

Bioestimulación y Regulación de Crecimiento: La Ciencia detrás del Concentrado de Fitohormonas Sintético.



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

■ ABSTRACT

La optimización de los rendimientos agrícolas modernos requiere del uso eficiente de los reguladores de crecimiento vegetal (RCV). Sin embargo, fitohormonas como las auxinas, giberelinas y citoquininas presentan desafíos significativos debido a su baja solubilidad en agua y su susceptibilidad a la hidrólisis en medios acuosos. El presente artículo describe el desarrollo y la justificación de un particular diseño de un concentrado no acuoso de tres fitohormonas (citoquininas, GA3 e IBA/AIA) estabilizado mediante una matriz de solventes ternarios. Esta invención se fundamenta en la manipulación de la constante dieléctrica (ϵ) del medio, utilizando un sistema de tres solventes con polaridades diferenciadas (baja, media y alta) para ampliar el espectro de interacciones intermoleculares y asegurar una adecuada solvatación favorable para cada hormona sintética.

■ INTRODUCCIÓN

Los reguladores de crecimiento vegetal (RCV) son compuestos orgánicos que, en concentraciones mínimas, tienen la capacidad de modificar o inhibir de forma total o parcial el desarrollo fisiológico de las plantas. A diferencia de los nutrientes, estas moléculas actúan como mensajeros químicos que activan o reprimen genes específicos, coordinando procesos que van desde la germinación hasta la maduración de los frutos. La biotecnología moderna ha permitido que el uso de estas sustancias sea una herramienta para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos, permitiendo controlar la producción de metabolitos secundarios y optimizar los tiempos de cosecha.

Técnicamente, una hormona vegetal o fitohormona es producida internamente por la planta, mientras que los reguladores son análogos producidos de forma sintética, a menudo más potentes, que imitan su fitohormona homóloga. El éxito de su aplicación depende de la dosis y el

momento de aplicación, pero sobre todo de la capacidad de la formulación para contener la molécula activa y que esté disponible para el cultivo. La formación de estas hormonas es un proceso sensible a condiciones del entorno como el pH y el contenido hídrico, factores que también determinan la eficacia de los productos aplicados de forma exógena.

Desde una perspectiva operativa, el mayor reto para los formuladores es la baja solubilidad de los RCV en medios convencionales y que, cuanto mayor sea la concentración de los agroquímicos activos, mayor será la probabilidad de que se altere la estabilidad de la formulación, o de que uno o más componentes se separen en fases. La solubilidad está gobernada por la regla de "lo semejante disuelve a lo semejante", donde compuestos polares requieren solventes con momentos dipolares altos para interactuar mediante fuerzas dipolo-dipolo o puentes de hidrógeno. La constante dieléctrica (ϵ) de un solvente es una propiedad importante

en este proceso, ya que mide su capacidad para neutralizar la atracción entre cargas eléctricas opuestas, facilitando la disociación y estabilización de las moléculas del soluto en una esfera de solvatación.

La invención de Formuquisa se sitúa a la vanguardia de las disoluciones acuosas al proponer un concentrado no acuoso fundamentado en un sistema de tres solventes con constantes dieléctricas diferenciadas (baja, media y alta). Esta mezcla de moléculas de propiedades dieléctricas diferentes permite que fitohormonas con estructuras químicas muy distintas —como las giberelinas, citoquininas y auxinas— coexistan en una misma matriz estable. Al manipular la polaridad del medio, se optimizan las interacciones intermoleculares (fuerzas de Van der Waals y puentes de hidrógeno), impidiendo la precipitación de los activos y garantizando su biodisponibilidad inmediata tras la dilución.

■ EXPERIMENTAL

Se presentan las propiedades físicas obtenidas y las proporciones aproximadas de los componentes utilizados en la validación técnica del concentrado fitohormonal de Formuquisa:

Componente	Función	(% m/m)
<i>Kinetina</i> <i>Citoquinina</i>	Promoción de división celular	0.05% - 0.15%
<i>Ácido Giberélico</i> <i>(GA3)</i>	Elongación y germinación	0.05% - 0.10%
<i>AUXINAS (mezcla AIA + IBA)</i>	Enraizamiento y división	0.05% - 0.10%
<i>Solvente Alta ϵ</i>	Codisolvente polar aprótico	10% - 45%
<i>Solvente Media ϵ</i>	Acoplador de fases	10% - 45%

<i>Solvente Baja ϵ</i>	Vehículo lipofílico	10% - 45%
<i>Sistema de Tensioactivos</i>	Emulsificación espontánea	5% - 20%

Propiedades Físicas:

- **Apariencia:** Concentrado líquido homogéneo, libre de partículas.
- **Densidad:** 0,91 g/mL a 23,1°C.
- **Estabilidad de Emulsión:** Formación espontánea en < 2 min; estable durante el tiempo de aplicación foliar.

Se obtienen los tres solventes de diferentes constantes dieléctricas; estos pueden ser:

Constante alta ($\epsilon > 30$): Por ejemplo, solventes polares apróticos: dimetil formamida (DMF), la N-metil pirrolidona (NMP), la dimetil acetamida (DMAc), el nitrobenzono, el carbonato de propileno (PC) y el acetonitrilo.

Constante dieléctrica media ($12 < \epsilon < 25$): Solventes polares carbonílicos, aminas y amidas: acetona, metiletil cetona, isopropanol, una N,N-dimetil amida, una mezcla de N,N- dimetil amidas, N,N-dimetil octanamida, N,N- dimetil decamida, 2,2-dimetil propanamida, 1-pentanol, 2-metil-1-butanol y 1,2-pentanodiol.

Constante dieléctrica baja ($\epsilon < 5$): Aceites en general: aceites vegetales, los aceites esterificados, los aceites parafínicos y los aceites aromáticos.

Una vez seleccionados los solventes, se disuelven las tres hormonas en el solvente de constante dieléctrica media, una vez completamente disuelta se agregan los dos solventes restantes, la solubilidad de estas tres hormonas es lenta, debe dejarse en agitación mínimo 2 horas. Una vez

disuelto, se agregan los tensioactivos y otros aditivos, se agita para disolver hasta obtener una solución homogénea y transparente. Para justificar el uso del sistema no acuoso, se prepara una solución acuosa con un 1% HCl concentrado. La solución llevará la misma cantidad en masa de las tres hormonas de crecimiento sintéticas para comparar cualitativamente la estabilidad del producto.

■ DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La efectividad de un sistema concentrado en fitohormonas radica en el balance e interacción entre las diferentes moléculas utilizadas. Las **auxinas**, como el ácido indolacético (AIA, Figura 1) o el indolbutírico (IBA, Figura 2), son fundamentales para dirigir la división y elongación celular, además de ser las principales responsables de la formación y desarrollo de tejidos vasculares de las plantas.

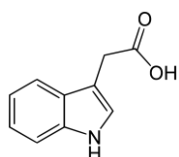


Figura 1. Estructura molecular del AIA.

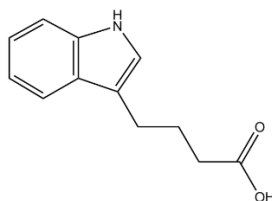


Figura 2. Estructura molecular del IBA.

Por otro lado, las **giberelinas** como el ácido giberélico (GA3, Figura 3) estimulan el alargamiento de los segmentos nodales y son vitales para romper el estado de latencia de los embriones de las semillas, induciendo una germinación vigorosa. Finalmente, las **citoquininas** (como la kinetina, Figura 4) promueven la proliferación de brotes axilares y mejoran la resistencia de la planta ante factores de estrés abiótico.

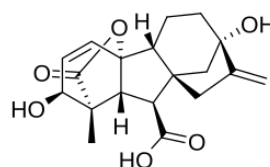


Figura 3. Estructura molecular del ácido giberélico.

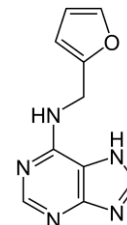


Figura 4. Estructura molecular de las citoquininas.

La bioquímica de este trío ofrece una optimización integral: mientras las auxinas y citoquininas trabajan en conjunto para generar una alta proliferación de tejidos madre (meristemos), la adición de giberelinas asegura que la energía metabólica del sistema se traduzca en un crecimiento apical y foliar robusto. Este efecto es lo que le permite a los agricultores mitigar problemáticas como la presencia de fitopatógenos o cambios ambientales bruscos, potencializando el vigor de la planta desde sus etapas iniciales.

Para lograr esta concentración hormonal, Formuquisa utiliza una matriz de solventes ternarios detallada en la sección experimental. El sistema incluye un solvente polar aprótico de alta constante dieléctrica (ϵ), que disuelva fácilmente activos como las citoquininas; un solvente de constante dieléctrica media (ϵ); y un solvente de baja constante dieléctrica (ϵ). Esta combinación de polaridades asegura que cada hormona encuentre un entorno de solvatación energéticamente favorable de acuerdo con su propia estructura molecular.

La estabilidad de esta matriz se justifica por la disminución de la energía libre de activación del sistema. Al evitar el agua como vehículo inicial, eliminamos los

riesgos de hidrólisis ácida o básica que afectan la estabilidad y biodisponibilidad de las auxinas. En medios con baja constante dieléctrica, las interacciones electrostáticas son menos efectivas para la estabilización coloidal, por lo que la fórmula incorpora estabilización estérica mediante el uso de dos tensioactivos específicos (como alcoholes etoxilados o sulfosuccinatos). Esto para que la fórmula tenga la capacidad de formar una emulsión espontánea en un máximo de 2 minutos al contacto con el agua de aplicación. Al ser una matriz no acuosa, los tensioactivos actúan como agentes anfífilos que reducen drásticamente la tensión interfacial, permitiendo que la fase oleosa (rica en hormonas) se disperse en glóbulos finos dentro de la fase acuosa continua. Esto garantiza que el producto se aplique de una vez, dispersando los activos antes de que cualquier fenómeno de segregación o inestabilidad termodinámica pueda entorpecer la aplicación.

Al comparar la invención con el concentrado acuoso a base de 1% de HCl, se observa que hubo degradación, manifestada por el viraje de la solución inicialmente incolora a un color negro, esto se debe a la sensibilidad de los reguladores de crecimiento como la heteroauxina (AIA) ante pequeñas concentraciones de ácidos, los cuales actúan como agentes deshidratantes y catalizadores de reacciones de hidrólisis.

La aplicación ideal de esta tecnología en el campo debería ser diluyendo el concentrado no acuoso en agua para tratar los diferentes órganos de la planta tras su siembra. Según las condiciones del entorno, se puede optar por la aplicación sobre raíces y tubérculos o aplicaciones

directas al suelo, aunque la vía foliar suele ser el método preferido para maximizar la absorción de los activos; además de que estas fitohormonas son más afines a la superficie cerosa de la cutícula de la hoja.

Es fundamental considerar la etapa fenológica del cultivo y el resultado deseado al definir la estrategia de administración. El producto está diseñado para ser distribuido mediante sistemas estándar de irrigación o pulverización.

■ CONCLUSIONES

La integración de auxinas, citoquininas y giberelinas en una sola matriz facilita el tratamiento agrícola, permitiendo un control preciso de la homeostasis vegetal y una aceleración significativa del ciclo de producción. El uso de reguladores vegetales en condiciones de esterilidad y proporciones adecuadas mejora en el tiempo de desarrollo y también la calidad de los cultivos.

La innovación de Formuquisa, basada en un sistema de solventes ternarios con constantes dieléctricas ajustadas, permite lidiar con la insolubilidad de los reguladores de crecimiento. Este diseño técnico asegura mejor estabilidad química y una aplicación foliar eficiente mediante emulsiones instantáneas, para consolidarse como una opción atractiva para la optimización biotecnológica de cultivos de alto valor frente a composiciones en base acuosa.

■ REFERENCIAS

Alcantara Cortes, J. S.; Acero Godoy, J.; Alcántara Cortés, J. D.; Sánchez Mora, R. M. Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el

crecimiento vegetal. *NOVA* **2019**, 17 (32), 109-129.

Bisht, T. S.; Rawat, L.; Chakraborty, B.; Yadav, V. A Recent Advances in Use of Plant Growth Regulators (PGRs) in Fruit Crops - A Review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* **2018**, 7 (05), 1307-1336. doi: 10.20546/ijcmas.2018.705.159.

Gupta, R.; Chakrabarty, S. K. Gibberellic acid in plant: Still a mystery unresolved. *Plant Signal. Behav.* **2013**, 8 (9), e25504. doi: 10.4161/psb.25504.

Masís Meléndez, F.; Hernández Chaverri, R.; Piedra Marín, G. *Química Agrícola*; 1ª ed.; Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUNED): San José, Costa Rica, 2017.

Vega-Celedón, P.; Canchignia Martínez, H.; González, M.; Seeger, M. Biosíntesis de ácido indol-3-acético y promoción del crecimiento de plantas por bacterias. *Cultivos Tropicales* **2016**, 37 (edición especial), 33-39. doi: 10.13140/RG.2.1.5158.3609.

Yurkanis Bruice, P. *Fundamentos de Química Orgánica*; 1ª ed. en español; Pearson Educación: México, 2007.