

Sinergia de Polifosfatos y Ortofosfatos: Una Estrategia Avanzada para la Nutrición Radicular y la Estabilidad Bioactiva



Parra, J.; Quirós, J.; Barrantes, D. *Formulaciones Químicas S.A.: Puntarenas, Costa Rica.*

■ RESUMEN

El presente estudio analiza la configuración química de un fertilizante complejo NPK (grado aproximado 10-21-5) que integra una estrategia de liberación dual de fósforo mediante la combinación de sales de polifosfato y ortofosfato. Esta formulación no solo garantiza una disponibilidad inmediata de nutrientes, sino que establece un reservorio macromolecular que resiste la fijación en el suelo, permitiendo además la co-existencia estable de fitohormonas esteroideas y micronutrientes esenciales.

■ INTRODUCCIÓN

La eficiencia de la fertilización fosfatada es uno de los mayores retos en la química agrícola, debido a la alta tasa de insolubilización del fósforo en presencia de cationes metálicos. La fórmula NPK con brasinoesteroides, desarrollada por Formulaciones Químicas S.A. aborda esta problemática mediante un diseño molecular que optimiza la movilidad sistémica y la longevidad del nutriente en la rizosfera.

La estabilidad de un concentrado multimineral fosfatado se justifica por propiedades fundamentales de los compuestos de coordinación y otras propiedades físicas. En contraste la eficiencia estructural de la mezcla se justifica con el uso de hormonas de crecimientos complementarias y moléculas de gran tamaño que constituyen nutrientes a largo plazo, resistentes y compatibles con otros nutrientes como el potasio y nitrógeno.

■ EXPERIMENTAL

Se prepara una muestra de 500,00 mL por triplicado del concentrado multimineral descrito de acuerdo con las siguientes características:

Cuadro I. Resumen nutricional del fertilizante NPK con brasinoesteroides

<i>Componente Nutricional</i>	<i>Concentración Aproximada (% p/v)</i>	<i>Función Principal</i>
<i>Nitrógeno Total (N)</i>	10.0 — 11.5	Desarrollo vegetativo y síntesis proteica.
<i>Fósforo Total (P₂O₅)</i>	21.0 — 22.5	Energía (ATP) y desarrollo radicular dual.
<i>Potasio Soluble (K₂O)</i>	5.0 — 6.0	Regulación osmótica y vigor del cultivo.
<i>Azufre Total (S)</i>	1.8 — 2.3	Biosíntesis de aminoácidos esenciales.
<i>Micro-nutrientes (Zn, Mn)</i>	0.05 — 0.10	Activación enzimática y síntesis de clorofila.
<i>Compuestos Bioactivos*</i>	Trzas (< 0.005)	Estimulación hormonal y antiestrés.

*Incluye fitohormonas esteroideas y alcoholes grasos primarios (Triacontanol).

Para regular la calidad de las formulaciones químicas en el ámbito agrícola, las fuentes citan el manual

conjunto de la FAO y la OMS (específicamente la edición de 2004, alineada con los estándares CIPAC), el cual establece que las formulaciones deben someterse a pruebas físicas críticas para asegurar su estabilidad. En el siguiente cuadro se detallan los resultados obtenidos de estas propiedades físico-químicas sobre las muestras del fertilizante NPK con brasinoesteroides:

Cuadro II. Propiedades físicas obtenidas en la muestra del fertilizante NPK con brasinoesteroides.

Parámetro	Rango de Control	de Condiciones de Medición
Potencial de Hidrógeno (pH)	6.0 — 7.0	Medido a 25 °C
Densidad Relativa	1.270 — 1.295 g/mL	Medido a 20 °C
Apariencia	Líquido concentrado	Líquido concentrado (compatible con colorantes artificiales) azules
Estabilidad de Fase	Homogénea	Sin presencia de precipitados

■ DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El eje de esta tecnología es la combinación equilibrada de fosfatos monoamónicos y polifosfatos de amonio. El ortofosfato aporta fósforo de disponibilidad inmediata en forma de $H_2PO_4^-$, mientras que el polifosfato, formado por unidades condensadas de fósforo, funciona como una reserva de liberación gradual. Este polímero inorgánico presenta mayor resistencia a condiciones adversas, como la precipitación con hierro y aluminio en suelos ácidos. A medida que sus cadenas se hidrolizan, libera fósforo de manera sostenida hacia el sistema radicular, prolongando su aporte más allá del de los fertilizantes convencionales. La

estabilidad de la fórmula se basa en el equilibrio termodinámico que proporciona una mezcla 50/50 de ortofosfatos y polifosfatos de amonio. En el rango de densidad de 1,270 a 1,295 g/mL, la matriz líquida alcanza un nivel de saturación en el que las macromoléculas de polifosfato favorecen la dispersión y aumentan la solubilidad total del sistema. A diferencia de las mezclas compuestas solo por ortofosfatos, que tienden a cristalizar en estas densidades, la hidrólisis controlada y la estructura polimérica del polifosfato permiten mantener una fuerza iónica alta sin superar la constante del producto de solubilidad (K_{ps}), lo que evita la precipitación no deseada de sales. Es importante verificar el rango de pH, ya que esta propiedad físico-química constituye un componente fundamental en la estabilidad del fertilizante. Valores de pH inferiores a 6.0 favorecerían la fijación del fósforo con hierro y aluminio, mientras que valores superiores a 7.0 inducirían la formación de fosfatos de calcio insolubles.

La inclusión de tiosulfato de potasio aporta un doble beneficio: suministra potasio iónico para la regulación osmótica y la activación enzimática, e incorpora azufre como micronutriente esencial. El azufre es importante para la biosíntesis de aminoácidos como la cisteína y la metionina, componentes fundamentales de las proteínas vegetales.

Un aporte científico disruptivo de esta fórmula es su estabilidad fisicoquímica para albergar reguladores de crecimiento de baja concentración, específicamente los brasinoesteroides. Estas hormonas son mensajeros químicos esteroidales que poseen una estructura de cuatro anillos. La matriz líquida, estabilizada con agentes

quelatantes como el EDTA para proteger cationes como Zn^{2+} y Mn^{2+} , mantiene un pH y una fuerza iónica que evitan la degradación de estos compuestos bioactivos, permitiendo que estimulen eficazmente el desarrollo celular y la resistencia al estrés fisiológico. En las muestras preparadas no se observa la precipitación o separación de fases producto de la mezcla del brasinoesteroide o las sales de zinc y manganeso en condiciones normales de almacenamiento: 22 – 28°C, humedad relativa de 80% y presión cercana a 1 atm.

La estabilidad de los mencionados micronutrientes (Zn^{2+} y Mn^{2+}) dentro de esta matriz de alta densidad se explica mediante la química de coordinación. El EDTA actúa como un ligando de campo fuerte (ligando aceptor de densidad electrónica), lo que conduce a un valor grande del parámetro de desdoblamiento del campo octaédrico (Δ_o). Al ser un ligando de campo alto, el EDTA forma complejos quelatados extremadamente estables que protegen a los cationes metálicos como el zinc y manganeso de la interacción directa con los aniones fosfato. Esta estabilización por campo fuerte asegura que los micronutrientes permanezcan en solución y sean plenamente bio-disponibles para el sistema radicular.

■ CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN

La fórmula NPK con brasinoesteroides representa un aporte significativo en la ingeniería agronómica en la elaboración de fertilizantes líquidos. Al combinar una nutrición fosfatada de corto y largo plazo con una base mineral rica en azufre y fitohormonas estables, se logra un producto con una funcionalidad superior

en la estimulación de raíces funcionales y vigorosas, indispensable para las etapas críticas del cultivo.

■ REFERENCIAS

- (1) Navarro Blaya, S.; Navarro García, G. **Química Agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal**, 2ª ed.; Ediciones Mundi-Prensa: Madrid, 2003; pp 233–247, 321–336.
- (2) Masís Meléndez, F.; Hernández Chaverri, R.; Piedra Marín, G. **Química Agrícola**; Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUNED): San José, Costa Rica, 2017; pp 249–288.
- (3) Chang, R. **Química**, 10ª ed.; McGraw-Hill: México, 2013; pp 952–978.
- (4) Carbonero Zalduegui, P. **Química del Suelo y los Fertilizantes**; Departamento de Biotecnología, Universidad Politécnica de Madrid: Madrid, España; pp 95–108.
- (5) Housecroft, C. E.; Sharpe, A. G. **Inorganic Chemistry**, 4ª ed.; Pearson: Harlow, Inglaterra, 2012.
- (6) Subbarao, Y. V.; Ellis, R. Phosphorus Reactions as Affected by Concentrated Polyphosphate Fertilizer. *J. Agric. Food Chem.* 1975, 23 (4), 740–744.
- (7) Martell, A. E.; Smith, R. M. **Critical Stability Constants**, Vol. 1: Amino Acids; Plenum Press (ACS Monograph): New York, 1974.