



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**“EFECTO DE POLVO DE DIFERENTES ROCAS
LOCALMENTE DISPONIBLES SOBRE LA PRODUCTIVIDAD
DE UN ANDOSOL EN HUATUSCO, VERACRUZ, MÉXICO”**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

PASQUINEL DE LA FRAGA CHÁVEZ

JURADO EXAMINADOR

DRA. MA. DE LOURDES FLORES DELGADILLO (DIRECTOR DE TESIS)

DRA. MARGARITA GUTIÉRREZ RUIZ (PRESIDENTE)

DR. DAVID FLORES ROMÁN (VOCAL)

DR. ARTURO AGUIRRE GÓMEZ (SUPLENTE)

DR. DANIEL GEISSERT KENTZ (SUPLENTE)

MÉXICO, D. F. JUNIO 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	ii
LISTADO DE FIGURAS.....	iv
LISTADO DE TABLAS.....	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	ix
RÉSUMÉ.....	xi
AGRADECIMIENTOS.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	
ANTECEDENTES.....	4
1.1 Generalidades.....	4
1.2 Aplicación de polvo de roca en ambientes templados.....	6
1.3 Aplicación de polvo de roca en ambientes tropicales.....	7
CAPÍTULO II	
PARTE EXPERIMENTAL.....	12
2.1 Descripción general de la zona de estudio.....	12
2.1.1 Ubicación.....	12
2.1.2 Topografía.....	13
2.1.3 Geología.....	13
2.1.4 Edafología.....	14
2.1.5 Hidrología.....	15
2.1.6 Clima.....	15
2.1.7 Uso actual del suelo.....	15
2.2 Materiales y métodos.....	16
2.2.1 Muestreo.....	16
2.2.2 Análisis de suelo.....	17
2.2.3 Análisis de rocas.....	19
2.2.4 Diseño experimental y de los tratamientos.....	20

2.2.5 Experimento de invernadero	21
2.2.6 Cortes	22
2.2.7 Medición del área foliar.....	22
2.2.8 Análisis estadístico de la información	22
CAPÍTULO III	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
3.1 Resultados.....	24
3.1.1 Características físicas del suelo.....	24
3.1.2 Características químicas del suelo	25
3.1.3 Punto de carga cero del suelo.....	27
3.1.4 Composición química de las rocas y del suelo	28
3.1.5 Concentraciones extraíbles de Fe, Zn, Cu y Mn con DTPA y con agua meteórica	29
3.1.6 pH de las rocas.....	31
3.1.7 Mineralogía de las rocas	31
3.1.8 Rendimiento de forraje fresco	35
3.1.9 Rendimiento de forraje seco.....	40
3.1.10 Área foliar	45
3.1.11 Propiedades del suelo al término del experimento en invernadero.....	49
3.2 Discusión	53
3.2.1 Características físicas y químicas del suelo	53
3.2.2 Efecto de las rocas sobre la productividad del suelo (rendimiento de forraje seco)	54
3.2.3 Efecto de las rocas sobre algunas características químicas del suelo: pH, biodisponibilidad y fijación de fósforo	55
3.2.4 Efecto de las rocas sobre el Fe, Zn, Cu y Mn extraíbles con DTPA.....	56
CAPÍTULO IV	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	62
APÉNDICE	67

LISTADO DE FIGURAS

Capítulo II

Figura 1. Mapa de localización de Huatusco

Figura 2. Ubicación y geología de la zona de estudio Las Cañadas en la región de Huatusco

Capítulo III

Figura 3. Curva de potencial Zeta en función del pH

Figura 4. Total de Álcalis vs Sílica

Figuras 5 y 6. Fotomicrografías de la Escoria roja usando un lente de aumento 4x

Figuras 7 y 8. Fotomicrografías del Basalto usando un lente de aumento 10x

Figuras 9 y 10. Fotomicrografías de un fragmento contenido en la Brecha volcánica usando un lente de aumento 10x

Figuras 11 y 12. Fotomicrografías de la Escoria negra usando un lente de aumento 4x

Figuras 13 y 14. Fotomicrografías de la Caliza usando un lente de aumento 4x

LISTADO DE TABLAS

Capítulo II

Tabla 1. Diseño de tratamientos

Capítulo III

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo

Tabla 3. Propiedades químicas del suelo

Tabla 4. Análisis químico total por fluorescencia de rayos X. Elementos mayores

Tabla 5. Análisis químico total por fluorescencia de rayos X. Elementos traza

Tabla 6. Fe, Zn, Cu y Mn extraíbles con DTPA y solubles en agua meteórica

Tabla 7. Niveles críticos de micronutrientes extraíbles con DTPA para cultivos sensibles

Tabla 8. pH de las rocas

Tabla 9. Rendimiento de forraje fresco en el primer corte

Tabla 10. Rendimiento de forraje fresco en el segundo corte

Tabla 11. Rendimiento de forraje fresco en el tercer corte

Tabla 12. Rendimiento de forraje fresco en el cuarto corte

Tabla 13. Rendimiento de forraje fresco en el total de los cortes

Tabla 14. Rendimiento de forraje seco en el primer corte

Tabla 15. Rendimiento de forraje seco en el segundo corte

Tabla 16. Rendimiento de forraje seco en el tercer corte

Tabla 17. Rendimiento de forraje seco en el cuarto corte

Tabla 18. Rendimiento de forraje seco en el total de los cortes

Tabla 19. Área foliar en la fecha del primer corte

Tabla 20. Área foliar en la fecha del segundo corte

Tabla 21. Área foliar en la fecha del tercer corte

Tabla 22. Área foliar en la fecha del cuarto corte

Tabla 23. Valores de pH en el suelo medido al término del experimento en invernadero

Tabla 24. Concentraciones de fósforo disponible en el suelo medido al término del experimento en invernadero

Tabla 25. Fijación de fósforo en el suelo medido al término del experimento en invernadero

Tabla 26. Concentraciones de Fe, Zn, Cu y Mn extraíbles con DTPA al término del experimento en invernadero

Tabla 27. Niveles críticos de Zn extraíble con DTPA

Tabla 28. Niveles críticos de Cu y Mn extraíbles con la solución extractora Mehlich 3 en Andosoles

RESUMEN

En muchas partes del mundo, la seguridad alimentaria está en riesgo. Una de las causas de la caída en la producción de alimentos *per capita*, es la disminución en la calidad y cantidad de los suelos agrícolas. Con el fin de invertir esta tendencia y aumentar la fertilidad del suelo, los nutrientes del mismo deben ser repuestos.

Hay varias maneras de mejorar y mantener la salud del suelo. La aplicación de prácticas agrogeológicas es sólo uno de los instrumentos biofísicos que se utilizan para hacer frente a problemas del suelo a largo plazo.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de rocas molidas, disponibles en la región de Huatusco, Veracruz, México, sobre la productividad de un Andosol, y relacionar dicha productividad con las características físicas y químicas del suelo y el rendimiento de una especie vegetal.

Para alcanzar el objetivo de la presente investigación se llevó a cabo un muestreo de suelo dentro de la Reserva Ecológica “Las Cañadas”, así como un muestreo de rocas en cada uno de los bancos de material ubicados en la región. Dichas muestras fueron analizadas, tanto física como químicamente. En forma posterior, se estableció un experimento en invernadero, el cual consistió de 17 tratamientos obtenidos mediante diferentes combinaciones de los distintos materiales de roca. Se utilizó el diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones, y el diseño de los tratamientos se realizó mediante la combinación de los diferentes polvos de roca. La aplicación de polvo de roca al suelo se hizo con una dosis uniforme equivalente a 10 ton ha^{-1} y se utilizó un mejorador del pH del suelo que fue una caliza, aplicando una sola dosis equivalente a 4 ton ha^{-1} . La evaluación de la productividad del suelo se hizo en función de la producción de biomasa aérea de un pasto utilizado como forraje, y que fue obtenido durante casi diez meses de experimentación a través de cuatro cortes. Se estableció la relación de esta producción de biomasa con algunas características químicas del suelo evaluadas en forma posterior al experimento, analizando toda la información mediante estadística clásica.

La aplicación de las rocas al suelo incrementó los valores de pH, aumentó la cantidad de algunos micronutrientes disponibles para las plantas, e incrementó los niveles de cationes en el suelo. Además, se produjo un incremento en la producción de biomasa con la utilización de los materiales de roca. Sin embargo, no se observaron cambios en la disponibilidad del fósforo para las plantas. El uso de polvo de roca para aumentar la fertilidad del suelo provee una alternativa inteligente para la agricultura, si la estrategia es la conservación del suelo.

ABSTRACT

In many parts of the world, food security is at risk. One of the causes of the falling on food production *per capita*, is the decline on agricultural soil's quality and quantity. In order to reverse this trend, and increase soil fertility, soil nutrients have to be replenished.

There are several ways to enhance and maintain the soil's health. The application of agrogeological practices is only one of the biophysical instruments that are used to tackle long-term soils related problems.

The aim of this study was to evaluate the effect of applying crushed rocks available in the region of Huatusco, Veracruz, Mexico, on the productivity of an Andosol and relating this productivity with physical and chemical characteristics of soil and yield of a plant species.

To achieve the goal of this research a soil sampling was carried out within the Ecological Reserve "Las Cañadas" as well as a sampling of rocks on each bank of material located in the region. These samples were analyzed, both physically and chemically. After the fact, was established a greenhouse experiment, which consisted of 17 treatments obtained by different combinations of different rock materials. We used a simple experimental design with distribution of treatments in randomized blocks with three replications. The application of rock dust to the soil was made with a uniform dose equivalent to 10 ton ha⁻¹ and we used limestone as a soil pH improver, using a single dose equivalent to 4 ton ha⁻¹. The evaluation of soil productivity was based on the biomass production of grass used as a forage and was obtained for almost ten months of experimentation through four courts. It was established the relationship of this production of biomass with some soil chemical characteristics evaluated in a post-experimental form, analyzing all the information through classical statistics.

The application of rocks to the soil increased pH values, increased the availability of some micronutrients to plants, and increased the levels of cations in the soil. There was also an increase in biomass production with the use of rock materials. However, there were no changes in the availability of phosphorus to plants. The use of rock dust to improve soil

fertility provides an intelligent alternative to agriculture where soil conservation is the strategy.

RÉSUMÉ

Dans de nombreuses parties du monde, la sécurité alimentaire est à risque. L'une de ces causes est la baisse de la production alimentaire par habitant liée à une diminution de la qualité et de la quantité des sols agricoles. Dans le but d'inverser cette tendance et d'augmenter la fertilité du sol, les nutriments doivent être la réponse.

Il existe différentes manières d'améliorer et de préserver la santé des sols. Les applications pratiques agro-géologiques sont seulement l'un des instruments biophysique qui sont utilisés pour freiner les problèmes des sols à long terme.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la roche réduite en poudre disponible dans la région de Huatusco, Veracruz au Mexique sur la productivité d'un Andosol en mettant en relation la productivité avec les caractéristiques physiques et chimiques du sol et le rendement d'une espèce végétale.

Pour mener à bien cette étude, il a été prélevé un échantillon de sol dans la Réserve écologique "Las Cañadas", ainsi qu'un échantillonnage de roche située dans la région. Ces échantillons ont été analysés aussi bien physiquement que chimiquement. Postérieurement, il a été réalisé une expérimentation sous serre, laquelle reposait sur 17 traitements obtenus grâce à différentes combinaisons de matériels distincts de roche. Le schéma expérimental utilisé était des groupes au hasard de trois répétitions. L'application de poudre de roche dans le sol s'est fait avec une dose uniforme équivalent à 10 ton ha^{-1} . Pour optimiser le pH du sol, le calcaire a été utilisé à une dose équivalent à 4 ton ha^{-1} . L'évaluation de la productivité du sol s'est faite en fonction de la production de la biomasse aérienne d'un pâturage utilisé comme fourrage et qui a été obtenu après dix mois d'expérimentation par l'intermédiaire de quatre coupes. Il a été établit la relation de cette production de biomasse avec certaines caractéristiques chimiques du sol évaluées a posteriori par l'expérimentation, analysant toutes ces informations statistiquement.

L'application de roche dans le sol augmente la valeur du pH, accroît la quantité de certains micronutriments disponible pour les plantes ainsi que le niveau de cations dans le sol. De plus, il s'est produit une augmentation de la production de biomasse avec l'utilisation de

matériaux de roche. Cependant, il n'a pas été observé de changement quant à la disponibilité de phosphore pour les plantes. L'utilisation de poudre de roche pour améliorer la fertilité du sol constitue une alternative intelligente à l'agriculture où la conservation des sols est la stratégie.

AGRADECIMIENTOS

Manifiesto mi más sincero agradecimiento a la Dra. María de Lourdes Flores Delgadillo por el apoyo incondicional que siempre me brindó durante la realización de este proyecto de tesis. A los Dres. Daniel Geissert Kentz, David Flores Román, Arturo Aguirre Gómez y Margarita Gutiérrez Ruiz, miembros de la Comisión Dictaminadora, por sus valiosos comentarios y la revisión del trabajo escrito.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca que durante dos años me permitió realizar los estudios de maestría y, al Instituto de Geología de la UNAM por la beca que durante cinco meses me ayudó a continuar con esos estudios.

Agradezco al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM, especialmente a la Dra. Elizabeth Solleiro, Dr. Francisco Romero, Dra. Christina Siebe, Dr. Sergey Sedov, Dr. Mario Villalobos, y Sritas. Gloria Benítez y María Luisa Reyes, por sus servicios y amabilidad que mostraron durante la realización de la maestría.

A los Técnicos Académicos del Instituto de Geología: Biól. René Alcalá, M. en C. Kumiko Shimada, M. en C. Jaime Díaz, M. en C. Iris Suárez y M. en C. Consuelo Macías, quienes colaboraron en varios de los análisis incluidos en esta tesis; además del asesoramiento en el uso del equipo indispensable como el invernadero y el taller de molienda.

Agradezco al Ing. Ricardo Romero fundador y director de Las Cañadas, por la idea esencial de esta tesis. A mi familia y a mi compañera de vida Paola Díaz, por el gran apoyo y motivación.

Muchas gracias a todos los que me acompañaron a lo largo de la maestría: Dimitri Herrera, Rafael Torres, Keiko Teranishi, Jaime Ito, Jerónimo Basilio, Erik Ortega, David Acosta, Fayssal Baou, Paloma Álvarez, Myriong Song, Ángel López, Marzia Sansone, Gerardo Lazo, Mario Serrano y Karenina Del Angel.

INTRODUCCIÓN

En muchas partes del mundo la seguridad alimentaria está en riesgo. Una de las causas biofísicas radicales de la caída en la producción de alimentos *per capita*, es la disminución en la calidad y cantidad de los suelos (Sánchez *et al.*, 1997; Sánchez, 2002). Muchos países en vías de desarrollo como es el caso de México, a menudo tropiezan con grandes problemas relacionados con la producción de alimentos, debido al empobrecimiento del contenido de nutrimentos en los suelos. Para invertir esta tendencia y aumentar la fertilidad del suelo, los nutrimentos del mismo deben ser repuestos.

El uso excesivo de los fertilizantes químicos provoca la contaminación del suelo y, por lo tanto, daños a la salud animal y humana. La incapacidad de los fertilizantes de tipo NPK (nitrógeno, fósforo, potasio) de añadir todos los micronutrimentos necesarios e importantes a los ya empobrecidos suelos tropicales, es otra razón para la búsqueda de un fertilizante alternativo. Es por ello, que se está considerando un cambio en la concepción sobre el manejo de la fertilidad en el agroecosistema, principalmente, de clima tropical, la cual se basa en el uso de los recursos naturales disponibles localmente, como es el caso del polvo de roca. El polvo de roca es cualquier material derivado de la molienda de alguna roca, también es conocido como harina de roca y en inglés se le conoce como “rock dust” o “rock fertilizer”, y pueden ser granitos, andesitas, basaltos, rocas fosfóricas, y calizas, entre otras.

México tiene una gran extensión de suelos en área tropical, y dispone de toda una gran variedad de rocas que pueden ser utilizadas como fertilizante. La parte central del Estado de Veracruz es una de estas zonas donde son muy comunes los suelos de tipo Andosol, los cuales se caracterizan por ser ácidos y principalmente, por tener una capacidad de fijación de fósforo muy alta, lo que constituye, generalmente, la limitante más importante para el crecimiento de las plantas.

Los suelos de uso agrícola, en comparación con los suelos que se desarrollan bajo una vegetación madura o de selva, presentan, con frecuencia, algún proceso de degradación y se muestran con menos materia orgánica, nitrógeno total y bases intercambiables, así como una capacidad de intercambio catiónico más baja (Geissert *et al.*, 2000, Kosmas *et al.*,

2000, citados por Geissert e Ibáñez, 2008). Asimismo, cambia la estabilidad de la estructura y se produce una remoción del suelo como resultado de la erosión provocada por la labranza, el viento y la escorrentía superficial (Schumacher *et al.*, 1999; Meza y Geissert, 2003, 2006, citados por Geissert e Ibáñez, 2008). A menudo, los suelos agrícolas ofrecen una condición ambiental de baja calidad y requieren de esfuerzos técnicos y económicos para conservar o restaurar sus funciones ambientales.

Este trabajo surge de la inquietud de un conjunto de personas, entre ellas, los integrantes de la Cooperativa de la Reserva Ecológica “Las Cañadas”, y el Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM, con relación a la posible utilización de diferentes materiales rocosos para elevar el nivel de fertilidad de los suelos que se encuentran en la región de Huatusco en el Estado de Veracruz. Dichos materiales se hallan en total disponibilidad en la región mencionada y su utilización representaría grandes beneficios, tanto para los agricultores, como para los suelos de la región. Para tal efecto, se estableció un experimento a nivel de invernadero con la finalidad de determinar el efecto del polvo de diversas rocas sobre el rendimiento de una especie vegetal sembrada en un suelo de tipo Andosol que pertenece a la Reserva Ecológica “Las Cañadas”. Este experimento abre la posibilidad de que, en un futuro cercano, se practique la aplicación de dicho polvo de roca como fertilizante, dentro y fuera de la Reserva Ecológica, siempre que se tenga el interés de conservar al suelo libre de los efectos nocivos que generan los fertilizantes químicos.

Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de polvos de diferentes rocas disponibles en la región de Huatusco, Veracruz sobre la productividad agrícola de un suelo Andosol.

Objetivos particulares

- Caracterización física y química del suelo tipo Andosol de Huatusco, Veracruz.
- Evaluación del efecto de la aplicación de los diferentes tipos de polvo de roca sobre el rendimiento de una especie vegetal, producido bajo diferentes mezclas de fertilización.
- Evaluación del efecto de las rocas empleadas como fertilizantes sobre algunas características químicas del suelo.

Hipótesis

La aplicación de diferentes polvos de roca al Andosol de la zona de estudio, tendrá un efecto benéfico, tanto en la productividad agrícola, como en algunas de sus propiedades químicas.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Generalidades

El uso de polvo de roca como fertilizante natural, con elementos geológicos que estén al alcance de una comunidad y que sean utilizados para el desarrollo agrícola, no es un tema nuevo. Las investigaciones agrícolas con polvo de roca, basadas en el concepto de “panes de piedra”, comenzaron en el siglo XIX por Missoux, 1853/54; Hensel, 1890, 1894; y otros investigadores, y fueron seguidas muchas décadas después por trabajos conceptuales y prácticos sobre las rocas naturales para el desarrollo agrícola por Evans, 1947; Keller, 1948; Feillafe, 1950; d’Hotman de Villiers, 1961; Keller *et al.*, 1963; Roschnik *et al.*, 1967; y Cheong y Halais, 1970. Numerosas investigaciones en las últimas tres décadas han mostrado las grandes ventajas que representa el empleo de polvo de roca (Gillman, 1980; Fyfe *et al.*, 1983; Leonardos *et al.*, 1987; von Fragstein *et al.*, 1988; Blum *et al.*, 1989; Barak *et al.*, 1993; Bolland y Baker, 2000; Harley y Gilkes, 2000; Gillman *et al.*, 2000, 2002; van Straaten, 2006; Theodoro y Leonardos, 2006; Theodoro *et al.*, 2010).

El polvo de roca es atractivo ya que tiene el potencial de suministrar a los suelos una gran variedad de macro y micronutrientes, en comparación con los fertilizantes solubles comerciales, los cuales aportan los macronutrientes principales N, P y K, pero no contienen Ca, Mg ni micronutrientes como Fe, Zn, Cu y Mn (Fyfe *et al.*, 1983; Leonardos *et al.*, 1987). En muchas partes del mundo se han visto los efectos positivos de la aplicación de polvo de roca en suelos particularmente ácidos y muy intemperizados, como por ejemplo en África, Asia, Sudamérica, y Australia. En estos casos y, especialmente, bajo tales condiciones ácidas, su uso tiene una acción lenta, la cual incrementa la fertilidad del suelo de mediano a largo plazo (Harley y Gilkes, 2000).

El estudio del polvo de roca ha recibido un renovado interés en años recientes, debido a los avances en la comprensión de los procesos de meteorización, de los ciclos de los nutrientes y de los procesos bioquímicos que suceden en la superficie de las raíces de las plantas. La mayoría de las investigaciones que se realizan sobre la liberación de

nutrimentos de las rocas y minerales, se enfoca en las tasas de disolución, así como en las transformaciones y procesos que los minerales llevan a cabo en los suelos. Mientras que, los procesos geoquímicos y mineralógicos involucrados en la disolución de varios minerales formadores de rocas han sido bien estudiados, las reacciones y las vías en los sistemas dentro del suelo no están tan bien comprendidas aún (Harley y Gilkes, 2000). Estas reacciones incluyen factores físicos, químicos, mineralógicos, bioquímicos e interacciones que controlan los procesos en la interface de los minerales, las soluciones, el aire y los organismos en los suelos.

El efecto del polvo de roca como mejorador de la fertilidad del suelo, depende no sólo de la disponibilidad de los elementos nutritivos para las plantas, sino también de una combinación de características del suelo tales como el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y otros, pero el más importante es el intemperismo químico, como lo apuntan Harley y Gilkes (2000). De acuerdo con estos autores, el intemperismo ocurre cuando los minerales metaestables en las rocas se ponen en contacto con la atmósfera y el agua, y los nutrientes empiezan a liberarse. El proceso central involucra nutrientes que son liberados en la solución del suelo como iones simples o complejos.

En un artículo amplio, Harley y Gilkes (2000) examinaron los diversos factores que influyen en la liberación de nutrientes del polvo de roca. Los estudios geoquímicos basados en la disolución de los minerales indican los mecanismos de reacción mediante los cuales los nutrientes son liberados, asumiendo que se logra un equilibrio entre la solución del suelo y el mineral primario. En los suelos, la disolución de los minerales se ve aumentada por un desequilibrio entre la solución del suelo y las superficies minerales mediante la eliminación de iones por procesos tales como la lixiviación y la sorción de nutrientes. Los procesos en la rizósfera y otras actividades biológicas pueden aumentar fuertemente la disolución de minerales a través de la liberación de iones H^+ , y complejar compuestos orgánicos que reaccionan con las superficies minerales.

Blum *et al.* (1989), citados por van Straaten (2006), mostraron que bajo condiciones de laboratorio, la tasa de liberación de nutrientes de la mayoría de las rocas graníticas es muy lenta, y que la mayoría de estas rocas contienen una alta proporción de elementos que no tienen importancia para la nutrición de las plantas. Sin embargo, estas investigaciones

también indicaron que ciertas cenizas volcánicas ricas en esmectitas, pueden incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de suelos pobres, por ejemplo, de algunos suelos forestales.

Von Fragstein *et al.* (1988), también citados por van Straaten (2006), encontraron que las tasas más altas de liberación de cationes se producen a partir de las rocas volcánicas fonolíticas, seguido de las rocas basálticas. El polvo de roca de granito liberaba las cantidades más bajas de cationes, independientemente, de los métodos de extracción. En extractos con agua, el pH de todas las muestras de roca era alcalino, las rocas fonolíticas alcanzaban un valor de pH mayor a 10, los basaltos valores de pH entre 8 y 10, y en los granitos el pH fluctuaba entre 7 y 10. Además de ser buenas fuentes de nutrientes, son también buenos materiales útiles para elevar el pH de los suelos ácidos.

Las rocas volcánicas son reconocidas como mejoradoras del suelo, gracias a que se intemperizan en plazos cortos y, en consecuencia, liberan relativamente rápido, diversos macro y micronutrientes (van Straaten, 2006). Su tasa de liberación de nutrientes, comúnmente, es más rápida que la de las rocas ígneas ricas en sílice como los granitos. Fyfe *et al.* (1983), enfatizan que las áreas volcánicas jóvenes con lavas intemperizadas y cenizas son, comúnmente, terrenos agrícolas muy fértiles.

La eficacia del polvo de roca en prácticas agrícolas se ha visto cuestionada debido a los “conflictivos” datos experimentales, a su baja solubilidad, a la subsecuente baja disponibilidad de nutrientes para las plantas, así como a la complejidad en la práctica para aplicar grandes cantidades de roca a terrenos agrícolas (Harley y Gilkes, 2000). Además, algunas rocas contienen minerales que no tienen valores nutrimentales importantes, como el cuarzo (Bolland y Baker, 2000).

1.2 Aplicación de polvo de roca en ambientes templados

Durante las últimas décadas ha existido un pequeño pero consistente uso de polvo de roca en Europa Central, principalmente en Alemania, y en algunas partes de Norteamérica, donde se practica la agricultura orgánica (von Fragstein *et al.*, 1988; Blum *et al.*, 1989, citados por van Straaten, 2006). Además, la eficiencia del polvo de roca ya se ha

comprobado para revertir el declive de la salud del suelo en bosques de Europa Central afectados por diversos agentes contaminantes, especialmente, por lluvia ácida.

El declive de los bosques en Europa Central se ha asociado frecuentemente con el decremento de la capacidad de neutralización de ácidos, y los desequilibrios en nutrientes en suelos forestales (Huettl y Zoettl, 1993). Las rocas, principalmente de composición basáltica y fonolítica se han utilizado como medios para incrementar el pH en los suelos forestales acidificados, y para proveer a largo plazo nutrientes, como Ca y K. Hildebrand y Schack-Kirchner (2000), así como von Wilpert y Lukes (2003) también han descrito efectos positivos del encalado sobre suelos forestales utilizando polvo de roca basáltica. Si bien la aplicación de 6 ton ha⁻¹ de éste, proporcionó más Ca y K a la nutrición de árboles en Alemania (Hildebrand y Schack-Kirchner, 2000), la aplicación de 10 ton ha⁻¹ de polvo de roca fonolítica en suelos forestales deficientes en K en el suroeste del mismo país, proporcionó más Ca e incrementó el pH del suelo (von Wilpert y Lukes, 2003).

1.3 Aplicación de polvo de roca en ambientes tropicales

La aplicación de polvo de roca en ambientes tropicales presenta muchas ventajas. En primer lugar, la tasa de disolución de las rocas y los minerales, y la reacción entre las superficies de los minerales y la solución del suelo, se incrementan debido a las altas temperaturas y regímenes de humedad altos. En segundo lugar, el potencial de aplicación del polvo de roca al suelo se eleva, especialmente, cuando los suelos se caracterizan por tener un bajo contenido nutricional, debido al intemperismo y a la lixiviación que ocurren en ellos y, por lo tanto, se vuelven más receptivos a la adición de nutrientes (van Straaten, 2006).

Mientras que, el uso de polvo de roca se ve progresando en algunos países con climas templados, especialmente en el mercado de la agricultura orgánica, en los países tropicales en desarrollo hay sólo unos cuantos resultados publicados que tratan sobre su aplicación. A pesar de que se han llevado a cabo muchas pruebas en zonas tropicales como por ejemplo Brasil, sólo unos cuantos resultados han sido reportados, integrando una buena caracterización de la roca que se va a usar como fertilizante, y del suelo en el que se va a aplicar. Los datos publicados indican que algunas rocas y minerales pueden ser utilizados

como materiales para suministrar nutrientes a los cultivos en suelos tropicales degradados, así como en bosques y pastizales.

Las investigaciones hechas en países tropicales (Evans, 1947; Feillafe, 1950; d'Hotman de Villiers, 1961; Roschnik *et al.*, 1967; Wong You Cheong y Halais, 1970; Leonardos *et al.*, 1987; Gillman, 1980; Gillman *et al.*, 2000, 2002; Theodoro y Leonardos, 2006; Theodoro *et al.*, 2010), reportan resultados positivos, a partir de pruebas con polvo de rocas ricas en ferromagnesianos, como son basaltos o lavas y tobas ultrapotásicas y potásicas. El principal factor del éxito de estas pruebas es el contenido de minerales básicos en la roca, principalmente de Ca y Mg, que reducen la acidez de los suelos de las zonas tropicales, altamente intemperizados y además repone los nutrientes perdidos por la lixiviación y lavado, aumentando su disponibilidad para las plantas. Las altas temperaturas y grado de humedad, aseguran que los procesos de encalado y solubilización de nutrientes se lleven en lapsos relativamente cortos. Las rocas de grano fino con cantidades considerables de olivinos, piroxenos, anfíboles, ricas en plagioclasas cálcicas, así como con bajas concentraciones de cuarzo, tienen los grados de intemperismo más altos (Goldich, 1938, citado por van Straaten, 2006).

Evans (1947) mostró que las aplicaciones mayores a 32 ton ha^{-1} de polvo de basalto a suelos fuertemente intemperizados, incrementan la producción de caña de azúcar y sus contenidos de sacarosa. Feillafe (1950) y D'Hotman de Villiers (1961) también reportan aumentos en la producción de caña de azúcar mediante la aplicación de polvos de rocas, como el basalto, en dosis de más de 180 ton ha^{-1} de basalto. En Zimbabwe, Roschnik *et al.* (1967), hicieron pruebas con polvo muy fino de rocas basálticas en suelos arenosos fuertemente intemperizados en experimentos de invernadero. Las altas tasas de aplicación de polvo de roca (99 ton ha^{-1}) generaron un incremento exponencial en el rendimiento total de dos leguminosas de lento crecimiento. Cheong y Halais (1970) compararon los efectos de la aplicación de polvo de caliza y cemento Portland en suelos con cultivo de caña de azúcar en Mauricio; aunque ambos materiales presentaron aumentos del pH similares, solamente con el tratamiento con cemento se observó un incremento significativo, en el crecimiento del cultivo.

Para examinar los efectos del polvo de basalto sobre las propiedades de los cationes intercambiables de suelos de carga variable, Gillman (1980) aplicó escoria basáltica triturada en tres grados de fineza, sobre una muestra superficial de un Oxisol. La enmienda fue aplicada en dosis mayores de 200 ton ha⁻¹ y las muestras fueron incubadas a una presión de 0.1 bar, por períodos superiores a 12 meses. Conforme se incrementaba la tasa de aplicación, también se incrementaron los valores de pH y CIC del suelo. Lo más importante fue que también aumentaron proporcionalmente las concentraciones de Ca, Mg, y K intercambiables. Los efectos fueron más pronunciados, mientras más fino era el polvo de basalto, lo cual también se reflejó en un incremento en la solubilidad de la escoria.

Leonardos *et al.* (1987) reportan que obtuvieron resultados positivos en experimentos de invernadero y de campo, llevados a cabo en suelos lateríticos de Brasil, empleando como factor de control de la productividad, cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*), pasto napier (*Pennisetum purpureum*) y árboles (*Eucalyptus pellita*). Utilizaron tres tipos de rocas: basalto pigeonítico, esquisto de muscovita-biotita-clorita-carbonato, y fonolita, y como materiales de comparación, un fertilizante tipo NPK, roca fosfórica y una caliza dolomítica. Los resultados de los experimentos en invernadero mostraron el efecto positivo del polvo de roca en el crecimiento de las plantas de frijol. Los valores más altos fueron registrados con el uso del fertilizante NPK. La adición del polvo de roca produjo una mayor nodulación del *Rhizobium* que otros tratamientos. El incremento de la productividad utilizando polvo de caliza fue considerablemente más bajo que con el polvo de basalto. Este último tipo de material seguido del esquisto dieron los mejores resultados sobre los otros tipos de rocas. Los resultados también mostraron que los frijoles no pueden crecer en un suelo laterítico virgen sin la reposición de sus nutrimentos. En el experimento con Eucalipto, los datos mostraron que el uso del basalto producía mejores resultados que utilizando el fertilizante NPK.

Los estudios de Gillman *et al.* (2000, 2002) en Australia tropical, ilustran los efectos positivos de la aplicación de grandes cantidades de polvo de roca basáltica en suelos intemperizados y pobres en nutrimentos. La aplicación de basalto (0, 1, 5, 25 y 50 ton ha⁻¹) elevó el pH, redujo la acidez intercambiable, incrementó la CIC y aumentó la cantidad de Ca, Mg, y K intercambiables derivados del basalto. La cantidad de cationes básicos que

están ocupando posiciones intercambiables en las fracciones sólidas activas del suelo, constituye sólo una fracción del total adicionado. Estas cantidades que se mantienen en la fracción sólida del suelo, constituyen una reserva que asegura su disponibilidad en forma continua y a largo plazo. En algunos suelos, la fijación de fósforo se redujo a causa de la aplicación del basalto y se observó un incremento del fósforo disponible medido por extracción con H_2SO_4 0.005M. Estos efectos se relacionaron al cambio del pH y a la liberación de los silicatos y fosfatos contenidos en el basalto.

En otros estudios, Theodoro y Leonardos (2006) compararon el efecto de la aplicación de polvo de rocas volcánicas (ricas en Mg, Ca, P y micronutrientes) y fertilizantes químicos. Dichas rocas pertenecen a la Formación Mata da Corda, que se extiende a través de grandes áreas (450 km²) en el centro de Brasil, en el estado de Minas Gerais. Estas rocas fueron aplicadas a suelos infértiles derivados de sedimentos aluminosos Bambuí, a 50 km al Este de João Pinheiro. Los autores mencionados encontraron que la productividad era superior (hasta un 40 %) con el empleo de roca volcánica, que en las parcelas en las que se aplicaron fertilizantes químicos. Cultivos como la caña de azúcar y la yuca, lograron una mayor productividad, y también aumentaron los rendimientos del maíz y arroz logrando los mismos niveles de productividad que los de suelos tratados con agroquímicos. La humedad se conservó con mayor eficiencia alrededor de las plantas que recibieron el tratamiento con polvo de roca que en el resto de los suelos, mostrando que las arcillas contenidas en la roca adicionada aumentan la retención de agua. También, las raíces de las plantas eran más abundantes y desarrolladas. El costo de la aplicación del polvo de roca fue mucho más bajo (< 60 %), debido al efecto sobre la fertilidad del suelo a largo plazo. Estos resultados confirmaron el potencial económico y financiero del empleo de polvo de roca, que condujo a su aceptación inmediata de los pequeños agricultores.

Recientemente, Theodoro *et al.* (2010), reportaron también resultados positivos al utilizar polvo de rocas localmente disponibles en el estado de Bahía, al noreste de Brasil. Estos autores utilizaron anfíbolitas y rocas fosfóricas, mezcladas con estiércol de vaca. Esta mezcla se aplicó a suelos ácidos y poco fértiles. Después de dos años de actividades agrícolas, se observó que la disponibilidad de P, K, Ca y Mg había aumentado, así como el

pH del suelo, y consecuentemente también se produjo un incremento en el rendimiento de maíz, frijol y yuca.

Estas investigaciones realizadas sobre el empleo de polvo de rocas ricas en minerales ferromagnesianos, como basaltos o lavas y tobas ultrapotásicas y potásicas; así como también calizas, mostraron su efectividad como proveedoras de macro y micronutrientes, mejoradoras del pH y agentes eficaces para restaurar la fertilidad del suelo, a largo plazo.

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Descripción general de la zona de estudio

2.1.1 Ubicación

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte central del estado de Veracruz, cerca de la ciudad de Huatusco (Fig. 1). Las coordenadas son: 19°10'46.5'' N, 96°58'30.66'' O.

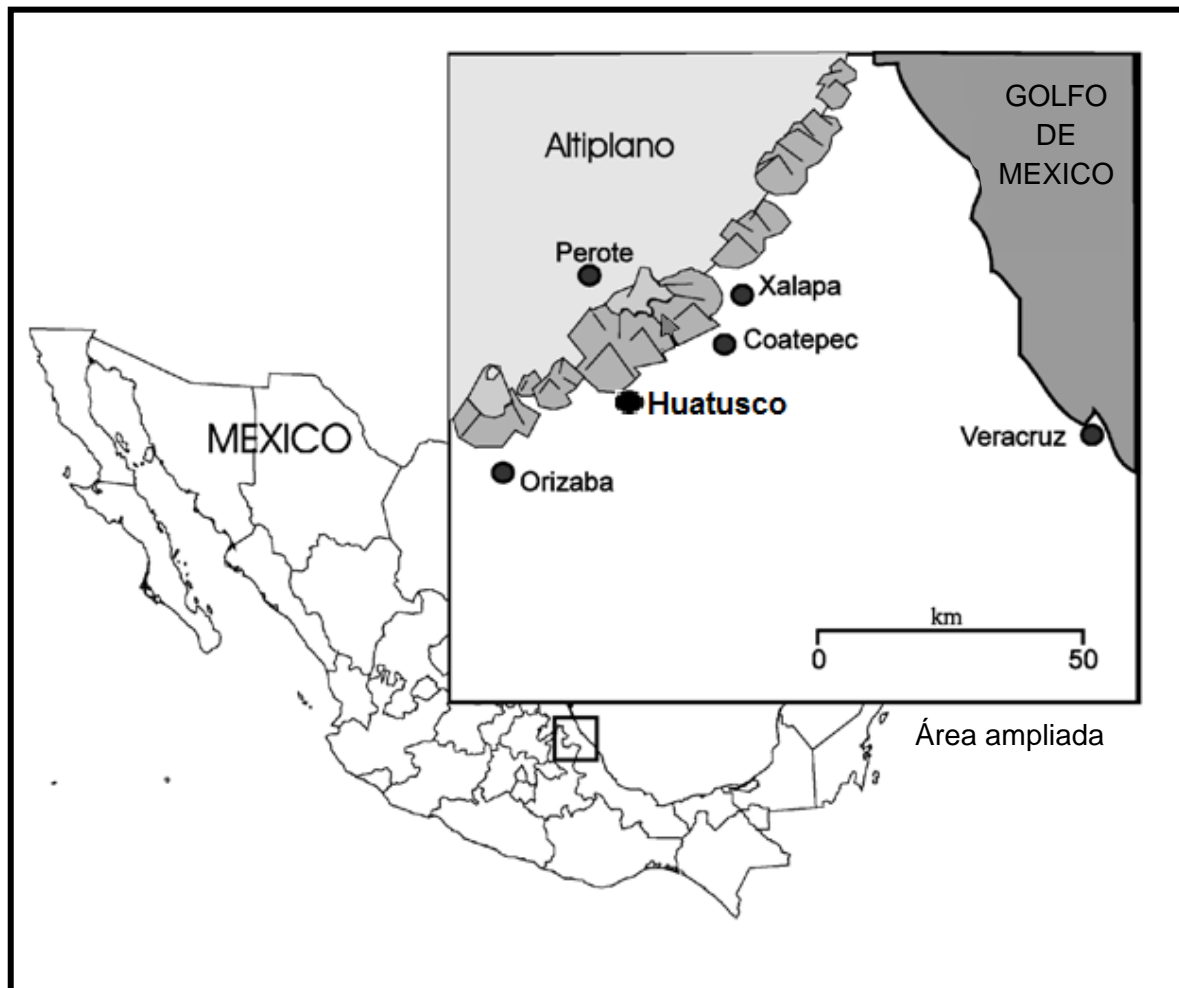


Figura 1. Mapa de localización de Huatusco.

2.1.2 Topografía

La región forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana. El sitio de muestreo del suelo es una superficie irregular, con lomeríos y pequeños cañones por donde pasan algunos arroyos, con pendientes que varían de 0 % a 60 %. La carta topográfica de INEGI E14B47 (escala 1:50,000), señala una altitud promedio de 1300 msnm \pm 50 m.

2.1.3 Geología

La Faja Volcánica Transmexicana se localiza en la porción central del País, de Oeste a Este. El paisaje geomorfológico está constituido por montañas, cerros y lomeríos, estos últimos formados, principalmente, por material piroclástico de composición básica e intermedia, producto de las últimas emisiones volcánicas durante el Plioceno tardío-Cuaternario (< 3 Ma) (Ferrari *et al.*, 2005).

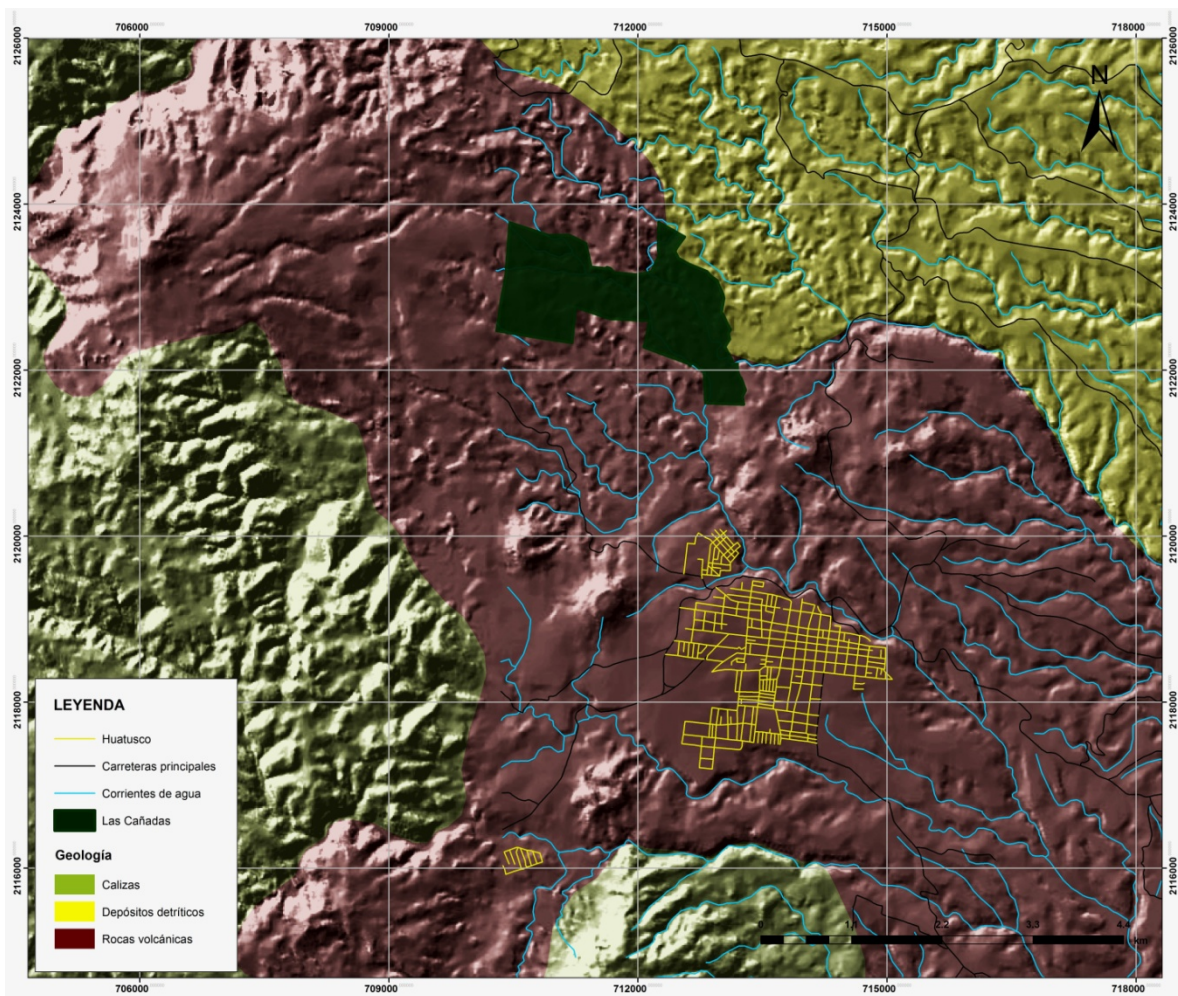


Figura 2. Ubicación y geología de la zona de estudio Reserva Ecológica “Las Cañadas”, en la región de Huatusco.

En todo el predio dominan las rocas volcánicas, que están constituidas principalmente, por material piroclástico de composición básica e intermedia y fragmentos poco consolidados de escoria y lapilli (Fig. 2). En los alrededores de la Reserva ecológica y de Huatusco se localizan varios conos monogenéticos. También, en la zona se ubican depósitos detríticos provenientes del transporte de los materiales geológicos localizados en zonas más altas. Y en la parte Oeste y Sur de Huatusco, sobresalen montañas constituidas por calizas pertenecientes a la provincia geológica Sierra Madre Oriental.

2.1.4 Edafología

Los suelos del área de estudio se desarrollan sobre cenizas volcánicas intemperizadas de espesor variable (1 a 3 m), que sobreyacen a brechas volcánicas y/o lavas (Geissert e Ibáñez, 2008). Los suelos son profundos con un espesor superior a 1.50 m. Su color varía de pardo oscuro a negro en superficie, y de pardo amarillento a pardo rojizo, en la profundidad.

Los suelos han sido clasificados por Geissert e Ibáñez (2008) mediante la base referencial mundial SICS-ISRIC-FAO (1999), como Andosoles úmbricos cuando varios horizontes de un mismo perfil presentaban propiedades ándicas (densidad aparente $\leq 0.90 \text{ Mg m}^{-3}$; fijación de fosfatos $\geq 70\%$; Al +1/2Fe extractables en oxalato ácido $\geq 2.0\%$), y como Acrisoles ándicos cuando dichas propiedades sólo estaban presentes en el horizonte superficial, además de contener en el horizonte subsuperficial un horizonte de acumulación de arcilla, ausente en los Andosoles.

Ambos tipos de suelos se ordenan a lo largo de un gradiente altitudinal que va de los 1000 a los 1400 m, el cual induce a un gradiente climático, de forma que en las zonas bajas, el clima es de tipo (A)C(m), más cálido y menos húmedo que el de tipo (A)C(fm) que se presenta en las partes altas. Los cambios térmicos y pluviométricos resultantes, ocasionan modificaciones progresivas de los procesos de formación del suelo; así, los Andosoles, situados en la zona alta y en equilibrio con el bosque mesófilo de montaña, cambian gradualmente a Acrisoles a menor altitud, en la zona cafetalera. A pesar de que, a lo largo

de ambos gradientes ocurre una heterogeneidad edáfica, la capa superior del Acrisol sigue presentando propiedades edafogenéticas similares a las del Andosol.

2.1.5 Hidrología

De acuerdo con la nomenclatura utilizada por el INEGI en su Carta Hidrológica de Aguas Superficiales clave E14-3 (escala 1:250 000), el sitio de muestreo se encuentra ubicado en la cuenca hidrológica del Río Jamapa, perteneciente a la región del Papaloapan (clave RH28). El Río Jamapa nace de los deshielos del glaciar Jamapa en tierras altas del Pico de Orizaba, y en su recorrido adquiere el nombre de Río Medellín, que desemboca al mar en un costado de la ciudad de Boca del Río. En Las Cañadas nacen o cruzan cuatro manantiales de corriente permanente que forman parte de los tributarios del Río Dos Puentes-El Castillo (clave RH28Bb), al bajar hacia el Golfo de México.

2.1.6 Clima

De acuerdo con el Mapa Climático de la CONABIO (García, 1997), escala 1:1,000,000 que tiene su base en la clasificación de Köppen modificada por E. García, el clima de la región de Huatusco y el correspondiente a Las Cañadas, es clasificado como (A)Cm(f)(i')gw", que se interpreta como semicálido húmedo del grupo C (en el mes más frío la temperatura está por debajo de 18° C), con régimen de lluvias intermedio, poca oscilación térmica, con marcha de temperatura tipo Ganges y posee canícula.

Los principales parámetros climáticos son:

Temperatura media anual: 19.8° C, precipitación promedio anual: de 350 a 400 mm, precipitación anual acumulada: 1951.6 mm, días con lluvia: de 30 a 59 días, temporada de lluvias: de julio a septiembre.

2.1.7 Uso actual del suelo

El uso actual del suelo en Las Cañadas puede dividirse en cuatro tipos básicos (Romero, 2011, comunicación personal):

- Ganadería: 10 ha.
- Agricultura orgánica: 10 ha.

- Agroforestal (extracción de leña y maderables en mínima medida): 113 ha.
- Infraestructura para cursos: 1 ha.
- Bosque: 172 ha.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Muestreo

Dentro de la Reserva Ecológica “Las Cañadas” se seleccionó un suelo de baja productividad. Se acudió a los agricultores de la zona y ellos indicaron una parcela en la que habían hecho intentos de cultivar maíz, sin obtener buenos resultados. La localización exacta de la parcela es 19°10'46.5'' N, 96°58'30.66'' O, 1313 msnm y se encuentra sobre un terreno con inclinación convexa y pendiente moderadamente inclinada (15°). Se procedió a la recolección aleatoria de varias muestras de suelo de la capa arable (0 - 20 cm), con el propósito de obtener una cantidad suficiente de material edáfico que sirviera como sustrato para las plantas del experimento en invernadero. Este material fue guardado en costales y transportado hasta el invernadero del Instituto de Geología de la UNAM, en Ciudad de México, D.F.

En forma previa a la recolección de las muestras de suelo superficial, se realizó un perfil de suelo a cielo abierto hasta una profundidad de 100 cm, cuya descripción morfológica fue hecha con base en la diferenciación de sus horizontes. También, se recolectaron muestras de suelo de cada uno de los horizontes del perfil para su caracterización física y química en el laboratorio. Se tomaron muestras con núcleos de acero inoxidable con un volumen de 100 cm³, utilizando un muestreador tipo Uhland, con la finalidad de realizar las determinaciones físicas de densidad aparente, humedad gravimétrica y conductividad hidráulica.

En cuanto a la recolección de muestras de roca, ésta se hizo con base en la geología de la zona de estudio, tomando muestras de cada uno de los bancos de material ubicados en la región. Las rocas recolectadas en campo y su respectiva localización fueron las siguientes:

Caliza: 19°08'15.12'' N, 97°00'26.52'' O, 1388 msnm

Escoria roja: 19°10'19.44'' N, 96°57'47.22'' O, 1350 msnm

Escoria negra: 19°09'27.72'' N, 96°39'54.12'' O, 1360 msnm

Basalto: 19°08'49.20'' N, 96°57'09.54'' O, 1195 msnm

Brecha volcánica: 19°11'44.64'' N, 97°02'50.16'' O, 1193 msnm

Las muestras de suelo y material de roca fueron analizadas en el Laboratorio de Física de Suelos y en el Laboratorio de Química de Suelos, ambos del Departamento de Edafología, en el Instituto de Geología de la UNAM.

2.2.2 Análisis de suelo

Los análisis practicados fueron los siguientes:

a. Físicos

1. Color en húmedo y en seco.- se determinó utilizando la tabla de colores de Munsell edición revisada por Washable (2000).
2. Densidad aparente.- se determinó por el método del cilindro, utilizando los núcleos de acero inoxidable (Grossman y Reinsch, 2002).
3. Densidad de partículas.- por el método del picnómetro (Flint y Flint, 2002).
4. Porosidad Total.- se calculó a partir de los valores de densidad aparente y densidad de las partículas (Flint y Flint, 2002).
5. Análisis del tamaño de las partículas y clasificación textural.- por el método de la pipeta, se inició este análisis con una muestra de suelo con humedad de campo, realizando los pretratamientos para destruir agentes cementantes como materia orgánica y óxidos de hierro; la remoción de materia orgánica se hizo adicionando a la suspensión de suelo peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y la remoción de óxidos de hierro se hizo agregando citrato-bicarbonato, ditionito de sodio ($Na_2S_2O_4$) y lavando con cloruro de sodio (NaCl); separando la fracción arena con lavados de agua destilada al material que queda en el tamiz de malla 270 ($53\mu m$). Las fracciones limo y arcilla fueron determinadas por sedimentación (Gee y Or, 2002).
6. Capacidad de campo.- utilizando una olla de presión a 33 kPa, sobre suelo secado al aire, sin tamizar (Tan, 2005).
7. Punto de marchitez permanente.- utilizando olla y membrana de presión a 1500 kPa (Tan, 2005).

8. Agua aprovechable.- por diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Tan, 2005).
9. Conductividad hidráulica.- por el método de flujo o carga constante, en condiciones de saturación, utilizando suelo inalterado, realizando tres repeticiones por horizonte (Klute y Dirksen, 1986).
10. Humedad gravimétrica.- se determinó por el método gravimétrico (Gardner, 1965).

b. Químicos

1. Reacción del suelo (pH).- se determinó con agua destilada en una suspensión de suelo-agua con relación 1:2.5, y utilizando un potenciómetro con electrodo de vidrio marca Metrohm Herisau, modelo E 588 (Van Reeuwijk, 1992).
2. Carbono orgánico.- por digestión ácida con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), titulando con sulfato ferroso (Fe_2SO_4) (Walkley y Black, 1946).
3. Carbono y nitrógeno totales.- las muestras se analizaron utilizando un Analizador Elemental marca Perkin Elmer 2400 serie II. Todas las muestras se analizaron en modo CHN, bajo las siguientes condiciones analíticas:
Gas acarreador, Helio; temperatura de combustión, 980° C; temperatura de reducción, 640° C; detector, conductividad térmica.
4. Fósforo disponible.- por el método de Bray y Kurtz, usando ácido ascórbico como reductor (Van Reeuwijk, 1992).
5. Fijación de fósforo.- utilizando el método propuesto por Blakemore (Blakemore *et al.*, 1981).
6. Acidez y aluminio intercambiable.- utilizando para el intercambio una solución de cloruro de potasio (KCl) 1M, determinando la acidez intercambiable por titulación con hidróxido de sodio (NaOH) 0.025M y cuantificando el Aluminio con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer, modelo 3110 utilizando una flama de óxido nitroso/acetileno (Van Reeuwijk, 1992).
7. Cationes intercambiables.- fueron obtenidos mediante extractos de suelo con acetato de amonio (CH_3COONH_4) 1N pH 7. El calcio y magnesio se cuantificaron por titulación con versenato (Heald, 1965); y el sodio y potasio por flamometría (Pratt, 1965), utilizando un fotómetro de llama marca Corning 400.

8. Capacidad de intercambio catiónico total (CIC).- por el método de centrifugación (Chapman, 1965), saturando con acetato de sodio ($\text{CH}_3\text{COONa}-3\text{H}_2\text{O}$) 1N pH 7, lavando con alcohol etílico y eluyendo con acetato de amonio.
9. Porcentaje de saturación de bases.- $(\Sigma\text{Ca, Mg, Na, K intercambiables})/\text{CIC} \times 100\%$
10. Análisis químico total.- por fluorescencia de rayos X; el análisis se realizó con la muestra seca. La pérdida por calcinación (PXC) se determinó tomando 1 g de muestra de suelo y sometida a 950°C durante 1 hora.
11. Determinación de Fe, Zn, Cu y Mn disponibles para la planta.- extraídos con DTPA y cuantificados con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer, modelo 3110 (Lindsay y Norvell, 1978).
12. Determinación de Fe, Zn, Cu y Mn solubles en agua meteórica.- extraídos con agua en equilibrio con CO_2 utilizando una relación suelo-agua 1:20; dichos elementos fueron cuantificados con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer, modelo 3110. Este análisis se apejó a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007).
13. Punto de carga cero.- se utilizó una relación de 5 mg de suelo por 100 ml de solución; la solución utilizada fue agua destilada y el pH de la solución se ajustó con HCl y NaOH. Las mediciones se realizaron a diferentes valores de pH en el intervalo de 2 a 11. La determinación se hizo con un aparato Zeta-meter 3.0+, con una diferencia de potencial de 100 Volts. El punto de carga cero del suelo se obtuvo de la curva de potencial Zeta en función del pH.

Los análisis químicos se apegaron a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

2.2.3 Análisis de rocas

Las rocas recolectadas en campo se molieron en una quebradora de quiјadas “Rhino”, y después se pulverizaron en un molino “Herzog” con mortero de carburo de tungsteno en el taller de molienda del Instituto de Geología de la UNAM. El tamaño final del material molido fue de aproximadamente $53\ \mu\text{m}$, el cual se homogeneizó y se caracterizó con base en los siguientes análisis:

1. Reacción de la roca (pH).- se determinó con agua destilada en una suspensión de polvo de roca-agua con relación 1:2.5, y utilizando un potenciómetro con electrodo de vidrio marca Metrohm Herisau modelo E 588 (Van Reeuwijk, 1992).
2. Análisis químico total.- por fluorescencia de rayos X; el análisis se realizó con la muestra seca, y la pérdida por calcinación (PXC) se determinó tomando 1 g de muestra y sometiéndola a 950° C durante 1 hora.
3. Determinación de Fe, Zn, Cu y Mn extraíbles con DTPA.- dichos elementos fueron cuantificados con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer, modelo 3110 (Lindsay y Norvell, 1978).
4. Determinación de Fe, Zn, Cu y Mn solubles en agua meteórica.- extraídos con agua en equilibrio con CO₂ utilizando una relación polvo de roca-agua 1:20; dichos elementos fueron cuantificados con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer, modelo 3110. Este análisis se apegó a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007).
5. Mineralogía de las rocas.- se hizo una descripción y cuantificación en porcentaje de los minerales presentes en cada una de las rocas, mediante observaciones bajo microscopio petrográfico de láminas delgadas marca Olympus BX51 en el Laboratorio de Petrología Experimental del Instituto de Geología, UNAM.

2.2.4 Diseño experimental y de los tratamientos

Se diseñó un esquema de 17 tratamientos (Tabla 1) obtenidos de la combinación de los diferentes materiales de roca que se pretende utilizar como fertilizantes, empleando una sola dosis. Se utilizó el diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones, es decir, la distribución de los 17 tratamientos se hizo en forma aleatoria dentro de cada uno de los tres bloques, los cuales fungieron como repeticiones. La aplicación de polvo de roca al suelo se realizó con una dosis uniforme equivalente a 10 ton ha⁻¹, excepto a los tratamientos 1 y 2, que se designaron como controles. Se utilizó una caliza como mejorador del pH del suelo, aplicando una sola dosis equivalente a 4 ton ha⁻¹. La selección de la dosis, tanto de polvo de roca como de caliza, se hizo con base en los resultados obtenidos en otras investigaciones.

Tabla 1. Diseño de tratamientos.

Tratamiento No.	Escoria roja	Basalto	Brecha volcánica	Escoria negra	Caliza
			ton ha ⁻¹		
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	4
3	10	0	0	0	4
4	0	10	0	0	4
5	0	0	10	0	4
6	0	0	0	10	4
7	10	10	0	0	4
8	10	0	10	0	4
9	10	0	0	10	4
10	0	10	10	0	4
11	0	10	0	10	4
12	0	0	10	10	4
13	10	10	10	0	4
14	10	10	0	10	4
15	10	0	10	10	4
16	0	10	10	10	4
17	10	10	10	10	4

2.2.5 Experimento de invernadero

El experimento de invernadero se llevó a cabo del 8 de diciembre de 2009 al 28 de septiembre de 2010, en las instalaciones del Instituto de Geología de la UNAM, ubicado en Ciudad Universitaria, D. F.

El suelo se tamizó empleando una malla de 2 mm y las rocas se molieron hasta quedar en un tamaño aproximado de 53 μm . Se utilizaron 51 macetas de 15.5 cm de diámetro y 12.5 cm de profundidad, con perforaciones en la base; la planta que se eligió fue “Rye Grass Perenne” (*Lolium perenne L.*), conocida en español como “ballico perenne”. Se seleccionó esta especie de pasto con base en la experiencia de otras investigaciones realizadas en invernadero, por su rápido desarrollo, su adaptabilidad a suelos tanto francos como franco arcillosos. Estas características aseguraron tener disponible forraje durante todo el experimento. La densidad de siembra fue de 25 kg de semilla ha⁻¹. Se colocó en cada maceta 1.2 kg de suelo, incorporando también, la cantidad correspondiente de polvo de roca

y material mejorador de acuerdo con cada uno de los tratamientos. Posteriormente, se llevó a cabo la siembra e inmediatamente después de ésta, se dio un riego de manera uniforme a todas las macetas.

Para no alterar la composición química de la solución del suelo, los riegos se hicieron con agua destilada y se aplicaron dos veces por semana, con el objeto de mantener la humedad en condiciones de capacidad de campo.

Durante todo el periodo de desarrollo de las plantas, se realizaron las observaciones necesarias en cada una de las macetas para apreciar diferencias en el crecimiento de las plantas bajo los diferentes tratamientos, así como para combatir oportunamente plagas y enfermedades, en caso de que se presentaran. Se controlaron las malas hierbas, erradicándolas manualmente.

2.2.6 Cortes

Con la finalidad de obtener la productividad de forraje, se realizaron cuatro cortes, con intervalos de 45 días entre ellos. Los cortes se hicieron a una altura de 4 cm a partir de la superficie del suelo.

La valoración de la productividad en verde se hizo pesando la totalidad del forraje, obtenido en cada maceta en el momento del corte. La valoración de la productividad en seco se hizo pesando la totalidad del forraje, obtenido en cada maceta después de haberlo secado a 60° C durante 72 horas, hasta peso constante.

2.2.7 Medición del área foliar

Previo a cada corte, se tomaron fotografías superficiales a cada una de las macetas a una misma altura. Posteriormente, estas fotografías sirvieron de base para que, con ayuda del programa Image-Pro, se hiciera un conteo del área que estaba cubriendo la vegetación en cada maceta. Dicho análisis se hizo en el Laboratorio de Microscopía, en el Departamento de Edafología del Instituto de Geología, UNAM.

2.2.8 Análisis estadístico de la información

Los resultados obtenidos del material vegetal en cada corte se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) para observar el efecto de los tratamientos sobre cada una de las

variables estudiadas que fueron: rendimiento de forraje fresco, rendimiento de forraje seco y área foliar. Cuando el ANOVA mostraba algún efecto significativo de los tratamientos, se procedía a realizar una prueba de rango múltiple basada en la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, para identificar las diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de las variables. También, se hicieron los análisis de ANOVA y correlación simple ($p \leq 0.05$), para cada una de las variables medidas en el suelo y en los polvos de roca.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Características físicas del suelo

El perfil de suelo analizado en campo es profundo con un espesor superior a 1 m. Su color varía de pardo muy oscuro en superficie a pardo fuerte en el subsuelo. La textura varía de franco limosa en superficie a arcillo limosa en el subsuelo. La estructura de los horizontes superficiales es esponjosa, con agregados granulares y bloques subangulares livianos y porosos, condiciones favorables para el buen desarrollo de las raíces de las plantas y la buena circulación del aire y del agua.

El suelo es liviano y esponjoso, caracterizándose por una densidad aparente situada entre 0.55 y 0.43 Mg m⁻³ en el horizonte superficial y el subsuperficial, respectivamente, y por una densidad de partículas de entre 2.56 y 2.9 Mg m⁻³ (Tabla 2). La porosidad total del suelo es alta (78.7 % a 85.1 %), el desarrollo de una estructura porosa es la principal causa de la baja densidad aparente de los suelos de origen volcánico, siendo el alofano uno de los compuestos mineralógicos no-cristalinos que más contribuye a ello (Shoji *et al.*, 1993).

El contenido de agua a capacidad de campo (CC) varió de 61.5 % en el horizonte superficial a 61.1 % en el subsuperficial. El contenido de agua a punto de marchitez permanente (PMP) varió de 36.6 % a 37.3 %. Los valores relativamente elevados de PMP indican que una cantidad apreciable de agua es retenida bajo fuerte tensión en los poros del suelo y no está disponible para las plantas.

El agua realmente disponible para las plantas o agua aprovechable (AA) alcanzó valores de 24.9 % y 23.9 %. La conductividad hidráulica (CH) varió de 6.2 cm h⁻¹ en el horizonte superficial a 39.1 cm h⁻¹ en el horizonte subsuperficial. El incremento de CH en el subsuelo, muy probablemente sea debido al respectivo incremento del espacio poroso y del contenido de arcilla, permitiendo así una mayor circulación del agua, aire, calor y sustancias nutritivas

en el subsuelo. Sin embargo, el valor de 6.2 cm h^{-1} promedio de dos repeticiones para el horizonte superficial, muy probablemente está por debajo del valor de su media real.

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo.

Hori zonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Color en seco	Da (Mg m^{-3})	Dp (Mg m^{-3})	Porosidad Total (%)	Arena (%)
Ap	0-10	7.5YR 2.5/3 Pardo muy oscuro	10YR 3/3 Pardo oscuro	0.55	2.56	78.74	17.79
A	10-40	7.5YR 2.5/2 Pardo muy oscuro	10YR 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	0.53	2.58	79.49	17.73
C	40-100	7.5YR 4/6 Pardo fuerte	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	0.43	2.9	85.14	11.53

Hori zonte	Prof. (cm)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clasificación textural	Θ_g (%)	CC (%)	PMP (%)	AA (%)	CH (cm hr^{-1})
Ap	0-10	73.89	8.32	Franco limoso	50.90	61.51	36.65	24.87	6.17
A	10-40	68.77	13.50	Franco limoso	68.52	61.20	37.05	24.17	33.70
C	40-100	42.63	45.84	Arcillo limoso	125.85	61.14	37.26	23.89	39.09

Da = densidad aparente; Dp = densidad de las partículas; Θ_g = humedad gravimétrica; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; AA = agua aprovechable; CH = conductividad hidráulica.

3.1.2 Características químicas del suelo

El ambiente químico del suelo se caracteriza por una acidez moderadamente fuerte en los horizontes superficiales, con valores de pH de 5.32 y 5.39, tendiendo a la neutralidad con la profundidad (Tabla 3). El contenido de materia orgánica (MO), según la clasificación de Fassbender y Bornemisza (1978) para suelos derivados de cenizas volcánicas, en los horizontes superficiales fue muy rico (17.4 %), y pobre en el horizonte subsuperficial (2.6 %); el carbono orgánico (CO) varió de 8.7 % en superficie a 1.3 % en profundidad.

El nitrógeno total, según la clasificación de Moreno (1978), en los horizontes superficiales fue rico (0.73 % y 0.75 %), y mediano en el horizonte subsuperficial (0.15 %). Los elevados niveles de este elemento tienen como fuente la materia orgánica del suelo, con cuyo contenido se correlacionó positivamente. Los valores de la relación carbono-nitrógeno ($\text{C/N} = 10-12$), indicaron que los residuos orgánicos se transforman en un humus estable, en el cual, de acuerdo a Geissert e Ibáñez (2008) dominan los compuestos húmicos insolubles y poco móviles, y en donde el nitrógeno se mineraliza activamente.

El fósforo disponible en el suelo fue bajo (0.53 y 0.57 mg kg^{-1}). La capacidad de fijación de fósforo del suelo, responsable de la carencia general de este elemento en formas

disponibles, fue del 100 % en todo el perfil. En suelos de origen volcánico, la fijación del fósforo generalmente constituye, la limitante más importante para el crecimiento de las plantas y cultivos. La mayor parte del fósforo contenido en las cenizas originales, reacciona rápidamente con el aluminio y el hierro no-cristalinos, productos resultantes de la transformación bio y geoquímica del material (intemperismo), formando compuestos insolubles fósforo-metálicos. Un proceso similar ocurre con el fósforo de los fertilizantes que puede ser rápidamente adsorbido para formar un fosfato de aluminio no-cristalino, y no disponible para las plantas (Shoji *et al.*, 1993).

El contenido de calcio intercambiable, según la clasificación de Etchevers *et al.* (1971), fue medio, alcanzando valores de 9.18 cmol kg⁻¹ en los horizontes superficiales, y de 8.16 cmol kg⁻¹ en el subsuperficial; el contenido de magnesio intercambiable fue alto (5.1 y 8.16 cmol kg⁻¹); mientras que el contenido de potasio intercambiable varió de alto a bajo en función de la profundidad (0.76, 0.49, y 0.23 cmol kg⁻¹), y el contenido de sodio fue bajo en todo el perfil, manteniéndose en 1.1 cmol kg⁻¹. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, que es un parámetro que mide la capacidad de un suelo para adsorber nutrientes de bajo potencial iónico (relación carga/radio) como son Ca, Mg, Na y K, y liberarlos a la solución manteniendo el nivel que requieren las plantas; según la clasificación de Cottenie (1980), es de alta a media, con valores de 22.9 a 16.7 cmol kg⁻¹, lo cual concuerda con los contenidos de materia orgánica.

Se ha tomado la clasificación hecha por Geissert e Ibáñez (2008), quienes clasifican al suelo como Andosol (SICS-ISRIC-FAO, 1999), cuando varios horizontes de un mismo perfil presentan propiedades ándicas (densidad aparente ≤ 0.90 Mg m⁻³; fijación de fosfatos $\geq 70\%$; Al +1/2Fe extractables en oxalato ácido $\geq 2.0\%$), además de poseer propiedades de diagnóstico mólicas (saturación con bases $\geq 50\%$). De esta manera el suelo es clasificado como Andosol mólico.

Tabla 3. Propiedades químicas del suelo.

Horizonte	Prof. (cm)	pH	CO (%)	MO (%)	C (%)	N (%)	C/N	P (mg kg ⁻¹)	Fijación P (%)
Ap	0-10	5.32	8.7	17.4	8.8	0.73	12.2	0.53	100
A	10-40	5.39	8.7	17.4	8.8	0.75	11.8	0.57	100
C	40-100	6.57	1.3	2.6	1.6	0.15	10.4	0.11	100

Horizonte	Prof. (cm)	Acidez intercamb. (cmol kg ⁻¹)	Al (cmol kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol kg ⁻¹)	Na ⁺ (cmol kg ⁻¹)	CIC (cmol kg ⁻¹)	Saturación con bases (%)
Ap	0-10	0.506	0.225	9.181	5.101	0.761	1.091	20.0	80.6
A	10-40	0.567	0.246	9.181	8.161	0.491	1.141	22.9	82.7
C	40-100	0.151	0.007	8.161	5.101	0.231	1.131	16.7	87.3

CO = carbono orgánico; MO = materia orgánica; C = carbono total; N = nitrógeno total; C/N = relación carbono-nitrógeno; P = fósforo disponible; Al, Ca, Mg, Na, K = aluminio, calcio, magnesio, sodio, potasio intercambiables; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

3.1.3 Punto de carga cero del suelo

Los Andosoles tienden a estar cargados positivamente bajo condiciones ácidas; sin embargo, llegan a estar cargados negativamente con valores de pH altos. El pH en el cual la carga neta superficial de las partículas del suelo es cero, se conoce como el punto isoeléctrico o como el punto de carga cero (pzc por sus siglas en inglés). Debajo de este punto el suelo, presenta carga positiva y no puede retener cationes por lo que su fertilidad está muy limitada, excepto para algunas especies vegetales tolerantes.

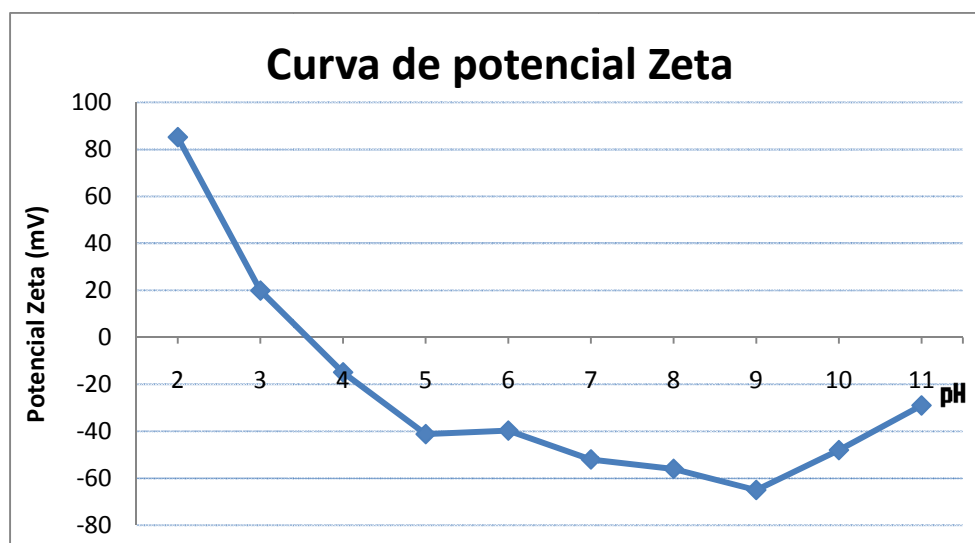


Figura 3. Curva de potencial Zeta en función del pH.

La curva de la Figura 3 indica la carga superficial de las partículas de la muestra de suelo en función del pH, y se observa un punto de carga cero a un pH de 3.5, lo cual manifiesta que a pH menor de 3.5, la superficie de las partículas está cargada positivamente y, por arriba de este valor, su carga es negativa. En consecuencia, los cationes pueden fijarse en el complejo de sorción, por interacción electrostática (adsorción física), con valores de pH superiores a 3.5.

3.1.4 Composición química de las rocas y del suelo

Las rocas volcánicas utilizadas en el presente trabajo de investigación se caracterizan por tener un contenido de SiO₂ de entre 50 % y 54 %, clasificándose de acuerdo con LeBas *et al.* (1986), como rocas de composición máfica e intermedia (Figura 4). También, contienen cantidades importantes de Mg, Ca, Fe, Zn, Cu y Ni (Tablas 4 y 5), la concentración de P en las rocas varía de 0.2 % a 0.3 %, lo cual es importante ya que estos elementos pueden contribuir a la nutrición de las plantas cuando se aplique el polvo de roca al suelo. Además de las rocas volcánicas, la roca caliza contiene el 98 % de Ca (restando la PXC). Es importante mencionar, que el suelo también contiene cantidades considerables de Si, Al, Fe, Cu y Zn. El alto contenido de Si, Al y Fe en el suelo es característico de los suelos de origen volcánico.

Tabla 4. Análisis químico total por fluorescencia de rayos X. Elementos mayores.

Muestra	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ t %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	PXC %	Suma %
Caliza	0.182	ND	ND	0.027	ND	0.503	56.061	0.21	0.015	0.007	43.22	100.23
Escoria roja	51.681	1.019	15.449	8.737	0.132	8.655	8.69	3.138	1.196	0.312	0.62	99.63
Basalto	54.557	1.168	17.475	7.987	0.11	6.042	7.157	3.547	1.165	0.331	0.80	100.34
Brecha volc.	55.474	0.773	16.898	7.607	0.094	5.457	7.203	2.982	1.084	0.218	2.03	99.82
Escoria negra	50.397	1.189	15.275	9.858	0.141	10.11	9.143	2.686	0.889	0.259	0.01	99.96
Horizonte Ap	37.451	1.09	22.648	8.895	0.253	2.471	1.871	0.92	0.668	0.276	23.34	99.88
Horizonte A	38.133	1.081	22.308	8.733	0.241	2.498	1.934	0.905	0.648	0.282	23.15	99.91
Horizonte C	38.82	1.232	29.764	9.509	0.22	1.358	0.768	0.589	0.501	0.147	17.33	100.24

Tabla 5. Análisis químico total por fluorescencia de rayos X. Elementos traza.

Muestra	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
(mg kg ⁻¹)														
Caliza	4	205	<11	0	14	<0.7	5	<2	8	3	<0.7	<1.5	<3	<5
Escoria roja	27	606	562	21	145	7	234	563	40	222	55	85	<3	8
Basalto	19	632	600	34	179	10	167	191	34	98	41	82	4	10
Brecha volc.	18	623	311	17	151	3	161	70	32	33	32	70	<3	<5

Escoria negra	21	422	310	21	121	5	251	675	43	206	49	88	<3	<5
Ap	23	79	726	33	138	2	199	183	35	63	47	137	7	13
A	23	84	760	33	143	2	218	190	32	59	48	131	6	13
C	19	93	394	27	159	3	230	143	35	55	50	84	7	12

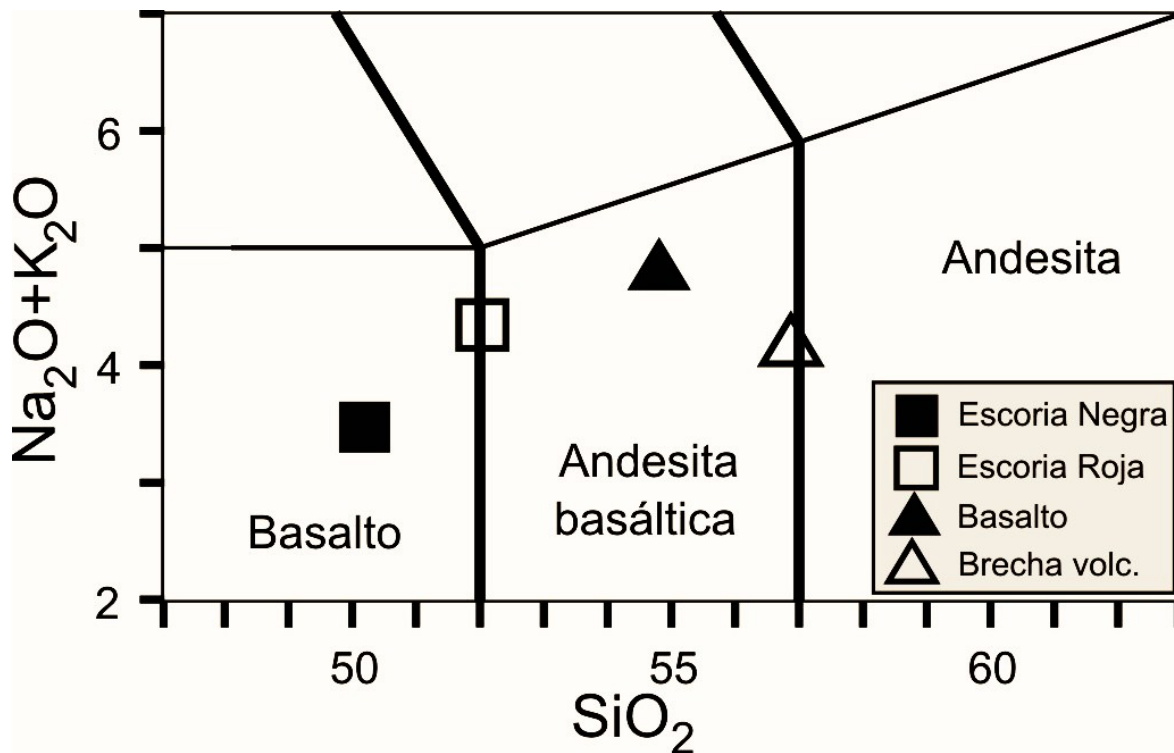


Figura 4. Total de Álcalis vs Sílica. Fuente: LeBas *et al.*, (1986).

3.1.5 Concentraciones extraíbles de Fe, Zn, Cu y Mn con DTPA y con agua meteórica

Los agentes quelatantes son muy eficientes para la extracción de micronutrientes catiónicos, entre los más utilizados se encuentra el DTPA que es el ácido dietilen triamin penta-acético. La acción de este quelato consiste en coordinar los metales principalmente de la solución, disminuyendo su actividad iónica, lo que origina su reemplazo a partir de la fase sólida disponible (Lindsay y Norvell, 1978). La cantidad de micronutrientes extraíbles por el quelato está relacionada con la actividad de los cationes en solución y con la capacidad del suelo para reemplazar esos iones. De esta forma, el agente quelatante

tiende a simular la remoción de nutrimentos por las raíces y la restitución de éstos por el suelo que los rodea (Viets y Lindsay, 1973, citado por Molina y Bornemisza, 2001).

La Tabla 6 enlista las concentraciones de micronutrimentos (Fe, Zn, Cu y Mn) que se encuentran en las muestras de roca y suelo estudiadas, y que pueden estar en forma disponible para las plantas. También, la misma tabla muestra las concentraciones de esos elementos que están en forma soluble. Se puede notar que las rocas analizadas podrían ser una fuente importante de micronutrimentos, ya que tienen cantidades considerables de estos elementos esenciales para el crecimiento de las plantas.

Tabla 6. Fe, Zn, Cu y Mn extraíbles con DTPA y solubles en agua meteórica.

Muestra	Fe	Zn	Cu	Mn	Fe	Zn	Cu	Mn
	Disponibles para las plantas (mg kg ⁻¹)				Solubles en agua meteórica (mg kg ⁻¹)			
Caliza	0.4	0.336	0.18	0.1	0	0.24	0.1	0
Escoria roja	12.7	0.205	0.22	102.5	22.3	0.34	0.2	0.2
Basalto	11.6	0.168	0.36	10.1	3.6	0.29	0.2	0
Brecha volc.	25.5	0.149	0.45	1.4	3.6	1.47	0.3	0
Escoria negra	14.1	0.167	0.35	47.5	7.7	0.51	0.2	0
Suelo	9.7	0.076	0.34	25.1	6.3	0.57	0.2	0

En esta Tabla 6 se observa que las concentraciones extraíbles con DTPA son mucho más altas que los valores límites requeridos por la vegetación. No obstante, se observa que las cantidades en solución de Mn son menores al límite de detección, lo cual posiblemente se deba a que el DTPA secuestra a este elemento de un mineral abundante y poco soluble como es el MnO₂. Sin embargo, debido a la gran cantidad de materia orgánica y el pH relativamente ácido, la disponibilidad de Mn debe ser suficiente por procesos de reducción del Mn⁴⁺ a Mn²⁺ soluble.

Tabla 7. Niveles críticos de micronutrientos extraíbles con DTPA para cultivos sensibles (Viets y Lindsay, 1973, citado por Bernard *et al.*, 1980).

Nutriente	Deficiente	Marginal	Adecuado
	(mg kg ⁻¹ extraíble del suelo)		
Fe	< 2.5	2.5 – 4.5	> 4.5
Zn	< 0.5	0.5 – 1.0	> 1.0
Cu	< 0.2		> 0.2
Mn	< 1.0		> 1.0

En la Tabla 7 se muestran los niveles críticos de micronutrientos que Viets y Lindsay (1973) reportan, utilizados para distinguir entre suelos deficientes, marginales, y no deficientes, para cultivos sensibles a la deficiencia de estos elementos.

3.1.6 pH de las rocas

Los valores de pH de las rocas utilizadas para fertilizar los suelos, se muestran en la Tabla 8, e indica que todas ellas presentan un carácter básico. La escoria roja presenta el valor más alto que es de 9.5, y la brecha volcánica el más bajo de 8.3, las diferencias entre estos dos valores se pueden explicar por el diferente contenido de metales alcalino y alcalinotérreos, como Ca y K; y Al que es un elemento anfótero (Tabla 4).

Tabla 8. pH de las rocas.

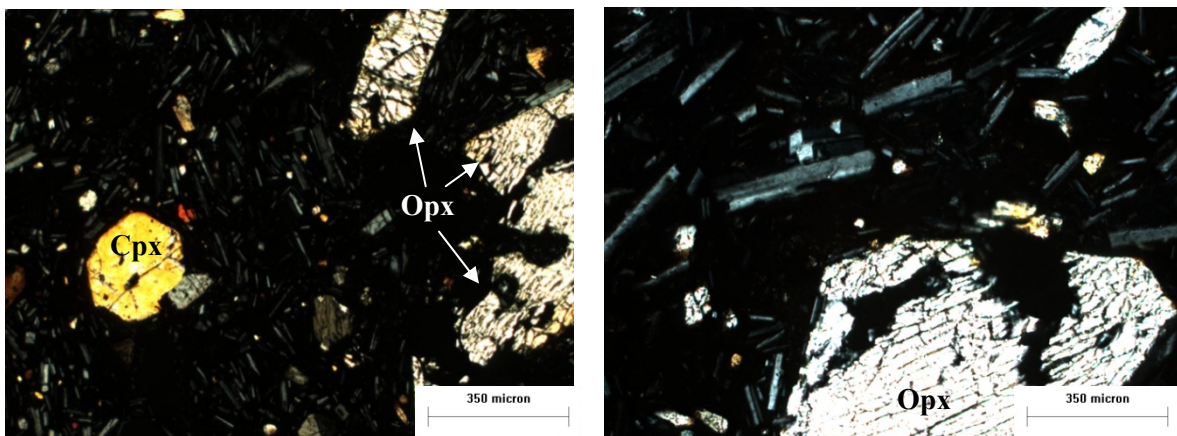
Muestra	pH
Escoria roja	9.50
Basalto	8.59
Brecha volcánica	8.33
Escoria negra	9.20
Caliza	8.77

3.1.7 Mineralogía de las rocas

Welch (1995) identifica 17 elementos requeridos por las plantas. Nueve macronutrientos que normalmente están presentes en los tejidos de las plantas en concentraciones mayores a

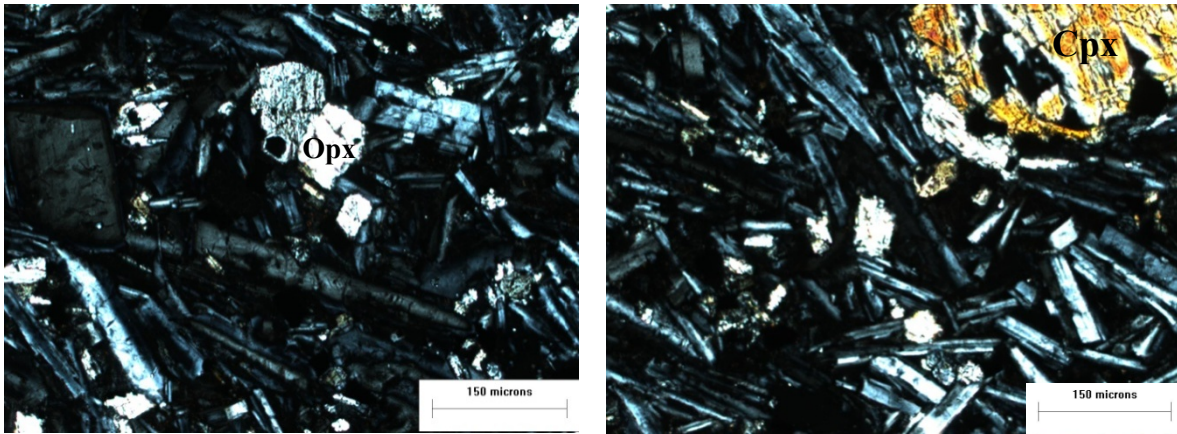
0.1 % en masa seca (C, H, O, N, K, Ca, Mg, P, S), y ocho micronutrientos en concentraciones menores a $100 \mu\text{g g}^{-1}$ en masa seca (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Zn). También, son requeridos algunos nutrientes adicionales por algunas plantas, bajo condiciones ambientales particulares (Co, Na, Si). Los nutrientes esenciales para las plantas se presentan en varias concentraciones en aluminosilicatos (plagioclasas), silicatos ferromagnesianos (olivinos y piroxenos), y minerales accesorios de las rocas. Los aluminosilicatos y los silicatos ferromagnesianos son los minerales más abundantes formadores de rocas, y pueden ser una fuente muy importante de nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas. Los minerales predominantes en las rocas propuestas en este trabajo para ser utilizadas como polvo de roca fueron: olivinos, piroxenos, plagioclasas (en las rocas volcánicas), y calcita (en la caliza). Importantes concentraciones de Fe y Mg están incorporadas en los olivinos y piroxenos; además, las plagioclasas y la calcita son fuentes importantes de Ca.

Escoria roja.- De textura inequigranular glomeroporfirítica; compuesta por un 55 % de cristales de ortopiroxeno, 20 % de clinopiroxeno, 20 % de plagioclasa, y 5 % de óxidos; envueltos por una matriz compuesta de listones microlíticos y microfenocristales de plagioclasa, microlitos de piroxeno, y óxidos granulares, como puede observarse en las fotomicrografías (Figs. 5 y 6).



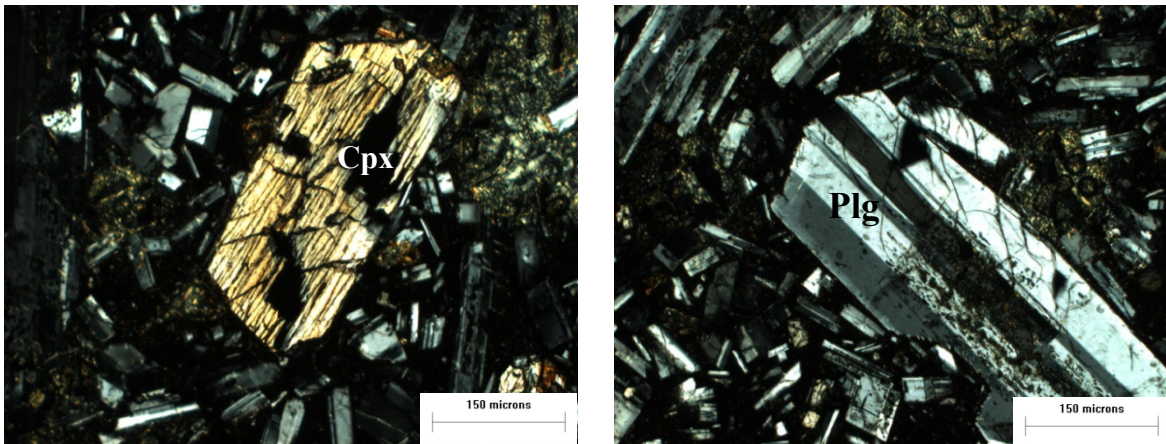
Figuras 5 y 6. Fotomicrografías de la Escoria roja usando un lente de aumento 4x. Se observan cristales de plagioclasa (Plg), ortopiroxeno (Opx) y clinopiroxeno (Cpx).

Basalto.- De textura inequigranular porfírica; compuesto por un 40 % de cristales de ortopiroxeno, 28 % de clinopiroxeno, 20 % de plagioclasa, 10 % de óxidos, y 2 % de olivino; inmersos en una matriz hipocristalina de grano fino a medio, compuesta por listones de plagioclasa, óxidos granulares, microlitos de piroxeno y olivino, y vidrio (Figs. 7 y 8).



Figuras 7 y 8. Fotomicrografías del Basalto usando un lente de aumento 10x. Se observan cristales de plagioclasa (Plg), ortopiroxeno (Opx), y clinopiroxeno (Cpx).

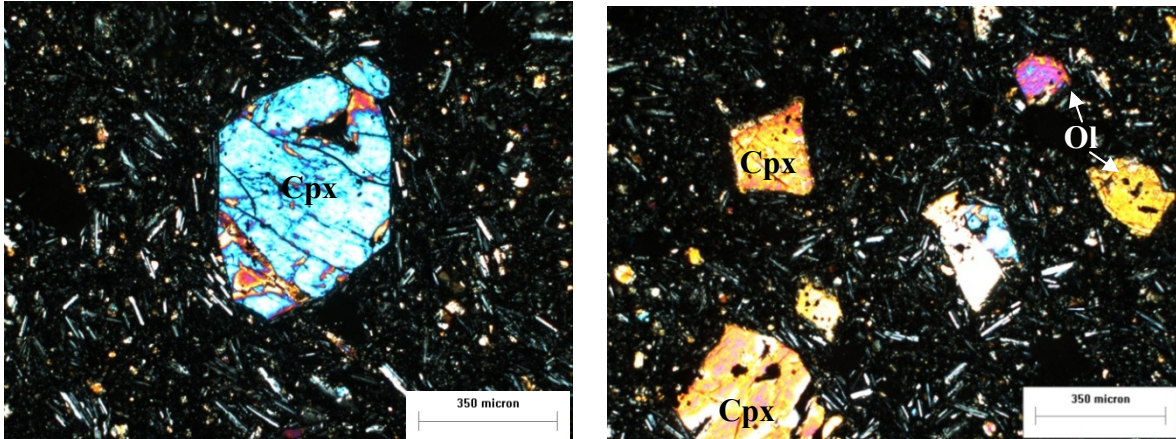
Brecha volcánica.- De textura inequigranular y glomeroporfírica; compuesta por un 60 % de cristales de plagioclasa, 20 % de clinopiroxeno, 15 % de ortopiroxeno, y 5 % de óxidos; inmersos en una matriz compuesta por glomerocristales de clinopiroxenos (Figs. 9 y 10).



Figuras 9 y 10. Fotomicrografías de un fragmento contenido en la Brecha volcánica usando un lente de aumento 10x. Se observan cristales de plagioclasa (Plg), y clinopiroxeno (Cpx).

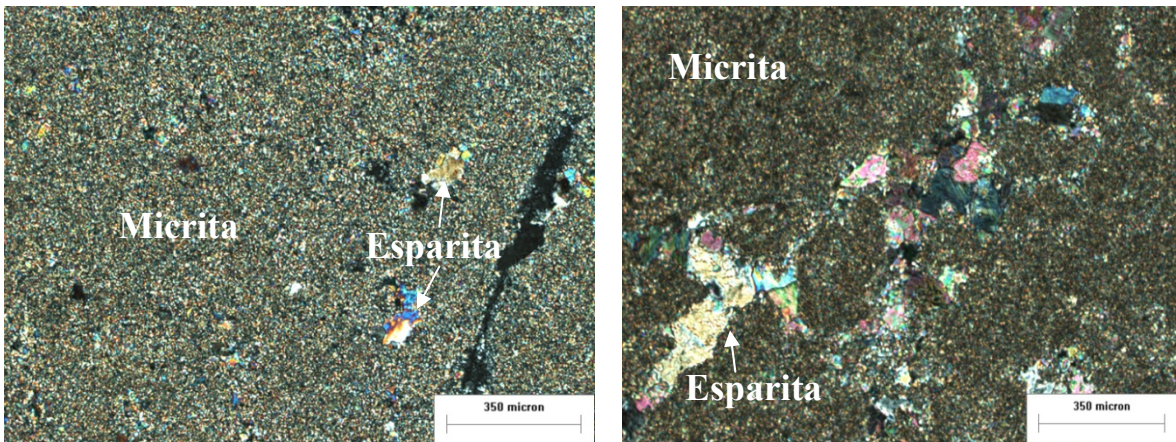
Escoria negra.- De textura inequigranular porfírica; compuesta por un 35 % de cristales de ortopiroxeno, 30 % de clinopiroxeno, 15 % de olivino, 10 % de plagioclasa, y 10 % de

óxidos; inmersos en una matriz hipocristalina de grano fino, compuesta por listones de plagioclasa, microlitos de orto y clinopiroxeno, microlitos de olivino, y microlitos de óxidos (Figs. 11 y 12).



Figuras 11 y 12. Fotomicrografías de la Escoria negra usando un lente de aumento 4x. Se observan cristales de clinopiroxeno (Cpx) y olivino (Ol).

Caliza.- Roca carbonatada principalmente formada de micrita, que son cristales de calcita microcristalina menores a 5 μm , y algunos poros rellenos de esparita, que son cristales de calcita con diámetro mayor a 5 μm y que, en esta muestra, se encuentran dispuestos en glomero-cristales de esparita. La textura es la de un mudstone carbonatado de grano muy fino (Figs. 13 y 14).



Figuras 13 y 14. Fotomicrografías de la Caliza usando un lente de aumento 4x. Se observan cristales de micrita (<5 μm) y esparita (>5 μm).

3.1.8 Rendimiento de forraje fresco

El análisis de varianza (ANOVA) de los datos de rendimiento de forraje fresco, indica que en los cortes segundo y tercero, el efecto de los tratamientos fue altamente significativo, el segundo corte con $p \leq 0.01$ y el tercer corte con $p \leq 0.05$. En el primer y cuarto corte, el ANOVA no detectó diferencias significativas entre los rendimientos promedio de forraje que indicara algún efecto de los tratamientos sobre esta variable.

Los análisis de varianza se presentan en los cuadros 3, 5, 7 y 9 del apéndice. En ellos aparecen la media general y los coeficientes de variación del rendimiento de forraje fresco en cada corte. El coeficiente de variación encontrado en los cortes en los que hubo efecto significativo de los tratamientos sobre el rendimiento de forraje fresco, es de 14.4 % para ambos cortes.

Por medio del análisis estadístico correspondiente, también se observó que hubo efecto de los cortes a través del tiempo sobre el rendimiento de forraje fresco, pues los rendimientos medios para cada uno de los cortes son diferentes entre sí, y esta diferencia es altamente significativa entre cortes.

Los rendimientos medios de forraje fresco en cada uno de los cortes fueron los siguientes:

Corte No.	Rendimiento (g maceta ⁻¹)	Rendimiento (ton ha ⁻¹)
1	9.87	5.23
2	6.25	3.31
3	4.53	2.40
4	3.26	1.73

a. Rendimiento de forraje fresco en el primer corte

La prueba de rango múltiple, realizada en forma posterior al ANOVA para el primer corte con un 99 % de confiabilidad (ver cuadro 4 del apéndice), indica que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores promedio del rendimiento de forraje fresco, es decir, que no hubo efecto de los tratamientos sobre esta variable. La Tabla 9 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 9. Rendimiento de forraje fresco en el primer corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje fresco (ton ha ⁻¹)
5	Brecha volcánica y caliza	4.24
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	4.56
1	Ninguna (testigo)	4.59
11	Basalto, escoria negra y caliza	4.63
4	Basalto y caliza	4.7
6	Escoria negra y caliza	4.77
7	Escoria roja, basalto y caliza	4.96
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	5.14
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	5.33
2	Caliza	5.38
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	5.55
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	5.56
3	Escoria roja y caliza	5.73
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	5.84
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	5.91
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	6.01
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	6.02

b. Rendimiento de forraje fresco en el segundo corte

La prueba de rango múltiple para el segundo corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 6 del apéndice), indica que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores promedio del rendimiento de forraje fresco, en especial, entre los tratamientos en los que se aplicó polvo de roca y el testigo absoluto (Tratamiento no. 1) que no tuvo ninguna aplicación. La Tabla 10 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 10. Rendimiento de forraje fresco en el segundo corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje fresco (ton ha ⁻¹)	
1	Ninguna (testigo)	2.11	a
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	2.89	b

14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	3.05	b, c
4	Basalto y caliza	3.15	b, c
2	Caliza	3.19	b, c
5	Brecha volcánica y caliza	3.2	b, c
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	3.26	b, c
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	3.32	b, c, d
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	3.36	b, c, d
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	3.4	b, c, d
7	Escoria roja, basalto y caliza	3.49	b, c, d
3	Escoria roja y caliza	3.51	b, c, d
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	3.54	b, c, d
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	3.59	b, c, d
6	Escoria negra y caliza	3.61	d
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	3.62	d
11	Basalto, escoria negra y caliza	4.0	d

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

c. Rendimiento de forraje fresco en el tercer corte

La prueba de rango múltiple para el tercer corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 8 del apéndice), indica que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores promedio de esta variable. Estas diferencias están señaladas en la Tabla 11, con las letras de la última columna de la derecha. La misma Tabla 11 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 11. Rendimiento de forraje fresco en el tercer corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje fresco (ton ha ⁻¹)	
1	Ninguna (testigo)	1.57	a
3	Escoria roja y caliza	2.2	a, b
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	2.22	b
2	Caliza	2.29	b
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	2.35	b
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	2.41	b
4	Basalto y caliza	2.41	b
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	2.41	b
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	2.43	b

16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	2.43	b
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	2.48	b
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	2.48	b
5	Brecha volcánica y caliza	2.55	b
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	2.56	b
7	Escoria roja, basalto y caliza	2.58	b
6	Escoria negra y caliza	2.65	b
11	Basalto, escoria negra y caliza	2.79	b

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

d. Rendimiento de forraje fresco en el cuarto corte

La prueba de rango múltiple para el cuarto corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 10 del apéndice), indica que no existe diferencia significativa entre los efectos de los tratamientos sobre esta variable. La Tabla 12 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 12. Rendimiento de forraje fresco en el cuarto corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje fresco (ton ha ⁻¹)
1	Ninguna (testigo)	1.4
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	1.58
3	Escoria roja y caliza	1.6
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	1.63
4	Basalto y caliza	1.63
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	1.63
2	Caliza	1.69
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	1.7
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	1.73
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	1.76
7	Escoria roja, basalto y caliza	1.8
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	1.83
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	1.86
11	Basalto, escoria negra y caliza	1.87
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	1.88
6	Escoria negra y caliza	1.88
5	Brecha volcánica y caliza	1.89

e. Rendimiento de forraje fresco en el total de los cortes

El ANOVA realizado detectó la significación estadística de algunos efectos de tratamientos sobre esta variable con un 95 % de confiabilidad (cuadro 11 del apéndice). Además, en la prueba de rango múltiple para la sumatoria de todos los cortes con un 99 % de confiabilidad (cuadro 12 del apéndice), indica que sí existen diferencias significativas en el rendimiento total de forraje, en especial entre los tratamientos en los que se obtuvo el rendimiento más alto y el más bajo. De esta prueba se puede establecer que los rendimientos más altos obtenidos con los tratamientos 17, 9 y 11, son significativamente diferentes del rendimiento más bajo que se obtuvo con el tratamiento 1. La Tabla 13 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 13. Rendimiento de forraje fresco en el total de los cortes.

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje fresco (ton ha ⁻¹)	
1	Ninguna (testigo)	9.67	a
5	Brecha volcánica y caliza	11.9	a, b
4	Basalto y caliza	11.9	a, b
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	12.1	b
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	12.5	b
2	Caliza	12.5	b
7	Escoria roja, basalto y caliza	12.8	b
6	Escoria negra y caliza	12.9	b
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	12.9	b
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	13.0	b
3	Escoria roja y caliza	13.0	b
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	13.1	b
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	13.2	b
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	13.2	b
11	Basalto, escoria negra y caliza	13.3	b
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	13.5	b
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	13.8	b

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

3.1.9 Rendimiento de forraje seco

El análisis de varianza de los datos de rendimiento de forraje seco, indica que en los cortes: segundo y tercero, el efecto de los tratamientos fue altamente significativo, ambos cortes con $p \leq 0.01$. Este resultado concuerda con lo que se obtuvo para el caso del rendimiento en fresco (inciso 3.1.8.).

En el primer y cuarto corte, el análisis de varianza no detectó el efecto de ningún tratamiento sobre esta variable. Sin embargo, al realizar la prueba de rango múltiple se observó una diferenciación del rendimiento en dos grupos homogéneos; estos resultados se muestran en las tablas 14 y 17 para los cortes primero y cuarto, respectivamente.

Los análisis de varianza realizados con los valores de forraje seco para los cortes 1, 2, 3, y 4, se presentan en los cuadros 13, 15, 17 y 19 del apéndice, respectivamente. En ellos, aparecen la media general y los coeficientes de variación para esta variable en cada corte. Los coeficientes de variación encontrados en los diferentes cortes en los que hubo efecto significativo de los tratamientos sobre el rendimiento de forraje seco, fluctuaron de 13.8 a 14.5 %.

Por medio del análisis estadístico correspondiente, también se observó un efecto de los cortes a través del tiempo sobre el rendimiento de forraje seco; pues los rendimientos medios de esta variable para cada uno de los cortes son diferentes entre sí, y esta diferencia es altamente significativa.

Los rendimientos medios para cada uno de los cortes fueron los siguientes:

Corte No.	Rendimiento (g maceta ⁻¹)	Rendimiento (ton ha ⁻¹)
1	2.13	1.13
2	1.22	0.649
3	0.97	0.512
4	0.67	0.355

a. Rendimiento de forraje seco en el primer corte

La prueba de rango múltiple para el primer corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 14 del apéndice), indica que los únicos dos tratamientos en los que se encontraron diferencias significativas del rendimiento fueron el 14 y el 5. Siendo el tratamiento 14 el que produjo el rendimiento más alto, y el tratamiento 5 el que originó el rendimiento más bajo. La Tabla 14 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 14. Rendimiento de forraje seco en el primer corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje seco (ton ha ⁻¹)	
5	Brecha volcánica y caliza	0.929	a
11	Basalto, escoria negra y caliza	0.972	a, b
4	Basalto y caliza	0.995	a, b
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	1.02	a, b
7	Escoria roja, basalto y caliza	1.03	a, b
1	Ninguna (testigo)	1.04	a, b
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	1.05	a, b
6	Escoria negra y caliza	1.09	a, b
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	1.11	a, b
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	1.14	a, b
2	Caliza	1.16	a, b
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	1.2	a, b
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	1.23	a, b
3	Escoria roja y caliza	1.24	a, b
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	1.31	a, b
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	1.32	a, b
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	1.37	b

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

b. Rendimiento de forraje seco en el segundo corte

La prueba de rango múltiple para el segundo corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 16 del apéndice), indica que sí existe diferencia significativa en el rendimiento medio de forraje por efecto de algunos tratamientos. La Tabla 15 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 15. Rendimiento de forraje seco en el segundo corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje seco (ton ha ⁻¹)	
1	Ninguna (testigo)	0.428	a
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	0.562	b
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	0.597	b, c
4	Basalto y caliza	0.619	b, c
5	Brecha volcánica y caliza	0.621	b, c
2	Caliza	0.626	b, c
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	0.642	b, c
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.65	b, c, d
7	Escoria roja, basalto y caliza	0.66	b, c, d
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.662	b, c, d
6	Escoria negra y caliza	0.685	b, c, d
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.685	b, c, d
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	0.691	b,c, d
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	0.698	c, d
3	Escoria roja y caliza	0.712	c, d
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.72	c, d
11	Basalto, escoria negra y caliza	0.776	d

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

c. Rendimiento de forraje seco en el tercer corte

La prueba de rango múltiple para el tercer corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 18 del apéndice), indica que la única diferencia significativa en el rendimiento se presentó entre el tratamiento uno y el resto. Con este análisis estadístico se ve claramente que al aplicar cualquier roca al suelo se obtiene un mayor rendimiento, a diferencia de si no se aplica ninguna roca. La Tabla 16 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 16. Rendimiento de forraje seco en el tercer corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje seco (ton ha ⁻¹)	
1	Ninguna (testigo)	0.326	a
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	0.469	b
3	Escoria roja y caliza	0.474	b

2	Caliza	0.496	b
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.502	b
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	0.506	b
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	0.521	b
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.523	b
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	0.526	b
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.529	b
7	Escoria roja, basalto y caliza	0.533	b
4	Basalto y caliza	0.535	b
5	Brecha volcánica y caliza	0.543	b
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	0.543	b
6	Escoria negra y caliza	0.545	b
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.554	b
11	Basalto, escoria negra y caliza	0.588	b

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

d. Rendimiento de forraje seco en el cuarto corte

La prueba de rango múltiple para el cuarto corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 20 del apéndice), indica que sí existe diferencia significativa en el rendimiento por efecto de algunos tratamientos. La Tabla 17 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 17. Rendimiento de forraje seco en el cuarto corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje seco (ton ha ⁻¹)	
1	Ninguna (testigo)	0.274	a
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	0.329	a, b
3	Escoria roja y caliza	0.331	a, b
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.335	a, b
4	Basalto y caliza	0.343	a, b
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	0.35	a, b
2	Caliza	0.352	a, b
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.356	a, b
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.356	a, b
7	Escoria roja, basalto y caliza	0.358	a, b
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.361	b
6	Escoria negra y caliza	0.369	b

10	Basalto, brecha volcánica y caliza	0.37	b
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	0.373	b
5	Brecha volcánica y caliza	0.385	b
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	0.392	b
11	Basalto, escoria negra y caliza	0.396	b

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

e. Rendimiento de forraje seco en el total de los cortes.

El análisis de varianza detectó el efecto significativo de algunos tratamientos sobre esta variable con un 95 % de confianza (cuadro 21 del apéndice). Además, la prueba de rango múltiple para la sumatoria de todos los cortes con un 99 % de confiabilidad (cuadro 22 del apéndice), indica que sí existe diferencia significativa sobre la variable, en especial entre los tratamientos en los que se obtuvo el rendimiento más alto y el más bajo. De esta prueba se puede establecer que los rendimientos más altos obtenidos con los tratamientos 17, 16 y 14, son significativamente diferentes del rendimiento más bajo que se obtuvo con el tratamiento 1. La Tabla 18 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 18. Rendimiento de forraje seco en el total de los cortes.

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Rendimiento de forraje seco (ton ha ⁻¹)	
1	Ninguna (testigo)	2.07	a
5	Brecha volcánica y caliza	2.48	a, b
4	Basalto y caliza	2.49	a, b
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	2.55	a, b
7	Escoria roja, basalto y caliza	2.58	b
2	Caliza	2.63	b
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	2.63	b
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	2.65	b
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	2.69	b
6	Escoria negra y caliza	2.69	b
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	2.71	b
11	Basalto, escoria negra y caliza	2.73	b
3	Escoria roja y caliza	2.75	b
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	2.75	b
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	2.81	b

16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	2.83	b
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	2.94	b

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

3.1.10 Área foliar

El análisis de varianza de los datos de área foliar, indicó que en las fechas de los cortes: segundo y tercero, el efecto de los tratamientos fue altamente significativo con $p \leq 0.01$.

En las fechas del primer y cuarto corte, el ANOVA no detectó ningún efecto significativo de los tratamientos sobre esta variable.

Los análisis de varianza se presentan en los cuadros 23, 25, 27 y 29 del apéndice. En ellos, aparecen la media general y los coeficientes de variación del área foliar para cada fecha de corte. Los coeficientes de variación encontrados en las fechas de corte en los que hubo efecto significativo de tratamientos sobre el área foliar, fluctuaron de 14.1 a 14.2 %.

El área foliar media para cada fecha de corte fueron los siguientes:

Corte No.	Área foliar (cm ²)
1	316
2	416
3	347
4	204

a. Área foliar en la fecha del primer corte

La prueba de rango múltiple para la fecha del primer corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 24 del apéndice), indica que sí existe diferencia significativa en el área foliar media por efecto de algunos tratamientos sobre esta variable. La Tabla 19 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 19. Área foliar en la fecha del primer corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Área foliar (cm ²)	
5	Brecha volcánica y caliza	255	a
6	Escoria negra y caliza	270	a

1	Ninguna (testigo)	290	a
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	298	a, b
11	Basalto, escoria negra y caliza	303	a, b
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	313	a, b
3	Escoria roja y caliza	313	a, b
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	313	a, b
7	Escoria roja, basalto y caliza	313	a, b
4	Basalto y caliza	314	a, b
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	323	a, b
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	332	a, b
2	Caliza	333	a, b
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	336	a, b
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	350	b
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	358	b
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	359	b

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

b. Área foliar en la fecha del segundo corte

La prueba de rango múltiple para la fecha del segundo corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 26 del apéndice), indica que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre las medidas de área foliar por efecto de algunos tratamientos. La Tabla 20 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 20. Área foliar en la fecha del segundo corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Área foliar (cm ²)	
1	Ninguna (testigo)	271	a
5	Brecha volcánica y caliza	363	b
4	Basalto y caliza	384	b, c
2	Caliza	392	b, c, d
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	402	b, c, d
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	408	b, c, d
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	410	b, c, d
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	413	b, c, d
3	Escoria roja y caliza	421	b, c, d
7	Escoria roja, basalto y caliza	423	b, c, d

8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	423	b, c, d
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	436	b, c, d
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	438	b, c, d
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	450	c, d, e
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	453	c, d, e
6	Escoria negra y caliza	467	d, e
11	Basalto, escoria negra y caliza	522	e

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

c. Área foliar en la fecha del tercer corte

La prueba de rango múltiple para la fecha del tercer corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 28 del apéndice), indica que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores de la variable por efecto de algunos tratamientos. La Tabla 21 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 21. Área foliar en la fecha del tercer corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Área foliar (cm ²)	
1	Ninguna (testigo)	232	a
2	Caliza	307	a, b
5	Brecha volcánica y caliza	309	b
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	320	b, c
3	Escoria roja y caliza	328	b, c
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	334	b, c
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	342	b, c
7	Escoria roja, basalto y caliza	344	b, c, d
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	358	b, c, d
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	361	b, c, d
4	Basalto y caliza	364	b, c, d
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	367	b, c, d
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	373	b, c, d
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	376	b, c, d
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	377	b, c, d
6	Escoria negra y caliza	386	c, d
11	Basalto, escoria negra y caliza	418	d

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

d. Área foliar en la fecha del cuarto corte

Al realizar la prueba de rango múltiple para la fecha del cuarto corte con un 99 % de confiabilidad (cuadro 30 del apéndice), se distinguen dos tratamientos en los que sí existió una diferencia significativa. Estos tratamientos son el 8 y el 1, siendo el 8 el que produjo mayor área foliar, y el 1, el que dio la menor área foliar. La Tabla 22 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 22. Área foliar en la fecha del cuarto corte (promedio de tres repeticiones).

Tratamiento No.	Rocas integrantes	Área foliar (cm ²)	
1	Ninguna (testigo)	154	a
3	Escoria roja y caliza	189	a, b
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	192	a, b
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	192	a, b
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	193	a, b
2	Caliza	193	a, b
4	Basalto y caliza	195	a, b
7	Escoria roja, basalto y caliza	196	a, b
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	199	a, b
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	202	a, b
5	Brecha volcánica y caliza	211	a, b
6	Escoria negra y caliza	212	a, b
11	Basalto, escoria negra y caliza	219	a, b
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	219	a, b
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	222	a, b
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	229	a, b
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	248	b

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

3.1.11 Propiedades del suelo al término del experimento en invernadero

a. pH

El análisis de varianza (Cuadro 31 del apéndice) detectó el efecto significativo de algunos tratamientos sobre el pH, con un 99 % de confiabilidad. Además, la prueba de rango múltiple para pH con un 99 % de confiabilidad, indicó que sí existe diferencia significativa, en especial entre los tratamientos en los que se obtuvo el valor de pH más alto y el más bajo. De esta prueba se puede inferir que el pH más alto se obtiene con el tratamiento 16, y que el pH más bajo se mantiene con el tratamiento 1. El valor de pH más alto se obtuvo de la combinación de caliza con basalto, brecha volcánica y escoria negra (tratamiento 16). En el testigo absoluto (tratamiento 1) se mantuvo el valor de pH más bajo, ya que no recibió ninguna adición de polvo de roca. La Tabla 23 enlista los resultados obtenidos en orden ascendente.

Tabla 23. Valores de pH en el suelo medido al término del experimento en invernadero. Media de tres repeticiones.

Tratamiento	Rocas integrantes	pH
1	Ninguna (testigo)	5.88 a
2	Caliza	6.53 b
3	Escoria roja y caliza	6.53 b, c
5	Brecha volcánica y caliza	6.56 b, c
4	Basalto y caliza	6.58 b, c, d
7	Escoria roja, basalto y caliza	6.64 b, c, d, e
6	Escoria negra y caliza	6.65 c, d, e
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	6.7 d, e, f
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	6.7 d, e, f
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	6.71 e, f
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	6.74 e, f, g
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	6.75 e, f, g
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	6.78 f, g
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	6.79 f, g
11	Basalto, escoria negra y caliza	6.8 f, g
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	6.8 f, g
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	6.84 g

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

b. Fósforo disponible y fijación de fósforo

El contenido de P disponible en el suelo, que se cuantificó al término del experimento en invernadero, fue bajo (0.14 a 0.7 mg kg⁻¹), observándose el mayor contenido en el suelo que fungió como tratamiento 1, y los menores contenidos de esta variable con los tratamientos 17 y 8 (Tabla 24).

La capacidad de fijación de P del suelo, responsable de la carencia general de P, osciló entre 98.8 y 100 % (Tabla 25), lo que concuerda con el bajo contenido de P disponible.

Tabla 24. Concentraciones de fósforo disponible en el suelo medido al término del experimento en invernadero. Media de tres repeticiones.

Tratamiento	Rocas integrantes	P disponible (mg kg ⁻¹)	
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	0.14	a
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.16	a
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.20	a, b
5	Brecha volcánica y caliza	0.21	a, b
7	Escoria roja, basalto y caliza	0.25	a, b, c
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.30	a, b, c, d
6	Escoria negra y caliza	0.32	a, b, c, d, e
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	0.40	a, b, c, d, e, f
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	0.46	b, c, d, e, f
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	0.47	b, c, d, e, f
2	Caliza	0.49	b, c, d, e, f
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	0.51	b, c, d, e, f
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	0.52	c, d, e, f
3	Escoria roja y caliza	0.56	d, e, f
11	Basalto, escoria negra y caliza	0.61	e, f
4	Basalto y caliza	0.62	e, f
1	Ninguna (testigo)	0.7	f

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

Tabla 25. Fijación de fósforo en el suelo medido al término del experimento en invernadero. Media de tres repeticiones.

Tratamiento	Rocas integrantes	Fijación de P (%)	
4	Basalto y caliza	98.8	a
1	Ninguna (testigo)	98.8	a, b
2	Caliza	98.9	a, b
3	Escoria roja y caliza	99.0	a, b
10	Basalto, brecha volcánica y caliza	99.3	a, b, c
5	Brecha volcánica y caliza	99.3	a, b, c
14	Escoria roja, basalto, escoria negra y caliza	99.6	b, c
13	Escoria roja, basalto, brecha volcánica y caliza	99.8	c
11	Basalto, escoria negra y caliza	99.8	c
12	Brecha volcánica, escoria negra y caliza	100	c
6	Escoria negra y caliza	100	c
15	Escoria roja, brecha volcánica, escoria negra y caliza	100	c
17	Escoria roja, basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	100	c
7	Escoria roja, basalto y caliza	100	c
9	Escoria roja, escoria negra y caliza	100	c
8	Escoria roja, brecha volcánica y caliza	100	c
16	Basalto, brecha volcánica, escoria negra y caliza	100	c

Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.01$).

c. Fe, Zn, Cu y Mn extraíbles con DTPA

Al término del experimento en invernadero se midieron las concentraciones de micronutrientes (Fe, Zn, Cu y Mn), para determinar la concentración potencialmente disponible para las plantas en cada uno de los tratamientos de suelo. En la Tabla 26 se puede notar que en la mayoría de los tratamientos en los que se aplicó polvo de roca al suelo, hubo un aumento significativo en la cantidad de micronutrientes disponibles para las plantas.

Tabla 26. Concentraciones de Fe, Zn, Cu y Mn extraíbles con DTPA al término del experimento en invernadero.

Tratamiento	Fe	Zn	Cu	Mn
No.	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
1	26.6	0.228	0.34	103.5
2	30.9	0.448	0.65	167
3	28.3	0.416	0.64	132
4	33.8	0.502	0.74	150
5	30.4	0.444	0.58	95.5
6	29.4	0.457	0.59	98
7	29.9	0.493	0.65	108.5
8	27.8	0.471	0.59	92.5
9	25	0.471	0.54	56.5
10	25.2	0.465	0.57	73.5
11	23	0.475	0.55	60.5
12	28.5	0.47	0.73	87.5
13	24.6	0.495	0.71	56.5
14	23	0.49	0.65	46.5
15	29.9	0.514	0.79	64.5
16	27.1	0.495	0.7	56.5
17	23	0.505	0.67	33

3.2 Discusión

3.2.1 Características físicas y químicas del suelo

Propiedades físicas como una alta porosidad, baja densidad aparente, textura franca y una alta profundidad del suelo (Tabla 2), son características muy favorables para la germinación de las semillas y para un buen enraizamiento de las plantas. Dichas características están estrechamente relacionadas con una estructura que permite trabajar fácilmente el suelo y que lo hace resistente a la erosión, estructura que también está relacionada con su contenido de materia orgánica y la abundancia de materiales no-cristalinos. Los altos e importantes contenidos de materia orgánica (Tabla 3), permiten considerar que el suelo estudiado presenta una buena calidad biológica.

Muchas reacciones químicas que influyen en la disponibilidad de los nutrimentos dependen del ambiente químico del suelo, en particular, del pH. Este ambiente para el suelo bajo estudio, es un tanto restrictivo y resulta de la edafogénesis particular de los suelos con propiedades ándicas. La acidez en Andosoles está determinada por la mineralogía de la fracción coloidal y el grado de saturación en bases y, generalmente, se presenta en regiones húmedas donde la lixiviación de bases es intensa (Shoji *et al.*, 1993). La materia orgánica también contribuye a la acidez de los Andosoles, especialmente, donde la liberación de ácidos orgánicos durante el proceso de transformación del carbono orgánico (CO) es importante.

Con relación a la disponibilidad de macronutrimentos como el Ca, y considerando los niveles críticos propuestos por Moreno-Dhame (1978), dicha disponibilidad en el suelo bajo estudio es media, la del Mg es alta, mientras que, la del K varía de alta a baja en función de la profundidad del suelo. Este comportamiento podría ser consecuencia de la acidez del suelo y de la lixiviación natural de las bases como el potasio. Uno de los principales problemas que presenta este suelo es la alta fijación del fósforo (Tabla 3), siendo éste el nutrimento más limitativo para el crecimiento de las plantas en los suelos con propiedades ándicas.

3.2.2 Efecto de las rocas sobre la productividad del suelo (rendimiento de forraje seco)

A lo largo del experimento en invernadero se apreció una disminución del rendimiento de forraje con el transcurso del tiempo. Este decremento del rendimiento pudo haberse debido a varios factores, entre los cuales puede mencionarse que los cortes severos, generalmente, causan una alta reducción de la tasa de elongación de las hojas (Davidson y Milthorpe, 1966). De esta manera, los cortes realizados pudieron haber tenido este efecto en el ballico perenne utilizado impidiendo que la planta alcanzara un óptimo desarrollo. Otra de las causas, pudo haber sido la presencia de un estrés radicular, generado por un reducido volumen de las macetas, que se manifestó en la disminución de la biomasa aérea.

Las variables evaluadas en el experimento de invernadero fueron: rendimiento de forraje fresco, rendimiento de forraje seco y área foliar. De éstas, la variable más representativa para realizar una interpretación adecuada de los datos obtenidos, es el rendimiento de forraje seco. Con base en la prueba de rango múltiple realizada sobre la sumatoria de forraje seco obtenido en todos los cortes (cuadro 22 del apéndice), se logró establecer que el rango de rendimiento de forraje ($2.48 - 2.94 \text{ ton ha}^{-1}$) obtenido con los tratamientos del 2 al 17, es estadística y significativamente diferente al rendimiento que se obtuvo con el tratamiento 1. Esto quiere decir que, la aplicación al suelo de todas las rocas que se encuentran disponibles en la región de Huatusco, Veracruz, aplicadas solas o mezcladas, originan un efecto benéfico en cuanto a la productividad de forraje seco, a diferencia del tratamiento 1 (testigo absoluto) en el que no se aplicó ningún tipo de roca al suelo. Por lo cual se cumple la hipótesis formulada al inicio de este trabajo. Además, estos resultados concuerdan y apoyan los resultados que otros autores han obtenido en relación al efecto positivo del polvo de roca en el rendimiento de los cultivos (Evans, 1947; Feillafe, 1950; d'Hotman de Villiers, 1961; Roschnik *et al.*, 1967; Leonardos *et al.*, 1987; Theodoro y Leonardos, 2006).

3.2.3 Efecto de las rocas sobre algunas características químicas del suelo: pH, biodisponibilidad y fijación de fósforo

a. pH

La aplicación de polvo de roca a suelos cuyo pH fluctúa de ácido a moderadamente ácido, mostró ser agronómicamente efectiva en relación al incremento de esta propiedad del suelo (Gillman, 1980; Coroneos *et al.*, 1996; Hinsinger *et al.*, 1996). Las rocas utilizadas como fertilizantes en esta investigación tienen valores de pH entre 8.33 y 9.50 (Tabla 8). Por lo tanto, su aplicación al suelo ácido de la región de Huatusco tuvo un efecto positivo al elevar el pH del mismo.

La eficacia de la adición de las rocas molidas en la mejora de la acidez del suelo, estimada por las mediciones del pH, se resume en la Tabla 23. En todos los tratamientos se observó un aumento en esta característica del suelo. Este incremento llegó hasta un valor de 6.8 en algunos tratamientos. Los tratamientos en los que se obtuvo una mejor respuesta en cuanto al ascenso del pH del suelo, fueron aquellos que contenían a la mayoría de las rocas estudiadas. Esto se debe al importante aporte de minerales contenedores de Ca como calcitas, plagioclasas y piroxenos.

Respecto a las bases intercambiables, se puede suponer un incremento de éstas en todos los tratamientos, pues si el valor de pH del suelo se elevó con la aplicación de las rocas, el complejo de cambio debió estar más saturado con iones de Ca^{++} y Mg^{++} , que con H^+ (que se transforma en H_2O) y Al^{3+} (que precipita).

b. Biodisponibilidad y fijación de fósforo

El contenido de P disponible en el suelo bajo los distintos tratamientos fue muy bajo, lo que concuerda muy bien con el alto porcentaje de fijación de P observado, sin excepción alguna, en todos los tratamientos. La baja concentración de P en la solución del suelo como consecuencia de la alta fijación de P, aún podría limitar el crecimiento de las plantas, porque la mayor parte del P que logra disolverse de la roca es inmediatamente sometida a una reacción de adsorción e inmovilización, y sólo una pequeña fracción del elemento llega a estar en forma disponible para las plantas (Mahimairaja *et al.*, 1995).

El método analítico utilizado para determinar el P disponible en el suelo, fue el propuesto por Bray-Kurtz (1992), que se basa en una extracción con HCl. En general, este método se ha considerado más adecuado para suelos ácidos, ya que en suelos alcalinos, el ácido añadido es rápidamente neutralizado por CaCO_3 , perdiendo así su fuerza extractora (Shimada, 2000). Debido a esto, es de suponerse que en los tratamientos en los que se aplicó la roca caliza al suelo, se obtuvo una cantidad de P disponible significativamente menor, en comparación con el tratamiento en el que no se aplicó ninguna roca, como consecuencia de una mayor concentración de Ca en el suelo, causando una baja biodisponibilidad de P.

No hubo ningún efecto significativo o alguna variación de interés para el agricultor, en cuanto al efecto de la aplicación de las rocas al suelo para incrementar la cantidad de P disponible o reducir el P fijado, lo que significa que sigue existiendo una deficiencia de este elemento en forma disponible para las plantas, y este factor tan importante podría seguir limitando el crecimiento adecuado de ellas.

3.2.4 Efecto de las rocas sobre el Fe, Zn, Cu y Mn extraíbles con DTPA

Haciendo una comparación de las concentraciones de Fe, Zn, Cu y Mn extraíbles con DTPA entre la muestra recolectada y analizada del suelo al inicio del trabajo experimental (Tabla 6), y después de haberlo sometido a un tratamiento de fertilización con polvos de roca en invernadero (Tabla 26), se aprecia que las concentraciones de estos elementos aumentaron significativamente. Los tratamientos de fertilización influyeron en este incremento de la concentración de micronutrientes biodisponibles extraídos del suelo con DTPA.

Dicho aumento en el contenido de micronutrientes disponibles para las plantas, también se relaciona con los exudados de las raíces de las plantas. Estudios realizados sobre el intemperismo experimental de un basalto conteniendo esencialmente Fe dentro de los minerales primarios (olivinos y piroxenos), Fernandes y Hinsinger (1994), mostraron que sólo cantidades menores de Fe eran liberadas en la solución de lixiviación en ausencia de plantas, debido a la baja solubilidad de los minerales contenedores de Fe en condiciones de oxidación. Por el contrario, en presencia de las plantas, los autores reportaron cantidades considerables de Fe liberado por el basalto, y tomado por las plántulas de varias especies

estudiadas y, sobre todo, por el maíz. Es probable que la movilización de Fe a partir de los minerales primarios contenidos en el basalto, tenga relación con fitosideróforos excretados por estas especies de gramíneas. Estos resultados sugieren, que además de ser de primordial importancia para la nutrición de las plantas, los exudados de las raíces así como los fitosideróforos, pueden jugar un papel importante en la meteorización de minerales y en la pedogénesis (Fernandes y Hinsinger, 1994).

a. Estatus del hierro

La concentración de Fe en el tratamiento testigo fue de 26.6 mg kg^{-1} , y para aquellos tratamientos en los que se aplicó polvo de roca, este elemento varió de 23 a 33.8 mg kg^{-1} (Tabla 26). Los resultados mostraron que, aparentemente, los contenidos de Fe extraíble en el suelo estudiado en este trabajo, son suficientemente altos para satisfacer los requerimientos nutrimentales del pasto y de muchos otros cultivos (Tabla 7), por lo que las posibilidades de encontrar deficiencia de este elemento son muy escasas.

No existe una buena correlación entre la influencia de la aplicación de las rocas al suelo y el contenido de Fe disponible para las plantas, ya que para algunos tratamientos hubo un aumento en la concentración de Fe extraíble con DTPA y, para algunos otros, hubo un decremento. Sin embargo, dichas variaciones parecen no afectar, pues las concentraciones de este elemento en el suelo continuaron siendo muy altas.

b. Estatus del zinc

La concentración de Zn en el tratamiento testigo (Tabla 26) fue de 0.228 mg kg^{-1} (nivel deficiente) y, para aquellos tratamientos en los que se aplicó polvo de roca este elemento fluctuó entre 0.416 y 0.514 mg kg^{-1} , clasificándose dentro de los niveles deficiente y marginal (Tabla 7).

En este grupo de tratamientos en los que sí se aplicó polvo de roca al suelo, se presentaron las concentraciones más altas de Zn extraíble, debido a los procesos de formación de complejos inorgánicos solubles cuando aumenta el pH, además de las cantidades de Zn liberadas por las rocas volcánicas.

Molina y Bornemisza (2006), establecieron un nivel crítico de 1 mg kg^{-1} de Zn extraíble con DTPA en Andosoles de Costa Rica. En la Tabla 27 se muestran algunos otros niveles críticos de Zn extraíble con DTPA para diversos tipos de cultivos mencionados por Molina y Bornemisza (2006).

Tabla 27. Niveles críticos de Zn extraíble con DTPA (Molina y Bornemisza, 2006).

Cultivo	Nivel crítico (mg kg^{-1})	Referencia
Sorgo	0.5	Lindsay y Norvell, 1978
Arroz	0.86	Singh y Takkar, 1981
Maíz	0.7	Havlin y Soltanpour, 1981
Sorgo	0.5	Brown <i>et al.</i> , 1971
Café	2.1	Lima y Malavolta, 1998

Esto significa que al aplicar el polvo de roca al suelo se puede elevar el contenido de Zn disponible para las plantas, hasta llevarlo muy cerca o por encima del nivel crítico para algunos cultivos.

c. Estatus del cobre y del manganeso

Cabalceta y Molina (2006), reportaron un nivel crítico para Cu y Mn disponibles utilizando como extractante el denominado Mehlich 3, método que genera resultados con alta correlación con los obtenidos en Andosoles utilizando como extractante DTPA, que en este estudio los valores medios obtenidos fueron de 0.4 y de 4 mg kg^{-1} , respectivamente (Tabla 28).

Tabla 28. Niveles críticos de Cu y Mn extraíbles con la solución extractora Mehlich 3 en Andosoles (Cabalceta y Molina, 2006).

Nutrimiento	Deficiente	Nivel crítico (mg kg^{-1} extraíble del suelo)	Suficiente	Alto
Cu	< 0.2	0.4	1-5	> 5
Mn	< 2	4	4-10	> 10

Los resultados mostraron que, aparentemente, los contenidos de Cu (0.34 mg kg^{-1}) y Mn (25.1 mg kg^{-1}) extraíbles en el suelo estudiado en este trabajo (Tabla 6), son suficientemente altos para satisfacer los requerimientos del pasto y de muchos otros

cultivos, por lo que las posibilidades de encontrar deficiencia de estos dos elementos son muy escasas.

Evidentemente, hay un aumento significativo en la concentración de Cu disponible para las plantas, alcanzando valores de 0.54 a 0.79 mg kg⁻¹ (Tabla 26), que están relacionados directamente con la aplicación del polvo de roca al suelo. En relación al Mn, no existe tal correlación, ya que con algunos tratamientos, hubo un aumento en la concentración de Mn extraíble con DTPA y, para algunos otros, hubo un decremento (Tabla 26), lo cual se puede deber a que es un elemento cuya solubilidad depende no solamente del pH, sino del pE, ya que, el elemento se oxida y reduce fácilmente. Sin embargo, dichas variaciones parecen no afectar, pues las concentraciones de este elemento en el suelo continuaron siendo muy altas.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las características físicas y químicas del suelo estudiado en este trabajo, además de las condiciones ambientales en la región de Huatusco, son favorables para el desarrollo de los diversos cultivos, exceptuando dos restricciones muy importantes como son la acidez del suelo, y la deficiencia y alta fijación de fósforo.

El empleo de polvo de diferentes rocas disponibles localmente en Huatusco a manera de fertilizante para la mejora de las condiciones de este suelo ha sido positivo, ya que se disminuye la acidez y se aumenta la productividad del suelo. Desafortunadamente, no se logró observar un aumento en la disponibilidad de fósforo para las plantas, pero es posible que, utilizando otros métodos complementarios que no utilicen ácido clorhídrico, y estudiando en forma específica la química de este elemento, se pueda llegar a observar un aumento de este elemento, como podría esperarse por el aumento de pH.

Sin lugar a dudas, la roca caliza es de suma importancia para elevar el pH del suelo, pero las rocas volcánicas también ejercieron un importante trabajo en el incremento de este parámetro del suelo. Además, es importante destacar que estas rocas volcánicas contienen minerales que, a su vez, contienen nutrimentos esenciales para las plantas. No es posible señalar con absoluta claridad qué roca o combinación de rocas, fue o fueron más eficaces para obtener una alta productividad del suelo, pero sí es posible destacar que todos los materiales empleados, sólo o mezclados, incrementaron el rendimiento del cultivo, y cuando se agregó la combinación de todas las rocas al suelo se obtuvo el mayor rendimiento de forraje, y se elevó el pH del suelo casi a la neutralidad.

Por lo tanto, se corrobora la hipótesis planteada al inicio de este trabajo, la cual señala que al emplear diferentes rocas como fertilizantes, se obtendría un efecto benéfico en la productividad y en algunas propiedades químicas del Andosol.

Para fines prácticos y de interés para el agricultor, es necesario realizar un mayor número de pruebas con la aplicación de las rocas empleadas en este trabajo, llevándolas a nivel de

campo, y utilizando las plantas que acostumbra cultivar el agricultor de la región de Huatusco. Además, resulta sumamente necesario realizar estudios de costo-beneficio, teniendo en cuenta factores como la cercanía de cada banco de material, las posibilidades de poder explotarlo, el consumo de energía que implica la extracción y transporte del material al lugar de su aplicación, la molienda de la roca, etc., etc.

También, es importante y recomendable, además de hacer un seguimiento de parcelas experimentales por períodos mayores a 2 años, mantener la colaboración entre científicos del suelo, geocientíficos y agricultores de la zona, para realizar las elecciones apropiadas de los recursos geológicos y realizar una buena aplicación de los mismos, para lograr un objetivo en común y aumentar la fertilidad del suelo de una manera más sostenible.

BIBLIOGRAFÍA

- Bernard D., Knezek and Boyd G. 1980. Essential Micronutrients IV: Copper, Iron, Manganese, and Zinc. In: Davies B. (Ed). Applied Soil Trace Elements. Cap. 8, p. 259-282.
- Blakemore L., Searle P., and Daly B. 1981. Methods for Chemical Analysis of Soils. Soil Bureau, Scientific Report 10 A, Department of Scientific and Industrial Research, New Zealand, Lower Hutt, A 5.9.
- Bolland M. and Baker M. 2000. Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 56: 59-68.
- Burt R. (Ed) 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigation Report No. 42 Version 4.0 November 2004. USDA-RRCS. Lincoln, Nebraska, USA, p. 213-215.
- Cabalceta G. y Molina E. 2006. Niveles críticos de nutrimentos en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. Agronomía Costarricense, 30(2): 31-44.
- Chapman H. 1965. Cation-Exchange Capacity by Sodium Saturation. In: Black C. (Ed) 1965. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, p. 899-900.
- Cottenie A. 1980. Los análisis de suelos y plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. Boletín de suelos de la FAO 38/2. FAO, Roma, Italia.
- D'Hotman de Villiers O. 1961. Soil rejuvenation with crushed basalt in Mauritius. International Sugar Journal, 63: 363-364.
- Etchevers B., Espinoza G. y Riquelme E. 1971. Manual de fertilidad y fertilizantes, segunda edición. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía Chillan, Chile.
- Evans, H. 1947. 18th Annual Report. Mauritius Sugar Industry Research Station Report, p. 42-48.
- Fassbender W. y Bornemisza E. 1987. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA, San José, Costa Rica.
- Feillafe, S. 1950. 21st Annual Report. Mauritius Sugar Industry Research Station Report, p. 25-28.

- Fernandes B. and Hinsinger P. 1994. Basalt weathering as induced by the roots of higher plants. In: "Proc. 15th ISSS Cong", Acapulco.
- Ferrari L., Rosas J., Orozco M., Carrasco G. and Norato T. 2005. Digital geologic cartography of the Trans-Mexican Volcanic Belt and adjoining areas: Digital Geosciences, UNAM. Fecha de consulta: septiembre de 2010 en: http://satori.geociencias.unam.mx/digital_geosciences.
- Flint A. and Flint L. 2002. Particle Density. In: Dane J. and Topp G. (Eds). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA Book Series No. 5. Madison, Wis., USA, p. 229-240.
- Flint L. and Flint A. 2002. Porosity. In: Dane J. and Topp G. (Eds). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA Book Series No. 5. Madison, Wis., USA, p. 241-243.
- Fyfe W., Kronberg B., Leonardos O. and Olorufemi N. 1983. Global tectonics and agriculture: a geochemical perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 9: 383-399.
- Gardner W. 1965. Humedad gravimétrica. In: Black C. (Ed). Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, Including Statistics of Measurement and Sampling, p. 82-96.
- Gee G. and Or D. 2002. Particle-Size Analysis. In: Dane J. and Topp G. (Eds). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA Book Series No. 5. Madison, Wis., USA, p. 255-278.
- Geissert D. e Ibáñez A. 2008. Calidad y ambiente físico-químico de los suelos. In: Manson R., Hernández O., Gallina S., Mehlreter K. (Eds). Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz. Biodiversidad, Manejo y Conservación. México. Capítulo 15.
- Gillman G. 1980. The effect of crushed basalt scoria on the cation exchange properties of a highly weathered soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 465-468.
- Gillman G., Burkett D., and Coventry R. 2000. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effects ion soil cation chemistry. *Australian Journal of Soil Research*, 39: 799-811.
- Gillman G., Burkett D., and Coventry R. 2002. Amending highly weathered soils with finely ground basalt rock. *Applied Geochemistry*, 17: 987-1001.

- Grossman R. and Reinsch T. 2002. Bulk Density. In: Dane J. y Topp G. (Eds). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA Book Series No. 5. Madison, Wis., USA, p. 201-228.
- Harley A. and Gilkes R. 2000. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 56: 11-36.
- Heald W. 1965. Exchangeable Calcium and Magnesium. In: Black C. (Ed). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, p. 999-1010.
- Hensel J. 1890. Das Leben. Verlag Boericke und Tafel. Leipzig, Germany.
- Hensel J. 1894. Bread from stones. TAFEL AJ (Ed). Philadelphia, USA.
- Hildebrand E. and Schack-Kirchner H. 2000. Initial effects of lime and rock powder application on soil solution chemistry in a dystric cambisol – results of model experiments. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 56: 69-78.
- Huettl R. and Zoetl H. 1993. Liming as a mitigation tool in Germany's declining forests – reviewing results from former and recent trials. Water Air Soil Pollution, 61: 325-338.
- INEGI. 1981. Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas E14-3, 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INEGI. 1981. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales E14-3, 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INEGI. 1999. Carta topográfica E14B47, 1:50000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- Kim T., Jung W., Lee B., Yoneyama T., Kim H. and Kim K. 2003. P effects on N uptake and remobilization during regrowth of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*). Environmental and Experimental Botany, 50: 233-242.
- Klute A. and Dirksen C. 1986. Conductividad hidráulica en suelos saturados. Método de flujo constante. In: Klute A. (Ed). Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Segunda Edición. Agronomy 9. ASA y SSSA. Madison, Wis., USA, p. 694-700.

- Le Bas M., Le Maitre R., Streckeisen A. and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745-750.
- Leonardos O., Fyfe W., and Kronberg B. 1987. The use of ground rocks in laterite systems: an improvement to the use of conventional soluble fertilizers? *Chemical Geology*, 60: 361-370.
- Lindsay W. and Norvell W. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42: 421-428.
- Mahimairaja S., Bolan N., Hedley M. 1995. Dissolution of phosphate rock during the composting of poultry manure: an incubation experiment. *Fert. Res.*, 40: 93-104.
- Missoux M. 1853/54. Sur l'emploi de la poudre des roches granitiques comme excitant de la végétation. *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris. T 36*: p. 1136; t 37: p. 245.
- Molina E. y Bornemisza E. 2006. Nivel crítico de Zinc en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 30(2): 45-59.
- Moreno D. 1978. Clasificación de pH del suelo, contenido de sales y nutrimentos. INIA-SARH, México, D.F.
- Pratt P. 1965. Exchangeable Potassium and Sodium. In: Black C. (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, p. 1022-1034.
- Sánchez P. 2002. Soil fertility and hunger in Africa. *Science*, 295: 2019-2020.
- Sánchez P., Shepherd K., Soule M., Place F., Buresh R., Izac A., Mkwunye A., Kwesiga F., Ndiritu C., and Woome P. 1997. Soil fertility replenishment in Africa: an investment in natural resource capital. In: Buresh R., Sánchez P., and Calhoun F. (Eds). *Replenishing soil fertility in Africa. SSSA Spec. Publ.*, 51: 1-46.
- SEMARNAT 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-RECNAT-2000. *Diario Oficial de la Federación*, 31 de diciembre 2002. Segunda sección, p. 1-75.
- SEMARNAT 2007. Norma Oficial Mexicana NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004. *Diario Oficial de la Federación*, 2 de marzo 2007. Segunda sección, p. 31-34.
- Shimada K. 2000. Determinación de fósforo disponible (método de Bray-Kurtz), usando ácido ascórbico como reductor. Procedimiento estandarizado, clave: MET-020. Laboratorio de Edafología Ambiental, Instituto de Geología, UNAM. México. 5 p.

- Shoji S., Nanzyo M., and Dahlgren R. 1993. Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21. Elsevier Science Publ. The Netherlands. 288 p.
- SICS-ISRIC-FAO. 1999. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Informe sobre Recursos Mundiales de Suelo No. 84. Roma. 90 p.
- Tan K. 2005. *Soil Sampling, Preparation, and Analysis*. 2nd ed. University of Georgia Greensboro, Georgia, U.S.A. Taylor & Francis Group, p. 143-145.
- Theodoro S. and Leonardos O. 2006. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* 78(4): 721-730.
- Theodoro S., Leonardos O., Kleysson G., and Rocha E. 2010. Stonemeal Technology: Changing the Poverty Scenario in Brazil. Fecha de consuta: septiembre 2010 en www.remineralize.org
- Van Reeuwijk L. (Ed). 1992. *Procedures for Soil Analysis*. Technical paper. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands, p. 11-1, 11-2, 14-2.
- Van Straaten P. 2006. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* 78(4): 731-747.
- Von Wilpert K. and Lukes M. 2003. Ecochemical effects of phonolite rock powder, dolomite and potassium sulphate in a spruce stand on an acidified glacial loam. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 65: 115-127.
- Walkley and Black. 1946. Organic Carbon. Walkley-Black Method. In: Sparks D. (Ed). 1996. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA Book Series No. 5. Madison, Wis., USA, p. 995-996.
- Welch R. 1995. Micronutrients Nutrition In Plants. *Crit. Rev. Plant Sci.*, 14: 49-82.
- Wong You Cheong Y. and Halais P. 1970. Needs of sugarcane for silicon when growing in highly weathered latosols. *Experimental Agriculture*, 6: 99-106.

APÉNDICE

Cuadro 1. Características químicas del suelo posteriores al experimento en invernadero.
P = Fósforo disponible; Fijación P = Fijación de fósforo.

Tratamiento	pH	P (mg kg ⁻¹)	Fijación P (%)
1	5.88	0.70	98.85
2	6.53	0.49	98.89
3	6.53	0.56	98.95
4	6.58	0.62	98.77
5	6.56	0.21	99.39
6	6.65	0.32	100
7	6.64	0.25	100
8	6.70	0.14	100
9	6.70	0.40	100
10	6.74	0.52	99.50
11	6.80	0.61	99.84
12	6.72	0.47	99.99
13	6.75	0.51	99.76
14	6.78	0.46	99.58
15	6.80	0.30	100
16	6.84	0.20	100
17	6.80	0.16	100

Cuadro 2. Variables evaluadas en experimento de invernadero.

Tratamiento	Variable evaluada											
	Forraje fresco				Forraje seco				Área foliar			
	1er corte	2° corte	3er corte	4° corte	1er corte	2° corte	3er corte	4° corte	1er corte	2° corte	3er corte	4° corte
	ton ha ⁻¹								cm ²			
1	4.59	2.11	1.57	1.4	1.04	0.428	0.326	0.274	290	271	232	154
2	5.38	3.19	2.29	1.69	1.16	0.626	0.496	0.352	333	392	307	192
3	5.73	3.51	2.2	1.6	1.24	0.712	0.474	0.331	313	421	328	189
4	4.7	3.15	2.41	1.63	0.995	0.619	0.535	0.343	314	384	364	195
5	4.24	3.2	2.55	1.89	0.929	0.621	0.543	0.385	255	363	309	211
6	4.77	3.61	2.65	1.88	1.09	0.685	0.545	0.369	270	467	386	212
7	4.96	3.49	2.58	1.8	1.03	0.66	0.533	0.358	313	423	344	196
8	5.14	3.36	2.56	1.88	1.11	0.642	0.543	0.392	313	423	358	248
9	5.91	3.62	2.43	1.58	1.2	0.698	0.526	0.329	313	408	320	199
10	5.33	3.54	2.48	1.76	1.05	0.691	0.521	0.37	298	413	361	219
11	4.63	4	2.79	1.87	0.972	0.776	0.588	0.396	303	522	418	219
12	5.55	3.4	2.41	1.63	1.14	0.685	0.529	0.356	350	450	342	192
13	5.56	2.89	2.35	1.73	1.23	0.562	0.506	0.35	358	410	377	202
14	6.02	3.05	2.22	1.86	1.37	0.597	0.469	0.373	323	402	334	229
15	4.56	3.26	2.41	1.83	1.02	0.662	0.502	0.361	332	436	376	192
16	5.84	3.32	2.43	1.63	1.32	0.65	0.523	0.335	359	438	373	193
17	6.01	3.59	2.48	1.7	1.31	0.72	0.554	0.356	336	453	367	222

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple

Rendimiento de forraje fresco

Primer corte

Cuadro 3. ANOVA para el primer corte

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	16.0	16	1.0	1.17	0.3373	N.S.
Dentro del grupo	29.1	34	0.855			
Total (Corr.)	45.1	50				

$\bar{X} = 5.23$ C.V. = 18.2 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje fresco para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 1.17, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es mayor o igual a 0.01, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 4. Prueba de Rango Múltiple para el Primer corte

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
5	3	4.24	X
15	3	4.56	X
1	3	4.59	X
11	3	4.63	X
4	3	4.7	X
6	3	4.77	X
7	3	4.96	X
8	3	5.14	X
10	3	5.33	X
2	3	5.38	X
12	3	5.55	X
13	3	5.56	X
3	3	5.73	X
16	3	5.84	X
9	3	5.91	X
17	3	6.01	X
14	3	6.02	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias a un nivel de confianza del 99.0%. En la tabla, un grupo homogéneo ha sido identificado por una columna de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Segundo corte

Cuadro 5. ANOVA para el segundo corte

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	7.85	16	0.491	4.83	0.0001	**
Dentro del grupo	3.45	34	0.102			
Total (Corr.)	11.3	50				

$\bar{X} = 3.31$ C.V. = 14.4 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje fresco para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 4.83, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 6. Prueba de Rango Múltiple para el segundo corte

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
1	3	2.11	X
13	3	2.89	X
14	3	3.05	XX
4	3	3.15	XX
2	3	3.19	XX
5	3	3.2	XX
15	3	3.26	XX
16	3	3.32	XXX
8	3	3.36	XXX
12	3	3.4	XXX
7	3	3.49	XXX
3	3	3.51	XXX
10	3	3.54	XXX
17	3	3.59	XXX
6	3	3.61	XX
9	3	3.62	XX
11	3	4.0	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 4 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Tercer corte

Cuadro 7. ANOVA para el tercer corte

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	3.23	16	0.202	2.52	0.0116	*
Dentro del grupo	2.73	34	0.0802			
Total (Corr.)	5.96	50				

$\bar{X} = 2.4$ C.V. = 14.4 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje fresco para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 2.52, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.05, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 95.0%.

Cuadro 8. Prueba de Rango Múltiple para el tercer corte

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
1	3	1.57	X
3	3	2.2	XX
14	3	2.22	X
2	3	2.29	X
13	3	2.35	X
15	3	2.41	X
4	3	2.41	X
12	3	2.41	X
9	3	2.43	X
16	3	2.43	X
17	3	2.48	X
10	3	2.48	X
5	3	2.55	X
8	3	2.56	X
7	3	2.58	X
6	3	2.65	X
11	3	2.79	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 2 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Cuarto corte

Cuadro 9. ANOVA para el cuarto corte

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	0.911	16	0.0569	0.80	0.6803	N.S.
Dentro del grupo	2.43	34	0.0715			
Total (Corr.)	3.34	50				
$\bar{X} = 1.73$ C.V. = 15.0 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje fresco para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 0.80, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es mayor o igual a 0.01, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 10. Prueba de Rango Múltiple para el cuarto corte

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
1	3	1.4	X
9	3	1.58	X
3	3	1.6	X
16	3	1.63	X
4	3	1.63	X
12	3	1.63	X
2	3	1.69	X
17	3	1.7	X
13	3	1.73	X
10	3	1.76	X
7	3	1.8	X
15	3	1.83	X
14	3	1.86	X
11	3	1.87	X
8	3	1.88	X
6	3	1.88	X
5	3	1.89	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias a un nivel de confianza del 99.0%. En la tabla, un grupo homogéneo ha sido identificado por una columna de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Sumatoria de 4 cortes

Cuadro 11. ANOVA para la sumatoria de 4 cortes

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	42.4	16	2.65	2.36	0.0177	*
Dentro del grupo	38.3	34	1.13			
Total (Corr.)	80.7	50				
$\bar{X} = 12.7$ C.V. = 10.0 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje fresco para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 2.36, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.05, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 95.0%.

Cuadro 12. Prueba de Rango Múltiple para la sumatoria de 4 cortes

Método: 99.0 % LSD

<i>Tratamiento</i>	<i>Conteo</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1	3	9.67	X
5	3	11.9	XX
4	3	11.9	XX
15	3	12.1	X
13	3	12.5	X
2	3	12.5	X
7	3	12.8	X
6	3	12.9	X
8	3	12.9	X
12	3	13.0	X
3	3	13.0	X
10	3	13.1	X
14	3	13.2	X
16	3	13.2	X
11	3	13.3	X
9	3	13.5	X
17	3	13.8	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 2 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

* Significativo al .05

** Significativo al .01

N.S. No significativo

 \bar{X} Media

C.V. Coeficiente de variación

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple**Rendimiento de forraje seco****Primer corte****Cuadro 13. ANOVA para el primer corte**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Media al cuadrado</i>	<i>F-Radio</i>	<i>P-Valor</i>	
Entre grupos	0.825	16	0.0516	1.44	0.1822	N.S.
Dentro del grupo	1.22	34	0.0359			
Total (Corr.)	2.05	50				
$\bar{X} = 1.13$ C.V. = 17.9 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje húmedo para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 1.44, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es mayor o igual a 0.01, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 14. Prueba de Rango Múltiple para el primer corte

Método: 99.0 % LSD

<i>Tratamiento</i>	<i>Conteo</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
5	3	0.929	X
11	3	0.972	XX
4	3	0.995	XX
15	3	1.02	XX
7	3	1.03	XX
1	3	1.04	XX
10	3	1.05	XX
6	3	1.09	XX
8	3	1.11	XX
12	3	1.14	XX
2	3	1.16	XX
9	3	1.2	XX
13	3	1.23	XX
3	3	1.24	XX
17	3	1.31	XX
16	3	1.32	XX
14	3	1.37	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 2 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Segundo corte

Cuadro 15. ANOVA para el segundo corte

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Media al cuadrado</i>	<i>F-Radio</i>	<i>P-Valor</i>	
Entre grupos	0.281	16	0.0175	4.89	0.0001	**
Dentro del grupo	0.122	34	0.00359			
Total (Corr.)	0.403	50				

 $\bar{X} = 0.649$ C.V. = 13.8 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje húmedo para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 4.89, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 16. Prueba de Rango Múltiple para el segundo corte

Método: 99.0 % LSD

<i>Tratamiento</i>	<i>Conteo</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1	3	0.428	X
13	3	0.562	X
14	3	0.597	XX
4	3	0.619	XX
5	3	0.621	XX
2	3	0.626	XX
8	3	0.642	XX
16	3	0.65	XXX
7	3	0.66	XXX
15	3	0.662	XXX
6	3	0.685	XXX
12	3	0.685	XXX
10	3	0.691	XXX
9	3	0.698	XX

3	3	0.712	XX
17	3	0.72	XX
11	3	0.776	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 4 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Tercer corte

Cuadro 17. ANOVA para el tercer corte

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	0.151	16	0.00946	2.61	0.0092	**
Dentro del grupo	0.123	34	0.00363			
Total (Corr.)	0.275	50				

$\bar{X} = 0.512$ C.V. = 14.5 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje húmedo para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 2.61, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 18. Prueba de Rango Múltiple para el tercer corte

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
1	3	0.326	X
14	3	0.469	X
3	3	0.474	X
2	3	0.496	X
15	3	0.502	X
13	3	0.506	X
10	3	0.521	X
16	3	0.523	X
9	3	0.526	X
12	3	0.529	X
7	3	0.533	X
4	3	0.535	X
5	3	0.543	X
8	3	0.543	X
6	3	0.545	X
17	3	0.554	X
11	3	0.588	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 2 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Cuarto corte

Cuadro 19. ANOVA para el cuarto corte

Fuente	Suma de	Df	Media al	F-Radio	P-Valor	
--------	---------	----	----------	---------	---------	--

	<i>cuadrados</i>		<i>cuadrado</i>			
Entre grupos	0.0396	16	0.00248	1.63	0.1146	N.S.
Dentro del grupo	0.0518	34	0.00152			
Total (Corr.)	0.0914	50				

$\bar{X} = 0.355$ C.V. = 12.1 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje húmedo para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 1.63, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es mayor o igual a 0.01, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 20. Prueba de Rango Múltiple para el cuarto corte

Método: 99.0 % LSD

<i>Tratamiento</i>	<i>Conteo</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1	3	0.274	X
9	3	0.329	XX
3	3	0.331	XX
16	3	0.335	XX
4	3	0.343	XX
13	3	0.35	XX
2	3	0.352	XX
17	3	0.356	XX
12	3	0.356	XX
7	3	0.358	XX
15	3	0.361	X
6	3	0.369	X
10	3	0.37	X
14	3	0.373	X
5	3	0.385	X
8	3	0.392	X
11	3	0.396	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 2 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Sumatoria de 4 cortes

Cuadro 21. ANOVA para la sumatoria de 4 cortes

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Media al cuadrado</i>	<i>F-Radio</i>	<i>P-Valor</i>	
Entre grupos	1.75	16	0.109	2.19	0.0269	*
Dentro del grupo	1.69	34	0.0498			
Total (Corr.)	3.44	50				

$\bar{X} = 2.65$ C.V. = 9.91 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje húmedo para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 2.19, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.05, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 95.0%.

Cuadro 22. Prueba de Rango Múltiple para la sumatoria de 4 cortes

Método: 99.0 % LSD

<i>Tratamiento</i>	<i>Conteo</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1	3	2.07	X
5	3	2.48	XX
4	3	2.49	XX

15	3	2.55	XX
7	3	2.58	X
2	3	2.63	X
10	3	2.63	X
13	3	2.65	X
8	3	2.69	X
6	3	2.69	X
12	3	2.71	X
11	3	2.73	X
3	3	2.75	X
9	3	2.75	X
14	3	2.81	X
16	3	2.83	X
17	3	2.94	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 2 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

* Significativo al .05

** Significativo al .01

N.S. No significativo

\bar{X} Media

C.V. Coeficiente de variación

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple

Área foliar

Primer corte

Cuadro 23. ANOVA para el primer corte

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	3.85E4	16	2.41E3	1.34	0.2313	N.S.
Dentro del grupo	6.12E4	34	1.8E3			
Total (Corr.)	9.97E4	50				
$\bar{X} = 316$ C.V. = 14.1 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje húmedo para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 1.34, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es mayor o igual a 0.01, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 24. Prueba de Rango Múltiple para el primer corte

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
5	3	255.	X
6	3	270.	XX
1	3	290.	XX

10	3	298.	XX
11	3	303.	XX
9	3	313.	XX
3	3	313.	XX
8	3	313.	XX
7	3	313.	XX
4	3	314.	XX
14	3	323.	XX
15	3	332.	XX
2	3	333.	XX
17	3	336.	XX
12	3	350.	X
13	3	358.	X
16	3	359.	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 2 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Segundo corte

Cuadro 25. ANOVA para el segundo corte

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	1.3E5	16	8.09E3	6.40	0.0000	**
Dentro del grupo	4.3E4	34	1.26E3			
Total (Corr.)	1.72E5	50				
$\bar{X} = 416$ C.V. = 14.1 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje húmedo para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 6.40, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 26. Prueba de Rango Múltiple para el segundo corte

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
1	3	271.	X
5	3	363.	X
4	3	384.	XX
2	3	392.	XXX
14	3	402.	XXX
9	3	408.	XXX
13	3	410.	XXX
10	3	413.	XXX
3	3	421.	XXX
7	3	423.	XXX
8	3	423.	XXX
15	3	436.	XXX
16	3	438.	XXX
12	3	450.	XXX
17	3	453.	XXX
6	3	467.	XX
11	3	522.	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 5 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar

entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Tercer corte

Cuadro 27. ANOVA para el tercer corte

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	8.27E4	16	5.17E3	4.51	0.0001	**
Dentro del grupo	3.9E4	34	1.15E3			
Total (Corr.)	1.22E5	50				
$\bar{X} = 347$ C.V. = 14.2 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje húmedo para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 4.51, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 28. Prueba de Rango Múltiple para el tercer corte

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
1	3	232.	X
2	3	307.	XX
5	3	309.	X
9	3	320.	XX
3	3	328.	XX
14	3	334.	XX
12	3	342.	XX
7	3	344.	XXX
8	3	358.	XXX
10	3	361.	XXX
4	3	364.	XXX
17	3	367.	XXX
16	3	373.	XXX
15	3	376.	XXX
13	3	377.	XXX
6	3	386.	XX
11	3	418.	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 4 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Cuarto corte

Cuadro 29. ANOVA para el cuarto corte

Fuente	Suma cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	2.03E4	16	1.27E3	0.86	0.6160	N.S.
Dentro del grupo	5.02E4	34	1.48E3			
Total (Corr.)	7.04E4	50				
$\bar{X} = 204$ C.V. = 18.4 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de rendimiento de forraje húmedo para el primer corte en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 0.86, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es mayor o igual a 0.01, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 30. Prueba de Rango Múltiple para el cuarto corte

Método: 99.0 % LSD

<i>Tratamiento</i>	<i>Conteo</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1	3	154.	X
3	3	189.	XX
12	3	192.	XX
15	3	192.	XX
16	3	193.	XX
2	3	193.	XX
4	3	195.	XX
7	3	196.	XX
9	3	199.	XX
13	3	202.	XX
5	3	211.	XX
6	3	212.	XX
11	3	219.	XX
10	3	219.	XX
17	3	222.	XX
14	3	229.	XX
8	3	248.	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 2 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

* Significativo al .05

** Significativo al .01

N.S. No significativo

 \bar{X} Media

C.V. Coeficiente de variación

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple**pH****Cuadro 31. ANOVA para el pH**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Media al cuadrado</i>	<i>F-Radio</i>	<i>P-Valor</i>	
Entre grupos	2.35	16	0.147	53.18	0.0000	**
Dentro del grupo	0.094	34	0.00277			
Total (Corr.)	2.45	50				

$\bar{X} = 6.65$ C.V. = 3.33 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de pH en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 53.18, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 32. Prueba de Rango Múltiple para el pH

Método: 99.0 % LSD

<i>Tratamiento</i>	<i>Conteo</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
--------------------	---------------	--------------	--------------------------

1	3	5.88	X
2	3	6.53	X
3	3	6.53	XX
5	3	6.56	XX
4	3	6.58	XXX
7	3	6.64	XXXX
6	3	6.65	XXX
8	3	6.7	XXX
9	3	6.7	XXX
12	3	6.71	XX
10	3	6.74	XXX
13	3	6.75	XXX
14	3	6.78	XX
15	3	6.79	XX
11	3	6.8	XX
17	3	6.8	XX
16	3	6.84	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 7 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple

Fósforo disponible

Cuadro 33. ANOVA para el P disponible

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	1.48	16	0.0922	4.85	0.0001	**
Dentro del grupo	0.647	34	0.019			
Total (Corr.)	2.12	50				

$\bar{X} = 0.406$ C.V. = 50.8 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de P disponible en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 4.85, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 34. Prueba de Rango Múltiple para el P disponible

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
8	3	0.14	X
17	3	0.155	X
16	3	0.203	XX
5	3	0.21	XX
7	3	0.245	XXX
15	3	0.297	XXXX
6	3	0.315	XXXXX
9	3	0.398	XXXXXX
14	3	0.463	XXXXXX
12	3	0.472	XXXXXX
2	3	0.49	XXXXXX
13	3	0.507	XXXXXX
10	3	0.518	XXXX
3	3	0.56	XXX
11	3	0.605	XX

4	3	0.618	XX
1	3	0.7	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 6 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple

Porcentaje de retención de fósforo

Cuadro 35. ANOVA para % de retención de P

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Ratio	P-Valor	
Entre grupos	11.1	16	0.695	5.38	0.0000	**
Dentro del grupo	4.39	34	0.129			
Total (Corr.)	15.5	50				

$\bar{X} = 99.6$ C.V. = 0.559 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de % de retención de P en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 5.38, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 36. Prueba de Rango Múltiple para % de retención de P

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
4	3	98.8	X
1	3	98.8	XX
2	3	98.9	XX
3	3	99.0	XX
10	3	99.3	XXX
5	3	99.3	XXX
14	3	99.6	XX
13	3	99.8	X
11	3	99.8	X
12	3	100.	X
6	3	100.	X
15	3	100.	X
17	3	100.	X
7	3	100.	X
9	3	100.	X
8	3	100.	X
16	3	100.	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 3 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple

Fe disponible para las plantas

Cuadro 37. ANOVA para el Fe disponible para las plantas

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Ratio	P-Valor	
Entre grupos	316.	16	19.8	45.90	0.0000	**
Dentro del grupo	7.32	17	0.431			

Total (Corr.)	324.	33				
$\bar{X} = 27.4$ C.V. = 11.4 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de Fe disponible para las plantas en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 45.90, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 38. Prueba de Rango Múltiple para Fe disponible para las plantas

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
11	2	23.0	X
17	2	23.0	X
14	2	23.0	X
13	2	24.6	XX
9	2	25.0	XX
10	2	25.2	XXX
1	2	26.6	XXX
16	2	27.1	XX
8	2	27.8	XX
3	2	28.3	XXX
12	2	28.5	XXXX
6	2	29.4	XXXX
15	2	29.9	XXX
7	2	29.9	XXX
5	2	30.4	XX
2	2	30.9	X
4	2	33.8	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 10 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple

Zn disponible para las plantas

Cuadro 39. ANOVA para el Zn disponible para las plantas

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	0.136	16	0.00849	21.26	0.0000	**
Dentro del grupo	0.00678	17	0.000399			
Total (Corr.)	0.143	33				
$\bar{X} = 0.461$ C.V. = 14.3 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de Zn disponible para las plantas en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 21.26, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 40. Prueba de Rango Múltiple para Zn disponible para las plantas

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
1	2	0.228	X
3	2	0.416	X
5	2	0.444	XX
2	2	0.448	XXX
6	2	0.457	XXXX

10	2	0.465	XXXX
12	2	0.47	XXXX
9	2	0.471	XXXX
8	2	0.471	XXXX
11	2	0.475	XXX
14	2	0.49	XXX
7	2	0.493	XXX
13	2	0.495	XXX
16	2	0.495	XXX
4	2	0.502	XX
17	2	0.505	XX
15	2	0.514	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 5 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple

Cu disponible para las plantas

Cuadro 41. ANOVA para el Cu disponible para las plantas

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	0.34	16	0.0212	39.21	0.0000	**
Dentro del grupo	0.0092	17	0.000541			
Total (Corr.)	0.349	33				

$\bar{X} = 0.629$ C.V. = 16.3 %

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de Zn disponible para las plantas en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 39.21, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 42. Prueba de Rango Múltiple para Cu disponible para las plantas

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
1	2	0.34	X
9	2	0.54	X
11	2	0.55	X
10	2	0.57	X
5	2	0.58	XX
8	2	0.59	XXX
6	2	0.59	XXX
3	2	0.64	XXX
14	2	0.65	XXX
7	2	0.65	XXX
2	2	0.65	XXX
17	2	0.67	XXX
16	2	0.7	XXXX
13	2	0.71	XXX
12	2	0.73	XXX
4	2	0.74	XX
15	2	0.79	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 9 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar

entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0

Análisis de varianza y prueba de rango múltiple

Mn disponible para las plantas

Cuadro 43. ANOVA para el Mn disponible para las plantas

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F-Radio	P-Valor	
Entre grupos	4.42E4	16	2.76E3	254.01	0.0000	**
Dentro del grupo	185.	17	10.9			
Total (Corr.)	4.44E4	33				
$\bar{X} = 87.2$ C.V. = 42.1 %						

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos de Zn disponible para las plantas en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo. El F-radio, que en este caso es igual a 254.01, es un cociente de la estimación entre grupos a la estimación dentro del grupo. Dado que el P-valor de la prueba F es menor a 0.01, hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada dato de un nivel de tratamiento a otro con un nivel de confianza del 99.0%.

Cuadro 44. Prueba de Rango Múltiple para Mn disponible para las plantas

Método: 99.0 % LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
17	2	33.0	X
14	2	46.5	X
13	2	56.5	X
9	2	56.5	X
16	2	56.5	X
11	2	60.5	X
15	2	64.5	XX
10	2	73.5	X
12	2	87.5	X
8	2	92.5	XX
5	2	95.5	XXX
6	2	98.0	XX
1	2	104.	XX
7	2	109.	X
3	2	132.	X
4	2	150.	X
2	2	167.	X

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. 11 grupos homogéneos han sido identificados usando columnas de X's. Cada columna de X's forma un grupo de medias entre las cuales no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.0 %. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de la mínima diferencia significativa de Fisher (LSD least significant difference por sus siglas en inglés). Con este método, existe el riesgo del 1.0 % de llamar a cada par de medias significativamente diferentes cuando la diferencia actual es igual a 0.

** Significativo al .01

\bar{X} Media

C.V. Coeficiente de variación