

## **Producción industrial de los productos zeolíticos NEREA<sup>®</sup> para la industria agrícola: alternativas para el proceso de curado-secado**

Industrial production of NEREA<sup>®</sup> zeolitic products for the agricultural industry: alternatives for the curing-drying process

Julio Cesar Molina-Amat<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9786-876X>

Inocente Rodríguez-Iznaga<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0729-1096>

Gerardo Rodríguez-Fuentes<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5846-2863>

Esperanza Yamile de la Nuez-Pantoja<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0004-3317-2308>

Armando Caisés-Ávalos<sup>2</sup> <https://orcid.org/0009-0004-1296-8219>

<sup>1</sup>Laboratorio de Ingeniería de Zeolitas Naturales (NatZEng<sup>®</sup>), Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), Universidad de La Habana (UH), Cuba

<sup>2</sup>UEB – Geominera Holguín. Loma Blanca, San Andrés, Holguín, Cuba

\*Autor para correspondencia. Correo electrónico: [inocente@imre.uh.cu](mailto:inocente@imre.uh.cu)

### **RESUMEN**

Los productos NEREA<sup>®</sup> Sustrato, NEREA<sup>®</sup> Fertilizante y NEREA<sup>®</sup> Plus están registrados para ser usados como sustrato, fertilizante edáfico y fertilizante foliar, respectivamente, para la producción agrícola. La tecnología de producción NEREA<sup>®</sup> no genera residuales y es adaptable a las condiciones de la industria, lo que conlleva a constantes mejoras en su implementación. El proceso de producción incluye, en una primera etapa, la modificación del mineral con disoluciones acuosas de fertilizantes químicos NPK hidrosoluble. En una siguiente etapa, denominada como “curado-secado”, se dispone al material en forma de cama para desarrollar la incorporación de los nutrientes (N, P, K, etc.) en la matriz zeolítica mediante procesos de intercambio iónico y adsorción. Esta investigación se realizó en la Planta Experimental NEREA<sup>®</sup> San Andrés, Cuba, con el propósito de desarrollar alternativas para el

“curado-secado” de estos productos, que incrementen la la capacidad productiva y permitan una mayor adaptabilidad de la tecnología. Se utilizó el mineral zeolítico del yacimiento San Andrés, el cual es una mezcla de zeolitas tipo clinoptilolita-heulandita y mordenita. Se determinó que el curado-secado del producto envasado directamente en sacos incrementa la productividad hasta 0,83 t/h, lo que resulta ser 0,41 t/h mayor que el proceso actual. Los productos NEREA<sup>®</sup> resultaron enriquecidos con los nutrientes N, P, K y otros micronutrientes necesarios para el desarrollo adecuado de los cultivos, lo que fue evidenciado por DRX, SEM, FTIR y otras técnicas de caracterización.

**Palabras clave:** zeolitas naturales; productos NEREA<sup>®</sup>; sustratos; fertilizantes.

### **ABSTRACT**

NEREA<sup>®</sup> Substrate, NEREA<sup>®</sup> Fertilizer and NEREA<sup>®</sup> Plus products are registered to be used as a substrate, soil fertilizer and foliar fertilizer, respectively, for the agricultural production. The NEREA<sup>®</sup> production technology does not generate waste and is adaptable to industry conditions, which lead to that its implementation is in a constant improvement. The production process includes, in a first stage, the modification of the mineral with aqueous solutions of hydro-soluble NPK chemical fertilizers. In a next stage, called “curing-drying”, the material is arranged in the bed form to develop the incorporation of nutrients (N, P, K, etc.) into the zeolite matrix through ion-exchange and adsorption processes. This research was carried out at NEREA<sup>®</sup> San Andrés Experimental Plant, Cuba, to develop alternatives for the “curing-drying” of these products in order to increase the productive capacity and allow greater adaptability of the technology. The zeolitic mineral from the San Andrés deposit was used, which is a mixture of clinoptilolite-heulandite and mordenite type zeolites. It was determined that the curing-drying of the product packaged directly in bags increases productivity up to 0,83 t/h, which turns out to be 0,41 t/h higher than the current process. NEREA<sup>®</sup> products turned out to be enriched with the nutrient's N, P, K and other micronutrients necessary for the proper development of crops, which was evidenced by using XRD, SEM, FTIR and other characterization techniques.

**Keywords:** natural zeolites; NEREA<sup>®</sup> products; substrates; fertilizers.

Recibido: 08/05/2024

Aceptado: 15/08/2023

## Introducción

Con la puesta en marcha de la Planta Experimental NEREA<sup>®</sup> (PEN) ubicada en la UEB Geominera Holguín, Cuba, dio inicio en noviembre de 2019, a la producción industrial de los productos NEREA<sup>®</sup> Sustrato, NEREA<sup>®</sup> Fertilizante y NEREA<sup>®</sup> Plus.

Estos productos están siendo usados en la agricultura nacional con buenos resultados y aceptación en la producción de alimentos agrícolas y otros cultivos. NEREA<sup>®</sup> Sustrato<sup>(1)</sup> está registrado en el Registro Central de Fertilizantes del MINAG, Cuba, para el cultivo sin suelo o mezclado con otros sustratos; por su parte, NEREA<sup>®</sup> Fertilizante <sup>(2)</sup> y NEREA<sup>®</sup> Plus <sup>(3)</sup> se utilizan como fertilizante edáfico (al suelo) y foliar (dispersado en agua), respectivamente. No obstante, existen resultados positivos y perspectivas del uso de NEREA<sup>®</sup> Plus edáfico, y combinado con los otros productos NEREA<sup>®</sup>.<sup>(4; 5)</sup> Este último producto destaca por la baja dosis que se requiere aplicar, que está alrededor de 16 kg por hectárea de cultivo.

La tecnología de producción NEREA<sup>®</sup>, la cual no genera residuales, se desarrolló en el Laboratorio de Ingeniería de Zeolitas Naturales (NatZEng<sup>®</sup>) del Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE) de la Universidad de La Habana (UH).<sup>(6; 7)</sup> El porcentaje en nutrientes NPK contenido en el soporte zeolítico es muy inferior comparado con un fertilizante químico convencional, con un 1,4 a 10 % de un fertilizante NPK fórmula completa. Sin embargo, estos bajos niveles de nutrientes permiten satisfacer las demandas nutricionales para el desarrollo eficiente de las plantas con producciones agrícolas similares a las alcanzadas con los fertilizantes químicos convencionales. <sup>(4; 5)</sup> Esto minimiza las pérdidas que típicamente se presentan con el uso de fertilizantes químicos convencionales, donde las plantas solo aprovechan alrededor del 20 – 40 % de lo aplicado y el resto se pierde por lixiviación en agua y volatilización térmica con serias afectaciones a las fuentes de agua y el medioambiente en general. <sup>(8)</sup>

El proceso de producción de los productos NEREA<sup>®</sup> consiste en las etapas fundamentales: modificación del material zeolítico, curado-secado del material modificado para obtener los productos NEREA<sup>®</sup> Sustrato y NEREA<sup>®</sup> Fertilizante, modificación adicional para la producción del NEREA<sup>®</sup> Plus, curado-secado de dicho material y micronización. En la actualidad los

productos NEREA<sup>®</sup> son producidos en tres plantas de producción de las provincias de Holguín, Villa Clara y Cienfuegos.

La investigación se realizó en la Planta Experimental NEREA<sup>®</sup> (PEN) San Andrés, Holguín, Cuba. En el mineral zeolítico usado, proveniente del yacimiento San Andrés, Holguín, predomina el tipo clase litotecnológico I, con un contenido total de zeolitas de 80 % y una Capacidad de Intercambio Catiónico Total de 120 meq/100 g. <sup>(9,10)</sup> Las fases principales presentes son las zeolitas tipo clinoptilolita-heulandita y mordenita. <sup>(11)</sup> Su composición elemental expresada en forma de óxidos es 65,29% SiO<sub>2</sub>, 11,50 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3,44 % CaO, 2,45 % Na<sub>2</sub>O, 1,28 % K<sub>2</sub>O, 1,10 % MgO y 2,64 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. <sup>(1,2,3)</sup>

En esta investigación se propuso desarrollar alternativas para el “curado-secado” de estos productos, que incrementen la capacidad productiva y permitan una mayor adaptabilidad de la tecnología. Los materiales se caracterizaron por Difracción de Rayos-X, Microscopía Electrónica de Barrido, Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier y Espectrometría de Absorción Atómica.

## **Materiales y métodos**

### **Descripción del proceso productivo**

El proceso de producción de los productos NEREA<sup>®</sup> en la PEN San Andrés incluye las siguientes etapas fundamentales: <sup>(6; 7)</sup>

**Etapas 1. Modificación del material zeolítico granulado.**

El mineral zeolítico del yacimiento de San Andrés, con clase de tamaño de partículas de +1-4 mm se modifica con disolución acuosa de un fertilizante NPK hidrosoluble fórmula completa. Esto se realiza en un mezclador de cuerpo móvil (tipo concretera) con capacidad de 0,5 t, que admite la rotación del sistema de reacción (material y disolución) y modifica homogéneamente el material. El equipo en cuestión es simple, posee facilidad para la carga y descarga de material, la limpieza y un bajo mantenimiento, lo que permite su uso en instalaciones pilotos del tipo PEN. Este tiene en su interior palas o baffles en determinadas posiciones y con ángulos de inclinación para reducir la segregación de sólidos e incrementa la homogeneidad del material modificado.

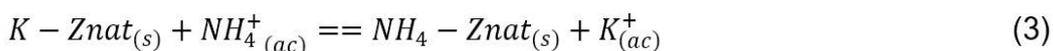
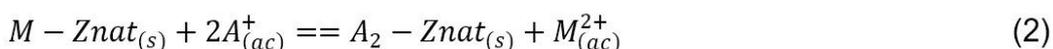
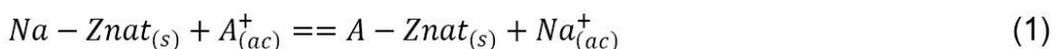
**Etapas 2. Curado-secado del material modificado.**

El mineral modificado en el mezclador se descarga sobre un piso de cemento, dentro de un túnel, donde se dispone en forma de cama con una altura

de 10 cm y se surca cada cierto tiempo para facilitar el curado y secado del material, y así obtener finalmente los productos NEREA<sup>®</sup> Sustrato y NEREA<sup>®</sup> Fertilizante.

En el proceso de curado ocurre la incorporación de las especies de fósforo, nitrógeno y potasio del fertilizante NPK en el soporte zeolítico, a través de procesos químico-físicos como el intercambio iónico y adsorción. En el túnel, se alcanzan temperaturas a lo largo del día entre 27 – 48°C, suficiente para que ocurran de forma paralela los procesos de curado y secado de los productos. Dadas las características de los iones presentes en el fertilizante NPK, la composición del material zeolítico y el hecho de que las zeolitas poseen una carga superficial negativa en su estructura, provoca la retención de los cationes  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{K}^+$  por procesos de intercambio iónico en su estructura. El intercambio ocurre con los cationes naturales de compensación de carga de las zeolitas,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , según corresponda, como se muestra en las ecuaciones 1-3. Los nutrientes (N y K) incorporados por esta vía quedan retenidos en las zeolitas presentes en estos productos. Además, ambos cationes pueden experimentar una retención por adsorción superficial en la mesoporosidad del material y superficie externa de los cristales de las zeolitas. Esta adsorción es más pronunciada con el incremento de los montos de fertilizante NPK incorporados, pudiendo llegar a superar la capacidad de intercambio iónico de estas zeolitas.

Por otra parte, el anión fosfato se adsorbe sobre la superficie del mineral, compensando su carga negativa con los cationes naturales intercambiados (eludidos de las fases zeolíticas) e iones amonio y potasio no intercambiados aportados por el fertilizante. El fosfato puede estar con estos cationes formando parte de una doble capa eléctrica sobre la superficie del material zeolítico.<sup>(12)</sup>



donde:

$\text{M}^+$  representa al  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , mientras que A al  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$ .

Dadas las condiciones prácticas, esta etapa limita la productividad de la planta (con capacidad productiva de 20 t/d) ya que las dimensiones del túnel

(30 m X 8 m X 4 m) solo permiten curar-secar hasta 30 t de productos en un tiempo entre 48 - 72 h.

Etapa 3. Producción del producto NEREA<sup>®</sup> Plus.

La producción del producto NEREA<sup>®</sup> Plus incluye una modificación adicional con urea, un subsecuente curado-secado y micronización, para obtener un producto con clase de tamaño de partículas < 74 µm. La urea incrementa de forma marcada el contenido de nitrógeno, lo cual es importante para lograr satisfacer la alta demanda de este elemento al inicio de los ciclos de los cultivos.

### **Alternativas del proceso de curado-secado**

El proceso de curado-secado que se utiliza actualmente para obtener los productos NEREA<sup>®</sup> en la PEN San Andrés, consiste en disponer en forma de cama los materiales modificados que se descargan directamente del mezclador. A partir de esto, se diseñaron experimentalmente las alternativas siguientes:

- (a) Curado-secado de los productos en cama con diferentes espesores o alturas (10, 20 y 30 cm) que incluye magnitudes superiores a lo usado normalmente (10 cm).
- (b) Curado-secado de los productos envasados en sacos de rafia de 50 kg de capacidad.

Se analizaron las ventajas y desventajas de cada alternativa, en cuanto a incremento de la capacidad productiva, los gastos y el cumplimiento de los estándares de calidad (tomando como referencia lo que hoy se tiene con la cama de 10 cm) como son: Sólidos Disueltos Totales (SDT, expresado en ppm), pH y Humedad final (10 a 14 %).<sup>(6; 7)</sup> El análisis se realizó por triplicado en tres sacos diferentes enumerados del 1 al 3, con 3 corridas experimentales.

### **Caracterización de la materia prima y productos**

La Znat y los productos NEREA<sup>®</sup> se caracterizaron por Difracción de Rayos-X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) y Espectroscopia Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) y análisis químico por Espectrometría de Absorción Atómica (AA) y el método de Kjeldahl.<sup>(13)</sup> El análisis DRX se realizó con un difractómetro Philips X'Pert equipado con un monocromador de grafito, usando el método de polvo y radiación de Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1,540 \text{ \AA}$ ). El análisis FTIR se efectuó con un

Espectrómetro Infrarrojo Marca: Broker, el método de preparación de muestras consistió en el prensado en disco de KBr con el fin de obtener una lámina translúcida para ser analizada. Para los estudios por SEM se usó un Microscopio Electrónico de Barrido FEI Nova NanoSEM 450 a 10,0 kV, para ello; las muestras se adhirieron a los portamuestras y fueron recubiertas con una capa de oro.

## **Resultados y discusión**

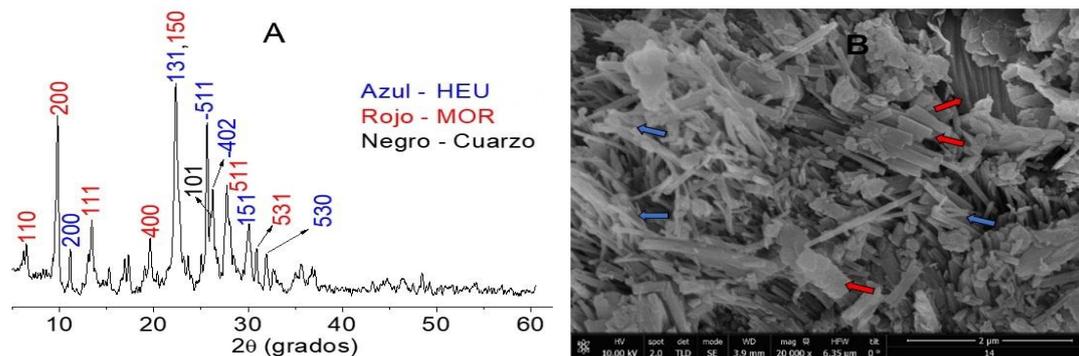
### **Caracterización de los materiales y productos NEREA®**

El patrón de DRX del mineral zeolita natural (Znat) se muestra en la figura 1A. Los principales picos de difracción están asociados a las zeolitas tipo clinoptilolita-heulandita (tipo HEU) y mordenita (MOR), lo cual permite plantear que esta zeolita natural constituye fundamentalmente una mezcla de ambos tipos de zeolitas (HEU y MOR). Además, están presentes otras fases minoritarias como el cuarzo, feldespatos y óxidos de hierro, en acuerdo con lo planteado por otros autores. <sup>(14)</sup>

La micrografía de SEM para Znat muestra cristales con morfologías tabulares y laminares correspondientes a la zeolita clinoptilolita-heulandita. Además, se observan cristales con morfología acicular o de agujas que corresponden a la mordenita. Estos cristales poseen una estructura microporosa formada por canales que se interconectan entre sí. El espacio entre los cristales constituye la mesoporosidad de este material (figura 1B).

En la composición de este mineral, se destaca el contenido de potasio, que es superior al de minerales de otros yacimientos cubanos. <sup>(11)</sup> El potasio, junto con el nitrógeno y el fósforo constituyen los nutrientes esenciales para las plantas de cultivo, lo que refuerza las potencialidades de uso de este mineral para la producción de los sustratos y fertilizantes NEREA® para cultivos agrícolas.

Los productos NEREA® Sustrato y NEREA® Fertilizante se diferencian en sus contenidos de nutrientes, que en el caso del fertilizante llegan a ser superiores. Así, por ejemplo, el contenido de nitrógeno en el sustrato llega a ser hasta alrededor de 0,4% (tabla 1), mientras que en el fertilizante inicia desde este mismo valor hasta alrededor de un 2 %. Para el presente estudio se utilizó un producto cuyo contenido en nitrógeno incorporado está en la frontera (0,4 %) de estos dos productos, lo que permite su uso tanto como sustrato y fertilizante edáfico.



**Fig. 1-** A) Patrón de DRX del material Znat, picos de difracción ( $hkl$ ) característicos para las fases zeolíticas tipo HEU (color azul) y MOR (color rojo). B) Micrografía de SEM de Znat; las flechas rojas indican los cristales de MOR y las azules los de HEU

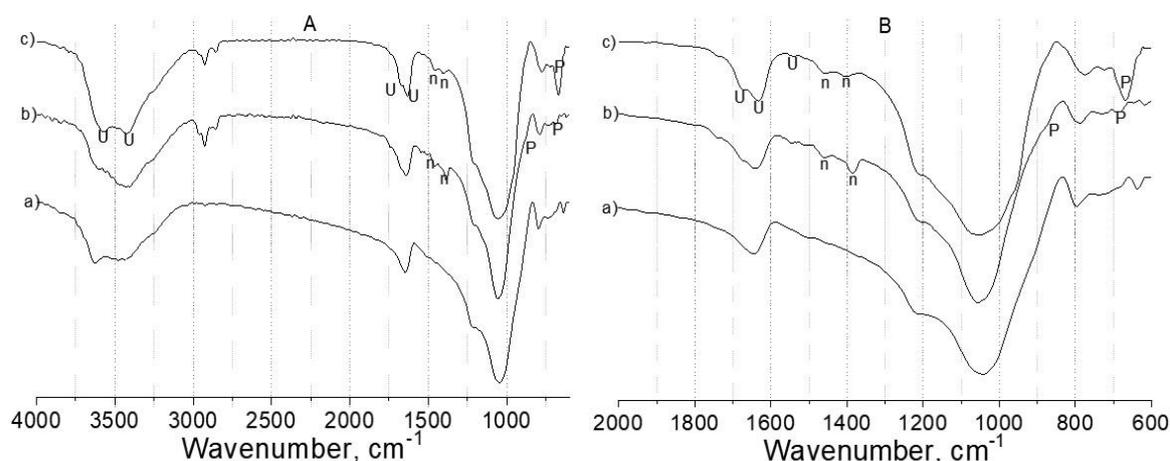
En la tabla 1 se muestran los productos con sus respectivos contenidos en N, P, K y otros elementos, nutrientes de las plantas de cultivo, así como aquellos aportados por el mineral zeolítico. En el caso del NEREA<sup>®</sup> Plus, el contenido de nutrientes es mayor (tabla 1) atendiendo a su empleo final como fertilizante foliar, que aporta nutrientes en las partes aéreas de las plantas. Su alto valor en nitrógeno (N) se debe al proceso de tratamiento adicional aplicado con la disolución de urea, como fue antes descrito y está reportado en la literatura. <sup>(6; 7)</sup>

El espectro FTIR de Znat (figura 2Aa y 2Ba) muestra bandas correspondientes con las frecuencias de vibración características de las zeolitas. Las bandas entre  $3\ 600 - 3\ 400\ \text{cm}^{-1}$  son asignadas a vibraciones de estiramientos de grupos OH, asociados al agua de coordinación de las especies catiónicas ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) que compensan la carga del enrejado zeolítico. <sup>(12; 13; 15)</sup> También se observó la presencia de bandas discretas centradas en  $3\ 440$  y  $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$  correspondientes a los modos de estiramiento y deformación de las moléculas de agua, relacionado fundamentalmente con la capacidad del material para absorber agua. <sup>(13)</sup>

**Tabla 1-** Composición química de los productos NEREA<sup>®</sup> determinada por Espectrometría de Absorción Atómica. El nitrógeno fue determinado por el método de Kjeldahl. <sup>(13)</sup>

Composición [% peso]	NEREA <sup>®</sup> Sustrato	NEREA <sup>®</sup> Plus
SiO <sub>2</sub>	63,98	54,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,27	9,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,58	2,21
MgO	1,07	0,92
CaO	3,37	2,89
Na <sub>2</sub> O	2,40	2,06
H <sub>2</sub> O	14	14
N	0,4	5,68
P	0,48	1,17
K	1,24	1,96
Mn	0,02	0,06
Zn	0,02	0,06
Cu	0,02	0,06
B	0,02	0,06

Las bandas entre 1 200 – 1 000 cm<sup>-1</sup> son características de las zeolitas y están asociadas a vibraciones de estiramientos T-O, donde T representa al Si o Al de los grupos tetraédricos TO<sub>4</sub> (SiO<sub>4</sub> y AlO<sub>4</sub>) de la red cristalina zeolítica. <sup>(12; 13)</sup>



**Fig. 2-** Espectros FTIR de Znat (a), NEREA<sup>®</sup> Sustrato (b) y NEREA<sup>®</sup> Plus (c) en las regiones de 4 000 – 600 cm<sup>-1</sup> (A) y de 2 000 – 600 cm<sup>-1</sup> (B, ampliación). Las letras n, P y U indican las bandas asociadas a especies de nitrógeno, fósforo y urea, respectivamente

En los espectros de NEREA<sup>®</sup> Sustrato (figura 2Ab y 2Bb), además de estas bandas se observan otras bandas a 1 402 cm<sup>-1</sup> y 1 460 cm<sup>-1</sup> que se corresponden con las frecuencias de vibración del ión amonio

(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, indicadas por una n) <sup>(13; 16)</sup>. En adición, aparecen bandas a 868 y 640 cm<sup>-1</sup> que se asociaron con las vibraciones del ión fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), representado por una letra P. <sup>(13)</sup>

El espectro FTIR de NEREA<sup>®</sup> Plus (figura 2Ac y 2Bc) también muestra las bandas características de las zeolitas, así como aquellas asociadas al ion amonio (n) y fosfato (P). En adición, se observan bandas centradas en 3 500, 3 406, 1 670, 1 624 y 1 460 cm<sup>-1</sup> que se corresponden a las frecuencias de vibración de la urea (U). Esto es resultado del tratamiento con las disoluciones de urea aplicado subsecuentemente para obtener el producto NEREA<sup>®</sup> Plus. La urea es retenida superficialmente sobre el soporte zeolítico, donde se enlaza al enrejado zeolítico por formación de puentes de hidrógeno a través de su grupo amino (NH<sub>2</sub>). <sup>(13)</sup>

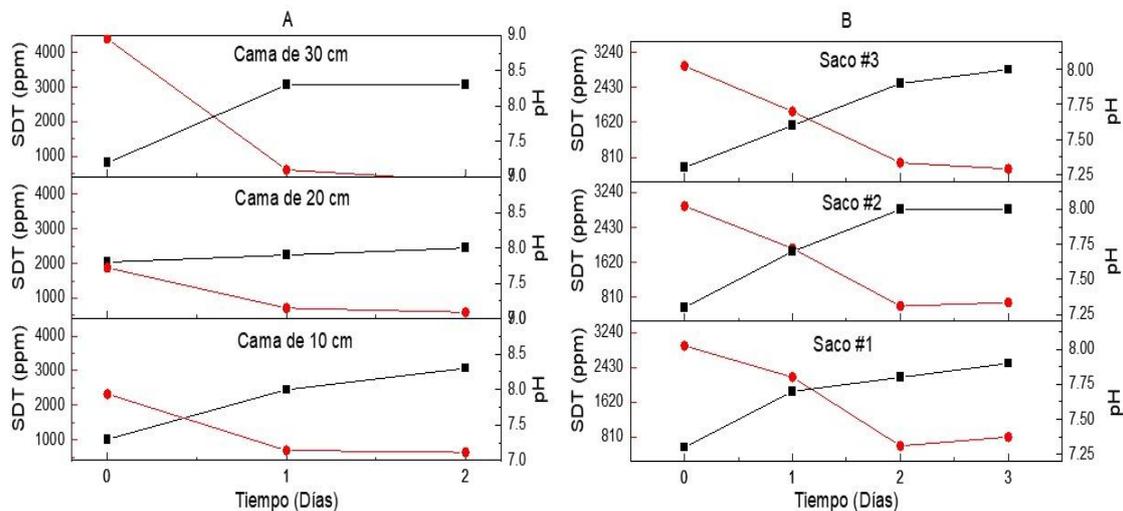
A partir de los resultados previos, se puede plantear que en el NEREA<sup>®</sup> Sustrato el nitrógeno se encuentra fundamentalmente en forma de ión amonio y el potasio como ión K<sup>+</sup>, ambos soportados principalmente como cationes intercambiados (1-3) que compensan la carga estructural de las fases zeolíticas mordenita y clinoptilolita-heulandita contenidas en el soporte mineral. Por su parte, el fósforo se encuentra fundamentalmente en forma de fosfato adsorbido en el soporte zeolítico. En el caso del producto NEREA<sup>®</sup> Plus, además del K<sup>+</sup>, fosfato y el amonio, existe urea dispuesta sobre el soporte zeolítico. Estos tres elementos (N, P y K) constituyen los nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas de cultivo. Adicionalmente a estos nutrientes esenciales y los micronutrientes, los materiales contienen un alto contenido de silicio, un elemento que incide positivamente en el desarrollo de las plantas.

### **Desarrollo de alternativas en el proceso curado-secado**

(a) Curado-secado del producto dispuesto en forma de cama con espesores de magnitud superior a lo usado actualmente (10 cm).

Se evaluaron los espesores de cama 10 ± 0,30 cm, 20 ± 0,60 cm y 30 ± 0,90 cm en un tiempo de 48 h. Los valores de pH y SDT son similares para los tres valores de espesor de cama. Esto demuestra que este incremento de espesor de cama no afectó el desarrollo eficiente de los procesos para la retención de las especies químicas del fertilizante NPK en los materiales. Una afectación de esta retención se reflejaría en un cambio importante de los niveles de pH y SDT, ya que habría un monto de portadores

de carga (ej. iones  $K^+$ ,  $NH_4^+$ , etc.) liberados en agua (figura 3A) diferente a lo que hoy se tiene en la cama de 10 cm. Se valoró el contenido de agua en el producto curado y seco, que resultó estar en el intervalo esperado (10 – 14 %) para ser envasado, después de 120 h.



**Fig. 3-** Valores de pH (en negro) y SDT (en rojo) en el tiempo para los materiales al ser expuestos en agua para ambas alternativas de curado: A) camas con diferentes espesores y B) envasados en sacos (#1, #2 y #3)

La principal ventaja de esta alternativa es la facilidad de triplicar la capacidad de curado-secado en los túneles disponibles. En estos casos, ahora sería posible curar-secar hasta 90 t de producto por túnel, cumpliendo con los estándares de calidad que hoy se tienen con la cama de 10 cm. En principio se avizoran como desventajas un incremento en el tiempo de curado-secado, lo que conllevaría a un surcado del producto más sistemáticamente para facilitar el proceso. Sin embargo, el tiempo total del proceso de curado-secado por masa de producto disminuyó. El tiempo del proceso de curado-secado de 30 t por cama de 10 cm es de 72 h (3 días), es decir, una relación de 0,42 t/h, mientras que para las 90 t se necesitarían aproximadamente 120 h (5 días), es decir, 0,75 t/h. Además, desde el punto de vista económico, dicha desventaja carece de validez puesto que los volúmenes de producción son triplicados, lo que demuestra el carácter factible de la propuesta.

(b) Curado-secado del producto envasado directamente en sacos.

Los valores de pH y SDT para esta alternativa son similares para cada caso valorado en un período de tiempo de 72 h. Esto demuestra la viabilidad de esta alternativa (figura 3B) para que ocurran de forma eficiente los procesos de

intercambio iónico y adsorción envueltos. Estos resultados permitieron verificar que con el ensacado directo se obtiene un producto con los estándares de calidad establecidos y sin la generación de residuales.

Se determinó experimentalmente que el tiempo máximo requerido para que el producto adquiriera la humedad mínima (10 %) es de 5 días. Considerando que el peso neto en los sacos del producto comercializable debe ser 50 kg, se pudo determinar que los sacos con el producto húmedo directamente envasado debían tener inicialmente un peso de  $53 \pm 0,45$  kg para garantizar que luego del curado-secado del material, el peso neto se ajuste a los  $50 \pm 0,45$  kg. A medida que se requiera tener un producto con una humedad final menor; mayor será el tiempo que deben permanecer los sacos dentro de los túneles (tabla 2). Los sacos fueron dispuestos dentro de los túneles en posición vertical sobre pallets. En caso de que los sacos se dispongan horizontales en forma de estibas puede conllevar a prolongar el tiempo de permanencia en los túneles. De acuerdo con las dimensiones de los túneles, el volumen que ocupan los sacos dispuestos verticalmente y el área libre que debe existir para garantizar la movilidad necesaria sólo es posible acomodar hasta 1 200 sacos por túnel, equivalentes a 60 t.

**Tabla 2-** Peso inicial de los sacos en función de la humedad y tiempo estimado

Humedad final deseada (%)	Peso de los sacos al inicio del curado/secado (kg)	Tiempo estimado para la humedad final deseada (días)
10	$53 \pm 0,45$	5
11	$52,95 \pm 0,44$	4
12	$52,45 \pm 0,44$	3
13	$51,95 \pm 0,43$	2
14	$51,45 \pm 0,43$	1

Desde el punto de vista productivo esta alternativa presenta mayor ventaja que el procedimiento actual. Por ejemplo, a partir de esta es posible tener una capacidad de curado-secado de 60 t dispuestas en forma de 1 200 sacos por túnel para lograr una humedad similar a la alcanzada en el procedimiento actual (12 %) en un tiempo aproximado de 3 días (tabla 2), lo que representa una relación de 0,83 t/h. Así, esta propuesta resulta ser superior al procedimiento actual y a la alternativa de la cama con 30 cm de altura. Otra de las facilidades que presenta, es la maniobrabilidad del producto que ya ha sido ensacado y espera que se complete el tiempo necesario para pasar a la etapa de comercialización. Como principal desventaja que se aprecia es el prolongado tiempo de permanencia en el túnel, que es necesario para que el

producto alcance la humedad mínima establecida (10%). A pesar de ello, podemos afirmar que en una instalación tipo PEN con 4 o más túneles de curado-secado podríamos mantener de forma continua el proceso productivo sin que se vea afectado la producción de los productos NEREA®.

## **Conclusiones**

Se desarrollaron dos alternativas para incrementar la capacidad de producción de los productos zeolíticos NEREA® en el proceso de curado-secado, que incluyen el incremento de espesor de la cama y el ensacado directo del producto, que permitió una mayor adaptabilidad de la tecnología, cumpliendo con los estándares de calidad.

Se determinó que el mineral zeolítico del yacimiento San Andrés consiste en una mezcla de zeolitas tipo clinoptilolita - heulandita y mordenita. Los productos NEREA® resultaron enriquecidos con los nutrientes esenciales N, P, K y otros micronutrientes necesarios para el desarrollo adecuado de los cultivos.

Se determinó que el curado-secado del producto en cama con 30 cm permite incrementar la capacidad de producción hasta 0,75 t/h; mientras que con el curado-secado del producto envasado directamente *en sacos* se incrementa hasta 0,83 t/h, lo cual resulta 0,41 t/h mayor que el proceso actual.

## **Referencias bibliográficas**

1. REGISTRO CENTRAL DE FERTILIZANTES. Departamento de Suelos y Fertilizantes. NEREA Sustrato, No. RCF 019/20; Libro primero, Tomo I, Folio 64. Ministerio de la Agricultura, Cuba, 2020.
2. REGISTRO CENTRAL DE FERTILIZANTES. Departamento de Suelos y Fertilizantes. NEREA Fertilizante, No. RCF 018/20; Libro primero, Tomo I, Folio 62. Ministerio de la Agricultura, Cuba, 2020.
3. REGISTRO CENTRAL DE FERTILIZANTES. Departamento de Suelos y Fertilizantes. NEREA Plus, No. RCF 017/20; Libro primero, Toma I, Folio 65. Ministerio de la Agricultura, Cuba, 2020.
4. SABORIT REYES, R. *et al.* Efecto del foliar Nerea Plus-U, sobre los rendimientos del cultivo del arroz. *Revista Infociencia*. 2021, **25** (3), pp. 36-48. ISSN: 1029-5186.
5. HERNÁNDEZ GÓMEZ, A. Evaluación de la incidencia del fertilizante Nerea Plus-U, en la producción del frijol. *Revista Infociencia*. 2023, **27** (3), pp. 12-22. ISSN: 1029-5186.

6. UNIVERSIDAD DE LA HABANA. *Procedimiento para la obtención de Sustratos y Fertilizantes Zeolíticos de Liberación Controlada y Métodos de Tratamiento de las plantas*. RODRÍGUEZ FUENTES, G. et al. 17 de noviembre de 2023. CU-2021-0017 A7. Patente de Invención. OCPI, Cuba.
7. UNIVERSIDAD DE LA HABANA. *Procedure for Obtaining Substrates and Controlled Release Zeolite Fertilizers and Plant Treatment Methods*. RODRÍGUEZ FUENTES, G.; RIVERO GONZÁLEZ, L.A. et al. 05/11/2021. CA3138031 A1. Certificate of Invention Request before CIPO, Canadian.
8. De CAMPOS BERNARDI, A.C. et al Enhancing nutrient use efficiency using zeolites minerals—A review. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2016, **6** (04), pp. 1-295. ISSN: 2160-0392.
9. RODRÍGUEZ-IZNAGA, I.; SHELYAPINA, M.G.; PETRANOVSKII, V. Ion Exchange in Natural Clinoptilolite: Aspects Related to Its Structure and Applications. *Minerals* 2022, **12** (12), pp. 1628. ISSN: 2075-163X.
10. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. Zeolitas Naturales-Requisitos de Calidad, NC 625: 2014. Cuba, 2014. pp. 1-10.
11. COSTAFREDA MUSTELIER, J.L. et al Las Zeolias Naturales de Cuba. *Las Zeolitas Naturales de Iberoamérica*. 2018, pp. 190-215.
12. CÓRDOVA RODRÍGUEZ, V. et al Use of natural mordenite to remove chromium (III) and neutralize pH of alkaline waste waters. *Journal of Environmental Science and Health*. 2016, **51** (5), pp. 425-433. ISSN: 1532-4117.
13. de la NUEZ PANTOJA, E.Y.; RODRÍGUEZ IZNAGA, I. et al Natural Clinoptilolite Materials Enriched in Nitrogen and Phosphorous for Agricultural Purposes: A Comprehensive Study on Their Development. *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.* 2024. ISSN: 1574-1451.
14. CÉSPEDES-ORTIZ, M.C.; RODRÍGUEZ IZNAGA, I. et al Zeolitas naturales de diferentes yacimientos cubanos: composición y estabilidad química y térmica. *Revista Cubana de Química*. 2011, enero-abril, **XXIII** (1), pp. 80-88.
15. CHÁVEZ RIVAS, F. et al Evidence for controlled insertion of Fe ions in the framework of clinoptilolite natural zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2013, **167**. pp. 76-81.
16. RODRÍGUEZ IZNAGA, I.; RODRÍGUEZ FUENTES, G.; PETRANOVSKII, V. Ammonium modified natural clinoptilolite to remove

manganese, cobalt and nickel ions from wastewater: Favorable conditions to the modification and selectivity to the cations. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018, **255**, pp. 200-210.

### **Conflicto de interés**

Los autores expresan que no hay conflictos de intereses con este trabajo.

### **Contribución de autores**

Julio Cesar Molina-Amat: realizó la curación de datos, análisis formal, investigación, metodología y redacción del borrador original.

Inocente Rodríguez-Iznaga: efectuó la conceptualización, supervisión, validación, visualización y redacción (revisión y edición).

Gerardo Rodríguez-Fuentes: asesoró en la administración del proyecto, supervisión, validación, visualización y redacción (revisión y edición).

Esperanza Yamile de la Nuez-Pantoja: realizó la curación de datos y la investigación.

Armando Caisés-Ávalos: aseguró los recursos, validación y visualización.