

**EFFECTOS MÚLTIPLES DEL FERTILIZANTE PAZ DEL RIO 0-9-0-40(Ca) SOBRE
ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO**

**Walter Osorio
Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Ph.D.**

Profesor Universidad Nacional de Colombia

Informe investigación No. 1 presentado a la empresa Acerías Paz del Rio

**Medellín
2018**

INTRODUCCIÓN

Problema: Unas de las principales limitantes de la agricultura Colombiana son la acidez de los suelos y la baja disponibilidad de nutrientes, particularmente fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y silicio (Si). Esto limita la nutrición vegetal y la productividad de los cultivos, pasturas y plantaciones forestales.

Alternativa: el fertilizante Paz del Río (FPDR) 0-9-0-40(Ca)-1,5(Mg)-1,5(Mn)-6(Si)+menores se constituye en un fertilizante que al tener en su composición elementos nutritivos para las plantas, y al pasar por procesos de alta temperatura en hornos con inyección de oxígeno, puede constituirse en un fertilizante efectivo para mejorar la fertilidad del suelo y la nutrición de plantas a través de efectos múltiples.

Hipótesis: la aplicación de FPDR puede aumentar pH, la disponibilidad P, Ca, Mg y Si en los suelos. Sin embargo, el efecto está controlado por la dosis aplicada y el tipo de suelo usado.

Objetivo: evaluar los efectos múltiples de dosis crecientes del FPDR sobre el pH del suelo y la concentración disponible de P, Ca, Mg y Si en diferentes los diferentes tipos de suelo de Colombia empleados en agricultura.

MATERIALES Y METODOS

Muestras de suelos

La efectividad del producto FPDR para mejorar algunas propiedades del suelo se evaluó en varias muestras de suelos de Colombia (Oxisol, Ultisol, Andisol, Inceptisol y Entisol). Estos suelos extremadamente a fuertemente ácidos (pH <5.5) y presentan baja disponibilidad de nutrientes (particularmente Ca, Mg, P). Las muestras de suelo se secaron al aire y luego fueron pasadas por un tamiz de 2 mm, una submuestra de 250 g se utilizó para realizar análisis de fertilidad del suelo que incluían determinaciones de pH en agua, materia orgánica (Walkley-Black), P (Bray II), Al intercambiable (1M KCl); Ca, Mg, K y CIC efectiva (1 M acetato de amonio), S (0.008 M fosfato de calcio); Fe, Mn, Cu y Zn (Olsen-EDTA) y B (agua caliente) (ver Tabla 1).

Tabla 1. Análisis de suelos utilizados.

Parametro	Método	Unidad (SI)	Oxisol	Ultisol	Andisol	Inceptisol	Entisol	Mollisol	Vertisol
pH	Agua (1:1)	-	5.0	4.9	4.9	5.0	5.7	5.7	6.1
MO	Walkley-Black	%	2.3	2.8	16.0	4.7	1.5	3.4	2.3
P	Bray II	mg/kg	5	3	4	6	14	22	32
Al	1M KCl	cmol _c /kg	1.0	1.9	1.7	3.4	0.0	0.0	0.0
Ca	1 M Acetato de amonio	cmol _c /kg	0.12	0.25	1.3	0.9	6.3	12.3	17.5
Mg	1 M Acetato de amonio	cmol _c /kg	0.06	0.12	0.4	0.3	1.7	3.4	4.2
K	1 M Acetato de amonio	cmol _c /kg	0.03	0.10	0.34	0.13	0.32	0.45	0.40
CICE	Suma de cationes	cmol _c /kg	1.21	2.37	3.74	4.73	8.32	16.15	22.10
S	0.008 M Ca(H ₂ PO ₄) ₂ .H ₂ O	mg/kg	2	3	5	8	5	10	23
Fe	Olsen-EDTA	mg/kg	72	123	129	223	69	45	31
Mn	Olsen-EDTA	mg/kg	1	3	1	24	49	7	4
Cu	Olsen-EDTA	mg/kg	1	1	2	3	3	4	5
Zn	Olsen-EDTA	mg/kg	1	2	2	3	4	3	2
B	Agua caliente	mg/kg	0.3	0.2	0.1	0.4	0.2	0.5	0.4

Como material fertilizante se utilizó el fertilizante Paz del Rio (FPDR) 0-9-0-40(Ca)-1,5(Mg)-1,5(Mn)-6(Si)+menores en polvo (<250 μ m), el cual fue caracterizado vía Fluorescencia de rayos X (FDx) (Tabla 2). Adicionalmente, se realizó un análisis de difracción de rayos X con el fin de determinar la composición mineral en el FPDR. Ambas técnicas son avanzadas determinar con exactitud la composición elemental de un material (FDX) y la identificación precisa de los minerales cristalinos en un material dado. La combinación de ambas técnicas permite una completa caracterización del FPDR de tal manera que se puede proyectar las reacciones que estos puedan tener el suelo y su potencial efecto fertilizante sobre las plantas cultivadas. Sin lugar a duda, esta caracterización posiciona al FPDR como un material precisamente caracterizado. Ambos análisis se realizaron el Instituto de Minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Tratamientos

Muestras de suelo en base seca (100 g) recibieron por triplicado dosis crecientes del FPDR a razón de 0 (control), 100, 250, 500, 750, 1000 y 1500 mg/kg. En los suelos minerales las dosis equivalen a 100, 250, 500, 750, 1000 y 1500 kg/ha, respectivamente. Para los cálculos se utilizó una densidad de 1.0 g/cm³, una profundidad de 20 cm y un uso del terreno del 50%. En el Andisol al variar la densidad aparente a 0.6 g/cm³ las dosis equivalen a 60, 150, 300, 450, 600 y 900 kg/ha, respectivamente.

Las muestras de suelos tratadas con FPDR se humedecieron a capacidad de campo ($\theta_g \approx 30\%$) y se incubaron a temperatura ambiente ($\sim 25^\circ\text{C}$) durante 30 días. Semanalmente se adicionó agua para mantener el suelo a capacidad de campo.

Luego del periodo de incubación se determinó: (i) pH del suelo en agua (1:1) con un potenciómetro, (ii) concentración de P extraído con el método de Bray II (NH₄F + HCl), (iii y iv) concentración de P y Si *solubles* en el suelo en una solución de 0.01 M de CaCl₂ (1:10) y luego determinación con el método del azul de molibdato, (v y vi) concentración de Ca *soluble* en extracto 1:2.5 y luego determinación por absorción atómica.

Análisis de Datos

El diseño experimental fue completamente al azar. Los datos fueron sometidos a análisis de regresión, para lo cual se usó un nivel de significancia ($P \leq 0.05$). Los análisis se realizaron con el paquete estadístico Statgraphics Centurion.

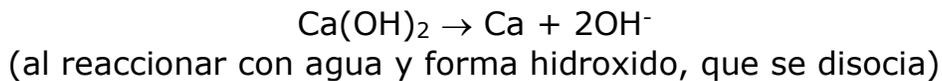
RESULTADOS

pH del suelo

Los resultados claramente demuestran la capacidad del FPDR para aumentar el pH del suelo. En el Oxisol este pasó de un valor inicial promedio de 4.9 hasta 6.0 con la dosis más alta. El modelo de regresión fue: $Y = 5.0898 + 0.0013x - 0.0000005x^2$ ($R^2 = 0.8796$). En el Oxisol la dosis de 317 mg/kg de FPDR permitió alcanzar un valor de pH de 5.5, en el cual el Al intercambiable se ha precipitado. En el Ultisol el modelo fue: $Y = 4.9482 +$

$0,0025x - 3 \times 10^{-06} x^2 + 10^{-09} x^3$ ($R^2 = 0.9868$), así el pH de 5.5 se alcanzó con la dosis de 350 mg/kg. En el Andisol fue necesario aplicar 980 mg/kg. El mayor requerimiento en este suelo se explica por el alto contenido de materia orgánica que le confiere una mayor capacidad buffer del pH (Figura 1). Incrementos en el pH fueron también detectados con los otros suelos, particularmente en el Mollisol y en Vertisol los niveles más altos de aplicación de FPDR generaron valores de pH en el rango alcalino (pH 7.4-8.0), mientras que en el Inceptisol y el Entisol se alcanzó el rango de la neutralidad (pH 6.6-7.3). En estos suelos que inicialmente tienen valores de pH más altos, cercanos a 6.0, con menor capacidad buffer para amortiguar cambios en el pH, no se requiere cambiar el pH del suelo.

El efecto del FPDR sobre el pH puede ser múltiple, por un lado la presencia de Ca(OH)_2 en el fertilizante, el cual al reaccionar con agua se disocia liberando hidroxidos y calcio. Este se disuelve y libera OH^- que (i) aumentan el pH del suelo, (ii) neutralizan el Aluminio, (iii) aumenta la Capacidad de Intercambio Cationico (CIC).



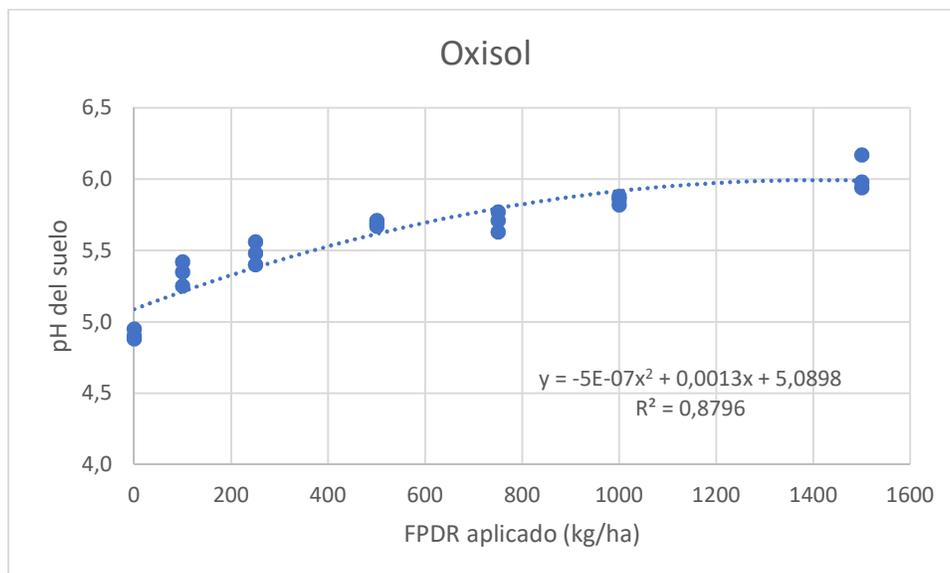
Igualmente, la silicocarnotita (detectada en el FPDR) puede liberar OH^- que aumentaría el pH del suelo, a través de la siguiente reacción:

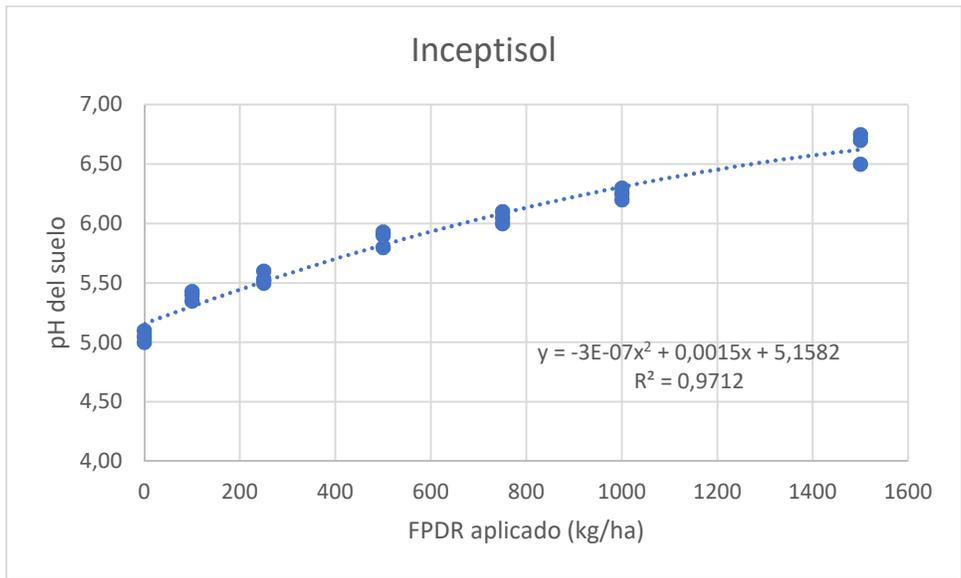
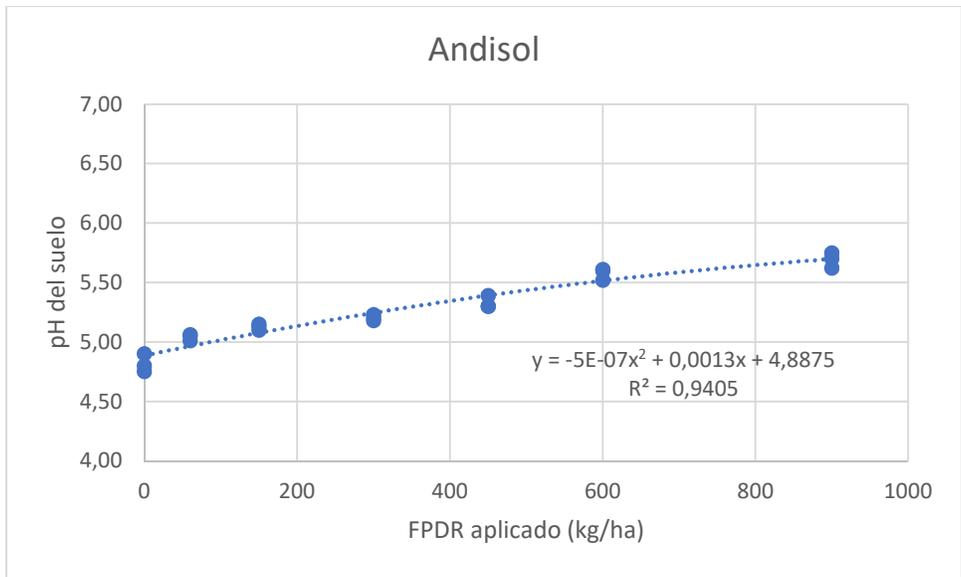
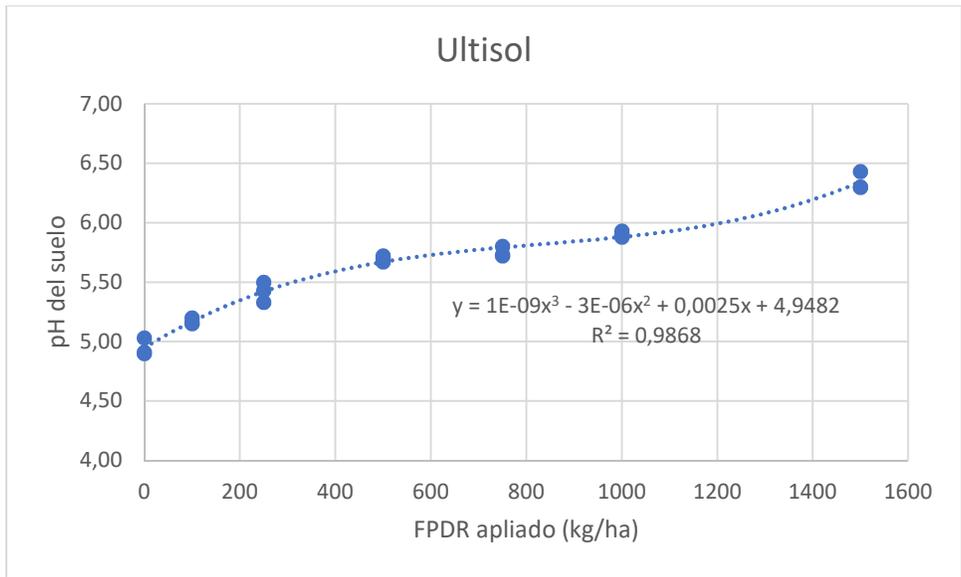


El intercambio de los iones de aluminio $[(\text{Al(OH)}_x)^{(3-x)+}]$ por iones de calcio (Ca^{2+}) en la superficie de arcillas y la posterior precipitación de los primeros para formar Al(OH)_3 se ilustra en las siguientes reacciones:



(Ca^{2+} reemplaza a los iones de aluminio en la superficie de las arcillas, luego se precipitan a Al(OH)_3)





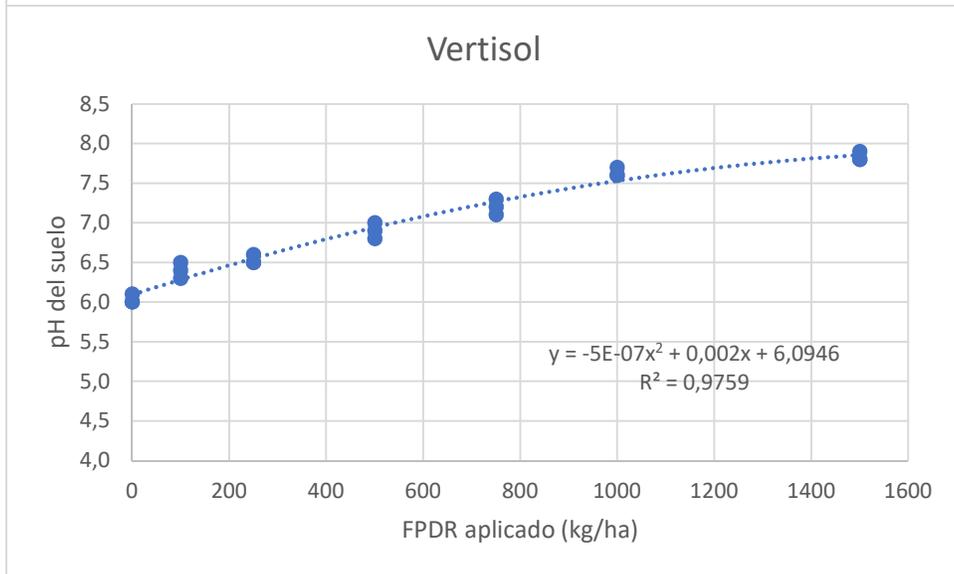
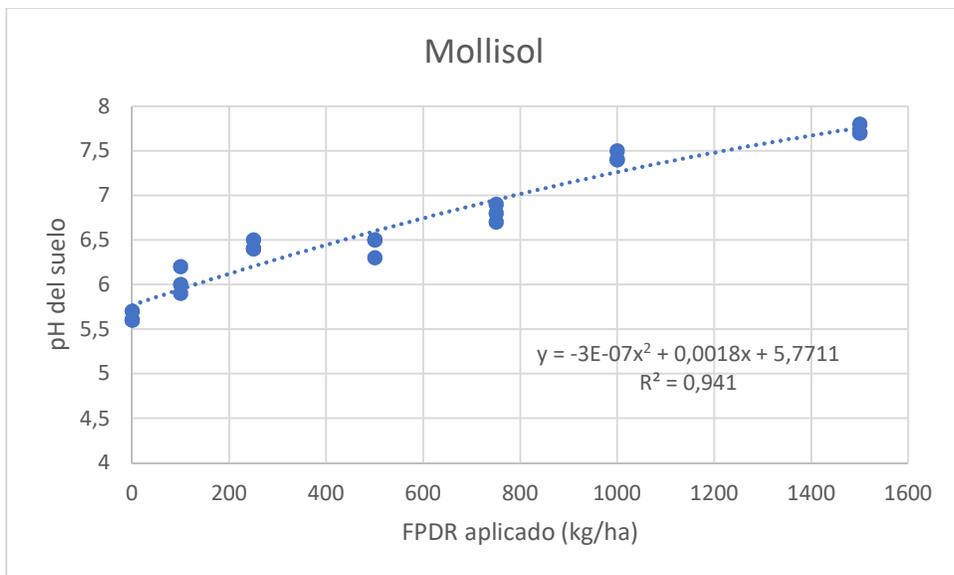
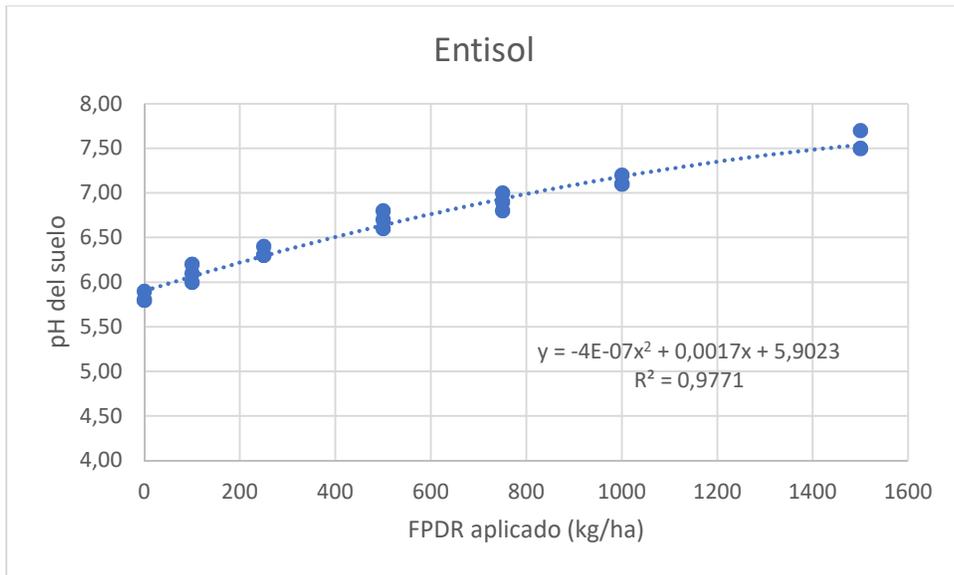


Figura 1. pH de los suelos en función de la dosis de FPDR (30 días de incubación).

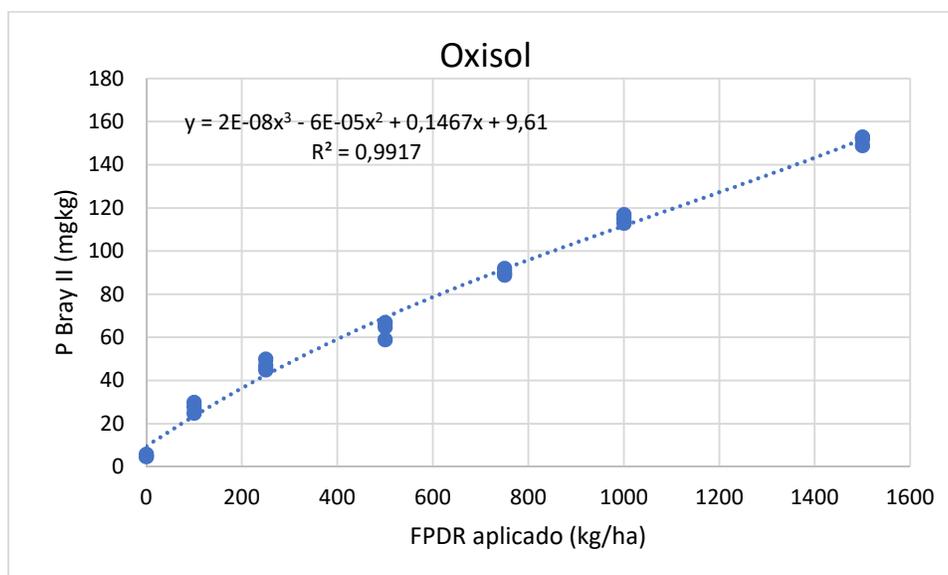
Fósforo Bray II

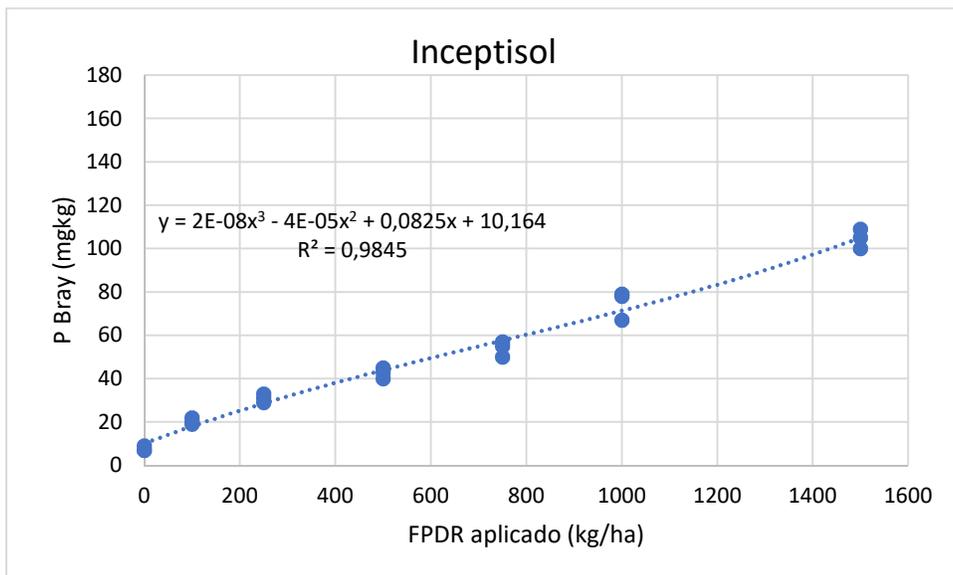
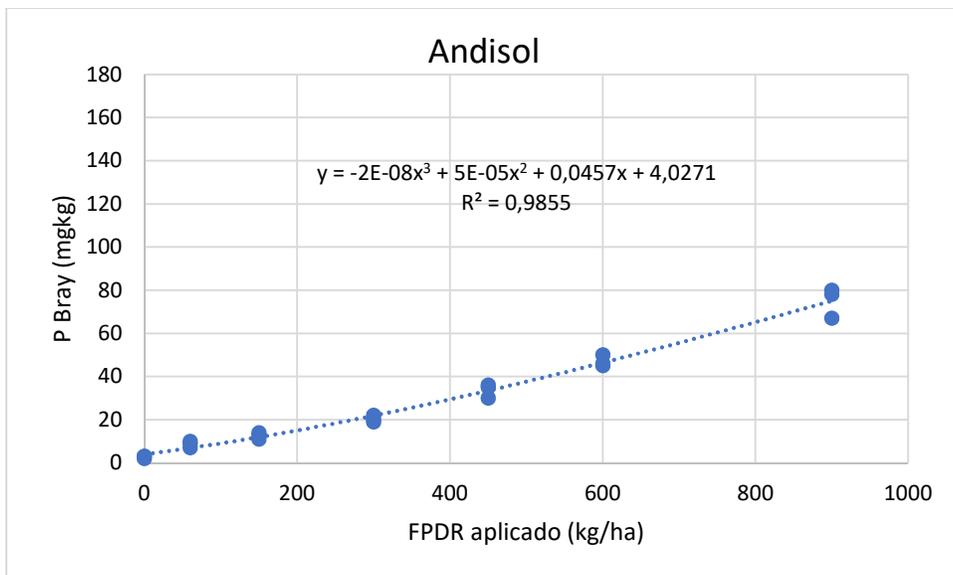
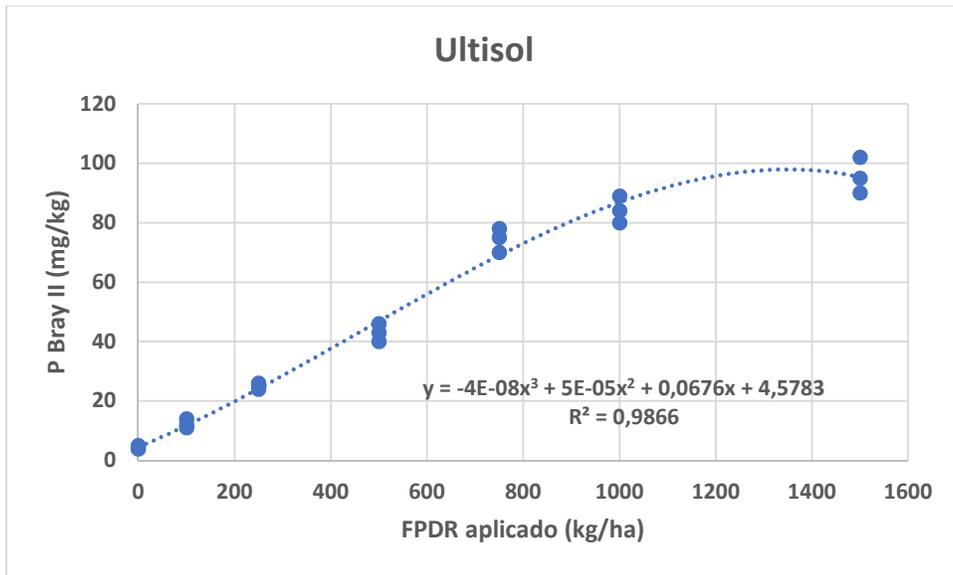
La concentración de P-Bray II en el Oxisol aumentó significativamente con el incremento de la dosis del FPDR. La concentración del tratamiento control fue de 5 mg/kg, la cual se considera muy baja para los cultivos de interés agronómico. Con la dosis de 100 y 250 mg/kg la concentración de P-Bray alcanzó niveles de 30 y 47 que son de suficiencia para la mayoría de cultivos. Las dosis superiores a 500 mg/kg presentaron valores de P-Bray II que se consideran muy altas (>50 mg/kg) y no son recomendables para los cultivos, no sólo por las posibilidades de causar desbalances con otros elementos (p.e., S, Zn) sino porque puede tener impactos ambientales en aguas corrientes (Figura 2).

Una situación similar ocurrió con el Ultisol con un valor inicial de 3 mg/kg, con las dosis de 100 y 250 los valores de 11 y 25 mg/kg que son suficientes; las dosis más altas también llevaron el valor de P-Bray II a valores muy altos.

En el caso del Andisol fue necesario aplicar dosis de 500 a 750 kg/ha para alcanzar niveles de P disponible satisfactorios. Esto se explica por la alta capacidad de adsorción de P que tienen estos suelos en virtud de sus contenidos de alófana.

Para los otros suelos, cuyo valor de P Bray fue más alto desde un inicio, los cambios en el nivel de P-Bray II fueron más notorios. Para alcanzar valores en este suelo es suficiente con aplicaciones de 100 a 250 kg/ha en Inceptisol100-250, de 100 kg/ha en el Entisol y en el Mollisol 100. En el Vertisol el valor de P-Bray II es muy alto y, por ende, la aplicación sería de mantenimiento.





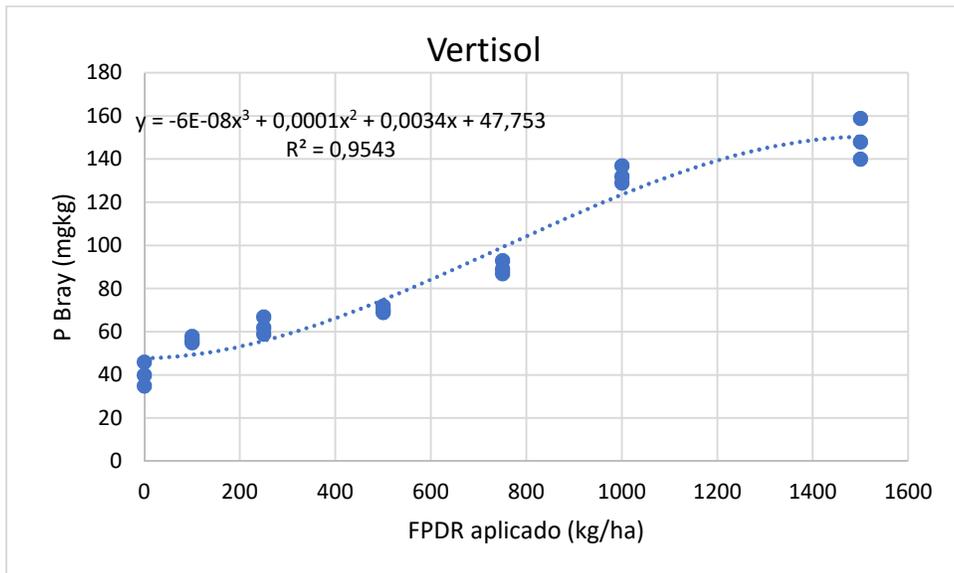
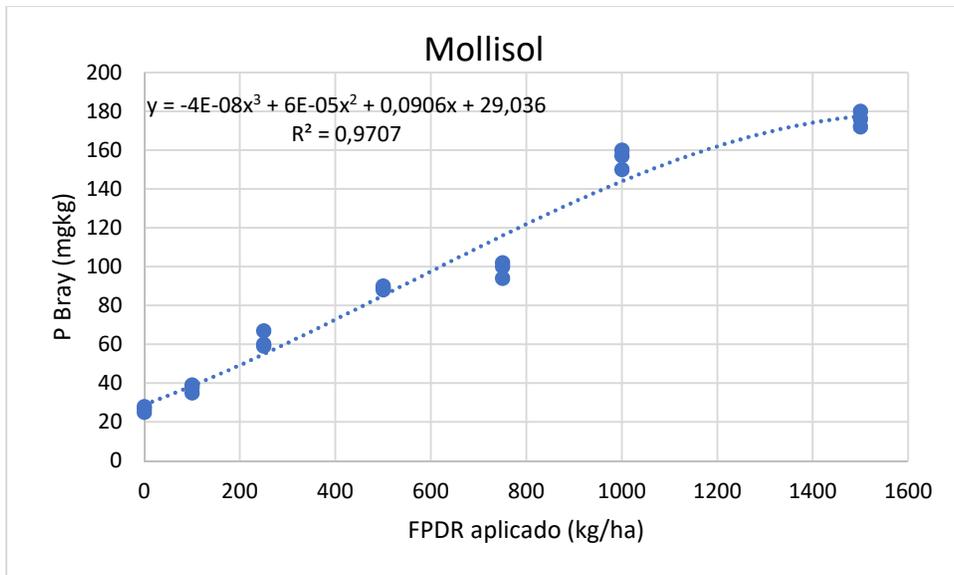
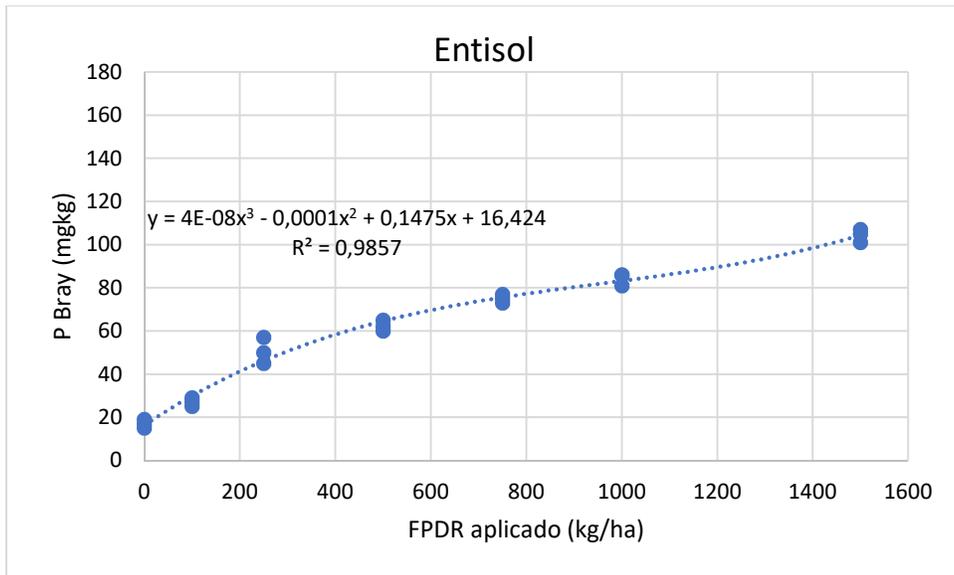


Figura 2. Concentración de P Bray II en los suelos en función de la dosis de FPDR (30 días de incubación).

Fósforo soluble en el suelo

La concentración de P soluble en el suelo incrementó significativamente con el incremento de la dosis de FPDR. Así el control presentó valores promedio de 0.04 mg/L que se consideran bajos para muchos cultivos; al aplicar FPDR a razón de 100 mg/kg la concentración de P soluble paso en promedio a 0.1 mg/L y con la dosis de 250 mg/kg a 0.26 mg/L, que se considera satisfactorio para la mayoría de los cultivos (Figura 3).

En el Ultisol los valores inicialmente de bajo del control (0.07 mg/L) fueron aumentados significativamente por las aplicaciones de FPDR; las dosis de 100 y 250 mg/kg elevaron la concentración de P a valores suficientes para los cultivos agronomicos. En este caso se requirió la dosis de 500 a 750 mg/kg para alcanzar valores cercanos a 0.2 mg/L, considerado adecuado para los cultivos. Dosis superiores a 1.000 kg llevaron los valores de P soluble a niveles excesivos.

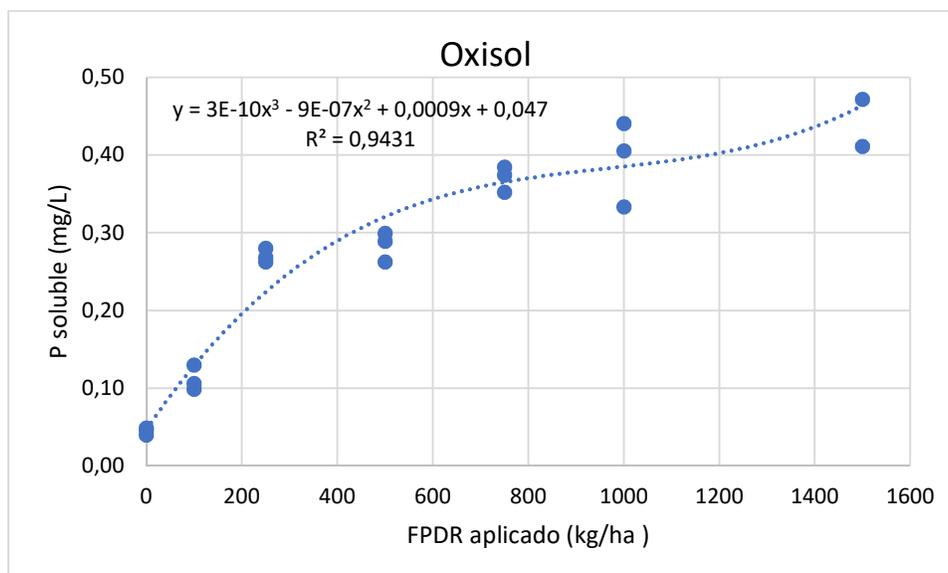
En el caso del Andisol la aplicación de 1000 mg/kg es necesaria para obtener la concentración de P soluble de 0.2 mg/L para cultivos de alta exigencia. De nuevo, estos altos requerimientos de P son consistentes con el contenido de alófana.

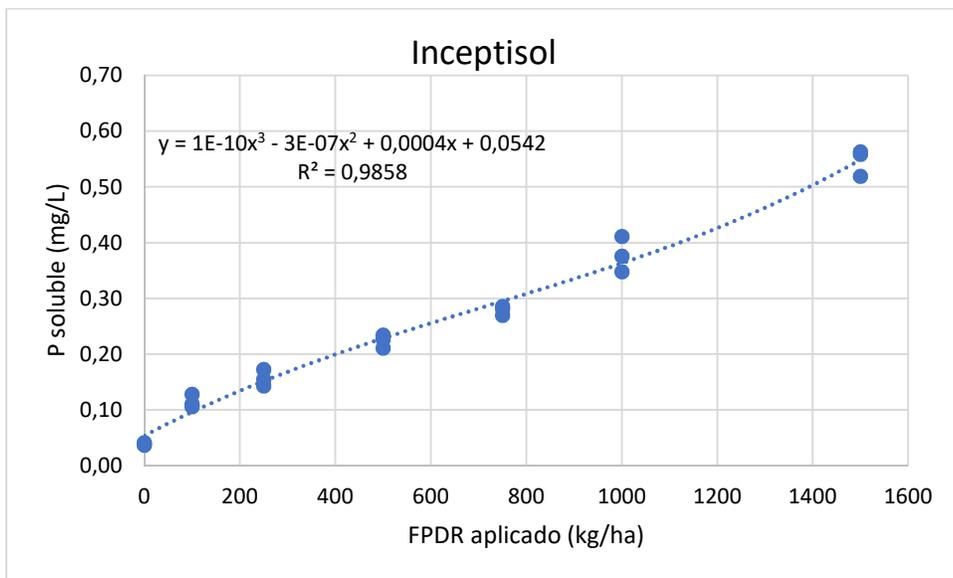
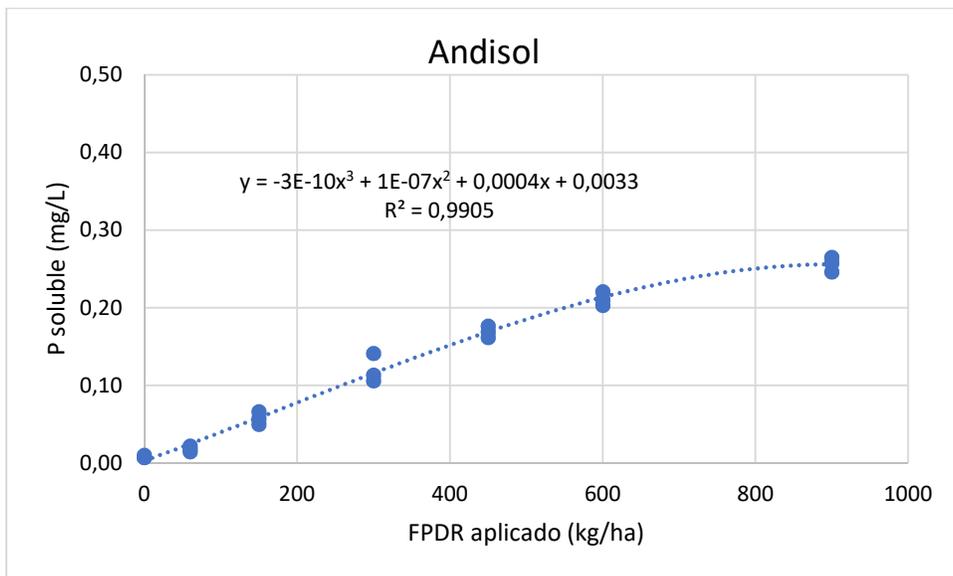
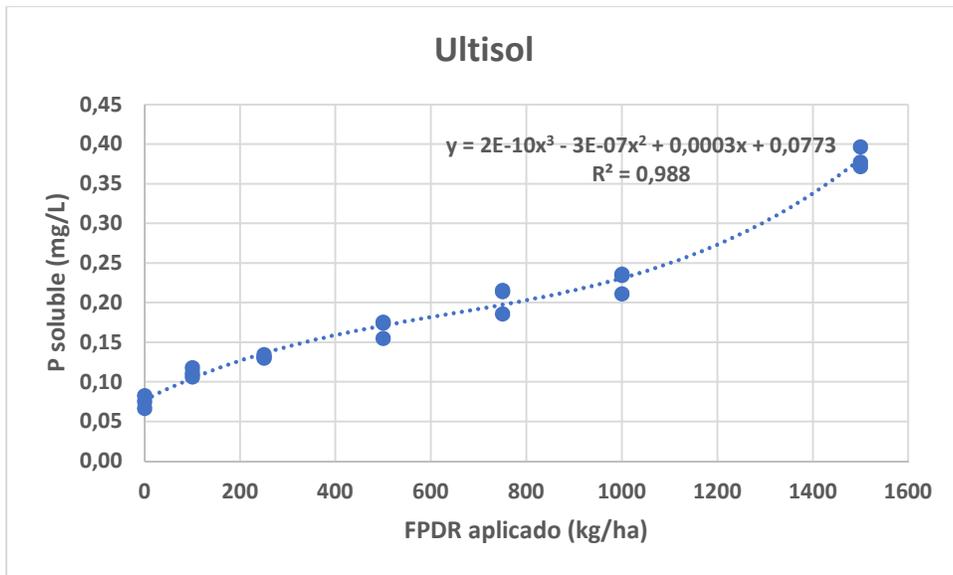
Para los otros suelos con menor capacidad buffer para amortiguar los cambios en la concentración de P en solución, las cantidades de FPDR requeridas para alcanzar valores deseados de 0.1 a 0.2 mg/L fueron así: Inceptisol y Entisol 100-250 kg/ha.

Parte del P en el FPDR es P_2O_5 , el cual al reaccionar con agua forma H_3PO_4 , el cual al estar en un medio con pH 5.0-6.0 se disocia para formar iones $H_2PO_4^-$, que son las formas más disponibles del elemento en el suelo para ser absorbidas por las raíces.



Igualmente, la silicocarnotita detectado en la difracción de rayos X del FPDR libera fosfato a través de la siguiente reacción:





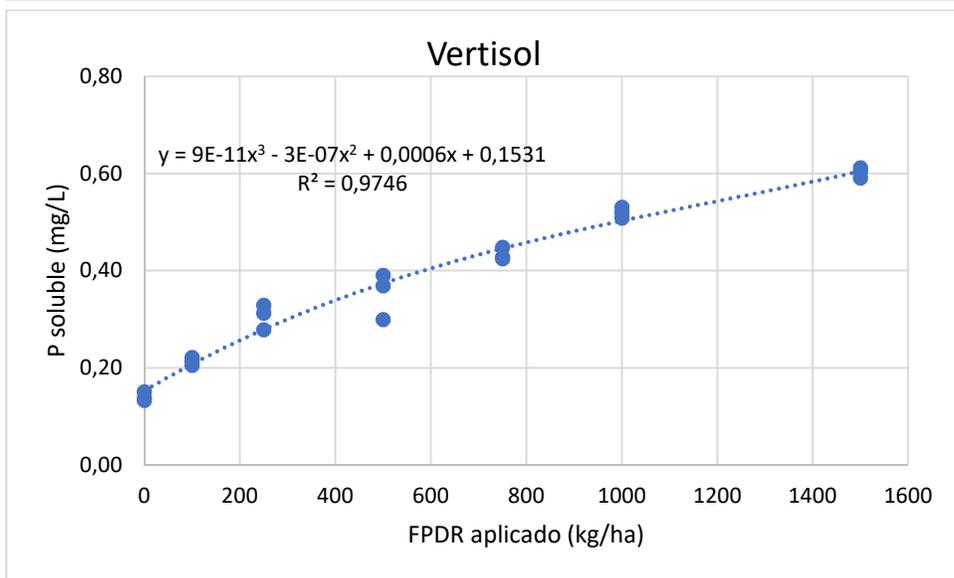
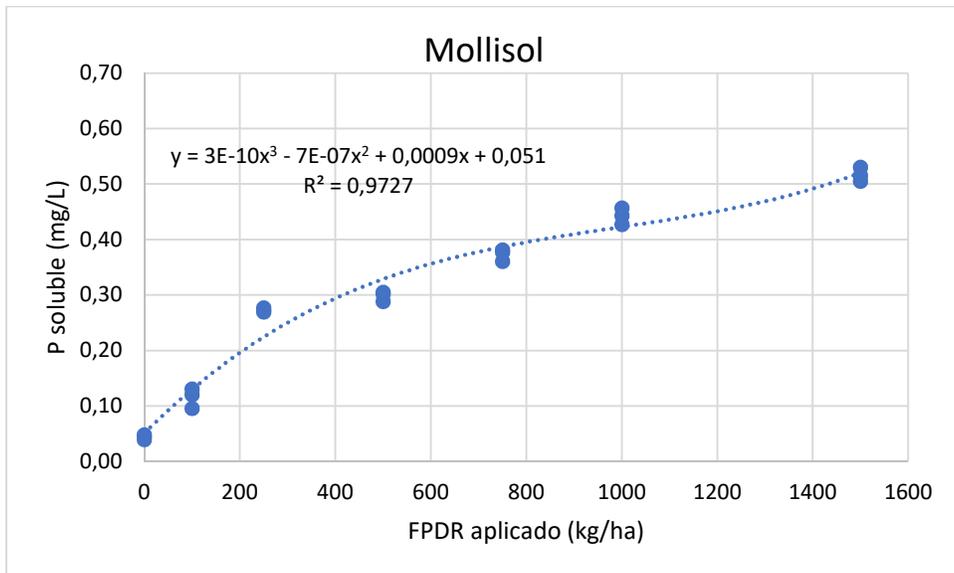
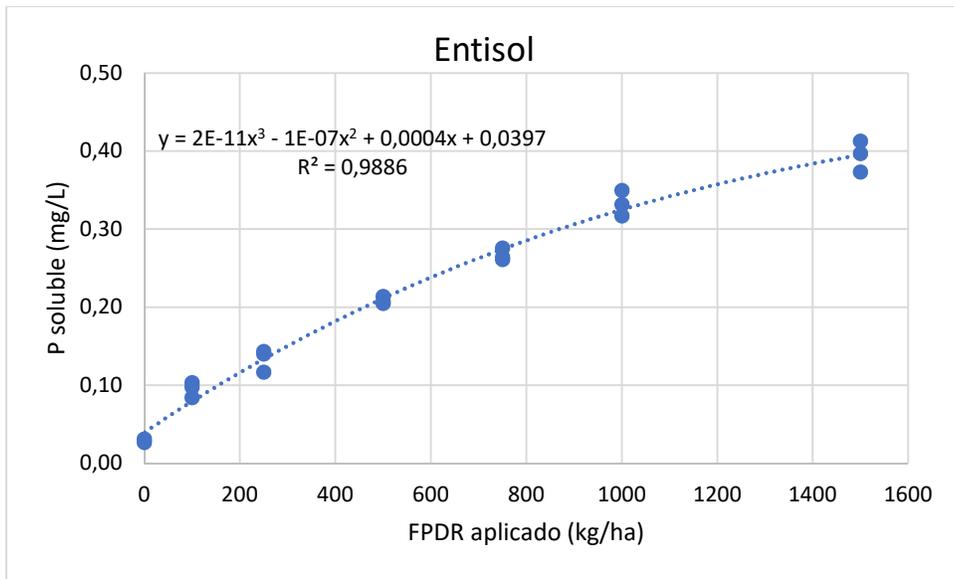


Figura 3. Concentración de P soluble en los suelos en función de la dosis de FPDR (30 días de incubación).

Silicio soluble en el suelo

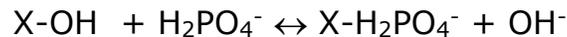
La concentración de Si soluble en los suelos también incrementó significativamente con el incremento de la dosis de FPDR en los suelos evaluados. Así el control presentó valores promedio de 40 mg/kg que se consideran suficientes para muchos cultivos; al aplicar FPDR a razón de 100 y 250 mg/kg la concentración de Si soluble alcanzó valores de 54 y 71 mg/kg. Dosis superiores a 500 mg/kg generaron concentraciones de Si solubles mayores (Figura 4). En el caso del silicio estas altas concentraciones del elemento no causan desbalances nutricionales, ni generan riesgos de contaminación de aguas.

Los beneficios al aplicar silicio en el FPDR no necesariamente surgen de mejorar su disponibilidad en el suelo (ya que hay niveles de suficiencia), sino de mejorar la eficiencia de la fertilización fosfórica. Tal como se explica a continuación.

Como es sabido el Si en forma de SiO_2 reacciona en el agua (en un medio ácido) y forma ácido silícico, tal como se ilustra en la siguiente reacción:



El H_4SiO_4 en la solución del suelo genera varios beneficios: (i) compete por iones fosfato (H_2PO_4^-) por sitios de fijación sobre arcillas u óxidos de Fe y Al, dejando así mayor disponibilidad de P en solución; (ii) precipita iones de Aluminio en forma insoluble lo que a su vez impide la precipitación de iones fosfato con Al; (iii) el ácido silícico es absorbido por las plantas y mejora la resistencia mecánica de los tejidos vegetales para reducir el riesgo a volcamiento y la incidencia de plagas y enfermedades.



(el fosfato es adsorbido a la arcilla "X", no queda biodisponible)



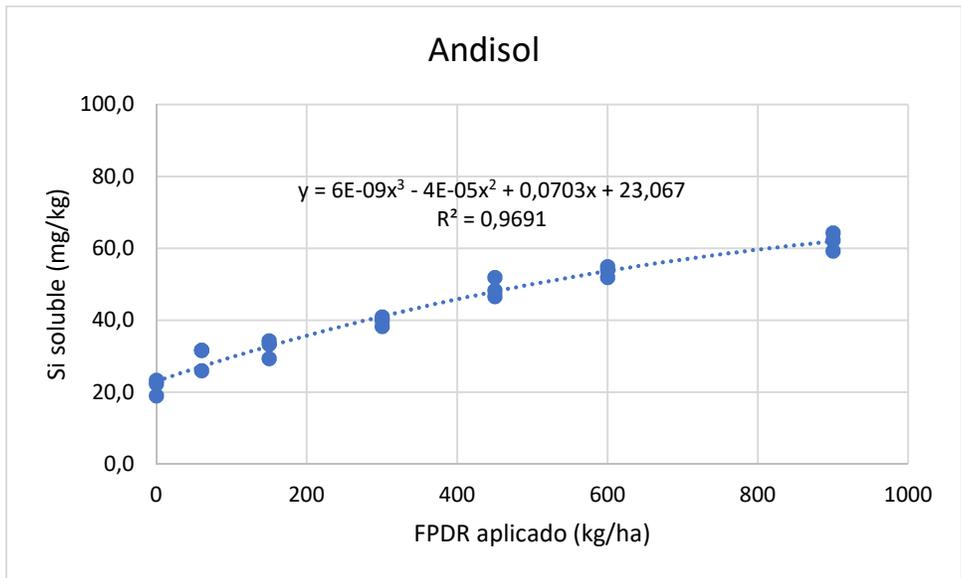
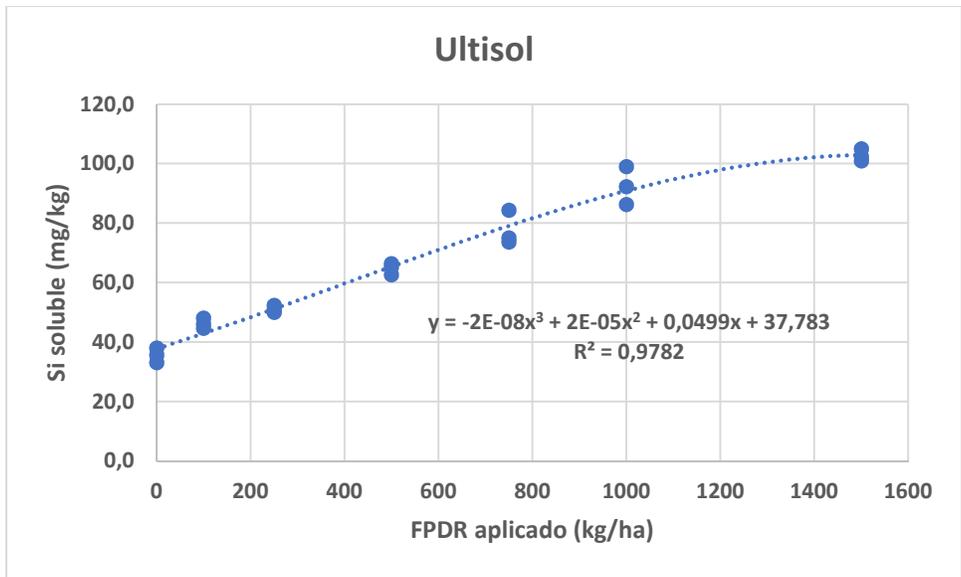
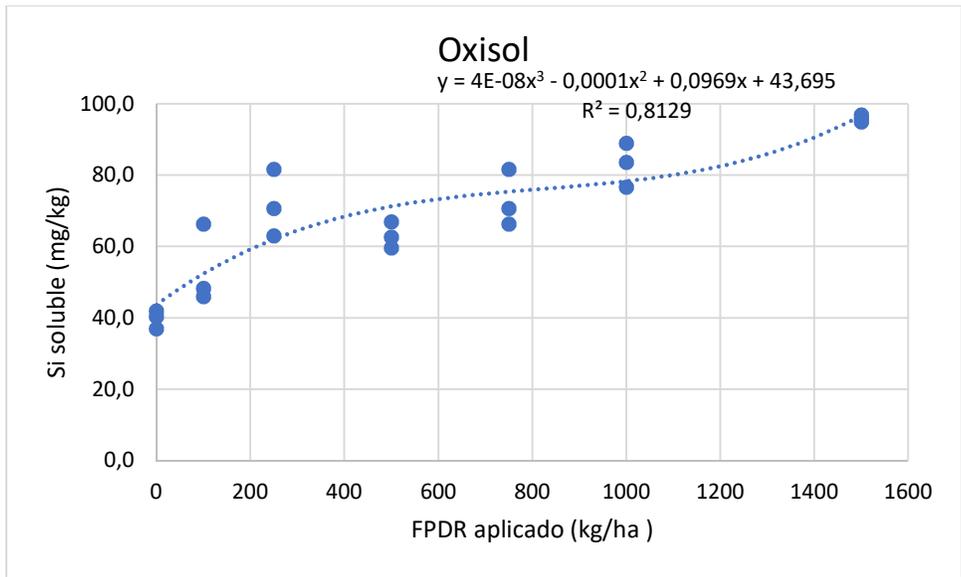
(el H_4SiO_4 es adsorbido a la arcilla "X" y el fosfato es dejado biodisponible en solución)

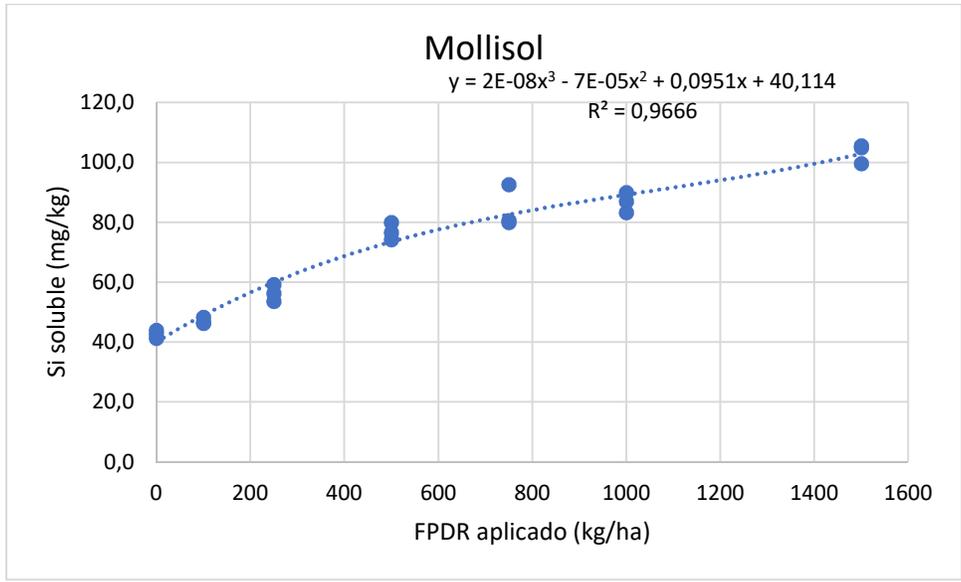
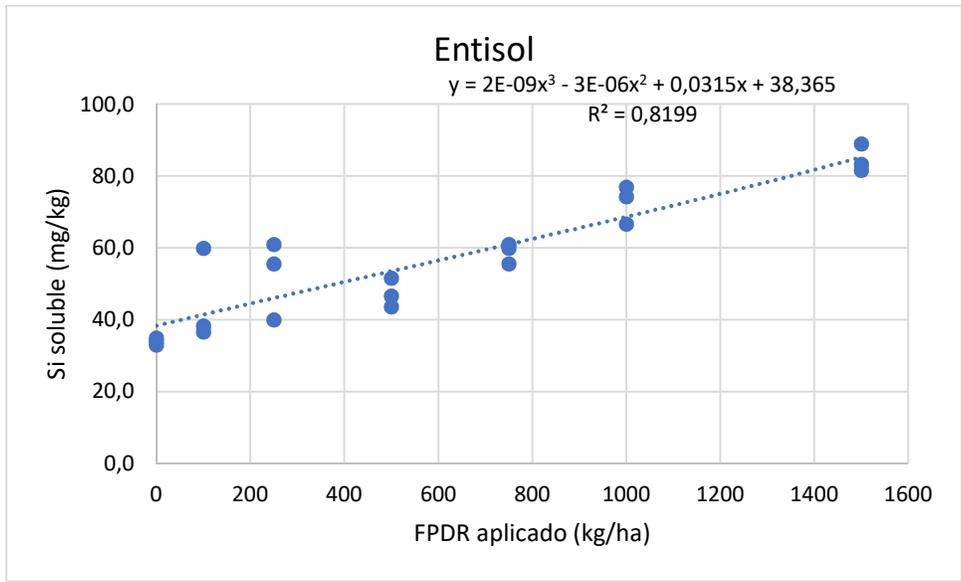
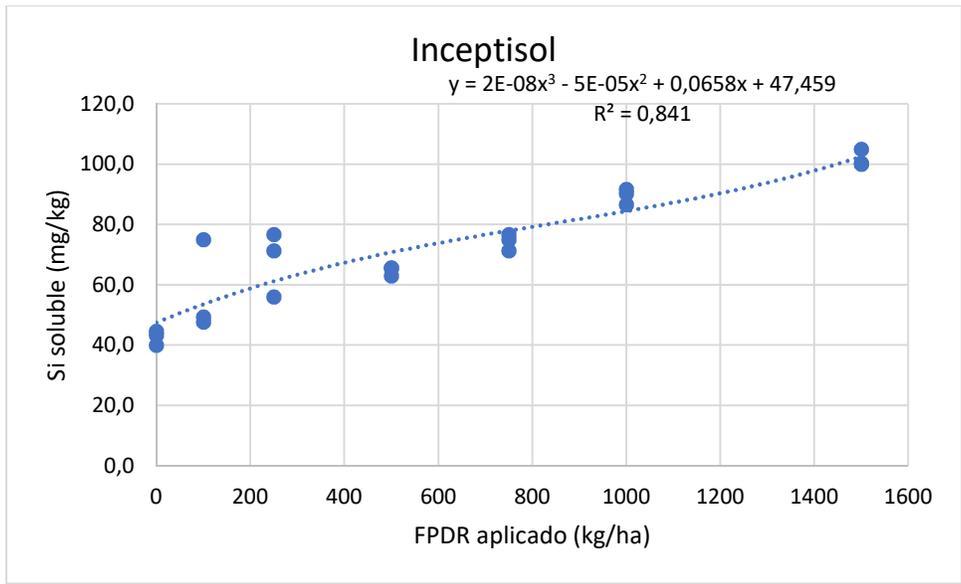
Otra alternativa es que el fosfato que está adsorbido en el suelo sea removido (desorbido) por el ácido silícico.



Otros componentes del FPDR también pueden liberar el ácido silícico particularmente silicocarnotita y Tobermorita; entre los materiales amorfos puede haber algunos que liberen Si en forma de ácido silícico.







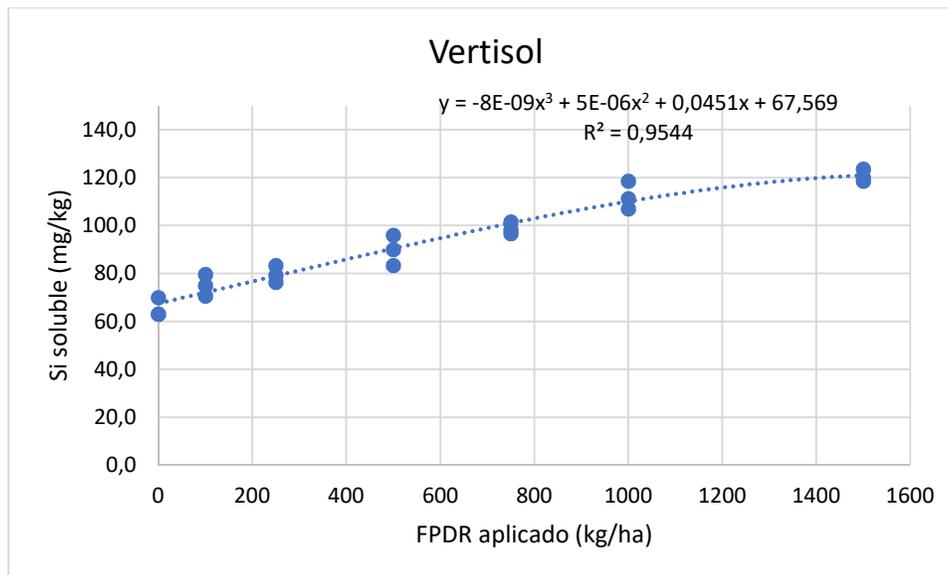


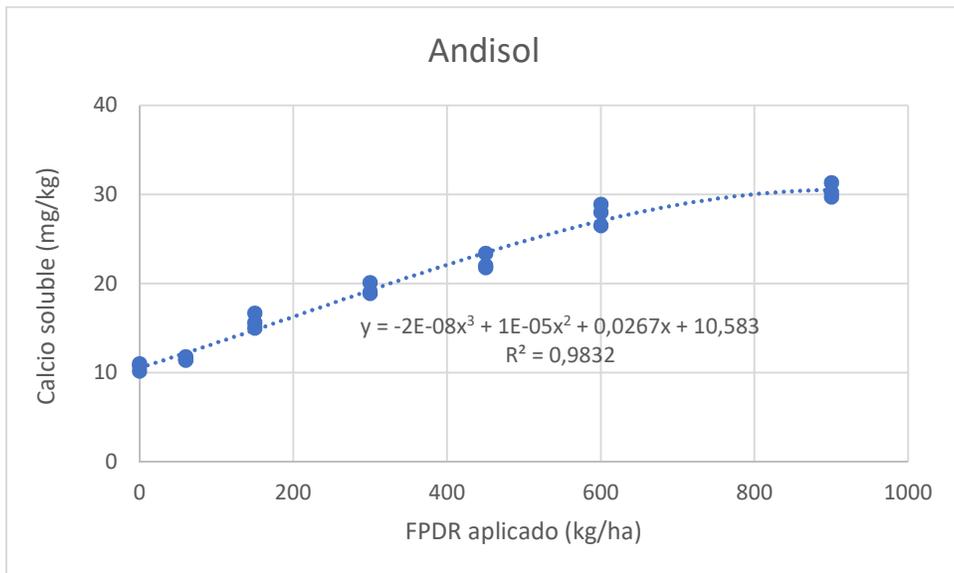
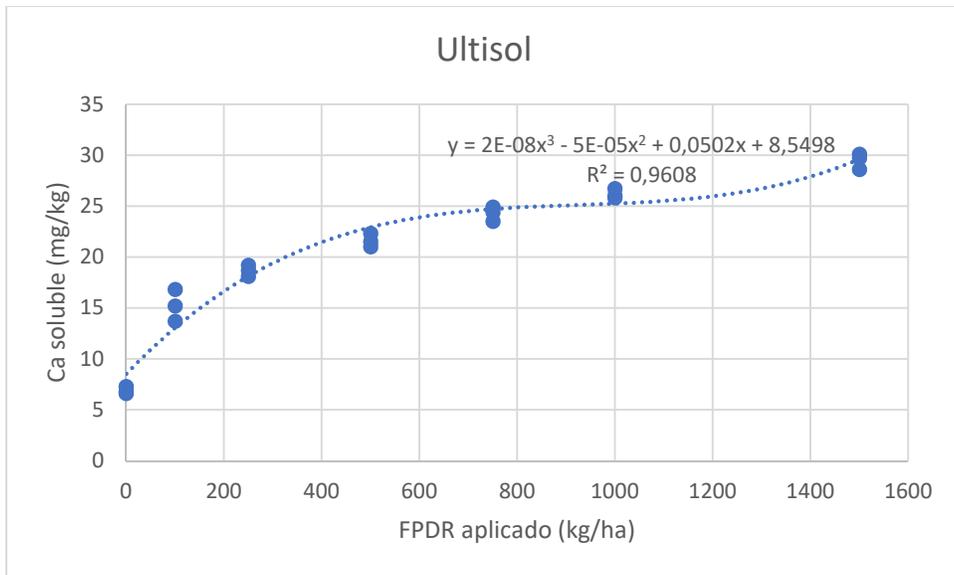
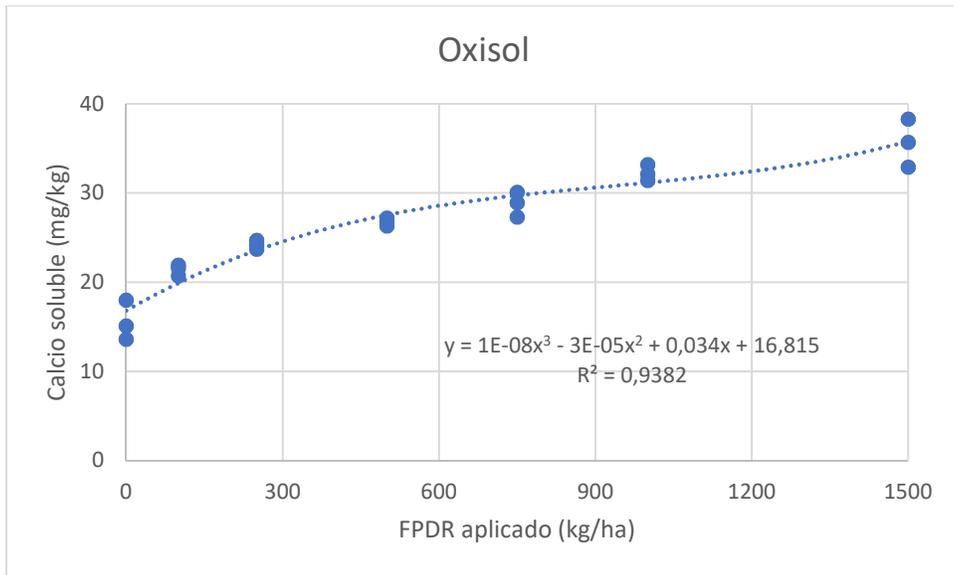
Figura 4. Concentración de Si soluble en los suelos en función de la dosis de FPDR (30 días de incubación).

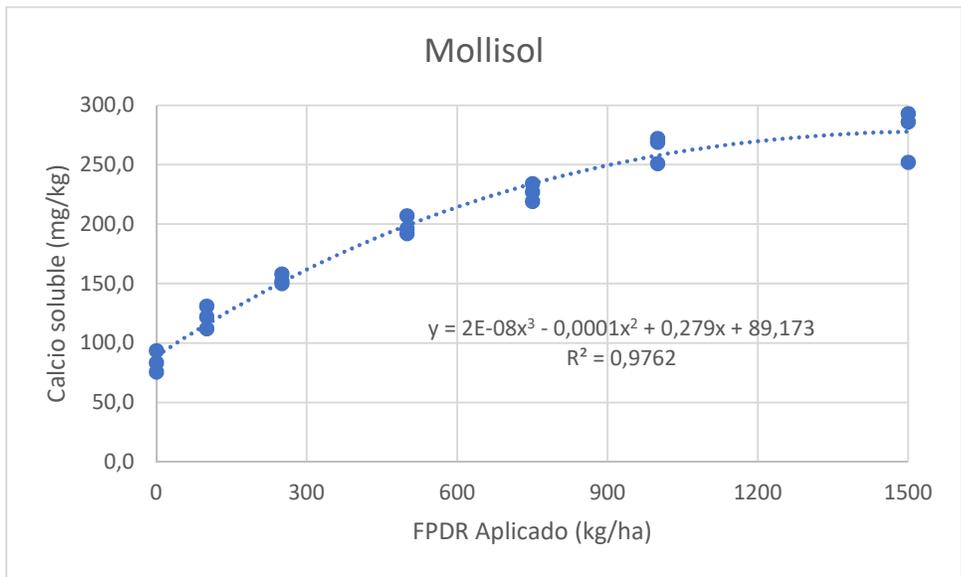
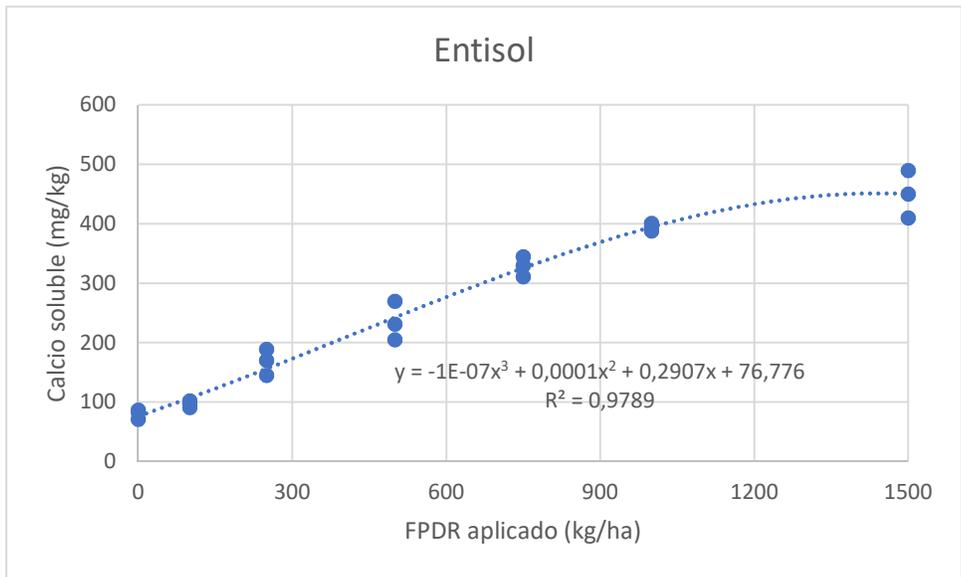
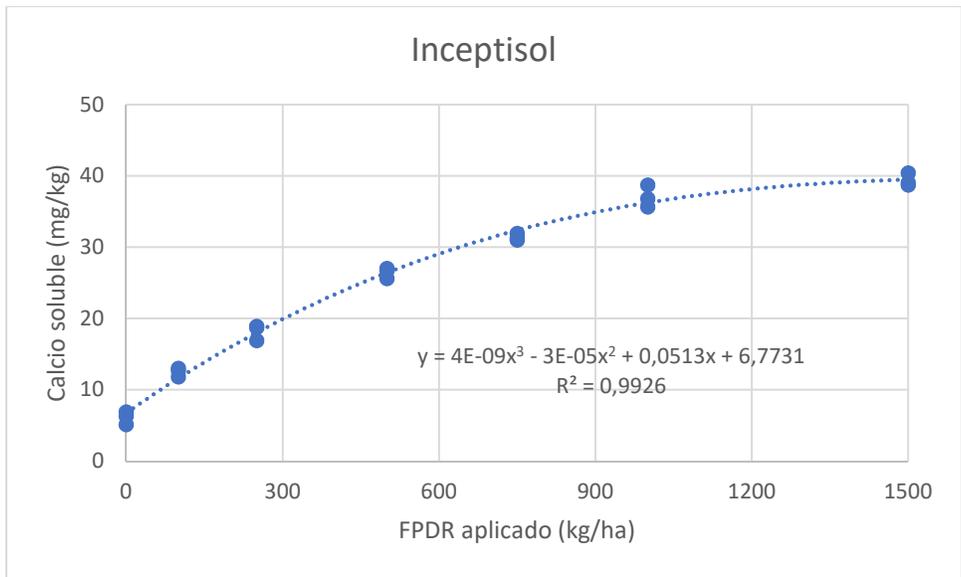
Calcio soluble en el suelo

En los suelos la concentración de calcio soluble aumentó significativamente en la solución del suelo en función de la dosis de FPDR. Con el tratamiento control la concentración fue muy baja (Oxisol=15.6 mg/kg; Ultisol= 6.9 mg/L; Andisol = 10.7 mg/L) y aumentó progresivamente hasta alcanzar valores cercanos o superiores a 30 mg/kg con la dosis más alta (Figura 5). Igualmente con los otros suelos Inceptisol, Entisol, Mollisol y Vertisol, la adición de FPDR aumento la concentración de Ca soluble a niveles altos, particularmente en el último suelo. Esto es bastante importante porque el calcio es uno de los elementos más estratégicos en plantaciones de frutales (aguacate, cítricos, mango), en los cuales se aplica normalmente nitrato de calcio, pero esto muchas veces aumenta los niveles de nitrógeno indeseablemente. Así, esta capacidad de aportar calcio soluble y elevar su disponibilidad en el suelo debe ser aprovechada.

En este estudio se hizo énfasis en medir la concentración de Ca en la solución del suelo, ya que existe dudas en los técnicos sobre la capacidad de estos materiales de liberar formas solubles de este y otros elementos, que son las formas realmente disponibles.

La liberación de Ca soluble es clara a partir del APR, note que la FRX mostró que había un contenido de 48% de CaO y la prueba del DRX mostró que hay varios minerales que lo contienen y que al disociarse en el suelo lo liberarían. Entre estos están: silicocarnotita, brownmillerita, portlandita, calcita y tobermorita. Además, se espera que los materiales amorfos contenidos en el FPDR también contengan Ca.





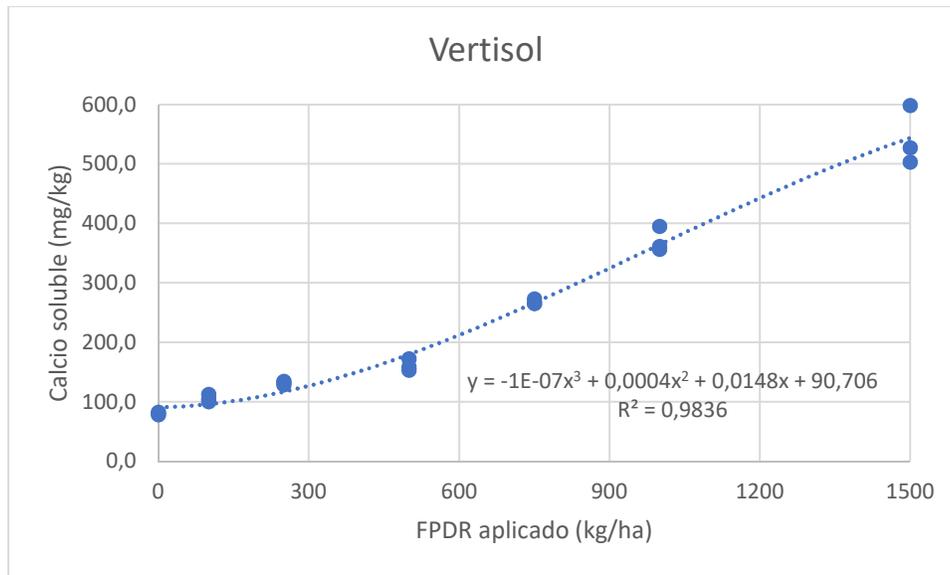


Figura 5. Concentración de Ca soluble en los suelos en función de la dosis de FPDR (30 días de incubación).

Magnesio soluble en el suelo

La concentración de magnesio soluble no aumentó significativamente en la solución del suelo con las aplicaciones de dosis crecientes de FPDR. Por ello, y por análisis técnico realizados se decidió en la empresa registrar, producir y comercializar el Fertilizante Paz del Rio Plus Magnesio, con adecuados contenidos de magnesio en ideal relación calcio:magnesio y que permite su uso para los casos en que se requiera magnesio en los planes de nutrición.

CONCLUSIONES

El FPDR tiene efectos múltiples que mejoran la fertilidad del suelo. Este quedo soportado en la composición química y mineralógica estudiada, en la que se destaca la presencia de elementos como Ca, P y Si, tal como lo mostraron los resultados de FRX.

La identificación de minerales vía DRX permite plantear varias reacciones viables de ocurrir en la solución del suelo e impactar significativamente ($P < 0.05$) el pH del suelo y la concentración de P, Si y Ca. Tal como lo mostraron las pruebas de incubación.

La magnitud de los efectos varía entre los suelos, debido principalmente a la mineralogía de cada suelo.

Los efectos obtenidos superan lo que se podría esperar con otros materiales como cales, fosfato diamonico puede ser atribuibles al tratamiento térmico que recibe el FPDR durante su elaboración. De esto pueden resultar silicio más soluble, que ayudaría a mejorar la efectividad del P en el suelo.

La eficiencia de la fertilización con FPDR en los suelos estudiados es más alta que la que se podría tener con otros fertilizantes fosfóricos simples (DAP, MAP, fosfato de potasio). Esto se presentó por una notoria reducción de la fijación de P, conforme con lo esperado para estos suelos.

La dosis adecuada es variable y depende del tipo de suelo. Según los resultados obtenidos las dosis adecuadas están alrededor de 250 kg/ha en el Oxisol, 250-500 kg/ha en el Ultisol y de 450-600 mg/kg en el Andisol. En el Entisol, Inceptisol y Mollisol la dosis puede fluctuar alrededor de 200-250 kg/ha kg/ha. En el Vertisol la dosis podría ser ≤ 150 kg/ha.

REFERENCIAS

- Barber SA (1995) Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley, New York.
- Bohn H, Mcneal BL, O'connor G (1985) Soil chemistry. New York, John Wiley and Sons.
- Brady N, Weil R (1999) The nature and properties of soils. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Cross AF, Schlesinger WH (1995) A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: application to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64:197-214.
- Da Silva AK, Silva EM, Marques J, and Ferreira de Oliveira C (2013) Silicon: A Benefic Element to Improve Tolerance in Plants Exposed to Water Deficiency. En: Responses of organisms to water stress, Ed. Sener Akinci, ISBN 9789535109334.
- Datnoff LE, Rodrigues FA (2005) The Role of Silicon in Suppressing Rice Diseases. *APSnet Features*. doi 10.1094.
- Fox RL, Hue NV, Jones RC, Yost RS (1991) Plant-soil interactions associated with acid, weathered soils. In: Wright RJ (ed.) Plant-soil interactions at low pH. Kluwer Academic Publishers, 197-204 pp.
- Havlin J, Beaton J, Tisdale SL, Nelson W (2004) Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to nutrient management. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Hue NV, Fox R. 2010. Predicting plant phosphorus requirements for Hawaii soils using a combination of phosphorus sorption isotherms and chemical extraction methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41:133-143.
- Lindsay WL (2001) Chemical equilibria in soils. The Blackburn Press, Caldwell, NJ, New Jersey.
- Marschner H (1995) Beneficial Mineral Elements. Mineral Nutrition of Higher Plants. San Diego, CA: Academic Press, 805.
- Murphy J, Riley JP (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27:31-35.
- Osorio NW. 2018. Manejo de Nutrientes en Suelos del Trópico. Medellín, 340 p.
- Parfitt RL (1989) Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *Journal of Soil Science* 40:359-369.
- Sanchez P, Uehara G (1980) Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: Khasawneh FE (ed.) The role of phosphorus in agriculture. Soil Science Society of America, Madison, WI, 471-514 pp.
- Shoji S, Nanzyo M, Dahlgren RA (1993) Volcanic ash soils-genesis, properties, and utilization. Elsevier Publishing, Amsterdam.

Elaboró:



Walter Osorio
Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Ph.D.
Tarjeta profesional 13.041