



CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

Artículo original de investigación

Avances en la obtención de biofertilizantes y herbicidas de liberación lenta a partir de la matriz urea-formaldehído

Mayra González Hurtado ^{1*} <https://orcid.org/0000-000-4218-2098>

Laura Siverio Martínez ² <https://orcid.org/0000-0001-7936-7953>

María I. Hernández Díaz ³ <https://orcid.org/0000-0003-2849-9002>

Laura M. Castro González ⁴ <https://orcid.org/0000-0001-7275-1426>

Jacques Rieumont Briones ⁵

Ariel Martínez García ¹ <https://orcid.org/0000-0002-2742-2321>

Augusto A. Iribarren Alfonso ¹ <https://orcid.org/0000-0003-0465-1516>

Yasnay Hernández Rivera ⁶ <https://orcid.org/0000-0001-7013-9540>

¹ Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad de La Habana. La Habana, Cuba

² Área de Aseguramiento de Calidad, Gerencia de Calidad de Golden Omega S.A. Arica, Chile

³ Instituto de Investigaciones Hortícolas Liliانا Dimitrova. Mayabeque, Cuba

⁴ Centro de Simulación Molecular, Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad de Calgary. Alberta, Canadá

⁵ Facultad de Química, Universidad de La Habana. La Habana, Cuba

⁶ Departamento de Química, Instituto de Ciencias del Mar de Cuba. La Habana, Cuba

* Autor para la correspondencia: mayra@imre.uh.cu

RESUMEN

Introducción: Entre los principales desafíos en la agricultura está mejorar la eficiencia en la producción de manera sustentable sin provocar impactos negativos al medio ambiente. El empleo de las tecnologías de liberación controlada constituye un enfoque científico novedoso que permite mejorar la actuación de los plaguicidas y los fertilizantes sobre el blanco deseado e incrementan la seguridad y la eficacia de los mismos. **Objetivo:** Obtener, caracterizar y estudiar 2 biofertilizantes y un herbicida de liberación lenta, a partir de la matriz de base urea-formaldehído. **Métodos:** La síntesis de los productos se realizó mediante el método de microencapsulación por extracción y evaporación de solvente. Se realizaron análisis cuantitativos de los macro y los micronutrientes. Los productos se caracterizaron por espectroscopía infrarroja, difracción de rayos X, isoterma de adsorción de nitrógeno, microscopía electrónica de barrido y análisis térmico. Además, se realizaron los estudios de los perfiles de liberación y las pruebas en campo. **Resultados:** Los productos caracterizados presentan una morfología heterogénea con superficies irregulares, son mesoporosos, semicristalinos y estables a temperatura ambiente. Las interacciones entre la matriz y los principios activos son débiles lo que favorece la liberación de los nutrientes. El proceso de liberación se ajusta a los requisitos establecidos internacionalmente para los materiales de liberación lenta que se emplean en la agricultura. **Conclusiones:** Se obtuvieron 2 biofertilizantes y un herbicida de liberación lenta a partir de la matriz de urea-formaldehído empleando el procedimiento de microencapsulación por extracción y evaporación de solvente.

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Palabras clave: urea-formaldehído; fertilizantes de liberación lenta; microalgas; plantas marinas; diuron

Advances in obtaining slow-release biofertilizers and herbicides from the urea-formaldehyde matrix

ABSTRACT

Introduction: One of the main challenges in agriculture is to improve production efficiency in a sustainable manner without causing negative impacts on the environment. The use of Controlled Release Technologies (CRT) represents a novel-scientific approach that allows the improvement of the performance of pesticides and fertilizers on the desired target, increasing their safety and efficacy. **Objective:** To obtain, characterize and study two biofertilizers and a slow-release herbicide from a urea-formaldehyde-based matrix. **Methods:** It was carried out the synthesis of the products using the microencapsulation method by solvent extraction and evaporation. They were performed quantitative analyzes of macro and micronutrients. The products were characterized by different techniques such as infrared spectroscopy, X-ray diffraction, Nitrogen adsorption isotherm, scanning electron microscopy and thermal analysis. In addition, they were carried out release profiles and field tests. **Results:** The characterized products showed heterogeneous morphology with irregular surfaces. They are mesoporous, semi-crystalline and stable at room temperature. The interactions between the matrix and the principles are weak, which favors the release of nutrients. The release process matches internationally established requirements for slow-release materials used in agriculture. **Conclusions:** They were obtained two biofertilizers and a slow-release herbicide from the urea-formaldehyde matrix using the microencapsulation procedure by solvent extraction and evaporation. With a single application of these products, they were achieved similar or superior agronomic parameters compared to conventional fertilizers, which need to be applied multiple times.

Keywords: urea-formaldehyde; slow release fertilizers; microalgae; sea plants; diuron

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales desafíos en la agricultura, es mejorar la eficiencia en la producción de manera sustentable. Por tanto, es necesario desarrollar productos capaces de suministrar a las plantas los nutrientes en la forma y la cantidad necesarios en cada fase del crecimiento, sin provocar impactos negativos en los diferentes ecosistemas. En la actualidad muchas investigaciones se enfocan en contrarrestar esta problemática. Estas van desde el empleo de los extractos líquidos de macroalgas y de plantas marinas (biofertilizantes), hasta el uso de los productos de liberación lenta, como los productos a base de urea-formaldehído (UF).⁽¹⁻⁶⁾ De este modo podemos evitar la utilización de productos agroquímicos, garantizando una agricultura respetuosa con el medio ambiente.

Las tecnologías de liberación controlada (TLC) puestas a disposición de la industria agrícola constituyen un enfoque científico-novedoso. Implican el uso de materiales y de equipos para

desarrollar productos y servicios de importancia en la industria farmacéutica, nutracéutica, cosmética, agrícola, química, de tratamiento de aguas residuales, entre otras. Sus objetivos primarios en la agricultura son mejorar la actuación de los plaguicidas y los fertilizantes sobre el blanco deseado e incrementar la seguridad y la eficacia en la aplicación de los mismos. De igual modo ayudan a prevenir la contaminación ambiental derivada del uso indiscriminado de productos químicos. Se fundamentan en la liberación lenta o gradual de un principio activo desde un sustrato de reserva al medio con el fin de conseguir sobre el mismo una acción determinada.^(7,8) De esta forma se obtienen sistemas mejorados que permiten una mayor disponibilidad de los nutrientes a lo largo de su ciclo productivo.

El objetivo fundamental de este trabajo estuvo encaminado a obtener y caracterizar varios productos agrícolas de liberación lenta a partir de la matriz de base urea-formaldehído, a la que se incorporaron diferentes principios activos como:

un fertilizante y un herbicida comercial, además microalgas y residuos industriales de plantas marinas, obteniéndose así una familia de productos de liberación lenta. Estos productos permiten reducir las pérdidas como consecuencia de la lixiviación, la volatilización y la baja eficiencia presente en los principios activos agrícolas convencionales.

MÉTODOS

Para este estudio se emplearon como materiales la urea de alta pureza que cumple con los estándares de la American Chemical Society (ACS), *Panreac*; formaldehído, disolución al 37 % para análisis estabilizado con aproximadamente 10 % de metanol, Merck; herbicida Diuron (D); microalgas *chlorella* sp (CHLO); mezcla natural de las macroalgas *thalassia testudinum* y *syringodium filiforme* (ThSr) y fertilizante convencional NPK (FC).

Síntesis de la matriz urea-formaldehído y los productos de liberación lenta

La síntesis de la matriz UF consiste en un procedimiento de microencapsulación por extracción y evaporación de solvente. La urea se mezcla con agua y al alcanzar la temperatura ambiente se incorpora el formaldehído a una velocidad de agitación de (500-2000) rpm por un espacio de tiempo de (10-60) min. Al alcanzar la viscosidad deseada (1,4-1,8) g/(cm/s) se añade *in situ* los principios activos a microencapsular (fertilizante convencional, herbicida, microalgas y residuos de plantas marinas), formándose una disolución polimérica estable. Los productos obtenidos se secan a temperatura ambiente hasta la evaporación total del disolvente (agua).

Caracterización de las muestras

El análisis cuantitativo de los macronutrientes (NPK) y micronutrientes se determinó mediante la espectroscopía de adsorción atómica en un espectrofotómetro de adsorción atómica (Perkin-Elmer 2280 y PG Instruments AA500), la colorimetría en un espectrofotómetro UV-visible (Unicam UV-4 y Genesys 20 UV Spectronic) y el método Kjeldahl con titulación volumétrica.

La morfología de los materiales se analizó mediante microscopía electrónica de barrido (Sem jeol-SM-6060lv). Se emplearon las técnicas de difracción de rayos X (Rigaku, modelo Miniflex), la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (espectrofotómetro Ftir therm nicolex nexus-670), el análisis termogravimétrico (analizador térmico TA Q50) y la isoterma de adsorción de N₂ (BET) (micromeritics ASAP 2405 N).

Estudios de liberación

Los estudios de liberación *in vitro* de los macronutrientes N_p, P₂O₅ y K₂O fueron realizados según lo establecido en la literatura.^(3,4) Además, a partir de los perfiles de liberación

obtenidos de los estudios *in vitro* se realizaron estudios cinéticos que permitieron dilucidar y describir los procesos que tenían lugar en la liberación de los productos encapsulados. Los ensayos en campo se realizaron en el Instituto de Investigaciones Hortícolas Liliانا Dimitrova, Mayabeque; en un suelo ferralítico rojo compactado. Se probaron en cultivo de tomates (variedad Vyta), el cultivo de gladiolos (*gladiolus* spp. variedad verde) y el cultivo de pimientos (*capsicum annuum* L. variedad híbrida, y variedad Lical), donde se evaluaron diferentes parámetros agronómicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La matriz polimérica empleada en la obtención de los fertilizantes de liberación lenta se obtuvo a partir de la reacción de policondensación entre la urea y el formaldehído, utilizando el método de extracción y evaporación del solvente.⁽¹⁾ En la figura 1 se muestra el procedimiento para obtener las formulaciones estudiadas en este trabajo.

La microscopía electrónica de barrido mostró que las partículas de las formulaciones obtenidas presentan una morfología heterogénea con superficies irregulares (figura 2). De acuerdo con las isoterma de adsorción-desorción analizadas por el método de BET estos materiales son mesoporosos, según la clasificación de la IUPAC.⁽²⁻⁴⁾

El estudio de los materiales mediante espectroscopía infrarroja indicó que en el proceso de microencapsulación no se forman nuevos enlaces entre la matriz y la sustancia activa. Por su parte, la difracción de rayos X mostró que los materiales son semicristalinos y que no existen cambios significativos en sus patrones de difracción.⁽²⁻⁴⁾ De acuerdo con el análisis térmico todas las formulaciones son estables a temperatura ambiente, a partir de los 160 °C comienzan los procesos de degradación que se atribuyen a la matriz urea-formaldehído (UFM). La matriz presenta un perfil de descomposición complejo con al menos 3 etapas con máximos que se centran en 240 °C, 278 °C y 300 °C.^(1,2)

Los estudios de liberación *in vitro* demostraron que la metodología de síntesis propuesta es válida para obtener un herbicida y biofertilizantes de liberación lenta a partir de microalgas y residuos industriales de plantas marinas. En los casos estudiados se observa un comportamiento típico de los materiales de liberación lenta. La liberación de los macronutrientes fue menor en comparación con el FC utilizado como referencia y en todos los casos la liberación de los macronutrientes fue inferior al 75 % a los 30 d del estudio.⁽²⁻⁴⁾ Las evaluaciones agronómicas en los cultivos mostraron resultados positivos cuando se emplean los biofertilizantes y el herbicida de liberación lenta. Los resultados son iguales o superiores en la mayoría de los casos en comparación con los FC em-

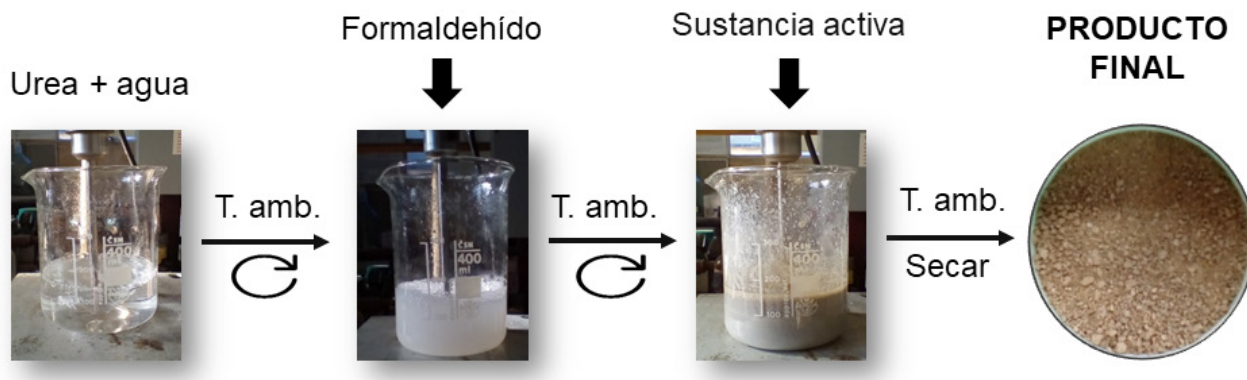


Fig. 1. Procedimiento general para la obtención del herbicida y los biofertilizantes de liberación lenta

pleados como referencia, mostrando una mayor eficiencia y aprovechamiento de los macronutrientes. ⁽²⁻⁴⁾

Las condiciones de síntesis establecidas permitieron obtener una disolución formada por una mezcla de oligómeros de baja masa molecular, con presencia de suficientes grupos hidrófilos (aminas) para producir una disolución estable y, además, con un grado de reticulación adecuado que posibilita modular la liberación de los nutrientes. ⁽⁹⁾ Las partículas de la UFM presentan una morfología heterogénea, la superficie es irregular y son mesoporosas. Los materiales que presentan estas propiedades son muy útiles en aplicaciones como matrices de liberación lenta o controlada, pues se favorece el incremento del área superficial, lo que promueve la degradación química y biológica de éstos en el medio.

Los estudios realizados por FTIR a las formulaciones obtenidas, mostraron que no ocurren desplazamientos de las bandas de los grupos principales. Esto sugiere que no se forman enlaces fuertes entre los principios activos y la matriz. Por tal motivo las interacciones entre los componentes de las formulaciones podrían considerarse de tipo débiles (interacción por puente de hidrógeno o de Van der Waals). ⁽¹⁰⁾ Estos resultados fueron confirmados por difracción de rayos X (DRX), en los difractogramas no se encontraron cambios significativos en

la posición de las bandas para las diferentes formulaciones, en comparación con las de sus componentes aislados. ⁽¹¹⁾ En la figura 3 se muestra el perfil de liberación para el producto UFM+D y el Diuron sin microencapsular.

Se observa que en UFM+D ocurre una liberación inicial en las primeras etapas (efecto Burst), que se puede atribuir a la presencia de Diuron no microencapsulado en la superficie del material. A los 15 d se logró una liberación del 65 %, sustentando que la liberación del componente activo se da en pequeñas cantidades, durante largos períodos de tiempo. Por otro lado, el Diuron sin encapsular libera un 20 % aproximadamente desde el primer día y al cabo de los 20 d ya se ha liberado el 91,2 % del mismo. Esta liberación acelerada es precisamente la causa fundamental de la contaminación ambiental de este herbicida. La matriz sintetizada (UFM), permite la liberación lenta del Diuron, reduce las pérdidas al evitarse aplicaciones repetitivas y el riesgo de contaminación de aguas y suelos a la vez que se mantiene el efecto deseado del herbicida sobre el objetivo. ⁽¹²⁾

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los estudios *in vitro* se realizaron estudios cinéticos para comprobar los posibles mecanismos de liberación del principio activo (Diuron) a través de la matriz. Se trabajó con 2 formulacio-

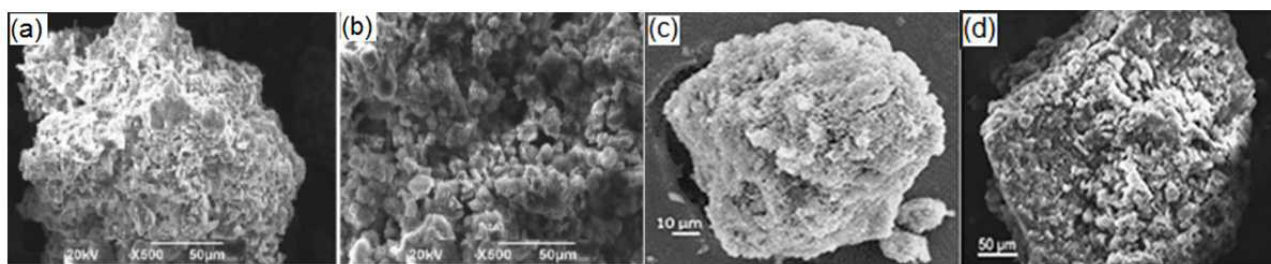


Fig. 2. Imágenes SEM: A) matriz urea-formaldehído (UFM), B) UFM+D, C) UFM+CHLO, D) UFM+ThSr

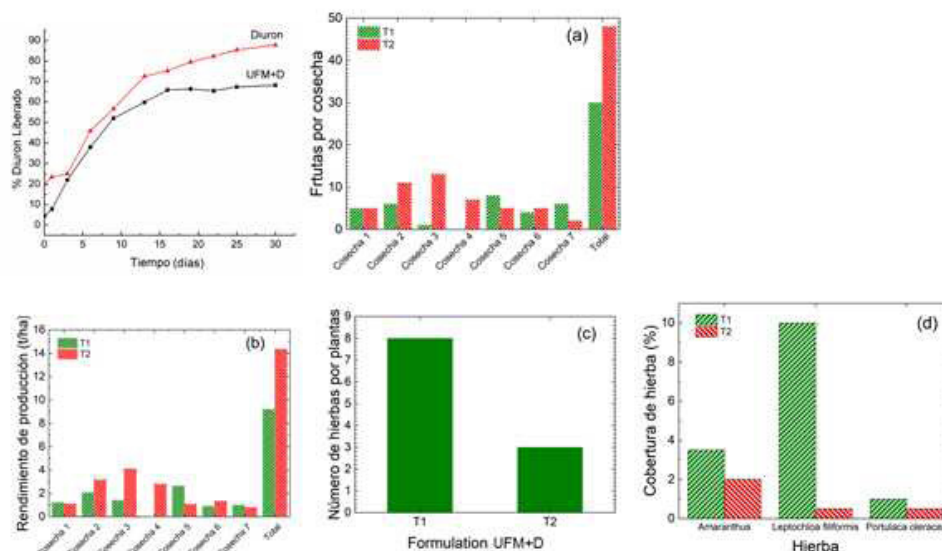


Fig. 3. Comparación de los porcentos de liberación del Diuron sin encapsular y en la formulación UFM+D. Evaluación agronómica de UFM+D: A) número de frutos, B) rendimiento de producción, C) número de malezas por plantas, D) porcentaje de cobertura de malezas

nes UFM-I+D y UFM+D, donde la primera tiene una capa de recubrimiento menor que la segunda. El análisis cinético del comportamiento de ambas formulaciones UFM-I+D y UFM+D sugiere que el Diuron difunde a través de la matriz UFM. En consecuencia, el proceso de liberación está principalmente regulado por su difusión desde la matriz al medio, siendo este proceso dependiente de la concentración, lo que se corresponde como una liberación de primer orden.

Las evaluaciones agronómicas de UFM+D se realizaron en el cultivo de pimiento (variedad Lical) y se trabajaron con 2 tratamientos, T1: fertilizante convencional como control (NPK 14-5-12) con 2 aplicaciones durante el ciclo reproductivo y T2: UFM+D con una aplicación durante el ciclo productivo. Los resultados obtenidos (ver figura 3) muestran el número total de frutos (ver figura 3A) y el rendimiento de producción (ver figura 3B) en el tratamiento T2 fueron estadísticamente más altos en comparación con T1 con aumento estadístico entre 15 % y 14 % respectivamente con respecto a lo recomendado para este tipo de cultivo.

El número de malezas por plantas es menor para T2 en comparación con T1 con una disminución superior al 50 % (ver figura 3C), y a su vez esto conduce a una reducción en el porcentaje de cobertura de malezas (ver figura 3D).⁽¹³⁾ Este estudio *in vivo* demuestra la efectividad de la formulación de liberación lenta obtenida (UFM+D) que reduce las pérdidas promovidas por repetidas aplicaciones y la necesidad de aplicar altas dosis del herbicida, además del riesgo de la contaminación de las aguas y suelos mientras se mantiene el efecto deseado el Diuron.

El empleo de la matriz UFM como portadora de pesticidas tendría un uso adicional sobre la fertilización del suelo.

La formulación obtenida tiene como propósitos proteger a las plantas y fertilizarlas. Estos resultados son una premisa para el control efectivo de herbicidas de liberación lenta. Se puede plantear que la matriz UFM permite microencapsular y liberar de forma lenta varios principios activos con fines agrícolas.

El producto obtenido de esta investigación UFM+D fue registrado en la Oficina cubana de la propiedad intelectual (OCPI) con la marca FitoLent®, el certificado de marca 2018-0747, concedido por la resolución 6245/2019, vigente hasta septiembre 2028.

Las formulaciones UFM+CHLO muestra un comportamiento de liberación lenta (figura 4). En el caso del FC sin encapsular libera entre 20 % y 30 % de los macronutrientes desde el primer día, esta liberación acelerada es precisamente la causa fundamental de la contaminación ambiental de los fertilizantes convencionales. Para la formulación UFM-CHLO se puede apreciar una liberación inicial mucho menor entre 5 % y 20 % en dependencia de cada caso. A partir de los 15 d el contenido liberado de los nutrientes alcanza la meseta manteniendo constante la liberación hasta el día 30.⁽¹⁴⁾

Con el objetivo de conocer de forma muy general el mecanismo cinético dominante mediante el cual se lleva a cabo la liberación de K_2O desde la matriz de UFM en la formulación de UFM+CHLO, se realizaron el estudio de la cinética de liberación en medio acuoso.⁽⁵⁾ Del estudio cinético se encontraron 2 tipos de procesos en la liberación del K_2O . Uno de ellos en períodos cortos ($t \leq 8$ h) que es de primer orden y tiene lugar debido a la difusión y liberación de nutrientes desde la matriz UF. El otro proceso en períodos largos ($96 \text{ h} \leq t \leq 520 \text{ h}$) es un

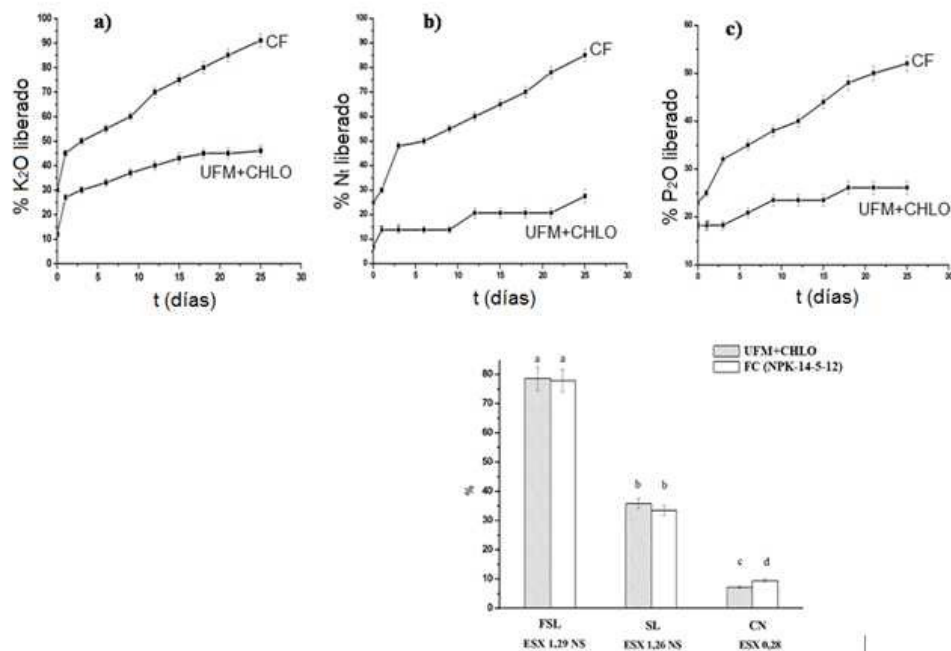


Fig. 4. Liberación en medio acuoso de: A) K₂O, B) Ni y C) P₂O₅ en la formulación UFM+CHLO y 1 fertilizante convencional (FC). Evaluación agronómica de UFM+CHLO. FSL: longitud del tallo floral, SL: longitud de la espiga y CN: número de campano por unidades

proceso de orden 0 relacionado con la liberación de la *chlorella* sp microencapsulada.

Las evaluaciones agronómicas de UFM+CHLO se realizaron en el cultivo de gladiolos (*gladiolus* spp. variedad *green*) y se trabajaron con 2 tratamientos; T1, fertilizante convencional como control (NPK 14-5-12), con 2 aplicaciones durante el ciclo productivo y T2, UFM+CHLO, con una aplicación durante el ciclo productivo. Los resultados expuestos (ver figura 4) muestran un pequeño incremento en los valores de los parámetros agronómicos longitud de la espiga y longitud del tallo floral para la aplicación del tratamiento UFM+CHLO respecto al fertilizante a FC. Sin embargo, el valor obtenido del parámetro número de campano por unidades, para el UFM+CHLO fue ligeramente inferior. Estos resultados demuestran la eficiencia del uso de UFM+CHLO pues ésta se aplicó al cultivo de gladiolo a razón de 40 g/m², obteniéndose resultados comparables con respecto al FC, el cual fue necesario suministrar 85 g/m² 2 veces durante el ciclo del cultivo. El uso de UFM+CHLO está asociado con la mejora de las condiciones de crecimiento de las plantas, como la reducción del estrés y la toxicidad específica resultante del suministro excesivo de fertilizantes químicos en las zonas de raíz.⁽¹⁵⁾

En la figura 5 se muestran los perfiles de liberación de la formulación UFM+ThSr, obtenida a partir de los residuos industriales de plantas marinas, la cual muestra también un compor-

tamiento de liberación lenta. El porcentaje de todos los macronutrientes liberados en UFM+ThSr fue menor en comparación con el FC a los 30 d. Los gráficos muestran una primera etapa de baja liberación de macronutrientes y una segunda, luego de 10 d, donde la liberación se mantiene constante (figura 5A-5C).

En todos los gráficos se observa una liberación inicial de macronutrientes a t = 0 en las muestras analizadas, esto puede estar relacionado con la presencia de macronutrientes no microencapsulados en la superficie de la matriz, lo que se conoce como efecto burst. Las evaluaciones agronómicas de UFM+ThSr se realizaron en el cultivo de pimientos (*capsicum annuum* L. variedad híbrida) y se trabajó con 2 tratamientos; T1, fertilizante convencional como control (NPK 14-5-12), con 2 aplicaciones durante el ciclo productivo y T2, UFM+ThSr con una aplicación durante el ciclo productivo (ver figura 5). Los mejores resultados se obtuvieron cuando se aplicó el UFM+ThSr, tanto en el número de frutos por plantas (figura 5 D) como en el rendimiento por hectáreas (ver figura 5 E), con respecto a FC. El principal logro de estas evaluaciones es que los cultivos mantuvieron una disponibilidad de nutrientes óptima durante todo el ciclo con una sola aplicación del biofertilizante (UFM+ThSr).⁽¹⁶⁾

El biofertilizante obtenido de esta investigación UFM+ThSr fue registrado en la Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual (OCPI) con la marca AGROSOT®, el certificado de marca 2018-0748, concedido por la resolución 3874/2019, vigente hasta septiembre 2028.

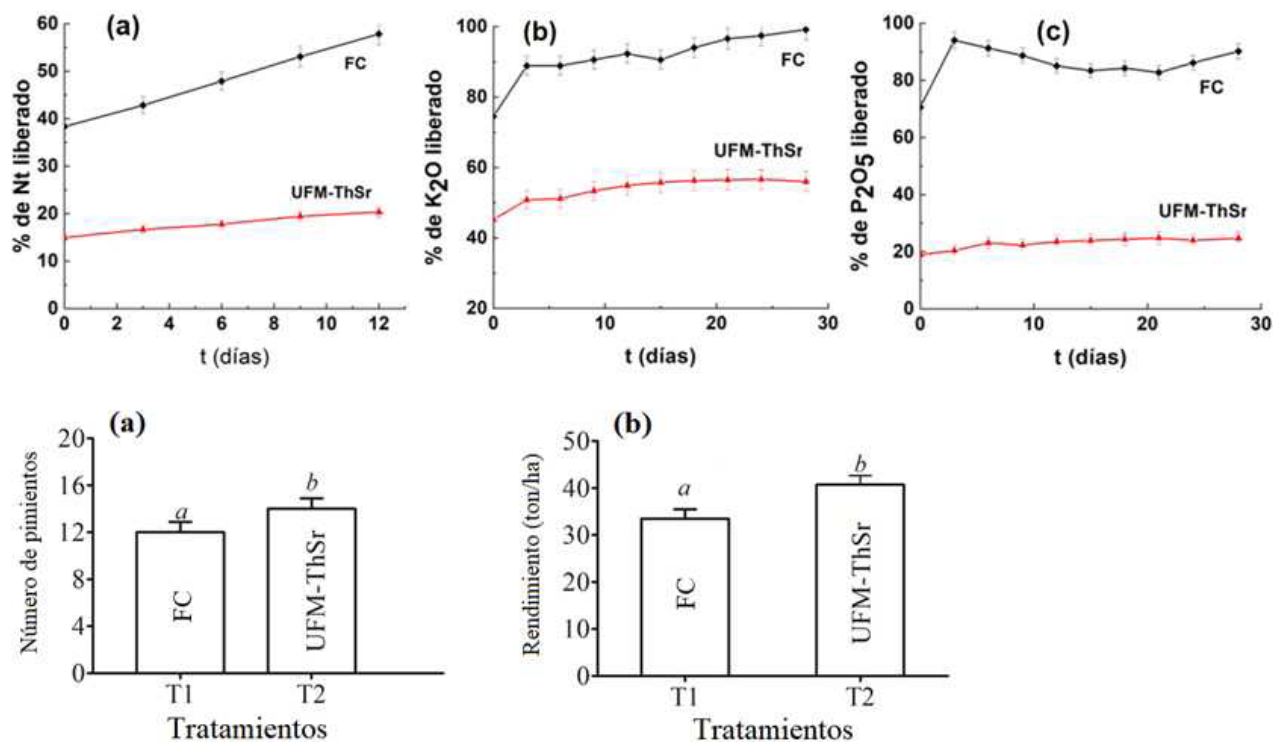


Fig. 5. Liberación en medio acuoso de: A) NT, B) K₂O y C) P₂O₅ en la formulación UFM+ThSr y 1 fertilizante convencional (FC). Evaluación agronómica de UFM-ThSr: D) número de frutos por planta y E) rendimiento del cultivo. Letras diferentes en las barras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$)

Conclusiones

La metodología de síntesis propuesta para la obtención de fertilizantes y de pesticidas de liberación lenta fue satisfactoria. Las caracterizaciones morfológicas y estructurales realizadas a los materiales obtenidos mostraron irregularidad y heterogeneidad en la superficie de las partículas y que las interacciones entre la matriz y los principios activos son lo suficientemente débiles para asegurar una liberación lenta de los nutrientes. Los estudios *in vitro* demostraron que los materiales obtenidos liberan los nutrientes de forma más prolongada en el tiempo, lo cual favorece una mayor asimilación de los mismos por parte de la planta. La evaluación agronómica demostró las ventajas de los productos de liberación lenta obtenidos en comparación con los fertilizantes convencionales. Con una sola aplicación de los productos de liberación lenta se alcanzaron parámetros agronómicos similares o superiores en comparación con los fertilizantes convencionales, que tienen que aplicarse 2 veces. El empleo de los productos agrícolas de liberación lenta constituye una alternativa respetuosa para reducir los efectos adversos sobre los ecosistemas y el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- González Hurtado M, Rieumont Briones J, Quintana Owen P, Bartolo-Perez P, Guenther Soares B, Magioli Cossa M. Ferlent@-a controlled release fertilizer produced from a polymeric material with agronomic benefits. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2015 Noviembre;14(12):2913-17.
- González-Hurtado M, Rieumont-Briones J, Castro-González LM, Zumeta-Dube I, Galano A. Combined experimental-theoretical investigation on the interactions of Diuron with a urea-formaldehyde matrix: implications for its use as an intelligent pesticide. *Chemical Papers [Internet]*. 2017, 8 July 2017;71:2495-503. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11696-017-0245-1>
- Siverio Martínez L, González Hurtado M, Castro González LM, Rieumont Briones J, Martínez García A, Hernández Díaz MI. Preparation of a Slow Release Biofertilizer from a Polymeric Urea-Formaldehyde Matrix (PUFM). *Phyton International Journal of Experimental Botany [Internet]*. 2019;88(4):459-70. Disponible en: <https://doi.org/10.32604/phyton.2019.07719>
- Hernández Rivera Y, González Hurtado M, Siverio Martínez L, Martínez García A, Hernández Díaz MI, Rodríguez García M. Easy method for obtaining slow-release biofertilizer enriched with marine plant residues. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2021 Junio;12(6):798-811.
- González-Hurtado M, Siveiro-Martínez L, Iribarren A. Slow-Release Fertilizer Based on Microalgae *Chlorella* sp Microencapsulated with

- Urea-Formaldehyde: Potassium Release Kinetics. Journal of Polymers and the Environment, [Internet] 2020 Noviembre;29:1424-33. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01971-w>.
6. Castro-González LM, Iribarren A, González M, Siverio L, Hernández MI. Microencapsulated diuron herbicide: kinetic study of its release from a urea-formaldehyde matrix. Journal of the Iranian Chemical Society [Internet]. 2022 Febrero 19:3057-66. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13738-022-02512-z>.
 7. Trenkel ME. Improving Fertilizer use Efficiency. Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture. Primera Edición, París, Francia: The International Fertilizer Industry Association, 1997:1-20.
 8. Trenkel ME. Slow and controlled release and stabilized fertilizers. Segunda edición. International Fertilizer Industry Association, Second edition, IFA, Paris, France: 2010:21-64.
 9. Rochmadi AP, Hasokowati W. Mechanism of microencapsulation with urea-formaldehyde polymer. American Journal of Applied Sciences. 2010;7(6):739-45.
 10. Ragupathi Raja KR, Arumugam R., Anantharaman P. Fourier transform infrared spectroscopy analysis of seagrass polyphenols. Current Bioactive Compounds. 2011;7(2):118-25.
 11. Park BD, Jeong HW. Hydrolytic stability and crystallinity of cured urea-formaldehyde resin adhesives with different formaldehyde/urea mole ratios. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2011 September; 31(6):524-29.
 12. Davidson DW, Verma MS, Gu FX. Controlled root targeted delivery of fertilizer using an ionically crosslinked carboxymethyl cellulose hydrogel matrix. SpringerPlus. 2013;2(1):1-9.
 13. Niu J, Liu C, Huang M, Liu K, Yan D. Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2021;21(1):104-18.
 14. Nirmal R, Abhishek G, Radha P, Poonam, S, Faizal B. Micro-algae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. Biotechnology Advances. 2018;36:1255-73.
 15. Friedman SP, Mualem Y. Diffusion of fertilizers from controlled-release sources uniformly distributed in soil. Fertilizer Research. 1994;39(1):19-30.
 16. Patel RV, Pandya KY, Jasrai RT, Brahmabhatt N. Significance of green and brown seaweed liquid fertilizer on seed germination of Solanum melongena, Solanum lycopersicum and Capsicum annum by paper towel and pot method. International Journal of Recent Scientific Research. 2018;9(2E):24065-72.

Recibido: 20/10/2023

Aprobado: 05/12/2023

Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren agradecer a María Rodríguez García, Annia Galano, Inti Zumeta Dube, Patricia Quintana Owen, Pascual Bartolo Pérez, Bluma Guentfer Soares, Matheus Magioli Cossa por la colaboración brindada.

Conflictos de intereses

No existen conflictos de interés en relación con la investigación presentada.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Mayra González Hurtado, María I. Hernández Díaz, Jacques Rieumont Briones

Curación de datos: Mayra González Hurtado, Laura Siverio Martínez, María I. Hernández Díaz, Laura M. Castro González, Yasnay Hernández Rivera

Análisis formal: Mayra González Hurtado, Laura Siverio Martínez, María I. Hernández Díaz, Laura M. Castro González, Jacques Rieumont Briones, Ariel Martínez García, Augusto Iribarren Alfonso, Yasnay Hernández Rivera

Investigación: Mayra González Hurtado, Laura Siverio Martínez, María I. Hernández Díaz, Laura M. Castro González, Yasnay Hernández Rivera

Metodología: Mayra González Hurtado, María I. Hernández Díaz, Jacques Rieumont Briones

Administración del proyecto: Mayra González Hurtado

Supervisión: Mayra González Hurtado, Jacques Rieumont Briones

Redacción-borrador original: Mayra González Hurtado, Laura Siverio Martínez, Laura M. Castro González, Ariel Martínez García, Augusto Iribarren Alfonso, Yasnay Hernández Rivera

Redacción-revisión y edición: Mayra González Hurtado, Laura M. Castro González, Jacques Rieumont Briones, Ariel Martínez García, Augusto Iribarren Alfonso

Financiamientos

Programa Nacional de Ciencias Básicas (PNCB): Pesticidas inteligentes. Desarrollo de matrices poliméricas de liberación controlada para la protección del medio ambiente, del 2017-2019. Proyecto sectorial de investigación básica, aplicada y de desarrollo, de innovación: Aprovechamiento de los residuos de *thalassia testudinum* como fertilizante ecológico, del 2019-2022. Programa Nacional de Ciencias Básicas (PNCB): Microencapsulación de principios activos agrícola utilizando una matriz de liberación lenta, del 2020-2021.

Cómo citar este artículo

González Hurtado M, Siverio Martínez L, Hernández Díaz MI, Castro González LM, Rieumont J, Martínez García A et al. Avances en la obtención de biofertilizantes y herbicidas de liberación lenta a partir de la matriz urea-formaldehído. An Acad Cienc Cuba [internet] 2024 [citado en día, mes y año];14(1):e1506. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1506>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).

© Los autores, 2024.

