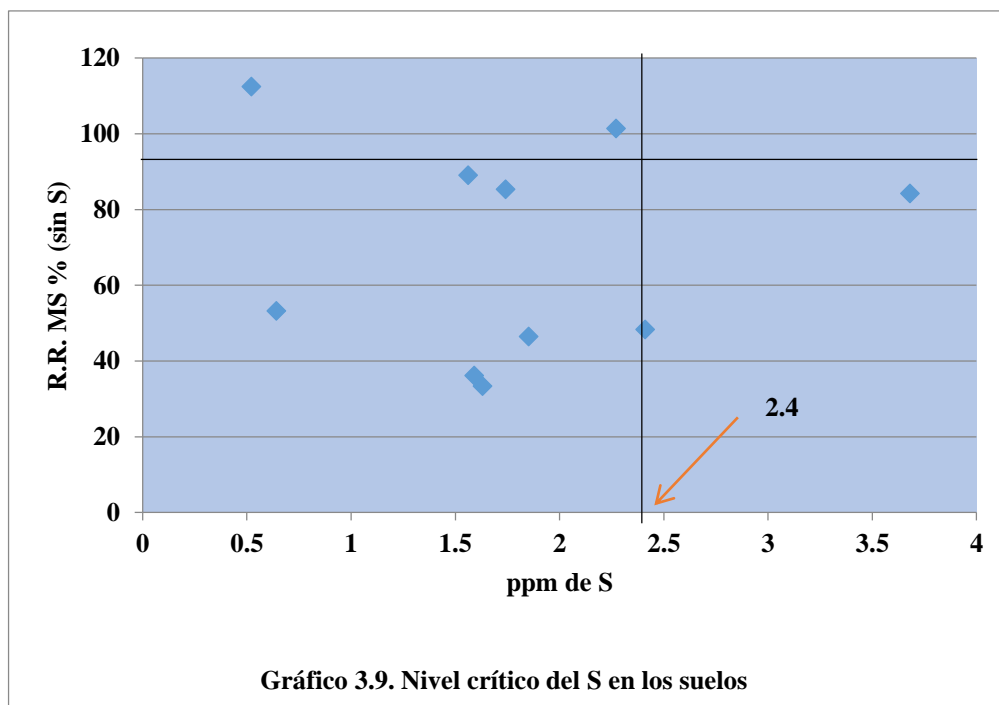
cantidad de K del suelo (García, 2002). Así, el no regresar lo que se extrae o se pierde durante el ciclo del K ocasiona que el suelo pierda fertilidad y por ende productividad potencial. Las formas de incorporación del potasio al suelo son: adición de residuos vegetales, estiércoles, residuos animales sólidos y fertilizantes minerales. Algunos fertilizantes minerales como el cloruro de potasio (KCl) y el sulfato de potasio y magnesio ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$), tienen la ventaja que son solubles por lo que son de rápida disponibilidad a los cultivos. El buen agricultor y técnico agrícola responsable, deben de asegurar que el ciclo del potasio sea sustentable y que pueda ser heredado a las siguientes generaciones en suelos más fértiles y productivos (Malavolta y otros, 1997).

c. Nivel crítico del S

El gráfico 3.9 nos permite visualizar el valor de 2.4 ppm de S como el nivel crítico. Muchos autores refieren que valores inferiores a 5 ppm son considerados bajos lo cual concuerda con el análisis de caracterización realizado para los 10 suelos. Es posible indicar que aportaciones de este nutriente a aquellos suelos que tienen valores menores a 2.4 ppm responderán favorablemente ya que el S es considerado un macronutrientes y por lo tanto esencial para el crecimiento y desarrollo de los organismos vivos, por su participación en la síntesis de proteínas (Ferraris y otros, 2004)

Este nutriente se encuentra en el suelo bajo diferentes formas químicas: azufre formando parte de compuestos orgánicos asociados con la llamada materia orgánica del suelo, azufre inorgánico formando principalmente sulfatos (que es la forma que es disponible para los vegetales). Del azufre total del suelo aproximadamente el 97% se encuentra bajo formas orgánicas y el 3% restante como formas inorgánicas. Estos conceptos indican claramente la importancia de la necesidad de que los suelos estén adecuadamente dotados de materia orgánica (que en nuestro caso es todo lo contrario), para que los procesos de descomposición de la misma entreguen a los vegetales las cantidades necesarias de este nutriente. Es común asociar al nitrógeno con la materia orgánica y los procesos de descomposición que transforman al nitrógeno orgánico en mineral asimilable por las plantas; este mismo proceso es válido para el azufre (Gutiérrez et al. 2005).

El contenido de azufre de los suelos es muy variable, los valores más bajos se encuentran especialmente en zonas tropicales y subtropicales. Esto se debe, entre otras causas, a la disminución en el uso de abonos orgánicos.



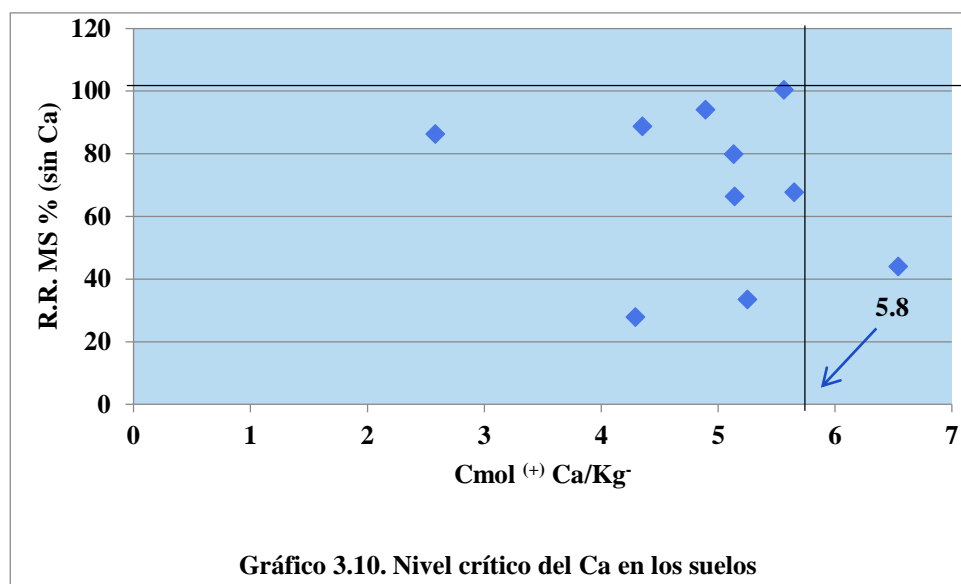
Las deficiencias de azufre en las plantas se parecen a las deficiencias de nitrógeno, las hojas tornan a un amarillo pálido. De cualquier manera, el azufre es de menor movilidad que el nitrógeno en la planta y las hojas más jóvenes son las que generalmente se amarillean, mientras que las hojas viejas se mantienen verdes. Esto es opuesto a lo que ocurre con la deficiencia de nitrógeno. Son frecuentes las excepciones a este síntoma. Los síntomas generales de deficiencia son hojas amarillas, plantas caídas con tallos cortos y escasos.

Las necesidades de los cultivos varían considerablemente en sus requerimientos de azufre. Tal es así que Colacelli (1999) refiere que el café requiere de 20 a 40 kg/ha.

d. Nivel crítico del Ca

El nivel crítico del calcio es de $5.8 \text{ cmol}_{(+)} \text{ Kg}^{-1}$ según lo indicado en el gráfico 3.10. La presencia de calcio en el suelo es indispensable para lograr que los otros elementos, especialmente los cationes, se pongan disponibles para la planta. Es conocido que el calcio debe cubrir el 60-70% de la saturación de los cationes del suelo (Fassbender y Bornemisza, 1987).

En suelos con pH ácidos como lo son de Santa Rosa, los problemas con la disponibilidad de calcio son bastante serios. Por una parte, los excesos de aluminio y hierro pueden convertirse en un problema de fitotoxicidad para las plantas, especialmente a nivel de su sistema radicular; y por otra, se presenta poca disponibilidad de los cationes (Mg, K, Ca), lo que afecta tremendamente la calidad de las cosechas.



El análisis de caracterización de los suelos muestra que el porcentaje de saturación de todos los suelos estudiados es menor al 50% lo que correlaciona con el pH fuertemente ácido de los mismos. Una forma de evaluar la importancia de los cationes

cambiables, es mediante las relaciones catiónicas; mediante él, se ha demostrado que el tenor del calcio es bajo en todos los suelos lo que condiciona la absorción de otros nutrientes generando deficiencias para las plantas. La deficiencia de calcio está generalmente asociada a efectos de acidez del suelo y muchas veces es difícil diferenciar una de la otra. El calcio se absorbe como catión divalente Ca^{2+} y es casi inmóvil, por lo que las deficiencias se observan primeramente en los tejidos jóvenes (Barceló, 1980).

Las deficiencias de calcio parecen tener dos efectos en la planta: atrofia del sistema radical y apariencia característica de la hoja. La carencia de calcio también inhibe la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico. Aunque los síntomas varían entre especies, generalmente se observa necrosis de ápices y puntas de hojas jóvenes además de deformación de las hojas, cuyos bordes se encorvan hacia la cara inferior o adoptan una apariencia dentada, y a menudo clorosis en el nuevo crecimiento (Díaz, 2002). En el experimento llevado a cabo en el invernadero, las plantas de tomate, no han mostrado evidencias sobre la falta de este elemento y quizá este asociado al corte prematuro de las plantas (50 días).

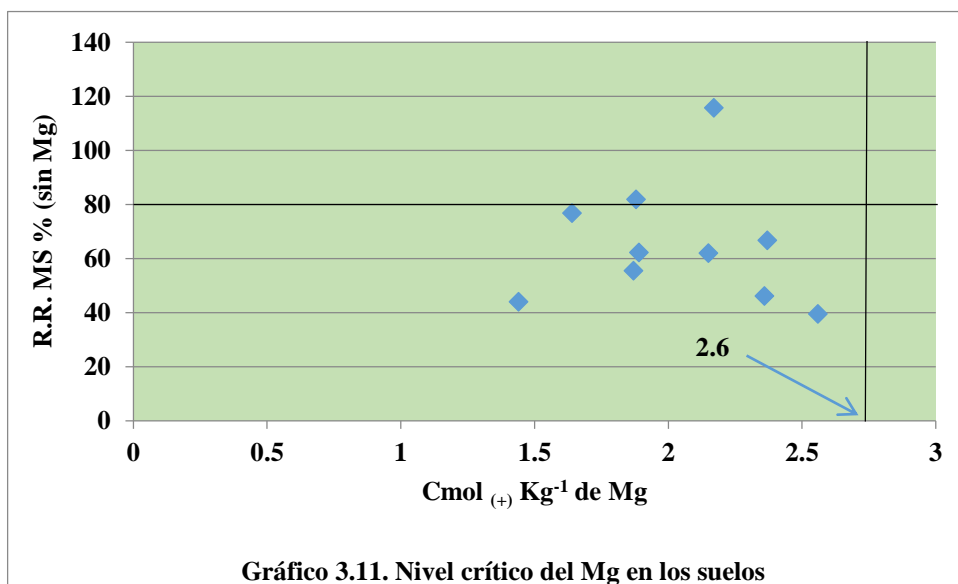
La única manera de corregir un suelo ácido es aplicando calcio en forma de enmiendas cálcicas, cuya dosis depende de los rangos de pH específicos de cada suelo (Brady y Weil, 2008)

e. Nivel crítico del Mg

El gráfico 3.11 nos muestra el nivel crítico de $2.6 \text{ cmol}_{(+)} \text{ Kg}^{-1}$ de Mg para los suelos estudiados. Aun cuando con los modelos matemáticos ensayados no se obtuvo una correlación positiva y estadísticamente significativa, los modelos discontinuos ofrecen la posibilidad de hallar este valor al tratarse de elementos esenciales para las plantas. En suelos ácidos, especialmente con valores de pH de 5 o menores como es nuestro caso, la extracción de iones de magnesio es inhibida especialmente por altas concentraciones de iones de Al^{3+} .

En otras palabras, la deficiencia de magnesio puede ser inducida y exacerbada por iones de Al. Por otra parte, si la concentración de iones de magnesio en la solución del suelo es solo moderada, fuertes aplicaciones de fertilizantes de potasio pueden reducir considerablemente la extracción de magnesio e inducir deficiencias. Fassbender y Bornemisza (1987) otorgan gran importancia al ratio entre las concentraciones de iones K^+ y Mg^{2+} como un factor que afecta la extracción de magnesio.

En la opinión de estos autores la clorosis debida a deficiencia de magnesio también puede ocurrir cuando el ratio K:Mg en el suelo es alto. De hecho López (1990), reportó en 1950 que los árboles de manzanas mostraban síntomas de deficiencia de magnesio si los niveles de potasio en el suelo eran muy altos. Según Leikam y otros (2003), el ratio entre las concentraciones de iones intercambiables de potasio y magnesio no debe ser mayor a 5.



Según Urbano (2002), el magnesio siempre ha tenido un rol clave en cada etapa decisiva en la evolución de la vida en la tierra, comenzando por las reacciones de condensación prebióticas, pasando por la formación y reduplicación de moléculas

orgánicas, plantas unicelulares hasta los humanos, porque casi todas las reacciones importantes involucradas en el metabolismo a nivel celular, como la biosíntesis de proteínas, el metabolismo de la energía, etc., necesitan iones de magnesio como catalizador metálico. Pese a que la deficiencia de magnesio lleva rápidamente a la destrucción de la clorofila, el magnesio en la clorofila solo representa entre un 15 y 20% del magnesio total contenido en una planta sana. Obviamente que también se necesitan cantidades importantes para otras funciones y procesos fisiológicos, algunos de los cuales están involucrados en la síntesis y mantenimiento de la clorofila. Eje, caroteno y xantophyll.

El contenido de magnesio total en las plantas normalmente está entre 0.10 y 0.55% de materia seca. Además de su participación en la fotosíntesis, el magnesio es importante como cofactor y activador de muchas reacciones enzimáticas. Otra función importante del magnesio es estabilizar la membrana celular y regular el balance de cationes intra y extracelular. Según Barceló y otros (1980), el magnesio también influencia el balance de fitohormonas y la reducción de nitrato. Y señala que la deficiencia de magnesio inhibe la reducción de nitrato y la producción de fitohormonas. El mismo autor señala que altos niveles de magnesio promueven la germinación del polen.

3.3. Interpretación de los niveles de nutrientes del análisis foliar

Los resultados del análisis foliar se muestra en el cuadro 3.5 y representa la absorción de nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio y magnesio de los diez suelos estudiados. De manera general se puede inferir que los suelos que no recibieron la aportación de un nutriente determinado, las plantas que desarrollaron en él, muestran menores concentraciones en el tejido vegetal en comparación a aquellos que si la recibieron.

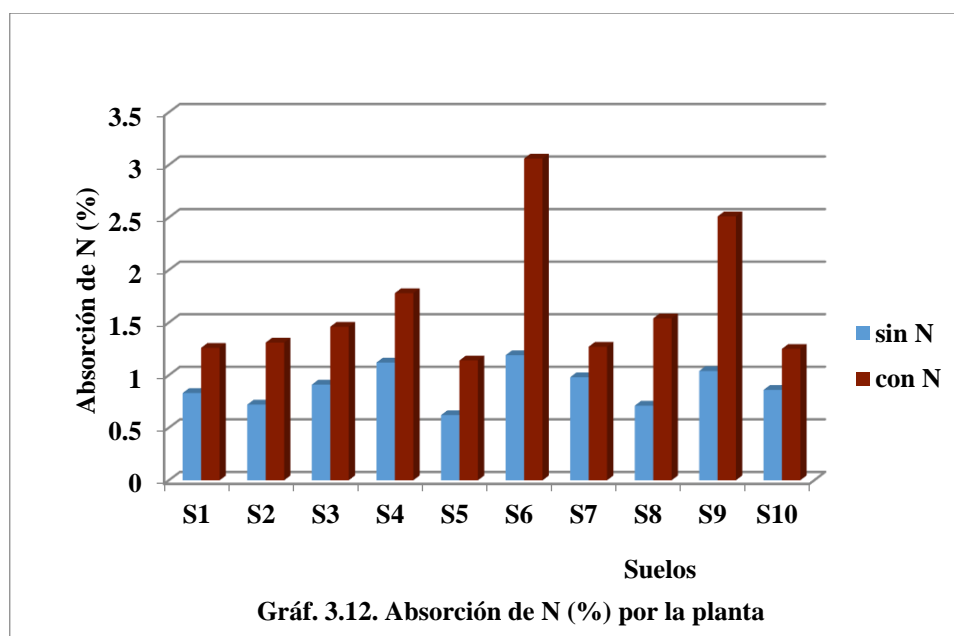
Con respecto al nitrógeno, la respuesta más evidente se consigue en el suelo de la localidad de Luisiana. Cuando no se aporta el nutriente, la absorción es de 1.19%, mientras que con la aportación ésta es de 3.06%; el incremento en la absorción es de 1.87%. Similares tendencias se logran en los demás suelos lo que implica la importancia de la fertilización nitrogenada y su rol en la planta. Tal como mencionan Barceló y otros

(1980), probablemente el papel más importante del nitrógeno en las plantas es su participación en la estructura de la molécula proteica. Es por ello que en las plantas desprovistas de este elemento, tal como ocurre en el tratamiento sin nitrógeno, el síntoma de deficiencia es fácilmente apreciable por el amarillamiento (clorosis) de las hojas, debido a una disminución del contenido de clorofila. Una interesante característica que se ha podido verificar en las plantas de tomate, es la producción de pigmentos distintos de la clorofila cuando falta nitrógeno, que se ha traducido en una coloración púrpura en los peciolo y nervios de las hojas debido a la formación de antocianinas.

Cuadro 3.5. Concentración de nutrientes absorbidos por las plantas (%)

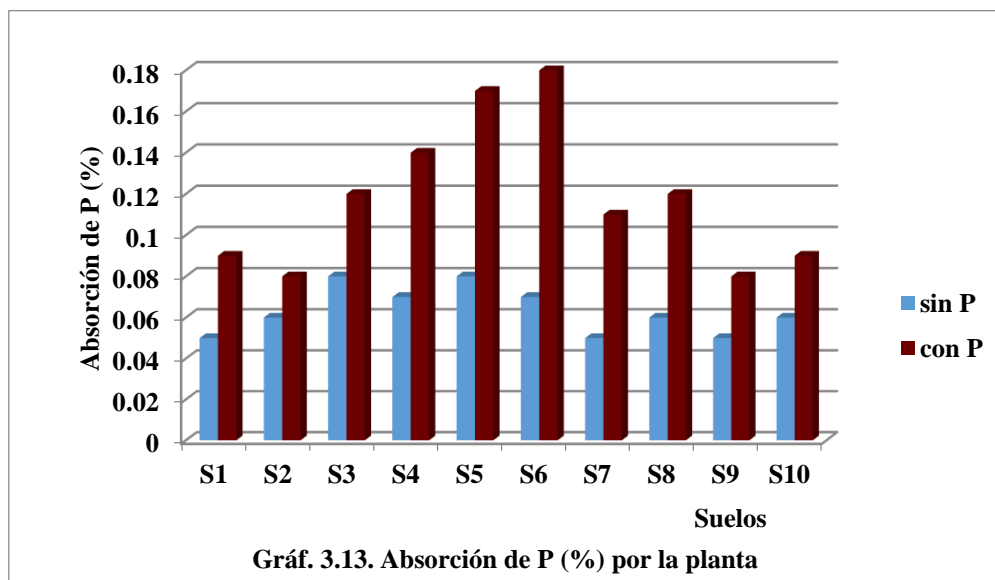
Localidad		Nitrógeno (N)	Fosforo (P)	Potasio (K)	Azufre (S)	Calcio (C)	Magnesio (Mg)
Cimariva	sin	0.83	0.05	0.63	0.06	1.42	0.06
	con	1.26	0.09	0.65	0.09	1.76	0.09
Huayrapata	sin	0.72	0.06	0.71	0.09	1.65	0.08
	con	1.31	0.08	0.81	0.14	1.83	0.11
Anteccasa	sin	0.91	0.08	0.56	0.06	1.64	0.11
	con	1.46	0.12	0.58	0.11	1.92	0.16
Huantachaca	sin	1.12	0.07	0.61	0.08	1.74	0.09
	con	1.78	0.14	0.63	0.13	2.03	0.12
Mejorada	sin	0.62	0.08	0.68	0.04	1.92	0.12
	con	1.14	0.17	0.69	0.08	2.16	0.15
Luisiana	sin	1.19	0.07	0.71	0.09	1.81	0.08
	con	3.06	0.18	0.72	0.16	2.31	0.11
Rinconada baja	sin	0.98	0.05	0.56	0.07	1.15	0.07
	con	1.27	0.11	0.58	0.13	1.65	0.09
La Victoria	sin	0.71	0.06	0.83	0.04	1.66	0.08
	con	1.54	0.12	0.92	0.09	1.87	0.11
San Cristóbal	sin	1.04	0.05	0.81	0.06	1.04	0.08
	con	2.51	0.08	0.83	0.11	1.51	0.09
San Pedro	sin	0.86	0.06	0.73	0.05	1.14	0.09
	con	1.25	0.09	0.74	0.08	1.57	0.12

En el gráfico 3.12 se visualizan las absorciones de nitrógeno en los diez suelos estudiados; para el caso de Luisiana y San Cristóbal, la diferencia de absorción en los tratamientos es mayor respecto a los demás suelos, siendo éstas de 1.87 y 1.47%, respectivamente. Este resultado se explica por el tenor de materia orgánica y nitrógeno total en los suelos (cuadro 3.1) que es superior 2% y 0.11%, respectivamente que es catalogado como medio a alto. Como el experimento se desarrolló en condiciones de invernadero con temperaturas diurnas que superan los 25°C y aportaciones periódicas de humedad al suelo, era de esperar un adecuado suministro de nitrógeno mineral que se ha manifestado en el crecimiento y desarrollo del cultivo mostrando diferencias muy evidentes con respecto al tratamiento que recibió adicionalmente nitrógeno vía urea de calidad reactivo a una dosis de 180 ppm.



La absorción de fósforo por las plantas en el tratamiento sin la adición de este elemento (-P) en los suelos, son bastante bajas y se ha manifestado en el escaso crecimiento y desarrollo del cultivo y por tanto en los menores rendimientos de materia seca. Esto es evidente y explicable por la importancia del nutriente en los procesos metabólicos. Barceló y otros (1980), refieren que el fósforo se encuentra en las plantas formando parte de los ácidos nucleicos, fosfolípidos, de las coenzimas NAD y NADP y, lo que es especialmente importante, como parte integrante del ATP. En los tejidos meristemáticos

de las regiones de la planta, sede de un activo crecimiento, se encuentran fuertes concentraciones de fósforo, que interviene allí en la síntesis de nucleoproteínas. Es por esta y otras funciones que es suficiente que digamos que no hay ninguna duda respecto al papel esencial del fósforo en las plantas.



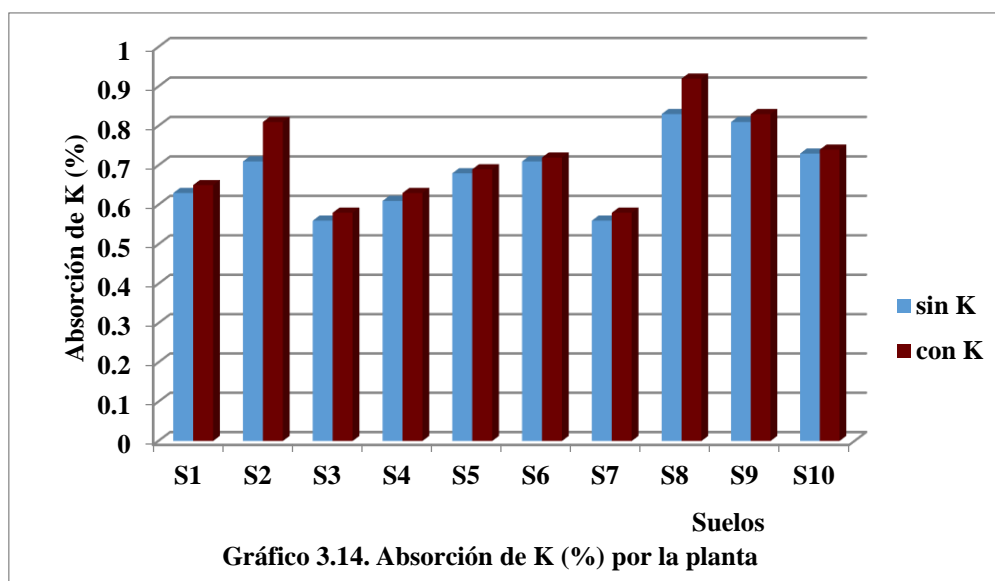
Investigaciones diversas realizadas en el Valle del Río Apurímac y Ene (VRAE), demuestran que los suelos muestran deficiencias de este elemento en los suelos debido principalmente a las extracciones de los cultivos que no son repuestas y a los procesos físico-químicos de fijación por el complejo arcillo húmico. Se ha establecido un nivel crítico de 10 ppm mediante el ajuste a los modelos discontinuos y en concordancia al análisis de los suelos, todos los suelos presentan valores inferiores a excepción de la localidad de Unión Mejorada. Las plantas demostraron, aparte del escaso crecimiento, la caída prematura de las hojas y la pigmentación antocianica púrpura o roja. Debido a la gran movilidad del fósforo son las hojas viejas las primeras en presentar los síntomas. Se reduce el crecimiento de la planta y en condiciones de extrema carencia las plantas presentan un aspecto achaparrado. La absorción de acuerdo a los tratamientos en los suelos estudiados, se muestra en el gráfico 3.13. Es evidente que la aportación del

elemento en suelos deficientes determina una mayor absorción por las plantas ya que el fósforo es el elemento más limitante en los suelos. Se encuentra en la planta como un componente de carbohidratos activados, ácidos nucleicos, fosfolípidos, fosfoaminoácidos que forman parte de fosfoproteínas. El papel central del fósforo es en la transferencia de energía. Los carbohidratos antes de ser metabolizados son fosforilados. La presencia de fósforo en la estructura molecular de los azúcares, los hace más reactivos. En la transferencia de energía por fosforilación, juegan un papel importante los nucleótidos altamente reactivos: ATP (adenosina trifosfato), ADP (adenosina difosfato), GTP (guanosina trifosfato), GDP (guanosina difosfato), UTP (uridina trifosfato), UDP (uridina difosfato), CTP (citosina trifosfato) y CDP (citosina difosfato). El fósforo, como ortofosfato (PO_4^{3-}) participa en un gran número de reacciones enzimáticas que dependen de la fosforilación. Posiblemente por esta razón es un constituyente del núcleo y es esencial para la división celular y el desarrollo de tejidos meristemáticos (García y otros, 2005).

En el caso de la absorción de potasio (gráfico 3.14), es notorio que no existen grandes diferencias entre los tratamientos considerados. Los suelos bajo su estado de fertilidad natural han aportado, según lo demuestra el análisis de suelos, cantidades suficientes de potasio que ha ocasionado que el crecimiento y desarrollo del cultivo no haya sufrido mermas importantes en comparación al tratamiento que sí recibió la aportación del elemento vía reactivo químico en solución.

Es necesario mencionar que en los suelos se pueden distinguir varias formas de K, cuya interpretación es muy importante. El K que contiene la solución del suelo, donde se produce la absorción por la planta, es una fracción muy pequeña del K total; generalmente varía entre 0.1 y 100 mg K l⁻¹. Tal como mencionan Fassbender y Bornemisza (1987), de las diferentes formas o fracciones de K (estructural, en los minerales secundarios, adsorbido, intercambiable y en la solución del suelo), constituyen una reserva potásica, actúan como un stock separado, definido y cuantificable, susceptible de transformaciones de una forma a otra continuamente según los factores que afecten el equilibrio.

Los procesos e interacciones que determinan los fenómenos de cambio, son múltiples y complicados. Lo indicado parece ser la razón del comportamiento de la absorción de potasio que se visualiza en el gráfico 3.12.

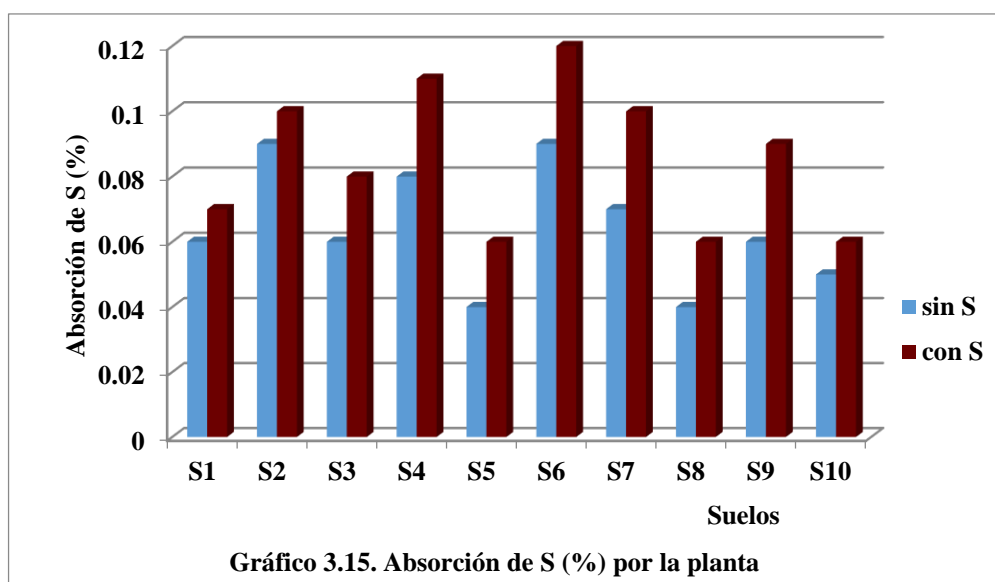


Se ha estimado en 42.5 ppm de K disponible como el nivel crítico. Todos los suelos estudiados están por debajo de este nivel a excepción de La Victoria que posee un valor superior. Sin embargo, las plantas en el tratamiento sin K, no han mostrado los síntomas típicos de deficiencia que se manifiesta en un retraso del crecimiento de la planta. Las partes más afectadas son aquellas que acumulan sustancias de reserva (frutos, semillas y tubérculos). En las deficiencias agudas aparecen en las hojas manchas cloróticas, seguidas de necrosis en la punta y en los bordes. La deficiencia de potasio origina un alargamiento del periodo vegetativo, un retraso en la maduración de frutos y semilla y una reducción de la cosecha en cuanto a cantidad, calidad y conservación. Es posible inferir que debido al corto periodo de conducción del experimento (50 días), las manifestaciones de su carencia, no hayan sido evidentes. Sin embargo es preciso indicar que el potasio regula muchas funciones de la planta, por formar parte de un gran número de enzimas. Interviene en la fotosíntesis de carbohidratos, así como en el movimiento de estos compuestos y su acumulación en los órganos de reserva.

Por este motivo las plantas que se cultivan por sus reservas de

carbohidratos tales como la patata, la remolacha, la uva, responden muy bien a las aportaciones de potasio. Interviene en la formación de los prótidos, lo cual justifica el adecuado suministro de este elemento para obtener un buen rendimiento del abono nitrogenado. Favorece el mejor aprovechamiento del agua de la planta y contribuye al mantenimiento de la turgencia celular.

La absorción del azufre (gráfico 3.15) según los tratamientos sigue similar tendencia al nitrógeno; es decir, aquellos suelos que aportaron de manera natural este nutriente, no fue suficiente para el cumplimiento de su rol en la planta. Tal como mencionan Barceló y otros (1980), la función más importante y evidente es la participación en la estructura de las proteínas como parte integrante de los aminoácidos sulfurados: cistina, cisteína y metionina. Es por esta razón que las plantas de algunas localidades, han mostrado síntomas evidentes de deficiencia muy parecidos a la del nitrógeno. Se presenta una clorosis general. Sin embargo, hay una diferencia fundamental, ya que debido a la inmovilidad de este elemento, los síntomas aparecen primero en las hojas jóvenes.



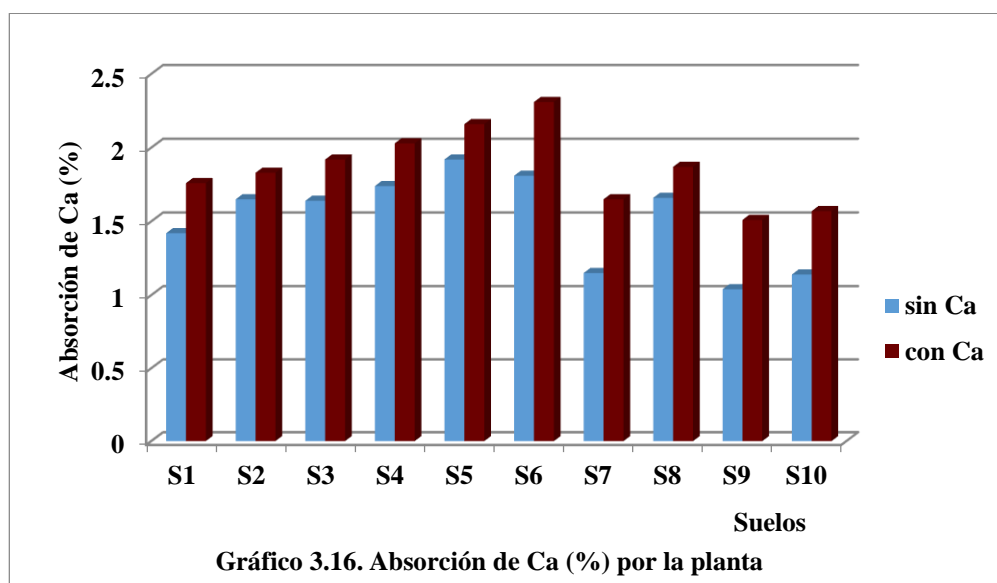
Cuando se aportó el elemento vía reactivo a una dosis de 100 ppm, hubo respuesta positiva y significativa en la producción de materia seca; y, consecuentemente en la absorción del elemento tal como lo demuestran los contenidos en el tejido vegetal y que se pueden visualizar en el gráfico 3.15.

La presencia de S en el suelo, está condicionada a la presencia de materia orgánica. Como la mayoría de los suelos están bien provistos de él, la asimilación por la planta luego de un proceso de descomposición parece haber sido suficiente. Las plantas en el tratamiento con aportación de este nutriente, tienen ligeras mayores absorciones en comparación a las que no la recibieron. En principio, las formas orgánicas tienen que descomponerse primero a ión sulfuro y luego a iones sulfato para que las plantas puedan utilizarlos. Esta descomposición está favorecida por la presencia de calcio en el suelo. Las formas minerales son oxidadas por la acción de los microorganismos a sulfatos y tiosulfatos (Fageria, 2001).

Las respuestas en la absorción de calcio por las plantas atendiendo a los tratamientos (gráfico 3.16), muestran que aquellos suelos que contribuyen con el aporte de este elemento por la fertilidad natural, tienden a que las plantas absorban en menor cantidad con respecto a la aportación mediante el carbonato cálcico a una dosis de 250 ppm.

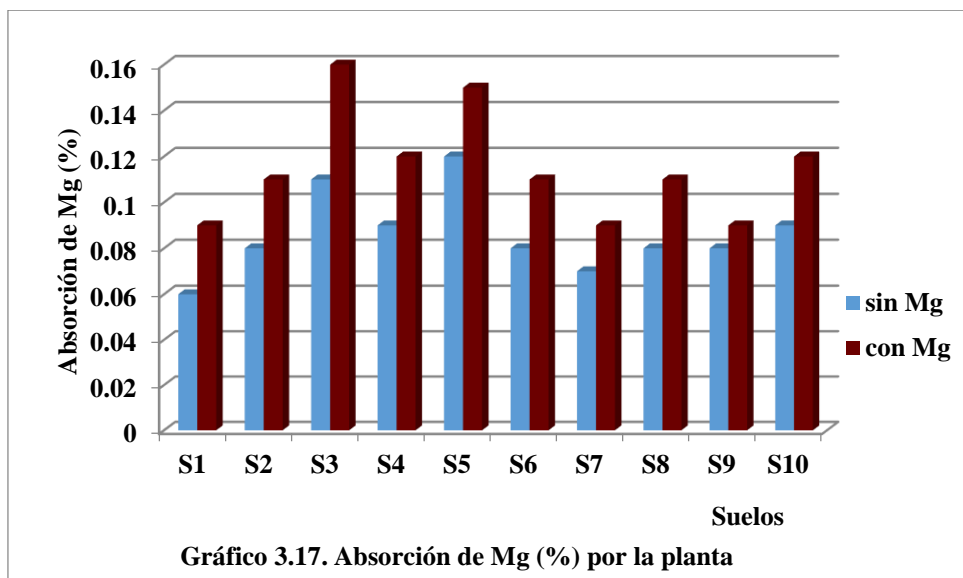
La respuesta es indiscutible teniendo en consideración que los suelos de la ceja de selva, son por lo general, deficientes en bases cambiables, entre ellos el calcio, que determina que el pH del suelo sea de reacción ácida. No se ha observado en las plantas, síntomas perceptibles de carencia, aun cuando se conoce la función importante en la planta. López (1990), revela un papel bien conocido desempeñado por el calcio en las plantas: su participación en las paredes celulares en forma de pectato cálcico. La lámina media de las membranas celulósicas de las células vegetales está formada básicamente por pectatos de calcio y magnesio. Barceló y otros (1980) mencionan, que los síntomas de deficiencia son fáciles de observar y muy espectaculares. Las regiones meristemáticas de los tallos, hojas y raíces son atacadas fuertemente y pueden acabar muriendo, cesando el crecimiento de estos órganos. Las raíces pueden acortarse, en los bordes de las hojas jóvenes aparece clorosis seguida de necrosis. También es un síntoma característico la malformación de las hojas jóvenes, siendo el síntoma más fácil de reconocer la forma de gancho que adquieren las puntas de las hojas; este hecho si ha sido posible observar en las plantas en el tratamiento sin calcio (-Ca). Debido a la inmovilidad del calcio dentro de la planta los síntomas aparecen primero en las hojas jóvenes. Las deficiencias de calcio son más frecuentes en los suelos ácidos, de tal forma

que la deficiencia de este elemento va acompañado por niveles tóxicos de iones hidrógeno y de iones de metales pesados como aluminio y manganeso que son solubles en medio ácido. Las raíces dañadas por la deficiencia de calcio son más susceptibles a la infección de bacterias y hongos.



En referencia al magnesio, las diferencias entre los tratamientos aplicados siguen similar tendencia al calcio. Es decir, la aportación al suelo deficiente en este elemento mediante carbonato de magnesio a una dosis de 30 ppm, ha repercutido favorablemente en la absorción por la planta. Se atribuye dos funciones esenciales desempeñadas en la planta por el magnesio: los procesos de la fotosíntesis y del metabolismo glucídico. El magnesio forma parte de la molécula de la clorofila, sin la cual la fotosíntesis no podría realizarse (Urbano, 1989). Muchas de las enzimas que intervienen en el metabolismo glucídico necesitan magnesio como activador. Se reconocen otras funciones vitales del elemento; entre ellos, dos papeles en la síntesis de proteínas: a) como activador de algunos de los sistemas enzimáticos que intervienen en la síntesis de los ácidos nucleicos y b) como importante agente de unión entre los cromosomas en donde se realiza la síntesis de proteínas.

Se ha podido notar en el tratamiento sin magnesio (-Mg) una leve clorosis internerval en las hojas, así como, un leve amarillamiento general. Sin embargo, tal como citan Barceló y otros (1980), los síntomas, cualesquiera que sean, se presentan primero en las hojas maduras, dato indicativo de su movilidad dentro de la planta. Las absorciones comparativas entre los tratamientos se muestran en el gráfico 3.17.



CONCLUSIONES

1. Los suelos estudiados del distrito de Santa Rosa presentan deficiencias de P, K y S condicionados por el pH fuertemente ácido. El contenido de materia orgánica y la CIC, oscilan de medio a alto. Las relaciones catiónicas demuestran desbalances en la cantidad y proporción de Ca, Mg y K. El porcentaje de saturación de bases es inferior al 50%.
2. Los nutrientes deficientes verificados por los síntomas de deficiencia y rendimiento de materia seca son en orden de importancia: P, N, K, Microelementos, Mg, S y Ca.
3. Los niveles críticos determinados según el ajuste a los modelos continuos para aquellos que resultaron estadísticamente significativos, son: materia orgánica: 2.2%, P: 5.1 ppm y K: 26.9 ppm.
4. Los niveles críticos determinados según el ajuste a los modelos discontinuos son: Nitrógeno total: 0.175%, P: 10 ppm, K: 42.5 ppm, S: 2.4 ppm, Ca: 5.8 cmol (+) Kg⁻¹ y Mg: 2.6 cmol (+) Kg⁻¹
5. No existe correlación entre los niveles críticos hallados por el modelo discontinuo respecto a los modelos continuos.
6. La absorción de nutrientes en los suelos que recibieron el aporte mediante reactivos químicos en solución respondieron favorablemente debido a su deficiencia en el suelo; a excepción del potasio cuya respuesta fue casi similar.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario implementar en las zonas de trabajo un proceso de información y capacitación acerca de los resultados obtenidos, aun cuando estos no son definitivos, para prestar la atención que merecen los nutrientes críticos como son el N, P, K y S.
2. Calibrar la información obtenida mediante correlación del análisis del suelo con el análisis foliar de los principales cultivos de la zona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez R.; Gutiérrez, F. y Rubio, G. 2005. Recomendación de fertilización. *En* R. Álvarez (Coord.). Fertilización de Cultivos de Granos y Pasturas. Diagnóstico y Recomendación en la Región Pampeana. Ed. Facultad de Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina. pp. 37-51.
2. Álvarez R.; Steinbach.; H. Álvarez, C. y Grigera, S. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas* 18:14-19. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
3. Baeyens, J;. 1970 Nutrición de las plantas de cultivo. Editorial Lemos. Madrid, España.
4. Barbagelata P.; y Melchiori, R;. 2004. Diagnóstico de la fertilización fosfatada para trigo en siembra directa en Entre Ríos. *Actas CD XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Luis. AACS.
5. Barceló, J.; Nicolás, G.; Sabater, B. y Sánchez, R. 1980. *Fisiología Vegetal*. Ediciones Pirámide. Madrid, España.
6. Berardo, A;. 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo del trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA-Balcarce. *Boletín Técnico* 128. EEA INTA Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
7. Brady, N.; and Weil, R;. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. 14th Edition. Prentice Hall, Inc. New Jersey.
8. Brown J;. 1987. *Soil Testing: Sampling, correlation, calibration and interpretation*. SSSA Spec. Pub. 21. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 144 pág.
9. Calzada, J;. 1982 *Métodos estadísticos para la investigación*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
10. Cate, B.; y Nelson, A. 1965 Un método rápido para correlación de análisis de suelos con ensayos de fertilizantes. *Technical Bulletin Internacional Testing*.
11. Ciampitti I; García, F.; Picone, L. y Rubio, G. 2008. Phosphorus in field crop rotations of the Pampas of Argentina: Dynamics of Bray P, P balance and soil P fractions. *Agronomy Abstracts*. ASA-CSSA-SSSA-GSA International Annual Meetings. October 5-9. Houston, Texas. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, EE.UU.

12. Colacelli, N;. 1999. Suelo: El azufre como nutriente para las plantas. Departamento de Ecología. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina. Sitio web: www.produccion.com.arg Visitado el 01/06/11.
13. Díaz, M;. 2002. Nutrición mineral y fertilización. *En* M. Díaz Zorita y G. Duarte (ed.) Manual práctico para el cultivo de girasol. Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. pp. 77-96.
14. Domínguez A;. 1997. Tratado de Fertilización. Editorial Mundi Prensa. Barcelona, España.
15. Fageria, V;. 2001. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8):1269-1290.
16. Fassbender, H;. y Bornemisza, E;. 1987 Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José, Costa Rica.
17. Ferraris G.; Salvagiotti, F;. Prystupa, P;. y Gutiérrez, F;. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. Actas CD XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. AACCS.
18. Fixen, P;. y Grove, J;. 1990. Testing soils for phosphorus. Pp. 141- 180. *In*: R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. 3a. edition. SSSA Book Number 3. Madison, Wisconsin, EE.UU.
19. Fontanetto H;. 2004. Nutrición de los cultivos y manejo de la fertilidad del suelo en la región central de Santa Fe. *En*: Actas Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable (IPNI Cono Sur) Pág. 19-25.
20. García F;. 2002. Manejo de la fertilidad de suelos y fertilización de cultivos para altos rendimientos en la región pampeana argentina. *En*: www.ipni.net/lasc
21. García F;. 2007. Requerimientos nutricionales del cultivo: Respuestas a la fertilización. *In* E. Satorre (ed.). Producción de trigo. 1a. edición. AACREA. Buenos Aires, Argentina. pp. 37-42. ISBN 978-987-22576-8-2.
22. García F;. Picone, L;. y Berardo, A;. 2005. Capítulo 5: Fósforo. *En*: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Echeverría H.E. y García F.O. (Eds.). 99-121. INTA.
23. González M;. López, M;. Moreno, G;. Comese, R;. y Madero, M;. 2007. Comparación de los métodos de Bray Kurtz I y Mehlich III en la determinación

- de la disponibilidad de fósforo en suelos con fertilizaciones continuas. *Ci. Suelo* 25(1) 23-29.
24. Gutiérrez F.; Rubio, G.; y Álvarez, R.; 2005. Diagnóstico de la disponibilidad de nutrientes. *En* R. Álvarez (Coord.). Fertilización de Cultivos de Granos y Pasturas. Diagnóstico y Recomendación en la Región Pampeana. Ed. Facultad de Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina. pp. 27-36.
 25. Gutiérrez, C.; 1995. Nutrición vegetal y uso de fertilizantes. Instituto Tecnológico de Sonora, Cd. Obregón, Son. 115 p.
 26. Havlin J.; Beaton, J.; Tisdale, S. y Nelson, W.; 2005. Soil Fertility and Fertilizers. Pearson Education Inc. Upper Saddle River, New Jersey, EE.UU. 7a. edition. 515 pág.
 27. Ibáñez, R.; y Aguirre, G.; 1983 Fertilidad del suelo. Manual de prácticas. Programa Académico de Agronomía. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Ayacucho, Perú.
 28. Ibáñez, J.; 2007. La planta y sus nutrientes. CSIC. Universidad de Valencia. España. Sitio web: www.madrimasd.org. Visitado el 05/05/11.
 29. Junta de Extremadura; 1992. Interpretación de análisis de suelo, foliar y agua de riego. Consejo de abonado (Normas básicas). Editorial Mundi Prensa. Barcelona, España.
 30. Leikam D.; Lamond, R. y Mengel, D.; 2003. Soil Test Interpretations and Fertilizer Recommendations. Department of Agronomy, Kansas State University. MF-2586. Manhattan, Kansas, EE.UU. Disponible en <http://www.agronomy.ksu.edu/SOILTESTING/DesktopModules/ViewDocument.aspx?>
 31. López Ritas, J.; y López Melida, J.; 1990. El diagnóstico de suelos y plantas. Editorial Mundi Prensa. Madrid, España.
 32. López, L.; 2002. Agricultura y medio ambiente en las condiciones mediterráneas. Universidad de Córdoba. Argentina. Sitio web: www.libroblancoagricultura.com Visitado el 05/05/11.
 33. Malavolta E.; Vitti, G. y Oliveira, S.; 1997. Avaliacao do estado nutricional das plantas. POTAFOS. Associacao Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil. 2ª. Edición. 319 pag.

34. Mallarino A.; y Blackmer, A.;. 1992. Comparison of Methods for Determining Critical Concentrations of Soil Test Phosphorus for Corn. *Agron. J.* 84: 850-856.
35. Melchiori R.; Paparotti, O.; y Barbagelata, P.;. 2002. Fertilización fosfatada en soja: validación del nivel crítico. INTA EEA Paraná. En: www.parana.inta.gov.ar
36. Mortvedt, J.; Giordano, M.; and Lindsay, W.;. 1972. *Micronutrients in agriculture*. SSSA, Inc. Madison, Wis.
37. Mortvedt, J.; Cox, F.;, Shuman, L.; y Welch, R.;. 1991. *Micronutrients in Agriculture*. 2° Edition. Soil Science Society of America, Inc.
38. Navarro, S.; y Navarro, G.;. 2003. *Química Agrícola*. Editorial Mundi Prensa. 2da edición. Madrid, España.
39. Nelson, D.; Elrick, D.; Tanji, K.;. 1992. *Chemical Mobility and Reactivity in Soil Systems*. SSSA Special Publication Number 11. American Society of America, Inc.
40. Oliveira, J.; Afif, E.; y Mayor, M.;. 2006. *Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado*. Ediciones de la Universidad de Oviedo. España.
41. Palomino, R.;. 1987. Estado nutricional de algunos suelos agrícolas de las provincias de Huamanga, Cangallo, Víctor Fajardo y Vilcashuamán del departamento de Ayacucho. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga. Ayacucho, Perú.
42. Peck, T.; Cope, J.; y Whitney, D.;. 1977. *Soil Testing: Correlating and interpreting the analytical results*. ASA Spec. Pub. 29. ASA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 117 pag.
43. Peralta, E.;. 2003. Caracterización morfogénica y estado nutricional de suelos agrícolas de Chiara, Ayacucho, con énfasis en zonas paperas. Tesis para Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga. Ayacucho, Perú.
44. Personal del laboratorio de salinidad de U.S.A., 1980. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Ed. Limusa.
45. Porta, J.;. 1986. *Técnicas y experimentos en Edafología*. Col·legi Oficial d'Enginyers Agrònoms de Catalunya.
46. Ramírez, F.;. 1997. *Conceptos sobre fertilidad de suelo y fertilizantes*. Corporación Misti S.A. sitio web: www.agrobanco.com visitado el 05/05/11.

47. Ramírez, R;. 1991. El uso eficiente de los fertilizantes y el incremento de la productividad agrícola en Venezuela. Informaciones agronómicas no. 4. Quito, Ecuador.
48. Reussi, N;. y Echeverría, H;. 2009. Azufre: Marco conceptual para definir las mejores prácticas de manejo en los cultivos. *En* F. García e I. Ciampitti (ed.). Simposio Fertilidad 2009: Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. pp.52-59.
49. Rice C;. y Havlin, J;. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. *In* J. Havlin y J. Jacobsen (ed.). Soil tesying: Prospects for improving nutrient recommendations. SSSA Spec. Pub. 40. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. pp. 1-13.
50. Rodríguez, S;. 1992. Fertilizantes, nutrición vegetal. AGT editor. Segunda reimpresión. México, D.F.
51. Sims J;. 2000. Soil fertility evaluation. *En* M.E. Sumner (ed.). Handbook of Soil Science. CRC Press. Boca Raton, FL. pp. D113-D153.
52. Stevenson, F;. and Cole, M;. 1999. Cycles of Soils. John Wiley & Sons, Inc.
53. Tamhane, R;. Motiramani, D. y Bali, Y. 1983 Suelos: su química y fertilidad en zonas tropicales. Tercera reimpresión. Editorial Diana. México.
54. Teuscher, H;. y Adler, R;. 1980 El suelo y su fertilidad. Compañía editorial Continental SA. México.
55. Tisdale, S;. y Nelson, W;. 1982. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Editorial Uteha. México, DF.
56. Urbano, P;. 1989. Tratado de Fitotecnia General. Editorial Mundi Prensa. Barcelona, España.
57. Urbano, P;. 2002. Fitotecnia: ingeniería de la producción vegetal. Editorial Mundi Prensa. Barcelona, España.
58. Van Raij, B;. 1998. Bioavailable tests: alternatives to standard soil extractions. *Commun. Soil Sci. Plant Ana.* 29:1553-1570.
59. Villalbí I;. y Vidal, M;. 1988. Análisis de suelo y foliares: interpretación y fertilización. Fundación Caja de Pensiones. Madrid, España.
60. Walsh L;. y Beaton, J;. 1973. Soil Testing and Plant Analysis. Revised edition. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 491 pag.

61. Zamuner E.; Picone, L.; y Echeverría, H. 2004. Comparación de métodos de extracción de fosforo disponible Bray I sobre la respuesta de la fertilización fosfatada en trigo. *Ciencia del Suelo* 22 (2):

ANEXO

Anexo 1. Rendimiento de M.S. (gr/maceta) en los suelos y tratamientos

CIMARIVA									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	1.69	0.35	1.33	0.89	0.96	1.48	1.24	0.41	2.21
II	1.5	0.32	1.22	0.78	1.06	1.52	1.18	0.44	2.13
III	1.7	0.25	1.42	0.79	0.98	1.54	1.12	0.35	2.46
Sum.	4.89	0.92	3.97	2.46	3	4.54	3.54	1.2	6.8
Prom	1.63	0.3067	1.3233	0.8200	1.0000	1.5133	1.1800	0.4000	2.2667

HUAYRAPATA									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	0.56	0.18	1.57	1	1.76	1.47	1.77	0.19	2.66
II	0.68	0.13	1.84	0.94	1.92	1.42	1.98	0.23	2.78
III	0.75	0.16	1.67	0.78	1.84	1.63	1.86	0.17	2.7
Sum.	1.99	0.47	5.08	2.72	5.52	4.52	5.61	0.59	8.14
Prom	0.6633	0.1567	1.6933	0.9067	1.8400	1.5067	1.8700	0.1967	2.7133

ANTECCASA									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	1.7	0.3	2.33	2.14	2.42	2.96	2.53	0.41	2.44
II	1.77	0.32	2.53	2.16	2.43	2.79	2.37	0.46	2.37
III	1.59	0.33	2.52	2.07	2.17	2.89	2.44	0.53	2.65
Sum.	5.06	0.95	7.38	6.37	7.02	8.64	7.34	1.4	7.46
Prom	1.6867	0.3167	2.4600	2.1233	2.3400	2.8800	2.4467	0.4667	2.4867

HUANTACHACA									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	1.22	0.28	1.98	1.72	2.2	1.38	2.67	0.39	3.14
II	1.49	0.19	1.76	1.59	2.31	1.42	2.6	0.43	3.43
III	1.65	0.26	1.89	1.61	2.25	1.68	2.32	0.35	3.6
Sum.	4.36	0.73	5.63	4.92	6.76	4.48	7.59	1.17	10.17
Prom	1.4533	0.2433	1.8767	1.6400	2.2533	1.4933	2.5300	0.3900	3.3900

MEJORADA									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	1.18	1.04	0.86	1.44	2.48	1.97	1.03	1.16	2.7
II	1.19	1.16	0.93	1.47	2.55	1.55	1.13	1.48	2.86
III	1.25	1.18	0.91	1.53	2.37	1.67	1.19	1.38	2.77
Sum.	3.62	3.38	2.7	4.44	7.4	5.19	3.35	4.02	8.33
Prom	1.2067	1.1267	0.9000	1.4800	2.4667	1.7300	1.1167	1.3400	2.7767

LUISIANA									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	1.66	0.46	0.8	1.39	1.02	0.59	1.08	0.32	1.75
II	1.78	0.41	0.9	1.28	1.42	0.68	1.05	0.28	1.56
III	1.58	0.49	0.81	1.35	1.37	0.62	1.15	0.26	1.46
Sum.	5.02	1.36	2.51	4.02	3.81	1.89	3.28	0.86	4.77
Prom	1.6733	0.4533	0.8367	1.3400	1.2700	0.6300	1.0933	0.2867	1.5900

RINCONADA BAJA									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	1.36	0.46	1.7	2.3	2.28	2.57	2.52	0.31	3.08
II	1.47	0.44	1.47	2.97	2.74	2.32	2.34	0.37	2.92
III	1.56	0.39	1.66	2.77	2.77	2.04	2.38	0.42	3.02
Sum.	4.39	1.29	4.83	8.04	7.79	6.93	7.24	1.1	9.02
Prom	1.4633	0.4300	1.6100	2.6800	2.5967	2.3100	2.4133	0.3667	3.0067

LA VICTORIA									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	1.5	0.57	2.63	2.54	2.55	1.93	1.72	0.47	2.11
II	1.42	0.46	2.68	2.7	2.44	1.87	1.83	0.24	2.38
III	1.71	0.52	2.81	2.84	2.22	2.08	1.64	0.21	2.69
Sum.	4.63	1.55	8.12	8.08	7.21	5.88	5.19	0.92	7.18
Prom	1.5433	0.5167	2.7067	2.6933	2.4033	1.9600	1.7300	0.3067	2.3933

SAN CRISTOBAL									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	0.65	0.26	0.64	1.01	0.34	0.46	0.48	0.24	1.17
II	0.48	0.29	0.82	1.44	0.29	0.6	0.56	0.18	1.24
III	0.53	0.23	0.73	1.15	0.36	0.58	0.47	0.25	1.14
Sum.	1.66	0.78	2.19	3.6	0.99	1.64	1.51	0.67	3.55
Prom	0.5533	0.2600	0.7300	1.2000	0.3300	0.5467	0.5033	0.2233	1.1833

SAN PEDRO									
	Tratamientos								
Rep.	sin N	sin P	sin K	sin S	sin Ca	sin Mg	sin ME	T	C
I	0.81	0.2	0.41	0.72	0.49	0.89	0.21	0.23	1.39
II	0.64	0.37	0.56	0.67	0.36	0.74	0.26	0.17	1.43
III	0.73	0.26	0.48	0.55	0.55	0.96	0.19	0.18	1.35
Sum.	2.18	0.83	1.45	1.94	1.4	2.59	0.66	0.58	4.17
Prom	0.7267	0.2767	0.4833	0.6467	0.4667	0.8633	0.2200	0.1933	1.3900

Anexo 02

Fotografías del experimento del elemento faltante



Fotografía N° 1. Lugares de muestreo de suelos en el distrito de Santa Rosa Vraem.



Fotografía N° 2. Lugares de muestreo de suelos en el distrito de Santa Rosa Vraem.



Fotografía N° 3. Muestreo y recolección de muestras de la parte baja del distrito de Santa Rosa Vraem. (cultivo de cacao).



Fotografía N° 4. Muestreo y recolección de muestras de la parte media del distrito de Santa Rosa. (cultivo de café).



Fotografía N° 5. Muestreo y recolección de muestras de la parte media y alta del distrito de Santa Rosa Vraem. (cultivo de café).



Fotografía N° 6. Muestras de los suelos en el invernadero del Programa de Pastos.



Fotografía N° 7. Secado y tamizado de las muestras.



Fotografía N° 8. Almacigo de tomate (muestra biológica).



Fotografía N° 9. Pesado de muestras.



Fotografía N° 10. Muestras de suelos pesadas, preparadas itequetadas.



Fotografía N° 11. Muestras de suelos pesadas, preparadas y itequetadas.



Fotografía N° 12. Macetas lavadas con capacidad de 2 kg.



Fotografía N° 13. Llenado de macetas con capacidad de 2 kg. de suelo.



Fotografía N° 14. Macetas listos para el trasplante del tomate.



Fotografía N° 15. Macetas listos para el trasplante del tomate.



Fotografía N° 16. Plántulas de tomate trasplantados en los maceteros de acuerdo al diseño de los tratamientos del elemento faltante.



Fotografía N° 17. Plántulas de tomate trasplantados en los maceteros de acuerdo al diseño de los tratamientos del elemento faltante.



Fotografía N° 18. Plántulas de tomate trasplantados en los maceteros según los tratamientos del elemento faltante.



Fotografía N° 19. Riego próximo a capacidad de campo de las plántulas de tomate.



Fotografía N° 20. Desarrollo de las plántulas de tomate en bloques y repeticiones.



Fotografía N° 21. Tratamientos del elemento faltante.



Fotografía N° 22. Tratamiento completo del elemento faltante.