

## I. INTRODUCCION

El suelo cumple funciones de suma importancia en la vida de todos los seres vivos por ser fuente de alimentos, fibra, recreación, amortiguador de residuos de otras actividades y estar involucrado en la purificación del agua y aire (Bovarnick et al. 2010) que explica el por qué ocho de nueve problemas ambientales que ponen en riesgo el futuro de la civilización, conciernen directamente a los suelos. Sin embargo, aun cuando el suelo es fundamental para la actividad agrícola, la seguridad alimentaria y medio de vida, es gravemente afectada por los procesos de degradación que altera la estabilidad de los ecosistemas convirtiéndose en una seria amenaza para el futuro, razón por la cual la agricultura actual enfrenta el reto de aumentar la producción y al mismo tiempo, preservar los recursos naturales, en procura de cumplir con los objetivos principales del desarrollo sostenible.

En este contexto, el uso sostenible de las tierras es vital para la conservación de las propiedades edáficas, por su importancia agronómica, económica y ambiental, pues su alteración puede afectar no solo la parte productiva de los cultivos, sino a todo el sistema, por su influencia en la transformación y distribución de la materia orgánica, la dinámica de nutrientes, el almacenamiento del agua, la agregación, porosidad, infiltración, erosión, biodiversidad etc. Por ello la FAO (1995) refiere que es esencial un manejo flexible y adaptable a cada sistema, que permita monitorear tanto la calidad como la cantidad de los recursos naturales involucrados.

La disminución de calidad de los suelos en el mundo, es creciente, siendo diversa la causa, como alteraciones de la estructura, compactación, reducción del nivel de materia orgánica, pérdida de suelos por erosión, reemplazo paulatino de áreas pastoriles y forestales en áreas netamente agrícolas o el agotamiento de su fertilidad. En el Perú, según el INRENA (2009) el 33.5% de los suelos se encuentran degradados, sobre todo en la zona altoandina, debido a su fisiografía compleja, laderas de fuertes pendientes y tierras con manifestaciones de

sobre pastoreo y baja fertilidad. Ante esta realidad, es necesario adecuada gestión del subsistema suelo, que permita obtener productos de calidad, estables y sostenibles (Altieri, 1999) para lo cual se han propuesto numerosas estrategias con el objetivo de conservar la calidad y salud del suelo, entre las cuales evitar la erosión, causada principalmente por el agua, adecuada gestión de los ciclos de las cosechas, uso de sistemas de labranza de conservación, bacterias fijadoras de nitrógeno e impulsar una diversa biota edáfica mediante la incorporación de residuos orgánicos entre ellos el estiércol -que dependiendo de su estado de transformación- favorece la conservación, estabilidad y fertilidad del mismo por su influencia sobre las diversas propiedades del suelo (Magdoff et al., 2004) permitiendo preservar la sostenibilidad del sistema o simplemente contribuir con la capacidad de resiliencia del suelo (Magdoff et al., 2009). Este abono orgánico incorporado a suelos ácidos de clase textural fina tendrá diversos efectos si se asocia con una enmienda como la dolomita. La acción de ambos afecta las propiedades edáficas -indicadoras de calidad- quienes interactúan entre sí, generando interdependencias interviniendo en el crecimiento y desarrollo de las plantas, cuya salud está estrechamente vinculada a la calidad del suelo (Altieri y Nicholls, 2003). Por lo tanto, la evaluación de su desempeño implica cuantificar indicadores de calidad del suelo; que deben reflejar las principales restricciones, en congruencia con la función o funciones principales que se evalúan (Astier et al., 2002). En el caso agrícola, se trata de atributos edáficos (físicos, químicos y biológicos) sensibles al manejo, útiles de evaluación y seguimiento.

Con estas consideraciones se ejecutó el presente trabajo de investigación planteando los siguientes objetivos:

- 1° Evaluar el efecto de niveles de estiércol y dolomita en la calidad del suelo.
- 2° Evaluar el efecto de niveles de estiércol y dolomita en la salud de la asociación de pasturas (*Trifolium pratense* – *Lolium perenne*).
- 3° Determinar los niveles de estiércol y dolomita, de mejor efecto en la calidad del suelo y salud de la asociación de pasturas.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 DESARROLLO SOSTENIBLE

El término desarrollo sostenible, perdurable o sustentable da idea de conciliar desarrollo económico y conservación de los ecosistemas naturales; enunciado en numerosos informes y de diferente forma desde los años 70. Sin embargo la expresión de mayor éxito de aceptación fue dada en 1987 por la Comisión de Medio Ambiente de Naciones Unidas en el informe “Nuestro Futuro Común” también conocido como “Informe Brundtland” que fuera asumida en el principio 3 de la Declaración de Río en 1992: “Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades”. No obstante tras éste informe el concepto de desarrollo sostenible fue redefiniéndose de manera que distintos organismos fueron expresando su propia definición, así La Unión Mundial de la Conservación (Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas y Fondo Mundial de la Naturaleza, 1991) lo define en éstos términos: “El desarrollo sostenible implica la mejora de la calidad de vida dentro de los límites de los ecosistemas”. El Consejo Internacional de Iniciativas Ambientales Locales en 1994, lo define “Aquel que ofrece servicios ambientales, sociales y económicos básicos a todos los miembros de una comunidad sin poner en peligro la viabilidad de los sistemas naturales, construidos y sociales de los que depende la oferta de servicios”.

En cualquier caso, las definiciones propuestas, tratan de conceptos ligados principalmente a la reflexión económica y ecológica, realmente lo que motivó su aparición fue la necesidad de un mejor conocimiento del grado de incidencia del desarrollo económico sobre el medio natural y social, con la finalidad de reencausarla de manera que se haga social y ecológicamente sostenible.

Por ello Hunnemeyer et al. (1997) afirman que el ámbito del desarrollo sostenible se sustenta en tres pilares fundamentales: el aspecto medio ambiental (sustentabilidad), el económico (satisfacción de necesidades, eficiencia y deseos humanos), y social (justicia distributiva y calidad de vida). Los autores enfatizan que la sostenibilidad ambiental se refiere a las características fundamentales para la supervivencia que deben mantener los ecosistemas a través del tiempo en cuanto a componentes e interacciones. La económica, implica producir con una rentabilidad razonable y estable en el tiempo, que haga atractivo continuar con dicho manejo y la última la sostenibilidad social, aspira a que esta forma de manejo permita a la organización social un grado aceptable de satisfacer sus necesidades. Sucede que estos tres componentes pueden y suelen estar en conflicto siempre y, especialmente en la situación actual. Sin embargo se entiende que desarrollo sostenible, implica cambio de modelo, consistente en reconstruir sistemas humanos que enlacen armoniosamente en los sistemas naturales, en integrar los sistemas humanos dentro de los sistemas naturales. Para ello es preciso conocer los principios de la organización y funcionamiento de los ecosistemas naturales y adaptar el sistema social a dichos principios. Debido a que la naturaleza proporciona el modelo de una economía sustentable y productiva. Se trata de una economía cíclica, renovable, auto productiva, sin residuos y sustentado en la energía solar o energías renovables.

Si bien el desarrollo agrícola sostenible abarca los tres pilares, sin embargo no parece posible optimizar simultáneamente cada uno de los tres componentes anteriores, lo conveniente es definir ciertos límites aceptables para cada uno de ellos e ir optimizando uno procurando que la intensidad de los otros dos se ubique en los límites aceptables para ese momento y condición particular. Se espera que en el transcurso del tiempo los tres objetivos deben ir aproximándose a los óptimos ideales para cada uno de los tres componentes (Bautista et al., 2004). Entonces en cada momento histórico o una situación en particular tendría que buscarse un equilibrio entre los tres objetivos del desarrollo sostenible.

## 2.2 PRINCIPIOS DE SOSTENIBILIDAD

Se dan cuenta de siete principios básicos a considerar para el logro del desarrollo sostenible:

- a. Respetar los límites de regeneración y absorción de los ecosistemas naturales. En un planeta finito, el ritmo de crecimiento ilimitado de la población y del consumo de los recursos es inviable, más aún si el modelo de producción y consumo que se expande es el de los denominados países desarrollados.
- b. Vivir de las fuentes de energía renovables: la solar y las fuentes de energía endógenas que no contaminan. La reducción de las energías no renovables y sus consecuencias medioambientales y sociales son ya evidentes. Se necesita un sistema energético basado en energías renovables. Los depósitos de energías fósiles deberían considerarse como una red de seguridad mientras se realiza la transición.
- c. Producir y consumir cerrando los ciclos de materiales: residuo cero de la materia prima. Todos los productos de la economía deberían ser nutrientes biológicos (biodegradabilidad y atoxicidad) del metabolismo biológico o nutrientes industriales de la producción industrial.
- d. Reducir el transporte horizontal de materias primas a larga distancia. El desarrollo sostenible es fundamentalmente producción endógena y de proximidad. Esta proximidad ha de referirse también a la construcción de ciudades compactas, frente a las actuales conurbaciones dispersas en sus funciones.
- e. Evitar los productos xenobioticos: impedir la introducción de productos artificiales y extraños a los sistemas naturales, por ejemplo los organismos modificados genéticamente.
- f. Respetar y estimular la biodiversidad natural, también respetando las singularidades regionales, culturales, materiales y ecológicas. La enorme variedad de genes, organismos y ecosistemas es una característica básica de la vida en el planeta y una garantía de seguridad para la humanidad.
- g. Reducción de la desigualdad en el uso de los recursos a escala global y eliminación de las relaciones de dependencia entre el norte y el sur, que producen pobreza,

desnutrición e imposibilidad de desarrollo humano, afectando a la mayoría de la población mundial actual.

- h. Aumentar la ecoeficiencia: se ha de promover la mejora de la eficiencia en la producción y consumo final de los recursos. Es necesario priorizar la tecnología que aumente la productividad de los recursos, es decir, el volumen del valor extraído por unidad de recurso, en detrimento de la tecnología que incrementa la cantidad extraída de recursos como tal (Garrido, 2009).

### **2.3 FUNCIONES DEL SUELO EN EL ECOSISTEMA**

El suelo es una parte integral del ecosistema; por lo tanto, se encuentra formando complejas y múltiples interrelaciones e interdependencias que se producen entre el suelo, la vegetación y otros factores ambientales (López, 2005). Los suelos poseen seis roles: 1) soporta el crecimiento de plantas tanto otorgando el medio para el crecimiento radicular y suministrando elementos nutritivos que son esenciales para el total de la planta. Las propiedades de los suelos frecuentemente determinan la naturaleza de la vegetación presente e indirectamente el número y tipo de animales (incluida la gente) que la vegetación puede soportar. 2) las propiedades del suelo son los principales factores que controlan el destino del agua en el sistema hidrológico. La pérdida de agua, uso, la contaminación y purificación, son todos afectados por el suelo. 3) el suelo es un sistema reciclador natural; en el suelo los productos de desechos y cuerpos muertos de plantas y animales son asimilados y transformados para luego estos componentes elementales se hacen disponibles para las próximas generaciones de vida. 4) los suelos son habitad para innumerables organismos vivientes, desde pequeños mamíferos y reptiles a diminutos insectos o células microscópicas de inimaginable número y diversidad, 5) los suelos influyen marcadamente la composición y condición física de la atmósfera tomando y desprendiendo grandes cantidades de dióxido de carbono, oxígeno, metano y otros gases y por contribuir con polvo y devolver energía calórica, finalmente 6) el ecosistema de edificios humanos, los suelos juegan un rol importante como un medio de ingeniería. Los suelos no solo son una fuente importante de materiales de construcción en la tierra, de relleno y ladrillo, sino provee el cimiento para virtualmente construir las vías, aeropuertos y nuestras casas (Brady y Weil, 2008).

Doran y Parkin (1994); Karlen et al. (1997) consideran que las funciones del suelo se resumen en: 1) promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); 2) atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); 3) favorecer la salud de las plantas, animales y humanos. Siendo hoy estas funciones, los componentes principales de la calidad del suelo. Por lo tanto al desarrollar estos componentes se considera que el suelo es el substrato básico para las plantas; capta, retiene y emite agua; y es un filtro ambiental efectivo (Buol, 1995).

## **2.4 PRINCIPALES PROBLEMAS DE MANEJO DEL SUELO**

Manejar las tierras significa muchas acciones de parte del hombre, todas ellas antiguamente, estuvieron relacionadas con actividades orientadas al incremento de la producción o la mejora o cambio de alguna característica en particular. Actualmente con la necesidad de evitar pérdidas de los recursos naturales y teniendo presente el criterio de sostenibilidad de acuerdo a la FAO (2001) las mayores preocupaciones son:

- declinación de la calidad de la tierra como ambiente para las raíces;
- erosión y pérdida de la capa superior de la tierra por el viento y el agua;
- pérdida de la cubierta vegetal, incluyendo las especies leñosas perennes;
- acidificación, declinación de la fertilidad del suelo y agotamiento de los nutrimentos de las plantas;
- salinidad y salinización, especialmente en los sistemas irrigados.

En tanto que muchos de estos procesos se producen en forma natural, sus impactos son agravados por sistemas inapropiados de manejo y por presiones inducidas por el hombre. Teniendo como efecto la reducción del potencial productivo de la tierra así como de su capacidad para servir como un filtro natural o amortiguador resiliente para otros usos de la tierra.

## 2.5 CALIDAD Y SALUD DE LOS SUELOS

La comunidad científica reconoció inicialmente que la calidad del aire y el agua estuvieron siendo degradadas por la actividad del hombre. En el caso del suelo, su aceptación es reciente probablemente debido a la elevada capacidad de amortiguación del suelo (Ochoa et al., 2007). De este modo, en la última década, se ha empezado a acuñar el concepto de calidad del suelo, siempre en relación a su productividad potencial, fertilidad, sostenibilidad y calidad ambiental. Paralelamente, la calidad del suelo es un instrumento que sirve para comprender la utilidad y salud de este recurso (Bautista et al., 2004).

El término calidad del suelo se empezó a acordonar al reconocer las funciones del suelo (productividad biológica, calidad ambiental y salud de los seres vivos) (Doran y Parkin, 1994; Karlen et al., 1997). Por lo tanto este concepto refleja la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema del cual forma parte y con el que interactúa (Parr et al., 1992). En razón a ello que David W. Nelson (1992) Presidente de la Soil Science Society of América Ad Hoc Comité on Soil Health, propuso que al definir calidad del suelo se considere: a) su capacidad de ser un elemento fundamental de los ecosistemas, b) ser medio para el desarrollo de las plantas y animales, c) mantener y aumentar la calidad del aire y el agua. De este modo una definición ampliamente aceptada es la de Doran y Parkin (1994) quienes se refieren como “la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites ecológicos, para sostener la productividad biológica, manteniendo la calidad ambiental, y promoviendo la salud de la flora y la fauna”. Respecto a esta última definición se han considerado algunos aspectos adicionales al que Karlen et al. (1997) hacen referencia indicando que el Comité de la Sociedad de la Ciencia del Suelo Americana, define la calidad del suelo como “la capacidad funcional de un tipo específico de suelo, para sustentar la productividad animal o vegetal, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y sostener el asentamiento y salud humanos, con límites ecosistémicos naturales o determinados por el manejo”.

Los términos calidad del suelo y salud del suelo según diferentes investigadores se emplean indistintamente, de este modo Acton y Gregorich (1995) refieren que es necesario una definición de salud del suelo y que vaya más allá de la productividad y se encuentre



conectado con el medio ambiente; entonces se define salud del suelo para la agricultura, como “la aptitud del suelo para apoyar el crecimiento de los cultivos sin degradación del suelo y el medio ambiente”; en tal sentido ambos términos se pueden usar indistintamente. Sin embargo para Doran y Parkin (1994) la calidad y salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerado sinónimos. Así según Carter et al. (1997) calidad se interpreta como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo. En tanto el estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos o productos microbianos en un tiempo particular constituye la salud del suelo (Romig et al., 1995). Finalmente Brady y Weil (2008) manifiestan que calidad y salud del suelo son términos empleados frecuentemente como sinónimos, pero actualmente involucran dos conceptos distintos. La salud del suelo se refiere a la autorregulación, estabilidad, resiliencia y carencia de síntomas de estrés en un suelo como en el ecosistema. La salud del suelo, describe entonces la integridad biológica de la comunidad del suelo, el balance entre organismos al interior del suelo y entre organismos en su medio ambiente. La calidad del suelo, en términos muy aplicados al suelo como componente de un gran ecosistema. Describe las propiedades que tiene el suelo apto para funcionar y cumplir en soportar los seis amplios roles, mencionados en el ítem 2.3. De este modo un suelo de alta calidad, dependerá de la función para la cual se considere.

## **2.6 IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DEL SUELO**

La obtención de fibra y diversos alimentos, el habitat para animales y el mismo hombre, el medio que permite reciclar desechos a su vez purificar el agua y mantener la calidad del aire, es el suelo; en resumen el suelo es el medio en el cual se desarrolla y depende la vida; pues todos necesitamos agua, aire limpios para mantenerse sano. Sin embargo hasta ahora muchos no se dan cuenta aún, de que su bienestar depende del bienestar de este otro componente de nuestro medio ambiente.

Actualmente se pone interés en la degradación del suelo, no obstante esto aún es tangencial pues se considera algún aspecto en particular por ejemplo erosión, salinización, compactación, etc. Sin embargo es necesario considerar integralmente a todas sus

características, teniendo en cuenta el concepto de calidad, engloba a todas las características del suelo para cumplir una función específica, y en lo que a nosotros respecta, está relacionada con la productividad, asimilación y reciclaje de materiales de desecho y protección del medio ambiente y calidad del agua y aire.

Por lo tanto la calidad del suelo es un asunto de suma importancia en la vida, salud y bienestar de los seres vivos sobre la tierra; por ello las actividades que se desarrollen en ella deberán ser tendientes a preservar sus componentes más deseables en óptimas condiciones de manejo permanente; es decir un tipo de agricultura amigable con el entorno, sostenible para futuras generaciones a través de prácticas que mantengan y/o mejoren sus propiedades.

## **2.7 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO**

La calidad intrínseca o natural del suelo está determinado por los materiales geológicos y los procesos de formación del suelo (meteorización) que se combinan para producirlo (Acton y Gregorich, 1995). Sin embargo estas características naturales pueden ser cambiadas por las actividades del hombre como uso y prácticas agrícolas que en él se produce.

De manera similar la calidad inherente del suelo puede disminuir debido a la erosión, pérdida de materia orgánica, compactación, desertificación y otros procesos de degradación. También en este mismo razonamiento la calidad del suelo puede mantenerse y/o ser mejorado, mediante diferentes practicas denominadas por ejemplo conservacionistas.

En suma, al referirnos a la calidad del suelo, aceptamos que se trata de un panorama compuesto de la situación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas y de los procesos que interactúan para determinar esa calidad, por lo tanto los suelos además de

presentarnos diferentes calidades, muestran diferente salud. De manera que no existen formas únicas de evaluar dichas calidades; las mismas que tampoco se pueden medir directamente, solamente se trata de inferir o estimar mediante evaluaciones de cada una de sus propiedades específicas, las que serán consideradas de acuerdo al uso o actividad agrícola. Finalmente como no existe un único formato en cada lugar o suelo, de acuerdo al objetivo se tiene que considerar un conjunto de parámetros a fin de estimar la calidad y salud del suelo. Inclusive en este proceso, se puede lograr diferenciar grupos de evaluaciones o simplemente de acuerdo al uso, tiempo o poniendo énfasis en el objetivo, en grupos de evaluación tales como las referentes a la calidad física, química y biológica, las cuales entraremos a detallar más adelante. No obstante, los autores consideramos que para capturar la naturaleza holística de la calidad y salud del suelo, las evaluaciones deben ser realizadas a través de sus tres grandes propiedades físicas, químicas y biológicas puesto que es la interacción de ellas, que permiten el adecuado funcionamiento del subsistema suelo.

De otro lado, no todos los parámetros tienen la misma relevancia para todos los suelos o situaciones. De manera que se seleccionaran un grupo mínimo de propiedades del suelo o indicadores de cada uno de sus componentes (físicos, químicos y biológicos) sobre la base de su aptitud e indicar la capacidad del suelo para funcionar en usos y climas determinados (Luters y Salazar, 2000). Además debido al carácter dinámico de la calidad del suelo, esta puede cambiar en el corto o largo plazo de acuerdo al uso y las prácticas de manejo; por lo tanto, es necesario monitorear los cambios del suelo de manera que se pueda determinar que prácticas son sustentables.

## **2.8 INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO**

Durante las dos últimas décadas, en el ámbito de la Ecología del Suelo una de las prioridades fue buscar indicadores que midan la calidad del suelo (Ochoa et al., 2007). Lo dificultoso de esta tarea radica en que el suelo es una entidad dinámica con multitud de procesos biológicos y geoquímicos que muestran una elevada heterogeneidad espacial y temporal, y con mecanismos de control que cambian según la escala espacio-temporal. Por ello Bandick y Dick (1999) refieren que el suelo no tiene estándares de calidad definidos a

diferencia del aire y el agua, debido a su variabilidad, por lo que casi es imposible establecer una simple medida física, química o biológica que la refleje adecuadamente. Consideran que se debe tener en cuenta, además, otros factores que afectan a su funcionamiento, hecho que dificulta medir y regular la calidad del suelo.

Dalurzo et al. (2002) y Bautista et al. (2004) están de acuerdo en que la calidad del suelo se puede evaluar empleando indicadores que reflejen los cambios en la capacidad del suelo y en su función. De manera que los indicadores son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos (Adriaanse, 1993).

De acuerdo a Doran y Parkin (1994) los indicadores directos frecuentemente empleados corresponden a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; luego para que ellas puedan ser consideradas como indicadores, deben cumplir con las siguientes condiciones:

- a) Describir los procesos del ecosistema
- b) Integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo;
- c) Reflejar atributos de sostenibilidad que se quieren medir;
- d) Ser sensitivas a variaciones de clima y manejo;
- e) Ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo;
- f) Ser reproducible;
- g) Ser fáciles de entender;
- h) Ser sensitivas a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica;
- i) Cuando sea posible ser componente de una base de datos del suelo ya existente.

Finalmente, de acuerdo a Hunnemeyer et al. (1997) los indicadores de la calidad del suelo deberían permitir:

- a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible,
- b) analizar los posibles impactos antes de una intervención,
- c) monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas, y
- d) ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

Debido a la existencia de muchas propiedades alternativas Larson y Pierce (1991); Doran y Parkin (1994) y Seybold et al. (1997) plantearon un grupo mínimo de propiedades del suelo para ser usadas como indicadores y evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo (Cuadros 1.1, 1.2 y 1.3). Entre los indicadores se considera a la profundidad de horizontes, textura, densidad aparente, tasa de infiltración, estabilidad de agregados y capacidad de retención de agua, pH, CIC, MO, P disponible, Ca, Mg, K; respiración y biomasa microbiana; rendimiento de materia seca, número de nódulos, etc. Estos permiten realizar un diagnóstico certero, basado en conocimiento científico.

**Cuadro 1.1: Indicadores físicos de la calidad del suelo, relación entre la propiedad y las funciones**

<b>INDICADORES FÍSICOS DE LA CALIDAD DEL SUELO</b>		
<b>Indicador</b>	<b>Relación con las funciones y condiciones del suelo</b>	<b>Valores o unidades relevantes, comparaciones para evaluación</b>
Textura	Retención y transporte de agua y minerales; erosión del suelo	% (arena, limo y arcilla); pérdida de sitio o posición del paisaje
Profundidad (suelo superficial y raíces)	Estimación del potencial productivo y de erosión	cm; m
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lixiviación, productividad y erosión	min/2,5cm agua; g/cm <sup>3</sup>
Capacidad de retención de agua	Contenido en humedad, transporte, erosión, humedad aprovechable, textura, materia orgánica	% (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ); cm humedad aprovechable/30cm; intensidad de precipitación (mm/h)
Estabilidad de agregados	Erosión potencial de un suelo, infiltración de agua	% (agregados estables)

**FUENTE:** Larson y Pierce (1991); Doran y Parkin (1994) y Seybold et al. (1997).

### 2.8.1 INDICADORES FISICOS

Se trata de propiedades del suelo que no se puede modificar fácilmente (Singer y Ewin 2000). Están relacionados a parámetros como la resistencia mecánica, la transmisión y el almacenaje de fluidos en la zona de exploración de las raíces. Una estimación indirecta de la capacidad de almacenar agua y aire en la zona de exploración de las raíces es a través de la estabilidad de la estructura, debido a que este parámetro gobierna tantos aspectos

relacionados con la compactación como con los vinculados con el almacenaje y movimiento de agua y aire (Reynolds et al., 2002; Dexter, 2004) además de la susceptibilidad a la erosión hídrica, manejo de labranzas y el contenido de materia orgánica (Martínez et al., 2008).

Según Chen (2000) se debe incluir además a la textura, pues se encuentra relacionada con la porosidad, infiltración y disponibilidad de agua. Bautista et al. (2004) afirman que las propiedades físicas más útiles como indicadores de la calidad del suelo son las relacionadas con el arreglo de las partículas, los poros y la estabilidad de agregados, pues estos reflejan la forma en que el suelo capta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que presenta a la emergencia de plántulas y crecimiento de raíces. La variedad de indicadores es amplia, sin embargo éstas varían de acuerdo a las características predominantes del lugar y con el manejo (Doran y Parkin, 1994).

## **2.8.2 INDICADORES QUÍMICOS**

Los indicadores químicos se refieren a todas aquellas propiedades del suelo que afectan a las relaciones suelo-planta, capacidad tampón o amortiguadora del suelo, calidad del agua, disponibilidad de nutrientes y agua para plantas y microorganismos. Los indicadores propuestos por Doran y Parkin (1994) reflejan estándares de fertilidad, que son factores importantes en términos de producción de cultivos. Sin embargo cuando se trata de polución otros son los indicadores que toman importancia, tales como Cu, Zn, Cd y Pb (Chen, 2000).

**Cuadro 1.2: Indicadores químicos de la calidad del suelo, relación entre la propiedad y las funciones**

<b>INDICADORES QUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL SUELO</b>		
<b>Indicador</b>	<b>Relación con las funciones y condiciones del suelo</b>	<b>Valores o unidades relevantes</b>
Contenido en materia orgánica	Fertilidad de suelo, estabilidad y grado de erosión, potencial productivo	kg (C ó N)/ha
pH	Actividad química y biológica	Comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
Conductividad eléctrica	Actividad microbiológica y crecimiento de plantas	dS/m; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
N, P, K extraíbles	Disponibilidad de nutrientes para las plantas, indicadores de productividad y calidad ambiental	kg/ha; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
Capacidad de intercambio catiónico	Fertilidad del suelo, potencial productivo	mol/kg

**FUENTE:** Larson y Pierce (1991); Doran y Parkin (1994) y Seybold et al. (1997).

### **2.8.3 INDICADORES BIOLÓGICOS**

Las propiedades biológicas del suelo son indicadores de estrés y son idóneas para su uso en los diferentes programas de evaluación y monitorización de la calidad del suelo (Dick, 1999). Generalmente se refieren a la abundancia y subproductos de los organismos, incluidas bacterias, hongos, nematodos, lombrices, anélidos y artrópodos (Bautista et al.,



2004). Chen (2000) incluye al rendimiento del cultivo como indicador, así como el equilibrio nutritivo de éstos.

**Cuadro 1.3: Indicadores biológicos de la calidad del suelo, relación entre la propiedad y las funciones**

<b>INDICADORES BIOLÓGICOS DE LA CALIDAD DEL SUELO</b>		
<b>Indicador</b>	<b>Relación con las funciones y condiciones del suelo</b>	<b>Valores o unidades relevantes</b>
Contenido de biomasa microbiana	Potencial catalizador microbiano, reposición de C y N	kg (C ó N)/ha relativo al C, N total o al CO <sub>2</sub> producido
Aireación, contenido en agua, temperatura	Medición de la actividad microbiológica	kg C·ha <sup>-1</sup> ·día <sup>-1</sup> relativo a la actividad de la biomasa microbiana; pérdida de C contra entradas al reservorio total de C
Contenido de lombrices	Actividad microbiana	Número de lombrices
Rendimiento del cultivo	Producción potencial del cultivo, disponibilidad de nutrientes	kg producto/ha

**FUENTE:** Larson y Pierce (1991); Doran y Parkin (1994) y Seybold et al. (1997).

Las propiedades biológicas, tienen la particularidad de ser dinámicas, tienen la ventaja entonces de ofrecer señales tempranas de degradación o mejoría de los suelos. Entre éstas se incluyen a las propiedades bioquímicas (respiración edáfica, biomasa microbiana, actividades enzimáticas, microorganismos y otros) como las más sensibles y valiosas (Bandick y Dick, 1999).

Por todo lo antes mencionado, no existe un enfoque único para generar un conjunto de indicadores, ellos deberán ser elegidos de acuerdo al propósito. Estos podrían cambiar en la medida que se vayan descubriendo nuevos aspectos, así como con la evolución de los valores sociales.

## **2.9 CALIFICATIVOS INHERENTES A LA CALIDAD DEL SUELO**

Los calificativos que se mencionan a continuación son inherentes a la calidad del suelo pues determinan la capacidad del suelo para producir, debido a que cada suelo es un organismo individual de la naturaleza, posee su propio carácter, historia de vida y competencia para permitir el crecimiento y desarrollo de plantas y animales, así como su capacidad resiliente.

**a. Porosidad del suelo**, la cantidad y tamaño del espacio poroso en el suelo, así como la proporción macroporos: microporos, determinan la infiltración, drenaje del exceso de humedad y proporciona aire a las raíces de las plantas, la cantidad de agua almacenada y cuanto de ella pone a disposición para las plantas. La porosidad del suelo es dependiente de los agregados, la estabilidad de éstos, el contenido de materia orgánica, tipo de cultivo y manejo en el proceso de labranza, etc. Hoogmoed (1999) citado por Dimanche y Hoogmoed (2002). De acuerdo a Dexter (1988) un suelo desagregado tiene menor volumen de poros y menor cantidad de macroporos comparado con un suelo bien agregado. Por su parte Márquez et al. (2004) concuerda que el suelo bien agregado ofrece mayor diversidad de tamaños de poros y por lo tanto de hábitats físicos, y provee mayor cantidad de macroporos insaturados y microporos situados a poca distancia de los insaturados.

Hernández et al. (2000) tuvo menor porcentaje de macroagregados estables en el suelo de manejo convencional (cuatro pases de grada de disco cada año). Gómez et al. (1999) refieren que la compactación, particularmente por debajo de los 10 – 15 cm, tiene efecto asociado con la aireación limitada y la inundación resultante del deterioro estructural que restringe la dimensión, la continuidad y el volumen de la porosidad.

La permeabilidad del suelo disminuye con el uso de arados de disco (177.6 mm/h) y azadas rotativas (179.1 mm/h) mientras que con siembra directa es 182.7 mm/h (Araujo et al. 2002). Según Uribe y Rouanet (2002) los sistemas de labranza conservacionista tienen ventajas sobre los convencionales especialmente si se dejan residuos post cosecha, principalmente en zonas de baja precipitación; los que están relacionados a la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil del suelo.

**b. Retención de nutrientes**, la mayoría de las plantas se alimentan con nutrientes del estrato superficial del suelo. La capacidad del suelo para captar y suministrar nutrientes depende de la capacidad de intercambio de cationes. Esta propiedad es a su vez controlada por la cantidad y tipo de arcilla y por la materia orgánica del suelo.

Este elemento también indica el grado en que fertilizantes y plaguicidas u otros agentes permanecen cuando llegan al suelo; igualmente indican qué tan bien en el suelo se conserva y se degradan los materiales de desecho, como compost, estiércoles, etc.

García de Cortázar et al. (2003) en Chile, encuentra que la quema de rastrojos, no sólo genera contaminación ambiental, riesgo de incendio y erosión; sino también pérdida de nutrientes. La cubierta orgánica facilita la infiltración y conservación del agua y es fuente de liberación de nutrientes además de disminuir la erosión hídrica y eólica.

La retención de nutrientes se ve fuertemente alterada con el aporte de alguna fuente orgánica y en el tiempo éste resulta siendo más estable, y al convertirse en una sustancia de alto peso molecular actúa como coloide y otorga al suelo la característica valiosa: capacidad de poder intercambiar sus cationes (CIC).

**c. Condiciones físicas y biofísicas**, existe una gama limitada de condiciones del suelo en los cuales los cultivos suelen ser más productivos. Las condiciones ideales de

enraizamiento físico, pasan por una estructura que proporciona agua y aire óptimo para la planta; así como una firmeza suficiente del suelo para las plantas y el manejo del tráfico de manera que no se obstaculice el desarrollo y penetración de la raíz al suelo. Son importantes la profundidad del suelo, la textura; las costras superficiales y subsuperficiales, densidad aparente y principalmente la estabilidad de los agregados, los que son dependientes a su vez de la materia orgánica, la actividad microbiana, raíces en el suelo, entre otros.

Wan y El-Swaity (1999) encontraron diferencias significativas en la densidad aparente del suelo con mulch y sin ésta; demostrando el cambio en la densidad del suelo compactado y sellado que fuera expuesto al impacto de las gotas de lluvia.

Según Arvidsson (1998) que coincide con Quiroga et al. (1999) el contenido de materia orgánica influye no sólo en la distribución del tamaño de partículas del suelo y el rendimiento de cosechas. La materia orgánica disminuye la densidad y el grado de compactación, aumenta la porosidad por ende el contenido de aire del suelo, luego de la compactación. La porosidad y retención de agua son dos parámetros que se encuentran estrechamente vinculados ya que la capacidad de retención de agua en el suelo es dependiente del número de poros, la distribución del tamaño de poros y de la superficie específica de cada suelo Krull et al. (2004). Así Pikul y Allmaras (1986) encontraron que al agregar materia orgánica al suelo, aumentan los poros de mayor diámetro, que retienen el agua con menor energía. Reddy (1991) descubrió que la materia orgánica del suelo disminuye la densidad aparente, pero a la vez tiende a disminuir la densidad real, por lo que el efecto en la porosidad total es difícil de predecir. De otro lado Lampurlanés et al. (2003) señala que la densidad aparente es fuertemente afectada por el manejo del suelo. Y que la mantención de niveles adecuados de materia orgánica del suelo contribuye a disminuir la densidad aparente y la resistencia a la compactación del suelo (Carter, 2002).

La incorporación de cachaza al suelo, realizado por Cabrera et al. (1999) favoreció a la microagregación y la estructuración del suelo, incremento el volumen de aireación e

infiltración del agua, traduciéndose en mayor desarrollo y rendimiento del cultivo. Martínez et al. (2008) manifiestan que la materia orgánica del suelo tiende a aumentar la tasa de infiltración del agua en el suelo. Sin embargo también es afectado por el manejo y la presencia de capas compactas en el perfil de este. Reddy (1991) y Pikul y Allmaras (1986) encontraron un aumento en la conductividad hidráulica a saturación en los tratamientos con mayor materia orgánica. Fuentes et al. (2003) descubrieron mayor conductividad hidráulica cercana a saturación en suelo con pradera natural (3.71% C-orgánico, 0 – 5 cm) que en suelos manejados con cero labranza y labranza convencional.

La materia orgánica afecta la estabilidad estructural y la compactación del suelo. Influye sobre las características de retención de agua por sus efectos en la estructura del suelo y también porque puede absorber agua debido a su naturaleza coloidal (Quiroga et al., 1996). Por su parte Chappell et al. (1999) manifiestan que la estabilidad de los agregados puede ser un indicador clave de la resistencia de los suelos a la erosión y menciona que la estabilidad de los agregados se ven afectados por la textura, contenido de materia orgánica, mineralogía de las arcillas y la presencia de agentes químicos dispersantes.

Prause y Soler (2001) refieren que en la provincia de Chaco, Argentina el exceso de labranzas con implementos de discos posee efectos adversos que al desproteger el suelo afecta a la estructura y facilita las costras. La elección de prácticas eficientes de labranza, requiere de la consideración de los factores biofísicos relacionados con la descomposición de los residuos; la estructura, por las condiciones físicas derivadas de éstas y la manera en que las operaciones de labranza actúa sobre la estructura del suelo y la distribución de los residuos de cosecha (Guérif et al., 2001). Pero además el sistema de labranza (tipo, frecuencia, profundidad) afecta a la incorporación y velocidad de descomposición de la materia orgánica (Etana et al., 1999; Green et al., 1995). La profundidad de labranza determina la distribución vertical del carbono y nitrógeno en el suelo. Normalmente los residuos ubicados en la superficie se descomponen más lentamente respecto de los que se incorporan en el perfil; debido a la humedad inferior. Watts y Dexter (1997) refieren que la cantidad de agregados estables al agua ( $> 0.25$  mm) se incrementa con el incremento del carbono orgánico en el suelo y disminuye con el incremento de la energía de rotura de los

agregados. Según Buyanovsky et al. (1994) a mayor contenido de carbono orgánico labil, mayor es el tamaño del agregado. A su vez los agregados de menor tamaño están asociados a la fracción altamente humificada. Rothon (2000) encontró una correlación positiva entre el porcentaje de estabilidad de los agregados y el contenido de materia orgánica.

De acuerdo a Six et al. (2000) el ciclo de formación y destrucción de los agregados del suelo, comienza cuando se forma un agregado, luego éste puede hacerse inestable y eventualmente es destruido. La labranza entonces perturba y acorta el “ciclo de vida” de un macroagregado disminuyendo la formación de nuevos microagregados y la captura de carbono dentro de ellos.

El contenido de materia orgánica estrechamente relacionado con la estructura, la densidad, infiltración, entre otros pero también con la actividad de los microorganismos, puesto que la actividad y supervivencia de estos está afectada por el tamaño de poros, por ello Hattori (1992) revela la importancia de los microporos para la supervivencia de los microorganismos y que los macroporos están involucrados en las actividades aeróbicas de los mismos. Por su parte Strong et al. (2004) indican que los poros de 15- 60  $\mu\text{m}$  y 0.6-30  $\mu\text{m}$  de tamaño serían favorables a la actividad aeróbica microbiana porque comprenden alternativamente poros llenos de agua y aire en condiciones normales de suelo. En el caso específico de los hongos, a decir de Otten et al. (2007) la proliferación de ellos está fuertemente determinada por los poros grandes y tienden a ocurrir en la superficie del suelo. Dabire et al. (2001) luego de inocular el suelo con bacterias *Pseudomonas* para promover la agregación, no observaron cambios en los agregados estables en agua, pero favoreció a la cantidad de suelo adherido a las raíces así como al incremento efectivo en la retención de esporas de *Pasteuria penetrans* (parasito de nematodos empleada como agente de biocontrol), la mayoría localizadas en los agregados mayores a 200  $\mu\text{m}$ . Por su parte Strong et al. (2004) refieren que un suelo agregado ofrece una diversidad de hábitats físicos a los microorganismos posibilitando su supervivencia y variadas actividades metabólicas. Así se puede esperar mayor diversidad de microorganismos en suelos agregados respecto de aquellos desagregados. Se amplía que una agregación inestable puede causar la desaparición periódica de los poros llenos de aire, favorables a la actividad

microbiana aeróbica y a los hongos a menos que la estructura del suelo tenga una alta resiliencia. Por otro lado, la interrupción periódica de los agregados en suelos inestables causa la liberación de la materia orgánica del suelo que estaba previamente protegida dentro de los agregados, lo que favorece la descomposición microbiana. De este modo la agregación estable asegura la permanencia de hábitats definidos por la arquitectura de un suelo agregado. Una agregación inestable asociada con una alta resiliencia provocara la periódica pérdida y recuperación a la arquitectura de un suelo agregado.

**d. Condiciones químicas y bioquímicas**, estas condiciones pueden ser tanto naturales y alteradas por el hombre. Entre estas condiciones favorables para el crecimiento de los cultivos agrícolas se halla el pH, niveles relativamente bajos de sales solubles, el carbono orgánico (materia orgánica) y la actividad de los microorganismos. Sánchez et al. (2004) consideran que el carbono orgánico del suelo afecta a la mayoría de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y Carter (2002) indica que estas se encuentran vinculadas con: a) calidad, b) sustentabilidad y c) capacidad productiva.

Aguilera (2000) refiere que la materia orgánica afecta la reacción del suelo (pH) por sus grupos activos diversos que aportan grados de acidez; bases cambiables y contenidos de nitrógeno. Wong et al. (2000) mencionado por Martínez et al. (2008) encontraron que en oxisoles existe un incremento de pH de 4.8 a 5.8 y de 4.1 a 6.8 en un ultisol, junto a una disminución de aluminio intercambiable; neutralización explicada por una complejación de protones y aluminio mediante aniones orgánicos. Similares resultados encontraron Pocknee y Summer (1997) incubando con diferentes materiales orgánicos de origen vegetal. La magnitud y duración de aquellos aumentos de pH (KCl) del suelo variaron con el tipo de enmienda y la tasa de aplicación. Según Carrasco (1992) la materia orgánica tiene grupos carboxílicos y fenolitos que se comportan como ácidos débiles y tienden a disminuir el pH del suelo. De otro lado también se liberaría vía mineralización las bases de cambio contenida en los compuestos orgánicos y por el contenido inicial de nitrógeno, que forma amonio consumiendo protones (aumento de pH); luego la posterior nitrificación  $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NO}_3^-$  que acidifica, sin alcanzar los niveles originales de acidez (Pocknee y Summer, 1997).

La CIC, es una propiedad del suelo vinculada a su fertilidad, depende de coloides inorgánicos (arcillas cristalinas, geles amorfos, óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio) y del contenido de materia orgánica (Martínez et al., 2008). La mayoría de los suelos tiene carga permanente y otra variable con el pH, observándose un aumento de la CIC con el pH (Krull et al., 2004). Se considera que al no variar la carga mineral, el aumento proviene de los coloides orgánicos y que a su vez dependen del manejo.

Según Krull et al. (2004) las interacciones comunes de la materia orgánica con los cationes son las reacciones de intercambio cationico, entre grupos carboxílicos cargados negativamente y los cationes. Reacciones que afectan la fertilidad del suelo incrementándola, por ejemplo la disponibilidad del fósforo por bloqueo de potenciales sitios de reacción con el hierro, aluminio y calcio.

Anger y Recous (1997) mencionan que la dinámica de descomposición de residuos de plantas en el suelo es compleja y controlada por muchos factores tales como la reacción del suelo, la temperatura, relación agua aire (tamaño de poros), tipo de microorganismos, nutrientes, naturaleza física y química de los residuos (dimensión bioquímica). Fruit et al. 1999, citados por Guérif et al. (2001) reseñan que el corte de residuos y la labranza influye mejorando la colonización microbiana y el intercambio de agua y nutrientes con el suelo circundante. García de Cortazar et al. (2003) halló que la cantidad de rastrojo de trigo descompuesto es mayor con el aumento de la temperatura media a que fueron sometidos los rastrojos.

Paul et al. (1999) declara que la biota del suelo representa de 1-3% del carbono orgánico del suelo y el componente microbiano varía desde 100 hasta 1000 ugC g<sup>-1</sup> de suelo. La actividad biológica de la biota actúa en la solubilización, movilización y disponibilidad de nutrientes para las plantas (Borie et al., 1999) y es un indicador de cambios tempranos que modifican la dinámica de nutrientes antes que estos puedan ser detectados por análisis químicos.



Según Borie et al. (1999) la actividad microbiana comúnmente se estudia mediante la biomasa microbiana, la actividad enzimática y la actividad respiratoria o producción de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, la actividad microbiana también se puede determinar mediante estimación de adenosin trifosfato (ATP) entre otros. La actividad respiratoria medida por la producción de CO<sub>2</sub> (C<sub>min</sub>) es un indicador de la actividad de los organismos aerobios del suelo (Anderson y Domsch, 1989 y Borie et al., 1999).

Wander et al. (1994) halló que el tratamiento convencional tuvo menor actividad biológica (CO<sub>2</sub>) respecto del tratamiento con abono animal que tuvo mayor tasa respiratoria. Zagal y Córdova (2005) encontraron que el carbono biomásico disminuye con la intensidad de uso del suelo, de 551 a 264 mgr C<sub>min</sub>/g de suelo. Traoré et al. (2007) describe que un bajo valor de carbono biomásico indica que las comunidades de microorganismos son más eficientes en el uso de sus recursos energéticos o lo que es lo mismo son eficientes descomponiendo residuos orgánicos.

## **2.10 DEGRADACIÓN DEL SUELO**

La calidad natural de un suelo puede ser cambiada por las actividades del hombre, el hombre usando la tierra y prácticas inadecuadas puede disminuir total o parcialmente las características del suelo. La degradación del suelo son todos aquellos procesos que producen la disminución parcial o total de su capacidad productiva o salud, afectando sus propiedades físicas, químicas o biológicas (Acton y Gregorich, 1995).

Muchos factores pueden producir el deterioro de la calidad del suelo. Así puede ser la destrucción de la estructura natural, la pérdida de materia orgánica, salinización, metales pesados potencialmente tóxicos, los orgánico-sintéticos, etc. Al respecto García y Dorronsoro (2006) citan la definición de degradación de la FAO-UNESCO como el proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios.

Existen muchos procesos de degradación del suelo, frecuentemente interactuantes, (FAO, PNUD, UNESCO, 1980), entre ellos encontramos a la erosión, degradación de estructura, salinización, acidificación, sodificación, pérdida de nutrientes y materia orgánica.

**a. Erosión,** tanto el agua como el viento son causantes de remoción de partículas del suelo o tierra vegetal; siendo esta capa, el material que soporta vida, la pérdida de una parte o todo el estrato disminuye o deteriora la capacidad productiva por su reducción en la fertilidad así como la capacidad para aceptar y almacenar agua y aire (Porta et al. 2003). Los materiales extraídos pueden ser depositados en zonas cercanas o bajas y contiguas siendo aparentemente sin consecuencias para el medio ambiente de esa localidad. En algunas zonas sin embargo los materiales son transportados a grandes distancias, depositados en ríos, arroyos y lagos, inclusive a los océanos, pudiendo afectar implícitamente la calidad de agua en aquellas zonas.

Un vasto sector del Perú, se ubica en los andes donde el factor fisiográfico predominante son las laderas cortas y largas con pendientes desde suaves hasta fuertemente escarpadas, con precipitación estacional relativamente alta (mayor 700 mm/año), tierras inadecuadamente empleadas y sobrepastoreo; que condicionan a un fuerte proceso erosivo; así, según el INRENA (2009) 43 057 038 has equivalentes al 33.5% del territorio nacional se encuentran degradadas.

**b. Salinización,** se trata de procesos que se producen al aumentar el contenido de sales al suelo, que actúan en detrimento de otros cationes como calcio, magnesio. La salinidad del suelo reduce la capacidad de éste para producir los cultivos, al restringir la cantidad de agua que la planta puede retirar del suelo.

**c. Acidificación,** es también un proceso que causa descompensación del balance de nutrientes. Cuando no es el caso, los vegetales absorben unos elementos químicos masivamente en detrimento de otros, que son también imprescindibles para su correcta

nutrición. En la acidificación la mayor parte de los nutrientes son lavados del suelo por el agua, siendo sustituidos por el hidrógeno o por el aluminio, pudiendo el pH alcanzar valores inferiores a 4, produciéndose entonces, problemas de toxicidad, más cuando se trata de aluminio. Entre las prácticas que inducen a estos cambios se encuentran el incorrecto abonado, repoblamiento de foresta acidificante entre otros.

**d. Contaminación con agroquímicos,** las tierras agrícolas se pueden contaminar con residuos industriales y aplicación directa de productos químicos agrícolas, agua de riego con químicos, fertilizantes, etc. Los productos químicos pueden permanecer en el suelo o ingresar a las aguas subterráneas a través de la lixiviación. Las prácticas de fertilización principalmente de nitrógeno y fósforo más allá de los indispensables para el cultivo o insecticidas en suelos permeables tienen mayor potencial para superar la capacidad del suelo para actuar como un amortiguador del medio ambiente (Acton y Gregorich 1995).

**e. Cambios de estructura,** los cambios en la estructura del suelo afectan a la calidad de éste en muchos aspectos. El espacio poroso en el suelo es importante como vía de entrada de agua, almacén y proveedor de agua y aire a la planta, además de ser un conducto de agua para salir del suelo. Considerando este aspecto los suelos de alta calidad son los que poseen muchos poros de diferente tamaño y formas, con diferente continuidad. Las prácticas agrícolas que incrementen la tasa de erosión, ruptura de agregados o reducción de espacio porosos (compactación), son los medios más comunes de modificación de estructura.

**f. Pérdida de materia orgánica,** normalmente se relaciona pérdida de materia orgánica con erosión del suelo, sin embargo la materia orgánica se puede perder también por oxidación microbiana, pues los microorganismos del suelo utilizan fuentes orgánicas como fuente de energía en su metabolismo normal. Prácticas agrícolas que añaden poca materia orgánica al suelo o incrementen la tasa de su descomposición, reducen los niveles de materia orgánica, la fertilidad del suelo, estabilidad de estructura, capacidad de aceptar, almacenar y liberar agua para el crecimiento vegetal, por consiguiente en la capacidad para

producir cosechas. Por ejemplo Barzegar et al. (2000) demostró que prácticas agrícolas con uso intensivo de maquinaria agrícola y bajo ingreso de materia orgánica provocan deterioro de la estructura del suelo y su compactación. De otro lado la pérdida de materia orgánica también está asociada a la pérdida de biodiversidad de organismos del suelo. Siegris et al. (1998) encontró que la densidad de las lombrices de tierra, así como la diversidad de la población, fue significativamente mayor en parcelas orgánicas.

Si bien todos los procesos de degradación de los suelos originan una pérdida de productividad del suelo, los modos en que tal cosa ocurre difieren grandemente de uno a otro proceso. Además las relaciones numéricas entre la velocidad de un determinado proceso de degradación de los suelos y la pérdida total de la productividad resultante no se conocen bien y suelen variar en cierta medida entre suelo y suelo. Es difícil, por ello, hacer comparaciones directas entre diferentes procesos de degradación de suelos basados en la pérdida de productividad de los mismos.

## **2.11 NATURALEZA DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO**

La materia orgánica incluye restos de animales y vegetales en distintas etapas de descomposición. Existen tres tipos genéricos de materia orgánica presentes en el suelo: (a) los organismos vivos, (b) la materia orgánica muerta activa (sin descomposición o levemente descompuesta, lábil) y (c) los materiales descompuestos (humificados) relativamente estables. Cada una de estas fracciones juegan roles importantes en la mantención y mejoramiento de la calidad del suelo. De esta manera se considera la relación estrecha entre la cantidad de materia orgánica y la productividad del suelo y el control de la erosión, por ello los agricultores procuran mantener la materia orgánica del suelo con aplicaciones de una serie de residuos tales como el estiércol, compost, abonos verdes, etc.

La materia orgánica es afectada por el clima, la vegetación, material parental, la topografía, el uso del suelo y el manejo agrícola. Tiene como componente principal el carbono, cuyo ciclo se reanuda a partir del dióxido de carbono de la atmósfera a compuestos orgánicos

como plantas, a la materia orgánica en el suelo y de ella de nuevo dióxido de carbono a la atmósfera.

## **2.12 FUNCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LA CALIDAD DEL SUELO**

Aunque la materia orgánica es solo un pequeño porcentaje del peso de la mayoría de los suelos, la cantidad y el tipo de materia orgánica influye en casi todas las propiedades que contribuyen a la calidad del suelo. La cantidad y calidad de la materia orgánica puede cambiar las propiedades del suelo, cuando la estructura y la disponibilidad de los nutrientes mejora y existe más diversidad biológica en suelos con un buen manejo de la materia orgánica Altieri y Nicholls (2006). En algunos casos la materia orgánica modifica los efectos de ciertas propiedades del suelo. Los diversos efectos de la materia orgánica pueden agruparse bajo las influencias ejercida en las propiedades físicas (estructura, infiltración, tamaño de poros, resistencia a la fuerza dispersiva de las gotas de lluvia), químicas (nutrientes, CIC, capacidad tampón) y biológicas del suelo (biodiversidad, actividad microbiana). Los efectos positivos de la materia orgánica fueron ampliamente considerados en el ítem 2.9.

Magdolf (1993), citado por Altieri (1999) afirma que la mejor manera para desarrollar un suelo de alta calidad es manejar el suelo y cultivos, para incentivar la estructura y mantención de altos niveles de materia orgánica, incluyendo la mantención de una cantidad activa de materia orgánica.

El incremento de la materia orgánica en opinión de Magdoff y Weil (2004) puede contrarrestar los efectos negativos de mucha arcilla o demasiada arena. Así los contenidos de materia orgánica del suelo suele aumentar la porosidad total y por lo tanto disminuir la densidad dentro de un rango limitado y en determinado suelo la relación es casi lineal. El mayor efecto de la materia orgánica sin embargo está relacionada con la estabilidad de los agregados, la friabilidad del suelo, la mineralización de nutrientes, la traficabilidad, la captación favorable de agua y propiedades de retención (Doran et al., 1998).

Los agregados grandes son especialmente importantes porque protegen físicamente a partículas de la materia orgánica de la descomposición y proporcionar grandes poros para el agua, el aire y el movimiento de raíz en y la superficie de los suelos. En suelos moderadamente degradados (suelos dominados por 2:1) los materiales orgánicos ayudan a juntar microagregados en macroagregados. Por lo tanto, la interacción entre los agregados del suelo y materia orgánica es de dos vías: La materia orgánica estabiliza los agregados del suelo y los agregados del suelo estabiliza a la materia orgánica del suelo (Six et al., 1999).

### **2.13 FACTORES QUE AFECTAN A LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO.**

**a. Labranza**, actividad que influye en la distribución, profundización y descomposición de la materia orgánica del suelo. La labranza de conservación es un método diseñado para mantener la mayoría de los residuos de los cultivos en la superficie de los suelos de este modo se protege contra la pérdida de suelo por erosión, reduce la pérdida de agua por escorrentía y evaporación.

**b. Rotación de cultivos**, la rotación con cultivos afecta a la cantidad de materia orgánica en el suelo. Los forrajes y leguminosas tienen amplios sistemas radiculares que permiten incorporar grandes cantidades de materia orgánica al suelo al morir. De otro lado también es importante considerar el barbecho, que permite conservar, siempre y cuando estuviera cubierto, de lo contrario se encontraría expuesto a erosión que reduce los niveles de materia orgánica y crea condiciones de humedad y temperatura que incrementa la velocidad de descomposición, reduciéndola.

**c. Enmiendas del suelo**, la incorporación permanente de residuos orgánicos como estiércol, compost, residuos de cosecha, abonos verdes, etc. Permite aumentar y/o mantener los niveles de materia orgánica del suelo.

**d. Erosión**, al producirse el traslado del suelo, generalmente es el estrato superior y con él la fracción orgánica.

## **2.14 CALIDAD DE SUELOS Y SALUD DE PLANTAS**

De acuerdo a Cerón y Melgarejo (2005) la calidad del suelo abarca tres componentes básicos: las características biológicas, las físicas y las químicas. Así mismo la calidad del suelo está determinado por funciones simultaneas como el de sostener la productividad de los cultivos, mantener la calidad del agua y del aire, y el de proporcionar condiciones saludables para plantas, animales y el hombre dentro de los límites de un ecosistema. Respecto a esto último Doran y Safley (1997) refieren que la calidad y salud de este recurso determina la sostenibilidad de la agricultura, la calidad ambiental y como consecuencia la salud de las plantas animales y el hombre.

Considerando la función de productividad del suelo, cualquier factor que afecte a sus componentes básicos, ejercerá influencia positiva o negativa sobre ellos y al respecto Altieri y Nicholls (2007) refieren que los agroecosistemas pueden ser optimizados a través del manejo de dos pilares: la manipulación del hábitat vía la diversificación de cultivos y el mejoramiento de la fertilidad del suelo. Este último referente al suelo, puede ser a través del incremento de materia orgánica a niveles adecuados con el que se promueve además la conservación de la biodiversidad del mismo.

Los alcances de la manipulación del hábitat edáfico tiene repercusión amplia, que logra inclusive ejercer influencia en la expresión a nivel genético (Kumar et al., 2004), no obstante lo más conocido es alcanzado por Altieri y Nicholls (2006) quienes indican que la fertilización de los cultivos pueden afectar la susceptibilidad de las plantas a los insectos plaga a través de las alteraciones de los niveles de nutrientes en los tejidos. Además mencionan que la habilidad de un cultivo para resistir o tolerar el ataque de plagas y enfermedades está ligada a las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Así suelos con alto contenido de materia orgánica y biológicamente activos, generalmente exhiben buena fertilidad, así como cadenas tróficas complejas y organismos benéficos abundantes que permiten nutrición adecuada y previenen infección. Otros estudios como

los de Wardle et al. (2004) hacen referencia a la existencia de interacciones entre las plantas (sobre el suelo) y los organismos (en el suelo) que influyen positiva o negativamente y que regulan la funcionalidad de la biodiversidad.

En opinión de Doran et al. (2000) existe una relación de causa-efecto entre la calidad del suelo y la promoción de la salud de las plantas y animales así como para sostener la productividad. En este entendido manejar la fertilidad del suelo influirá en la calidad de las plantas y la aplicación de enmiendas que incrementen los nutrientes al suelo afectara en ellas en diferente dimensión, por ello Altieri y Nicholls (2006) concluye que los fertilizantes químicos pueden influenciar dramáticamente el balance de elementos nutricionales en las plantas, y es probable que su uso excesivo incremente los desbalances nutricionales, lo que a su vez reduce la resistencia a insectos plaga; aun cuando este fenómeno es posible que no sea universal (Phelan et al., 1995). Contrariamente, la fertilización orgánica promueve el aumento de materia orgánica y la actividad microbiana, junto a una progresiva liberación de nutrientes, permitiendo teóricamente que las plantas resulten con una nutrición más balanceada.

Bauer (1994) al cuantificar los efectos del contenido de materia orgánica en la productividad del suelo, demuestra que la pérdida de productividad de los suelos está asociada con el agotamiento del contenido de materia orgánica y es principalmente una consecuencia de una concomitante perdida de la fertilidad. Por su parte Tirol et al. (2007) demuestran que la aplicación continua de estiércol de granja, para los cultivos de arroz y trigo, permite el aumento de C y N total y el C oxidable en permanganato. Así como también ha permitido mejorar el contenido de P disponible, la CIC, el N potencial mineralizable y la actividad deshidrogenasa, refieren además que la fertilización inorgánica, por sí sola no puede mantener la calidad del suelo que es necesaria para mantener la productividad de los cultivos. Recomiendan finalmente que se debe optimizar cantidades de materia orgánica para complementar a los fertilizantes inorgánicos así aumentar la acumulación de C y N en el suelo, sin efectos negativos sobre el rendimiento de los cultivos.



Por lo tanto, el manejo de la fertilidad de los suelos pueden influir en la calidad y salud de las plantas, y esta se puede apreciar mediante ciertos parámetros surgida a partir de la propuesta de Altieri y Nicholls (2002) y modificada por Rivero et al. (2004) quienes utilizan como indicadores de salud al estado nutricional del cultivo, crecimiento del cultivo, biomasa seca de raíces, biomasa seca de la parte aérea del cultivo, rendimiento actual, índice de cosecha, número de nódulos por plantas y peso seco de nódulos por planta; los cuales pueden variar de acuerdo al cultivo. Por su parte Guharay et al. (2001) menciona además que los indicadores de la salud del cultivo se refieren a la apariencia del cultivo, el nivel de incidencia de enfermedades, la tolerancia del cultivo al estrés (sequía u otro factor) y a malezas, crecimiento del cultivo y raíces, así como rendimiento potencial.

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1 UBICACIÓN**

El ensayo se condujo en el invernadero del Área de Suelos de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, ubicado en el distrito de Ayacucho, Provincia de Huamanga, Departamento de Ayacucho a 2750 m.s.n.m.

#### **3.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DEL MEDIO**

La provincia de Huamanga en promedio posee temperaturas máxima, media y mínima anual de 24.5, 16.5 y 8°C respectivamente; con precipitación anual de 550.40 mm distribuida irregularmente, durante los meses de noviembre a marzo.

#### **3.3 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO**

El suelo empleado procede de la Comunidad Campesina de Sulluhuaylla, Distrito de Huamanguilla, Provincia de Huanta, Departamento de Ayacucho, ubicado a 3450 msnm. Es un suelo residual procedente de laderas largas y cortas. Los resultados del análisis de caracterización se muestran en el cuadro 3.1.

#### **3.4 PLANTA INDICADORA**

Se empleó como planta indicadora, una asociación de pasturas constituida por un 40% de Trébol rojo (*Trifolium pratense*) y 60% de Rye grass Ingles (*Lolium perenne*).

**Cuadro 3.1: Análisis de caracterización del suelo.**

<b>Característica</b>	<b>Muestra</b>	<b>Interpretación</b>
pH	4,50	Fuertemente acido
MO %	3,08	Medio
P ppm	13.46	Medio
K ppm	163.00	Medio
CIC cmol(+).kg <sup>-1</sup>	15.00	Medio
Ca <sup>++</sup> meq/100g	3.10	
Mg <sup>++</sup> meq/100g	0.91	
K <sup>+</sup> meq/100g	0.54	
Na <sup>+</sup> meq/100g	0.18	
Al <sup>+++</sup> meq/100 g	2.00	
H <sup>+</sup> meq/100g	0.80	
Arena %	33.99	
Limo %	20.80	
Arcilla	45.21	
Clase textural		Arcillosa

### **3.5 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE ESTIÉRCOL, DOLOMITA Y ROCA FOSFATADA.**

Las características químicas de la dolomita, roca fosfatada y estiércol, empleados en el experimento se muestran en los cuadros 3.2 y 3.3, respectivamente.

**Cuadro 3.2: Características químicas de dolomita y roca fosfatada.**

<b>DOLOMITA</b>			<b>ROCA FOSFATADA</b>	
<b>Porcentaje</b>				
<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>CO<sub>3</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>CaO</b>
30.41	21.86	47.73	26.88	42.94

**Cuadro 3.3: Características del estiércol de ganado vacuno**

<b>Determinación</b>	<b>Contenido</b>
pH	8,66
CE (dSm-1)	6,66
MO (%)	67,38
N (%)	1,51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,83
K <sub>2</sub> O (%)	2,22
CaO (%)	3,73
MgO (%)	0,7
S (%)	0,24
Humedad	Seco
Na (%)	0,25
Cu (ppm)	17,5
Zn (ppm)	84,5
Mn (ppm)	144,5
Fe (ppm)	4020
B (ppm)	110

### **3.6 DISEÑO METODOLÓGICO**

Los tratamientos fueron dispuestos en un factorial de 3 niveles de estiércol por 2 de dolomita en un Diseño Completo Randomizado, con 3 repeticiones, haciendo un total de 18 unidades experimentales, los que se duplican con fines de evaluación, (18 unidades experimentales (UE) con plantas y 18 UE sin plantas). El modelo aditivo lineal es el siguiente:

$$\text{M.A.L: } Y_{ij} = u + A_i + B_j + A_iB_j + e_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$  = Indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo y salud del cultivo

$A_i$  = Efecto del factor niveles de estiércol

$B_j$  = Efecto del factor niveles de dolomita

$A_iB_j$  = Efecto de la interacción nivel de estiércol y dolomita.

$e_{ij}$  = Efecto del error.

**Cuadro 3.4: Descripción de tratamientos del experimento**

<b>Tratamiento</b>	<b>Descripción</b>
T1 (a1, b1)	10 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 2 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita, con roca fosfatada (RF) e Inoculante
T2 (a1, b2)	10 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 4 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita, con RF e inoculante
T3 (a2, b1)	15 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 2 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita, con RF e inoculante
T4 (a2, b2)	15 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 4 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita, con RF e inoculante
T5 (a3, b1)	20 tn.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 2 tn.ha <sup>-1</sup> de dolomita, con RF e inoculante
T6 (a3, b2)	20 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 4 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita, con RF e inoculante
<b>ADICIONALES</b>	
T7 (a0, b0)	00 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 00 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita, sin RF, sin inoculante
T8 (a0, b0) + RF	00 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 00 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita con RF, Sin inoculante
T9 (a3, b2)	20 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 4 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita, sin RF, Sin inoculante
T10 (a3,b0)	20 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 00 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita, sin RF, Sin inoculante
T11 (a0, b2)	00 t.ha <sup>-1</sup> de estiércol, 4 t.ha <sup>-1</sup> de dolomita, sin RF, Sin inoculante

### **3.7 TRATAMIENTOS**

En el cuadro N° 3.4 se muestra la descripción de tratamientos correspondientes al factorial 3 niveles de estiércol (E) x 2 niveles de dolomita (D), así como los adicionales considerados.

### **3.8 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.8.1 RECOLECCIÓN DEL SUELO**

El suelo empleado fue colectado en un campo de cultivo representativo, de una capa arable de aproximadamente 30 cm de profundidad.

#### **3.8.2 TRATAMIENTO DEL SUELO**

En el invernadero el suelo fue tamizado con malla de un centímetro de diámetro, con la finalidad de limpiar de rastrojos y piedras; una vez seco se procedió a pesar en bolsas de 4 kilogramos.

#### **3.8.3 ENCALADO**

Un mes antes de la siembra se procedió a la aplicación de dolomita, mezclando con todo el suelo de la maceta.

#### **3.8.4 ESTABLECIMIENTO DEL SUELO EN MACETAS**

Luego de un mes de encalado el suelo, se colocaron éstos en macetas de plástico de 4 kilogramos de capacidad en cuyo fondo se puso grava de 2 centímetros de profundidad, con la finalidad de permitir el drenaje.

### **3.8.5 INCORPORACIÓN DE ROCA FOSFATADA Y ESTIÉRCOL**

Consistió en la aplicación de roca fosfatada en dosis equivalente a 300 unidades de  $P_2O_5$ , que fue incorporada junto al estiércol, mezclando con aproximadamente el 80% del suelo en la maceta.

### **3.8.6 SIEMBRA E INOCULACIÓN**

La siembra simultánea de dos especies de cultivo, se sembraron a densidades de 25 y 15 kg de gramínea (*Lolium perenne*) y leguminosa (*Trifolium pratense*), respectivamente, actividad que fue realizada el 12 de junio 2008. La inoculación del trébol rojo con *Rhizobium trifolii* se efectuó cuando las plantas alcanzaron una altura promedio de 20 cm.

### **3.8.7 RIEGO Y CONTROL FITOSANITARIO**

Los riegos fueron permanentes, en función de la necesidad del cultivo y considerando alcanzar la capacidad de campo. No hubo necesidad de control fitosanitario debido a que no se presentaron problemas.

### **3.8.8 PERIODO DE EVALUACIÓN**

La evaluación de las características del suelo (macetas sin plantas) y el rendimiento de materia seca de la planta (macetas con planta); se realizó durante tres periodos: a los seis, nueve y doce meses luego de aplicado los tratamientos.

## **3.9 PARAMETROS DE EVALUACIÓN**

### **3.9.1 PARAMETROS FÍSICOS DEL SUELO**

Se determinó el índice de inestabilidad de estructura, según Henin et al. (1958) la densidad aparente del suelo utilizando el método del cilindro (Porta et al., 2003) y la tasa de

infiltración, según Soil Quality Institute, (1998). Cuyos procedimientos se detallan a continuación:

**a. Índice de inestabilidad de estructura (Is)**

Los autores proponen calcular un índice de inestabilidad obtenido mediante la determinación de los agregados retenidos sobre un tamiz de 0.2 mm, después de pre-tratamientos con alcohol, benceno y agua en muestras de 10 g de suelo. Los contenidos de arcilla + limo fueron determinados en el sobrenadante luego del tamizado, empleando el método de Robinson, también se determinó a las arenas comprendidas entre 0.2 – 2 mm. Los cálculos del índice de inestabilidad se realizaron con la siguiente ecuación:

$$Is = \% \text{ de } (A + L) \text{ Max.} / \text{Promedio de agregados } (\%) - 0.9 (\% \text{ arena gruesa}).$$

Donde:

Is = Índice de inestabilidad de estructura

(A + L) Max. = Arena más limo máximo encontrado en el pre-tratamiento más desfavorable.

**b. Densidad aparente**

Se obtuvieron las muestras de suelos en cilindros metálicos cuyas dimensiones de altura y diámetro interno eran conocidos. Las muestras así obtenidas fueron pesadas y secadas en estufa a 105°C. Con los datos obtenidos se procede a calcular la densidad del suelo.

**c. Infiltración básica**

Se introduce aproximadamente a 20 cm de profundidad del suelo, un cilindro de 30 cm de longitud y 3 pulgadas de diámetro con marcas graduadas de 100 mm. Una vez añadida el agua desionizada se realizaron las primeras lecturas a 2, luego a 20



minutos hasta que la tasa de infiltración sea sensiblemente constante, aproximadamente durante 5 horas.

### **3.9.2 PARAMETROS QUÍMICOS DEL SUELO**

Se determinó el pH (1:2 en CaCl<sub>2</sub>), capacidad de intercambio de cationes (Acetato de amonio), materia orgánica (Walkley y Black), fósforo disponible (Olsen modificado), calcio, magnesio y potasio cambiabiles (extraídos con acetato de amonio y lectura en absorción atómica). Todos ellos forman parte del protocolo de análisis de suelos de la UNALM.

### **3.9.3 PARAMETROS BIOLÓGICOS DEL SUELO**

Comprendió las determinaciones de respiración, siguiendo la metodología propuesta por Anderson (1982) que utilizó la técnica volumétrica, mediante la cual el gas producido durante la respiración (CO<sub>2</sub>) es capturado en una solución básica y determinado posteriormente por titulación. El contenido de biomasa microbiana fue mediante la técnica de fumigación/ extracción de Jenkinson y Powlson (1976) basado en el análisis del CO<sub>2</sub> liberado en muestras de suelo previamente fumigadas con cloroformo, posteriormente inoculadas con suelo fresco y comparadas a su vez con otras muestras de suelo sin fumigar. Ambos son parte del protocolo de análisis microbiológico en suelos de la UNALM.

### **3.9.4 EVALUACIÓN DEL CULTIVO**

Se determinó el rendimiento de materia seca (g.maceta<sup>-1</sup>) del cultivo, que se obtuvo pesando las muestras, luego del corte y secado en estufa; los porcentajes de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, por digestión húmeda de acuerdo al protocolo de análisis de plantas de la Universidad Nacional Agraria “La Molina”, con los cuales se determina el diagrama de balance de nutrientes de acuerdo a Altieri y Nicholls (2002)

modificado por Rivero et al. (2004) y finalmente se evaluó el número y peso de nódulos por maceta.

### **3.10 ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

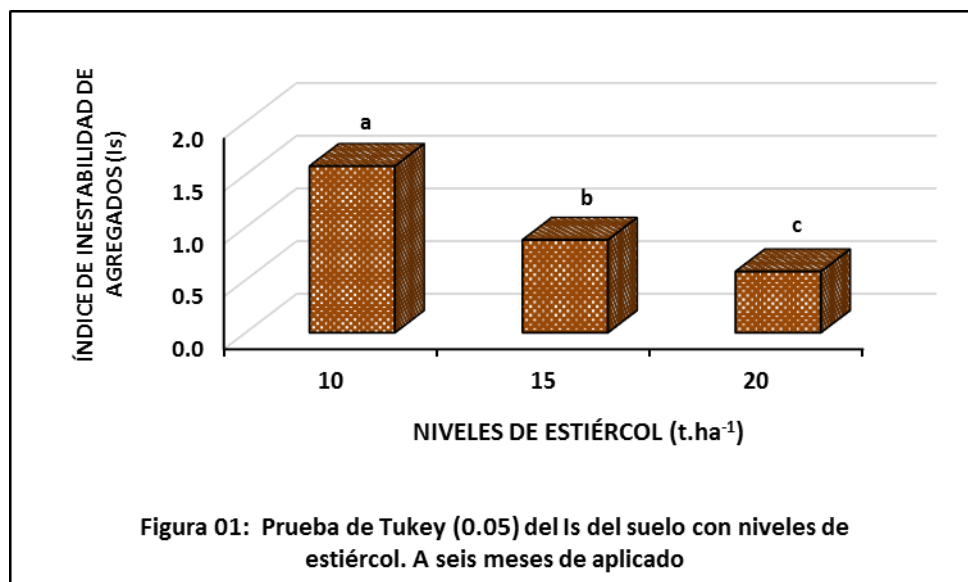
Con los datos obtenidos se procedió a realizar el Análisis de varianza, pruebas de comparación de promedios de Tukey. Además de análisis de tendencia por polinomios ortogonales.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 INDICADORES FÍSICOS

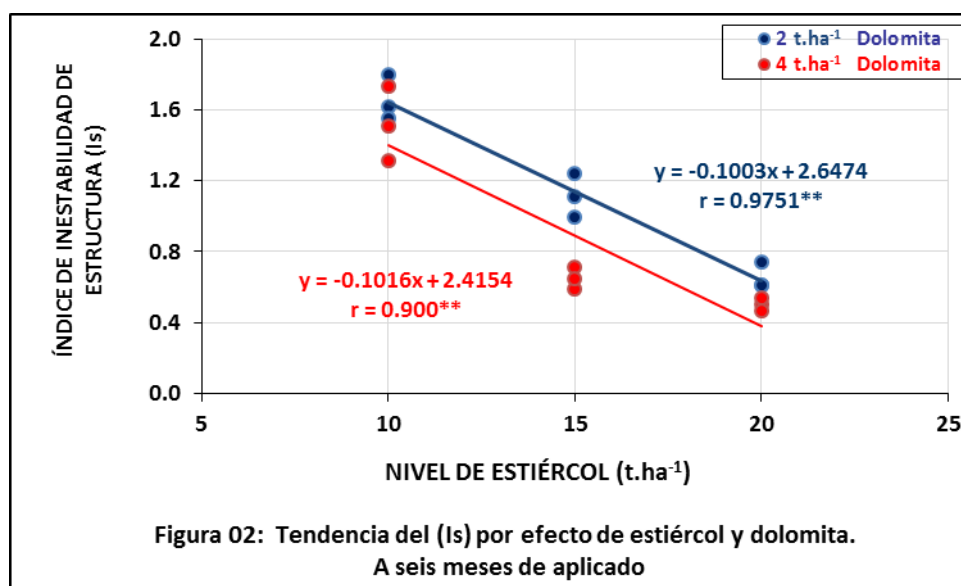
#### 4.1.1 INESTABILIDAD DE AGREGADOS

En el análisis funcional de variancia (ANFUVA) del índice de inestabilidad de estructura (Is) del suelo -en ausencia de raíces- existen diferencias significativas (Cuadro 4.1) entre los tratamientos aplicados y en los tres periodos de evaluación. Así, a seis meses la prueba de Tukey (Figura 01) muestra que el menor índice de inestabilidad de estructura se produce cuando se aplica la mayor dosis de estiércol (20 t.ha<sup>-1</sup>) en promedio de dolomita.



La tendencia lineal significativa (Figura 02) en cada nivel de dolomita (2D, 4D) indica que dentro de los límites estudiados (0.2 - 2 mm), el aporte de estiércol provoca una

disminución proporcional del Índice de inestabilidad, de manera que con la máxima dosis de estiércol (20E-2D) el índice es 0.65 y con (20E-4D) es del orden de 0.503; que implica mayor estabilidad de agregados en ambos casos, respecto a los niveles de 10 y 15 t.ha<sup>-1</sup> de E.

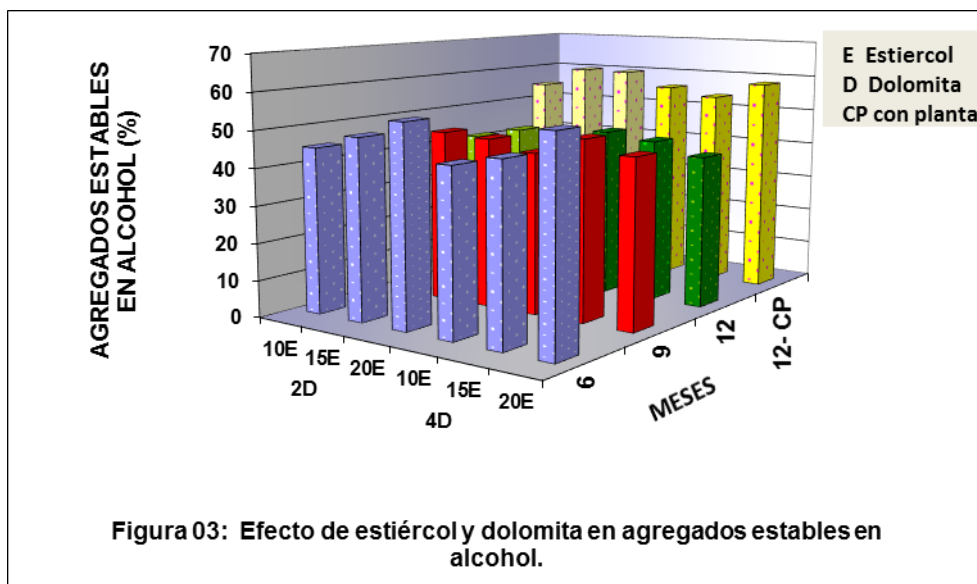


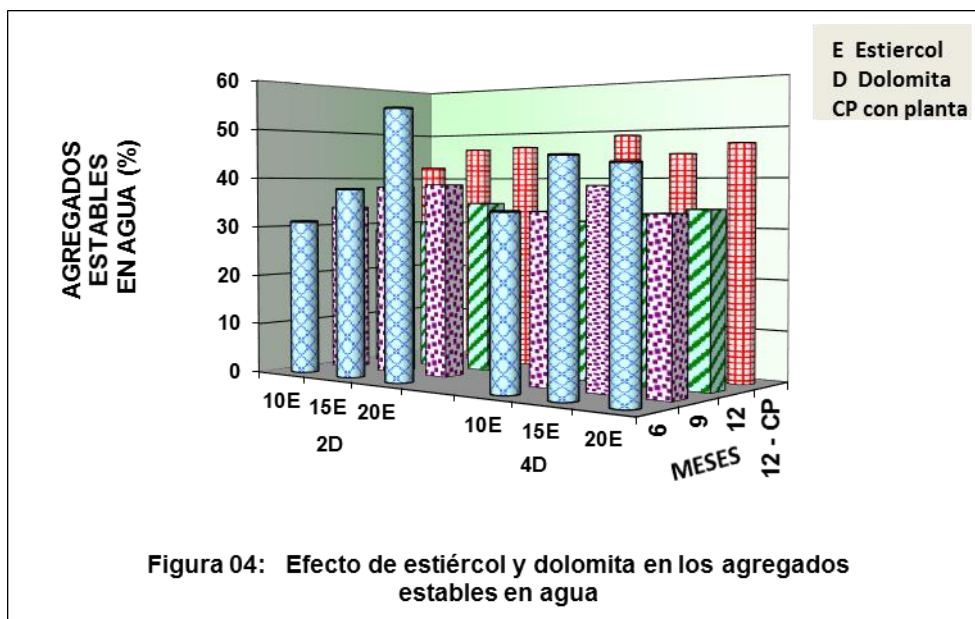
Estas derivaciones están relacionadas con las reacciones que genera el estiércol que se encarga de formar enlaces entre las partículas del suelo, aumentando la fuerza cohesiva entre éstas para formar agregados (Golchin et al., 1995). Esta fuerza cohesiva determina mayor resistencia a la acción degradante del agua principalmente, evitando el fenómeno del estallido en los agregados (De Orellana y Pilatti, 1994). Está documentado que con la menor tasa de adición de carbono orgánico y la mayor oxidación se provocan pérdidas sustanciales de la materia orgánica y con ella el deterioro de las propiedades físicas en suelos cultivados en comparación con suelos vírgenes o bajo pasturas (Pilatti et al., 1988; Golchin et al., 1995; Grant, 1997). Por ello, en general se observa que a dosis mayores de estiércol se produce paralelamente un incremento de agregados comprendidos entre 0.25 y 2 mm de diámetro. Sin embargo es necesario estudiar la distribución de los agregados estables para entender el comportamiento de la estabilidad

**Cuadro 4.1: Análisis funcional de varianza del índice de inestabilidad de estructura del suelo (Is), por efecto de la aplicación de estiércol y dolomita.**

		SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
F.V.	G.L.	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	0.721587	50.14**	2.80503	30.24 **	0.099692	8.23**	0.02302	6.34**
<b>Dolomita</b>	1	0.28379	19.72**	0.09406	1.01 ns	0.076368	6.31*	0.01282	3.53 ns
<b>Estiércol</b>	2	1.61014	111.9**	6.12596	66.06**	0.177431	14.65**	0.01293	3.56 ns
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	0.05193	3.60 ns	0.83957	9.05**	0.033614	2.78 ns	0.03819	10.52*
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	1.51050	104.97**	3.85149	41.53**	0.365067	30.14**	0.08568	23.61**
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.00310	0.21 ns	0.02791	0.30 ns	0.000089	0.01 ns	0.00985	2.71 ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	1.54922	107.66 **	6.40667	69.09**	0.056756	4.69 ns	0.00634	1.75 ns
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.26132	18.16**	3.64500	39.31**	0.000180	0.01 ns	0.00039	0.107 ns
<b>Error</b>	12	0.01439		0.09273		0.012111		0.00363	
<b>Total</b>	17								
		CV = 11.80%		CV = 17.73%		CV = 7.49%		CV = 9.71%	

estructural del suelo (Girbau et al., 1989). Aquellas fracciones poseen un sentido por sí mismos y pueden establecer las causas de la inestabilidad de estructura (Mathieu y Pieltain, 1998). Así, en la Figura 03 se observan los agregados estables en alcohol -presentes en mayor proporción- que fluctúan entre 44.9 - 53.9% con el aporte de E-2D y de 44.3 a 55.1% con E-4D; siendo mayor el porcentaje a mayor dosis de estiércol, lo que significa que durante los primeros seis meses de aplicadas las enmiendas, los agregados son cohesionados y resistentes al fenómeno del estallido. Dicha estabilidad obedece a la disminución de la tensión superficial entre las fases liquido-aire (Pérez, 1992), donde el lento humedecimiento de los agregados con el ingreso de agua miscible en alcohol denota la existencia de mayor cohesión de agregados humedecidos (Díaz y Rava, 2007). De manera similar el contenido de calcio proveniente de la dolomita a través de la saturación en el coloide orgánico y/o inorgánico estaría contribuyendo con la estabilidad de los agregados, coincidiendo con lo hallado por Girbau et al. (1989). Se trata de agregados grandes que permiten la formación de macroporos en los que se garantiza el avenamiento interno del suelo, su aireación, exploración radical, resistencia a la erodabilidad, sellado y encostrado (Bronick y Lal, 2004).

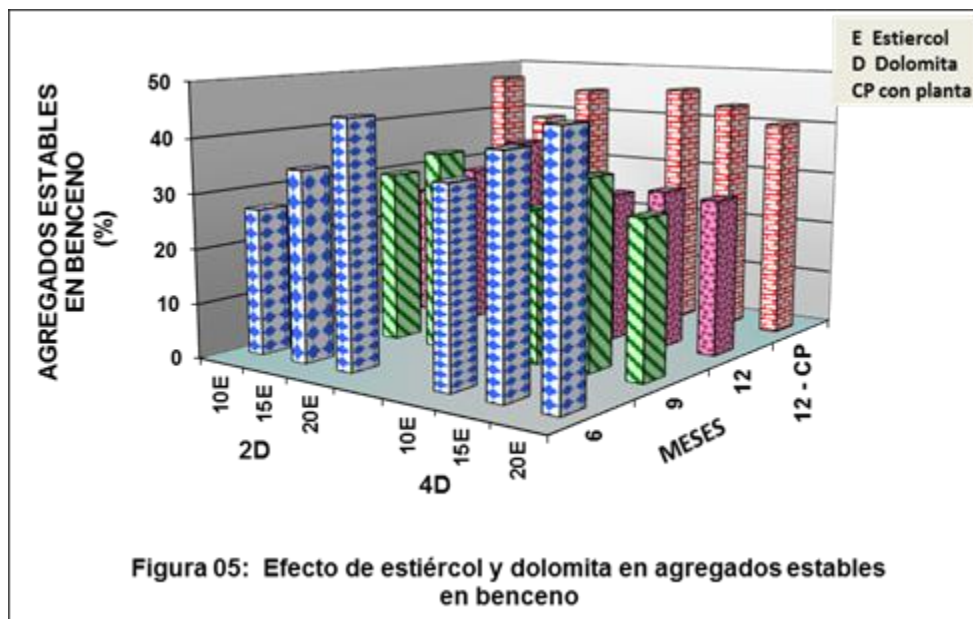




Los agregados estables en agua (Figura 04) varían de 31.0 - 53.4% al aplicar E-2D y cuando se emplea E-4D la variación es de 33.7 - 42.5%. El ingreso abrupto de agua al comprimir el aire entre algunos meniscos provoca la disgregación de los agregados por presión interna (Amezqueta, 1999). Estos agregados reflejan lo que se produce en la naturaleza, pues el agua ejerce libremente su acción. Se observa que también está relacionado con la materia orgánica pues posee una tendencia creciente con el aporte de estiércol, tal como reporta Fortum et al. (1989) quienes al aplicar estiércol de ganado mejoraron significativamente la estabilidad de agregados estables al agua al cabo de dos semanas de incubación, no obstante el mejor efecto se obtuvo con la aplicación de la fracción húmica del estiércol a diecisiete semanas de aplicado.

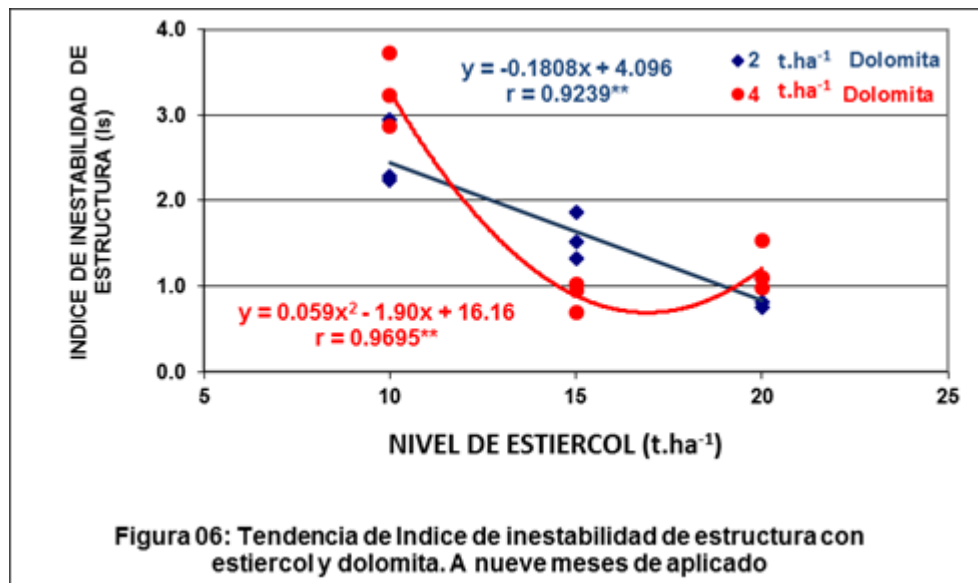
Los agregados estables en benceno (Figura 05) presentes entre 26.8 a 44.5% (E-2D) y de 35.2 a 45.8% (E-4D) poseen proporciones también crecientes con el aporte de estiércol. El benceno incrementa el carácter hidrófobo de la materia orgánica limitando el accionar del agua (De Orellana y Pilatti, 1994; Díaz y Rava, 2007); convirtiéndose de este modo a decir de Cerana et al. (2006) en un indicador muy sensible respecto del papel protector de las materias orgánicas, como en este caso el estiércol de vacuno. Estos agregados indican un tenor suficiente, calidad y distribución adecuada de materia orgánica y está relacionado con el tamaño de poros (Ojeda et al., 2008). Tamaño de poros que a su vez están conexos

con el tamaño de agregados y éstos directamente con el contenido de carbono lábil (Buyanovsky et al., 1994). Sin embargo si bien la estructuración se da a diferentes escalas, al inicio del proceso de formación son grandes, es decir macroagregados, posteriormente dependiendo de las condiciones de diferentes factores éstos podrían cambiar (Six et al., 2000). El efecto positivo entre la materia orgánica y la estabilidad de los agregados también fueron hallados por Ferreras et al. (2001); Díaz y Rava (2007).



La dolomita probablemente también intervenga en el porcentaje de agregados estables en benceno, por su relación con la materia orgánica influyendo a su vez en el Is. Así, Pérez (1992) encuentra que la presencia de calcio asociada a la fracción húmica de la materia orgánica tiene acción estabilizante e indica un orden de influencia de cationes:  $Mg < Ca < H < Al < Fe$ . Por lo tanto la naturaleza de la estabilidad de los agregados depende de la relativa cantidad y fuerza de varios tipos de asociaciones órgano-minerales y agentes de enlace (Jastrow y Miller, 1998).





A nueve meses disminuye la estabilidad de agregados pues aumenta el valor del Is. La tendencia lineal del efecto del estiércol (Figura 06) continúa con propensión a disminuir de manera significativa, obteniéndose así un Is de 0.88 con 20E-2D. Esta información armoniza con la disminución de la proporción de agregados estables en alcohol respecto de los obtenidos en el periodo anterior que van de 53.9 a 46.2%, de igual forma los evaluados en agua varían de 53.4 a 38.6% y en benceno de 44.5 a 36.1% (Figuras 03, 04 y 05). En E-4D, la tendencia cuadrática del efecto del estiércol también denota disminución (Figura 06) de manera que con 20E-4D se obtiene un Is de 1.21 y las disminuciones de las proporciones de agregados estables en alcohol, agua y benceno, respecto de los obtenidos en el periodo anterior van de 55.1 a 45.2%; 42.5 a 33.4% y de 45.7 a 28.5% respectivamente. Estos resultados de disminución de los agregados estables principalmente los del pre tratamiento en benceno que influye en el aumento del Is, están relacionados con la descomposición de la materia orgánica incorporada, descomposición que iría en aumento dado que las condiciones de pH en el suelo también aumenta con la incorporación de dolomita, principalmente en E-4D, favoreciendo a la formación de mayor biomasa y actividad microbiana, quienes aumentan en el mismo periodo (Figuras 46 y 50). Estos resultados se ajustan a lo vertido por Degens (1997) quien afirma que la materia orgánica lábil actúa como agente ligante en los agregados del suelo. Materias orgánicas que pueden impartir algún grado de repelencia al agua; por cuanto al disminuir por descomposición permitirían el debilitamiento de los agregados (Tisdall, 1991 y Dexter, 1988). Entonces los efectos iniciales de formar agregados grandes también disminuyen con la consecuente

degradación de algunas características como por ejemplo la porosidad (Bonel et al., 2005), coincidiendo con Márquez et al. (2004) quienes afirman que tales cambios además de influir en el tamaño y continuidad de los poros, afecta a otras propiedades.

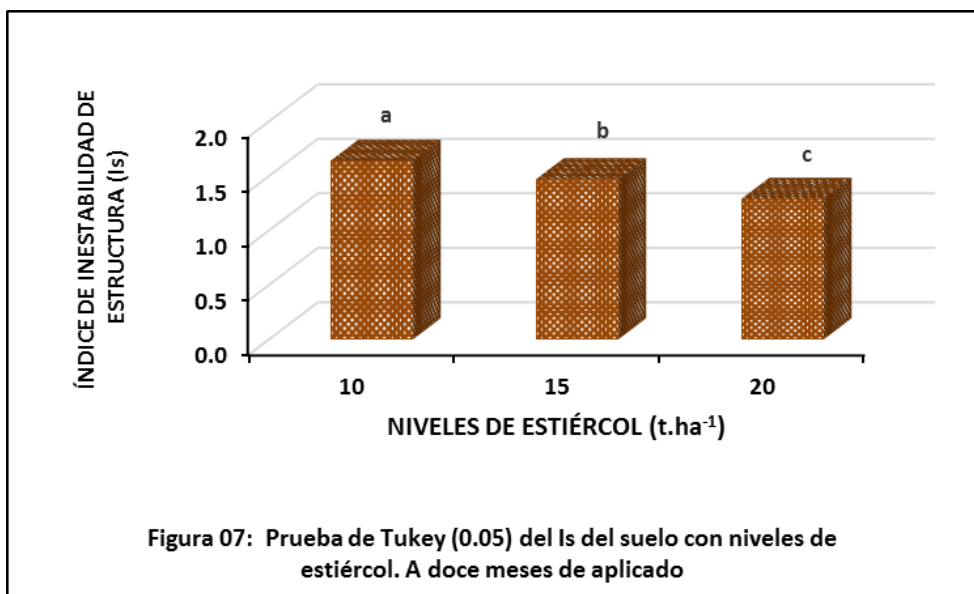


Figura 07: Prueba de Tukey (0.05) del Is del suelo con niveles de estiércol. A doce meses de aplicado

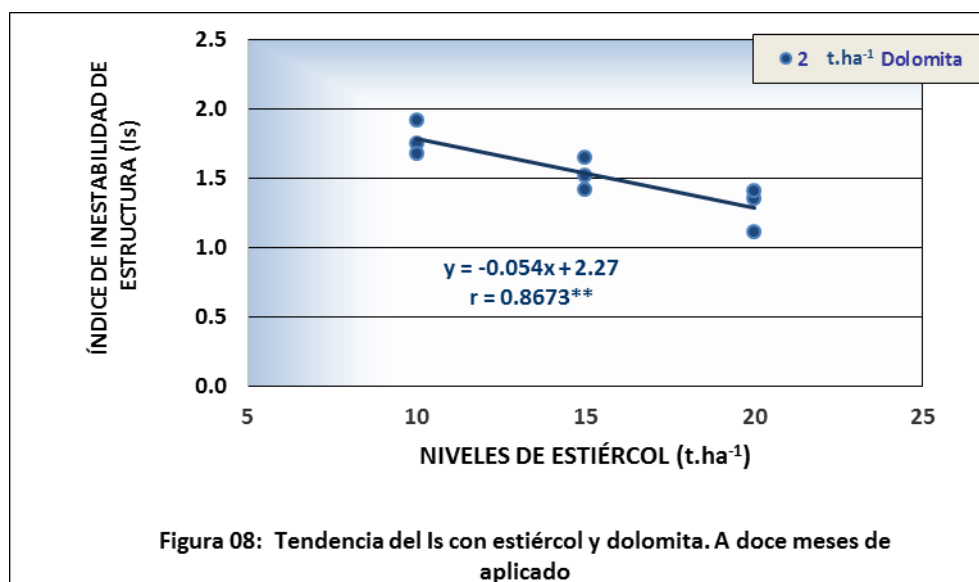
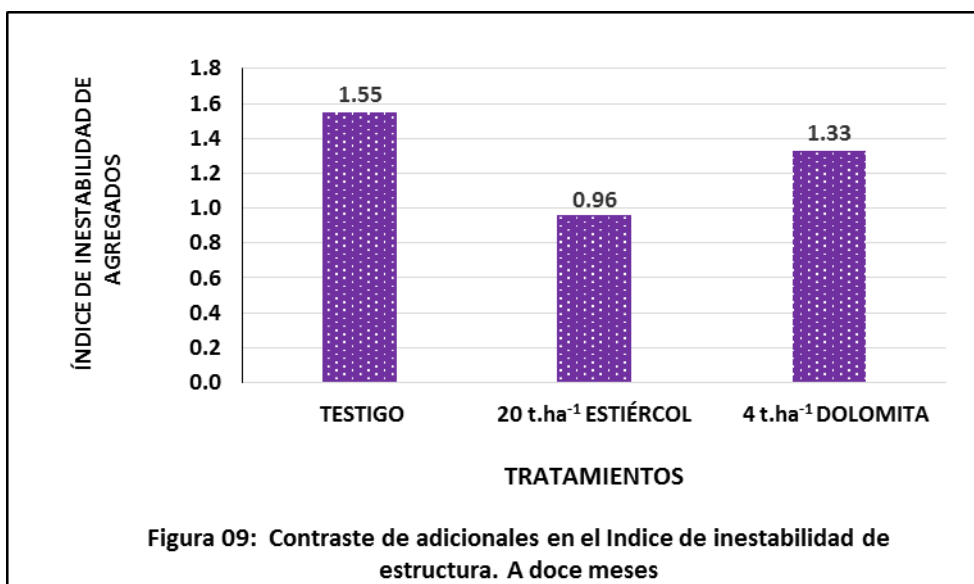


Figura 08: Tendencia del Is con estiércol y dolomita. A doce meses de aplicado

A doce meses el Is continúa en ligero ascenso. La prueba de Tukey (Figura 07) del Is con niveles de estiércol en promedio de dolomita, muestra menor Is (1.295) cuando se emplea

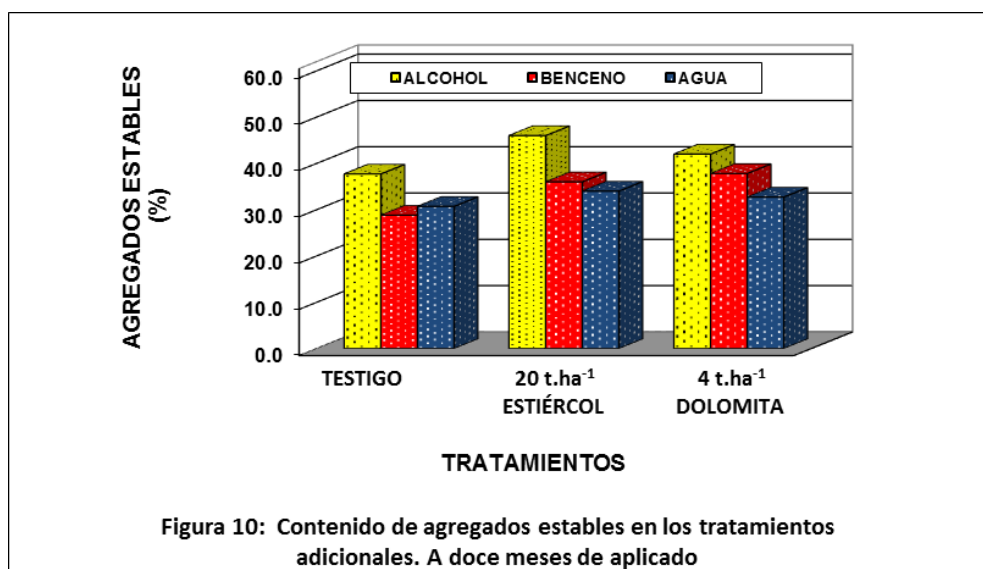
20E, con tendencia lineal y significativa en la dosis de 2 t.ha<sup>-1</sup> de dolomita (Figura 08) siendo mayor la estabilidad al emplear dosis alta de estiércol respecto a los niveles inferiores de E, se observa además mayor porcentaje de agregados estables en benceno (Figura 05) denotando que el efecto de la materia orgánica continúa relevante.

En el caso de E-4D, no resulta significativa la tendencia, sin embargo en 20E-4D el Is de 1.304 es similar al obtenido en 20E-2D. En este periodo los agregados estables en benceno prácticamente se mantienen respecto del periodo anterior; en tanto que los estables en agua y en alcohol disminuyeron ligeramente en ambas dosis de dolomita. En este medio de disminución de agregados estables probablemente predominen los microagregados, pues al existir menores contenidos de materia orgánica, baja la relación macroporo:microporo (De Orellana y Pilatti, 1994), poniendo de manifiesto que la formación y destrucción de los agregados está vinculado a la tasa de descomposición de residuos (Six et al., 2000 y Cabria et al., 2002).

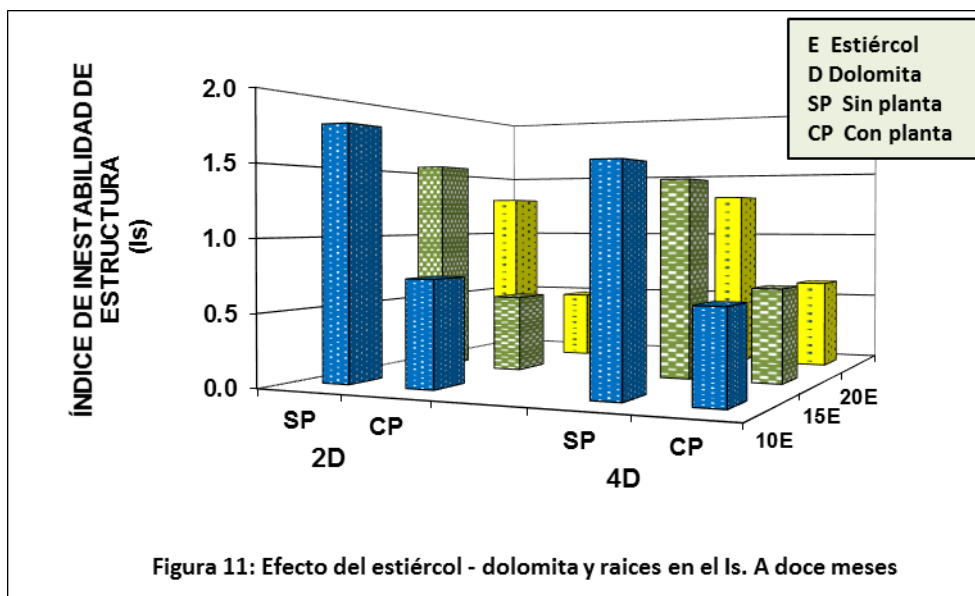


En la Figura 09, se muestran los índices de inestabilidad de estructura en los tratamientos adicionales entre ellos el Testigo; con solo 20 t.ha<sup>-1</sup> de E y con solo 4 t.ha<sup>-1</sup> de D. Dejando entrever que la sola aplicación de 20 t.ha<sup>-1</sup> de estiércol favorece a la formación de

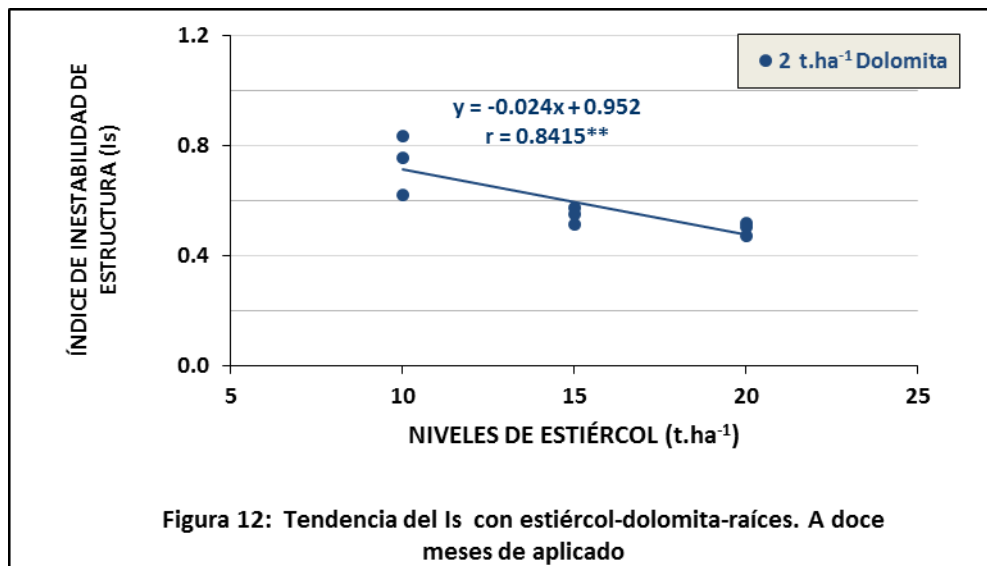
agregados, por todas las razones antes expuestas, pues alcanza un  $I_s$  de 0.95, siendo este valor más bajo respecto al del testigo (1.55) y al aplicar solo  $4 \text{ t.ha}^{-1}$  de dolomita, el  $I_s$  es de 1.33. De este modo la aplicación de una fuente orgánica como el estiércol de vacuno en dosis de  $20 \text{ t.ha}^{-1}$  contribuye con la floculación y posterior agregación con la consecuente mejora en la calidad del suelo para una producción agrícola sostenible.



La sola aplicación de dolomita ( $4 \text{ t.ha}^{-1}$  D), si bien es cierto implica principalmente aumento en la reacción del suelo, sin embargo, también existe la influencia simultánea de la concentración de calcio en el complejo de cambio que se eleva de 3.10 a 4.63  $\text{cmol}(+).\text{kg}^{-1}$  lo que probablemente justifique la mayor presencia de agregados estables en alcohol y benceno en el suelo (Figura 10) respecto al testigo. Por ello Jastrow y Miller (1998) afirman que los componentes inorgánicos como el calcio se sumarian al efecto estabilizador de los agregados. Resultados que son similares a los reportados por Pérez (1992) quien provoca la disminución del  $I_s$ , con un incremento del porcentaje de agregados estables en benceno al aplicar materia orgánica en presencia de calcio. Y en aquellas zonas donde el calcio disminuye, incrementa la proporción de microagregados (Cabria et al., 2002).



En el grupo de tratamientos con plantas, las raíces de la asociación de pasturas de Trébol rojo (*Trifolium pratense*) y Rye grass Ingles (*Lolium perenne*) - a doce meses- influye de manera categórica en el Is, (Figura 11), con respuesta lineal y significativa en E-2D (Figura 12). Así con la mayor dosis de estiércol se obtuvo un Is tan bajo como 0.497. En el caso de los tratamientos E-4D -sin diferencia entre sí- también con índices bajos que fluctúan entre 0.61 a 0.66. Estos valores son menores a los hallados en los tratamientos equivalentes sin plantas. En este medio los agregados estables en alcohol alcanzan un valor máximo de 60.13% (Figura 3), 46.30% en agua (Figura 4) y 45% en benceno (Figura 5), todos ellos superiores a su similar sin plantas. Resultados que obedecen a que las plantas excretan compuestos orgánicos gelatinosos por las raíces, que sirven de ligamento entre las sustancias inorgánicas. De otro lado las pequeñas raíces mantienen juntas las partículas del suelo contribuyendo con la formación de agregados (Oades, 1993; Brady y Weil, 2008; Ojeda et al., 2008 y Ramírez y Acosta, 2009). Las raíces también se incorporan como materia orgánica e incrementan el contenido de macroporos, favoreciendo a la estabilidad de los agregados (Degens, 1997). Las hifas, compuestos carbonatados poco polimerizados, favorecen a la formación de agregados grandes (Six et al., 2000). Finalmente los residuos vegetales proporcionan alimento a los microorganismos del suelo, quienes se suman como uno de los principales factores agregantes (Deyens, 1997).



Los resultados obtenidos son similares a los de Misra et al. (1999) quienes mejoran la estabilidad global de los agregados, al incluir trébol en rotación. En tanto con el Rye grass de acuerdo a Gavilanez (2001) no se influye en los agregados del suelo. Por su parte Cerana et al. (2006) encontraron que las raíces de arroz tienen un efecto positivo en la estabilidad de agregados y Sanzano et al. (2005) descubrieron que la estabilidad estructural estuvo fuertemente asociada al carbón orgánico en todas las situaciones, excepto en el suelo bajo pasturas donde el efecto físico de las raíces fue más importante que el contenido de materia orgánica del suelo. Finalmente al comparar las dos especies empleadas Pilatti et al. (1988) descubrieron que las gramíneas superaban a las leguminosas en la generación de agregados estables mayores de 200µm al que Primavesi (1980) atribuye como el fenómeno de los hongos asociados a las raíces de las gramíneas y a la excreción fúngica de ácido urónico.

#### 4.1.2 DENSIDAD APARENTE DEL SUELO (Pa)

El ANFUVA (Cuadro 4.2) de la densidad aparente del suelo (Pa), muestra diferencia significativa para el efecto principal del estiércol con tendencia lineal en E-2D ( $Y = -0.009X + 1.106$ ;  $r = 0.767^*$ ) a seis meses de incorporadas las enmiendas.

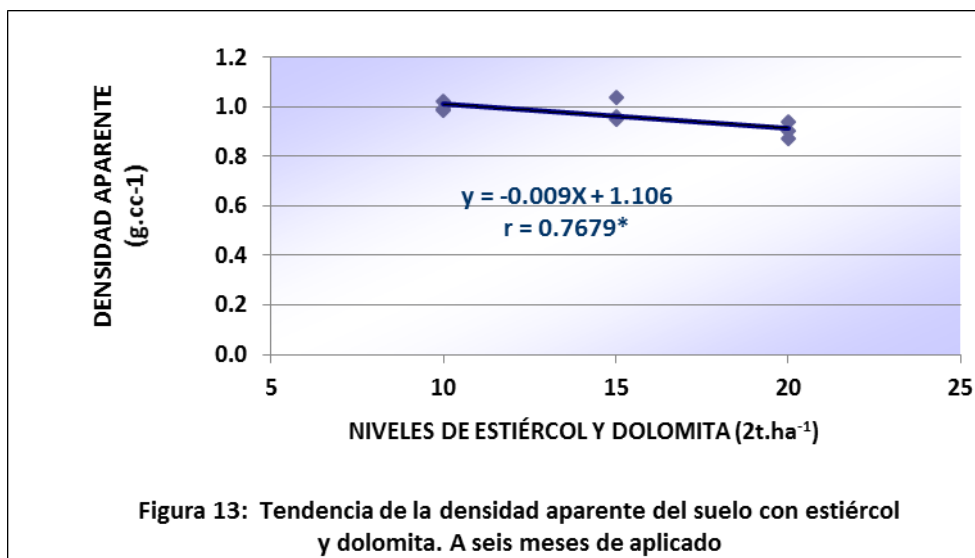
**Cuadro 4.2: Análisis funcional de variancia de la densidad aparente del suelo, por efecto de la aplicación de estiércol y dolomita.**

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.C.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Fc</b>
<b>Tratamientos</b>	5	0.01828	0.00366	4,08 *
<b>Dolomita</b>	1	0.00122	0.00122	1,36 ns
<b>Estiércol</b>	2	0.01110	0.00555	6,19 *
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	0.00597	0.00298	3,33 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>				
<b>F. lineal</b>	1	0.00552	0.00552	6,16 *
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.00845	0.00845	9,43 **
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>				
<b>F. lineal</b>	1	0.00286	0.00286	3,19 ns
<b>F. cuadrática</b>	1	0.00023	0.00023	0,26 ns
<b>Error</b>	12	0.01076	0.00090	
<b>Total</b>	17	0.02904		

CV = 3.12%

Se observa que a dosis alta de estiércol (20E-2D), la Pa disminuye hasta 0.94 g.cc<sup>-1</sup> (Figura 13). La clase textural del suelo es arcillosa, por tanto se trata de suelos con tendencia a problemas en la movilización de agua, nutrientes y desarrollo de raíces (Cantú et al., 2007). Condiciones en las cuales la incorporación de una fuente orgánica como el estiércol genera reacciones importantes con los coloides inorgánicos, los microorganismos del suelo, etc. influyendo por lo menos durante los seis primeros meses de aplicado, en la densidad aparente. Al respecto Nardone (1994) afirma que la materia orgánica incorporada al suelo permite incrementar la actividad microbiana, generándose como consecuencia formación de macro y microagregados. Agregados que estarían permitiendo mayor cantidad de poros que incrementa el volumen de aireación y con ella la disminución de la densidad aparente (Bonel et al., 2005). No obstante el efecto inicial que provoca la incorporación de E-D sobre la densidad aparente, resulta siendo efímero, pues a nueve meses de incorporada las enmiendas, la densidad retorna a su valor normal; debido probablemente a la descomposición de la materia orgánica que a su vez repercute en la

disminución de agregados estables (0.25- 2 mm) principalmente aquellos en alcohol y agua. El efecto es similar tanto con el aporte de 2 ó 4 t.ha<sup>-1</sup> de dolomita.



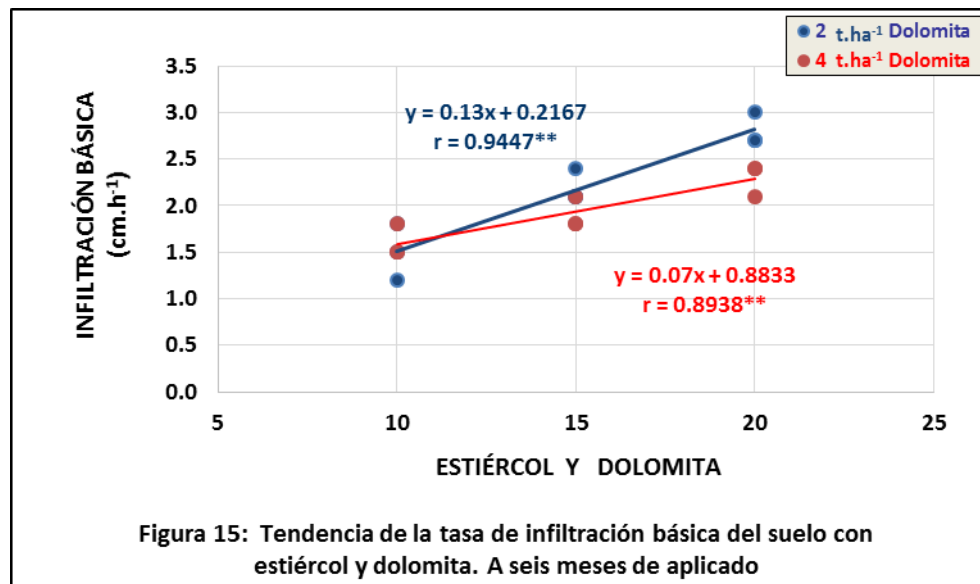
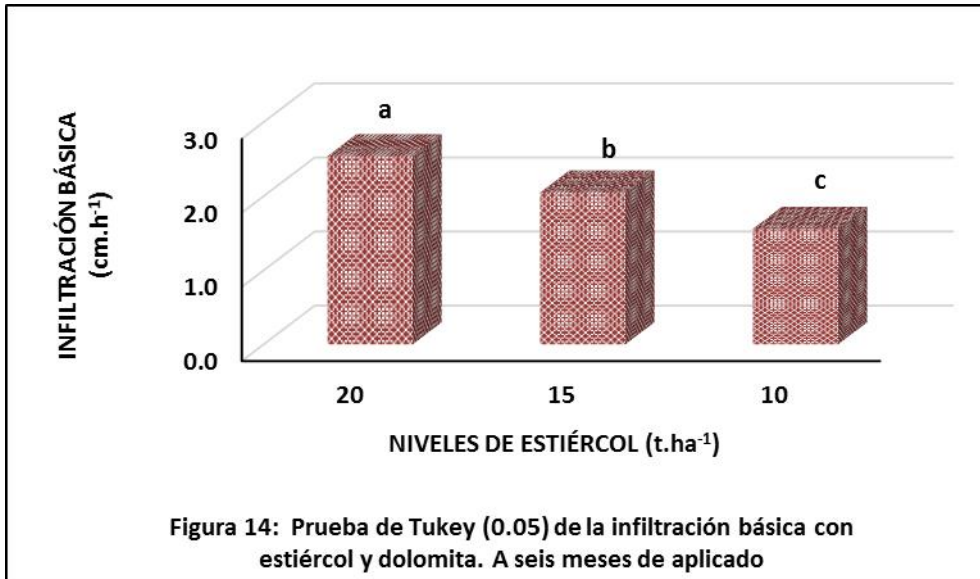
#### 4.1.3 TASA DE INFILTRACIÓN BÁSICA

Los niveles de estiércol en el suelo tienen efecto diferenciado con 99 % de seguridad sobre la tasa de infiltración básica, al igual que la dolomita (95%) (Cuadro 4.3). A los seis meses la prueba de contraste de Tukey (Figura 14) muestra que a dosis alta de E -en promedio de dolomita- se produce la mayor tasa de infiltración básica en el suelo. Al respecto es sabido que los componentes orgánicos participan en la aglutinación de las partículas y lo hacen de diferente forma; por ejemplo, las moléculas más complejas de polisacáridos son más importantes en la promoción de la estabilidad de los agregados e infiltración del agua que las moléculas simples (Cabria et al., 2002). En el caso de la dolomita la mayor dosis de ésta, disminuye la infiltración básica de manera que con el aporte de 20E-4D la infiltración es del orden de 2.28 cm.h<sup>-1</sup>, en tanto que con 20E-2D es de 2.8 cm.h<sup>-1</sup> (Figura 15).



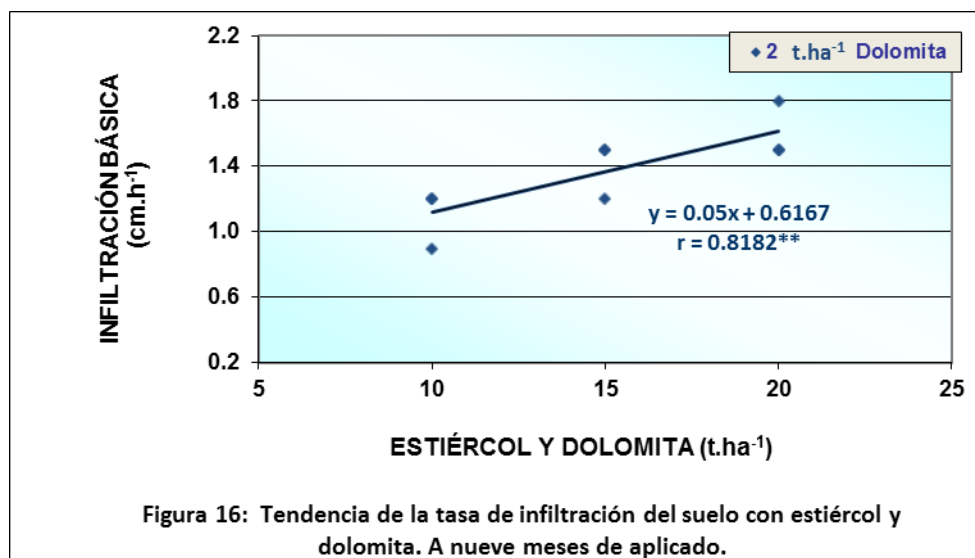
**Cuadro 4.3: Análisis funcional de variancia de la infiltración básica del suelo, por efecto de la aplicación de estiércol y dolomita.**

F.V.	G.L.	SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	0.07769	18.92**	0.01014	2.81 ns	0.0103681	6.44*
<b>Dolomita</b>	1	0.02880	7.01*	0.00125	0.35 ns	0.0036125	2.24 ns
<b>Estiércol</b>	2	0.16336	39.78**	0.02097	5.81 *	0.0208097	12.92**
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	0.01647	4.01 ns	0.00375	1.04 ns	0.0033042	2.05 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>							
<b>F. Lineal</b>	1	0.28167	68.60 **	0.04167	11.54**	0.0100042	6.21*
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.00056	0.14 ns	0.00056	0.15 ns	0.0007347	0.45 ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>							
<b>F. Lineal</b>	1	0.07707	18.77 **	0.00667	1.85 ns	0.0352667	21.90**
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.00036	0.09 ns	0.00056	0.15 ns	0.0022222	1.38 ns
<b>Error</b>	12	0.00411		0.0036		0.0016097	
<b>Total</b>	17						
		CV = 9.39%		CV = 12.95%		CV = 10.21%	



El movimiento de agua en los suelos depende en gran medida del diseño y la perdurabilidad del espacio poroso y sobre estos influyen la forma, tamaño, distribución y estabilidad de los agregados (Dexter, 2004). De otro lado la estabilidad de los agregados están influenciados por el contenido de materia orgánica o más exactamente la naturaleza de los productos de la descomposición, además de la textura, tipo de minerales asociados con los coloides (Ca, Al, etc.), plantas, microorganismos o la naturaleza de la floculación microbiana (los micelios y las sustancias gomosas producidas por las bacterias favorecen la agregación) y manejo (Brady y Weil, 2008; Ojeda et al., 2008; Ramírez y Acosta, 2009).

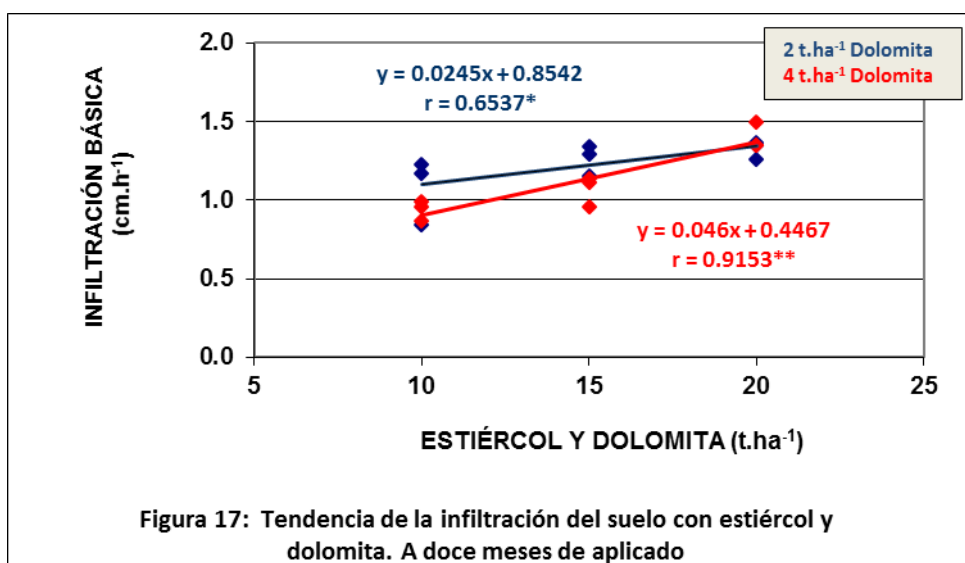
Los resultados obtenidos se encuentran enmarcados en este contexto y básicamente con la proporción de agregados en vista de que la mayor tasa de infiltración está relacionada con la mayor proporción de agregados como los estables en agua, presentes en mayor proporción en E-2D respecto a E-4D. Los agregados resistentes al agua permiten una mayor velocidad de infiltración y son más resistentes ante la erosión (Kay y Angers, 2001) por ello inclusive se les emplea como indicador de calidad del suelo (Aravena et al., 2007). Respuestas similares fueron reportados por Reddy (1991) quien al aumentar 10 t.ha<sup>-1</sup> de abono verde a un suelo franco arenoso, aumentó la tasa de infiltración de agua; Pikul y Allmaras (1986) mencionados por Martínez et al. (2008) en un Typic Haploxerol manejado por 55 años encontraron un aumento en la conductividad hidráulica a saturación en los tratamientos con mayor aporte de materia orgánica.



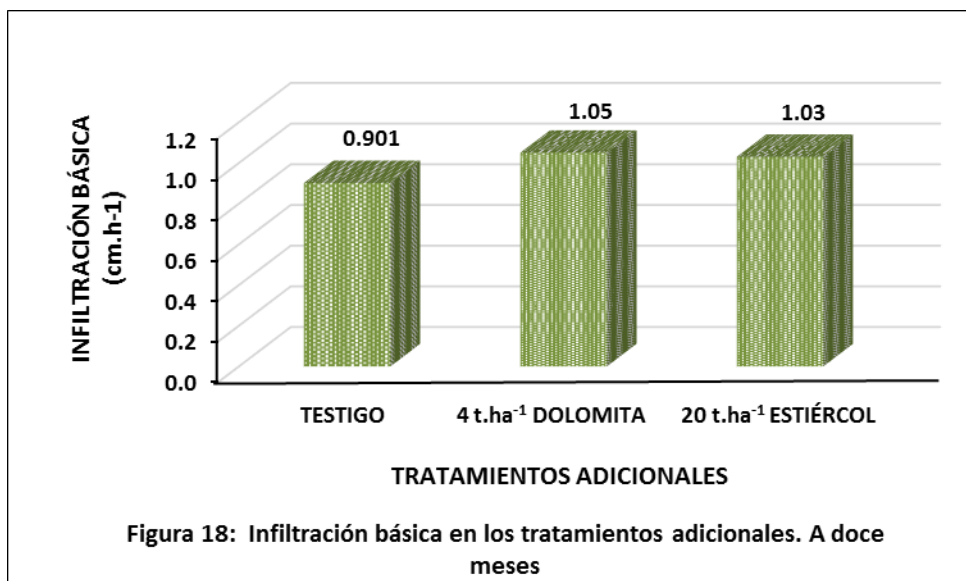
A nueve meses, los efectos de E-2D muestran respuesta lineal significativa (Figura 16). Se observa infiltración creciente hasta un valor de 1.6 cm.h<sup>-1</sup> con la aplicación de 20E-2D.

A doce meses, continúan las tendencias lineales (Figura 17) sin diferencia significativa entre E-2D y E-4D. Se observa que la infiltración ha disminuido ligeramente respecto a los obtenidos en el periodo anterior, llegando a 1.32 cm.h<sup>-1</sup> al aplicar 20E-2D y prácticamente se mantiene en 20E-4D (1.40 cm.h<sup>-1</sup>), no obstante la tendencia de la infiltración es

igualmente creciente con los niveles de estiércol. Estos cambios provocados en la infiltración probablemente obedezcan a las transformaciones de las que es objeto la materia orgánica, de manera que al principio al estar fresca, determina una fase inicial donde los agentes metabólicos cementantes fueron en aumento asociados a su descomposición con efecto positivo en la macroagregación, pero con el tiempo la descomposición continúa y al no ser repuesta también los agregados se ven alterados (Doran y Parkin, 1994) afectando a los poros y por ende a la infiltración del suelo, que disminuye.



Al disminuir la materia orgánica entre los agregados al cabo de doce meses de aplicado, los macroagregados presentes simplemente sufren el proceso del estallido, disminuyendo el tamaño de agregados en favor de los denominados microagregados (Six et al., 2000) microestructuras que de acuerdo a Dexter (2004) son las responsables de la mayoría de las propiedades físicas del suelo, las que son necesarias para el funcionamiento adecuado del suelo en agricultura y medio ambiente; este hecho es muy importante debido a que en el tiempo disminuye la materia orgánica pero quedan estables los microagregados -atrapando a otras fracciones orgánicas- que continúa favoreciendo a la tasa de infiltración. Sin embargo al parecer el nivel de materia orgánica tendría que ser el suficiente - como en este caso- solamente a 20 t.ha<sup>-1</sup> se da ese comportamiento, de lo contrario se altera los agregados, la porosidad, infiltración, como sucede en los tratamientos con 10 y 15E.



La Figura 18 muestra la tasa de infiltración básica con el aporte de sólo dolomita (4t.ha<sup>-1</sup>) que aumenta ligeramente respecto al testigo y prácticamente similar al tratamiento que recibió solo 20 t.ha<sup>-1</sup> de estiércol. Tal como se mencionó líneas arriba en este tratamiento existe mayor proporción de agregados estables en alcohol y benceno (Figura 10) atribuidos al contenido de calcio aportado. Un trabajo similar a éste, fue reportado por Keren (1996) quien al aplicar 3 t.ha<sup>-1</sup> de yeso sobre suelo salino recupero la estructura del suelo, por un aumento en los agregados estables en alcohol en presencia de calcio, lo que a su vez permitió el incremento del nivel de percolación de 7,8 a 18,5 cm h<sup>-1</sup>.

#### **4.1.4 RELEVANCIA DE LA MEJORA DE INDICADORES FISICOS EN LOS ASPECTOS SOCIOECONOMICO Y AMBIENTALES**

El uso de materias orgánicas como el estiércol influye en las características físicas de los suelos mejorando su desempeño, cometido que se ve aumentado cuando se incorpora estiércol junto a dolomita. Así tenemos a la densidad aparente, cuyo valor es de suma importancia cuando de evaluar la compactación se trata. También están los agregados que se ven favorecidos por un aumento de tamaño y fundamentalmente por la estabilidad, esto último repercute en la distribución y tamaño de poros. Poros que tienen la función de retener, almacenar y regular agua (Amézquita 2004). La estrecha relación de estabilidad estructural con la materia orgánica -como se demuestra en el presente trabajo- cumple un

papel fundamental en la sostenibilidad del suelo, por todo lo antes mencionado y por su repercusión en la resistencia a la erosión. De este modo, se estaría favoreciendo a los aspectos socioeconómicos, dado que al procurar la mantención de agua útil, favorecer la infiltración y/o drenaje y evitar la erosión, permitirá proteger los recursos suelo, agua y biodiversidad para las futuras generaciones. De otro lado en este aspecto tendría que incluirse la valoración de la calidad del suelo por consiguiente calidad del cultivo, pues tan solo en modelos empíricos de crecimiento económico se han incluido variables medioambientales (Castro, 2009). Por cuanto el aumento de la productividad, como resultado de las mejoras antes mencionadas se traducirá en un avance de las economías, en este caso de la población altoandina, donde la degradación y especialmente la erosión es un fenómeno complejo que alcanza a niveles de 33.5% y las posibilidades de acceder al uso de estiércol, es factible.

El buen manejo del estiércol estimulará los efectos positivos sobre el medio ambiente. La disminución del lavado de nutrientes producto de la retención y almacenamiento de agua, la desnitrificación, tienen efectos favorables (Cairo y Fundora, 1994). Un efecto positivo indirecto es que el uso del estiércol puede ahorrar recursos no renovables usados en la producción con fertilizantes inorgánicos.

Aun cuando las evaluaciones en invernadero no reflejen con precisión a las condiciones de campo y que los resultados puedan ser diferentes producto de la mayor o menor intensidad de los procesos, las evaluaciones preliminares en condiciones controladas resultan de valor y pueden ser puntos de partida para su aplicación en campo.

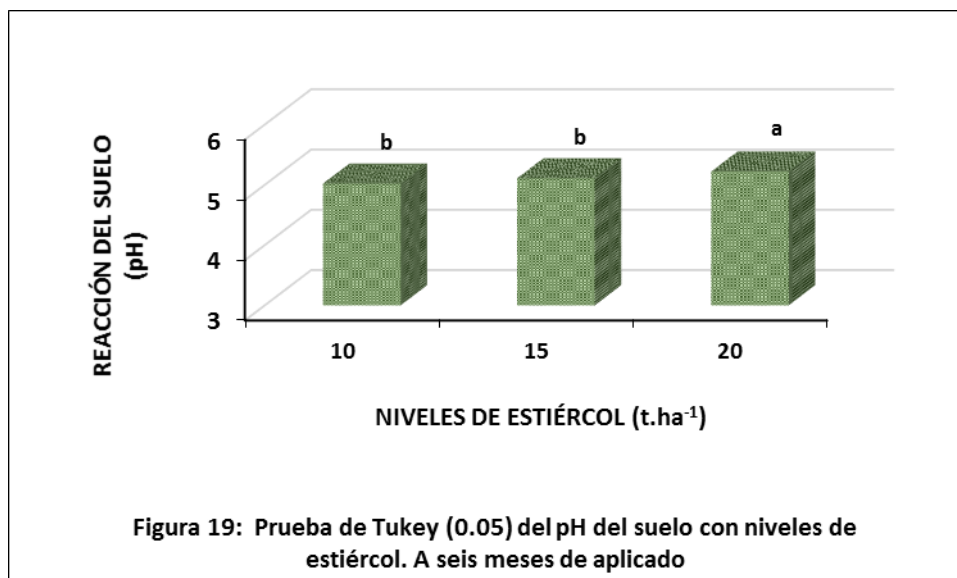
## **4.2 INDICADORES QUÍMICOS**

### **4.2.1 REACCIÓN DEL SUELO (pH)**

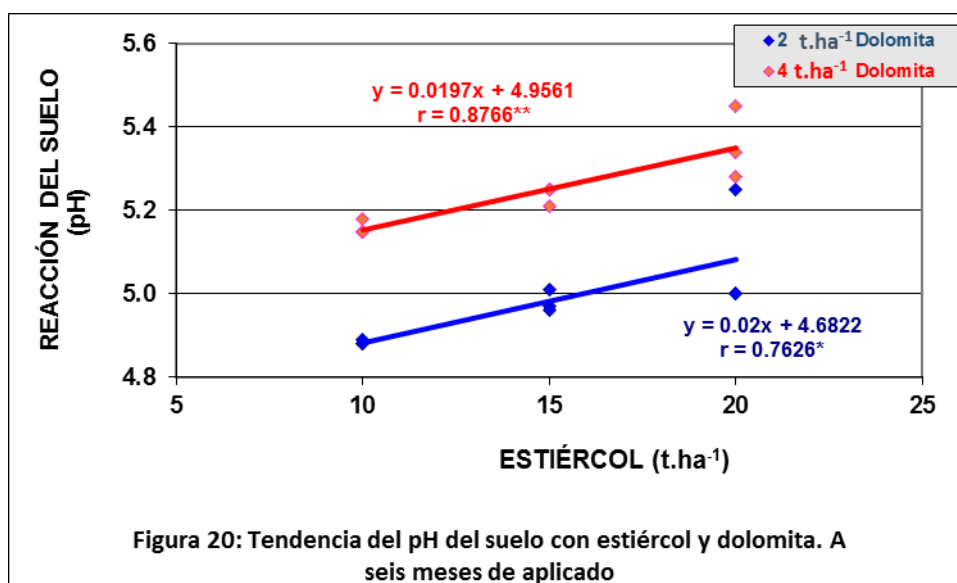
El aporte de estiércol y dolomita muestran diferencias significativas en su efecto sobre la reacción del suelo durante los seis, nueve y doce meses de aplicados (Cuadro 4.4). La Figura 19, muestra la prueba de Tukey (0.05) del efecto del estiércol en los primeros seis meses, donde la dosis más alta de E -en promedio de dolomita- permite el mayor valor de pH.

**Cuadro 4.4: Análisis funcional de variancia del pH del suelo, por efecto de la aplicación de estiércol y dolomita.**

F.V.	G.L.	SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	0.088867	17.87 **	0.046293	4.72*	0.042387	7.28 **	0.245796	9.29**
<b>Dolomita</b>	1	0.325356	65.43**	0.118422	12.07**	0.164356	28.23**	0.961422	36.34**
<b>Estiércol</b>	2	0.059317	11.93 **	0.047617	4.85*	0.017550	3.01*	0.066289	2.50ns
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	0.000172	0.03 ns	0.008906	0.91ns	0.006239	1.07ns	0.067489	2.55ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.060000	12.07 **	0.096267	9.81**	0.038400	6.60*	0.000600	0.02 ns
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.000022	0.01 ns	0.000356	0.04ns	0.000089	0.02 ns	0.016200	0.61 ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.058017	11.67 **	0.015000	1.53ns	0.003750	0.64ns	0.240000	9.07 *
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.000939	0.19 ns	0.001422	0.14ns	0.005339	0.92ns	0.010756	0.40 ns
<b>Error</b>	12	0.004972		0.009811		0.005822		0.026456	
<b>Total</b>	17								
		CV = 1.37 %		CV = 1.96%		CV = 1.48%		CV = 2.93%	

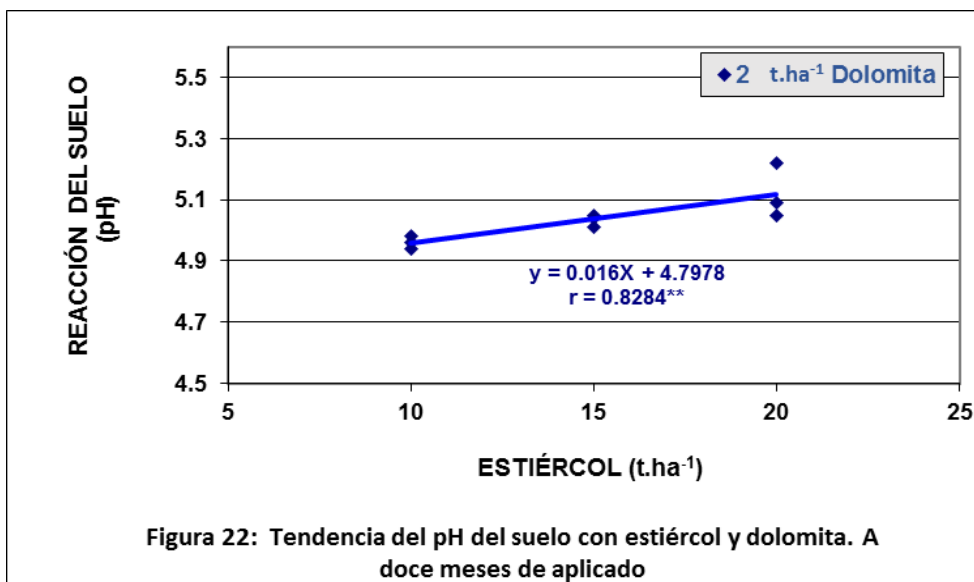
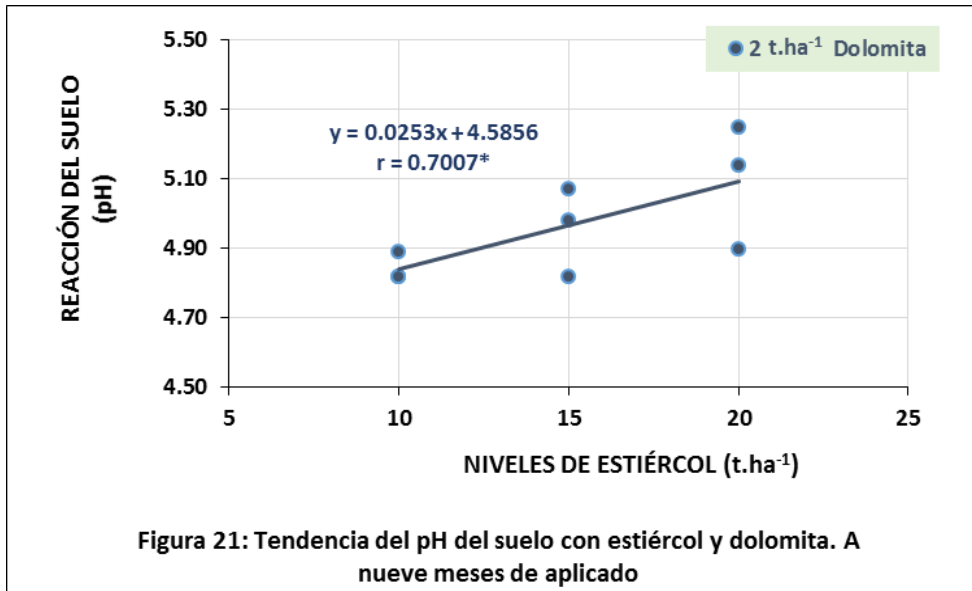


La Figura 20 muestra las tendencias lineales cuando se aplica estiércol con 2 y 4 t.ha<sup>-1</sup> de dolomita y se observa que la incorporación de cada unidad de estiércol, dentro de los límites estudiados incrementa el pH del suelo hasta en un promedio de 0.02 unidades. De manera que durante los seis primeros meses de aplicada las enmiendas la reacción del suelo cambió de 4.5 a 5.08 con 20E-2D y hasta 5.36 con 20E-4D; es decir un incremento de 0.58 y 0.85, respectivamente.





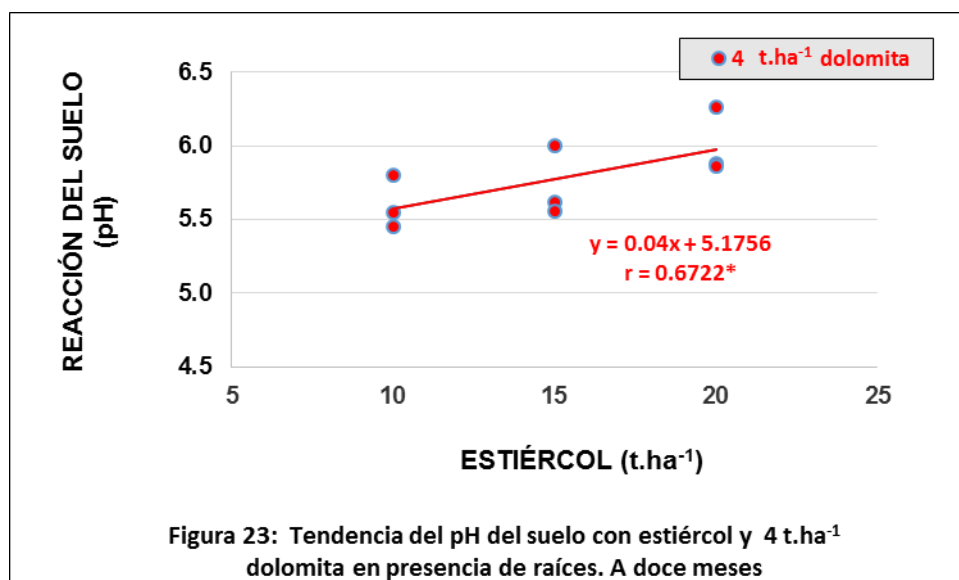
A los nueve meses continúa la tendencia creciente del pH en ambas dosis de dolomita, pero con tendencia lineal significativa solamente entre los tratamientos que recibieron E-2D (Cuadro 4.4 y Figura 21).



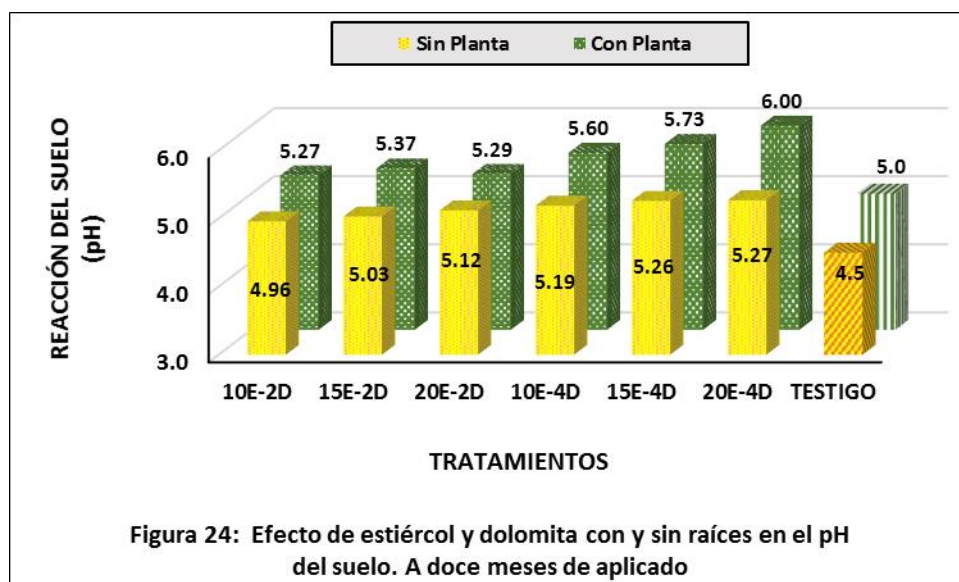
Al año se obtiene respuesta altamente significativa de tendencia lineal positiva en E-2D (Figura 22), donde el incremento de pH es hasta en 0.62 unidades en relación al testigo al

aportar 20 t.ha<sup>-1</sup> de estiércol (Figura 24). Similar resultado fue reportado por Gil et al. (2008) al cabo de un año de aplicar compost de deyecciones ganaderas al suelo.

La materia orgánica influye en las diferentes reacciones químicas y biológicas, provocando cambios en el suelo; también sus grupos activos permiten reacciones con el aluminio del suelo permitiendo su complejación; estos efectos complementan al que produce la dolomita, que aporta bases cambiables induciendo a cambios en el pH, o lo que es lo mismo, incrementando el valor. Resultados similares fueron reportados por Wong et al. (2000) luego de 14 días de incubado el suelo con restos de poda, aumentó el pH de 4.8 a 5.8 en oxisol y 4.1 – 6.5 en ultisol. Utilizando enmienda calcárea Sánchez (2008) encontró que la aplicación de 2.5 t.ha<sup>-1</sup> de dolomita incrementó el pH del suelo en 0.2 y con 5 t.ha<sup>-1</sup> en 0.39. Empleando una fuente orgánica diferente Salazar et al. (2009) halló que el pH del suelo subió de 7.02 a 8.0 con la incorporación de 30 t.ha<sup>-1</sup> de lodo o residuo de depuradora. Finalmente empleando microorganismos con el mismo objetivo, Acosta y Ramírez (2009) encontraron un incremento importante de pH y P-disponible, después de incubar 120 días con 109 unidades formadoras de colonia de *Bacillus subtilis*.



A doce meses el aporte de E-D -en presencia de raíces- provoca mayores incrementos de pH respecto a los tratamientos sin plantas, con tendencia lineal significativa (Figura 23) tan solo cuando se aplica E-4D.

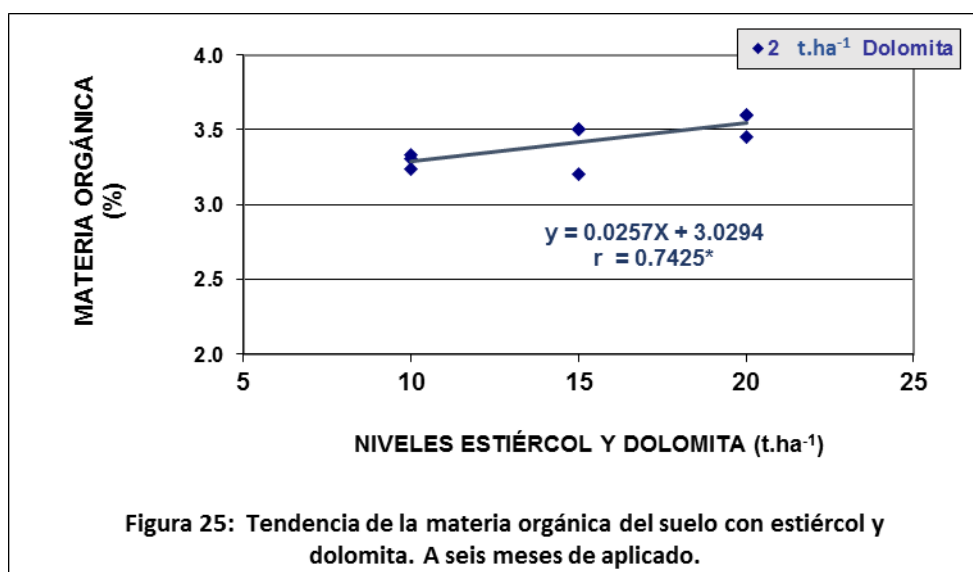


Las raíces de la asociación de pasturas, poseen efectos más notorios, de manera que los incrementos en relación al testigo fueron del orden de 0.79 y 1.50 unidades de pH con el aporte de 20E-2D y 20E-4D respectivamente. Se aprecia que tan solo la presencia de raíces durante un año en ese medio edáfico se incrementó el pH en 0.5 unidades (Figura 24) respecto al testigo (4.5). Este hecho confirma que las raíces -máxime cuando son abundantes- como sucede con las raíces de las pasturas empleadas; poseen un efecto positivo en el incremento de pH del suelo. Se estima que afectan a aproximadamente 1 mm circundante a la raíz, por ello considerando el volumen y cantidad de raíces; el efecto es apreciable. Lo cual implica que al incorporar E-D en presencia de plantas, se produjeron reacciones con mayor diligencia, probablemente por las excreciones radiculares que indujeron a reacciones de quelación, disolución o bioquímicas en presencia de microorganismos que permitieron aumentar el pH del suelo. Los resultados concuerdan con los obtenidos por otros como Caires et al. (2002) quienes aplicando 4.5 t.ha<sup>-1</sup> de dolomita al suelo de reacción acida (pH = 4.6) al cabo de 2 años de evaluación en presencia de raíces de trigo y otros residuos de plantas, encuentra que el Al disminuye de 8 cmol(+).kg<sup>-1</sup> a un promedio de 3.5 cmol(+).kg<sup>-1</sup> junto a un incremento del pH hasta

alcanzar 5.1. Otras investigaciones como las de Franchini et al. (1999) y Miyazawa et al. (1993) demuestran que la disminución del Al intercambiable en el suelo causada por el material orgánico de la planta, está relacionada con el aumento del pH y la complejación orgánica.

#### 4.2.2 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

A seis meses de incorporado el E existe efecto significativamente diferente (95%) sobre la materia orgánica del suelo (Cuadro 4.5) con tendencia lineal significativa ( $Y = 0.025X + 3.02$ ,  $r = 0.7425^*$ ) cuando se aporta junto a 2D (Figura 25). Donde por cada tonelada adicional de estiércol se incrementa en 0.025 unidades el contenido de materia orgánica, hasta alcanzar el nivel de 3.45% con 20E-2D.

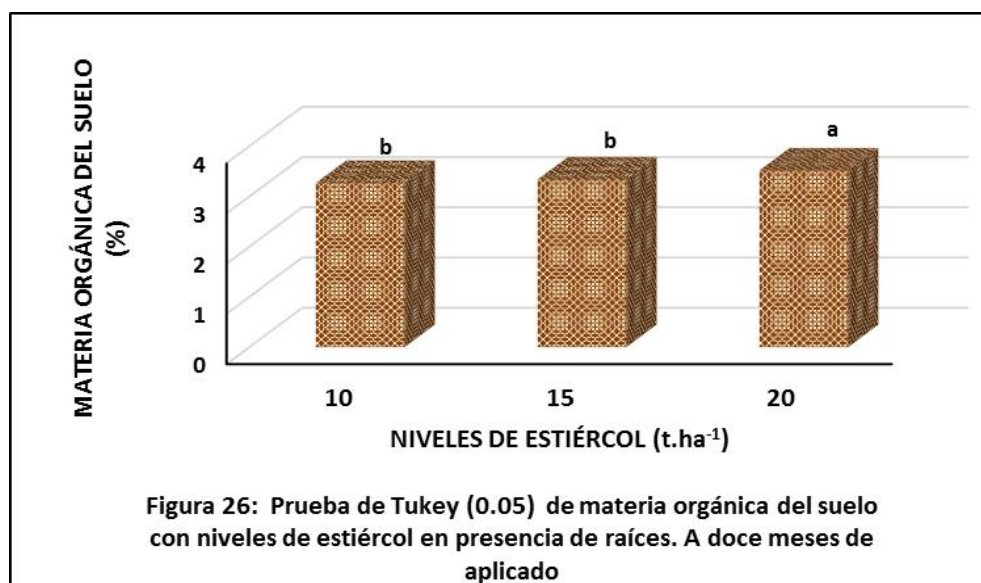


Posteriormente hasta el año de evaluación los porcentajes de materia orgánica fácilmente oxidable no se diferencian, sin embargo muestran en general tendencias crecientes con el aporte de estiércol, aun cuando la descomposición de carbono de bajo peso molecular fue rápidamente transformado por los microorganismos para convertirlos a compuestos orgánicos de mayor peso molecular, favorecidos por el efecto del pH.

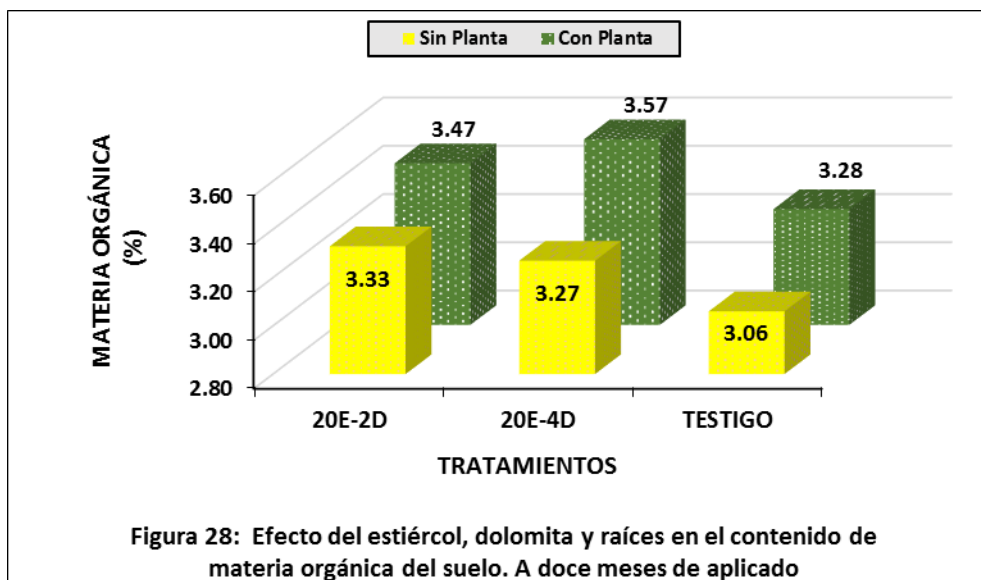
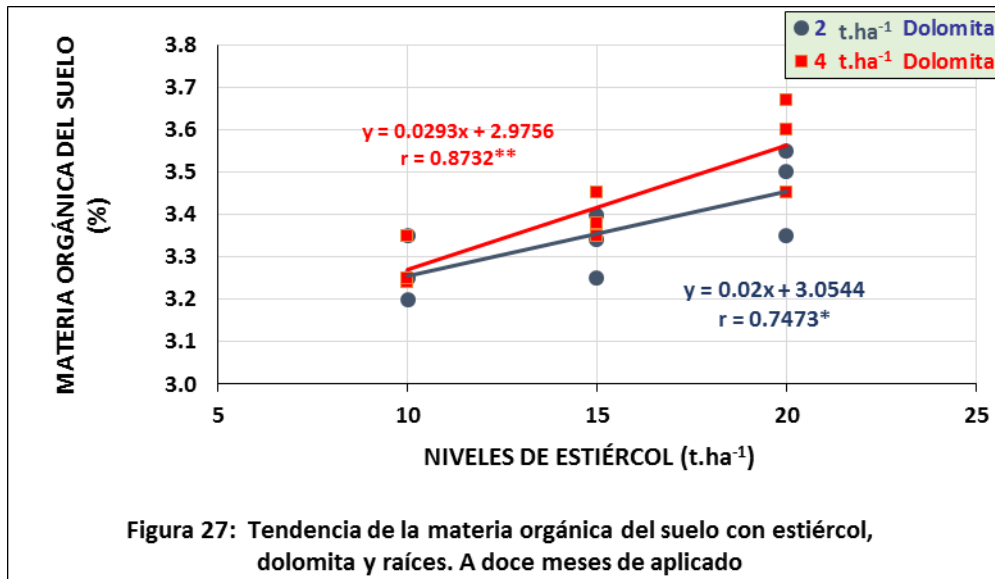
**Cuadro 4.5: Análisis funcional de variancia de la materia orgánica del suelo, por efecto de estiércol y dolomita.**

F.V.	G.L.	SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fe	C.M.	Fe	C.M.	Fe	C.M.	Fe
<b>Tratamientos</b>	5	0.029502	2.56 ns	0.020222	0.75 ns	0.0131467	1.58 ns	0.0421567	3.55 *
<b>Dolomita</b>	1	0.020000	1.73 ns	0.008889	0.32 ns	0.0043556	0.52 ns	0.0168056	1.41 ns
<b>Estiércol</b>	2	0.057039	4.95 *	0.042639	1.58 ns	0.0284667	3.42 ns	0.0937167	7.88 **
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	0.006717	0.58 ns	0.003472	0.13 ns	0.0022222	0.26 ns	0.0032722	0.28 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.098817	8.58 *	0.015000	0.55 ns	0.0280167	3.36 ns	0.0600000	5.05*
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.000939	0.08 ns	0.020000	0.74 ns	0.0046722	0.56 ns	0.0026889	0.23 ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.026667	2.31 ns	0.050417	1.87 ns	0.0280167	3.36 ns	0.1290667	10.86**
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.001089	0.09 ns	0.006806	0.25 ns	0.0006722	0.08 ns	0.0022222	0.19 ns
<b>Error</b>	12	0.011522		0.026944		0.0083222		0.0118889	
<b>Total</b>	17								
		CV = 4.06 %		CV = 5.02%		CV = 2.82%		CV = 3.22%	

Los cambios en el nivel de materia orgánica del suelo señalado por diversos investigadores se producen en diferentes condiciones de clima, suelo y tipo de material orgánico, sin embargo en la mayoría de ellos, si no es en todos los casos, la tendencia es a aumentar con el aporte de cualquier fuente orgánica, así Salazar y Trejo (2009) concluyen que a mayor estiércol de bovino empleado ( $130 \text{ t.ha}^{-1}$ ) puede incrementar hasta en 5% la materia orgánica del suelo, Piw et al. (2012) encuentra que la aplicación de deyecciones ganaderas, de aves y vermicompost a suelo aluvial de trópico, se traduce en incrementos considerables en el C-orgánico. Los residuos aplicados al suelo abarcan también a los biosoles (lodos de depuradora) con los que se incrementa la materia orgánica, tal como reporta Tamariz et al. (2009) en México y Salazar et al. (2009) en Chile. Alvear et al. (2005) encuentran que una sucesión vegetal genera cambios en la materia orgánica y en el crecimiento de la población microbiana. Finalmente Paustian et al. (1997) reportaron relaciones lineales positivas entre la cantidad de residuos entrados al suelo y el nivel de materia orgánica del mismo.



En presencia de raíces, a doce meses, el efecto del estiércol en el contenido de materia orgánica es estadísticamente significativo. La Figura 26 muestra que con 20E -en promedio de dolomita- la materia orgánica, es mayor respecto a los otros niveles que resultan estadísticamente iguales. Las tendencias de la materia orgánica del suelo con el aporte de estiércol en presencia de raíces son lineales y significativas (Figura 27) sin diferencia estadística entre sí.

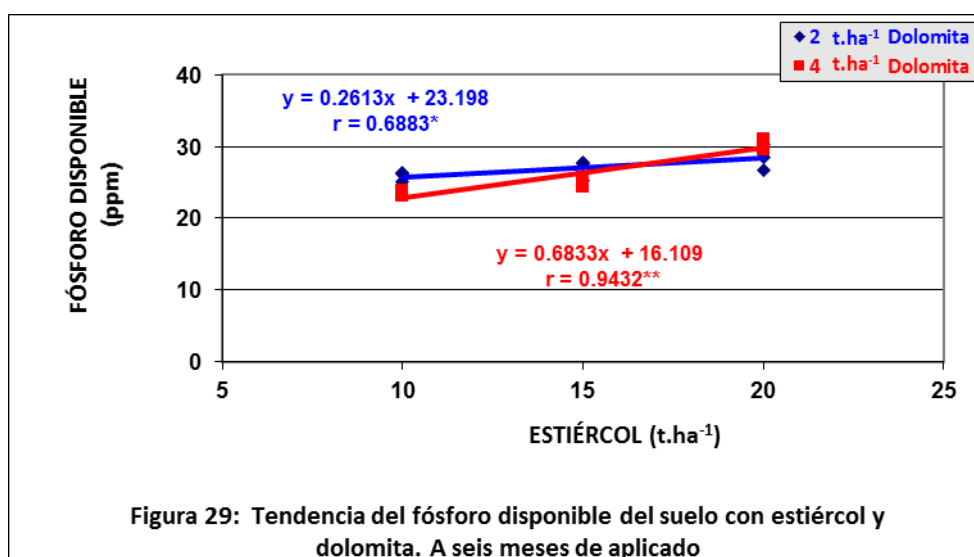


Las raíces en todos los casos permiten mayor dinámica en las diferentes reacciones del suelo y alcanzan a modificar su entorno más próximo como la rizósfera, tales cambios podrían ser en pH, nitrógeno, actividad microbiana, materia orgánica, etc. Así las raíces de la asociación de pasturas provocan estos cambios que se traducen en este caso, en el nivel de materia orgánica que es creciente con el nivel de E empleado. En la Figura 28, se observa que el contenido de materia orgánica del suelo resulta mayor con la adición de cualquier nivel de E-D en relación al testigo. Otro trabajo concordante con lo obtenido es el de Sierra (2005) quién refiere que el aporte de raíces de pastos pueden ser de 1120 a

2240 Kg de materia orgánica/ha/año, a 15 centímetros del suelo. Según Arshad et al. (2004) la rotación de cultivos y la práctica del abonado orgánico tienen impacto positivo sobre el carbono orgánico del suelo total así como en el carbono biomásico.

### 4.2.3 FÓSFORO DISPONIBLE DEL SUELO

El aporte de estiércol y dolomita al suelo afecta de manera diferente el contenido de fósforo disponible. Se observa en el Cuadro 4.6 la diferencia altamente significativa en la interacción ExD a seis meses de aplicados, sin diferencia en las dosis de dolomita y con tendencia lineal tanto en 2D como en 4D, como se muestra en la Figura 29, donde se observan además pequeños cambios por cada unidad de estiércol aplicado, con una ligera superioridad cuando se aporta 20E-4D respecto de 20E-2D hasta alcanzar 30.37 y 28.53 ppm de P, respectivamente. La respuesta obedece a la presencia de la dolomita que mejora las condiciones del pH, tal como se discute en el ítem 4.2.1; lo que repercute tanto a nivel de actividad microbiana –intensificándola– así como en la solubilidad de los fosfatos nativos, que para el caso podrían ser aquellos fosfatos ligados al aluminio, en vista de que el pH original del suelo es de 4.5.



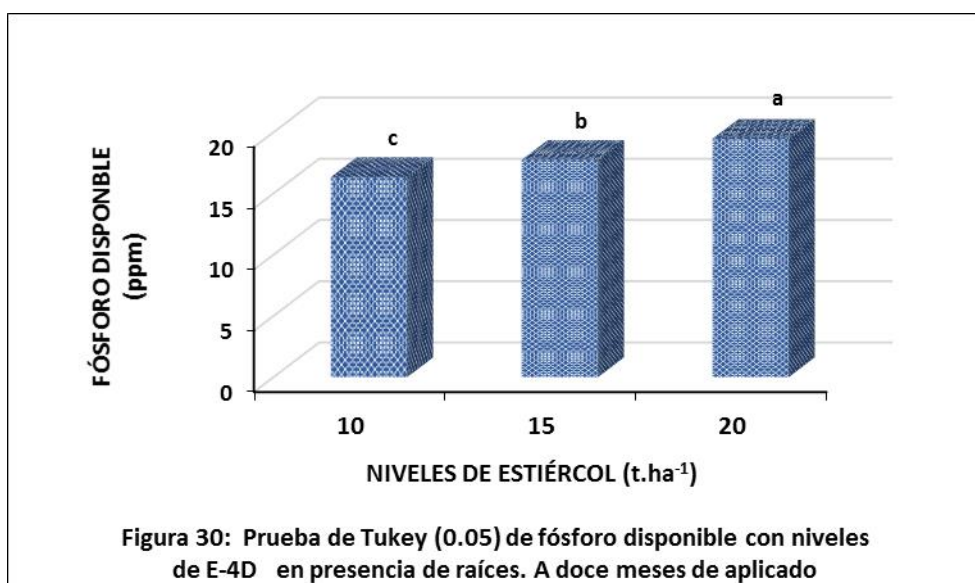


**Cuadro 4.6: Análisis funcional de variancia del fósforo disponible del suelo, por efecto del estiércol y dolomita.**

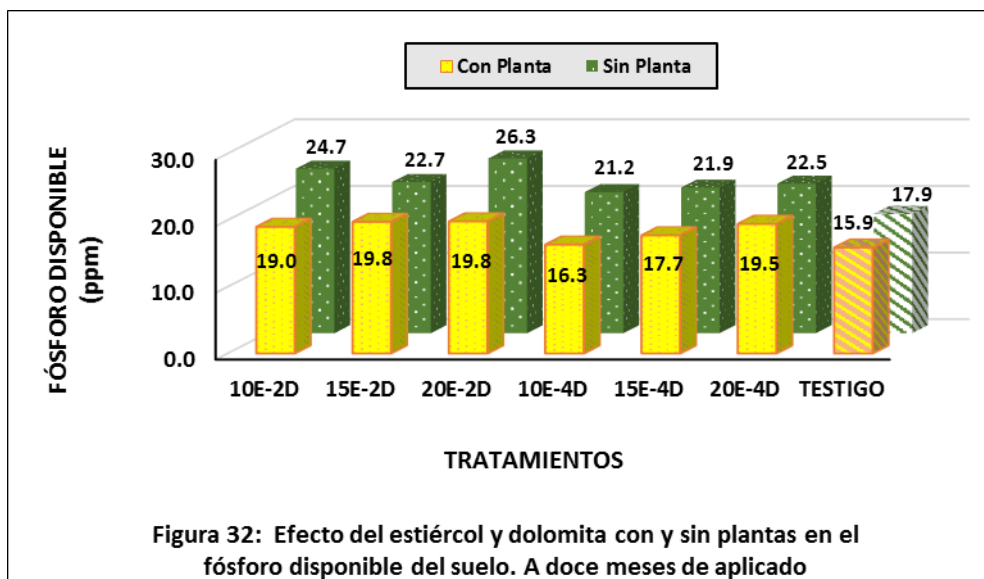
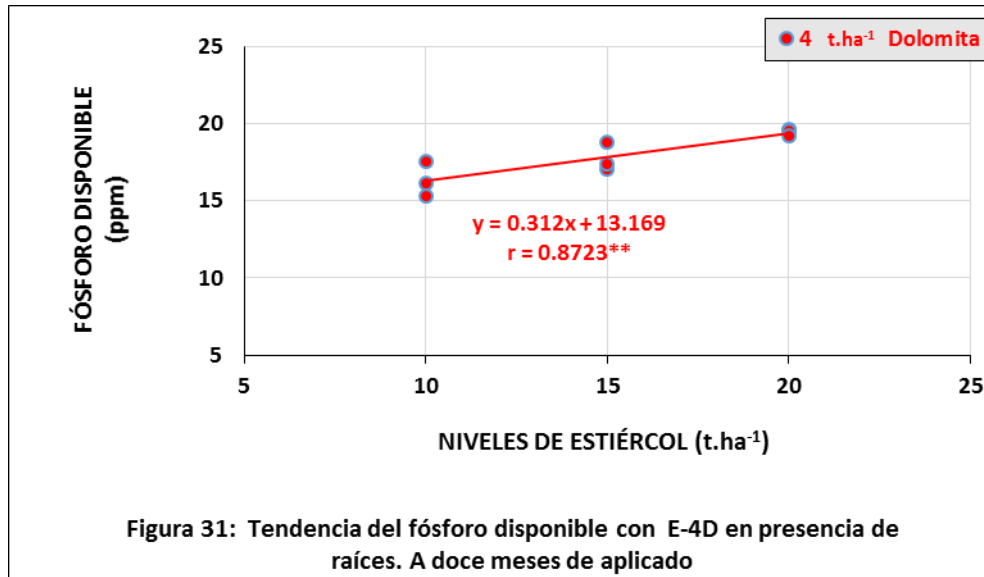
F.V.	G.L.	SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	17.908659	11.18 **	5.132312	0.90 ns	10.885543	1.13 ns	5.743636	4.45*
<b>Dolomita</b>	1	1.638050	1.02 ns	4.042272	0.71 ns	33.048450	3.43 ns	12.86936	9.98*
<b>Estiércol</b>	2	36.784422	22.98 **	7.011622	1.23 ns	6.757617	0.70 ns	5.795906	4.49*
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	7.168200	4.48 *	3.798022	0.67 ns	3.932017	0.41 ns	2.128506	1.65 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	10.244267	6.40*	16.766817	2.95 ns	3.603750	0.37 ns	0.976067	0.76 ns
<b>F. Cuadrática</b>	1	1.258756	0.78 ns	0.806450	0.14 ns	15.290450	1.59 ns	0.217800	0.17 ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	70.041667	43.76 **	1.316017	0.23 ns	2.483267	0.26 ns	14.601600	11.32**
<b>F. Cuadrática</b>	1	6.360556	3.97 ns	2.730006	0.48 ns	0.001800	0.0002 ns	0.053356	0.04 ns
<b>Error</b>	12	1.600483		5.680644		9.625611		1.289522	
<b>Total</b>	17								
		CV = 4.74 %		CV = 9.58%		CV = 13.37%		CV = 6.07%	

Posteriormente, en el tiempo es decir a nueve y doce meses las tendencias del nutriente son a disminuir luego del primer efecto. En el trabajo de Kunes et al. (2007) se reporta que la aplicación de dolomita en suelo ácido de foresta disminuye el contenido de fósforo en el suelo. Por ello Brady y Weil (2008) refieren que el patrón de fijación de P en el suelo es un fenómeno muy complejo. En el suelo pueden existir diferentes formas de fosfato como aquellas ligadas al Fe, Al, Ca o Mg dependiendo de la reacción del suelo. Por ejemplo, en suelos ácidos son dominantes las sales de aluminio (Brady y Weil, 2008). De una parte el encalado podría aumentar el contenido del fósforo por el incremento en la reacción del suelo y la promoción de la mineralización de la materia orgánica, sin embargo por otro la adición de dolomita aumenta calcio aumentando así la probabilidad de formación de sales insolubles de Ca-fosfatos. El aumento del pH también podría promover la inmovilización del fósforo por microorganismos (Fransson et al., 1999). Por ello es difícil predecir la dinámica y los mecanismos que se producen con exactitud en el suelo.

En los tratamientos con plantas -a doce meses- el contenido de fósforo disponible es estadísticamente diferente ( $p < 0.05$ ) en los efectos simples de estiércol y dolomita (Cuadro 4.6), siendo ligeramente más concentrado el P cuando se aporta E-2D, sin alcanzar diferencia entre los niveles de estiércol, en tanto que con E-4D si existe diferencia en los niveles de E, siendo mayor con 20E-4D, tal como se observa en la prueba de Tukey (Figura 30) y la tendencia lineal significativa (Figura 31).

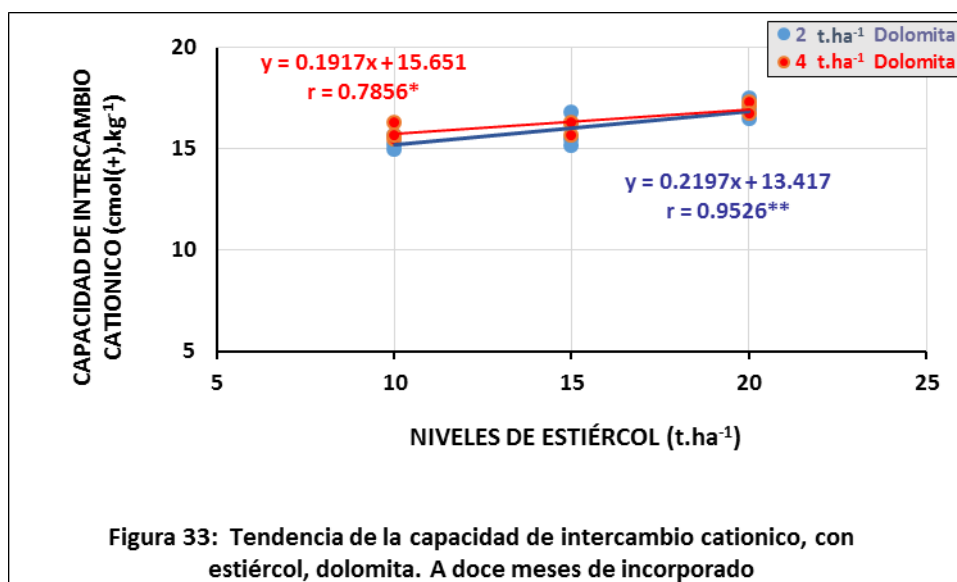


Se observa en general (Figura 32), que la concentración de fósforo disponible en este grupo de tratamientos con plantas, es menor respecto de aquellos sin plantas, diferencias que se atribuyen al consumo de P por las plantas y/o organismos.



#### 4.2.4 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DEL SUELO (CIC)

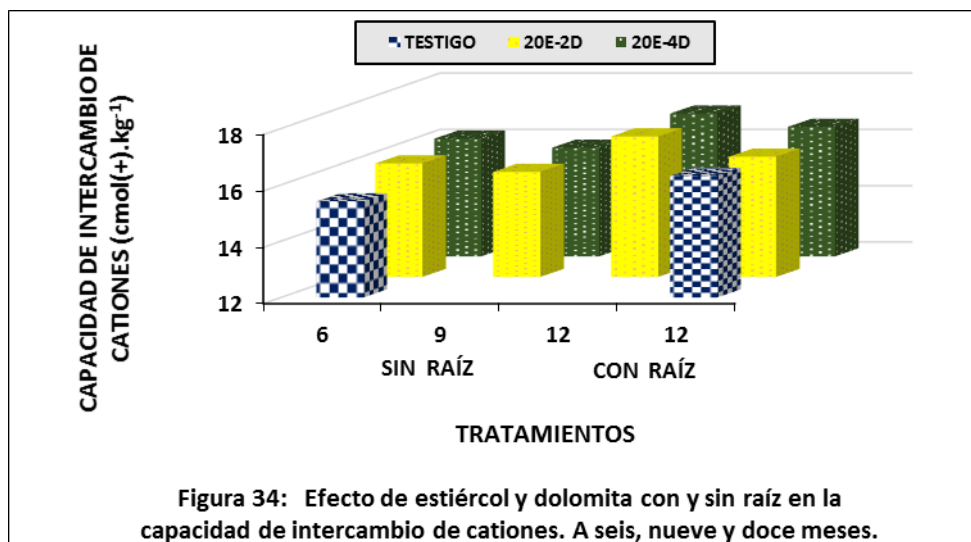
El análisis estadístico de la capacidad de intercambio de cationes muestra diferencia estadística significativa en el efecto principal Estiércol, en todos los periodos de evaluación (Cuadro 4.7). Las tendencias son lineales y significativas en los niveles de dolomita y se observa que la CIC es prácticamente similar en E-2D y E-4D (Figura 33) sin embargo respecto al testigo (15.41  $\text{cmol}(+).\text{kg}^{-1}$ ), todos los tratamientos con alguna aplicación de E-D llega a ser mayor. Si consideramos el efecto en el tiempo, se observa que al año la CIC tiende a ser mayor (Figura 34).



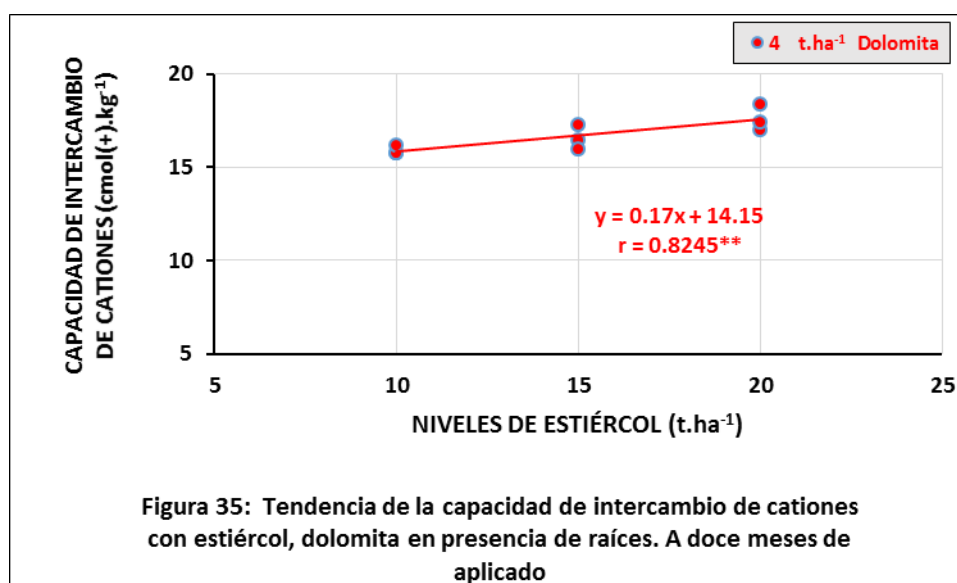
La CIC es una propiedad del suelo debido a la presencia de compuestos orgánicos (humus) e inorgánicos (arcillas); lo que implica que las variaciones de las propiedades químicas, se debe al tipo y cantidad de estos coloides. Así mismo otro factor importante es el pH, cuya variación afecta a la concentración de cargas negativas disminuyendo o incrementando, principalmente en las cargas del coloide orgánico. De manera que al haberse acrecentado el pH del suelo de 4.5 a 5.12 (20E-2D) y hasta 5.27 en el tratamiento 20E-4D, la CIC también incrementa de 15.41 a 16.99 y 17.07  $\text{cmol}(+).\text{kg}^{-1}$ , correspondientemente.

**Cuadro 4.7: Análisis funcional de variancia de la capacidad de intercambio catiónico del suelo, por efecto del estiércol y dolomita.**

F.V.	G.L.	SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	0.376942	3.42*	0.664650	2.91 ns	1.4912622	5.82 **	1.427570	3.69*
<b>Dolomita</b>	1	0.320000	2.91 ns	0.220006	0.96 ns	0.3990222	1.55 ns	2.354450	6.08*
<b>Estiércol</b>	2	0.555089	5.04 *	1.504050	6.60 *	3.4439056	13.44**	1.741550	4.50*
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	0.227267	2.06 ns	0.047572	0.21 ns	0.0847389	0.33 ns	0.650150	1.68 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	1.118017	10.15**	1.470150	6.45*	4.3180167	16.85**	0.228150	0.59 ns
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.271339	2.47 ns	0.126672	0.56 ns	0.1984500	0.77 ns	0.162450	0.42 ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.150417	1.36 ns	1.500000	6.58*	2.2570667	8.80*	4.335000	11.21**
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.024939	0.23 ns	0.006422	0.03 ns	0.2837556	1.10 ns	0.057800	0.15 ns
<b>Error</b>	12	0.110044		0.227883		0.2562278		0.386683	
<b>Total</b>	17								
		CV = 2.01 %		CV = 3.12%		CV = 3.13%		CV = 3.80%	



Dichos incrementos obedecerían, al aumento de coloides orgánicos que se produjeron durante el año de aplicadas las enmiendas y/o a la mayor expresión de cargas negativas en las fracciones minerales y orgánicas del suelo, es decir a las cargas dependientes del pH. Por ello Kunes et al. (2007) refieren que el encalado empleando dolomita además de elevar la reacción del suelo también influye en la capacidad de intercambio de cationes y la reducción del contenido de aluminio intercambiable.

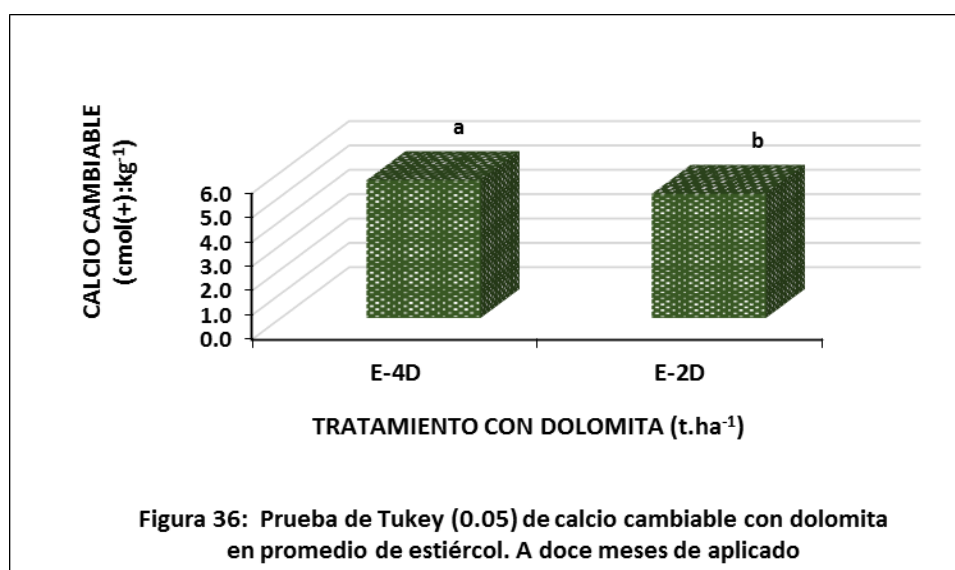


Cuando hay raíces durante todo el año, la CIC también conserva su tendencia lineal significativa en E-4D (Figura 35) y prácticamente se mantiene invariable respecto al grupo sin plantas. En todos los casos el aporte de enmiendas permite una CIC ligeramente superior al testigo.

#### 4.2.5 CATIONES CAMBIABLES

##### a) CALCIO

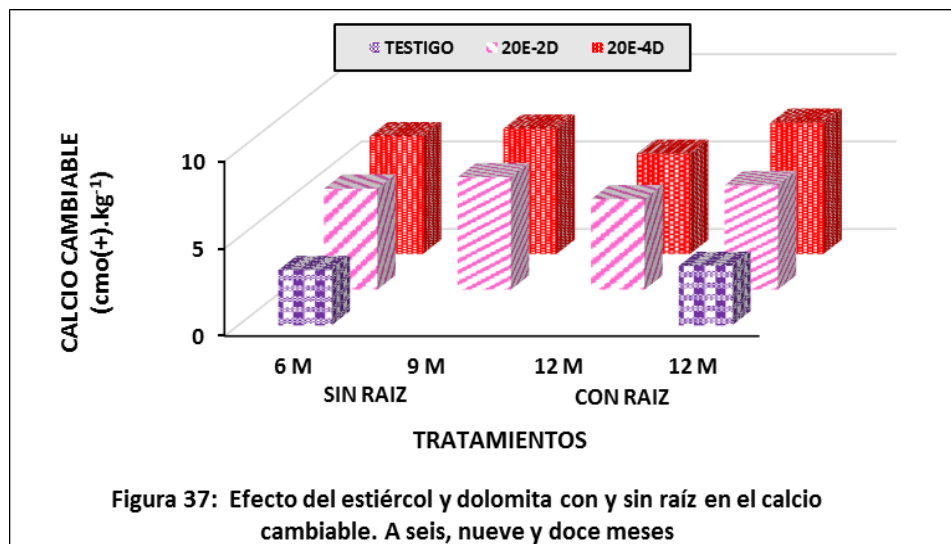
El análisis estadístico del calcio cambiante muestra diferencia estadística significativa en el efecto principal Dolomita, tanto a seis, nueve como a doce meses de evaluación (Cuadro 4.8). En todos los tratamientos sin plantas hasta el año de incorporada la enmienda, existe mayor contenido de calcio cambiante cuando se incorpora la mayor dosis de dolomita, tal como se observa en la prueba de Tukey de la Figura 36. Los resultados fueron similares a los de Kunes et al. (2007) quienes al encalar obtuvieron un masivo incremento de calcio cambiante en el suelo ácido, siendo mayor la concentración en el estrato superficial. El calcio cambiante que incrementa con el aporte de E-D -en presencia de raíces- tiene un contenido mayor, respecto a su equivalente sin plantas (Figura 37), de manera que al final del periodo de evaluación (12 meses) existe un promedio de 5.97  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  en E-2D y 7.50  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  en E-4D.



**Cuadro 4.8: Análisis funcional de variancia del calcio cambiante del suelo, por efecto del estiércol y dolomita.**

F.V.	G.L.	SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	1.304372	3.13*	1.270105	11.57**	0.294025	4.10 *	1.705600	8.53**
<b>Dolomita</b>	1	5.259606	12.61**	5.212144	47.47**	1.402254	19.55 **	6.841301	34.19**
<b>Estiércol</b>	2	0.567967	1.36 ns	0.431904	3.93*	0.031675	0.44 ns	0.742035	3.71 ns
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	0.063160	0.15 ns	0.137285	1.25ns	0.002261	0.03 ns	0.101314	0.51 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.580326	1.39 ns	0.906371	8.26*	0.021720	0.30 ns	0.263342	1.32 ns
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.145440	0.35 ns	0.140804	1.28 ns	0.000501	0.01 ns	0.031668	0.16 ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.522150	1.25 ns	0.090774	0.83 ns	0.043011	0.60 ns	1.250354	6.25 *
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.014337	0.03 ns	0.000430	0.001 ns	0.002640	0.04 ns	0.141335	0.71 ns
<b>Error</b>	12	0.417182		0.109794		0.071709		0.200070	
<b>Total</b>	17								
		CV = 10.90%		CV = 5.10%		CV = 4.97%		CV = 7.05%	

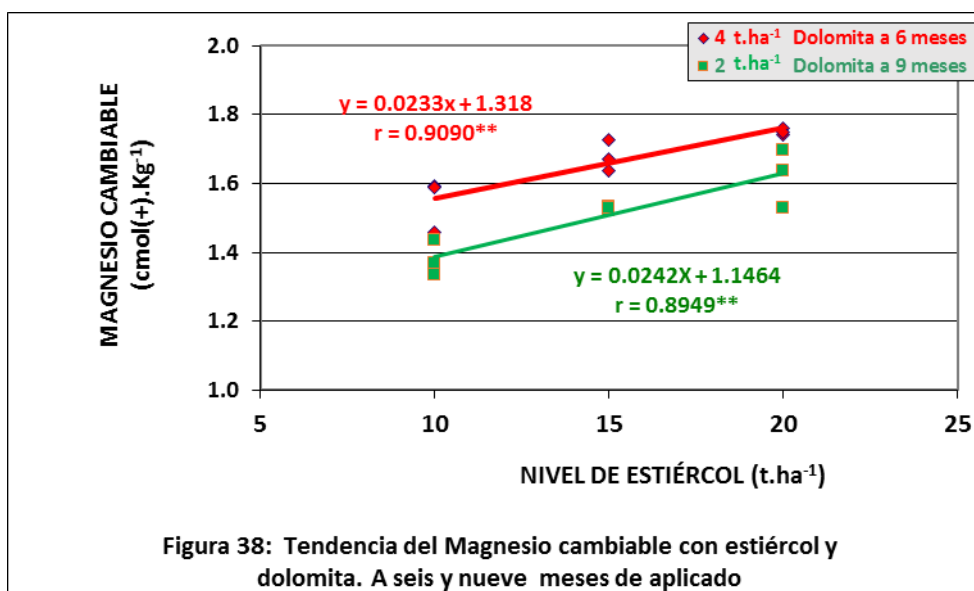




En la Figura 37 se observa además, el progreso del contenido de calcio cambiabile en los tres periodos de evaluación, se muestran ligeras variaciones en las concentraciones de calcio, de manera que luego de haber subido a niveles promedio de 6.43  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  (E-2D) y 7.16  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  (E-4D) a nueve meses, éstas concentraciones disminuyen a doce meses hasta alcanzar un promedio de 5.17  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (E-2D) y 5.73  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  (E-4D). Las variaciones en el contenido de calcio cambiabile obedecen principalmente a la velocidad de solubilización de la dolomita aplicada, el que a su vez es dependiente de un conjunto de factores entre otros del pH, la actividad de los microorganismos, cuya proporción y tipo también depende de la materia orgánica presente, la humedad, etc. Es decir son interacciones complejas entre los factores que pueden influir, no obstante también podría atribuirse a que luego de un periodo, los cationes tratan de establecer un nuevo equilibrio (Geibe et al., 2003). Estos resultados de incremento de Calcio cambiabile son similares a los reportados por Caires et al. (2002) quienes luego de dos años de encalar con 4.5  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de dolomita cálcica en suelo ácido (4.6 de pH; 25, 3.0 y 3.6  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  de calcio, magnesio y potasio, en orden) y arcilloso de textura, encontraron mayor concentración de calcio, magnesio y potasio cambiabiles en el suelo alcanzando niveles de 38, 24 y 4.8  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  respectivamente.

## b) MAGNESIO

En el ANFUVA del magnesio cambiabile (Cuadro 4.9), existe diferencia altamente significativa para el efecto principal de dolomita en los tres periodos y en ambos grupos de tratamientos (con y sin plantas). Las tendencias del efecto que se observan en algunos periodos de evaluación (seis y nueve) son lineales significativas (Figura 38), en ésta se observa que el estiércol aplicado con cualquier dosis de dolomita incrementa el contenido de magnesio cambiabile, siendo más elevado a mayor dosis tanto de estiércol como de dolomita. Respuesta que está relacionada al contenido de magnesio en la dolomita, que en este caso en particular es de 21.86% de MgO y probablemente también al contenido y actividad de microorganismos con las dosis de estiércol, quienes favorecen la disolución.

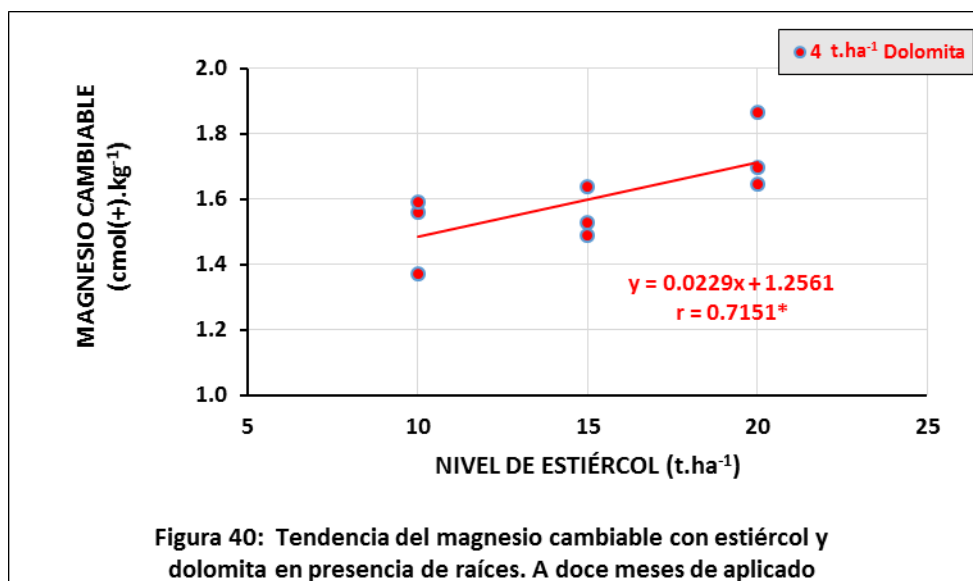
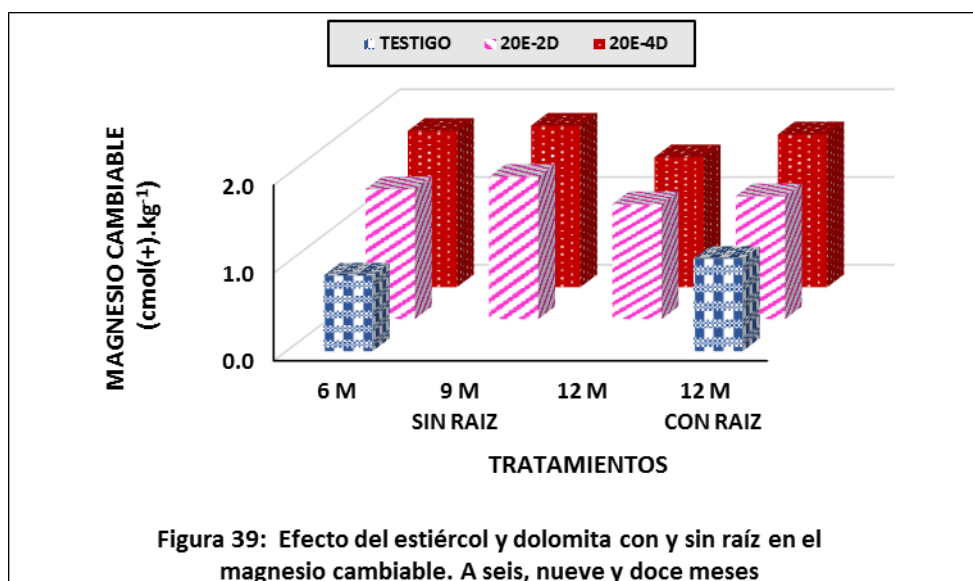


Los resultados coinciden con lo hallado por Caires et al. (2002) quienes luego de dos años de encalar con 4.5 t.ha⁻¹ de dolomita cálcica en suelo ácido encontraron mayor concentración de magnesio cambiabiles que varía de 3 a 24 cmol(+).kg⁻¹. El comportamiento de la concentración de magnesio en el tiempo es similar al que se produce en el calcio cambiabile (Figura 39), de manera que a nueve meses existe un promedio de 1.62 cmol(+).kg⁻¹ (E-2D) y 1.84 cmol(+).kg⁻¹ (E-4D) para luego disminuir a doce meses a niveles de 1.31 y 1.48 cmol(+).kg⁻¹, respectivamente, donde probablemente luego de la

**Cuadro 4.9: Análisis funcional de variancia del magnesio cambiante del suelo, por efecto de la aplicación de estiércol y dolomita.**

F.V.	G.L.	SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	0.0517186	4.09*	0.0863230	37.73**	0.039199	9.12**	0.065824	8.51 **
<b>Dolomita</b>	1	0.1899334	15.02**	0.3372942	147.41 **	0.174838	40.68**	0.237820	30.74**
<b>Estiércol</b>	2	0.0249477	1.97 ns	0.0327402	14.31**	0.009761	2.27 ns	0.031516	4.07*
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	0.0093821	0.74 ns	0.0144202	6.30*	0.000818	0.19 ns	0.014135	1.83 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.0036015	0.28 ns	0.0876042	38.29**	0.012060	2.81 ns	0.003083	0.40 ns
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.0001334	0.01 ns	0.0014761	0.65 ns	0.000660	0.15 ns	0.000356	0.05 ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.0632427	5.00 *	0.0031282	1.37 ns	0.007704	1.79 ns	0.078433	10.14 **
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.0016828	0.13ns	0.0021125	0.92ns	0.000735	0.17 ns	0.009430	1.22 ns
<b>Error</b>	12	0.1517240		0.0022882		0.004298		0.007737	
<b>Total</b>	17								
		CV = 7.23%		CV = 2.90%		CV = 4.84%		CV = 5.92%	

disolución, los cationes tratan de establecer un nuevo equilibrio (Geibe et al., 2003).



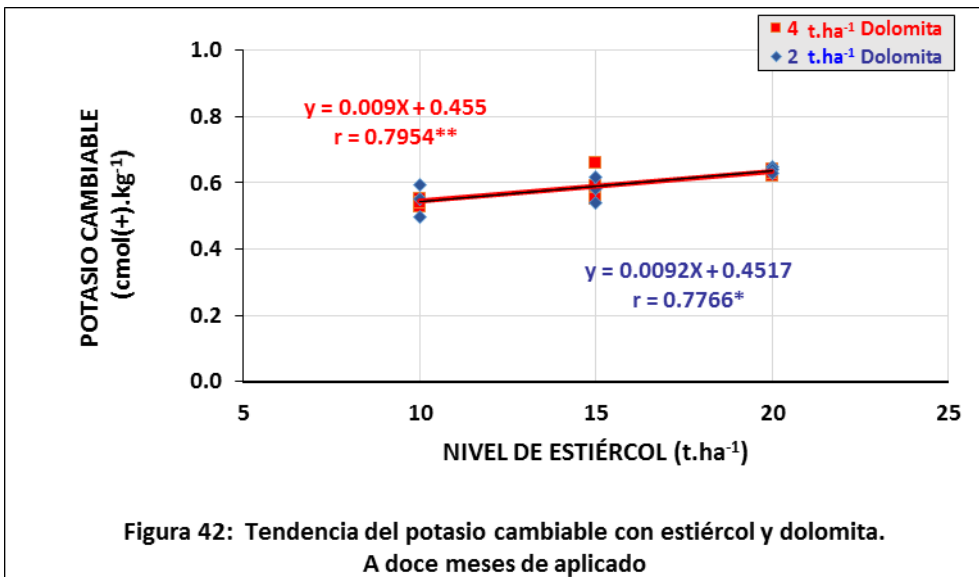
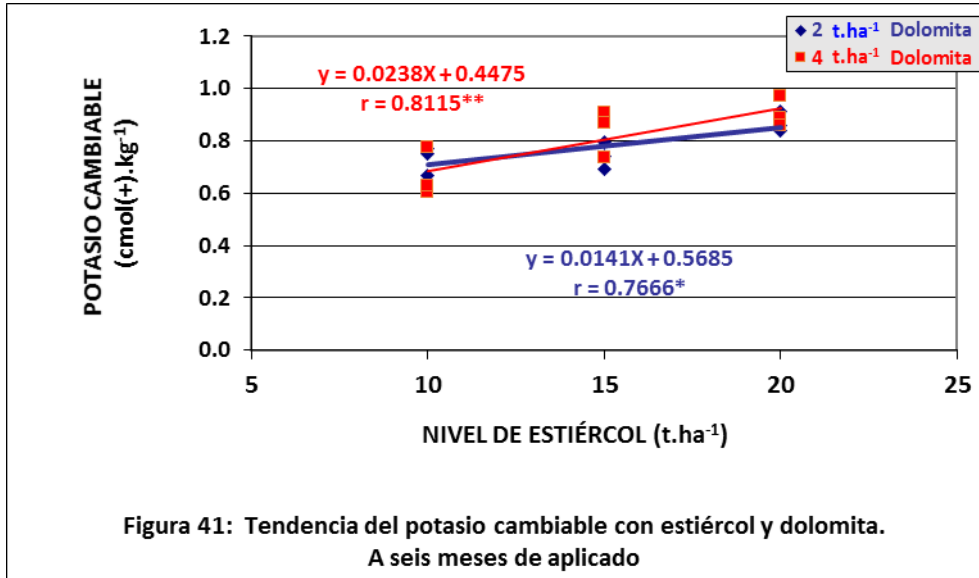
### c) POTASIO

Durante los primeros seis meses de aplicado el estiércol al suelo, el nivel del potasio cambiabile se ve significativamente ( $p < 0.01$ ) influenciado (Cuadro 4.10). La

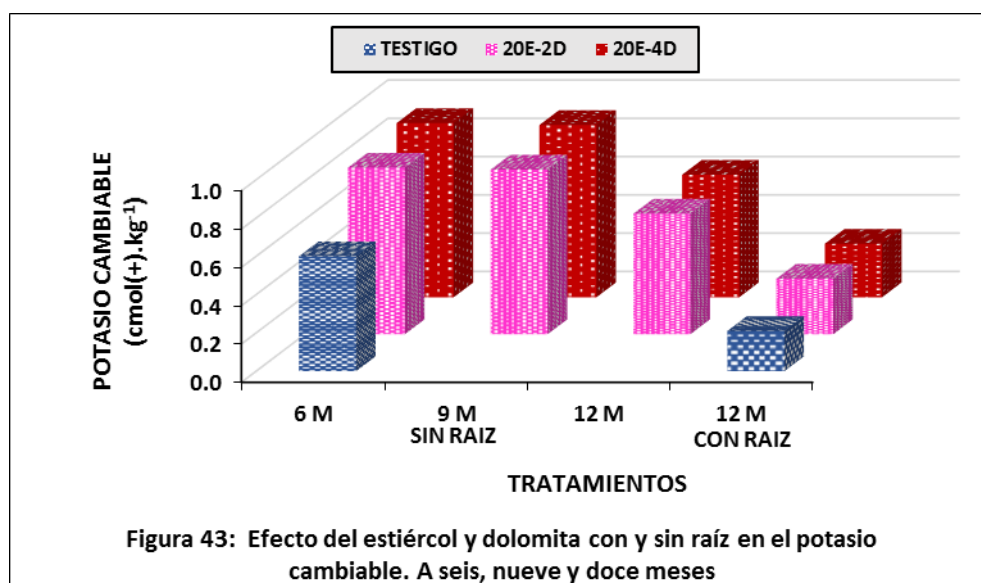
**Cuadro 4.10: Análisis funcional de variancia del potasio cambiabile del suelo, por efecto de la aplicación de estiércol y dolomita**

F.V.	G.L.	SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	0.025810	5.79*	0.011558	1.26 ns	0.005049	2.49 ns	0.002237	1.61 ns
<b>Dolomita</b>	1	0.002553	0.57 ns	0.000705	0.08 ns	0.000001	0.001 ns	0.002282	1.64 ns
<b>Estiércol</b>	2	0.054016	12.12**	0.023206	2.54 ns	0.012231	6.04 *	0.004318	3.10 ns
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	0.009233	2.07 ns	0.005335	0.58 ns	0.000391	0.19 ns	0.000133	0.10 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.029977	6.73*	0.009723	1.06 ns	0.011356	5.61 *	0.000028	0.02 ns
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.006976	1.57 ns	0.000877	0.10 ns	0.000369	0.18 ns	0.003763	2.70 ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	0.084929	19.06**	0.041218	4.50 ns	0.013139	6.49 *	0.000262	0.19 ns
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.004615	1.04 ns	0.005264	0.58 ns	0.000381	0.19 ns	0.004849	3.48 ns
<b>Error</b>	12	0.004455		0.009151		0.002024		0.001393	
<b>Total</b>	17								
		CV = 8.42%		CV = 11.61%		CV = 7.06%		CV = 14.04%	

tendencia lineal significativa del potasio cambiabile, cuando se aporta estiércol junto a 2 y 4 t.ha<sup>-1</sup> de dolomita (Figura 41), indica que prácticamente los niveles del nutriente se mantienen iguales entre las dosis de dolomita. Similar tendencia se observa hasta el año de evaluación, sin embargo para este periodo los niveles son relativamente más bajos (Figura 42).



Una observación global en el tiempo -durante los tres periodos de evaluación- la variación en el contenido de potasio cambiante mostrada en la Figura 43, indica que luego de la aplicación de estiércol y dolomita al suelo, el potasio cambiante durante nueve meses en los tratamientos sin plantas prácticamente es invariable, para luego disminuir alcanzando el nivel original. Se asume que los efectos sobre este elemento cambiante al incorporar E-D, obedecen principalmente a las reacciones que ambos provocan en el pH (que a su vez provocan cambios en la solubilidad de los elementos o minerales en el suelo), en la liberación de componentes desde la materia orgánica del suelo (capacidad buffer), la actividad microbiana, el aporte de calcio, magnesio, movimiento de agua y finalmente el aporte de éste como parte de la composición global del estiércol que equivale a 2.22%  $K_2O$ . También se puede observar en la misma Figura 43, que la presencia de plantas ha disminuido el contenido de potasio cambiante hasta alcanzar niveles promedio de  $0.29 \text{ cmol.kg}^{-1}$  con 20E-2D y  $0.28 \text{ cmol(+)}.kg^{-1}$  20E-4D, los cuales resultan más bajos a sus pares sin plantas con los que se obtienen  $0.63$  y  $0.64 \text{ cmol(+)}.kg^{-1}$ , respectivamente, hecho que se atribuye al consumo realizado por las plantas y al nuevo equilibrio catiónico que se provoca con el incremento de calcio y magnesio a través de la dolomita (Geibe et al., 2003). Los resultados de Kunes et al. (2007) coinciden con lo hallado pues afirman que la aplicación de dolomita disminuye el contenido de potasio intercambiable en los primeros 10 cm del suelo y disminuye aún más entre los 10-20 cm de profundidad.



#### **4.2.6 RELEVANCIA DE LA MEJORA DE INDICADORES QUIMICOS EN LOS ASPECTOS SOCIOECONOMICO Y AMBIENTALES**

Los indicadores químicos mejoraron con la aplicación de niveles crecientes de estiércol junto a dolomita de este modo favorecen al incremento de características como el pH, materia orgánica, fósforo disponible, capacidad de intercambio de cationes, calcio, magnesio y potasio cambiables las que junto a las características físicas (estabilidad de estructura) se traducen directamente en el flujo de masas y las posibilidades de absorción de nutrientes y el proceso de difusión de iones (Amézquita, 2003) al existir una relación directa de la condición hídrica del suelo y la distribución del tamaño de poros. Como resultado se obtiene un suelo de mejores condiciones físico químicas en mejor estado de crecimiento de plantas, por cuanto supondría con repercusión directa en la parte socioeconómica, por su desenlace en la productividad y calidad del producto. Respecto a esto último por ejemplo el incremento del contenido de magnesio en las pasturas evaluadas permite la posibilidad de disminuir la existencia de hipomagnesemia en los animales que lo consumen. En lo ambiental, es importante señalar que al mejorar las condiciones reductoras, la capacidad tampón y las posibilidades de retención de cationes en la CIC, sus efectos son de suma importancia en la dinámica de nutrientes, evitar las pérdidas de algunos elementos vía lixiviación y con ella soslayar la contaminación de aguas.

### **4.3 INDICADORES BIOLÓGICOS**

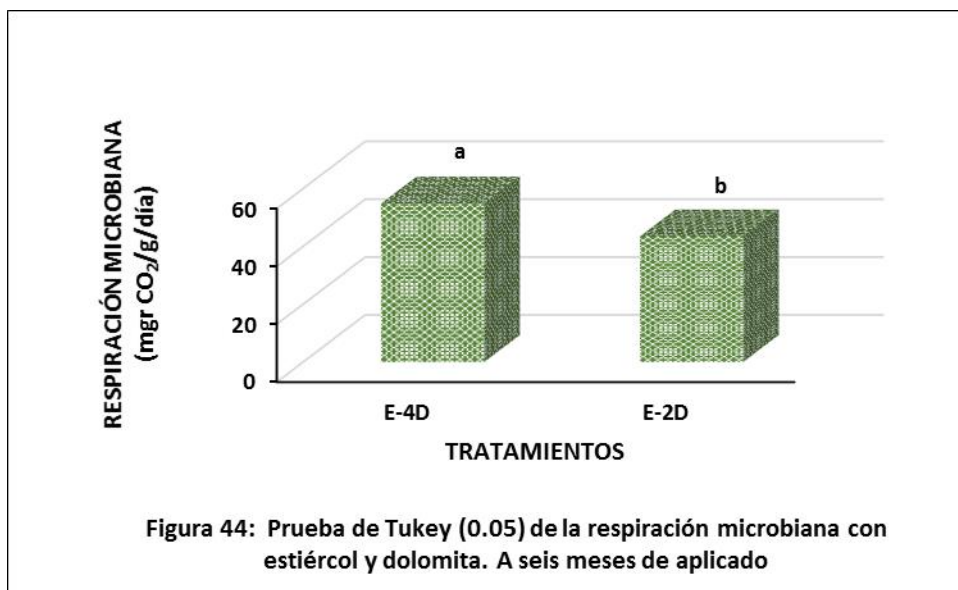
#### **4.3.1 ACTIVIDAD MICROBIANA**

La estimación de la respiración basal del suelo se realiza para tener una idea sobre la actividad microbiana, por ende también, sobre los procesos metabólicos que se desarrollan en este subsistema, los cuales se encuentran influenciados por factores extrínsecos e intrínsecos y se considera que su medición es un indicador de la salud de este recurso (García y Rivero, 2008). Bajo este contexto se observa el Cuadro 4.11 donde existe diferencia significativa en los efectos principales, así como en la interacción a seis meses de evaluación. El aporte de la mayor dosis de dolomita, contribuye con la mayor tasa de respiración (Figura 44) respecto a 2D.

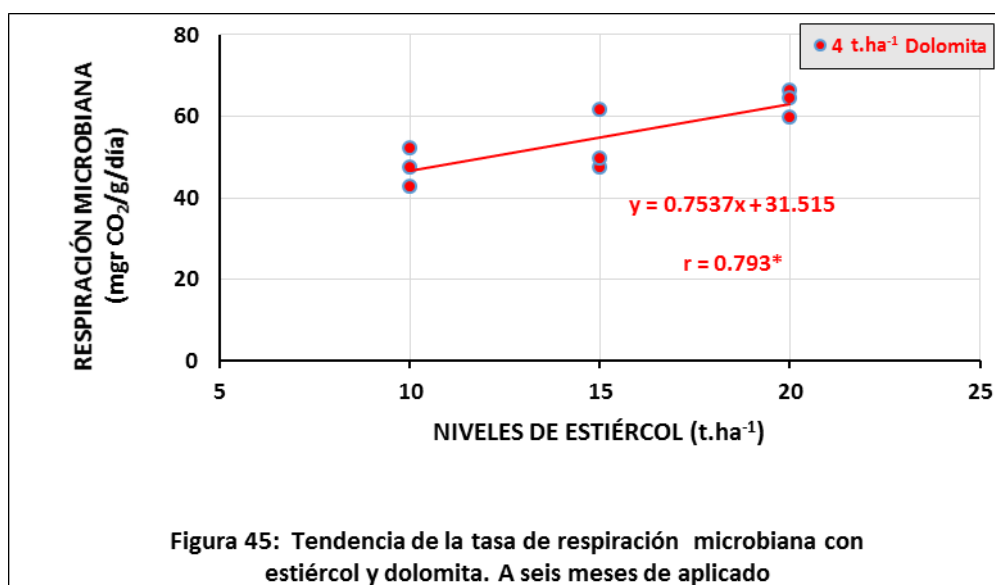


**Cuadro 4.11: Análisis funcional de variancia de respiración microbiana del suelo, por efecto de la aplicación de estiércol y dolomita**

F.V.	G.L.	SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	198.0960	11.20**	22.7979	1.17 ns	97.3018	14.19**	1173.0140	49.44**
<b>Dolomita</b>	1	580.7459	32.85**	8.0027	0.41 ns	46.7287	6.81*	1807.8485	76.20**
<b>Estiércol</b>	2	89.3567	5.05*	16.6767	0.85 ns	214.5535	31.29**	2021.8475	85.22**
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	115.5103	6.53*	36.3168	1.86 ns	5.3366	0.77 ns	6.7632	0.28 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	1.4524	0.08 ns	3.7636	0.19 ns	177.6487	25.91 **	1652.4305	69.65 **
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.3652	0.02 ns	0.0335	0.001 ns	4.5080	0.65 ns	142.4897	6.00*
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	394.4380	22.31 **	102.1598	5.24 *	254.8277	37.17 **	2088.2780	88.02**
<b>F. Cuadrática</b>	1	13.4784	0.76 ns	0.0303	0.001	2.7958	0.40 ns	174.0232	7.33*
<b>Error</b>	12	17.6743		19.4641		6.8556		23.7238	
<b>Total</b>	17								
		CV = 8.56 %		CV = 14.61%		CV = 5.47%		CV = 7.36%	

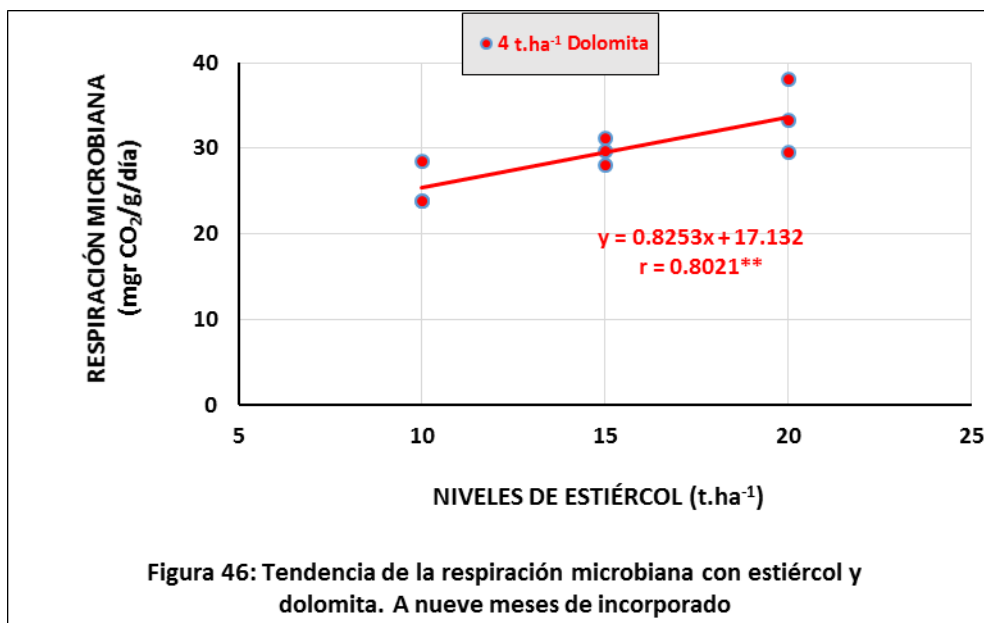


La tendencia lineal y altamente significativa en E-4D (Figura 45) muestra que por cada unidad de estiércol aplicado existe un incremento del orden de 0.75 unidades en la liberación de CO<sub>2</sub>. La mayoría de los trabajos de investigación señalan que a mayor dosis de abonos orgánicos la respiración es mayor y con tasas mucho más elevadas a las encontradas en el trabajo, sin embargo las evaluaciones reportadas han sido realizadas durante los primeros días u otros hasta los 90 días de incorporado los residuos.



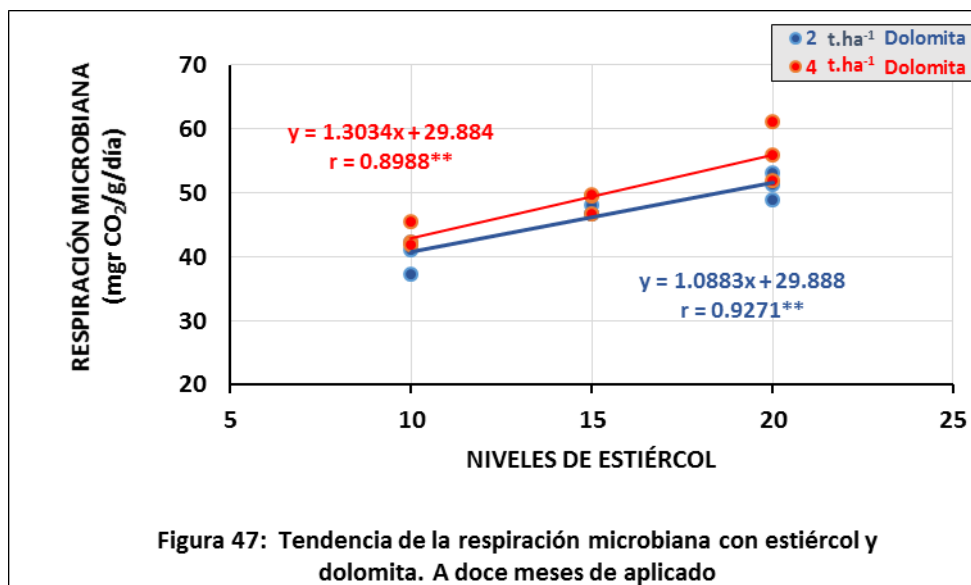
En el presente trabajo se realiza a partir de los seis meses de incorporada las enmiendas y se observa que los microorganismos continúan activos, probablemente descomponiendo las fracciones más recalcitrantes de carbono, es decir a aquellos ligados a la celulosa, hemicelulosa y lignina o resíntesis de sustancias que en líneas generales se trata de materiales resistentes a la degradación (Traoré et al., 2007), por ello Rivero y Paolini (1995) y Stott et al. (1986) señalaron que las diferencias significativas en la descomposición de residuos orgánicos, medidas a través de la respiración, son sólo detectables como máximo hasta los treinta días. Sin embargo se debe considerar que la dinámica de carbono unido a la biomasa misma, implica muerte de las células y reutilización del sustrato, que es permanente; razón por la cual Parton et al. (1987) considera que la dinámica de la materia orgánica del suelo, comprende tres fracciones con tiempos medios de permanencia cada vez mayores, entre los cuales se tienen: (1) materia orgánica activa (1- 2 años, tiempo medio de permanencia); (2) materia orgánica lenta (20 – 50 años), materia orgánica pasiva (800 – 1000 años). Lo que quiere decir que a seis meses de incorporado el estiércol y dolomita, la respiración de los microorganismos aún son detectables.

El efecto inmediato de los beneficios de este proceso se observan en los nutrientes como P disponible, calcio y magnesio cambiante (Borie et al., 1999), que junto al pH se traduce en un efecto positivo sobre el rendimiento de materia seca/maceta de la asociación de pasturas; la estabilidad de agregados, infiltración, que también incrementan, en el mismo sentido. Sucede que durante una etapa inicial de intensa actividad microbiana, favorecida por la reacción del suelo -que aumenta- en presencia de compuestos simples (hidratos de carbono o compuestos orgánicos de bajo peso molecular) y los complejos; los microorganismos heterótrofos y en condiciones principalmente aeróbicas, utilizan los restos aplicados para descomponer y liberar sus componentes (Krull et al., 2004). Esta dinámica se mantiene durante un periodo y a seis meses se mantiene creciente y es mayor con el aumento de estiércol y con las mejoras que provocan la presencia de dolomita, como en este caso es más notorio con la aplicación de 4D.

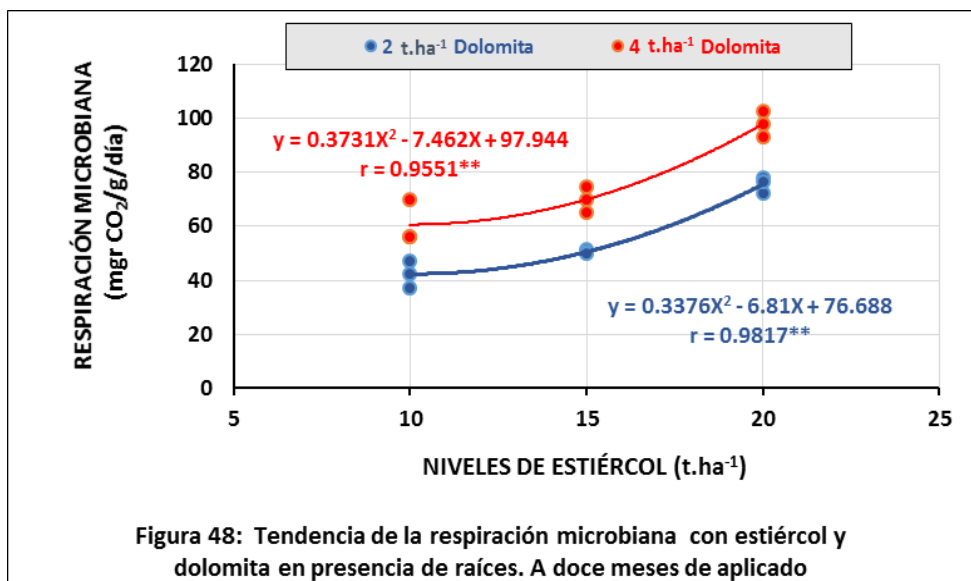


A nueve meses, la tasa de respiración disminuye sustancialmente respecto al primer corte (6M) en ambos niveles de dolomita y existe respuesta lineal significativa en la tendencia de la respiración al aplicar estiércol junto a 4t.ha<sup>-1</sup> de dolomita (Figura 46). Al respecto Arrigo et al. (2002) acota que la producción de CO<sub>2</sub> puede cambiar con la calidad del material orgánico aportado al suelo, pero además con las variaciones del clima y por alteraciones que producen los diferentes sistemas de labranza (Acevedo y Martínez, 2003). Según Pérez et al. (1998) durante la descomposición una parte del carbono es devuelto a la atmosfera en forma de CO<sub>2</sub>, mientras que otra se transforma en otros compuestos más sencillos o se almacena en las propias estructuras microbianas.

A los doce meses la tasa de respiración incrementa respecto del periodo anterior, prácticamente sin mostrar diferencia entre sí, dado que los niveles de CO<sub>2</sub> producto de la respiración van paralelos, siendo ligeramente superior con E-4D (Figura 47). Naturalmente la actividad microbiana continúa, por ello Jenkinson (1992) refiere que el incremento en la actividad microbiana puede estar correlacionado también con la generación de productos metabólicos como polisacáridos extracelulares, enzimas y ácidos poliurónicos, muy importantes en la estabilización de los agregados.

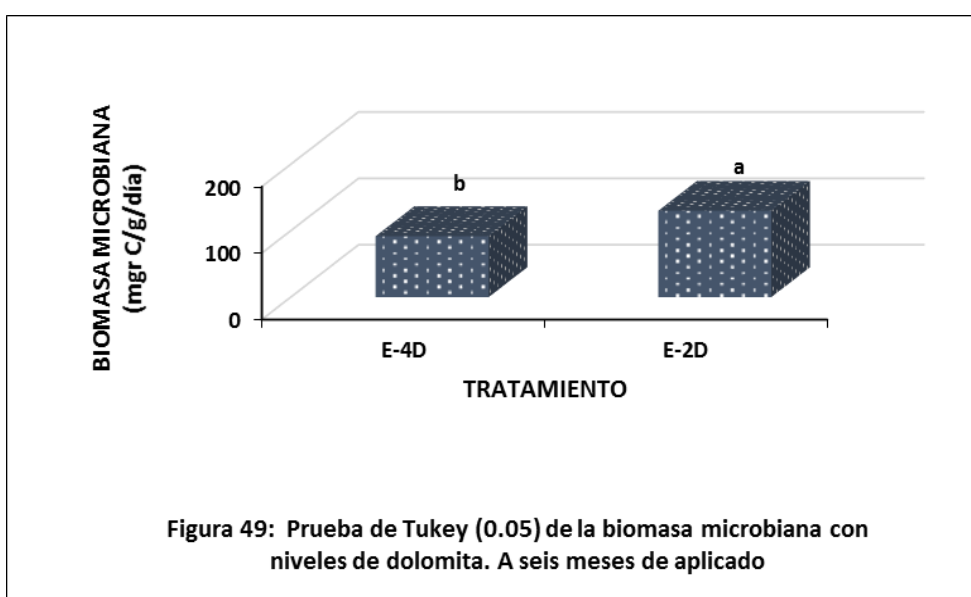


En presencia de raíces (Figura 48), se observa en general, que la tasa de respiración es más intensa, a lo cual Timan et al. (1999) refieren que la densidad radical es uno de los factores más importantes en la actividad de los microorganismos en el suelo. Por su parte Barea y Olivares (1998) recuentan que la presencia de plantas en el sistema del suelo cambia la situación de los microorganismos drásticamente, puesto que ellas son las principales suministradoras de substratos energéticos, factores de crecimiento, etc, del que los microorganismos se aprovechan y proliferan, generando a su vez cambios de diversa naturaleza tanto físicos, químico y biológico en el suelo. Así por ejemplo, Alexander (1980) afirma que entre los compuestos naturales que inducen a cambios de pH en la raíz, están los compuestos químicos como el ácido cítrico, acético y málico; compuestos como nucleótidos (adenina, guanina, uridina y citosina), flavomonas y enzimas (fosfatasas, invertasas, amilasas, proteasas), así como hormonas vegetales (auxinas, citoquininas, ácido giberelico, etc.) y otros importantes para la actividad microbiana en la rizósfera, pues ayudan a formar quelatos asociados con poblaciones microbianas y nutrientes del suelo, aunque también participan en la inmovilización de elementos esenciales (Acuña et al., 2006). Por todas las consideraciones antes mencionadas el efecto de las raíces se traducen en una mayor tasa de respiración es decir mayor actividad microbiana, por ello la tendencia creciente con las dosis de estiércol, en ambas fuentes de dolomita.



### 4.3.2 BIOMASA MICROBIANA

Las dosis de dolomita son estadísticamente diferentes en su efecto sobre la biomasa microbiana (Cuadro 4.12) y la prueba de Tukey (Figura 49) muestra que existe mayor formación de biomasa con 2D en promedio de E, respecto de 4D. Se entiende que durante los primeros seis meses de incorporado el estiércol, éste es objeto de descomposición y más cuando se mejora algunas características edáficas como el pH.

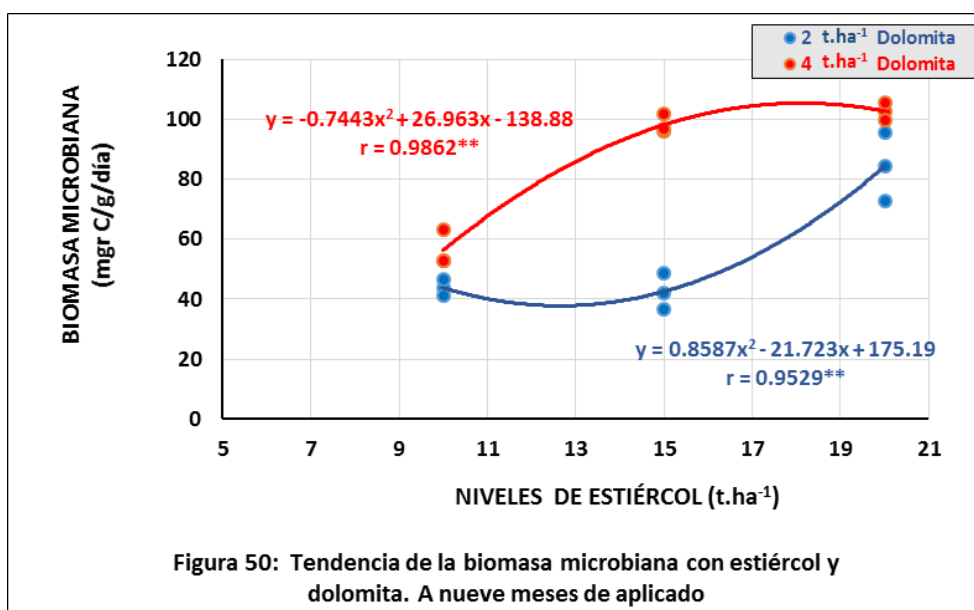


**Cuadro 4.12: Análisis funcional de variancia de la biomasa microbiana del suelo, por efecto de la aplicación de estiércol y dolomita**

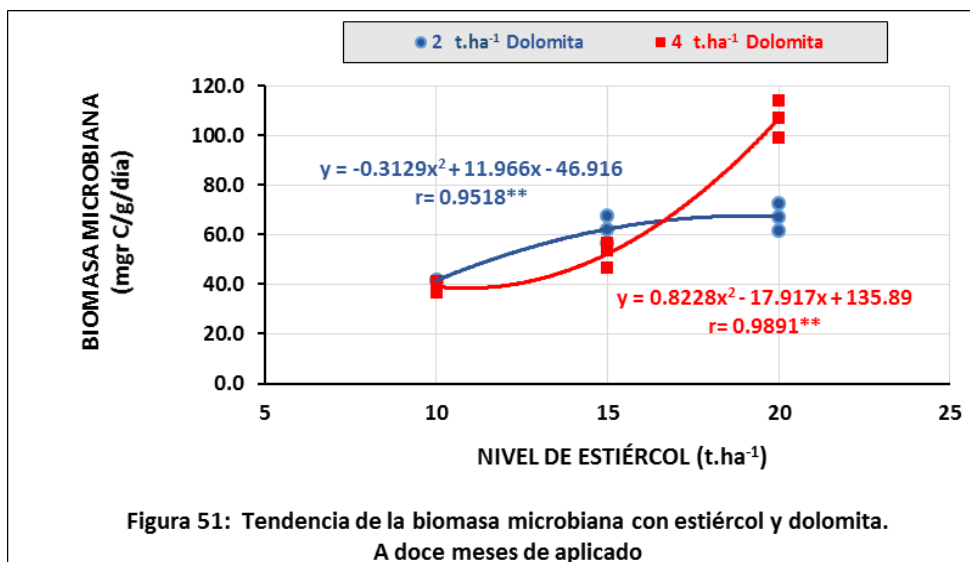
F.V.	G.L.	SIN PLANTAS						CON PLANTAS	
		SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	1444.0612	10.40**	2204.1818	58.62**	1840.1250	76.98**	13342.7688	140.25**
<b>Dolomita</b>	1	3946.8651	28.42**	3737.6658	99.41**	365.5007	15.29**	15978.8930	167.96**
<b>Estiércol</b>	2	830.8295	5.98*	2825.3131	75.14**	3357.1605	140.45**	25345.8232	266.42**
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	805.8911	5.80*	816.3085	21.71**	1060.4018	44.36**	21.6522	0.23 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	881.8513	6.35*	2447.0282	65.08**	998.3453	41.76**	22285.7581	234.26**
<b>F. Cuadrática</b>	1	1608.2011	11.58**	921.7787	24.51**	122.3627	5.11*	2218.6434	23.32**
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>									
<b>F. Lineal</b>	1	492.5016	3.54ns	3222.0203	85.69**	6868.1667	287.34**	24521.4170	257.76**
<b>F. Cuadrática</b>	1	290.8872	2.09 ns	692.4161	18.41**	846.2498	35.40**	1709.1322	17.96**
<b>Error</b>	12	138.8667		37.5981		23.9019		95.1318	
<b>Total</b>	17								
		CV = 11.18 %		CV = 8.60%		CV = 7.95%		CV = 7.83%	

La aplicación de dolomita tiene el objetivo de incrementar el pH del suelo, con este cambio se produce paralelamente un conjunto de reacciones que tiene repercusión en las otras características del suelo. Sin embargo la intensidad de dichos cambios depende entre otros factores, de la cantidad de enmienda siendo generalmente mayor a mayor dosis de ésta. Por cuanto aquellos efectos al aplicar 2 t.ha<sup>-1</sup> de dolomita a seis meses de su incorporación cambiaron el pH de 4.5 a 5.08 con el cual se favorece a la acumulación de carbono vía formación de materia orgánica activa (carbono de la masa microbiana), que resulta mayor (129.94 mgr C/g/día) que cuando se aplica E-4D (91.64 mgr C/g/día). Por lo tanto en ese medio continúa influyendo en la acumulación de materia orgánica del suelo, por la estrecha relación entre la biomasa del suelo con el C orgánico (Kaiser et al., 1992).

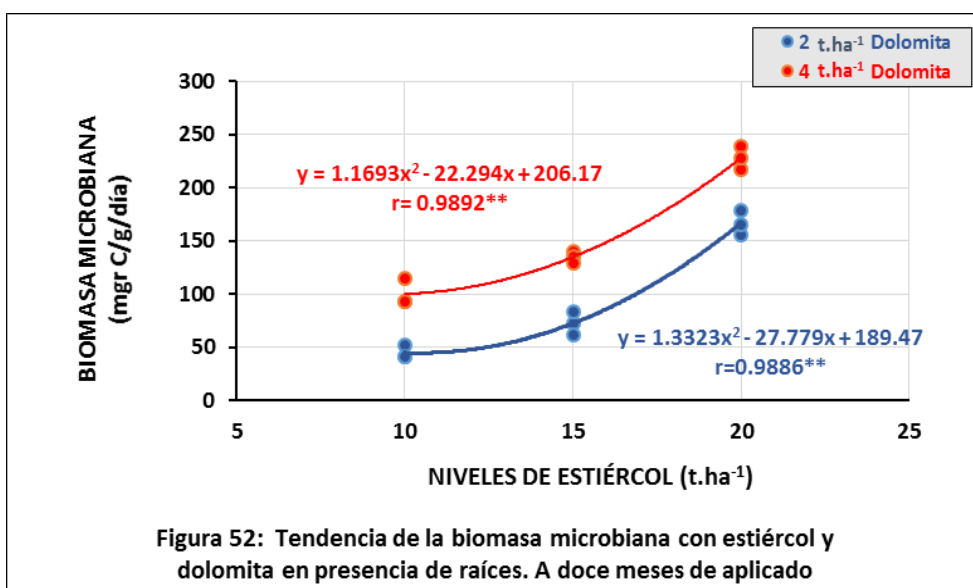
A nueve meses la formación de biomasa es creciente con el nivel de estiércol aplicado, siendo mayor en E-4D (Figura 50). Se observa que respecto al periodo anterior la formación de biomasa es menor en ambos grupos de tratamientos (E-4D) y (E-2D), disminución que va acompañada de la tasa de respiración.







A doce meses con compuestos carbonatados complejos y vinculados inclusive con el material mineral en el suelo (Kaiser et al., 1992). La formación de biomasa continúa creciente tanto en E-4D como en E-2D, con tendencias cuadráticas significativas, pero con mayor crecimiento en 20E-4D. En relación a la evaluación anterior existe menor formación de biomasa, sobre todo en aquellos tratamientos que recibieron menor dosis de estiércol (Figura 51).



En presencia de raíces las tendencias altamente significativas de la biomasa, son cuadráticas (Figura 52), se observa que los niveles son considerablemente mayores a los alcanzados cuando no hay plantas, sobre todo cuando el estiércol está por encima de 15 t.ha<sup>-1</sup>, lo que permite afirmar que las raíces y el estiércol al ser factores importantes que controlan la cantidad de carbono biomásico del suelo (Timan et al., 1999) también mantienen viva su actividad y se nota un efecto prolongado en el tiempo, debido a que a diferencia del grupo de tratamientos sin plantas, la formación de biomasa continúa inclusive al año de incorporada la materia orgánica. Se observa además que en presencia de raíces tanto la respiración como la formación de biomasa tienen la misma tendencia, es decir existe descomposición y paralelamente formación, de tal manera que los compuestos simples constituidos durante la etapa anterior y que formaron parte de la biomasa microbial, junto a los incorporados en el estiércol, están siendo transformados en productos secundarios, que se van acumulando como sustancias complejas (humus). Estas sustancias a su vez tendrían otros efectos como la estabilidad y formación de estructura, la porosidad del suelo; con efectos positivos en el almacenamiento de agua y la disponibilidad de nutrientes (Singer y Munns, 1996). Este comportamiento resulta de importancia en un modelo de manejo sostenible del subsistema suelo, en razón a que el incremento de la biomasa implica incremento de reservas de recursos orgánicos del suelo, es una fracción considerable (10-20%) de la materia orgánica del suelo que corresponde a la fracción activa (Tisdall, 1996). Se trata por lo tanto de preservar la materia orgánica y la microflora asociada, de manera que no se deteriore la estructura y la capacidad de regular la disponibilidad de macro y micronutrientes (Pierano et al., 1992; Stevenson y Cole, 1999), además del efecto posterior sobre la infiltración, almacenamiento de agua, etc. que se mantendrían en un nivel deseable.

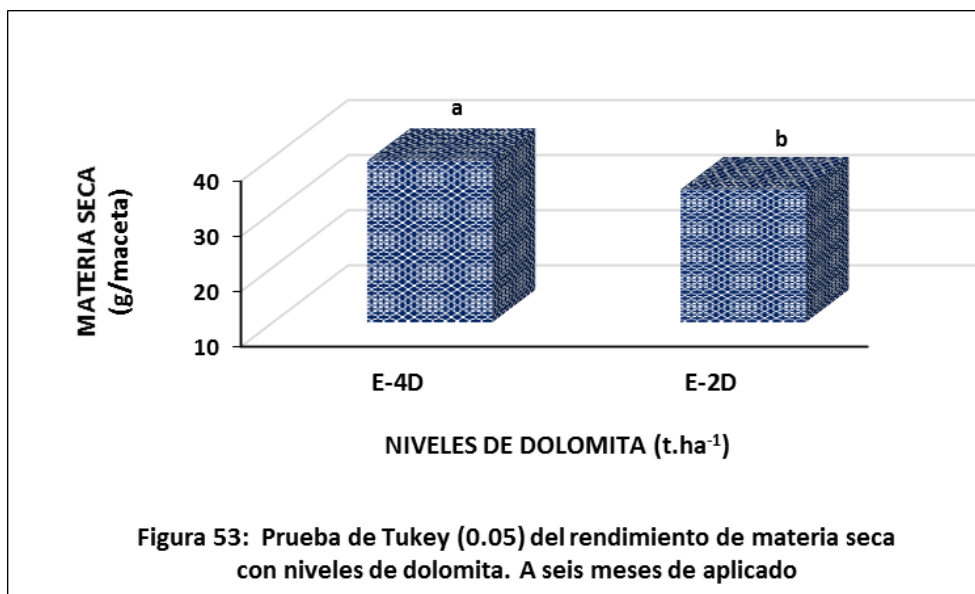
#### **4.3.3 RENDIMIENTO DE MATERIA SECA**

El rendimiento de materia seca de la asociación de pasturas Trébol rojo (*Trifolium pratense*) y Rye-grass inglés (*Lolium perenne*) se ve influenciado significativamente con la aplicación de estiércol como por dolomita, de acuerdo al ANFUVA (Cuadro 4.13). La prueba de contraste de Tukey (Figura 53) en promedio de los niveles de

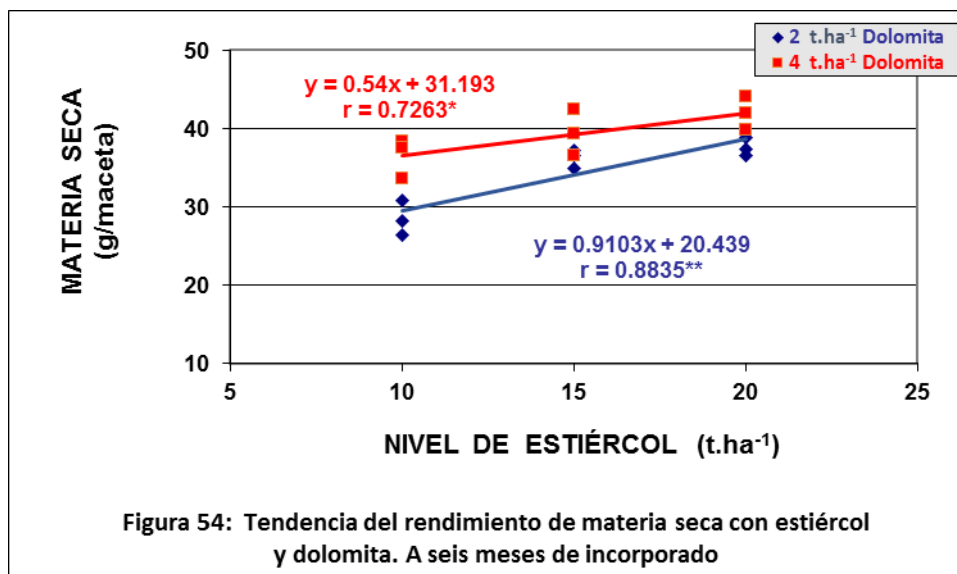
**Cuadro 4.13: Análisis funcional de variancia del rendimiento de materia seca (g.maceta<sup>-1</sup>), por aplicación de estiércol y dolomita.**

F.V.	G.L.	SEIS MESES		NUEVE MESES		DOCE MESES	
		C.M.	Fc	C.M.	Fc	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	62.013	13.86**	1191.627	37.32**	806.227	28.36**
<b>Dolomita</b>	1	121.628	27.18**	48.085	1.51 ns	1261.024	44.35**
<b>Estiércol</b>	2	84.519	18.88**	1823.302	57.11**	1118.278	39.33**
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	9.698	2.17 ns	1131.724	35.45**	266.777	9.38*
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>							
<b>F. Lineal</b>	1	124.306	27.77**	5708.484	178.79**	1859.616	65.41**
<b>F. Cuadrática</b>	1	20.331	4.54 ns	118.734	3.72 ns	483.709	17.01**
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>							
<b>F. Lineal</b>	1	43.740	9.77**	78.193	2.45 ns	424.032	14.91**
<b>F. Cuadrática</b>	1	0.058	0.01 ns	4.641	0.15 ns	2.753	0.10 ns
<b>Error</b>	12	4.476		31.928		28.431	
<b>Total</b>	17						
		CV = 5.76%		CV = 10.08%		CV = 9.47%	

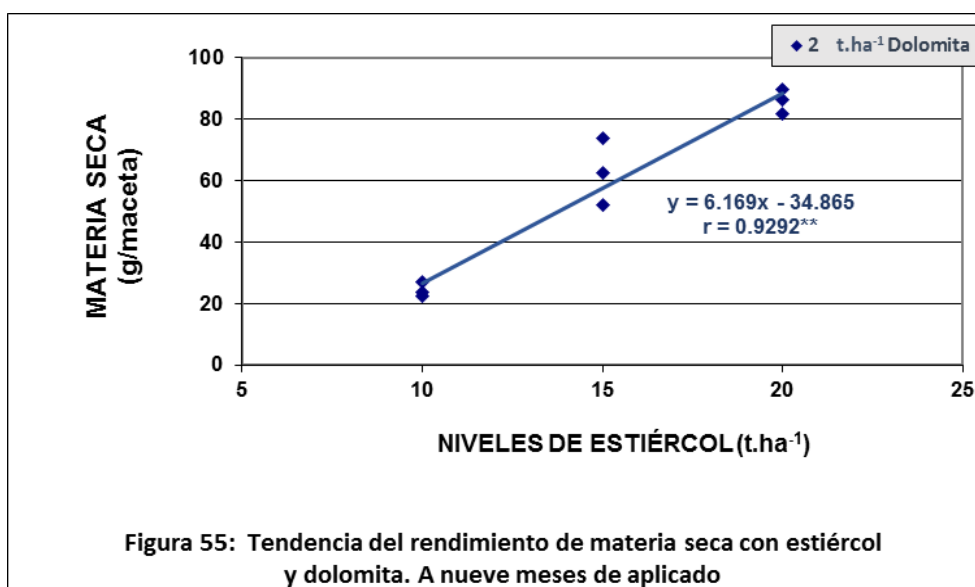
estiércol, muestra que existe mayor rendimiento de materia seca de los pastos en E-4D respecto de E-2D, poniendo de manifiesto el efecto de la dolomita.

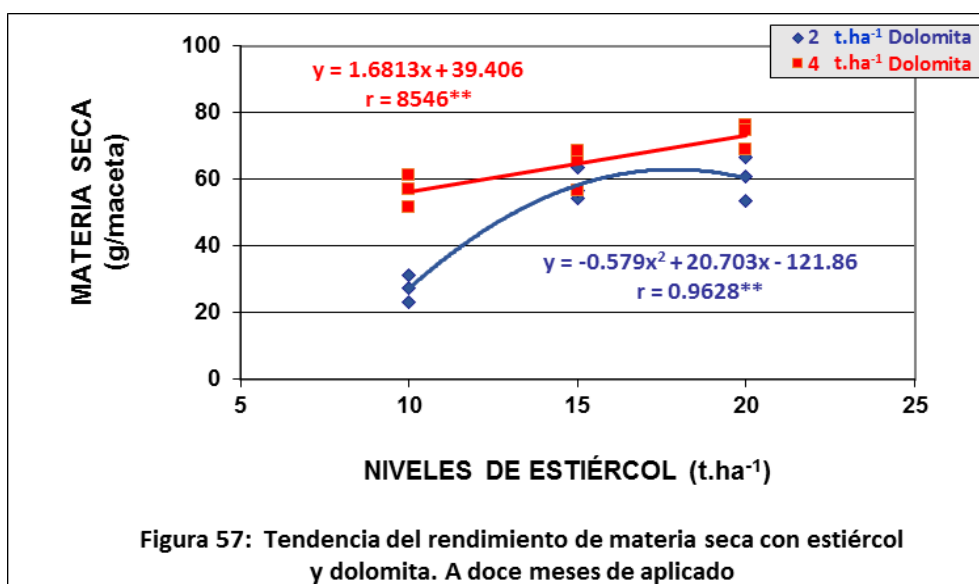
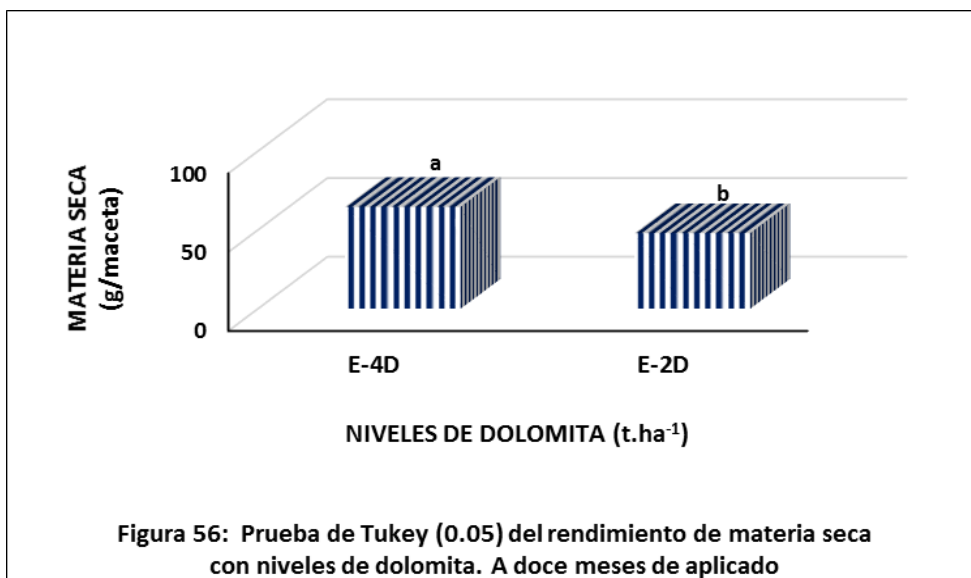


El efecto de los niveles del estiércol, muestra tendencia lineal significativa tanto en E-2D como en E-4D (Figura 54), siendo mayor el rendimiento de materia seca con el aporte de E-4D (39.29 g.maceta<sup>-1</sup>). Si consideramos las evaluaciones realizadas de los indicadores anteriores, se observa que el mayor rendimiento de materia seca es producto de las mejoras que a su vez se produjeron al aplicar estas enmiendas sobre indicadores como el índice de inestabilidad estructural, infiltración, densidad aparente, pH, contenido de calcio, magnesio, tasa de respiración, etc. Características que para el mismo periodo de evaluación resultaron también con la misma tendencia, por lo cual se asume que la mejora de las características del suelo, se traducen en un efecto positivo como en este caso sobre el rendimiento de materia seca de una asociación de pasturas, en vista de que la respuesta de las plantas, es al conjunto de aspectos físicos, químicos y biológicos del medio edáfico y del medio exterior (Porta et al., 2003).



En el segundo corte el efecto del estiércol se muestra estadísticamente diferente en el rendimiento de materia seca en E-2D, ajustándose significativamente a una función lineal (Figura 55). De manera que a mayor nivel de estiércol, mayor rendimiento de materia seca (85.94 g.maceta<sup>-1</sup>). Resultado que es superior a los obtenidos en los tratamientos con E-4D.





Al año el rendimiento de materia seca de la asociación de pasturas resulta mayor cuando se aplica 20E-4D (64.62 g.maceta<sup>-1</sup>) respecto a 20E-2D (47.88 g.maceta<sup>-1</sup>) siendo estadísticamente diferentes según la prueba de Tukey (Figura 56). La tendencia del efecto del estiércol junto a 2D es significativa y cuadrática (Figura 57), en tanto que con E-4D es lineal. Cabe observar que con la aplicación de E-2D, el rendimiento tiende a disminuir en el tiempo, en tanto con E-4D a doce meses es aún creciente. Respuesta que se relaciona a que en estos últimos existe cierta estabilidad de las características mejoradas del suelo

sobre todo en los agregados estables en benceno, donde al cabo de un año prácticamente no varían los porcentajes, otorgándole en alguna medida continuidad en los efectos positivos.

#### **4.3.4 RELEVANCIA DE LA MEJORA DE INDICADORES BIOLÓGICOS EN LOS ASPECTOS SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTALES**

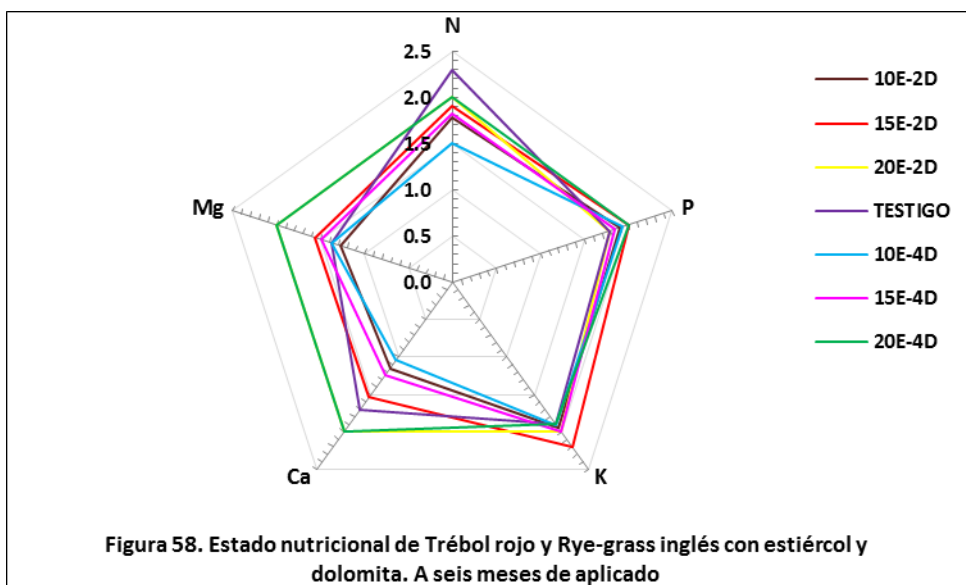
La existencia de mejores condiciones físico químicas del suelo en general, con el aporte de estiércol y dolomita en dosis altas, tiene inmediata repercusión en la parte biológica por el incremento de los rendimientos de la asociación de pasturas Trébol rojo y Rye-grass inglés, el acrecentamiento de la actividad microbiana y la biota en general, por el aumento en la respiración y biomasa microbiana. Aspectos que son de importancia en lo ambiental dado que se garantiza una adecuada producción microbiana (Jaramillo, 2002). También señalar que se induce al menor uso de fuentes nitrogenadas y favorecer a la fijación de N. Finalmente una contribución importante para favorecer el aspecto ambiental es la inclusión de pasturas en las rotaciones con los cuales se estarían diversificando, además de intensificar los diferentes procesos sobre los cuales accionan el estiércol y dolomita. Los cultivos anuales se alternan con pasturas plurianuales de leguminosas y gramíneas. En este último sistema, las pasturas que duran más de un año, contribuyen interrumpiendo el ciclo anual de malezas, plagas y enfermedades propias de los cultivos de granos de estación. Así se reduce la necesidad de defensivos agrícolas para la protección contra esos factores bióticos. Por otra parte, las pasturas con leguminosas reducen notoriamente el riesgo de erosión durante su fase de crecimiento y contribuyen a recuperar el contenido de materia orgánica y nitrógeno del suelo.

#### **4.4 SALUD DEL CULTIVO**

##### **4.4.1 ESTADO NUTRICIONAL DEL CULTIVO**

En razón a la existencia de la relación causa-efecto entre la calidad del suelo y la salud de plantas (Doran et al., 2000); basadas fundamentalmente en la nutrición mineral balanceada (Magdoff et al., 2009) y observable a través del indicador “estado nutricional” de las plantas (Altieri y Nicholls, 2003). En un gráfico tipo ameba, se asigna un valor máximo a los nutrientes absorbidos correspondientes al mayor rendimiento, de manera que el valor

umbral de la arista -en este caso del pentágono- corresponde a una constante nutritiva del elemento en cuestión, por debajo del cual se asume menor estado nutricional y si se aproximan más a los valores máximos, se entiende que mejor nutridas estarían las plantas, por ende la salud de las mismas, que para el caso es la asociación de pasturas Trébol rojo (*Trifolium pratense*) y Rye-grass inglés (*Lolium perenne*). De este modo el estado nutricional en las plantas del primer corte (Figura 58) las que recibieron 10E y 15E-2D y 10E-4D; presentan menos concentración de N, sobre todo cuando recibe dosis alta de dolomita pues el contenido de N se aleja del valor umbral de la arista. Efectos que estarían relacionados con la actividad de los microorganismos ya que se observa que en 10E existe menor tasa de respiración microbiana (Figura 45) que supone menor actividad microbiana y menor liberación de nutrientes -entre ellos N- además los microorganismos también consumen nitrógeno generando competencia con las plantas por este elemento, en vista de que el N que aporta el suelo es bajo. De otro lado las bacterias incorporadas no estarían fijando lo suficiente.

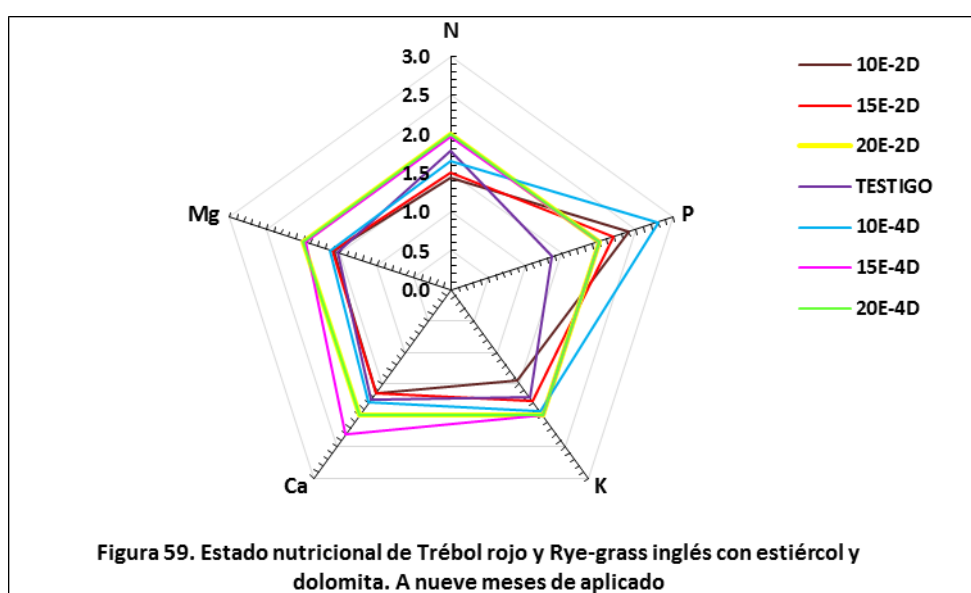


Los cationes Ca y Mg cuando se aplican 10 y 15 t.ha<sup>-1</sup> de estiércol junto a 2 y 4 t.ha<sup>-1</sup> de dolomita poseen valores inferiores al umbral, indicándonos que a seis meses de incorporada las enmiendas, la dolomita no estaría bien disuelta y no lograría contrarrestar el efecto del K, quien se encuentra en similar proporción al magnesio en el suelo y ambos



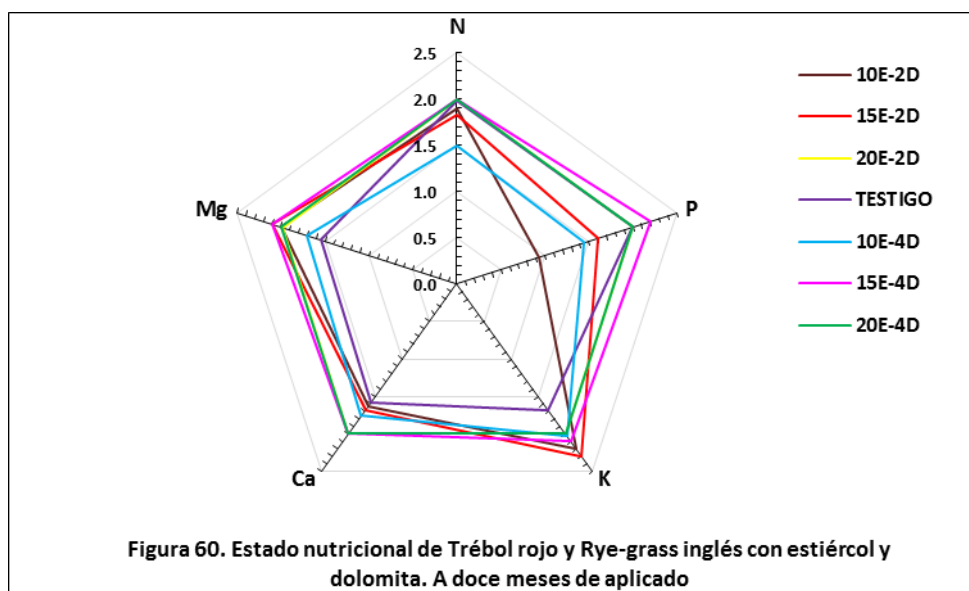
son mayores al calcio, induciendo al efecto antagónico (Mengel y Kirkby, 1987) lo que probablemente esté influyendo a que el potasio sea más rápidamente absorbido, en vista de que este último elemento es absorbido en similar proporción al máximo tanto en E-2D como en E-4D. En cuanto al P, en ambos casos se observa que las plantas estarían adecuadamente suministradas.

En el segundo corte se observa que continúa la menor absorción de N en los tratamientos 10, 15E-2D como en 10E-4D (Figura 59), que coincide con un periodo creciente de formación de biomasa (Figura 50), por ende competencia por nitrógeno. Respecto al Ca, Mg la brecha en relación al umbral si bien disminuye y resulta mejor nutrido en relación al primer corte, sin embargo la concentración en el tejido de plantas todavía es menor, principalmente en el caso de 10, 15 E-2D; 10E-4D y se supera a partir de 15E-4D. El K es menos absorbido en 10E y 15E -2D.



En el tercer corte el tratamiento 10E y 15E-2D y 10E-4D continúa la menor absorción de N y comparativamente entre los tres tratamientos, el comportamiento es mejor con la mayor dosis de dolomita (Figura 60) sin embargo continua la carencia, que podría estar relacionado además de lo mencionado líneas arriba; con el menor número y peso de

nódulos en las plantas. En tanto que en el tratamiento 15E-4D, la contribución de N que realizan las bacterias presentes en menor número pero de mayor peso muestran mejor performance. El P al cabo de un año de aplicadas las enmiendas muestran desbalance básicamente en 10 y 15E-2D como en 10E-4D y probablemente este menor contenido influya en los rendimientos que son menores, respecto al de mayor dosis de E-4D. En el caso del K, se observa que están en igual nivel en todos los casos. El Ca y Mg en general al año de incorporadas las enmiendas, presentan mayor contenido en las plantas, fenómeno que podría estar relacionado con la mayor disolución de la dolomita con la consiguiente alteración del equilibrio de nutrientes en el suelo, que permite mayor absorción de los elementos, respecto a los que se produjeron en el primer y segundo corte.



#### 4.4.2 NÚMERO DE NÓDULOS

El número de nódulos es influenciado por la adición de estiércol y dolomita de manera significativa (Cuadro 4.14).

Las tendencias del efecto de ambos niveles de dolomita -en promedio de E- sobre el número de nódulos (Figura 61) muestran que cuando se aplica 15E-2D existe mayor número de nódulos y disminuye a mayor dosis de E. Los incrementos no podrían atribuirse a la infección de otras especies adicionales al rizobio aplicado, porque la soya,

trébol y alfalfa son extremadamente exigentes o específicas respecto a su rizobio (Freire, 1996). Por cuanto puede atribuirse a que alguna característica del suelo como por ejemplo el pH que a su vez influiría sobre otros nutrientes en el suelo, estaría generando una condición desfavorable o de estrés, tal como refiere Graham (1994) que los nódulos al sufrir condiciones adversas en algún período de sus vidas pueden mostrarse abundantes y grandes a simple vista, pero al efectuar el corte de los mismos, se observa una corteza gruesa y una diminuta superficie activa.

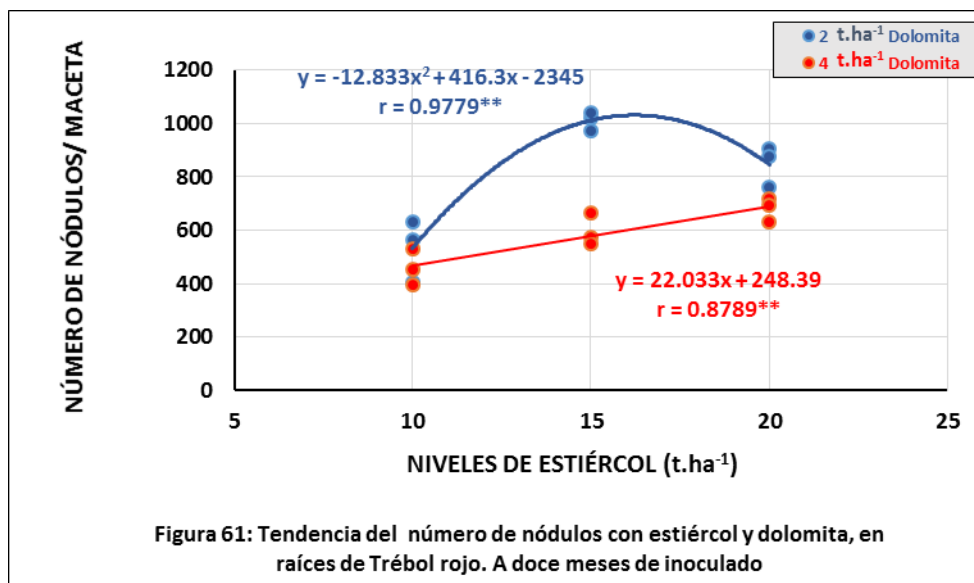
**Cuadro 4.14: Análisis funcional de variancia del número de nódulos en el Trébol rojo (*Trifolium pratense*) aplicado con estiércol y dolomita.**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	643171.167	128634.233	25.73**
<b>Dolomita</b>	1	216262.722	216262.722	43.25**
<b>Estiércol</b>	2	333049.333	166524.667	33.31**
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	93859.111	46929.556	9.39**
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>				
<b>F. Lineal</b>	1	146953.500	146953.500	29.39**
<b>F. Cuadrática</b>	1	205868.056	205868.056	41.17**
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>				
<b>F. Lineal</b>	1	72820.167	72820.167	14.56**
<b>F. Cuadrática</b>	1	1266.722	1266.722	0.25ns
<b>Error</b>	12	59991.333	4999.278	
<b>Total</b>	17	703162.500		

CV= 10.26%

Si consideramos el pH de aquellos tratamientos (E-2D), estos fluctúan entre 5.27 a 5.37, es decir un medio ácido que influye en la movilización del Al en la solución del suelo (Vance et al., 1996). Esto supone toxicidad del Al (pH menor de 5.5) que puede tener efecto perjudicial sobre la simbiosis rizobio-leguminosa, ya sea dañando directamente a la planta hospedera, reduciendo la sobrevivencia del rizobio o interfiriendo en alguno de los estados de nodulación y funcionamiento del proceso simbiótico (Wright, 1991). Otro aspecto a

considerar y que puede generar estrés, son los bajos contenidos de calcio y magnesio y también la baja disponibilidad de molibdeno y esta última es componente de la nitrogenasa, lo cual implica problema en la fijación, pero además se afirma que la falta de molibdeno contribuye a la formación de mayor número de nódulos, pero son menos eficientes y su estructura es similar a los nódulos inactivos (Martínez et al., 2010). Finalmente Fauvart et al. (2008) refiere al respecto, que también una señalización inefectiva puede afectar negativamente el desarrollo de un número apropiado de nódulos e impedir el desarrollo de nódulos normales y efectivamente funcionales a través de su efecto sobre alguno o todos de los siguientes aspectos: el crecimiento de los hilos de infección, la formación del primordio nodular, el establecimiento de una infección atípica, la falta de biosíntesis de leghemoglobina, la producción de un desbalance hormonal o la carencia de una organización tisular normal.



Tendencia diferente se observa con el aporte de E-4D, pues aumenta el número de nódulos con el aporte de E, siendo sin embargo, todos ellos menores en número respecto a los contados en E-2D. Se trata de un medio en el cual muchas de las características del suelo fueron más dinámicas en su reacción, además se conoce que las bacterias, como el *Rhizobium*, son exigentes en ciertas características entre otros las referidas al calcio, molibdeno, fósforo, condiciones de pH (Peoples et al., 1995). Es así que las aplicaciones de estiércol junto a dosis alta de dolomita, aumentan tanto el contenido de calcio, magnesio

como el pH del suelo, habiéndose obtenido reacciones fluctuantes entre 5.60 – 6.00; lo que supone que se genera un medio más propicio para el desarrollo creciente de bacterias fijadoras de nitrógeno (Brady y Weil, 2008; Coyne, 2000).

#### 4.4.3 PESO DE NÓDULOS

Los efectos de dolomita y estiércol sobre el peso seco de nódulos, muestran en el ANFUYA diferencias significativas en ambos factores simples (Cuadro 4.15) así como en las tendencias lineales en cada uno de los niveles de dolomita (Figura 62).

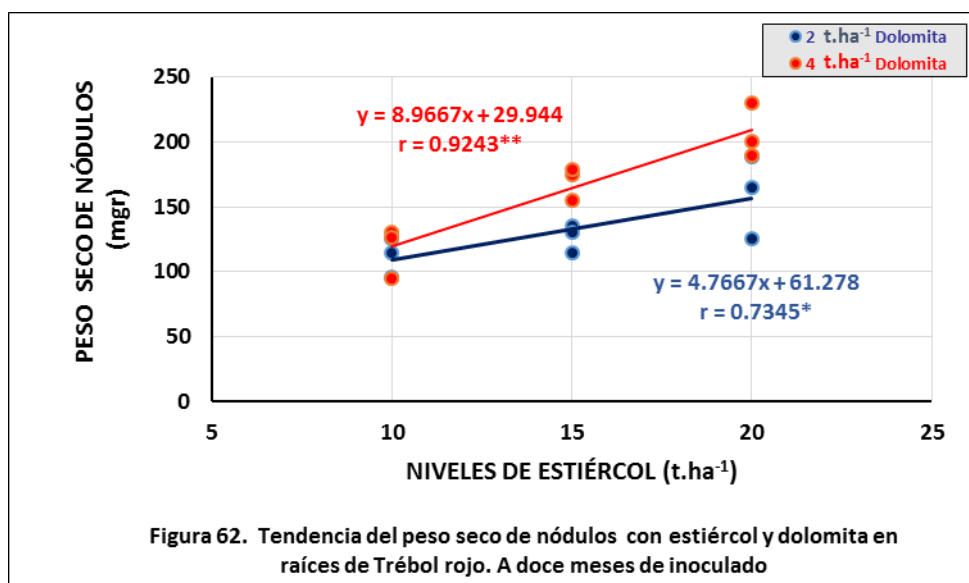
**Cuadro 4.15: Análisis funcional de variancia del peso de nódulos (mgr/maceta) en Trébol rojo (*Trifolium pratense*) aplicado con estiércol y dolomita.**

V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc
<b>Tratamientos</b>	5	16934.944	3386.989	8.27**
<b>Dolomita</b>	1	2156.056	2156.056	5.26*
<b>Estiércol</b>	2	13630.111	6815.056	16.65**
<b>Dolomita x Estiércol</b>	2	1148.778	574.389	1.40 ns
<b>2 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>				
<b>F. Lineal</b>	1	3360.667	3360.667	8.21*
<b>F. Cuadrática</b>	1	162.000	162.000	0.39ns
<b>4 t.ha<sup>-1</sup> DOLOMITA</b>				
<b>F. Lineal</b>	1	11180.167	11180.167	27.31**
<b>F. Cuadrática</b>	1	76.056	76.056	0.19ns
<b>Error</b>	12	4911.333	409.278	
<b>Total</b>	17	21846.278		

CV = 13.08%

La tendencia del peso seco total de nódulos presentes en las raíces del Trébol rojo (*Trifolium pratense*) son mayores a medida que aumenta las dosis de estiércol, siendo mayor peso total de nódulos en los tratamientos E-4D, lo que no armoniza con lo encontrado en el número de nódulos, pues en aquel grupo de tratamientos existe menor

número de nódulos, atribuyéndose el hecho al tamaño de los nódulos, de manera que en el grupo E-4D si bien el número es menor, pero el tamaño es mayor, que incrementa el peso total del mismo; que a su vez estaría relacionado con la eficiencia en el proceso de fijación, en vista de que el peso de nódulos permite precisar la actividad de la enzima nitrogenasa porque su variación esta correlacionada positivamente con la actividad nitrogenasica y por lo tanto con la fijación (FAO, 1985). Por ello Graham (1994) indicaba que no necesariamente un mayor número implica eficiencia. Al respecto Martínez et al. (2010) refieren que las cepas más eficientes son aquellas que tienen mayor cantidad de nódulos medianos y grandes, siendo rojos en su interior, ubicados en raíz primaria y tienen rápida y prolongada fijación, en tanto que los rizobios menos eficientes tienen nódulos más pequeños, ubicados en raíces secundarias y tienden a paralizar la fijación biológica de nitrógeno en etapas más tempranas, siendo en el caso del trébol rojo en etapa anterior a la floración.



#### 4.5 RESULTADOS DE INVESTIGACION EN INVERNADERO Y SU EXTRAPOLACION A AGRICULTORES. EN FUNCION A INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD

Los resultados de los trabajos de investigación en invernadero, son obtenidos en condiciones controladas, entre ellos los elementos de la producción, sin que aquellos se

vean sometidos a la influencia distorsionante de los factores climáticos, plagas o simplemente acelerar el crecimiento o las reacciones. De este modo se obtiene información por ejemplo del potencial productivo acorde a lo genético, detectar los factores óptimos para un desarrollo, los tiempos de reacción etc. Los resultados de los trabajos realizados en estas condiciones resultan importantes pues dependiendo del tipo de información obtenida podrían ser de uso directo es decir aplicables, sin embargo existirán algunos otros en los cuales los resultados podrían ser preliminares y tendrían que ser validados en campo donde se obtiene información más cercana a la real, confiable y en consecuencia menor margen de error, no obstante es costosa, mayor tiempo, personal especializado, equipos, instalaciones etc.

De este modo la extrapolación de la información obtenida en invernadero al campo de agricultores es gradual, más cuando se trata de buscar información en el marco del desarrollo sostenible, dado que los indicadores desarrollados para medir avances en sustentabilidad y en la implementación de las estrategias productivas asociadas (eficiencia, producción más limpia, calidad del producto y otras) presentan inconvenientes que dificultan su correcta aplicación (Varsavsky y Fernández, 2003).

## V. CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se arribaron en cada uno de los indicadores de calidad del suelo y salud del cultivo; serán congruentes con el tipo de suelo empleado o similar.

1. En lo físico, los niveles crecientes de estiércol (E) junto a dolomita (D) a seis meses de incorporado disminuye linealmente tanto el índice de inestabilidad de estructura (Is) en agregados comprendidos entre 0.25 – 2 mm (en ambos niveles de D); como la densidad aparente (significativa solo en 2D) e incrementa la tasa de infiltración básica. Al año el Is incrementa hasta en un promedio de 150%; la densidad retoma su valor normal y la tasa de infiltración básica disminuye en promedio de 45%.
2. En lo químico, niveles crecientes de (E) junto a dolomita favorecen linealmente al incremento de pH, materia orgánica, fósforo disponible, capacidad de intercambio de cationes, calcio, magnesio y potasio cambiabiles, durante los seis primeros meses; siendo mejor el performance en general, empleando 4D. Similar comportamiento al año con ligera variación en el equilibrio y concentración de calcio, magnesio y potasio cambiabiles, que disminuyen ligeramente.
3. En lo biológico, existe relación creciente entre niveles de (E) junto a dolomita con el rendimiento de materia seca de la asociación de Trébol rojo y Rye-grass inglés; la respiración y biomasa microbiana, hasta el año de incorporado, siendo mayor en 4D respecto a 2D.
4. Respecto a la salud de plantas, al inicio muestran desbalance de calcio, magnesio, nitrógeno al aportar 10E en ambos niveles de dolomita. A doce meses mejora la absorción de Ca y Mg aumentado su calidad a nivel alto de E-D. Los nódulos en las raíces aumentan en número con la dosis de (E) junto a 2D y menor con 4D, no obstante en este último es mayor el peso.



5. Las raíces de las pasturas evaluadas poseen un efecto positivo, en el corolario de las enmiendas aplicadas, e influyen en todas y cada una de las características evaluadas, intensificando las reacciones producidas por el estiércol y dolomita.
6. La respuesta en la mejora de la calidad físico-química y biológica del suelo así como en la salud del cultivo, es información básica, que influenciaría en los aspectos socioeconómicos y ambientales con miras a alcanzar la sostenibilidad del suelo en sistemas de producción de zonas altoandinas en los que se incluya pasturas.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Con el propósito de sostenibilidad o incremento de la capacidad de resiliencia del recurso suelo y bajo el concepto de que todo tipo de vida depende de la calidad y salud del mismo para su supervivencia, en suelo ácido y fino de textura, se recomienda hacer uso de 20E-4D (estiércol y dolomita, en  $t.ha^{-1}$ ), de manera que se pueda alcanzar beneficios integrales en todos y cada uno de los parámetros de calidad del suelo - planta.
2. Continuar con el experimento durante mayor tiempo, con la finalidad de determinar la persistencia de las enmiendas.
3. Realizar el experimento en condiciones de campo, que permita refrendar los resultados obtenidos, con un análisis completo sobre aspectos socioeconómicos y medioambientales.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acevedo, E; Martínez, E. 2003. Sistema de labranza y productividad de los suelos, en Acevedo, E.: sustentabilidad en cultivos anuales. Santiago, Universidad de Chile (Serie Ciencias Agronómicas) 8:13-25.
2. Acosta, G; Ramírez, R. 2009. Cambios en las propiedades físicas y químicas de un Ultisol por acción de *Bacillus subtilis*. In XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Costa Rica.
3. Acton, D; Gregorich, L. 1995. The health o four soils: Toward sustainable agriculture in Canadá. Centre for land and biological resources research, Research Branch. Agriculture and Agri-Food Canadá, Ottawa, Ont. 138p.
4. Acuña, O; Peña, W; Serrano, E; Pocasangre, L; Rosales, F.; Delgado, E. Trejos, J; Segura, A. 2006. La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de suelos. In XVII. Reuniao Internacional da Associacão para a Cooperacão nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na América Tropical.v1.
5. Adriaanse, A. 2003. Environmental Policy Performance Indicators. A Study on the Development on indicators for environmental policy in the Netherlands. Sdu Uitgeverij Koninginnergrach, the Netherlands.13:7-21.
6. Aguilera, S. 2000. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín N° 14. Valdivia, Chile. p. 77-85.
7. Alegre, O. 1977. Efecto de enmiendas orgánicas sobre la agregación y estabilidad de los agregados, porosidad, humedad equivalente y CIC de un suelo de costa. La Molina. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 117p.
8. Alexander, M. 1980. Introducción a la Microbiología del suelo. AGT (Eds), México. D.F. 491p.
9. Altieri, M. 1999. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. 2ed. New York. 338p.

10. Altieri, M; Nicholls, C. 2002. Sistema agroecológico rápido de evaluación de calidad de suelo y salud de cultivos en el agro ecosistema de café. Universidad de California, Berkeley. Consultado 20 abril 2014. Disponible en <http://www.agroeco.org/doc/SistAgroEvalSuelo2.html>
11. Altieri, M; Nicholls, C. 2003. Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems. *Soil and Tillage Research*. 72:203-211.
12. Altieri, M; Nicholls, C. 2005. Agroecology and the Search for a Truly Sustainable Agriculture. México: United Nations Environment Programme. Consultado 15 de marzo 2014. Disponible en <http://www.agroeco.org/doc/agroecology-engl-PNUMA.pdf>
13. Altieri, M; Nicholls, C. 2006. Optimizando el manejo agroecológico de plagas a través de la salud del suelo. Department of Environmental Science, Policy and Management, Division of Insect Biology, University of California, Berkeley. *Agroecología* 1:29-33.
14. Altieri, M; Nicholls, C. 2007. Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas* 16 (1):3-12
15. Alvear, M; Rosas, A; Rouanet, J; Borie, F. 2005. Effects of three soil tillage systems on some biological activities in an ultisol from southern Chile. *Soil and Tillage Research*. 82:195-202.
16. Amézketa, E. 1999. Soil aggregate stability. *Journal of Sustainable Agriculture* 14 (2/3): 83-151.
17. Amézquita, E. 2003. La fertilidad física del suelo. In: Manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogota, SCCS. 164-176.
18. Amézquita, E. 2004. La fertilidad física del suelo. In: XVI Congreso Latinoamericano y XII Congreso Colombiano de la ciencia del suelo sobre “Suelo Ambiente y Seguridad Alimentaria”. Cartagena.
19. Anderson, J; Domsch, K. 1989. Ratios of microbial biomass carbon to total carbon in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry* 21:471-479.
20. Angers, D; Recous, S. 1997. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size. *Plant and Soil*. 189:197-203.

21. Araujo, D; Freitas, L; Daniel, L. 2002. Influência do sistema de preparo sobre as características físicas de um latos solo vermelho. Memórias. XII. Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola y II Foro de la Agroindustria del Mezcal. Oaxaca, México.
22. Aravena, C; Diez, C; Gallardo, F; Mora, M; Valentín, C. 2007. Utilización de lodo de la industria de celulosa y su efecto sobre las propiedades físico-químicas en suelos volcánicos degradados. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 7(1):1-14.
23. Arrigo, N; Jiménez, M; Efron, D; Defrieri, R. 2002. Carbono de respiración de un suelo forestal y su relación con la calidad de la hojarasca. *Agricultura Técnica*. 62 (2):331-338.
24. Arshad, M; Coen, G. 2004. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture* 7:25-31.
25. Arvidsson, J. 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. *Soil and Tillage Research*. 49:159-170.
26. Astier, C; Mass-Moreno, M; Etchevers, B. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelo. En el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605 – 620.
27. Bandinck, A; Dick, R. 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry* 31(11):1471-1479.
28. Barea, J; Olivares, J. 1998. Manejo de las propiedades biológicas del suelo. En: Jiménez Díaz, L. y R. Lamo de Espinosa (ed) *Agricultura sostenible*. Editorial Mundi Prensa. Madrid, p.173-193.
29. Barzegar, A; Asoodar, M; Ansari, M. 2000. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. *Soil and Tillage Research*. 57: p. 167-172.
30. Bauer, A. 1994. Quantification of the effect of soil organic – matter content on soil productivity. *Article in Soil Science Society of America Journal* 58 (1):185-193.
31. Bautista, A; Etchevers, J; Del Castillo, R; Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*. Asociación Española de Ecología terrestre. Alicante, España, v.3.

32. Bonel, B; Morrás, H; Bisaro, V. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo*. v. 23 (1):1850-2067.
33. Borie, G; Aguilera, S; Peirano, P. 1999. Actividad biológica en suelos. *Frontera Agrícola*. 5:29-32.
34. Bovarnick, A; Alpizar, F; Schnell, C. 2010. La importancia de la biodiversidad y de los ecosistemas para el crecimiento económico y la equidad en América Latina y el Caribe: Una valoración económica de los ecosistemas, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. New York. 29p.
35. Brady, N; Weil, R. 2008. *The nature and properties of soils*. 14 ed. Columbus, Ohio. Pearson Prentice hall. 990p.
36. Bronick, C; Lal, R. 2004. Soil structure and management: a review *Geoderma*: 124: 3-22.
37. Buol, S. 1995. Sustainability of soil use. *Annual Review of Ecology and Systematic* 26:25-44.
38. Buyanovsky, G; Aslam, M; Wagner, G. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Science Society of American Journal* 58:1167-1173.
39. Cabrera, S; Perez, C; Pla, E; Dominguez, J; Abréu, E. 1999. Influencia de la materia orgánica sobre los índices estructurales fundamentales de un vertisol y los rendimientos de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 8(3):55-58.
40. Cabría, F; Calandroni, M; Monteribbianesi, G. 2002. Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Ciencia del Suelo* 20 (2): 69p.
41. Caires, E; Feldhaus, I; Barth, G; Garbuio, F. 2002. Lime and Gypsum Application on the Wheat Crop. *Scientia Agrícola*, 59(2): p.357-364.
42. Cairo, P; Fundora, O. 1994. *Edafología*. La Habana, Pueblo y Educación. 476 p.
43. Cantú, M; Becker, A; Bedano, J; Schiavo, H. 2007. Evaluación de la calidad de los suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo*. 25 (2): 1850-2067.

44. Carrasco, M. 1992. El suelo como sistema químico. En Vera W.: Suelos una Visión actualizada del recurso. Publicaciones Misceláneas Agrícolas N° 38, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 345p.
45. Carter, M. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*. 94: 38-47.
46. Carter, M; Gregorich, E; Anderson, D; Doran, J; Jansen, H; Pierce, F. 1997. Concepts of soil quality and their significance. In Gregorich, E; Carter, M. (eds.): Soil quality for crop production and ecosystem health. *Developments in Soil Science 25*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
47. Castro, L. 2009. Crecimiento económico y medio ambiente. *Economía y Medio ambiente*. N° 847. Universidad Complutense de Madrid.
48. Cerana, J; Wilson, M; De Battista, J. Noir, J; Quintero, C. 2006. Estabilidad estructural de los Vertisoles en Entre Ríos en un sistema Arrocerero regado con agua subterránea. Tesis de Maestría. Argentina. Universidad Nacional de Entre Ríos. 175p.
49. Cerón, L; Melgarejo, M. 2005. Enzimas del suelo: Indicadores de Salud y Calidad. *Acta Biológica Colombiana*, 10(1).
50. Chappell, N; Ternan, J; Bidin, K. 1999. Correlation of physicochemical properties and sub-erosional landforms with aggregate stability variations in a tropical Ultisol disturbed by forestry operations. *Soil and Tillage Research*. 50: 55-71.
51. Chen, Z. 2000. Relationship between heavy metal concentrations in soils of Taiwan and uptake by crops. Food and fertilizer technology center. Consultado 15 abril 2014. Disponible en <http://www.ffte.agnet.org/library/article/tb149.html>.
52. Coyne, M. 2000. Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio. España. Editorial Paraninfo. 416p.
53. Dabire, K; Duponnois, R; Mateille, T. 2001. Indirect effects of the bacterial soil aggregation on the distribution of *Pasteuria penetrans*, and obligate bacterial parasite of plant-parasitic nematodes. *Geoderma* 102:139-152.
54. Dalurzo, H. 2002. Agregado de residuos orgánicos en suelos ferralíticos. Efecto sobre variables que estiman sustentabilidad. Tesis Magíster Scientiae. Argentina. Escuela para Graduados Alberto Soriano. 250p.

55. De Orellana, J; Pilatti, M. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del Suelo*. 12(2):75-80.
56. Degens, B. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanism and the factors affecting these: a Review. *Australian Journal of Soil Research*. 35:435-459.
57. Dexter, A. 1988. Strength of soil aggregates and of aggregate beds. *Catena Supplement*. 11:35-52.
58. Dexter, A. 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
59. Diaz, R; Rava, C. 2007. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono sur. 1era ed. Montevideo. PROCISUR. 273p.
60. Dick, R; Breakwell, D; Turco, R. 1999. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: Doran, J. & Jones, A. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America. 49: 247-271.
61. Dimanche, P; Hoogmoed, W. 2002. Soil tillage and water infiltration in semi-arid Morocco: the role of surface and sub-surface soil conditions. *Soil and Tillage Research*. 66:13-21.
62. Doran, J; Elliott, E; Paustian, K. 1998. Soil microbial activity, nitrogen cycling, and long-term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management. *Soil and Tillage Research*. 49:3-18.
63. Doran, J; Parkin, T. 1994. Defining and assessing soil quality. *Soil Science Society of America* 677:3-21.
64. Doran, J; Safley, M. 1997. Defining and Assessing Soil Health and Sustainable Productivity. In: *Biological Indicators of Soil Health*. Pankhurst; C. Doube, B.M. and Gupta, V.V.S.R. (eds), p.1-28. (CAB International: New York).
65. Doran, J; Zeiss, M. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*. 15 (1):3-11.



66. Etana, A; Hakansson, I; Zagal, E; Bucas, S. 1999. Effects of tillage depth on organic carbon content and physical properties in five Swedish soil. *Soil and Tillage Research*. 52:129-139.
67. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1985. *Inoculantes para leguminosas y su uso*, FAO/NIFTAL, Roma. 60p.
68. FAO, PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Ciencia y la Cultura). 1980. *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. FAO, Roma.
69. FAO. 1995. *Planning for sustainable use of land resources: toward a new approach*. Background paper to FAO's Task Managership for Chapter 10 of Agenda 21 of the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED). *FAO Land and water bulletin 2*, Rome. 60p.
70. FAO. 2001. *Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural*. Boletín de tierras y aguas de la FAO. n.5. PNUD. Costa Rica.
71. Fauvart, M; Michiels, J. 2008. Rhizobial secreted proteins as determinants of host specificity in the Rhizobium-legume symbiosis. *FEMS Microbiol Lett*, 285 (1): 1-9.
72. Ferreras, L; De Battista, A; Pecorari, C. 2001. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 36:61-170.
73. Fortun, A; Fortun & Ortega, C. 1989. Effect of farmyard manure and its humic fractions on the aggregate stability of sandy- loam soil. *Journal of Soil Science*. 40: 293-298.
74. Franchini, J; Malavolta, E; Miyazawa, M; Pavan, M. 1999. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 23:533-542.
75. Fransson, A; Bergkvist, B; Tyler, G. 1999. Phosphorus solubility in an acid forest soil as influenced by applied phosphorus and liming. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 14: 538-544.
76. Freire, J; 1996. For the Rhizobium-legume symbiosis. In Alexander, M (ed) 1984. *Biological nitrogen fixation; ecology, technology and physiology*. New York, Plenum Press. p.51-72.

77. Fuentes, J; Flury, M; Hugging, D; Bezdicek, M. 2003. Soil water and nitrogen dynamics in dry land cropping systems of Washington State, USA. *Soil. Soil. Tillage Research*. 71:33-43.
78. García de Cortázar, C; Silva, P; Acevedo, E. 2003. Evaluación de un modelo predictivo sobre él; efecto de la temperatura y humedad en la descomposición de rastrojo de trigo. *Agricultura Técnica*. 63(1):69-80.
79. García y Dorronsoro, 2006. Contaminación del suelo. En tecnología de suelos. Universidad de Granada. Revisado el 20 de abril del 2014. Disponible en <http://edafologia.ugr.es/conta/tema10/tipos.htm>
80. García, A; Rivero, C. 2008. Evaluación del carbono microbiano y la Respiración basal en respuesta a la aplicación de lodo papelero en dos suelos de la Cuenca del Lago de Valencia, Venezuela. *Revista Facultad de Agronomía*. (Maracay) 34:119-133.
81. Garrido, J. 2009. Guía de conocimiento sobre desarrollo sostenible. Instituto de estudios políticos para América Latina y África. Observatorio internacional de ciudadanía y medio ambiente sostenible. Revisado el 10 de abril del 2014. Disponible en <http://www.gloobal.net/iepala/gloobal/fichas/ficha.php?entidad=Textos&id=1548&opcion=documento>
82. Gavilánez, P. 2001. Rehabilitación de Cangahua con cultivo de Rye-grass híbrido (*Lolium perenne x Lolium multiflorum*), manejo de la fertilización y estabilidad estructural. Tumbaco-Pichincha. Universidad Central del Ecuador.
83. Geibe, C; Holmstorm, S; Van Hees, P; Lundstrom, U. 2003. Impact of lime and ash applications on soil solution chemistry of an acidified podzolic soil. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*. 3:p.77–96.
84. Gil, M; Carballo, M; Calvo, L. 2008. Fertilization of maize with compost from cattle manure supplemented with additional mineral nutrients. ISSN 0956-053X, (8):1432-1440.
85. Girbau, J; Josa, R. 1989. Estabilidad estructural y erosión en suelos de uso agrícola de la Plana de Vic. *Acta Geológica Hispánica*, V. 24(1):59:66.

86. Golchin, A; Clarke, P; Oades, J; Skjemstad, J. 1995. The effects of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils. *Australian Journal of Soil Research*. 33:975-993.
87. Gómez, J; Giráldez, J; Pastor, M; Fereces. 1999. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil and Tillage Research*. 52:167-175.
88. Graham, P; Draeger, K; Ferrey, M. 1994. Acid pH tolerance in strains of *Rhizobium* and *Bradyrhizobium*, and initial studies on the basis for acid tolerance of *Rhizobium tropici* strain UMR 18991. *Canadian Journal of Microbiology*. 40:198-207.
89. Grant, R. 1997. Changes in soil organic matter under different tillage and rotation: Mathematical modeling in ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*. 61:1159-1175.
90. Green, C; Blackmer, A; Horton, R. 1995. Nitrogen effects on conservation of carbon during residue decomposition in soil. *Soil Science Society of America Journal*. 59:453-459.
91. Guérif, J; Richard, J; Durr, C; Machet, J; Recous, S; Estrade, R. 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment *Soil and Tillage Research*. 61:13-32.
92. Guharay, F; Monterroso, D; Staver, C. 2001. El diseño y manejo de la sombra para la supresión de plagas en cafetales de América central en las Américas 8: 22-29.
93. Hattori, H. (1992). Influence of heavy metals on soil microbial activities. *Soil Science Plant Nutrition*. 38(1):93-100.
94. Henin, S; Monnier, G; Combeau A. 1958. Methode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*. 9:71-90.
95. Hernández, R; López, D. 2000. Efectos de la siembra directa y la labranza convencional en la estabilidad estructural y otras propiedades físicas de ultisol en el estado de Guarico- Venezuela. *Agronomía Tropical*. 50(1):9-29.
96. Hunnemeyer, J; De Camino, R; Muller, S. 1997. Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.

97. INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales). 2009. Gestión de recursos hídricos en el Perú. Erosión severa de los suelos por regiones. Consultado 20 marzo 2014. Disponible en <http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream>.
98. Jaramillo, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 613 p.
99. Jastrow, J; Miller, R. 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organ - mineral associations. In: Lal, R; Kimball, J; Follett, R; Stewart, B. (Eds.), Soil processes and the carbon cycle. Boca Ratón. CRC. p.207-223.
100. Jenkinson, D. 1992. La materia orgánica del suelo: evolución. En: Wild, A. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas. Madrid: Mundi-Prensa.
101. Kaiser, E; Mueller, T; Joergensen, R; Insam, H; Heinemeyer, O. 1992. Evaluation of methods to estimate the soil microbial biomass and the relationship with soil texture and organic matter. Soil Biology and Biochemistry. V.24 (7):675-683.
102. Karlen, D; Mausbach, M; Doran, J; Cline, R; Harris, R; Schuman, G. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. Soil Science Society America Journal. 61:4-10.
103. Kay, B; Angers, D. 2001. Soil structure. In: Sumner, ME (ed). Handbook of Soil Science. Boca Raton: CRC Press, p. 229- 276.
104. Keren, R. (1996). Reclamation of sodic affected soils. In Soil erosion Conservation and rehabilitation. Mercel Decker, Inc. p. 353-74.
105. Krull, E; Skjemstad, J; Baldock, J. 2004. Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. Grains research & Development Corporation Report Proyect. CSO 00029.
106. Kumar, J; Jamal, T; Doetsch, A; Turner, F; Duffy, J. (2004). CREB binding protein functions during successive stages of eye development in Drosophila. Genetics 168(2):877-893.
107. Kunes, I; Balcar, V; zahradnik, D. 2007. Influence of a planting hole application of dolomitic limestone powder and basalt grit on the growth of Carpathian birch (*Betula carpatica* W. et K.) and soil chemistry in the air-polluted Jizerské hory Mts. Journal of Forest Science 53 (11):505–515.

108. Lampurlanés, J; Martínez, C. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management system and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal*. 95:526-536.
109. Larson, W; Pierce, M. 1991. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J. (ed.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America. 35:37-51.
110. López, I. 2005. Qué se sabe sobre la calidad del suelo y su importancia. Universidad Veracruzana. *Gaceta*. p.94-96.
111. Lutters, J; Salazar, C. 2000. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Traducción al español del: "Soil Quality Test Kit Guide". Argentina, Instituto de Suelos. 82 p.
112. Magdoff, F; Van Es, H. 2009. *Building Soils for Better Crops Sustainable Soil Management*. 3ra Ed. National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture. 330p.
113. Magdoff, F; Weil, R. 2004. *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. CRC Press, Boca Raton. p.67-102.
114. Márquez, C; García, V; Cambardella, C; Schultz, R; Isenhardt, T. 2004. Aggregate-size stability distribution and soil stability. *Soil Science Society America Journal*. 68: 725-735.
115. Martínez, E; Fuentes, J; Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Publicado en *Journal Soil Science Plant Nutrient*. v.8: 68-96.
116. Martínez, V; Jorquera, M; Crowley, D; Gajardo, G; Mora, M. 2010. Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *Journal Soil Science Plant Nutrient*. 10: 293-319.
117. Mathieu, C; Pielain, F. 1998. *Analyse physique des sols: Methodes choisies*. Lavoisier Tec. Doc. Paris, London, New York. 275p.
118. Mengel, E; Kirkby, E. 1987. *Principles of plant nutrition*. 4<sup>th</sup> ed. International Potash Institute, IPI, Bern, Switzerland. 685p.
119. Misra, A; Daniel, H; Hill, R; Blair, G. 1999. Effect of long term crop rotations and rewetting of soil on stability. *Soil Use Management Journal*, v.15: 254-255.

120. Miyazawa, M; Pavan, M; Calegari, A. 1993. Efeito de material vegetal na acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.17: 411-416.
121. Nardone, M. 1994. La siembra directa en la agricultura sostenible. INTA-PAC. Encuentro de profesionales hacia una agricultura sostenible. Argentina. p.29-33.
122. Oades, J. 1993. The role of biology in the formation stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56:377-400.
123. Ochoa, V; Hinojosa, B; Gómez-Muñoz, B; García-Ruíz, R. 2007. Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Revista electrónica. Universidad de Jaén. Iniciación a la Investigación*. 2:10p.
124. Ojeda, G; Alcaniz, G; Le Bissonnais, Y. 2008. Enmiendas orgánicas para mejorar la estabilidad estructural del suelo mediterráneo. *Agricultura Ecosystems & Environment*, 125 (1-4): 48-56.
125. Otten, L. 2007. Recycling organic wastes: Science and technology. Short course on ISWM at Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Habana, Cuba.
126. Parr, J; Papendick, R; Meyer, R. 1992. Soil quality: attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture* 7:5-11.
127. Parton, W; Schinel, D; Cole, C; Ojima, S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of American Journal* 51: 1173-1179.
128. Paul, E; Harris, D; Klug, M; Ruess, R. 1999. The determination of microbial biomass. In G.P. Robertson, D. Coleman, C.S. Bledsoe, and P. Sollings: Standard soil methods for long-term ecological research. Oxford University Press. New York. p. 291-319.
129. Paustian, K; Collins, H; Paul, L. 1997. Management Controls on Soil Carbon. In: Paul, E.A., Elliott, E.T.; Paustian, K.; Cole, C.V. ed. *Soil Organic matter in Temperate Agroecosystems*. Cap 2 p.15-49.
130. Peirano, P; Aguilera; G; Borie, M; Caiozzi. 1992. Actividad biológica en suelos volcánicos y su relación con la dinámica de la materia orgánica. *Agricultura Técnica. Chile*. 52: 367-371.

131. Peoples, M; Herridge, D; Ladha, J. 1995. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production. *Plant Soil* 174:3-28.
132. Pérez B; Ouro P; Merino A; Macias F. 1998. Descomposición de materia orgánica, biomasa microbiana y emisión de CO<sub>2</sub> en un suelo forestal bajo diferentes manejos sevícolas. *Edafología* 5: 83-93.
133. Pérez, J. 1992. Estudio de la estabilidad estructural del suelo en relación con el complejo de cambio (Comportamiento de algunos suelos característicos Españoles). Tesis doctoral. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 445p.
134. Phelan, P; Mason, J; Stinner, B. 1995. Soil fertility management and host preference By European corn borer, *Ostrinia nubilalis*, on *Zea mays*: a comparison of organic and conventional chemical farming. *Agriculture Ecosystem and Environment*. v.56: 1-8.
135. Pikul, J; Allmaras, R. 1986. Physical and chemical properties of a Haploxeroll after fifty years of residue management. *Soil Science Society American Journal*. 50: 214-219.
136. Pilatti, M; De Orellana, J; Priano, L; Felli, O; Grenon, D. 1988. Incidencia de manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades físicas, químicas y biológicas de un Argiudol en el Sur de Santa Fe. *Ciencia del Suelo*, 6: 19-29.
137. Piw, D; Raktim, P; Pradip B. 2012. Temporal variation of soil nutrients under the influence of different organic amendments. *Agronomy and Soil Science*. v.58 (7): 745-757.
138. Pocknee, S; Sumner, M. 1997. Carbon and nitrogen contents of organic matter determine its soil liming potential. *Soil Science Society of America Journal*. 61: 86-92.
139. Porta, J; López, M; Roquero, C. 2003. *Edafología, para la agricultura y el medio ambiente*. 3 ed. España. Mundi-Prensa. 628p.
140. Prause, j; Soler, J. 2001. Cambios producidos en un suelo bajo labranza conservacionista y siembra directa de algodón en el Chaco, Argentina. *Agricultura Técnica*. 61: (4) 527-532.
141. Primavesi, A. 1980. *Manejo ecológico del suelo*. 5ª. Ed. Buenos Aires. El Ateneo. 499p.

142. Quiroga, A; Buschiazzo, D; Peinemann, N. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid argentinian pampas. *Soil Science*. 161 (2): 104-108.
143. Ramírez, R; Acosta, G. 2009. Cambio en las propiedades físicas y químicas de un ultisol por acción de *Bacillus subtilis*. In. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Costa Rica.
144. Reddy, M. 1991. Effects of soil amendments on the hardening of red sandy loams (chalka soils) of Andhra Pradesh. *Annals of Agricultural Research*. 12: 174-176.
145. Reynolds, W; Bowman, B; Drury, C; Tana, C. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*. 110:131-146.
146. Rivero, C; Paolini, J. 1995. Efecto de la incorporación de residuos orgánicos sobre la evolución de CO<sub>2</sub> de dos suelos venezolanos. *Revista de Facultad de Agronomía*. (Maracay). 21: 37-49.
147. Rivero, E; Irurtia, C; Michelena, R. 2004. Indicadores cuantitativos de calidad de suelo y salud de un cultivo de soja en siembra directa. Instituto de suelos INTA. Argentina. Informe. 1-4.
148. Romig, D; Garlynd, M; Harris, R; McSweeney, K. 1995. How farmers assess soil health and quality. *Journal Soil Water Conservation* 50: 229-236.
149. Rethon, F. 2000. Influence of Time on Soil Response to No-till practices. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 700-709.
150. Salazar, I; Alvear, M; Baraona, J. 2009. Evolución de las propiedades químicas y biológicas de un Andisol con la aplicación de biosólido, región de la Araucanía, Chile. In. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Costa Rica.
151. Salazar, I; Trejo, H. 2009. Impacto de la aplicación de estiércol bovino en el comportamiento de algunas características del suelo y producción del maíz forrajero. In. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Costa Rica.
152. Sanchez, J; Harwood, R; Willson, T; Kizilkaya, K; Smeenk, J; Parker, E; Paul, E; Knezek, B; Robertson, G. 2004. Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Agronomy Journal*. 96: 769-775.



153. Sánchez, R. 2008. Efecto del encalado superficial sobre la producción de pastos Estrella (*Cynodon nlemfuensis*) y Transvala (*Digitaria eriantha*) en suelos moderadamente ácidos de Monteredondo II Zamorano. *Ceiba* 49(2):186.
154. Sanzano, G; Corbella, R; García, J; Salvador, G. 2005. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ciencia del Suelo*. v. 23 (1): 1850-2067.
155. Seybold, C; Mausbach, M; Karlen, D; Rogers, H. 1997. Quantification of Soil Quality. En *Soil process and the carbon Cycle* (eds. Lal, R.; Kimble, J.; Follet, R. & Stewart, B.), CRC Press, Boca Raton, Florida. p .387-403.
156. Siegrist, S. Schaub, D; Pfiffner, L; Mader, P. 1998. Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term field study on loess in Switzerland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 69: 253-264.
157. Sierra, J. 2005 *Fundamentos para el establecimiento de pasturas y cultivos forrajeros*. 2 ed. Universal de Antioquia. Colombia.
158. Singer, M; Ewing, S. 2000. Soil Quality. En *Handbook of Soil Science*. Chapter 11. (ed. Sumner, M.E.), CRC Press, Boca Raton, Florida. p.271-298.
159. Singer, M; Munn, D. 1996. *Soils and introduction*. 3 ed. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 450p.
160. Six, J; Elliott, E; Paustian, K. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*. 63:1350–1358.
161. Six, J; Elliott, E; Paustian, K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C-sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biologist Biochemistry*. 32: 2099-2103.
162. SQI (Soil Quality Institute). 1998. *Indicators for soil quality evaluation*. USDA. Natural Resources Conservation Service. Prepared by the national soil survey center in cooperation with the soil quality institute. NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
163. Stevenson, F; Cole, M. 1999. *Cycles of soil*. 2nd Ed. Wiley & Sons. New York, USA. 427p.

164. Stott, T; Elliott, L; Papendick, R; Campbell, R. 1986. Low temperature or low water potential effects on the microbial decomposition of wheat residue. *Soil Biology Biochemistry*. 18: 577-582.
165. Strong, D; De Wever, H; Merckx, R.; Recous, S. 2004. Spatial location of carbón decomposition in the soil pore system. *European Journal of Soil Science*. 55: 739–750.
166. Tamaríz, J; Cruz, A; Castelán, R; Linares, G. 2009. Efectos de los biosólidos sobre las propiedades de los suelos y desarrollo del maíz. In. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Costa Rica.
167. Timan, E; Neufeldt, H; Ayarza, M; Resck, D; Zech, W. 1999. Microbial biomass, microbial activity, and carbon pools under different land-use systems in the brazilian cerrados. In R. Thomas and M. Ayarza, Sustainable land management for the Oxisols of the Latin American savannas. p.187-197.
168. Tirol, A; Ladha, J; Regmi, A; Bhandari, A; Inubushi, K. 2007. Organic Amendments Affect Soil Parameters in Two Long-Term Rice-Wheat Experiments. *Soil Science Society of America Journal* 71: 442-452.
169. Tisdall, J. 1991. Fungal hyphae and structural stability of soil. *Australian Journal of Soil Research*. 29:729-743.
170. Tisdall, J. 1996. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: Carter, M. and Steward, B. (eds) *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, Florida, 57–96.
171. Traoré, S; Thiombiano, L; Rasolodimby, J; Guinko, M. 2007. Carbon and nitrogen enhancement in Cambisols and Vertisols by *Acacia spp.* In eastern Burkina Faso: Relation to soil respiration and microbial biomass. *Applied Soil Ecology*. 35: 660-669.
172. Uribe, H; Rouanet, J. 2002. Efecto de tres sistemas de labranza sobre el nivel de humedad en el perfil del suelo. *Agricultura Técnica*, v.62: 4.
173. Vance, G; Stevenson, F; Sikra, F. 1996. Environmental chemistry of aluminum-organic complexes. En: *The Environmental chemistry of aluminum* Sposito, G. ed. CRC. Press. Boca Raton, Florida. 169-220p.
174. Varsavsky, A; Fernández, D. 2003. Indicadores de sustentabilidad. Se utilizan correctamente?. XIII Congreso Argentino de saneamiento y Medio Ambiente. Buenos Aires.

175. Wan, Y; El-Swaify, S. 1999. Runoff and soil erosion as affected by plastic mulch in a Hawaiian pineapple field. *Soil and Tillage Research*. 52: 29-35.
176. Wander, M; Traina, S; Stinner, B; Peters, S. 1994. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Science Society of American Journal*. 58: 1130-1139.
177. Wardle, D; Bardgett, R; Klironomos, J; Setälä, H; Parton, W; Wall, D. 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science* 304: 1629-33.
178. Watts, C; Dexter, A. 1997. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. *Soil and Tillage Research*. 42: 253-275.
179. Wong, M; Gibbs, P; Nortcliff, S; Swift, R. 2000. Measurement of the acid neutralizing capacity of agroforestry tree prunings added to tropical soils. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 134: 269-276.
180. Wright, F; Wright, R; Sworobuk, J; Boyer, D. 1988. Effect of acid soil chemical properties on nodulation and competition of *Rhizobium trifolii*, *Comm Soil Science Plant Anal.* v.19: 311.
181. Zagal, L; Córdova, C. 2005. Indicadores de calidad de la materia orgánica del suelo en un Andisol cultivado. *Agricultura técnica*, 65: 186-197.