

**Alejandro MORON\***  
**Jorge C. KIEHL\*\***

\* Ing. Agr., Dr., Suelos, Est. Exp. Alberto Boerger, INIA La Estanzuela, 70000, Colonia, Uruguay.

\*\* Prof., Dr., Dep. Solos, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, Brasil.

## INTRODUCCION

El conocimiento de la dinámica del fósforo es necesario para aumentar la eficiencia biológica y económica de su utilización. Este conocimiento, según Harrison (1985), debe ser apoyado tanto en el balance del nutrien-

## SUMMARY

*This work intended to obtain a broad and long-term characterization of the evolution of soil phosphorus (P) under three systems of agriculture production. The systems were selected from a crop rotation experiment started in 1963 at the Alberto Boerger Experiment Station (INIA-La Estanzuela). The prevailing soil in the study was a Mollisol. The selected systems were: System 1, crop rotation without fertilization; System 2, crop rotation with fertilization; and System 5, crop rotation including pasture, with fertilization.*

*The balance for total-P content of the soil showed that erosion was the main route of P loss in all cropping systems. Balance in System 1 was clearly negative, in System 2 close to zero and in System 5 was positive.*

*In System 1 the organic-P was the fraction showing the greatest decrease. Results from System 2 showed that application of P did not hinder this decrease, but in System 5 this was achieved by including pastures in the rotation program.*

*The amount of aluminum-P in the soil under crop rotation without fertilization was reduced by 60% from 1964 to 1987. The available-P (Bray I and resin) was also markedly reduced during this period. The application of fertilizer P increased the amount of soil inorganic-P. Occluded-P fraction constituted 48% and 61% of the increase in systems 2 and 5 respectively.*

*Available-P (Bray I) content in the soil under System 2 was always above 12 µg P/g, whereas under System 5 the content was smaller most of the time.*

*Pooling all three treatments, Aluminum-P was the fraction that best correlated to available P (Bray I and resin).*

*To maintain a phosphorus concentration of 0,1 µg P/ml in the soil solution, soil under System 1 required 48% more P in the solid phase than systems 2 and 5.*

*Crop rotation including pastures increased the amount of P in the microbial biomass.*

# DINAMICA DEL FOSFORO EN TRES SISTEMAS AGRICOLAS EN EL SUROESTE DE URUGUAY

te en el ecosistema, así como en las transformaciones del nutriente en el suelo.

Como continuación de la investigación sobre fósforo en Uruguay, este trabajo procuró obtener una caracterización amplia y a largo plazo de la evolución del nutriente en diversos sistemas agrícolas de producción. Para la realización del presente estudio se tuvo la oportunidad de utilizar muestras de suelo de un experimento de rotación de cultivos y pasturas conducido en la Estación Experimental Alberto Boerger (INIA-La Estanzuela).

Los sistemas agrícolas estudiados fueron seleccionados bajo la hipótesis general que presentarían dinámicas de fósforo en el suelo contrastantes. Esto permitiría aumentar la comprensión de la evolución del fósforo en el largo plazo.

Específicamente, se procuró estudiar los siguientes aspectos:

- Quantificar las alteraciones del nivel de P total en el suelo a través del tiempo, así como las entradas y salidas del ecosistema.
- Conocer las fracciones del fósforo que hacen posible mantener un sistema sin fertilización.
- Identificar y cuantificar la evolución de las fracciones que son afectadas por la fertilización.
- Confirmar la importancia de la inmovilización de fósforo en forma orgánica du-

**Cuadro 1.** Propiedades químicas de muestras de suelo tomadas en 1963 y 1964. Promedio de bloques.

| Propiedad                        | Año  | Promedio |
|----------------------------------|------|----------|
| pH (H <sub>2</sub> O)            | 1963 | 5,90     |
| pH (KCl)                         | 1963 | 4,90     |
| % C                              | 1963 | 2,19     |
| Bray I $\mu$ g P/g               | 1963 | 7,10     |
| % N total                        | 1963 | 0,19     |
| Ca meq/100g                      | 1964 | 14,20    |
| Mg meq/100g                      | 1964 | 2,50     |
| K meq/100g                       | 1964 | 0,80     |
| Na meq/100g                      | 1964 | 0,40     |
| Acidez potencial a pH 7 meq/100g | 1964 | 4,70     |
| CIC pH 7 meq/100g                | 1964 | 22,50    |
| % sat en bases                   | 1964 | 79,20    |

## RESUMEN

En el presente trabajo se procuró obtener una caracterización amplia y a largo plazo (1964-89) de la evolución del fósforo (P) del suelo en tres sistemas agrícolas de producción. Los sistemas fueron seleccionados de un experimento de rotaciones instalado en 1963 en la Estación Experimental Alberto Boerger (INIA-La Estanzuela). El suelo dominante en el área de estudio es un Molisol. Los sistemas seleccionados fueron: Sistema 1, rotación de cultivos continuos sin fertilización; Sistema 2, rotación de cultivos continuos con fertilización; Sistema 5, rotación de cultivos con pasturas de gramíneas y leguminosas, con fertilización.

El balance de P total del suelo reveló que la erosión fue la principal vía de salida en los tres sistemas. En el Sistema 1 el balance fue claramente negativo, en el Sistema 2 fue próximo al equilibrio y en el Sistema 5 fue positivo.

En el Sistema 1 el P orgánico fue la fracción que presentó mayor disminución. Los resultados del Sistema 2 revelan que la aplicación de fertilizante P no detuvo esa disminución, mientras que en el Sistema 5 la inclusión de pasturas permitió mantener el contenido de P orgánico.

La concentración de fosfato de aluminio en el suelo bajo rotación de cultivos continuos sin fertilización disminuyó 60% en el período 1964-87. El P disponible (Bray I y resinas) también sufrió una acentuada reducción durante dicho período. La aplicación de fertilizante P aumentó la concentración de P inorgánico, presentándose un 48% del mismo en la fracción ocluida en la rotación sin pasturas y un 61% cuando se incluían pasturas.

Los valores de P disponible (Bray I) en el Sistema 2 fueron siempre superiores a 12  $\mu$ g de P/g, mientras que en el Sistema 5 los valores fueron menores que los anteriores en la mayoría de los años. En el análisis conjunto de los tres sistemas la fracción fosfato de aluminio presentó la mejor correlación con el P disponible (Bray I y resinas).

Para mantener una concentración de 0,1  $\mu$ g de P/ml en la solución del suelo, el Sistema 1 (años 1986-87) requirió 48% más fósforo en la fase sólida que los otros dos sistemas.

La rotación de cultivos con pasturas aumentó la cantidad de P presente en la biomasa microbiana del suelo.

rante el período en que el suelo permanece con pasturas.

- e) Establecer relaciones entre la variación del P disponible y las diversas fracciones del P en el suelo.
- f) Estudiar las alteraciones que provocan los distintos sistemas en la capacidad de retención de fósforo por el suelo.
- e) Estudiar la importancia del fósforo presente en la biomasa microbiana en la dinámica de ese nutriente en el suelo.

## MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo fue realizado utilizando muestras de suelo provenientes de un experimento de rotación de cultivos y pasturas instalado en 1963 en la Estación Experimental Alberto Boerger (INIA-La Estanzuela). Se estimó que el suelo tenía 50-60 años de agricultura (no permanente) cuando este experimento fue instalado.

### Características locales

Según Vitoria et al. (1985), el suelo dominante es un Brunosol Eutrítico típico, suave a moderadamente ondulado (2-4% de pendiente). Correspondería al orden Molisol en la 7° aproximación norteamericana. Este suelo pertenece a la Unidad Ecilda Paullier-Las Brujas de la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Ministerio de Agricultura y Pesca, 1979).

Los resultados de los análisis de suelo realizados en muestras de 1963-64 son presentados en el cuadro 1. El pH al agua fue medido en una relación suelo:solución de 1:2,5, el carbono orgánico según Tinsley (1967), el fósforo disponible según Bray & Kurtz (1945) y el N total por el método semi-micro Kjeldhal (Bremner, 1965). El tenor de bases, la acidez potencial y la capacidad de intercambio catiónico fueron analizados según la metodología descrita por el Ministerio de Agricultura y Pesca (1976).

De acuerdo con informaciones obtenidas del Proyecto Clima, colectadas en el propio local entre 1965 y 1989, la precipitación media anual es de 1.100 mm, con una media mensual mínima de 74 mm en agosto y una media mensual máxima de 129,5 mm en el mes de marzo. La temperatura media anual es de 16,3°C con una media mensual

mínima de 10,5 °C en los meses de junio y julio y la máxima de 23,1 °C en enero.

### Delineamiento experimental, instalación y conducción del experimento

El estudio de campo fue instalado en bloques al azar con tres repeticiones, abarcando originalmente siete sistemas de rotaciones. Para los efectos del presente trabajo fueron seleccionados tres sistemas:

- Sistema 1: rotación continua de cultivos sin fertilización.
- Sistema 2: rotación continua de cultivos con fertilización (N-P).
- Sistema 5: rotación de pasturas (gramíneas y leguminosas) con cultivos, con fertilización (N-P).

Las parcelas tenían 25 m de ancho por 200 m de largo. El tamaño de las parcelas y el diseño del ensayo obligaron a que las operaciones de laboreo del suelo fueran realizadas en el mismo sentido de la pendiente.

La secuencia de cultivos -en los tres sistemas- fue básicamente: sorgo-lino-trigo-girasol-trigo. En el Sistema 5 las pasturas duraban un período de 4 años siendo las especies *Lotus corniculatus*, *Trifolium repens* y *Festuca arundinacea*. Los sistemas propuestos fueron mantenidos hasta el año 1973 inclusive, cuando se tomó conocimiento de la gran influencia de las diferencias climáticas entre años sobre la productividad de los cultivos. Por otra parte, variaciones constantes y de menor magnitud eran observadas entre bloques (Díaz, 1983). En consecuencia para minimizar el efecto año, a partir de 1974 las rotaciones en los tres bloques fueron desfasadas en el tiempo. A su vez, Díaz (1983) introdujo modificaciones generales -en los tres sistemas estudiados- en la secuencia de cultivos que comenzaron en 1983. La secuencia básica modificada fue con sorgo como cabeza de rotación, continuando con cebada y girasol de "segunda", finalizando con trigo. En el Sistema 5, la siembra de pasturas es asociada con trigo, el cual termina la fase de cultivos.

En los sistemas 2 y 5 la fertilización fosfatada (superfosfato) fue igual en los tres bloques hasta 1973 inclusive. Posteriormente pasó a ser realizada separadamente

en cada bloque en función del cultivo y del valor de P disponible del suelo. Para el período 1963-87 el Sistema 2 recibió en promedio 39,8 kg de  $P_2O_5$ /ha/año, mientras que en el Sistema 5 fue 41,8 de  $P_2O_5$ /ha/año, siendo mínima la diferencia entre bloques en cada Sistema.

La fertilización nitrogenada aplicada al Sistema 2 fue igual entre bloques hasta 1973, y en el período 1963 a 1987 fue en promedio 40,2 kg de N/ha/año. Para el Sistema 5, para el mismo período, incluyendo los años con pasturas, recibió en promedio 19,2 kg de N/ha/año, concentrándose su aplicación en la fase de cultivos.

Todos los años, en el mes de mayo, fueron colectadas 20 muestras de suelo de cada parcela, en la profundidad 0-20 cm, las cuales fueron mezcladas para obtener una muestra compuesta por parcela. Dichas muestras fueron secadas en estufa a 40-45 °C, molidas y almacenadas.

### Determinación de las formas de fósforo del suelo

En las muestras anuales obtenidas de cada parcela de los sistemas 1, 2 y 5 -durante el período 1964-87- se realizaron los siguientes análisis químicos:

- a) P total (Pt) determinado por digestión con  $HNO_3$ - $HClO_4$  según Jackson (1964). La determinación de fósforo en el extracto fue realizada por colorimetría utilizándose ácido ascórbico como reductor según Murphy & Riley (1962). El ácido sulfúrico utilizado en la colorimetría fue cambiado de 5 N a 2,5 N dada la acidez presente en la alícuota a analizar.
- b) P orgánico (Porg) determinado por ignición a 240 °C y ataque con HCl concentrado según Legg & Black (1955). La concentración de P en el extracto fue determinada conforme al ítem a.
- c) P inorgánico (Pinor) calculado por diferencia entre P total (ítem a) menos P orgánico (ítem b).
- d) Fraccionamiento del P inorgánico según Chang & Jackson (1957) modificado. El P hidrosoluble extraído con  $NH_4Cl$  1 N fue descartado por presentar una concentración de P muy baja. La extracción de fosfato de aluminio fue realizada con  $NH_4F$  ajustado a pH 8,5 con  $NH_4OH$ . La determinación de fósforo en los extrac-

tos de  $\text{NH}_4\text{F}$  0,5 N a pH 8,5 (PAI), NaOH 0,1 N (PFe) y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5 N (PCa), fue realizado por colorimetría, utilizándose el ácido ascórbico como reductor según Alexander & Robertson (1970). El ajuste de la acidez de los extractos de fluoruro de amonio a pH 5 fue realizado por el agregado de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  puro. En los extractos de NaOH y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  el ajuste a pH 5 fue realizado con NaOH 2 N. El P ocluido (POcl) fue calculado por la diferencia entre el P total y la suma de PAI + PFe + PCa + P orgánico (Roche et al., 1980).

- e) P disponible-Bray I determinado según Bray & Kurtz (1945) modificado. El tiempo de agitación fue aumentado a 5 minutos. La determinación de P en el extracto fue realizada según Murphy & Riley (1962).
- f) P disponible determinado por el método de resinas de intercambio catiónico de Zamuz & Castro (1974) modificado. Se colocaron 5 g de suelo molido y pasado en tamiz de 1 mm en frasco plástico con tapa de 100 ml de capacidad, donde se agregó una medida volumétrica (equivalente a 2 g) de resinas Dowex 50 W X 8 en la forma  $\text{H}^+$  y 50 ml de agua destilada. Se agitó durante 3 horas y se dejó decantar toda la noche. Posteriormente se agregaron 10 gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  5 N dejando en reposo hasta que el extracto quedó claro (no más de 1 hora y 30 minutos). A continuación se tomó una alícuota de 5 ml agregándole 8 ml de reactivo según Murphy & Riley (1962) y se completó a 50 ml. La lectura se realizó en un espectrofotómetro a 882 nm de longitud de onda.

### Determinación de la retención de fósforo según las isotermas de adsorción

Para construir las isotermas de adsorción de fósforo se siguió el procedimiento utilizado por Escudero & Morón (1978) con modificaciones. De las muestras de suelo de cada parcela de los sistemas 1, 2 y 5 -correspondientes a los años 1986 y 1987- se tomaron seis submuestras de 3 g cada una. A cada muestra de 3 g de suelo seca y tamizado a 1 mm se le agregó 30 ml de  $\text{CaCl}_2$  0,01 M en tubos de vidrio de 100 ml. El cloruro de calcio agregado contenía concentraciones variables de P ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) para obtener concentraciones de 0, 5, 25,

100, 250, y 500  $\mu\text{g}$  de P/g de suelo. Las suspensiones eran agitadas durante 18 horas, siendo posteriormente centrifugadas a 2.000 rpm durante 15 minutos. Del sobrenadante se tomaron alícuotas que fueron convenientemente diluidas y sometidas a la determinación de la concentración de fósforo. La colorimetría fue realizada agregando 8 ml de reactivo propuesto por Murphy & Riley (1962) y completado el volumen a 50 ml. La temperatura ambiente en el laboratorio oscilaba entre 18 y 21 °C. El P retenido por el suelo fue calculado como la diferencia entre el P inicialmente adicionado en la solución y la parte agregada que quedó en la solución después del equilibrio. Con los valores de P retenido en  $\mu\text{g}$  P/g de suelo y la concentración de P en la solución en equilibrio ( $\mu\text{g}$  P/ml), se construyeron las isotermas de adsorción. Para los dos años considerados en cada Sistema se determinó la media de la concentración de P en la solución y la media del P retenido en la fase sólida para una misma dosis de P agregado. Así, se obtuvo la isoterma de adsorción media de bloques y años 1986-87. Por tanto, cada valor es un promedio de seis análisis (3 bloques x 2 años).

### Determinación del fósforo presente en la biomasa microbiana del suelo

El fósforo presente en la biomasa microbiana del suelo fue analizado según la metodología (fumigación con cloroformo) propuesta por Brookes et al. (1982). Se partió de muestras frescas de cada parcela de los tres sistemas que fueron tomadas el 28/06/89. La calorimetría fue realizada según Murphy & Riley (1962). Se asumió que el 40% del P presente en la biomasa microbiana se extraía como P inorgánico por la fumigación con cloroformo ( $K_p = 0,4$ ) de acuerdo con Brookes et al. (1982).

### Métodos estadísticos

Con el objetivo de conocer la tendencia de la evolución de las diferentes formas de fósforo estudiadas a lo largo de todo el período 1964-87, se ajustaron regresiones lineales (método de mínimos cuadrados) con sus respectivos coeficientes de correlación para las diversas variables: Pt, Porg, Pinor, PAI, PFe, PCa, POcl, P Bray I, P

resinas (POCl/Pinor) . 100, en función del tiempo. Para cada sistema se tomaron los valores promedio de cada año. Se verificó si los coeficientes angulares eran significativamente diferentes de cero, en cuyo caso se calculaban los intervalos de confianza al 95% de probabilidad. El posible efecto del cambio introducido en las repeticiones desde 1974, fue estadísticamente analizado por Morón (1990), no siendo significativo para la amplia mayoría de las variables estudiadas.

Con el objetivo de conocer que fracciones o relación entre fracciones de fósforo mejor explican la variación en P disponible (Bray I, resinas) se realizó un análisis de correlación y regresión múltiple. Se consideraron los resultados analíticos promedio para cada uno de los tres sistemas en cada año del período 1964-87. El programa utilizado pertenece al paquete estadístico Statpak, programa "step wise", método "forward". El programa está ordenado para que las distintas variables sean incorporadas una a una, en orden de importancia según su contribución en la variación del P disponible. La contribución mínima exigida para entrar en la ecuación fue un F de entrada significativo al 1% .

Para las isotermas de adsorción de cada Sistema se ajustó una función polinomial de 4° grado a partir de la cual se calculó el P retenido en la fase sólida para 0,1 µg de P/ml en la solución.

Para los diferentes análisis estadísticos se utilizaron tres niveles de probabilidad: 10% (\*), 5% (\*\*) y 1% (\*\*\*).

## Balance de fósforo

La inexistencia de información que permitiera cuantificar la salida de fósforo del área de estudio por las dos vías principales -remoción por las cosechas y erosión- dificultaba la realización de un balance del nutriente en el suelo. Considerando el gran esfuerzo y el número de años dedicados, se realizó una estimación de los datos faltantes para lograr una aproximación al balance.

Los flujos de entrada y salida fueron expresados como tasas anuales en kg de  $P_2O_5$ /ha/año referidos al horizonte superficial (0-20 cm). Se consideraron las siguientes vías de salida:

1) Extracción por las cosechas (CP). Fue calculada a partir de los rendimientos de las cosechas y de la concentración de P

en los granos cosechados. Esto último fue estimado en base a tablas publicadas por el National Research Council (1982) e informaciones no publicadas del Proyecto Suelos de la Estación Experimental Alberto Boerger (INIA-La Estanzuela).

- 2) Erosión (EP). En este término fueron consideradas las pérdidas por escurrimiento superficial tanto de P en solución como de P en los sedimentos. Las pérdidas de P por lixiviación, presumiblemente despreciables, también estarían incluidas en este término. El valor EP fue calculado de la ecuación (1) de balance de P total -para la profundidad 0-20 cm- para cada sistema.
- 3) Movimiento del fertilizante fosfatado a la camada inferior de suelo (20-40 cm), abreviado FCI. Fueron colectadas muestras en la profundidad 20-40 cm en cada parcela de los tres sistemas en Agosto de 1989 para análisis de P total según metodología anteriormente descrita. La diferencia entre los promedios de los sistemas 2 y 5 y el resultado del Sistema 1 fue considerada como producto del trabajo mecánico del suelo y/o movimiento descendente causado por las raíces de las plantas (Read & Campbell, 1981). Se asumió que esa diferencia fue el resultado del movimiento anual de idénticas cantidades de P en el período 1963-89. Para las transformaciones de concentraciones a cantidades absolutas se utilizaron los valores de densidad del suelo de 1,26 g/cm<sup>3</sup>, 1,22 g/cm<sup>3</sup> y 1,06 g/cm<sup>3</sup> respectivamente (García et al., 1979).

Las entradas de fósforo en el horizonte 0-20 cm consideradas fueron las siguientes:

- 1) Fósforo proveniente de las aplicaciones de fertilizante, FP.
- 2) Fósforo existente en las camadas inferiores y que pasó a pertenecer a la camada 0-20 cm debido a la remoción de suelo superficial por la erosión, abreviado como SP. García et al. (1983), utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo de Wischmeier & Smith (1978), estimaron las pérdidas anuales de los sistemas 1, 2 y 5 en 27,18; 23,72 y 9,39 toneladas de suelo por hectárea. Considerando que las camadas del suelo tengan la misma densidad, esas mismas cantidades de suelo estarían ingresando

en la camada superior 0-20 cm. La cantidad de P que ingresa -para los sistemas 1, 2 y 5- fue calculada considerando la concentración de P total existente en la camada 20-40 cm del Sistema 1 en 1989 dado que este sistema no recibió fertilizante fosfatado. La posible absorción de P desde el horizonte 20-40 cm por las plantas, y su transferencia hasta el horizonte 0-20 cm -especialmente en el Sistema 1- no fue considerado por no tener informaciones al respecto.

Los cambios en la concentración de P total en la profundidad 0-20 cm sería el balance entre los flujos de entrada y salida, reflejándose en los valores de los coeficientes angulares de las regresiones ajustadas

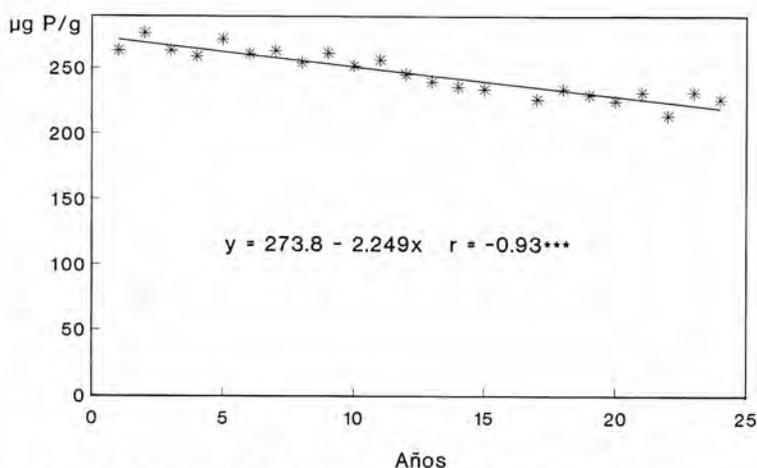


Figura 1. Evolución de la concentración de fósforo total en el Sistema 1 durante el período 1964-87.

Cuadro 2. Fósforo total ( $\mu\text{g}$  de P/g) en la profundidad 20-40 cm.

|          | Sistema 1 | Sistema 2 | Sistema 5 |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| Bloque 1 | 196.3     | 209.7     | 223.1     |
| Bloque 2 | 196.3     | 216.4     | 236.5     |
| Bloque 3 | 216.4     | 203.0     | 216.4     |
| Media    | 203.0     | 209.7     | 225.3     |

para P total en los sistemas 1, 2 y 5. Para transformar las concentraciones en cantidades absolutas (AP) se utilizaron los valores de densidad aparente previamente citados.

De acuerdo con lo anteriormente discutido se estableció la siguiente ecuación general:

$$AP = FP + SP - CP - EP - FCI \dots\dots\dots(1)$$

El resultado de la ecuación (1) informa si existieron pérdidas o ganancias de fósforo en el suelo, pero se trata de un balance aparente dado que el balance real debería contabilizar las entradas y salidas de P de la camada inferior (20-40 cm).

El balance real (BR), de 0 a 40 cm, fue calculado según la siguiente ecuación:

$$BR = AP - SP + FCI \dots\dots\dots(2)$$

Sustituyendo la ecuación (1) en la ecuación (2) y simplificando, el balance real queda reducido a la siguiente expresión:

$$BR = FP - CP - EP \dots\dots\dots(3)$$

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Sistema 1: agricultura continua sin fertilización

El Sistema 1, constituido por agricultura continua sin fertilización y sin tratamiento alguno de conservación de suelo, puede ser considerado como la condición de utilización con máxima degradación.

### Balance de fósforo

En la figura 1 se observa que existió una pérdida consistente de P total a lo largo del período estudiado. La regresión muestra una pérdida anual de  $2,25 \mu\text{g}$  de P/g. Admitiendo una densidad de suelo de  $1,26 \text{ g/cm}^3$  (García et al., 1983) las pérdidas anuales aparentes (AP) serían de  $12,93 \text{ kg}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha/año}$ .

La estimativa de la pérdida anual de P debido a extracción por las cosechas (CP) fue de  $7,04 \text{ kg}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha/año}$ , con una desviación estándar de 2,74.

Los análisis de P total en la profundidad 20-40 cm del Sistema 1, realizadas en agosto de 1989, presentaron un valor promedio de  $203 \mu\text{g}$  de P/g (cuadro 2). En consecuen-

**Cuadro 3.** Aproximación a un balance de fósforo total (kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/año) en el Sistema 1.

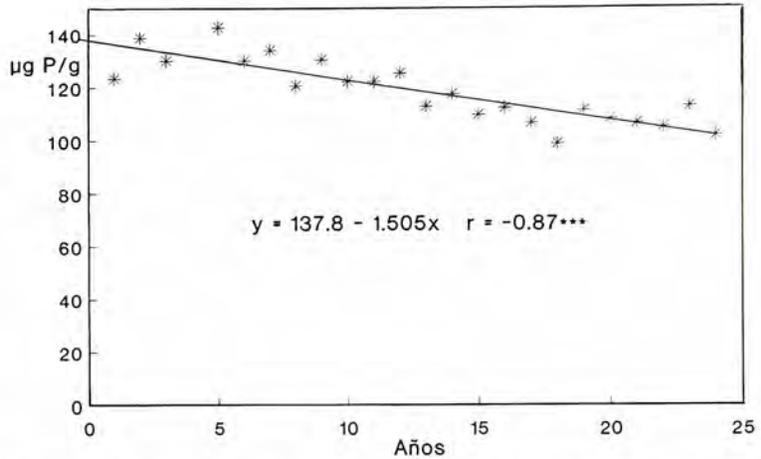
| ← 0-20 cm → |       |         |       |     | ← 0-40 cm → |         |
|-------------|-------|---------|-------|-----|-------------|---------|
| Entradas    |       | Salidas |       |     | Balance     | Balance |
| FP          | SP    | CP      | EP    | FCI | AP          | BR      |
| 0           | 12.64 | 7.04    | 18.52 | 0   | -12.93      | -25.57  |

cia, se estimó que ingresaban 12,64 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/año por la incorporación de camadas de suelo inferior a la profundidad originalmente considerada de 0-20 cm (SP).

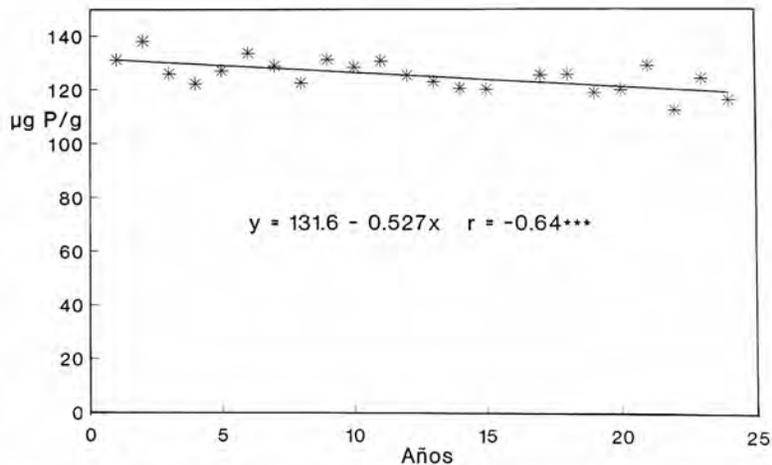
Las pérdidas anuales por erosión (EP), calculadas según la ecuación (1), serían de 18,52 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/año.

El cuadro 3 resume el balance de P obtenido para el Sistema 1. La erosión fue la principal vía de salida del fósforo del Sistema 1, con pérdidas 2,6 veces superior a la cantidad extraída por las cosechas. Para este sistema de producción, según la revisión de Sharpley & Menzel (1987) se puede suponer que el fósforo perdido por la erosión se encuentra principalmente en los sedimentos, siendo mínima la proporción en solución. Según estos autores, la biodisponibilidad del P presente en los sedimentos es muy variable. Probablemente el valor de la unidad de P perdido por la erosión sea de menor disponibilidad para las plantas que aquel que se encuentra en el fertilizante o que es extraído por las cosechas. No obstante, de acuerdo con los resultados de Sharpley (1985) es de esperar que el P perdido en las partículas de suelo sea de mayor valor para la nutrición de las plantas que el encontrado en el suelo del cual se originó.

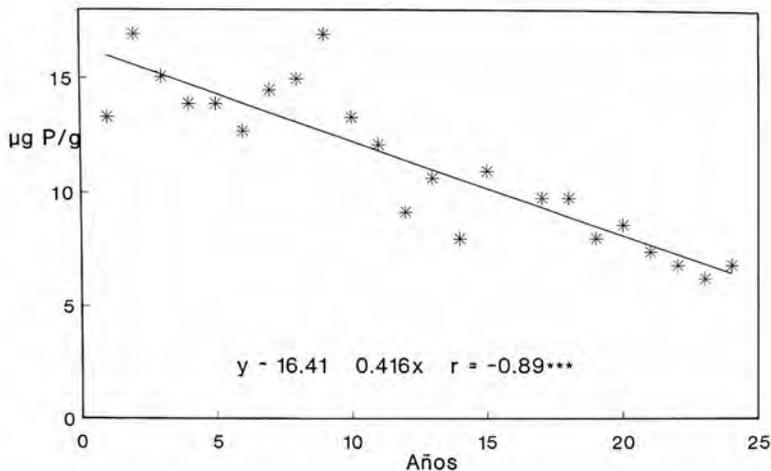
García (1983) llamo la atención sobre el hecho que las pérdidas de suelo en este experimento podrían ser disminuidas en 50% solamente realizando cultivos que respetasen las curvas de nivel. Considerando que las pérdidas de P por erosión son más selectivas cuanto menor es la cantidad de suelo perdido (Menzel, 1980; Sharpley, 1980; Sharpley, 1985; McDowell et al., 1989) igual es de esperar una reducción significativa de las pérdidas de fósforo cuando se reducen las pérdidas de suelo. Importantes reducciones en las pérdidas de P total por los procesos erosivos fueron obtenidos por McDowell & McGregor (1984) y O'Hallo-



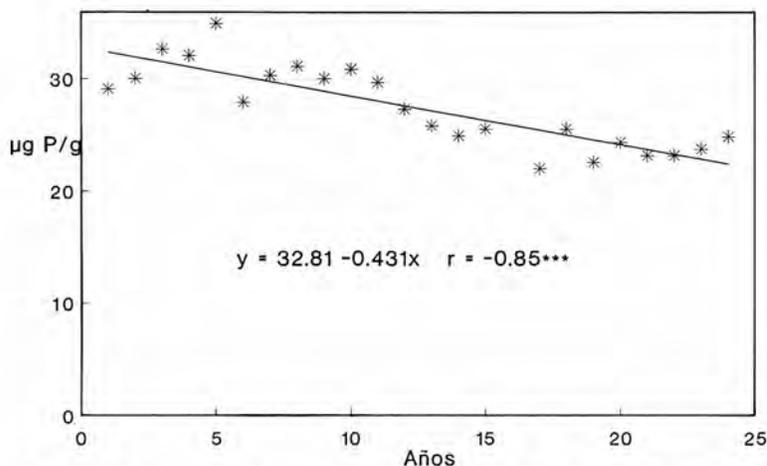
**Figura 2.** Evolución de la concentración de fósforo orgánico en el Sistema 1 durante el período 1964-87.



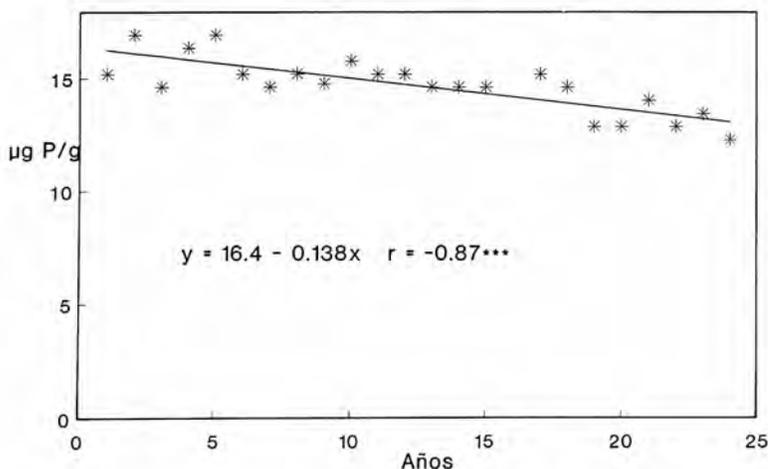
**Figura 3.** Evolución de la concentración de fósforo inorgánico en el Sistema 1 durante el período 1964-87.



**Figura 4.** Evolución de la concentración de fosfato de aluminio en el Sistema 1 durante el período 1964-87.



**Figura 5.** Evolución de la concentración de fosfato de hierro en el Sistema 1 durante el período 1964-87.



**Figura 6.** Evolución de la concentración de fosfato de calcio en el Sistema 1 durante el período 1964-87.

ran et al. (1987) con la aplicación de prácticas de conservación de suelos.

Según la función ajustada en la figura 1, el contenido de P total disminuyó en el período 1964-87 un 19%. Este hecho, conjuntamente con un balance real (BR = -25,27 kg de  $P_2O_5$ /ha/año) claramente negativo, constituyen indicadores primarios de rápida degradación del fósforo del suelo cuando éste es sometido a agricultura continua sin fertilización y sin medidas de conservación de suelo.

### Cambios en el estado interno del fósforo en el Sistema 1

La figura 2 representa la evolución del P orgánico en el período 1964-87, donde se observa que la pérdida anual de esa fracción fue de 1,5 µg de P/g. Esta pérdida es notoriamente superior a la presentada por la fracción inorgánica en la figura 3.

Según las funciones ajustadas, mientras que el P orgánico disminuyó 25,4% en el período 1964-87, el P inorgánico bajó sólo 9,2%, mostrando que la fracción inorgánica tiende a predominar con el tiempo. El hecho que la fracción orgánica sea más afectada que la fracción inorgánica en rotaciones agrícolas no fertilizadas o fertilizadas con cantidades muy bajas de nutrientes, fue reportado por diversos autores (Hass et al., 1961; Tiessen et al., 1982; Dalal & Meyer, 1986; Parton et al., 1988). No obstante no se conozca cuánto de la disminución del P orgánico es explicada por la erosión y por la mineralización, la magnitud en que es afectada merecería atribuirle un papel de reservorio.

Respecto al fraccionamiento del P inorgánico (figuras 4, 5 y 6) se observa que las pérdidas de las fracciones PAI y PFe son superiores a las registradas para la fracción PCa. La acción combinada de la extracción por las plantas y la erosión -los dos procesos selectivos- explicarían esta tendencia. El estudio realizado por Scheffer et al citado por Black (1975) mostró que las fracciones PAI y PFe difieren de la fracción PCa porque aquéllas se concentran en las fracciones granulométricamente más finas. Esto haría que las fracciones PAI y PFe se tornasen más susceptibles a las pérdidas en los sedimentos del escurrimiento superficial. Por otra parte, Kamprath & Watson (1980) afirman -en términos generales- que la fracción PAI es la fuente primaria de fósforo para las

plantas. Conceptos similares fueron expresados por Mendez (1975) trabajando en un suelo de la Estación Experimental Alberto Boerger, semejante al utilizado en el presente trabajo.

En términos porcentuales para el período 1964-87, la pérdida de PCa fue de 19,6%, valor prácticamente igual al de la pérdida de P total (19,0%). Por el contrario, la fracción PAI disminuyó un 60% en el mismo período, lo cual demuestra que es una fracción altamente susceptible a perderse con el manejo adoptado en el Sistema 1. Las pérdidas de la fracción PFe (30,6%) fueron intermedias a las registradas en las fracciones PCa y PAI.

En la figura 7 se observa que la regresión de la concentración de P ocluido con el tiempo no fue significativa, indicando que su concentración es estable en el suelo a través del tiempo y que no es afectado por los procesos selectivos. Su presencia en la fracción arena fue reportada por Syers et al. (1969) para un suelo aluvial, este hecho le daría a esta fracción mayor estabilidad frente al proceso erosivo. No se posee información sobre la relación entre el P ocluido y las fracciones granulométricas en el suelo estudiado, pero se presume que el P ocluido se encuentre en mayor concentración en las fracciones más gruesas.

Sharpley & Smith (1985) utilizando el fraccionamiento de Chang & Jackson (1957) modificado, encontraron tendencias semejantes para el P ocluido de un suelo franco limoso no calcáreo, cultivado durante 60 años sin recibir ninguna fertilización fosfatada. En ese estudio, la concentración de P ocluido permanecía estable mientras que el P total y el P orgánico disminuían. La diferencia entre el resultado de los autores antes mencionados y los obtenidos en el Sistema 1 está en el hecho de que la fracción P no ocluido (PAI + PFe) aumentaba su concentración, debido -según los mismos- a la incorporación de residuos orgánicos y a la adsorción de P mineralizado.

En el comienzo del período en estudio la cantidad de P ocluido era aproximadamente el 54% del P inorgánico total, aumentando ese valor en el transcurso del tiempo (figura 8). Así, la calidad de la fracción inorgánica tendió a disminuir con el tiempo. El valor inicial de 54% es superior a las tendencias generales sugeridas por Smeck (1985) para suelos del orden Molisol. Es posible que, así como su valor aumentó en el período de agricultura 1964 a 1987, los 50 ó 60 años de agricultura previa hayan actuado en el mis-

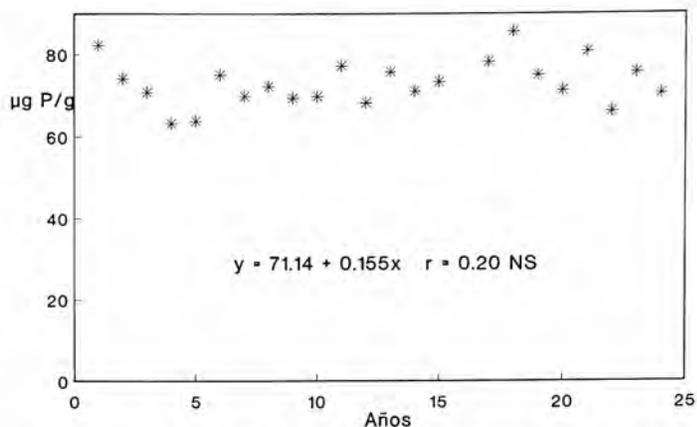


Figura 7. Evolución de la concentración de fosfato ocluido en el Sistema 1 durante el período 1964-87.

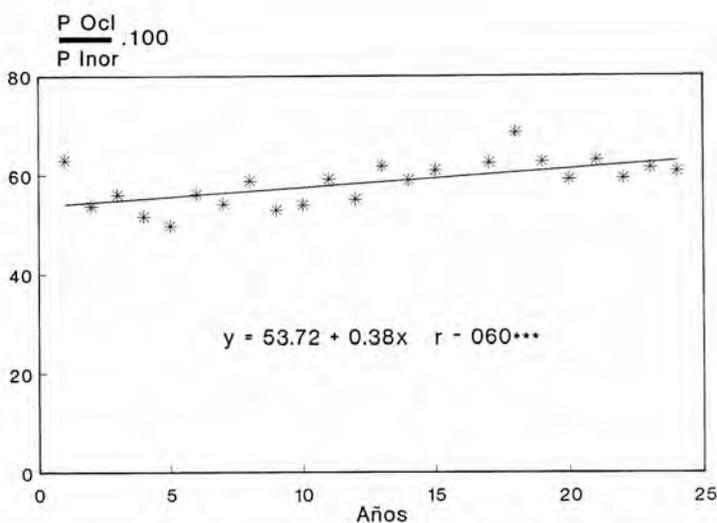


Figura 8. Evolución de la relación P ocluido/P inorgánico en el Sistema 1 durante el período 1964-87.

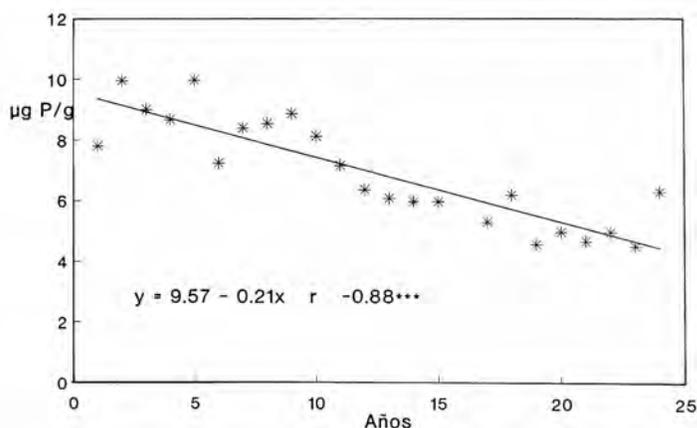
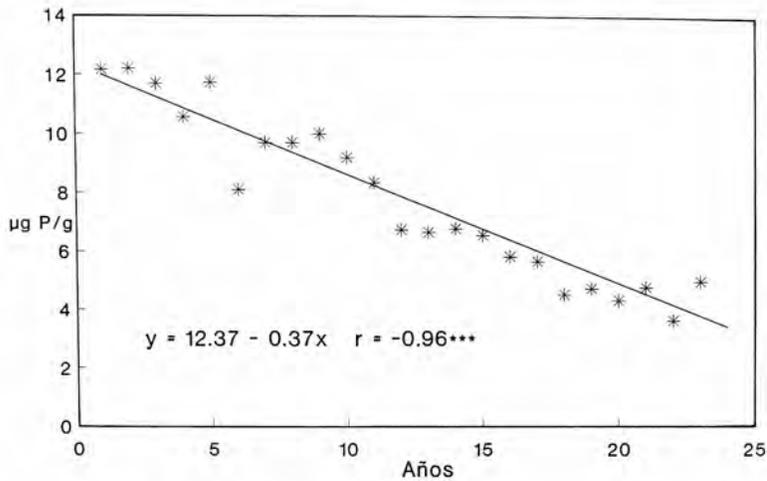
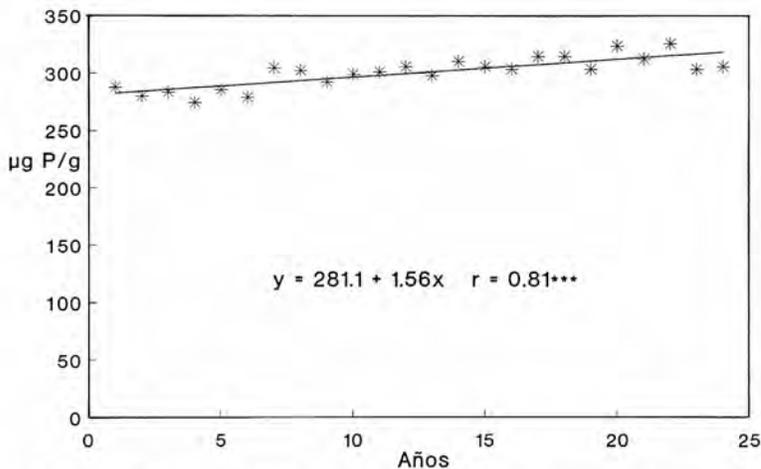


Figura 9. Evolución de la concentración de P disponible-Bray I en el Sistema 1 durante el período 1964-87.



**Figura 10.** Evolución de la concentración de P disponible-resinas en el Sistema 1 durante el período 1964-87.



**Figura 11.** Evolución de la concentración de fósforo total en el Sistema 2 durante el período 1964-87.

mo sentido que lo observado en el período 1964-87.

El P disponible-Bray I (figura 9), de la misma forma que el obtenido por el método de resinas (figura 10), presentan una acentuada disminución a lo largo del período de uso del suelo. Los valores iniciales de P disponible-resinas fueron mayores que los tenores normalmente descritos para suelos de este tipo no fertilizados (Castro et al., 1981b). No existen registros, pero es posible que el área haya recibido fertilización fosfatada previo a este experimento. Considerando las reacciones entre el P aplicado y el suelo, era de esperar una curva de extinción como las presentadas por diversos

autores (Barrow, 1974; Castro et al., 1981a; Morón & Pérez, 1981). La acción de la erosión, conjuntamente con la extracción de los cultivos, probablemente hayan contribuido para que la disminución del tenor de P disponible sea lineal con el tiempo.

En resumen, la agricultura continua sin fertilización ni conservación de suelo conduce a una significativa pérdida de P total, principalmente por erosión, y de P ligado a la fracción orgánica. También se registra una acentuada pérdida de aquellas fracciones inorgánicas de mayor significación para la nutrición de las plantas (PAI y PFe). Estos hechos indican que el Sistema 1 -para el fósforo- no es sustentable a mediano plazo.

Como fue comentado al tratar el balance de P total, medidas simples de conservación de suelo contribuirían a que las pérdidas de suelo por erosión se tornaran más lentas, especialmente de aquellas fracciones más relacionadas con el suministro del nutriente para las plantas como PAI y PFe.

## Sistema 2 : agricultura continua con fertilización

El Sistema 2, constituido por agricultura continua con fertilización y sin medidas de conservación de suelo, teóricamente constituye una condición de utilización que provoca menor degradación que el Sistema 1.

### Balance de fósforo

En la figura 11 se presenta la evolución del contenido de P total para el período 1964-87. La regresión ajustada muestra un aumento anual de  $1,56 \mu\text{g}$  de P/g. Considerando la densidad de suelo igual a  $1,22 \text{ g cm}^{-3}$  (García et al., 1979) la ganancia anual aparente (AP) sería de  $8,73 \text{ kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha/año}$ .

La fertilización nitrogenada y fosfatada aplicada al Sistema 2 en el período 1964-87 provocó un rendimiento medio en grano 44% superior al registrado en el Sistema 1. Este hecho, conjuntamente con una mayor concentración de fósforo estimada para los granos cosechados en este Sistema, determinó una extracción por los cultivos de  $13,94 \text{ kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha/año}$ , con una desviación estándar de 6,17. La extracción de P por los cultivos en este sistema fue prácticamente el doble de la estimada para el Sistema 1.

**Cuadro 4.** Aproximación a un balance de fósforo total (kg de  $P_2O_5$ /ha/año) en el Sistema 2.

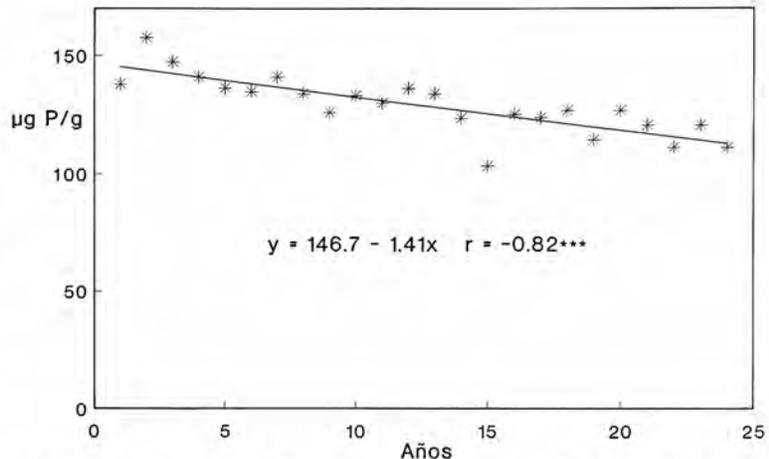
| ← 0-20 cm → |       |         |       |      | ← 0-40 cm → |         |
|-------------|-------|---------|-------|------|-------------|---------|
| Entradas    |       | Salidas |       |      | Balance     | Balance |
| FP          | SP    | CP      | EP    | FCI  | AP          | BR      |
| 39.83       | 11.03 | 13.94   | 26.74 | 1.44 | +8.73       | -0.86   |

El ingreso de fósforo por la incorporación de camadas de suelo inferiores a la profundidad originalmente considerada (0-20 cm) fue calculado en 11,03 kg de  $P_2O_5$ /ha/año.

El análisis de P total para la profundidad 20-40 cm presentó un valor medio de 209,7  $\mu\text{g}$  de P/g (cuadro 2), el cual es superior al valor medio del Sistema 1. Así, el movimiento anual de fósforo hacia la camada inferior (20-40 cm) habría sido de 1,44 kg de  $P_2O_5$ /ha/año.

Al igual que en el Sistema 1, la erosión fue la principal vía de salida de P. La cantidad pérdida por erosión (26,74 kg de  $P_2O_5$ /ha/año) fue prácticamente el doble que la removida por los cultivos (13,94 kg de  $P_2O_5$ /ha/año). Las pérdidas de suelo estimadas para el Sistema 2 fueron inferiores a las del Sistema 1. A pesar de este hecho, las pérdidas de P total por erosión presentaron una situación inversa. Sharpley (1980) demostró para distintos suelos, que la fertilización fosfatada provoca acentuados aumentos en la razón de enriquecimiento. Probablemente la menor pérdida de suelo por erosión en el Sistema 2, en relación al Sistema 1, sea más que compensada por al aumento de la razón de enriquecimiento en P total.

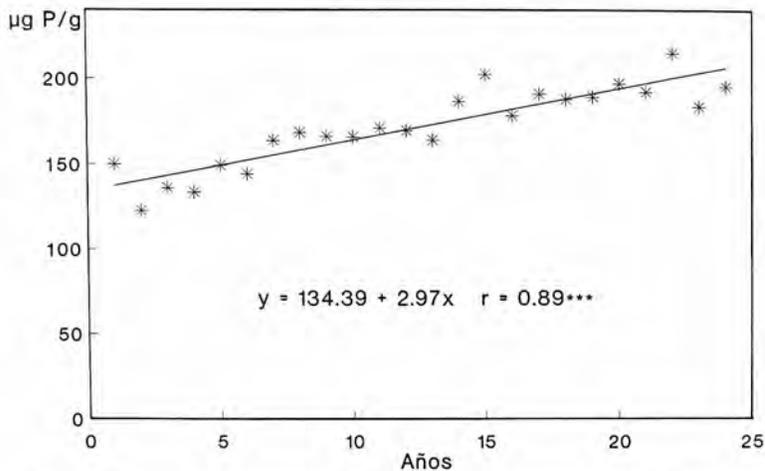
En el cuadro 4 se puede observar que el balance real (BR) de fósforo para el Sistema 2 fue de -0,86 kg de  $P_2O_5$ /ha/año, lo cual indica una condición próxima del equilibrio. Conforme fue visto, el balance real del Sistema 1 (BR = -25,57 kg de  $P_2O_5$ /ha/año) fue fuertemente negativo. Podría preverse que un agregado de 40 kg de  $P_2O_5$ /ha/año invirtiese el balance, pero esto no se cumplió dado que los flujos de salida del Sistema 2 presentan claros aumentos en la extracción por las cosechas y en las pérdidas por erosión. Esto conduce a un balance real cercano al equilibrio.

**Figura 12.** Evolución de la concentración de P orgánico en el Sistema 2 durante el período 1964-87.

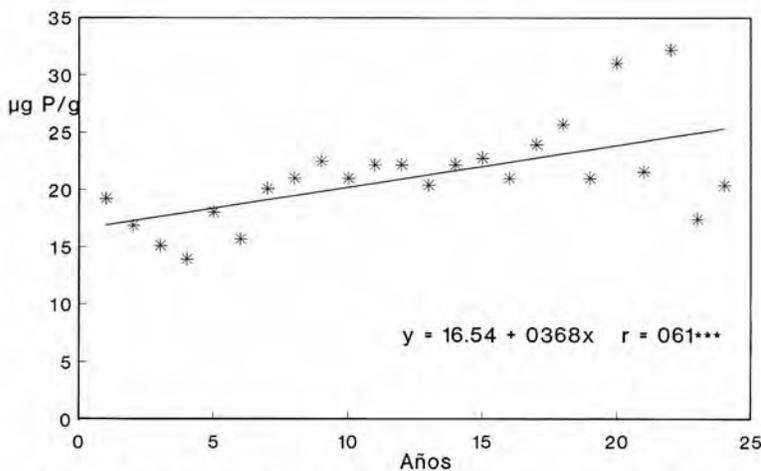
A pesar de presentar un balance real cercano a cero, las pérdidas por erosión son muy elevadas. Los comentarios sobre el impacto de medidas simples de conservación de suelo realizados para el Sistema 1 son válidos para este Sistema.

### Cambios en el estado interno del fósforo en el Sistema 2

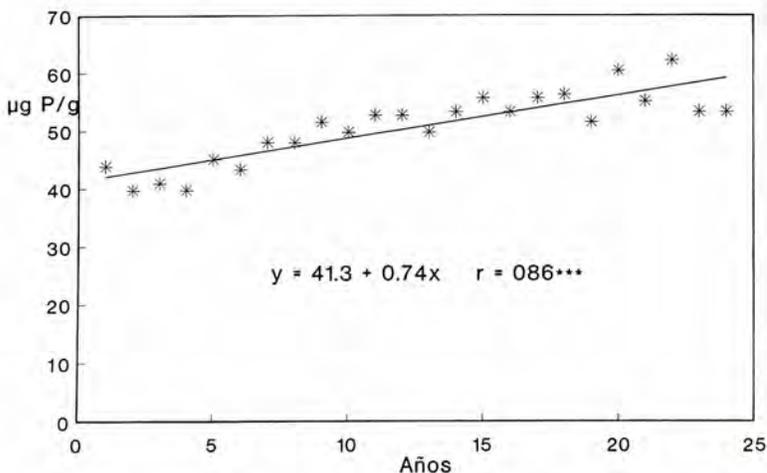
En la figura 12 se observa la evolución del P orgánico a lo largo del período estudiado. La disminución anual del tenor de esa fracción entre 1964 y 1987 fue de 1,41  $\mu\text{g}$  de P/g. Esta disminución fue prácticamente igual a la registrada en el Sistema 1, por tanto se puede deducir que la fertilización no detuvo la caída del P orgánico. Este hecho coincide con lo observado por Hass et al. (1961) y Sharpley & Smith (1983). Según la teoría de McGill & Cole (1981), la minerali-



**Figura 13.** Evolución de la concentración de P inorgánico en el Sistema 2 durante el período 1964-87.



**Figura 14.** Evolución de la concentración de fosfato de aluminio en el Sistema 2 durante el período 1964-87.



**Figura 15.** Evolución de la concentración de fosfato de hierro en el Sistema 2 durante el período 1964-87.

zación del P orgánico en el Sistema 2 sería menor que en el Sistema 1, debido a la represión ejercida por el P disponible proveniente de la fertilización sobre las fosforilasas.

EIP inorgánico -con una tendencia inversa al Sistema 1- presentó un acentuado aumento en su concentración en el período estudiado (figura 13). Tendencias semejantes también fueron reportadas por Hass et al. (1961) y Sharpley & Smith (1983) para los suelos agrícolas fertilizados.

Tomando como base las regresiones lineales ajustadas para P total y P inorgánico, se puede calcular que el porcentaje de P inorgánico en relación a P total varió de 48,6% para 1964 a 64,6% en 1987. La tendencia al predominio de la fracción inorgánica en este Sistema fue más acentuada que en el Sistema 1. Hass et al. (1961) también encontraron que en las rotaciones agrícolas continuas, el agregado de estiércol determinaba que el P inorgánico ocupase un porcentaje más elevado del P total. Por tanto, el aumento en la concentración de P total es explicado por el incremento de P inorgánico, el cual supera las disminuciones de la fracción orgánica.

Las tres fracciones inorgánicas no ocluidas (PAI, PFe y PCa) aumentaron su concentración desde 1964 a 1987 (figuras 14, 15 y 16). El incremento porcentual en el contenido de cada una de las tres fracciones osciló entre 41 y 52%, siendo los fosfatos de hierro la fracción que presentó los mayores incrementos absolutos.

Méndez (1975), trabajando con un suelo semejante por un período de un año, determinó que dentro de las fracciones inorgánicas no ocluidas el mayor incremento absoluto producido por la fertilización era para la fracción PAI, en segundo lugar para PFe y por último para PCa.

El PAI sería la principal forma de retención a corto plazo, dado que luego esta fracción sufriría disminución por dos mecanismos: a) utilización por las plantas y b) solubilización y retención como PFe (Shelton & Coleman, 1968). Este último mecanismo explicaría el predominio de la retención de P como PFe en el período 1964-87.

La fracción PCa presentó una ligera disminución en el Sistema 1, mientras que en el Sistema 2 mostró un aumento relativamente acentuado, superando a la formación de la fracción PAI. En términos porcentuales, el PCa fue la fracción que presentó mayor incremento durante el período 1964-87.

En la figura 17 se puede observar que el P ocluido aumento su concentración a una tasa de 1,42 µg de P/g/año. Este valor indica la importancia de la retención de P en una de las formas más desfavorables para la nutrición de las plantas. El contraste entre el comportamiento del P ocluido en el Sistema 1 y el Sistema 2 podría ser comparado a un depósito en el cual el flujo de ingreso es ampliamente dominante sobre la liberación. El efecto de extracción continua y sistemática de fósforo por las plantas durante 23 años, en un suelo con un bajo nivel de disponibilidad de ese elemento como el Sistema 1, no provocó cambios en la concentración de P ocluido (figura 7).

El hecho de que una parte del P aplicado como fertilizante sea convertida en P ocluido fue mencionado por Shelton & Coleman (1968) para un suelo con alta capacidad de fijación de P. También Sharpley & Smith (1985) constataron, en dos suelos agrícolas no calcáreos, fertilizados y cultivados por períodos entre 30 y 50 años, aumentos en el tenor de P ocluido. Los mismos autores registraron que la fracción ocluida fue prácticamente inexistente y no alterada con los años de cultivos y fertilización, para la mayoría de los suelos calcáreos estudiados.

La liberación de fósforo de la fracción ocluida parecería sólo ser posible sometiendo el suelo a inundaciones que conduzcan, durante determinados períodos de tiempo, a condiciones de reducción (Patrick & Mahapatra, 1968; Sah & Mikkelsen, 1986).

Según se observa en la figura 18 el destino del P aplicado como fertilizante parece distribuirse proporcionalmente según el peso relativo de las fracciones ocluida y no ocluida. Así, la calidad de la fracción inorgánica permanecería relativamente estable. Los resultados de Sharpley & Smith (1985) difieren: en dos suelos no calcáreos, el cultivo y la fertilización que variaba entre 30 y 50 años provocaban disminuciones porcentuales del P ocluido, relativas al conjunto de las formas de fósforo.

Como era de esperar, la concentración de P disponible-Bray I aumento con el tiempo (figura 19), acompañando la tendencia general de la fracción inorgánica. Para el P disponible-resina (figura 20), si bien la tendencia general es semejante, el coeficiente de correlación lineal no fue significativo.

Para los dos métodos de análisis se puede constatar que el Sistema 2 presentó valores relativamente aceptables para la producción de cultivos según las calibraciones presentadas por Castro et al. (1981b)

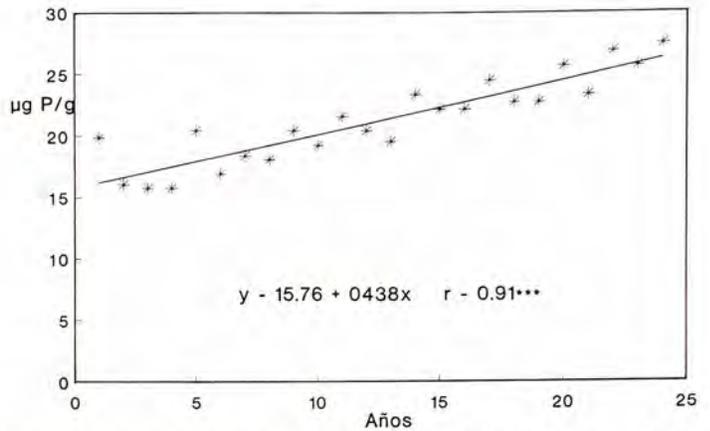


Figura 16. Evolución de la concentración de fosfato de calcio en el Sistema 2 durante el período 1964-87.

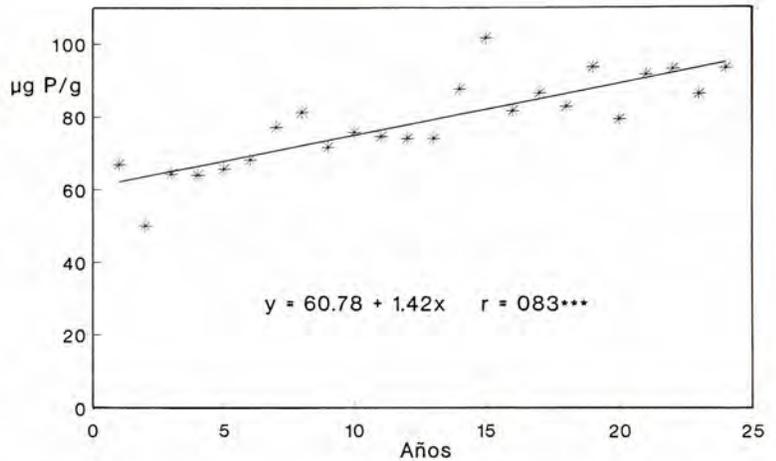


Figura 17. Evolución de la concentración de fosfato ocluido en el Sistema 2 durante el período 1964-87.

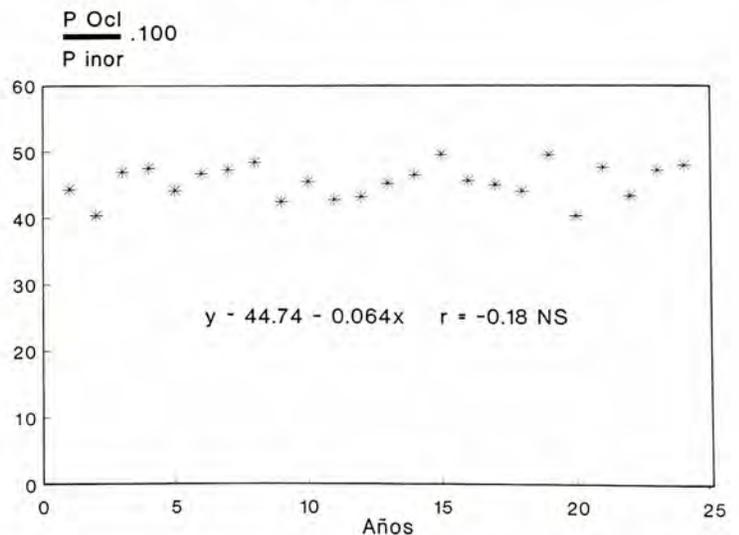
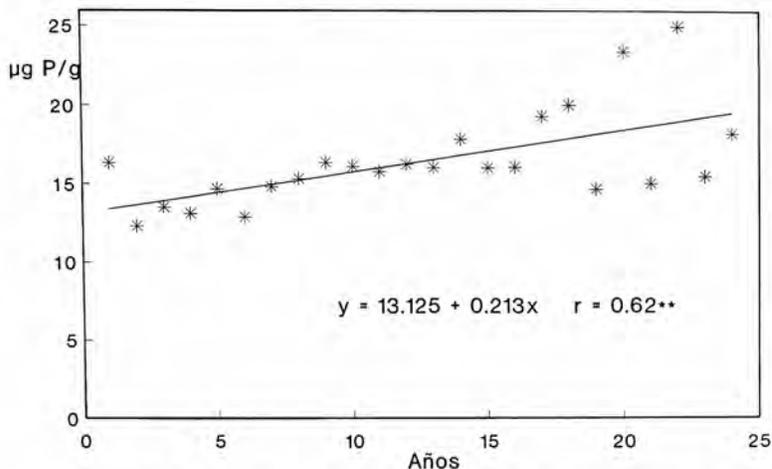
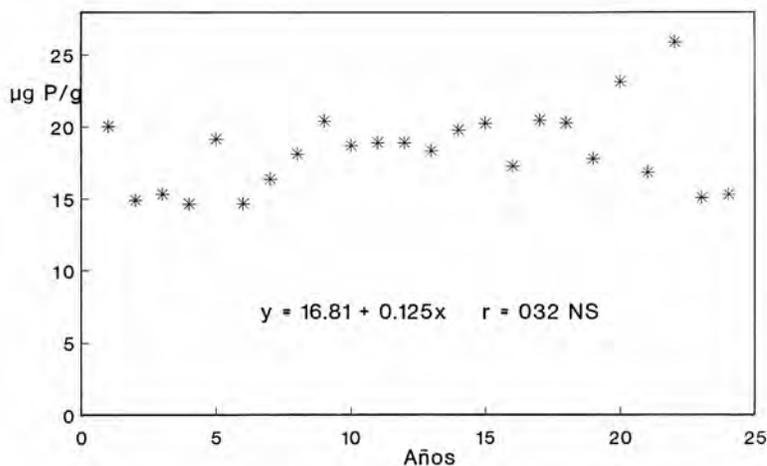


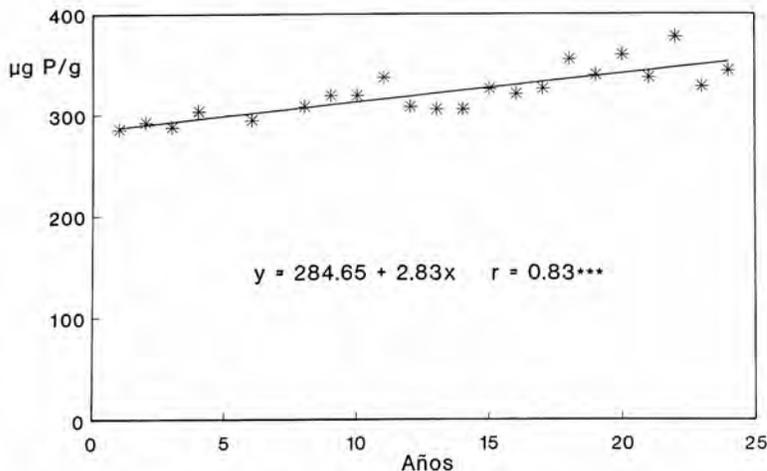
Figura 18. Evolución de la relación P ocluido/P inorgánico en el Sistema 2 durante el período 1964-87.



**Figura 19.** Evolución de la concentración de P disponible-Bray I en el Sistema 2 durante el período 1964-87.



**Figura 20.** Evolución de la concentración de P disponible-resinas en el Sistema 2 durante el período 1964-87.



**Figura 21.** Evolución del fósforo total en el Sistema 5 durante el período 1964-87.

y Pérez et al. (1981). En las figuras 19 y 20 se observa que en los últimos 5 años existió mayor dispersión de los valores, siendo interesante señalar que la fracción PAI (figura 14) presentó el mismo padrón de comportamiento.

Resumiendo, la agricultura continua con fertilización y sin conservación de suelos logra aproximarse a una situación de equilibrio real en términos de P total. Las salidas de P por extracción de los cultivos y erosión aumentaron en relación al Sistema 1. La fertilización aumentó las fracciones inorgánicas aproximadamente en la misma proporción de su peso relativo, quedando cerca del 48% en la fracción ocluida. La fertilización no detuvo la disminución del tenor de P orgánico.

Los niveles relativamente aceptables de P disponible, así como un balance real próximo a cero, presentan al Sistema 2 -desde el punto de vista del fósforo- como sustentable en el medio y largo plazo. La dosis media de 40 kg de  $P_2O_5$ /ha/año probablemente pueda ser reducida con la adopción de medidas simples de conservación de suelo.

### **Sistema 5 : agricultura en rotación con pasturas con fertilización**

En el Sistema 5, con la inclusión de una fase de pasturas convencionales de gramíneas y leguminosas, determina una utilización del suelo sustancialmente más conservacionista que el Sistema 2 (García, 1983).

### **Balance de fósforo**

En la figura 21 se constata un aumento anual de 2,83  $\mu g$  de P/g en el contenido de P total. El Sistema 5, a pesar de contar con una fertilización fosfatada anual levemente superior al Sistema 2, presentó un incremento anual en la concentración de P total apreciablemente superior al Sistema 2.

La extracción de P por los cultivos presentó un valor promedio anual de 9,45 kg de  $P_2O_5$ /ha/año, por tanto inferior al registrado en el Sistema 2. Se debe recordar que aproximadamente el 50% del tiempo en el Sistema 5 (período 1964-87) fue dedicado a la producción de pasturas, siendo el forraje producido devuelto al suelo la mayoría de las veces.

**Cuadro 5.** Aproximación a un balance de fósforo total (kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/h/año) en el Sistema 5.

| ← 0-20 cm → |      |         |      |      | ← 0-40 cm → |         |
|-------------|------|---------|------|------|-------------|---------|
| Entradas    |      | Salidas |      |      | Balance     | Balance |
| FP          | SP   | CP      | EP   | FCI  | AP          | BR      |
| 41.81       | 4.37 | 9.45    | 17.5 | 4.18 | +15.05      | +14.86  |

El ingreso de P en la profundidad 0-20 cm por la incorporación de camadas inferiores del suelo fue estimada en 4,37 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/año.

De acuerdo con el tenor medio de P total encontrado en la profundidad 20-40 cm (cuadro 2), el movimiento anual de P hasta la camada inferior fue calculado en 4,18 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/año.

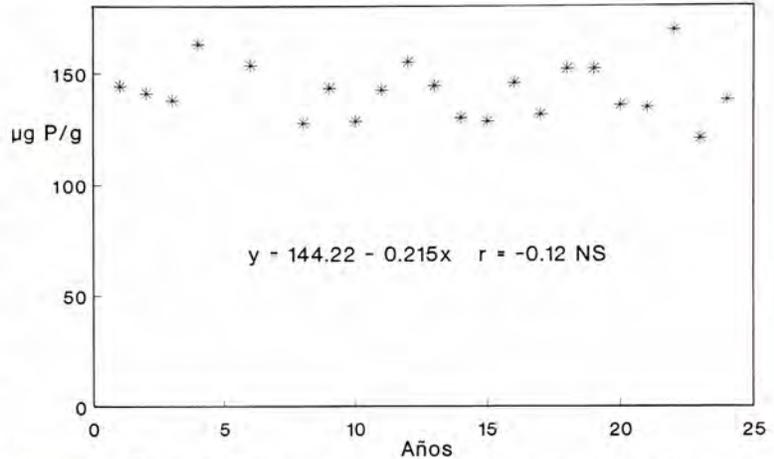
Así, utilizando la ecuación (1), las pérdidas por erosión fueron calculadas en 17,50 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/año, las cuales son inferiores a las del Sistema 2. El cuadro 5 resume el balance de P en el suelo para el Sistema 5.

Un denominador común observado en los tres sistemas estudiados es que la erosión fue la principal vía de salida de P del ecosistema.

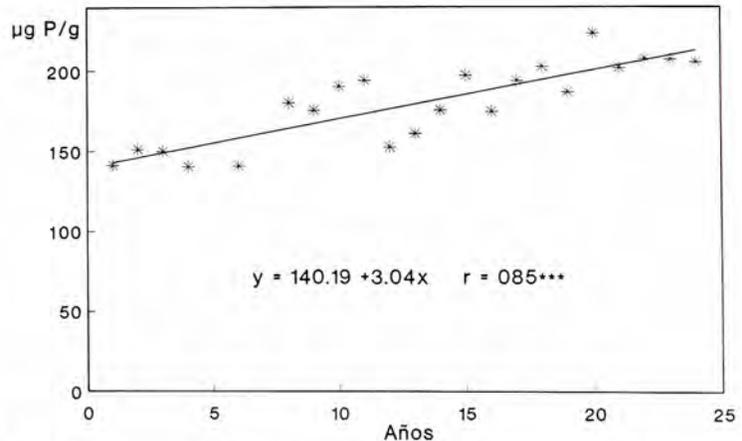
La salida de P en productos agrícolas fue baja por la no extracción de productos animales en la fase de pastura. La suma de la cantidad de P extraída por productos animales con la extraída por los cultivos probablemente sería una cifra próxima a las pérdidas por erosión. Por otra parte, la inclusión de pérdidas de P en excrementos fuera del área productiva, como lo consideran Middleton & Smith (1978) y Cornforth & Sinclair (1982), sumada a la extracción en granos y productos animales, seguramente superaría a la extracción en granos del Sistema 2.

A pesar de contar con un nivel de fertilización similar al del Sistema 2, el balance real del Sistema 5 (BR = + 14,86 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/año) fue positivo y definitivamente superior al balance del Sistema 2. La principal diferencia es que en el Sistema 5 existió menor pérdida por erosión, y en segundo lugar menor extracción de los cultivos.

La inclusión de medidas simples de conservación de suelo determinaría menores pérdidas de P por erosión. Probablemente

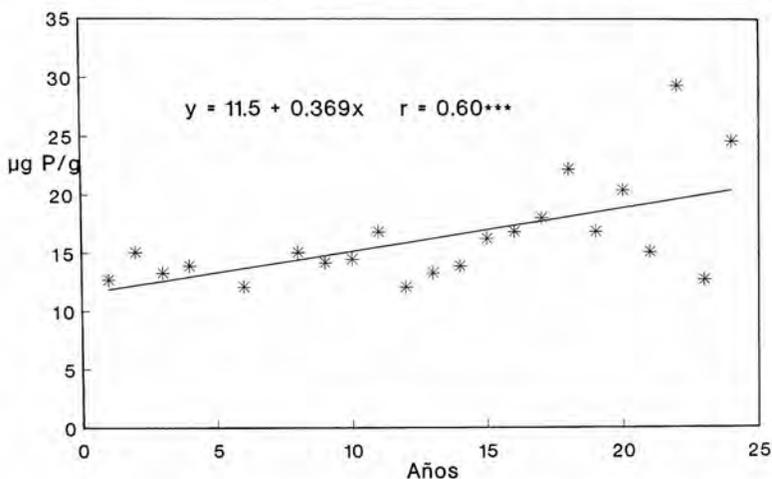


**Figura 22.** Evolución de la concentración de fósforo orgánico en el Sistema 5 durante el período 1964-87.

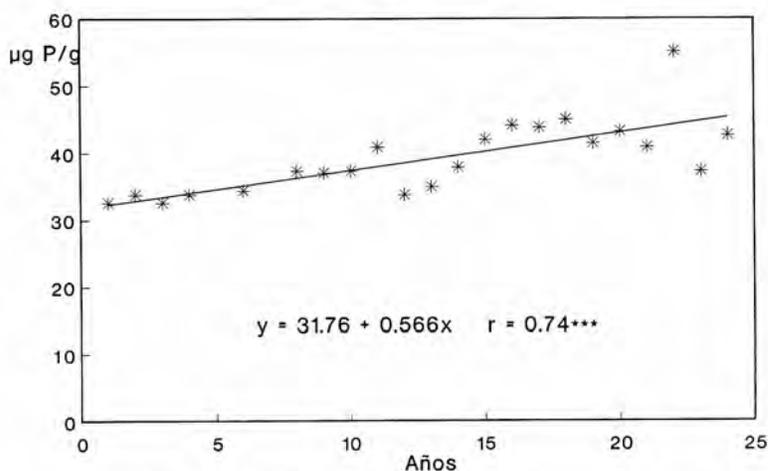


**Figura 23.** Evolución de la concentración de fósforo orgánico en el Sistema 5 durante el período 1964-87.

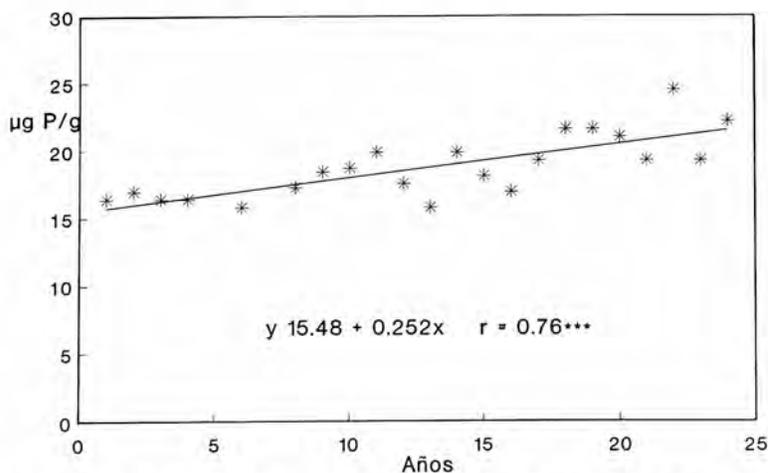
esta disminución sería contrabalanceada por la extracción en productos animales, determinando cifras de balance real próximas a las presentadas en el cuadro 5. Por tanto, considerando solamente el balance real encontrado, sería posible pensar en



**Figura 24.** Evolución de la concentración de fosfato de aluminio en el Sistema 5 durante el período 1964-87.



**Figura 25.** Evolución de la concentración de fosfato de hierro en el Sistema 5 durante el período 1964-87.



**Figura 26.** Evolución de la concentración de fosfato de calcio en el Sistema 5 durante el período 1964-87.

reducir las dosis anuales agregadas como fertilizante fosfatado.

Finalizado el último balance de P total, cabría una reflexión. Se entiende que el balance es complejo. No fue posible medir directamente determinados parámetros, los cuales necesitaron ser estimados. En consecuencia, se admite la posibilidad de error en alguna de las estimaciones; sin embargo, debido a los fuertes contrastes observados entre los sistemas, estos errores deberían ser muy acentuados para alterar sensiblemente los balances.

### Cambios en el estado interno del fósforo en el Sistema 5

La figura 22 representa la evolución del P orgánico en el Sistema 5 a lo largo del período 1964 a 1987, pudiéndose observar que la correlación no fue significativa. Esto muestra que, mientras en los sistemas 1 y 2 el tenor de P orgánico presentó una clara disminución anual, en el Sistema 5, debido a la fase de pasturas, esta fracción se mantuvo estable durante más de 20 años. Por otra parte, diversos autores (Russel, 1960b; Jackman, 1964; Simpson et al., 1974; Batten et al., 1979; Lewis et al. 1987a; Condrón & Goh, 1989) han reportado incrementos (inmovilización neta) en el nivel de P orgánico en suelos bajo pasturas. Tal vez, la presencia de pasturas durante un período de tiempo mayor en el área estudiada y/o de mayor productividad, conjuntamente con medidas de conservación de suelo, resultasen en una inmovilización neta. Así, el nivel de equilibrio para el P orgánico sería superior al presentado en la figura 22.

El P inorgánico (figura 23) presentó aumentos anuales muy semejantes a los registrados en el Sistema 2. Como el tenor de P orgánico (figura 22) no mostró tendencia de variación durante el período, la evolución del P total (figura 21) queda explicada casi en su totalidad por la evolución del P inorgánico. Por otra parte, el P inorgánico puede ser considerado como el destino del fertilizante fosfatado que queda en el suelo.

Los tres sistemas estudiados presentaron tendencias al predominio de la fracción inorgánica. En el Sistema 5, según la ecuación de regresión, 49,8% del P total estaba en forma inorgánica en 1964, aumentando a 60,5% en 1987. Esto coloca al Sistema 5 en posición intermedia entre el Sistema 1 y el Sistema 2.

Las fracciones inorgánicas no ocluidas (figuras 24, 25 y 26), al igual que en el Sistema 2, aumentaron su concentración durante los 23 años estudiados. En compensación, el P ocluido (figura 27) presentó un aumento de 1,85 µg de P/g. Así, el aumento anual de P ocluido en el Sistema 5 fue superior al registrado en el Sistema 2 (1,42 µg de P/g). Cabría mencionar que, del total de P acumulado en la fracción inorgánica, según los respectivos coeficientes angulares, quedaron 61% en la forma ocluida.

La proporción de P ocluido en la fracción inorgánica del Sistema 5 no presentó variación significativa con el tiempo (figura 28). Así, la calidad de la fracción inorgánica permaneció relativamente estable con el tiempo. Comparando con la distribución interna de la fracción inorgánica en el Sistema 2 (figura 18) se puede observar que el Sistema 5 se estabilizó en valores que pueden ser considerados más desfavorables para la nutrición de las plantas. No fue encontrada explicación para esa tendencia en la bibliografía consultada.

El P disponible-Bray I (figura 29), presentó una evolución creciente, y para la mayoría de los años los tenores fueron inferiores a los registrados en el Sistema 2 (figura 19). Los valores de P disponible-resinas (figura 30), presentaron alta dispersión, resultando en un coeficiente de correlación no significativo.

Los menores valores de P disponible-Bray I en el Sistema 5 en relación al Sistema 2, son concordantes con las tendencias observadas en las fracciones inorgánicas anteriormente discutidas. En términos generales, se puede decir que los valores de P disponible durante la mayor parte del período 1964-87 eran superiores al nivel considerado como deficiente (Castro et al., 1981b; Perez et al., 1981).

La consideración del P disponible (Bray I o resinas) como indicador que sintetiza o resume la evolución de los sistemas debe ser observado en forma relativa, dado que la fracción fósforo orgánico también puede contribuir para la disponibilidad de ese elemento, principalmente en suelos bajo pasturas (Bowman & Cole, 1978b). En este sentido, la modificación del método de Olsen, desarrollada por Bowman & Cole (1978a), permite medir compuestos lábiles del P orgánico (Bowman & Cole, 1978b).

Si el Sistema 5 presentase una fase de pasturas más larga y productiva, podría mostrar una competencia de la vía orgánica

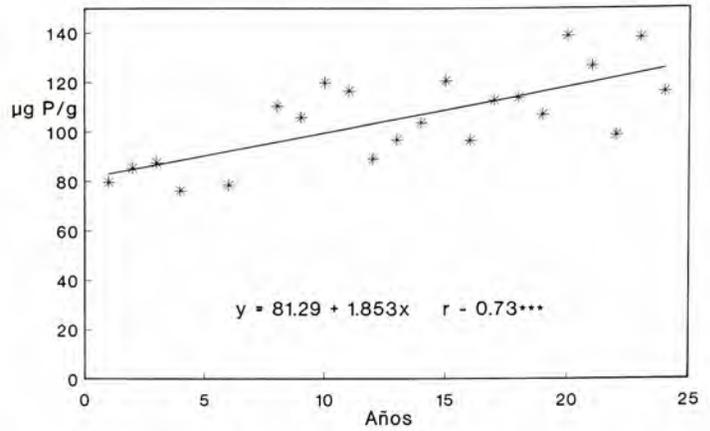


Figura 27. Evolución de la concentración de fósforo ocluido en el Sistema 5 durante el período 1964-87.

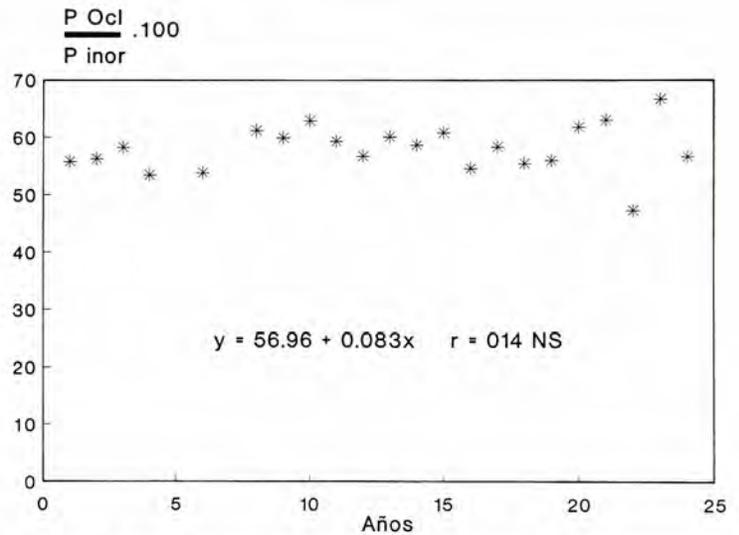


Figura 28. Evolución de la relación P ocluido/P inorgánico en el Sistema 5 durante el período 1964-87.

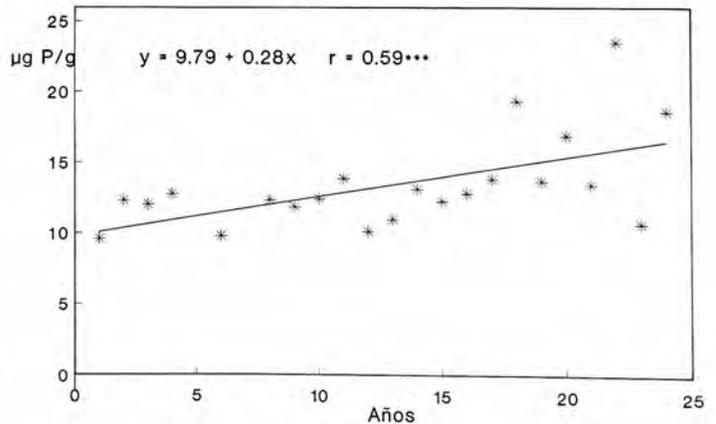


Figura 29. Evolución de la concentración de P disponible-Bray I en el Sistema 5 durante el período 1964-87.

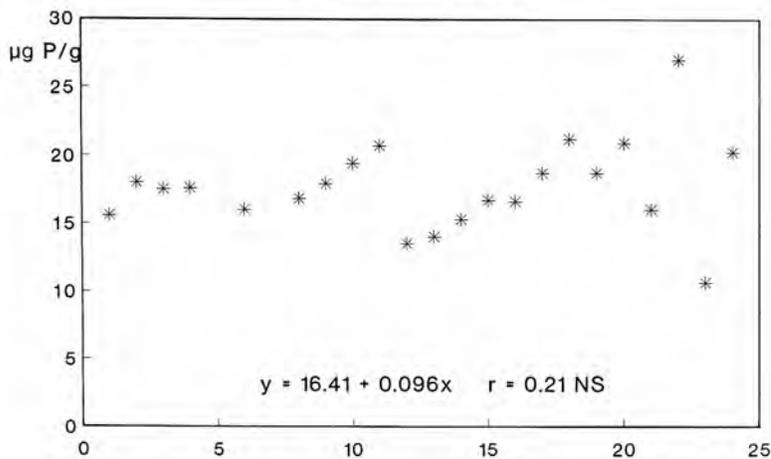


Figura 30. Evolución de la concentración de P disponible-resinas en el Sistema 5 durante el período 1964-87.

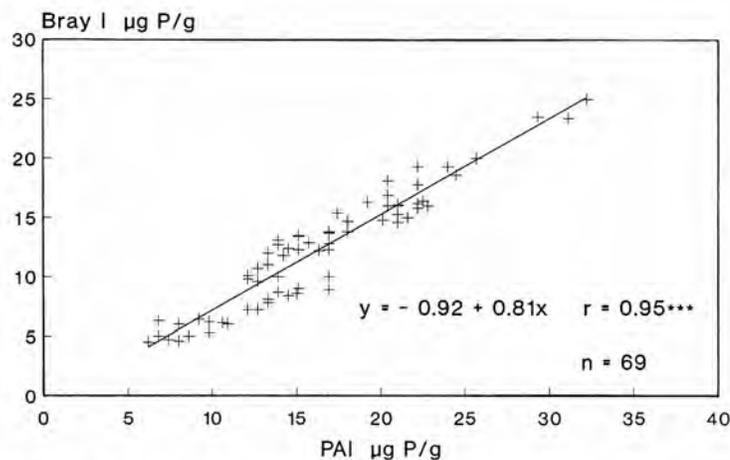


Figura 31. Relación entre el PAI y el P disponible-Bray I en los tres sistemas durante el período 1964-87.

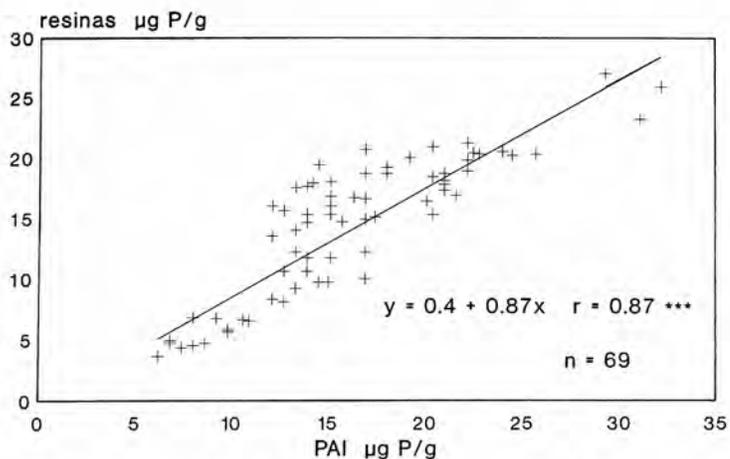


Figura 32. Relación entre el PAI y el P disponible-resinas en los tres sistemas durante el período 1964-87.

por el fósforo soluble. El incremento del P orgánico (inmovilización neta) podría no ser desfavorable para las plantas, en la medida que una parte quedara en la fracción orgánica lábil ( $\text{NaHCO}_3$ ), como lo reportaron Condron & Goh (1989). Queda la interrogante si el aumento del período con pasturas causarían un aumento en la proporción de P ocluido, lo cual sería negativo para la nutrición de las plantas.

Resumiendo, la agricultura en rotación con pasturas, ambas fertilizadas, presenta un balance real de P total claramente positivo. Se mantienen elevadas las pérdidas de P por erosión, pero son de menor magnitud que las calculadas en el Sistema 2. La extracción de P en productos fue menor que el Sistema 2, pero si fuera considerada la extracción en productos animales, sería igual o superior a la de ese Sistema. La inclusión de pasturas evita la disminución en el contenido de P orgánico. La fertilización incrementa las fracciones inorgánicas, siendo el principal destino el P ocluido. El P disponible presentó valores medios. El control de la erosión permitiría disminuir la dosis anual promedio de P agregado, estando esto limitado por el destino desfavorable de la mayor parte del P inorgánico acumulado.

### Relación entre el P disponible y otras fracciones según análisis de correlación y regresión múltiple

Para un período de 23 años, bajo diferentes sistemas de manejo, el PAI fue la fracción que individualmente mejor explicó la variación del P disponible, medido por el método de resinas o Bray I. En las figuras 31 y 32 se observan estas asociaciones. Estos resultados son concordantes con los relatos por Méndez (1975) en un suelo similar en un experimento de corto plazo. En general, la fracción PAI ha sido considerada como la más importante para la nutrición de las plantas en suelos ácidos o próximos de la neutralidad (Kamprath & Watson, 1980).

El verdadero carácter del P ocluido es visto cuando se observa que el P disponible se correlaciona negativa y significativamente con el porcentaje de P ocluido dentro del P inorgánico (figuras 33 y 34).

El cuadro 6 presenta las regresiones múltiples para P disponible por los dos métodos. Es interesante señalar que en ambos

**Cuadro 6.** Correlaciones y regresiones múltiples. Análisis conjunto de los Sistemas 1, 2 y 5. Periodo 1964-87.

| y1 = PResinas $\mu\text{g P/g}$ | x3 = PAI $\mu\text{g P/g}$                           | x7 = $\frac{(PAI + PFe) \cdot 100}{POCl}$ |
|---------------------------------|--|---|
| y2 = PBray 1 $\mu\text{g P/g}$  | x4 = PFe $\mu\text{g P/g}$                           |   |
| x1 = Porg $\mu\text{g P/g}$     | x5 = PCa $\mu\text{g P/g}$                           | x8 = $\frac{POCl \cdot 100}{Pinor}$       |
| x2 = Pinor $\mu\text{g P/g}$    | x6 = POCl $\mu\text{g P/g}$                          |   |
| Variable                        | Ecuación   | r <sup>2</sup>                            |
| PAI                             | y1 = 0.4 + 0.87x3                                    | 0.754***                                  |
| Porg                            | y1 = -13.688 + 0.119x1 + 0.787x3                     | 0.847***                                  |
| Pinor                           | y1 = -19.555 + 0.119x1 + 0.064x2 + 0.527x3           | 0.903***                                  |
| PAI                             | y2 = -0.92 + 0.811x3                                 | 0.901***                                  |
| PFe                             | y2 = -2.925 + 0.48x3 + 0.188x4                       | 0.929***                                  |
| Porg                            | y2 = -7.762 + 0.04x1 + 0.434x3 + 0.199x4             | 0.943***                                  |
| PCa                             | y2 = -10.812 + 0.047x1 + 0.387x3 + 0.113x4 + 0.344x5 | 0.954***                                  |

casos la variable P orgánico ingresa en la correlación múltiple. En el caso de resinas, ingresa en segundo lugar, contribuyendo con un aumento del 9,3% en la variación ya explicada por el PAI. Por otra parte, el P disponible-Bray I, parece estar más estrechamente asociado con la variación de las fracciones inorgánicas, dado que la inclusión de las dos primeras variables (PAI y PFe) alcanzan a explicar el 93% de la variación.

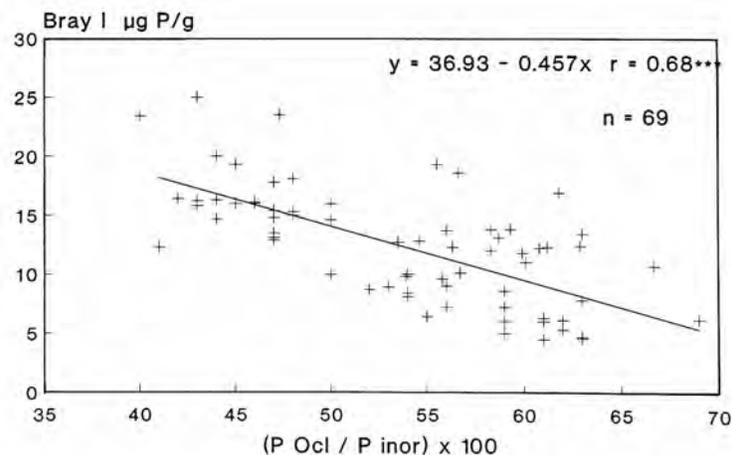
### Efecto de los sistemas en la capacidad del suelo en retener fósforo

En el cuadro 7 se observa que para mantener una misma concentración de P en la solución del suelo (0,1  $\mu\text{g}$  de P/ml), el sistema 1 requiere 48% más P retenido en la fase sólida que el promedio de los otros dos sistemas.

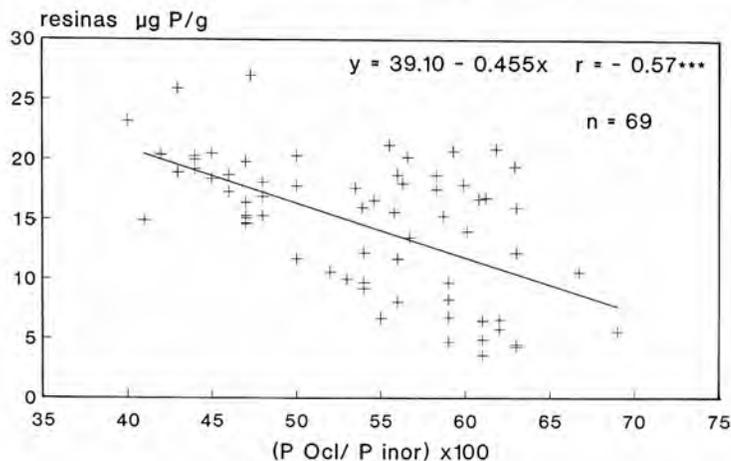
La principal explicación para ese comportamiento sería la fertilización fosfatada previamente recibida por los sistemas 2 y 5, lo cual tiende a aumentar el grado de saturación del suelo y disminuir la retención. Esa disminución de la capacidad de reten-

ción debido a fertilización fosfatada previa fue reportado por Beckwith (1964) y Fox & Kamprath (1970). Ozanne & Shaw (1967) y Barrow (1975) encontraron relaciones negativas entre la capacidad de retener P y la eficiencia del fertilizante agregado.

En la práctica, se puede decir que una unidad de fósforo adicionada a los sistemas 2 y 5 sería más eficientemente utilizada por las plantas que en el Sistema 1.



**Figura 33.** Relación entre la calidad del P inorgánico y el P disponible-Bray I en los tres sistemas durante el período 1964-87.



**Figura 34.** Relación entre la calidad del P inorgánico y el P disponible resinas en los tres sistemas durante el período 1964-87.

**Cuadro 7.** Retención de fósforo en la fase sólida del suelo, promedio de bloques y años 1986-87 para los sistemas 1, 2 y 5.

|         | µg P/g    |           |           |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| µg P/ml | Sistema 1 | Sistema 2 | Sistema 5 |
| 0.1     | 37.6      | 26.8      | 24.0      |

**Cuadro 8.** Fósforo (µg de P/g) en la biomasa microbiana del suelo en los sistemas 1, 2 y 5.

|          | Sistema 1 | Sistema 2 | Sistema 5 |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| Bloque 1 | 6.21      | 8.59      | 19.57     |
| Bloque 2 | 9.28      | 13.23     | 20.72     |
| Bloque 3 | 6.87      | 14.80     | 28.04     |
| Media    | 7.45      | 12.21     | 22.78     |

## Efecto de los sistemas en el nivel de fósforo presente en la biomasa microbiana del suelo

Como era de esperar, los sistemas presentaron diferentes niveles de P en la biomasa microbiana del suelo (cuadro 8). Los bloques 2 y 3 del Sistema 5, que en el momento del muestreo estaban bajo pasturas, presentaron los valores más elevados. Las tendencias observadas en el cuadro 8 son coincidentes con las reportadas por Brookes et al. (1984), los cuales compararon el tenor de P presente en la biomasa microbiana en suelos agrícolas en comparación con suelos bajo pasturas.

La interpretación del tenor de fósforo en la biomasa microbiana, según la bibliografía consultada, es contradictoria. Stewart & Sharpley (1987) interpretan a la biomasa microbiana como una fuente adicional de suministro de P para la solución del suelo. Por otra parte, Parfitt et al. (1989) sugieren que los microorganismos son eficaces competidores de las plantas por el P inorgánico.

Por otro lado, según los trabajos de Sparling et al. (1985, 1987), el P presente en la biomasa microbiana puede ejercer una significativa interferencia en la determinación del P disponible, sobreestimando el valor real de esa fracción.

Si bien los datos del cuadro 8 reflejan sólo los valores en el momento del muestreo, careciendo de resultados para otras épocas del año, por otro lado expresan el efecto acumulado de muchos años de sistemas de manejo contrastantes.

Serán necesarios otros estudios para conocer hasta qué punto el P presente en la biomasa microbiana es disponible y cómo actúan las diferentes variables climáticas y de manejo en su liberación u inmovilización.

## CONCLUSIONES

- a) En términos generales se confirmó la hipótesis según la cual los tres sistemas agrícolas presentarían tendencias contrastantes en la dinámica del fósforo en el suelo.
- b) En el sistema de agricultura continua sin fertilización se observó lo siguiente:
  - b.1) El balance de P total en el suelo fue negativo, indicando una pérdida anual

de 25,57 kg de  $P_2O_5$ /ha/año. Las principales vías de salida fueron la erosión (18,52 kg de  $P_2O_5$ /ha/año) y la remoción por las cosechas (7,04 kg de  $P_2O_5$ /ha/año).

**b.2)** El P orgánico fue la fracción que presentó mayores pérdidas en cantidades absolutas (1,5  $\mu$ g de P/g/año), siendo seguido por las fracciones PFe (0,43  $\mu$ g de P/g/año) y PAI (0,42  $\mu$ g de P/g/año).

**b.3)** Las principales pérdidas porcentuales en todo el período fueron las fracciones PAI (60%), PFe (30,6%) y P orgánico (25,4%).

**b.4)** El tenor de P disponible por Bray I disminuyó de 9,4 para 4,7  $\mu$ g de P/g en el período 1964-87, mientras que determinado por resinas varió de 12,0 para 3,9  $\mu$ g de P/g en el mismo período.

El Sistema 1 -en términos generales y desde el punto de vista de la dinámica del fósforo- no es sustentable en el mediano y largo plazo.

**c)** Para el sistema de agricultura continua con fertilización las principales conclusiones fueron:

**c.1)** El balance de P total indicó una condición muy próxima al equilibrio, existiendo una pérdida anual de 0,86 kg de  $P_2O_5$ /ha/año. Las principales pérdidas del sistema fueron 26,74 kg de  $P_2O_5$ /ha/año por la erosión y 13,94 kg de  $P_2O_5$ /ha/año por remoción de las cosechas.

**c.2)** La fertilización utilizada en este sistema no detuvo la disminución del tenor de P orgánico, su tasa (1,41  $\mu$ g de P/g/año) fue levemente menor que la del Sistema 1. En todo el período el P orgánico disminuyó 22,3%.

**c.3)** Existió un aumento en todas las fracciones inorgánicas del fósforo, en proporciones aproximadamente iguales a las de su peso relativo. Cerca de la mitad (48%) del incremento quedó en la forma de P ocluido.

**c.4)** Los valores de P disponible fueron mayores de 12  $\mu$ g de P/g en todos los años del período estudiado y para ambos métodos de extracción (Bray I y resinas).

A pesar de presentar un marcado deterioro en la fracción orgánica, el Sistema 2 es sustentable en el mediano y largo plazo.

**d)** Para la rotación de cultivos con pasturas y con fertilización se puede concluir:

**d.1)** El balance de P total en el suelo fue positivo, con una ganancia anual de 14,86 kg de  $P_2O_5$ /ha/año. La erosión continuó siendo la principal vía de salida (17,5 kg de  $P_2O_5$ /ha/año), siguiendo la remoción por las cosechas (9,45 kg de  $P_2O_5$ /ha/año).

**d.2)** No se registró inmovilización neta, pero se evitó la disminución en el contenido de P orgánico.

**d.3)** Existió un aumento en los valores de todas las fracciones inorgánicas, siendo el P ocluido el principal destino del fósforo aplicado. Aproximadamente el 61% del incremento anual del P inorgánico del Sistema 5 se presentó en la forma de P ocluido. Por tanto, la distribución interna del P inorgánico del Sistema 5 fue más desfavorable que la del Sistema 2.

Al igual que el Sistema 2, el Sistema 5 es sustentable en el medio y largo plazo.

**e)** El PAI fue la fracción que individualmente mejor se correlacionó con el P disponible para los métodos Bray I y resinas.

**f)** El P orgánico presentó una correlación positiva y significativa con el P disponible resinas.

**g)** Para mantener 0,1  $\mu$ g de P/ml en solución en el sistema fue necesario 48% más fósforo retenido en fase sólida que en los sistemas 2 y 5.

**h)** La inclusión de pasturas provocó un aumento en el contenido de P presente en la biomasa microbiana del suelo en relación a los sistemas de agricultura continua no fertilizado o fertilizado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALEXANDER, T. G.; ROBERTSON, J. A. 1970. Ascorbic acid as a reductant for inorganic phosphorus determination in Chang and Jackson fractionation procedure. Soil Science, Baltimore, 110 (5): 361-362.
- BARROW, N. J. The slow reactions between soil and anions: 1. Effects of time, temperature and water content of soil on the decrease in effectiveness of

- phosphate for plant growth. *Soil Science*, Baltimore, 118: 380-386, 1974.
- BARROW, N. J. 1975. The response to phosphate of two annual pasture species. I Effect of the soil's ability to adsorb phosphate on comparative phosphate requirement. *Aust. J. Agric. Res.*, Melbourne, 26: 137-143.
- BATTEN, G. D.; BLAIR, G. J.; LILL, W. J. 1979. Changes in soil phosphorus and pH in a red earth soil during build-up and residual phases of a wheatclover ley farming system. *Aust. J. Soil Res.*, Melbourne, 17: 163-175.
- BECKWITH, R. S. 1965. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soil. *Aust. J. Exp. Agr. An. Hus.*, Melbourne, 5: 52-58.
- BLACK, C. A. 1975. Relaciones suelo-planta. Buenos Aires, Hemisferio Sur. V. 2. p. 445-866.
- BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. 1978a. Transformations of organic phosphorus substrates in soil as evaluated by  $\text{NaHCO}_3$  extraction. *Soil Science*, Baltimore, 125(1): 49-54.
- BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. 1978b. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. *Soil Science*, Baltimore, 125(2): 95-101.
- BRAY, R. H.; KURTZ, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, Baltimore, 59: 39-45.
- BREMNER, J. M. 1965. Inorganic forms of nitrogen. In: BLACK, C. A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison. *Agronomy*, 9. p.1179-1237.
- BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. 1984. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, Oxford, 16(2): 169-175.
- CASTRO, J. L.; ZAMUZ, E. M. de; BARBOZA, S. 1981a. Fertilización de pasturas en el litoral oeste de Uruguay. *Investigaciones Agronómicas*, Montevideo, 1: 56-67.
- CASTRO, J. L.; ZAMUZ, E. M. de; OUDRI, N. 1981b. Guía para fertilización de pasturas. In: CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRICOLAS "ALBERTO BOERGER". Fertilización de pasturas. La Estanzuela, Estación Experimental Agropecuaria. *Miscelánea* 37. cap 7.
- CONDON, L. M.; GOH, K. M. 1989. Effects of a long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. *Journal of Soil Science*, Oxford, 40: 383-395.
- CORNFORTH, I. S.; SINCLAIR, A. G. 1982. Model for calculating maintenance phosphate requirements for grazed pastures. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, Wellington, 10: 53-61.
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, Baltimore, 84(2): 133-144.
- DALAL, R. C.; MEYER, R. J. 1986. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. I - Overall changes in soil properties and trends in winter cereal yields. *Aust. J. Soil Res.*, Melbourne, 24: 265-279.
- DIAZ, R. 1983. Propuesta de modificaciones a un experimento de rotaciones agrícola-ganaderas. *Investigaciones Agronómicas*, Montevideo, 4: 76-78.
- ESCUADERO, J.; MORON, A. 1978. Caracterización de la capacidad de fijación de fósforo de distintos suelos del Uruguay. Montevideo, Tesis Grado Ing. Agr., Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay. 100p.
- FOX, R. L.; KAMPRATH, E. J. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 34: 902-907.
- GARCIA, F. 1983. Predicción de pérdidas de suelo por erosión hídrica. Montevideo, Universidad de la República. 59p.
- GARCIA, F.; BELOQUI, C.; LABELLA, S. 1979. Propiedades físicas del suelo en rotaciones de 16 años. In: Reunión técnica de la Facultad de Agronomía. 2. Montevideo. p.54.
- HAAS, H. J.; GRUNES, D. L.; REICHMAN, G.A. 1961. Phosphorus changes in Great Plains soils as influenced by cropping and manure applications. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 25(3): 214-218.
- HARRISON, A. F. 1985. Effects of environment and management on phosphorus cycling in terrestrial ecosystems. *Journal of Environmental Management*, London, 20: 163-179.
- JACKMAN, R. H. 1964. Accumulation of organic matter in some New Zealand

- soils under permanent pasture. I - Patterns of organic carbon, nitrogen, sulphur, and phosphorus. *New Zealand Journal Agriculture Research*, Wellington, 7(4): 445-71.
- JACKSON, M. L. 1964. Análisis químico de suelos. Barcelona, OMEGA. 662p.
- KAMPRATH, E., J.; WATSON, M. E. 1980. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soil. In: KHASAWNEH, F. E., ed. *The role of phosphorus in agriculture; proceedings*. Madison, American Society of Agronomy, cap 16. p.433-69.
- LEGG, J. O.; BLACK, C. A. 1955. Determination of organic phosphorus in soils: II -Ignition method. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 19(2): 139-143.
- LEWIS, D. C.; CLARKE, A. L.; HALL, W. B. 1987. Accumulation of plant nutrients and changes in soil properties of sandy soils under fertilized pasture in Southeastern South Australia. I -Phosphorus. *Aust. J. Soil Res.*, Melbourne, 25: 193-202.
- MCDOWELL, L. L.; MCGREGOR, K. C. 1984. Plant nutrient losses in runoff from conservation tillage corn. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, 4: 79-91.
- MCDOWELL, L. L.; WILLIS, G. H., MURPHREE, C. E. 1989. Nitrogen and phosphorus yields in runoff silty soils in the Mississippi. *Agriculture, ecosystems and environment*, Amsterdam, 25: 119-137.
- MCGILL, W. B.; COLE, C. V. 1981. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, Amsterdam, 26: 267-286.
- MENDEZ, J. A. 1975. Estudio de formas de fósforo en el suelo en un ensayo de fertilización. Montevideo. Tesis de Grado Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay. 85p.
- MENZEL, R. G. 1980. Enrichment ratios for water quality modeling. In: KNISEL, W. ed. *CREAMS. A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems*. Washington, Department of agriculture. cap 12. p.486-93.
- MIDDLETON, K. R.; SMITH, G. S. 1978. The concept of a climax in relation to the fertilizer input of a pastoral ecosystem. *Plant and Soil*. Dordrecht, 50: 595-614.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. 1976. Dirección de Suelos y Fertilizantes; Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. t. 1. 96p.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. 1979. Dirección de Suelos y Fertilizantes; Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. t. 3. 45p.
- MORON, D. A. 1990. Dinâmica do fósforo em um molissol do Uruguai sob três sistemas agrícolas e a longo prazo (1964-1989). Piracicaba. Tese Doutor. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de Sao Paulo, Brasil. 195 p.
- MORON, A. E.; PEREZ, J. M. 1981. Dinámica del fósforo en la productividad de una pastura convencional. In: CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRICOLAS "ALBERTO BOERGER". Fertilización de pasturas. La Estanzuela, Estación Experimental Agropecuaria "La Estanzuela". Miscelánea 37. cap 3.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, Washington, 27: 31-36.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1982. United States-Canadian Tables of Feed Composition. Washington, USDA. 148p.
- O'HALLORAN, I. P.; STEWART, J. W. B.; DE JONG, E. 1987. Changes in P forms and availability as influenced by management practices. *Plant and Soil*, Dordrecht, 100: 113-126.
- OZANNE, P. G.; SHAW, T. C. 1967. Phosphate sorption by soils as a measure of the phosphate requirement for pasture growth. *Aust. J. Agric. Res.*, Melbourne, 18: 601-12.
- PARFITT, R. L.; HUME, L. J.; SPARLING, G. P. 1989. Loss of availability of phosphate in New Zealand soils. *Journal of Soil Science*, Oxford, 40: 371-382.
- PARTON, W. J.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, Dordrecht, 5: 109-131.
- PATRICK, Wm. H.; MAHAPATRA, I. C. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Advances in Agronomy*, New York, 20: 323-359.
- PEREZ, J.; CASTRO, J. L.; ZAMUZ, E. M. de. 1981. Calibración de métodos de

- análisis de suelos para determinar la fertilización fosfatada de trigo. *Investigaciones Agronómicas*, Montevideo, 1: 74-79.
- RED, D. L.; CAMPBELL, C. A. 1981. Biocycling of phosphorus in soil by plant roots. *Can. J. Soil Sci.*, Ottawa, 61: 587-589.
- ROCHE, P.; GRIERE, L.; BABRE, D.; CALBA, H.; FALLAVIER, P. 1980. El fósforo en los suelos tropicales: evaluación de los grados de deficiencia y de las necesidades de fósforo. Paris, Institut Mondial du Phosphate. Publicación científica, 2. 48p.
- RUSSELL, J. S. 1960b. Soil fertility changes in the long term experimental plots at Kybybolite, South Australia. II -Changes in phosphorus. *Aust. J. Agric. Res.*, Melbourne, 11: 927-947.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D. S. 1986. Transformation of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 50: 62-67.
- SHARPLEY, A. N. 1980. The enrichment of soil phosphorus in runoff sediments. *J. Environ. Anal.*, London, 9(3): 521-526.
- SHARPLEY, A. N. 1985. The selective erosion of plant nutrient in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 49: 1527-1534.
- SHARPLEY, A. N.; SMITH, S. J. 1983. Distribution of phosphorus forms in virgin and cultivated soils and potential erosion losses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 49: 127-130.
- SHARPLEY, A. N.; SMITH, S. J. 1985. Fractionation of inorganic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 49: 127-130.
- SHARPLEY, A. N.; MENZEL, R. G. 1987. The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment. *Advances in Agronomy*, New York, 41: 297-324.
- SHELTON, J. E.; COLEMAN, N. T. 1968. Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high fixing soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison 32: 91-94.
- SIMPSON, J. R.; BROMFIELD, S. M.; JONES, O. L. 1974. Effects of management on soil fertility under pasture. 3. Changes in total soil nitrogen, carbon, phosphorus and exchangeable cations. *Aust. J. Exp. Agr. An. Hus.*, Melbourne, 14: 487-494.
- SMECK, N. E. 1985. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma*, Amsterdam, 36: 185-199.
- SPARLING, G. P.; WHALE, K. N.; RAMSAY, A. J. 1985. Quantifying the contribution from the soil microbial biomass to the extractable P levels of fresh and air-dried soils. *Aust. J. Soil Res.*, Melbourne, 23: 613-621.
- SPARLING, G. P.; MILNE, J. D. G.; VICENT, K. W. 1987. Effect of soil moisture regime on the microbial contribution to Olsen phosphorus values. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, Wellington, 30: 79-84.
- STEWART, J. W. B.; SHARPLEY, A. N. 1987. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA*, ed. Soil fertility and organic matter as critical components of production systems; Spec. Pub. Madison. p101-21.
- SYERS, J. K.; SHAH, R.; WALKER, T. W. 1969. Fractionation of phosphorus in two alluvial soils and particle size separates. *Soil Science*, Baltimore, 104(4): 283-288.
- TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; BETTANY, J. R. 1982. Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon, nitrogen and phosphorus in grassland soils. *Agronomy Journal*, Madison, 74: 831-835.
- TINSLEY, J. 1967. *Soil Science manual of experiments*. Aberdeen, University of Aberdeen, Department of Soil Science. 124p.
- VICTORA, C. D.; PIÑEYRUA, J.; PUENTES, R. 1985. Relevamiento semi-detallado de suelos de la Estación Experimental "La Estanzuela". Colonia, CIAAB/MAP. 20p.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. *USDA, Handbook*, 537. 58p.
- ZAMUZ, E. M. de; CASTRO, J. L. 1974. Evaluación de métodos de análisis de suelo para determinar fósforo asimilable. La Estanzuela, Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger". *Boletín Técnico*, 15. 15p.