

EFFECTO DE LA FUENTE DE CALCIO Y LA FERTILIZACION CON SULFATOS Y CLORUROS EN LA DISPONIBILIDAD DEL FOSFORO EN UN SUELO ACIDO DE COSTA RICA¹

Marvin González*
Miguel A. González*

ABSTRACT

Effect of calcium source and fertilization with sulfates and chlorides on the phosphorus availability in an acid soil of Costa Rica. A greenhouse study was carried out in order to study the response of sorghum plants (*Sorghum vulgare* L.) to different levels of calcium sulfate, calcium carbonate, calcium chloride and phosphorus applied to an acid soil of Costa Rica. The general fertilization was supplied in some cases as chlorides and in other cases as sulfates.

The production of dry matter showed high values when the lowest level of CaSO₄ and phosphorus were used, under the sulfate treatment. The highest values of dry matter corresponded to the highest levels of calcium carbonate and phosphorus applied, when sulfates were used.

The highest utilization of phosphorus by the sorghum resulted when sulfates and the highest level of calcium carbonate and phosphorus were used. The application of calcium sulfate, sulfates and tricalcium phosphate also produced high concentration of phosphorus in the plants.

The highest concentration of calcium in the plants corresponded to the treatment where only sulfates were applied and tricalcium phosphate was used as phosphate source in the highest rate.

The application of calcium phosphate and the fertilization with sulfates and potassium phosphate as phosphorus source, in the lowest levels, produced the highest concentration of magnesium in the plants.

It was clear from this experiment, the beneficial effect that sulfate fertilization had on dry matter production as well as on the availability of phosphorus, in a high phosphorus fixing soil.

INTRODUCCION

Los suelos que tienen alta capacidad de fijación de fósforo por lo general presentan marcadas deficiencias de este elemento, especialmente en ausencia de fertilizante fosfatado (14). En estudios hechos en suelos derivados de cenizas volcánicas

de América Central se encontró deficiencias de fósforo y una capacidad variable de fijación de los fosfatos aplicados en forma de fertilizante, lo que limita la productividad (19). La fijación de fósforo se acentúa con la acidez del suelo y el contenido de Al intercambiable (7, 12). Es por eso que los suelos con mayor cantidad de aluminio tienen deficiencias de fósforo debido a la alta fijación (6).

La adsorción de sulfatos está relacionada con el pH del suelo; es así que al aumentar o disminuir el pH se ha reportado aumentos o disminuciones en la adsorción de sulfatos. Barrow *et al* (4) en suelos de Australia encontraron que la adsorción

¹ Recibido para su publicación el 5 de marzo de 1981. Parte de la Tesis de Grado presentada por el primer autor a la Escuela de Fitotecnia, Universidad de Costa Rica.

* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.

Cuadro 1. Algunas propiedades químicas del suelo estudiado.

| pH | | | P | K | Ca | Mg | Al | Fe | Mn | Cu | Zn |
|------------------|-----|--------------------------------|-------|------------|-----|-----|-------|----|----|----|-----|
| H ₂ O | KCl | K ₂ SO ₄ | μg/ml | meq/100 ml | | | μg/ml | | | | |
| 4,4 | 4,2 | 4,8 | 4 | 0,09 | 0,5 | 0,2 | 0,84 | 98 | 2 | 7 | 1,4 |

de sulfatos se incrementó en áreas con lluvias mayores de 760 mm debido probablemente a la disminución del pH. Bornemisza y Llanos (5) y Chao *et al* (9) encontraron un aumento del pH al aumentar la adsorción de sulfatos, lo que indica que ocurren desplazamientos de grupos OH⁻. Otros investigadores han determinado que en el rango ácido, la cantidad de sulfatos adsorbidos es proporcional a las cantidades de óxidos hidratados de Fe y Al (8, 16), de los cuales los de Al son más efectivos en retener sulfatos (10, 18). Mehlich (18) dice que los suelos que tienen una considerable capacidad de adsorción aniónica, en los cuales el sulfato sustituye a los hidroxilos, presentan un valor de pH menor, una menor eficiencia de adsorción de calcio y una mayor conductividad específica que el suelo sustituido con hidroxilos.

La adsorción de sulfatos y fosfatos está íntimamente relacionada, lo que sugiere que tienen un mecanismo de adsorción similar (3). Sin embargo, el fosfato tiene una mayor fuerza de fijación que el sulfato (5), por lo que se indica que el ion fosfato es efectivo en reducir la cantidad de sulfato adsorbido (16). También se ha encontrado que a bajas concentraciones de fosfato hay intercambios con el sulfato y silicato adsorbidos, como con el aluminio de arcillas viejas (21). En un suelo de Buenos Aires de Puntarenas se observó un incremento en la retención de sulfatos al aumentar la concentración de estos en ausencia de fosfatos (22). La aplicación de sulfato de amonio en un suelo de Jamaica provocó un aumento en la adsorción de fósforo por las plantas de maíz lo que se tradujo en una mayor producción (23).

Al presente no se cuenta con información pertinente al uso de cloruro de calcio como fuente de calcio en suelos ácidos tropicales, por lo que se considera de interés estudiar su comportamiento en esas condiciones.

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar el efecto de tres fuentes de calcio, a saber carbonato, sulfato y cloruro, así como la fertilización a base de sulfatos y cloruros, en la utilización de fósforo por el sorgo, como planta indicadora, en un suelo ácido de Costa Rica.

MATERIALES Y METODOS

Para evaluar el efecto de diferentes fuentes de calcio y de la fertilización en la disponibilidad del fósforo aplicado al suelo, se instaló un ensayo en el invernadero del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. El suelo utilizado ha sido clasificado como Ortóxico Palehumult y procede de la finca "La Piñera" ubicada en Buenos Aires de Puntarenas. Las características de este suelo se presentan en el Cuadro 1.

Se colectó muestras de 0 a 30 cm de profundidad que fueron secadas al aire, morterizadas y homogenizadas.

El pH del suelo se determinó en relaciones de 1:2,5 con H₂O, KCl 0,1 N y K₂SO₄ 0,1 N usando un potenciómetro Perkin Elmer modelo 80. El fósforo se extrajo con la solución Olsen modificada (14), luego se desarrolló y se leyó a 660 mμ en un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo 295.

El aluminio se determinó por extracción con KCl 1 N y titulado con hidróxido de sodio 0,01 N (17). El calcio y magnesio se extrajeron con KCl 1N (17); las lecturas se hicieron directamente del extracto con un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 303. El potasio, hierro, zinc y manganeso se extrajeron con la solución Olsen modificada y se leyeron directamente del extracto con el espectrofotómetro de absorción atómica antes mencionado (15).

Cuadro 2. Tratamientos de fertilización (g/maceta).

1. Testigo sin fertilizantes
2. Testigo + $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, KCl , MgSO_4 , CaCO_3 (3,5gCaO), micronutrientos
3. Testigo + $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 (3,5gCaO), micronutrientos

GRUPO I: 300 mg P_2O_5

4. $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, K_3PO_4 , KCl , MgSO_4 , CaCO_3 (3,5gCaO), micronutrientos
5. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_3PO_4 , K_2SO_4 , MgSO_4 , CaCO_3 (3,5gCaO), micronutrientos
6. $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, K_3PO_4 , KCl , MgSO_4 , CaCl_2 (3,5gCaO), micronutrientos
7. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_3PO_4 , K_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 (3,5gCaO), micronutrientos
8. $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, K_3PO_4 , KCl , MgSO_4 , CaCO_3 (1,5gCaO), micronutrientos
9. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_3PO_4 , K_2SO_4 , MgSO_4 , CaCO_3 (1,5gCaO), micronutrientos
10. $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, K_3PO_4 , KCl , MgSO_4 , CaCl_2 (1,5gCaO), micronutrientos
11. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_3PO_4 , K_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 (1,5gCaO), micronutrientos
12. $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, KCl , MgSO_4 , CaCO_3 (3,5gCaO), micronutrientos
13. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, K_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 (3,5gCaO), micronutrientos
14. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, K_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 (1,5gCaO), micronutrientos
15. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, K_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 (1,5gCaO), micronutrientos + 5 o/o SO_4

GRUPO II: 600 mg P_2O_5 tratamientos iguales del 4 al 15**GRUPO III: 1200 mg P_2O_5 tratamientos iguales del 4 al 15**

Los tratamientos se presentan en el Cuadro 2. Consistieron en la aplicación del equivalente a dos dosis de cal, tres niveles de fósforo y fertilización completa utilizando sales como sulfatos o cloruros. Las cantidades agregadas se presentan en los Cuadros 3 y 4. La cal se aplicó con base en los miliequivalentes de aluminio extraídos con KCl 1 N presentes y el fósforo con base en los resultados obtenidos por Quirós y González (19). El diseño experimental fue de bloques irrestrictamente al azar, con treinta y nueve tratamientos y cuatro repeticiones.

Se usó sorgo (*Sorghum vulgare* L.) como planta indicadora, debido a su sensibilidad a la acidez y a su rápido crecimiento. Se sembró originalmente veintiséis semillas en potes con capacidad para 5 kg de suelo. Diez días después se raleó a trece plantas. La aplicación de nitrógeno y potasio se realizó en tres épocas: al momento de la siembra, a los once y a los treinta y dos días después de la

siembra. El agua se aplicó por capilaridad.

La siembra se realizó el 25 de marzo de 1977, y el corte de las plantas se hizo cincuenta y dos días después de la siembra. Se evaluó la producción de materia seca y la extracción de nutrientes.

Las plantas una vez cortadas, se secaron a 70 C y después se pesaron. Después de molidas, se sometieron a una digestión húmeda con una mezcla de ácidos perclórico y nítrico en relación de 1:5 respectivamente y luego, se procedió a evaluar las cantidades de fósforo, calcio, potasio y magnesio presentes.

El nitrógeno se determinó por digestión de la materia seca con ácido sulfúrico concentrado y sulfato de potasio, y se destiló en un aparato microkjeldhal modificado para ser titulado con H_2SO_4 de normalidad conocida (1).

Cuadro 3. Compuestos químicos y cantidades aplicadas en gramos por maceta.

| Compuestos químicos | TRATAMIENTOS | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| CO(NH ₂) ₂ | | 3,21 | | 3,21 | | 3,21 | | 3,21 | | 3,21 | | 3,21 | | | |
| (NH ₄) ₂ SO ₄ | | | 7,08 | | 7,08 | | 6,08 | | 7,08 | | 7,08 | | 7,08 | 7,08 | 7,08 |
| MgSO ₄ | | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 | 2,45 |
| CaCO ₃ | | 6,25 | | 6,25 | 6,25 | | | 2,68 | 2,68 | | | 6,25 | | | |
| CaCl ₂ | | | | | | 6,96 | | | | 3,64 | | | | | |
| CaSO ₄ | | | 8,50 | | | | 8,50 | | | | 3,64 | | 8,50 | 3,28 | 3,28 |

Las cantidades de CO(NH₂)₂ y de (NH₄)₂ SO₄ aquí expresadas corresponden a la aplicación de 1,5 g de N por maceta. Estas cantidades se suplieron fraccionadas a razón de 0,5 g de N por maceta, a la siembra, a los 11 días y a los 32 días.

Los micronutrientos se aplicaron a razón de 5 ml/maceta de 5 kg., tomados de una solución de 1 litro que se preparó con 14 g Cu SO₄, 18 g Zn SO₄, 6 g (NH₄)₂ Mo O₄, 6 g H₃BO₃.

Cuadro 4. Fuentes y cantidades de fósforo y potasio.

| | TRATAMIENTO CON P y K (g/maceta) | | | | | |
|----|--|---|---------------------------------|------|--------------------------------|-----|
| | K ₃ PO ₄ | Ca ₃ (PO ₄) ₂ | KH ₂ PO ₄ | K Cl | K ₂ SO ₄ | KOH |
| | 300 mg P ₂ O ₅ /maceta | | | | | |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | 1,19 | | |
| 3 | | | | | 1,39 | |
| 4 | 0,90 | | | 0,24 | | |
| 5 | 0,90 | | | | 0,28 | |
| 6 | 0,90 | | | 0,24 | | |
| 7 | 0,90 | | | | 0,28 | |
| 8 | 0,90 | | | 0,24 | | |
| 9 | 0,90 | | | | 0,28 | |
| 10 | 0,90 | | | 0,24 | | |
| 11 | 0,90 | | | | 0,28 | |
| 12 | | 0,66 | | 1,19 | | |
| 13 | | 0,66 | | | 1,39 | |
| 14 | | 0,66 | | | 1,39 | |
| 15 | | 0,66 | | | 1,39 | |

Continúa en la página siguiente:

| | K_3PO_4 | $Ca_3(PO_4)_2$ | KH_2PO_4 | KCl | K_2SO_4 | KOH |
|--------------------------|-----------|----------------|------------|------|-----------|-------|
| 600 mg P_2O_5 /maceta | | | | | | |
| 16 | | | 0,575 | | | 0,659 |
| 17 | | | 0,575 | | | 0,659 |
| 18 | | | 0,575 | | | 0,659 |
| 19 | | | 0,575 | | | 0,659 |
| 20 | | | 0,575 | | | 0,659 |
| 21 | | | 0,575 | | | 0,659 |
| 22 | | | 0,575 | | | 0,659 |
| 23 | | | 0,575 | | | 0,659 |
| 24 | | 1,32 | | 1,19 | | |
| 25 | | 1,32 | | | 1,39 | |
| 26 | | 1,32 | | | 1,39 | |
| 27 | | 1,32 | | | 1,39 | |
| 1200 mg P_2O_5 /maceta | | | | | | |
| 28 | | | 1,15 | | | 0,330 |
| 29 | | | 1,15 | | | 0,330 |
| 30 | | | 1,15 | | | 0,330 |
| 31 | | | 1,15 | | | 0,330 |
| 32 | | | 1,15 | | | 0,330 |
| 33 | | | 1,15 | | | 0,330 |
| 34 | | | 1,15 | | | 0,330 |
| 35 | | | 1,15 | | | 0,330 |
| 36 | | 2,64 | | 1,19 | | |
| 37 | | 2,64 | | | 1,39 | |
| 38 | | 2,64 | | | 1,39 | |
| 39 | | 2,64 | | | 1,39 | |

Las dosis de K aquí expresadas corresponden a la aplicación de 0,75 g de K_2O por maceta. Posteriormente, a los 11 días después de la siembra se aplicó K_2SO_4 o KCl en cantidades de 0,96 y 0,79 g por maceta respectivamente, para suplir 0,5 g de K_2O por maceta.

A los 32 días se suplió 0,48 g de K_2SO_4 y 0,395 g de KCl por maceta para suplir 0,25 g de K_2O adicionales. En total se agregó 1,5 g de K_2O por maceta.

Los tratamientos 15, 27 y 39 recibieron 6,2, 6,5 y 7,1 ml de H_2SO_4 1N por maceta, lo que corresponde a un 5 % de sulfatos en exceso de los fosfatos + sulfatos agregados a estos tratamientos.

RESULTADOS

El fósforo se determinó colorimétricamente, por medio de un espectrofotómetro modelo 295 a 600 m μ . El calcio, potasio y magnesio se leyeron en un fotómetro de llama Coleman modelo 21.

Producción de materia seca

La producción de materia seca para cada grupo, presentó diferencias altamente significativas entre tratamientos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Valores de F calculados ($P \gg 0,01$) de los diferentes parámetros evaluados en la prueba biológica.

| Agrupación de tratamientos | VARIABLE | | | | | |
|----------------------------|--------------|------|------|------|-----|------|
| | Materia seca | N | P | K | Ca | Mg |
| | Fc | Fc | Fc | Fc | Fc | Fc |
| I | 27,7 | 38,1 | 11,9 | 37,1 | 7,6 | 7,1 |
| II | 9,4 | 38,8 | 18,6 | 40,2 | 9,8 | 9,4 |
| III | 22,5 | 35,1 | 9,7 | 35,0 | 4,8 | 36,9 |

En la Fig. 1 se muestra que la producción de materia seca en el testigo sin fertilización fue mínima comparada con los otros tratamientos.

En el caso en que se aplicó la dosis más baja de cal (1,5 g CaO) con diferentes cantidades de fósforo, la tendencia fue similar a los tratamientos en que se suministró mayor cantidad de cal, excepto en el caso en que se fertilizó con sulfatos en que se obtuvo una producción superior a las demás.

Cuando se aplicó el nivel más bajo de fósforo la mayor producción se obtuvo cuando se fertilizó con sulfatos y se encaló con 3,5 g CaO como CaSO_4 . La producción, cuando se suministró carbonato de calcio como enmienda y cloruros en la fertilización, fue la más baja del grupo I (300 mg P_2O_5).

En el grupo II (600 mg P_2O_5) no se encontró producciones tan altas como en los tratamientos con menores dosis de fósforo. Cuando se agregó 1200 mg de P_2O_5 /pote y 3,5 g de CaO, se encontró la producción más alta al emplearse carbonatos y sulfatos; caso contrario ocurrió cuando se usó carbonatos y cloruros en que se obtuvo la menor producción.

En la Fig. 2 se presentan los resultados obtenidos en la producción de materia seca, tomando en cuenta las diferentes fuentes de fósforo empleadas y comparando los tratamientos en que se usó un exceso de sulfatos.

Con la menor dosis de cal se encontró que cuando se utilizó sulfatos y se fertilizó con 300 mg

P_2O_5 como K_3PO_4 la producción de materia seca fue superior a los tratamientos en que se agregaron sulfatos y fósforo como $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Cabe destacar que no hubo diferencias cuando se aplicó un exceso de sulfatos. Para el nivel de 600 mg de P_2O_5 con la misma dosis de cal se notó que con el uso de sulfatos y $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ se obtuvo rendimientos más altos. Con el tratamiento anterior y un exceso de sulfatos se obtuvo la producción más baja para el nivel de fósforo citado, encontrándose también en este nivel, un rendimiento intermedio con el uso de sulfatos y K_3PO_4 como fertilizante fosfado.

Cuando se utilizó 1200 mg de P_2O_5 se encontró que la producción fue mayor que con el nivel intermedio de fósforo aplicado, pero siguió la misma línea de rendimiento como respuesta a los tratamientos que en el caso anterior.

La aplicación de la dosis más alta de cal no provocó respuesta en el rendimiento cuando se empleó carbonatos y cloruros con las diferentes fuentes y niveles de fósforo, ya que la producción fue baja como se observa en la Fig. 2.

Con el nivel más bajo de fósforo y con 3,5 g de CaO se encontró que la aplicación de sulfatos y K_3PO_4 indujeron a una producción alta si se le compara con la otra fuente de fósforo usada. Para el nivel intermedio de fósforo, con la dosis de cal más alta los resultados indicaron que el uso de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dio una mayor producción que cuando se empleó K_3PO_4 como fuente de fósforo y fertilización con sulfatos. Los resultados encontrados siguieron la misma tendencia al aplicar la dosis de fósforo más alta, pero con mayor producción que en el caso anterior.

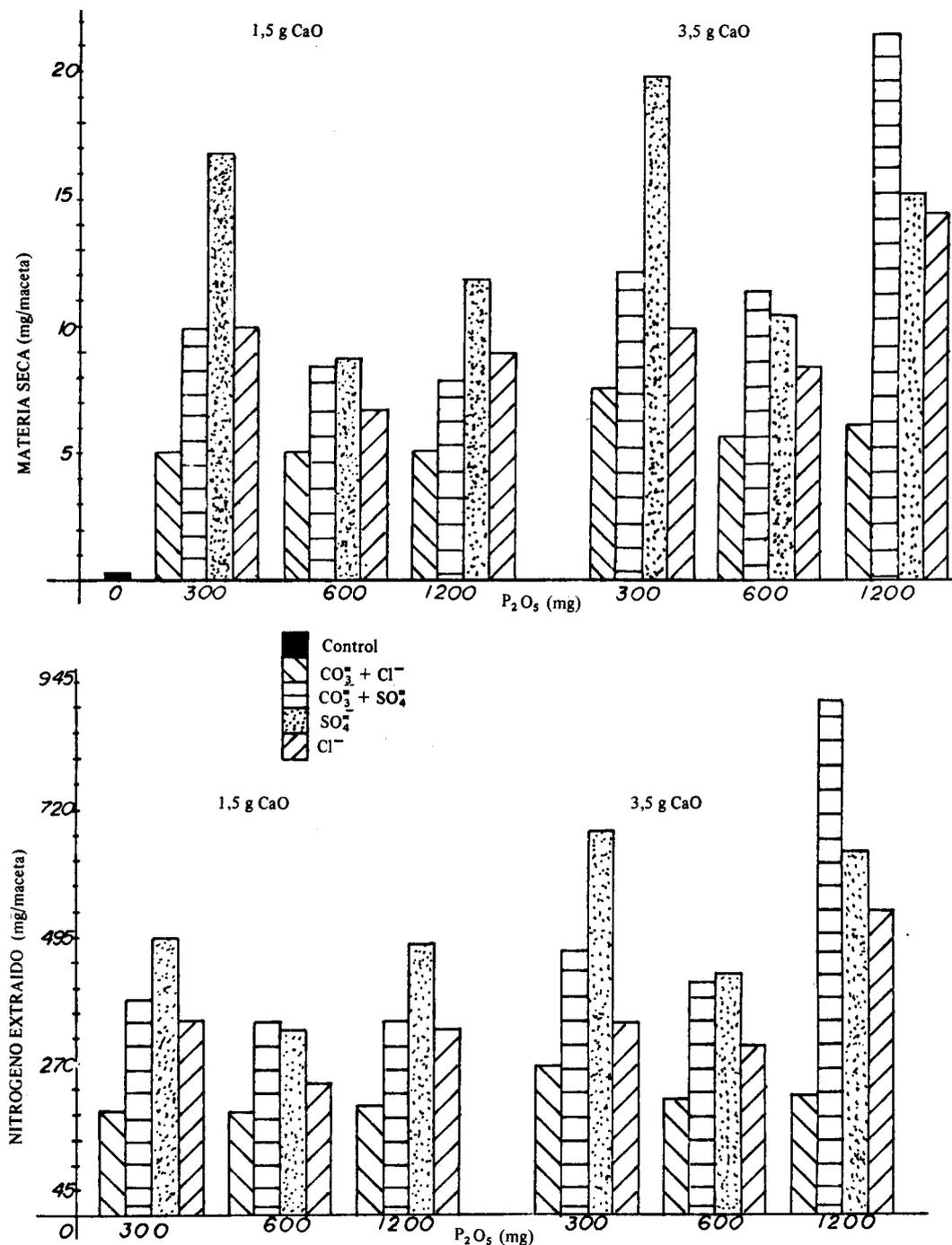


Fig. 1. Efectos de diferentes tratamientos en la producción de materia seca y extracción de N.

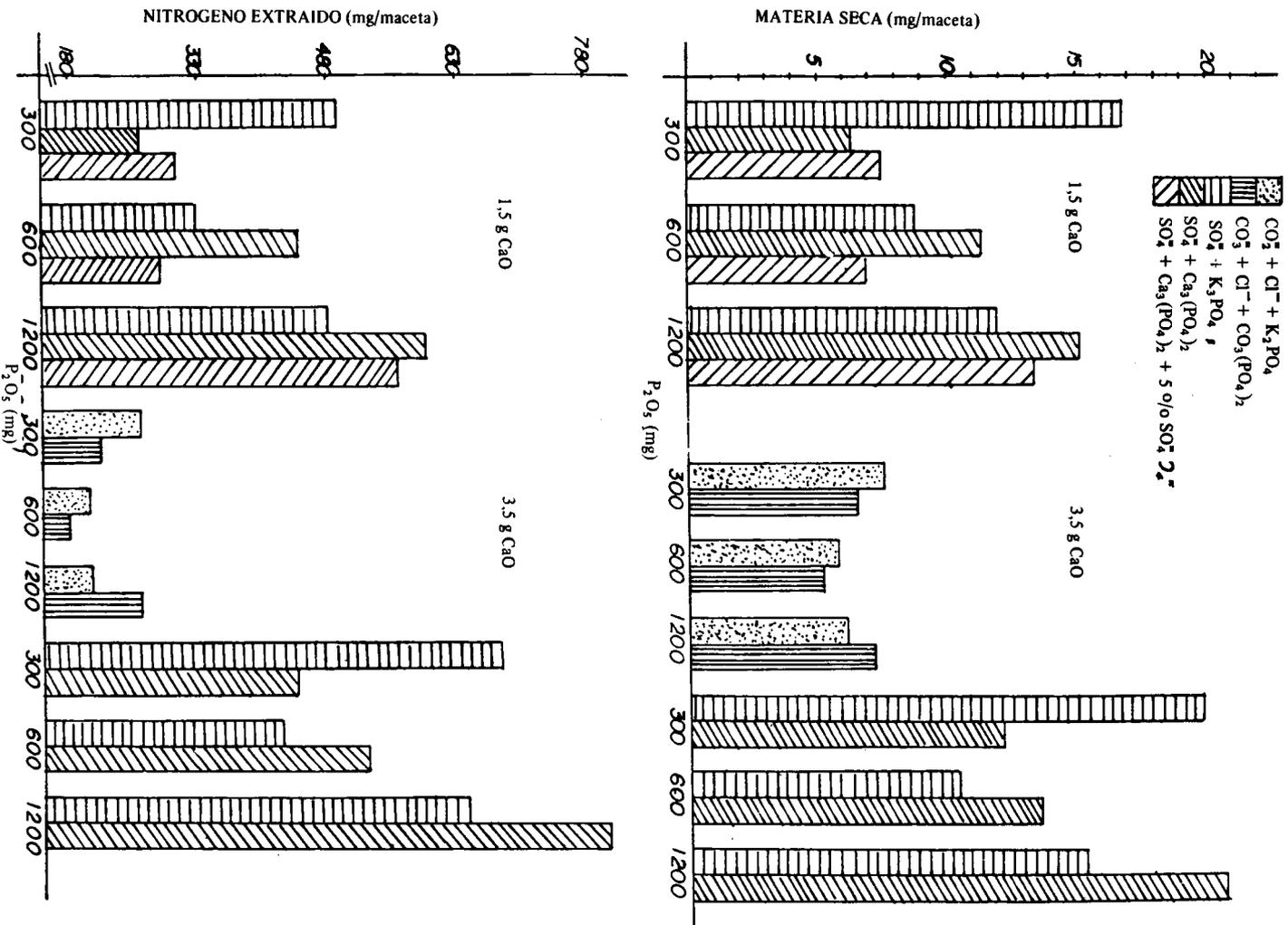


Fig. 2. Efecto de diferentes tratamientos en la producción de materia seca y extracción de N.

Extracción de nitrógeno por el sorgo

El nitrógeno absorbido por las plantas de sorgo fue significativamente afectado por los tratamientos (Cuadro 5). En las Figs. 1 y 2 se puede observar que la extracción de nitrógeno por las plantas con respecto a los diferentes tratamientos, siguió la misma tendencia observada en la producción de materia seca. O sea, que la extracción de nitrógeno fue proporcional a la materia seca producida. Por lo tanto, puede interpretarse la respuesta a este elemento de manera similar a la producción de materia seca, ya que el comportamiento fue paralelo.

Extracción de fósforo por el sorgo

En la Fig. 3 se presenta la extracción de fósforo por las plantas, el cual fue afectado significativamente por los diferentes tratamientos. Con el nivel menor de cal (1,5 g CaO), la mayor extracción de este elemento ocurrió cuando se aplicó únicamente 300 mg P_2O_5 por pote y se usaron sulfatos.

Cuando se aplicó 300 mg de P_2O_5 y 3,5 de CaO y se fertilizó únicamente con sulfatos, la extracción de fósforo fue la más alta para dicho grupo. Cuando se encaló con carbonatos y se aplicaron sulfatos, la extracción de fósforo fue intermedia, no ocurriendo así en el tratamiento que se utilizaron carbonatos y cloruros en que la extracción fue la más baja.

El empleo de 600 mg de P_2O_5 para la dosis más alta de cal no produjo respuesta en la extracción de fósforo de los diferentes tratamientos si se compara con los otros niveles de fósforo aplicado.

La utilización de carbonato de calcio como fuente de cal y la fertilización con sulfatos provocó la más alta extracción, cuando se aplicó la mayor cantidad de fósforo. También se observó que el encalado y la fertilización con sulfatos tuvieron un efecto similar al caso anterior. La extracción de fósforo fue baja cuando se aplicó carbonatos y cloruros con el nivel de fósforo más alto.

En la Fig. 4 se muestra que al aplicar 1,5 g de CaO y la dosis de fósforo más alta, la extracción fue mayor cuando se utilizaron sulfatos y $Ca_3(PO_4)_2$ como fuente de fósforo. Cuando se aplicó un exceso de sulfatos, en este caso, los resultados fueron similares.

Con la dosis de 3,5 g CaO y las diferentes fuentes y cantidades de fósforo no se encontró respuesta cuando se utilizó carbonatos y cloruros. La aplicación de sulfatos y fosfato de potasio con la cantidad de fósforo más baja produjo una mayor extracción de fósforo que en el tratamiento en que se usó $Ca_3(PO_4)_2$. En el nivel intermedio de fósforo aplicado, los resultados fueron opuestos a los anteriores. La mayor extracción de fósforo se obtuvo cuando la cantidad de fósforo fue de 1200 mg de P_2O_5 y se aplicó sulfatos y $Ca_3(PO_4)_2$, no encontrándose diferencia con el tratamiento con sulfatos y K_3PO_4 .

Extracción de potasio por el sorgo

Los resultados presentados en la Fig. 3 para la extracción de potasio siguieron un patrón similar al encontrado con el fósforo, con la excepción de que en ambas dosis de cal la aplicación de carbonatos y sulfatos presentó una mayor extracción de potasio que cuando se fertilizó y encaló con sulfatos al nivel de 600 mg de P_2O_5 .

En la Fig. 4 al comparar las fuentes y cantidades de fósforo empleadas con respecto a los diferentes tratamientos se observa que la extracción de potasio presentó una tendencia similar a la del fósforo, por lo que estos resultados se pueden interpretar de igual forma.

Extracción de calcio por el sorgo

En la Fig. 5 se destaca que la aplicación de 1,5 g de CaO y sulfatos con 300 mg de P_2O_5 , se tradujo en la mayor extracción de calcio. Sin embargo, con esa dosis de cal, las extracciones fueron bajas con los otros tratamientos.

Cuando se encaló con la dosis más alta y se fertilizó con sulfatos, se observó que la extracción fue mayor con el nivel de fósforo más bajo. El uso de 600 mg de P_2O_5 con esa dosis de cal produjo la mayor extracción cuando se fertilizó con cloruros, luego siguió el caso en que se aplicó sulfatos y después cuando se aplicó carbonatos y sulfatos. La menor extracción se encontró al usar carbonatos y cloruros.

La mayor extracción de calcio se obtuvo cuando se empleó carbonato de calcio (3,5 g CaO), sulfatos y la mayor cantidad de fósforo. Luego siguió el tratamiento en que se aplicó sulfatos, y por último se usó carbonatos y cloruros.

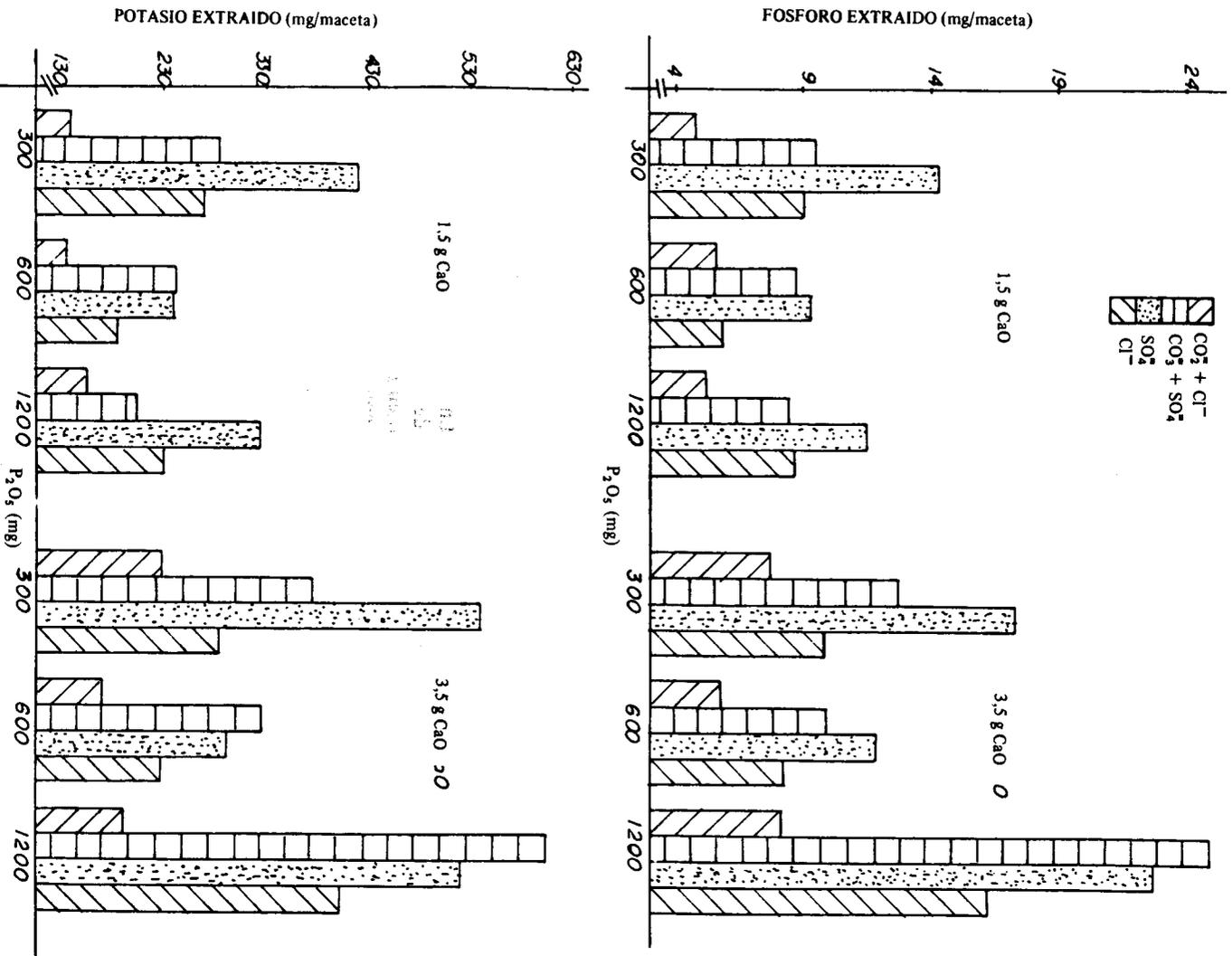


Fig. 3. Efecto de los diferentes tratamientos en la extracción de P y K.

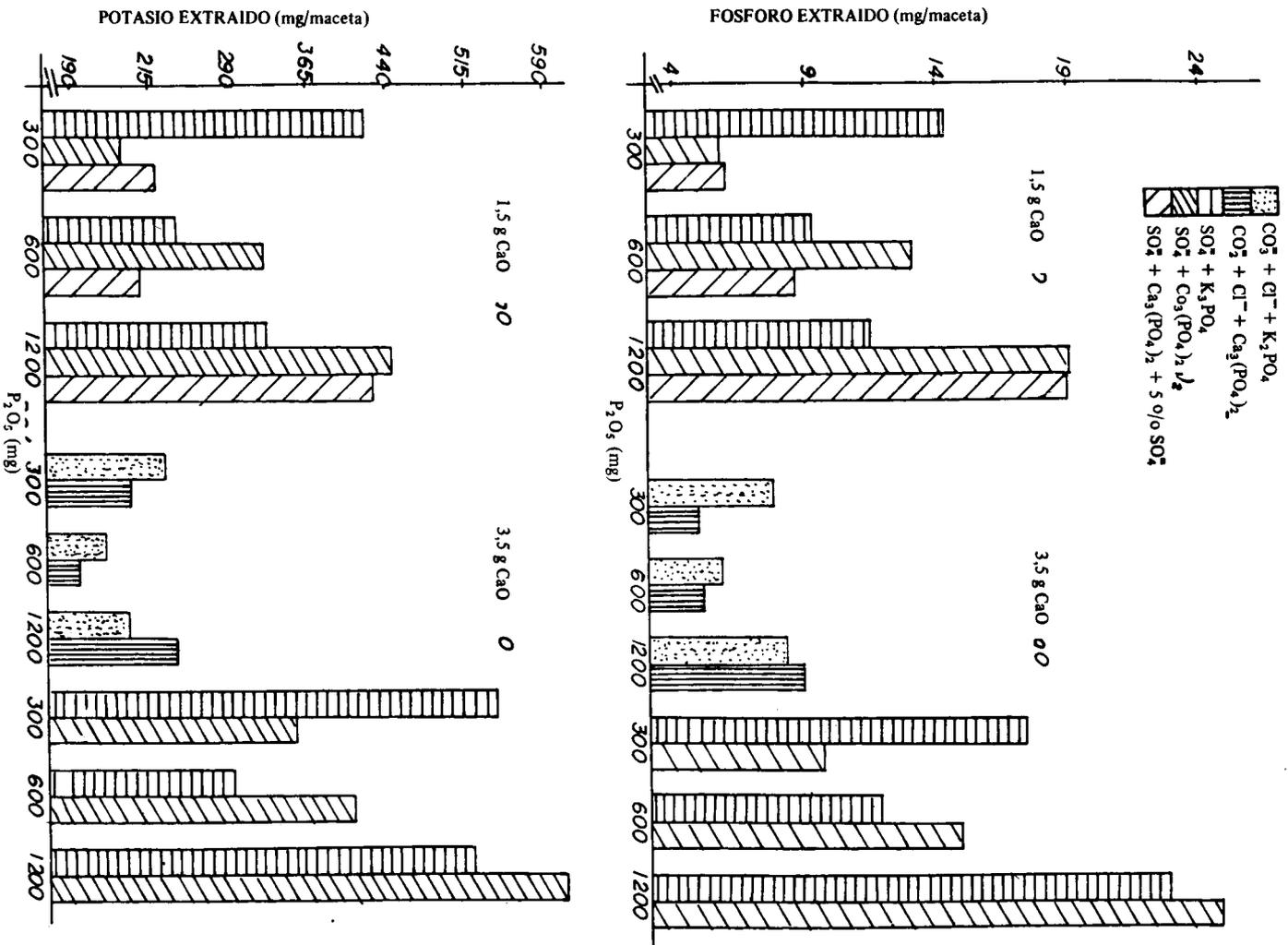


Fig. 4. Efecto de los diferentes tratamientos en la extracción de P y K.

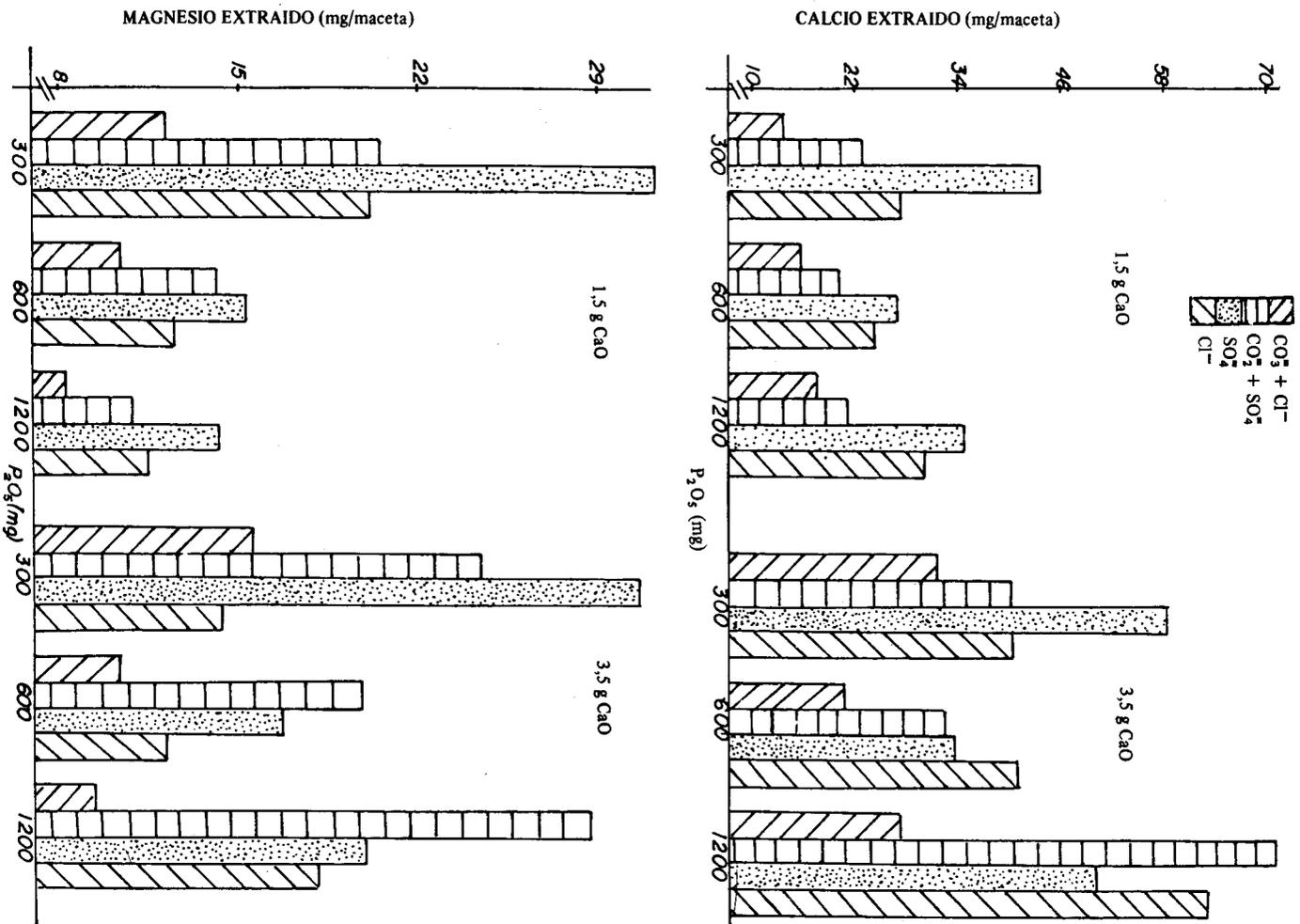


Fig. 5. Efecto de diferentes tratamientos en la extracción de Ca y Mg.

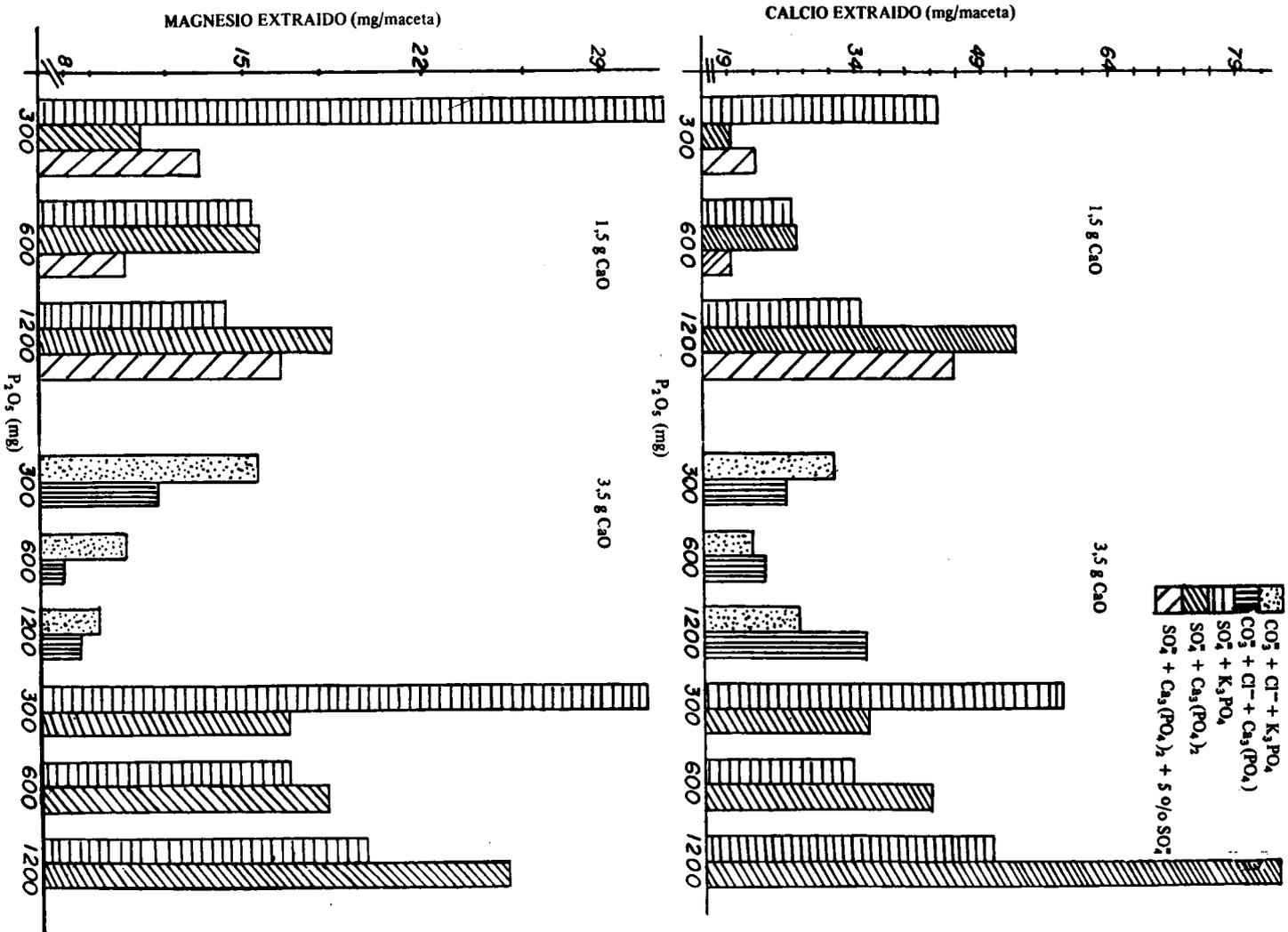


Fig. 6. Efecto de diferentes tratamientos en la extracción de Ca y Mg.

317

En la Fig. 6 se muestra como con la aplicación de 1,5 g de CaO y 300 mg de P_2O_5 como K_3PO_4 se obtuvo la mayor extracción al usarse los sulfatos. Con la dosis más alta de fósforo como $Ca_3(PO_4)_2$ y fertilización con sulfatos se encontró que la extracción de calcio fue la más alta para esta dosis de cal.

La utilización de carbonatos y cloruros con diferentes fuentes de fósforo y la aplicación de 3,5 g de CaO no presentó resultados satisfactorios.

Con el nivel de fósforo bajo (300 mg P_2O_5) y con la mayor dosis de cal se observó que la aplicación de sulfatos y K_3PO_4 produjo la mayor extracción, ocurriendo el caso contrario con la aplicación de 600 mg de P_2O_5 en que la extracción de calcio fue superior cuando se usaron sulfatos y $Ca_3(PO_4)_2$.

La mayor extracción se obtuvo al aplicar el equivalente a 3,5 g de CaO como $CaSO_4$ y 1200 mg de P_2O_5 como $Ca_3(PO_4)_2$ cuando se empleó sulfatos.

Extracción de magnesio por el sorgo

La mayor extracción de magnesio se obtuvo al aplicar la dosis menor de fósforo, sulfatos como fuente aniónica con las dos cantidades de cal probadas (Fig. 5). Un resultado similar se obtuvo cuando se aplicó la dosis mayor de carbonato de calcio junto con sulfatos con la menor y mayor cantidad de fósforo.

Con la dosis más alta de fósforo y cal, y la aplicación de carbonatos y cloruros no se encontró respuesta en la extracción de magnesio por las plantas.

En la Fig. 6 se destaca que la mayor extracción de magnesio se produjo, al usar 300 mg de P_2O_5 y como fuente de fósforo el K_3PO_4 . Esta tendencia se manifestó en los tratamientos que recibieron el equivalente a 1,5 y 3,5 g de CaO, aplicado como $CaSO_4$.

El uso de $CaSO_4$ equivalente a 3,5 g de CaO, el empleo de sulfatos y $Ca_3(PO_4)_2$ como fuente de fósforo (1200 mg P_2O_5) también produjo una extracción alta de magnesio. En el caso en que se aplicó carbonatos y cloruros se encontró valores muy bajos en la extracción de este elemento.

DISCUSION

La mayor producción de materia seca se obtuvo con la aplicación de carbonato de calcio y la fertilización aniónica a base de sulfatos cuando se usó una dosis alta de fósforo. Datos similares encontró McLean (18) en alfalfa utilizando sulfato de calcio como fuente de calcio.

Con la aplicación de fertilizantes en forma de sulfatos, el uso de $CaSO_4$ como fuente de calcio y la dosis más baja de fósforo se encontró una alta producción de materia seca. En el caso en que se aplicó la mayor cantidad de sulfato de calcio y se fertilizó con sulfatos, la mayor cantidad de fósforo tricalcico provocó una producción de materia seca también alta. Igual ocurrió cuando se usó fosfato de potasio como fuente de fósforo.

Se encontró diferentes respuestas de las plantas a la aplicación de fósforo y su posterior utilización. Cuando se aplicó una cierta cantidad de sulfatos al suelo, esta cantidad pudo ser lo suficientemente adecuada para que el sulfato ocupara posiciones de intercambio aniónico que de otra manera hubieran sido ocupadas por el fosfato, de modo que al aplicarse una cantidad relativamente baja de fósforo, éste quedó disponible para las plantas. En estudios realizados por Alvarez (2), se encontró que el encalafío en ausencia de sulfatos disminuyó un poco la cantidad de fósforo disponible, lo que corrobora la importancia de la aplicación de sulfatos en estos suelos. Además, Rajan (20) observó en condiciones de suelos ácidos tropicales, que a bajas concentraciones de fosfato, éste se intercambia con el sulfato adsorbido. Por otro lado, al haber altas concentraciones de sulfatos, la retención de ellos se ha encontrado que aumenta, especialmente en ausencia de fosfatos (21).

Cuando las cantidades de fósforo aplicado al suelo aumentaron, los fosfatos pudieron reemplazar parte del sulfato en posiciones de intercambio aniónico; esto debido a que el fosfato tiene mayor fuerza de adsorción que el sulfato (5). Por lo tanto, al haber mayor adsorción de fósforo, la producción de materia seca disminuyó.

Al aumentar aún más la cantidad de fosfatos agregados, éstos posiblemente reemplazaron a los sulfatos y ocuparon posiciones de intercambio aniónico, pero debido a la alta cantidad de fósforo, parte de éste quedó libre y fue absorbido por la

planta. Kamprath (16), encontró que cuando la concentración de fosfato aumentó y la concentración de sulfato se mantuvo constante, la cantidad de sulfato adsorbido decreció para cada suelo estudiado.

La aplicación de la mayor dosis de cal se reflejó en la cantidad de materia seca producida en los diferentes tratamientos. La cal agregada fue suficiente para neutralizar la mayoría del aluminio intercambiable presente en este suelo con lo que ocurrió un aumento en la producción de materia seca. En los casos en que se usó la menor dosis de cal, no se encontró rendimientos altos; cuando se aplicó carbonatos y cloruros en cantidad equivalente a la mayor dosis de cal, la respuesta de las plantas fue sumamente baja. Los cloruros tienen menor fuerza de adsorción que los fosfatos, por lo que estos los pueden desplazar y ocupar posiciones de intercambio aniónico, lo que hace que haya menor cantidad de fósforo disponible para que pueda ser absorbido por la planta.

La cantidad de nutrimentos extraídos por la planta, estuvo íntimamente relacionada con la materia seca producida. La extracción de nitrógeno tuvo una respuesta positiva cuando se aplicó la mayor cantidad de fósforo y de calcio en forma de carbonato de calcio. El nitrógeno fue suministrado como sulfato de amonio. En los casos en que se aplicó urea como fuente de nitrógeno, la extracción de este nutrimento no fue satisfactoria probablemente porque la urea tiene un efecto acidificante, el cual se agrava al aplicarse en combinación con fertilizantes fosfatados y potásicos. Esta acidificación del suelo produce cambios en la disponibilidad del fósforo y de cationes (13).

El fósforo extraído fue alto cuando se suplió la mayor cantidad (1200 mg P_2O_5 /pote) del mismo al suelo, especialmente cuando se aplicó carbonatos y sulfatos y únicamente sulfatos con fosfato tricálcico como fuente de fósforo. Weir (23), en estudios realizados en Jamaica, encontró que en suelos ácidos el empleo de sulfato de amonio ayuda a la absorción del fósforo por las plantas, no siendo así cuando se usa urea como fuente de nitrógeno. Los resultados de la presente investigación concuerdan con lo encontrado por este autor.

La cantidad de potasio extraído por la planta fue mayor en el caso en que se aplicó sulfatos con la dosis más alta de cal y de fósforo. El fós-

foro se suplió como fosfato tricálcico. Luego se siguió el caso en que se aplicaron carbonatos y fosfato de potasio en las dosis mayores, junto con fertilización en forma de sulfatos.

La mayor extracción de calcio se obtuvo cuando se aplicó 1200 mg de P_2O_5 y 3,5 g de CaO como $CaSO_4$. Además el fósforo se aplicó como $Ca_3(PO_4)_2$.

La cantidad de magnesio extraído fue mayor cuando se aplicó 1,5 g de CaO y se fertilizó con sulfatos y con fosfato de potasio (300 mg P_2O_5).

AGRADECIMIENTO

Los autores desean dejar constancia de su agradecimiento al Dr. K. Sommer, del Agrikulturchemisches Institut, Bonn, República Federal de Alemania, por sus valiosas sugerencias durante el planeamiento y ejecución del ensayo.

RESUMEN

Se estudió en condiciones de invernadero la respuesta del sorgo (*Sorghum vulgare* L.) a diferentes dosis de calcio ($CaSO_4$, $CaCO_3$ y $CaCl_2$) y la utilización del fósforo aplicado en diferentes cantidades en un suelo ácido. La fertilización aniónica fue en unos casos como cloruros y en otros como sulfatos.

La producción de materia seca mostró valores altos cuando se utilizó las dosis más bajas de sulfato de calcio y de fósforo, en el tratamiento a base de sulfatos. Con las dosis más altas de cal y fósforo se encontró la mayor producción de materia seca al utilizarse carbonatos y sulfatos.

La mayor utilización de fósforo por la planta se presentó cuando se aplicó sulfatos con las mayores dosis de carbonato de calcio. La aplicación de sulfato de calcio, sulfatos y fosfatos tricálcicos también mostró buenos resultados.

La mayor utilización de calcio se encontró cuando únicamente se aplicó sulfatos y se usó fosfato tricálcico como fuente de fósforo en la dosis más alta.

La mayor cantidad de magnesio fue extraída cuando se aplicó sulfato de calcio y se fertilizó

con sulfatos y con fosfato de potasio como fuente de fósforo en la cantidad más baja.

De los resultados obtenidos se observó la influencia beneficiosa que ejercieron los sulfatos tanto en la producción de materia seca, como en la disponibilidad del fósforo en un suelo altamente fijador de este elemento.

LITERATURA CITADA

1. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS METHODS OF ANALYSIS. Horwitz, W. ed. Kjeldahl Method for Samples Containing Nitrates 3.115. p. 55. Washington 1970.
2. ALVAREZ, V.H. *et al.* Equilibrio de formas disponibles de fósforo e enxofre em dois latossolos de Minas Gerais. 2. Formas isotropicamente trocáveis de fósforo e enxofre. *Experientiae (Brasil)* 22(12): 293-328. 1976.
3. BARROW, N.J. Studies on the adsorption of sulfate by soils. *Soil Science* 104(5): 342-349. 1967.
4. ———. Influence of solution concentration of calcium on the adsorption of phosphate, sulfate and molybdate by soil. *Soil Science* 113(3): 175-180. 1972.
5. BORNEMISZA, E. y LLANOS, R. Sulfate movement, absorption and adsorption in three Costa Rica soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 31(3): 356-360. 1967.
6. BRAVO, G.E. y GOMEZ, A.A. Capacidad de fijación de fósforo en seis unidades de suelos andosólicos de la zona cafetalera colombiana. *Cenicafé (Colombia)* 25(1): 19-29. 1974.
7. CHANG, S.C. y CHU, W.K. The fate of soluble phosphate applied to soil. *Journal of Soil Science* 12(2): 286-293. 1961.
8. CHAO, T., HARWARD, M. y FANG, S.C. Iron or aluminum coating in relation to sulfate adsorption characteristics of soils. *Soil Science of America Proceedings* 28(5): 632-635. 1964.
9. ———, ———, ———. Exchange reactions between hydroxyl and sulfate ions in soils. *Soil Science* 99(2): 104-108. 1965.
10. ENSMINGER, L.E. Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama Soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 18(3): 259-264. 1954.
11. FASSBENDER, H.W. Deficiencia y fijación del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas en América Central. *In Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina*, Turrialba, IICA, 1969. pp B 4.1 - B 4-10.
12. ———. Estudio del fósforo en suelos de América Central. IV. Capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. *Turrialba* 19(4): 497-505. 1969.
13. ———. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. Turrialba, IICA, (Libros y Materiales Educativos No. 24). 1975. 398 p.
14. FOX, R.L., ALTA, S.K. DE y SHERMAN, G.D. Phosphorus solubility and availability to plants and the aluminum status of Hawaiian soils as influenced by liming. *In Transaction Joint Meeting Comm. IV and V. International Society of Soil Science*, New Zealand, 1962. pp. 574-583.
15. HUNTER, A.H. Métodos de análisis y de invernaderos. Departamento de Suelos, Universidad de Carolina del Norte, Raleigh, 1970. p. 30. (mimeografiado).
16. KAMPRATH, E.J., NELSON, W.L. y FITTS, J.W. The effect of pH sulfate and phosphate concentrations on the adsorption of sulfate by soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 20(4): 463-466. 1956.
17. LIN, C. y COLEMAN, N.T. The measure of exchangeable aluminum in soils and clays. *Soil Science of America Proceedings* 24(6): 444-446. 1960.
18. MELHICH, A. Influence of sorbed hydroxyl and sulfate on liming efficiency pH and conductivity. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(4): 496-499. 1964.
19. McLEAN, E.O. y SSALI, H. Effects of phosphorus rate and form in combination with lime and gypsum on yields and composition of German millet and alfalfa from highly weathered soils. *Soil Science* 123(3): 155-164. 1977.
20. QUIROS, S. y GONZALEZ, M.A. Neutralización del aluminio intercambiable y aprovechamiento del fósforo en tres suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 3(2): 137-149. 1979.
21. RAJAN, S.S. y FOX, R.L. Phosphate adsorption by soils. II. Reaction in tropical acid soils. *Soil Society of America Proceedings* 39(5): 846-851. 1975.
22. RAMIREZ, E. Retención de sulfatos y relación fosfato-sulfato en suelos de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1974. 97 p.
23. WEIR, C.C. Phosphate fixation in Jamaican latosolic soils. *Tropical Agriculture (Trinidad and Tobago)* 54(1): 87-93. 1977.