

Artículo Original

**TECNOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN
DE SUPERFOSFATO TRIPLE**

**TECHNOLOGICAL PROPOSAL FOR THE PRODUCTION
OF TRIPLE SUPERPHOSPHATE**

Jenny Serrano Castillo^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-7555-2315>
Teresa de la Caridad Iraola Reyes² <https://orcid.org/0000-0002-3818-1391>
Fernando Ramos Miranda² <https://orcid.org/0000-0002-0601-6228>

¹ Grupo Empresarial de la Industria Química, La Habana, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos
"Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

Recibido: Marzo 29, 2024; Revisado: Mayo 12, 2024; Aceptado: Julio 22, 2024

RESUMEN

Introducción:

Con el tiempo la población humana aumenta y se requiere que los sitios aptos para cultivo incrementen su producción, encontrar nuevos sitios para satisfacer las necesidades, o que se roten los cultivos sobre una misma parcela de tierra. Con el objetivo de hacer los cultivos más intensivos es que aparecen los abonos y los fertilizantes químicos.

Objetivo:

Presentar la evaluación del impacto económico del diseño tecnológico de una instalación productora de superfosfato triple (SFT), a partir de roca fosfórica importada o nacional y de ácido fosfórico importado.

Materiales y Métodos:

Partiendo del diseño tecnológico de una instalación industrial a partir de una tecnología recomendada en la literatura científico técnica, se realizan los balances materiales y se determinan los costos inversionistas y los costos de producción que permiten estimar los precios de venta del producto y los indicadores dinámicos para la inversión propuesta.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Jenny Serrano, Email: jenny.serrano@equifa.cu



Resultados y Discusión:

El análisis económico determinó que habían pérdidas entre el 4,6 y el 28,86 % en tres de los porcentajes estudiados debido al precio del ácido fosfórico, por lo que se evaluó el 70 % que fue la única variante que mostró resultados positivos por lo que se calcularon para ese por ciento los valores dinámicos de rentabilidad Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno, y Período de Recuperación al Descontado.

Conclusiones:

Tecnológicamente es factible la producción de superfosfato triple utilizando proporciones parciales entre 70 y 78 % de ácido fosfórico, aunque las mejores condiciones de los indicadores dinámicos se reportan a un 70 %.

Palabras clave: ácido fosfórico; roca fosfórica; superfosfato triple.

ABSTRACT

Introduction:

Over time the human population increases and sites suitable for cultivation are required to increase their production, find new sites to satisfy the needs, or rotate crops on the same plot of land. With the aim of making crops more intensive, fertilizers and chemical fertilizers appear.

Objective:

To present the economic impact assessment of the technological design of a facility producing triple superphosphate (TSP) from imported or national phosphate rock and imported phosphoric acid.

Materials and Methods:

Starting from the technological design of an industrial facility based on a technology recommended in scientific-technical literature, material balances are carried out and investment costs and production costs are determined to estimate the selling prices of the product and the dynamic indicators for the proposed investment.

Results and Discussion:

The economic analysis determined that there were losses between 4.6 and 28.86% in three of the percentages studied due to the price of phosphoric acid, so 70% was evaluated which was the only variant that showed positive results so the dynamic values of profitability Net Present Value, Internal Rate of Return, and Discounted Payback Period at Discounted were calculated for that percent.

Conclusions:

Technologically, the production of triple superphosphate is feasible using partial proportions between 70 and 78% of phosphoric acid, although the best conditions of dynamic indicators are reported at 70%.

Keywords: phosphoric acid; phosphoric rock; triple superphosphate.

1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemoriales el hombre, el animal más avanzado en el planeta, ha tenido que buscar formas de alimentación para sobrevivir. En este proceso de búsqueda

descubrió la agricultura como fuente de suministro de alimentos, lo que ha sido uno de sus más grandes atinos de todos los tiempos. Pero con el tiempo la población humana aumenta y se requiere que los sitios aptos para cultivo incrementen su producción o encontrar nuevos sitios para satisfacer las necesidades del género humano, o que se roten los cultivos sobre una misma parcela de tierra. Con el objetivo de hacer los cultivos más intensivos es que aparecen los abonos y los fertilizantes químicos.

Los fertilizantes se clasifican en dos grandes grupos: (1) los orgánicos, también conocidos como abonos y son de origen animal o vegetal y (2) los orgánico - minerales, que son producidos en industrias y por medio de los cuales se obtienen resultados en la agricultura muy rápidamente (Eroski, 2021).

Todo suelo contiene un número de elementos químicos que son necesarios para el crecimiento de las plantas, aquellos que se requieren en grandes cantidades se llaman nutrientes principales. Los elementos más importantes son: nitrógeno, fósforo y potasio, calcio y el magnesio. Los nutrientes deben estar siempre presentes en cantidades y proporciones adecuadas (Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 1996).

El fósforo es un macronutriente fundamental que las plantas necesitan para su crecimiento y responsable del aporte de energía a todos los procesos que la requieren, por tanto participa en distintos procesos metabólicos, como por ejemplo, la fotosíntesis. Solo una pequeña cantidad del fósforo del suelo (que proviene de la degradación de minerales es posible tenerlo para las plantas, por lo que hay que mejorarlos con fertilización (Habit, 2020).

La explotación continua de los terrenos sin aplicación del fósforo agota rápidamente las reservas de este elemento en el suelo, generando problemas de productividad y calidad. Para los volúmenes de cultivos que se manejan en un país la opción de fertilizantes naturales o abonos no es viable. Para las producciones masivas o de gran volumen de fertilizantes la opción viable es la de fertilizantes minerales, sintéticos, o químicos, o producidos en fábrica.

Existen muchos fertilizantes producidos industrialmente, como por ejemplo los fosfatos monopotásico utilizado en todos los sistemas vegetales aumentando en estas la resistencia a las enfermedades fúngicas, dipotásico que además de su aporte de fósforo y potasio proporciona una óptima solución en los suelos ácidos debido a su reacción alcalina, monoamónico en el cual el nitrógeno amoniacal contribuye a una mejor absorción del fósforo por las plantas y diamónico con gran facilidad para ser utilizado sin importar las condiciones climáticas; y los superfosfatos simple, doble y triple que no solo sirven para restituir los niveles de nutrientes del suelo, sino también para obtener plantas más vigorosas y promover el crecimiento de las raíces haciéndolas más resistentes a la falta de agua. Entre los más utilizados y rico en fósforo está el superfosfato triple (SFT) con una concentración que oscila entre el 44 y 48 % de P_2O_5 del cual es soluble agua entre el 40 a 45 % estando inmediatamente disponible para las plantas, de este modo proporciona un impulso muy rápido al crecimiento de las mismas y los rendimientos agrícolas son mucho mayores.

Gran influencia en el costo de las importaciones que Cuba realiza la tienen los fertilizantes, siendo aproximadamente el 10,5 % del valor total según se evidencia en los anuarios estadísticos. Los fertilizantes fosfatados presentan altos consumos por lo

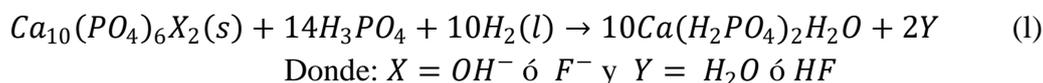
que la producción nacional de estos, permitiría sustituir las importaciones de los productos terminados, con precios CIF actuales entre 850 y 900 USD/t, por importaciones de materias primas, por importes inferiores y bajos costos de transformación que se revierten en menos costos del producto terminado y al mismo tiempo sustituir parte de las mismas, mediante el mejoramiento de la roca fosfórica nacional del yacimiento de Trinidad de Guedes, provincia de Matanzas, Cuba.

Es por ello que se considera que resulta necesario construir un complejo para la producción en Cuba de fertilizantes fosfatados para ahorrar con ello importaciones y satisfacer la demanda del país 20 000 toneladas anuales y exportar al Caribe. El precio promedio de la roca fosfórica importada es de 200 USD/t y del ácido fosfórico 1200 USD/t.

El objetivo del presente artículo es presentar la evaluación del impacto económico del diseño tecnológico de una instalación productora de superfosfato triple (SFT), a partir de roca fosfórica importada o nacional y de ácido fosfórico importado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El fertilizante superfosfato triple (SFT), con fórmula química $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, también conocido en Norte América como superfosfato concentrado (SFC) y fosfato monocalcico monohidratado (FMM), en Cuba está registrado como fertilizante mineral y autorizado por la dirección de suelos y fertilizantes del Ministerio de la Agricultura con contenido en por ciento de P-total ($\text{P}_2\text{O}_5 \geq 46$); P-asimilable ($\text{P}_2\text{O}_5 \geq 43$); P soluble en agua ($\text{P}_2\text{O}_5 \geq 32$); CaO 21-25; $\text{H}_3\text{PO}_4 \leq 3$; Humedad ≤ 4 , (LOFA, 2023). Los fertilizantes SFT son generalmente obtenidos al añadir ácido fosfórico a roca fosfórica, mayormente fluorapatita, de acuerdo con la siguiente reacción química (Ullmann y Bohnet, 2009); (Nasri, y col., 2015); (Nasri y col., 2014a), (Nasri y col., (2014b):



El SFT ha sido extensamente utilizado en la agricultura alrededor de todo el mundo, causando que las reservas de roca fosfórica sean cada vez menores y que los precios se multipliquen (Seesanong y col., 2020).

Recientemente, SFT ha sido también utilizado para reducir la acidez del suelo tropical (Maru y col., 2020), fitoestabilizar desechos de minería Pb–Zn (Sikdar y col., 2020), cultivar *Chlorella pyrenoidosa* (Elystia y col., 2020), el crecimiento del pasto de Bermuda (Vance y col., 2021), producir setas de ostra blanca (*Pleurotus ostreatus*) (Sianturi y col., 2021), sostener la fertilidad del suelo y mejorar la nodulación (Phares y col., 2020), producir cerámicas (Safronova y col., 2020a; Safronova y col., 2020b; Safronova y col., 2020c), producir materiales compuestos endurecidos (Musskaya y col., 2020), y producir compuestos bioactivos para cementar huesos (Huan y Chang, 2009).

Otros estudios de SFT incluyen las mejoras de la solubilidad de fosfatos en los suelos utilizando hongos *Trichoderma* (Bononi y col., 2020), la preparación de fertilizantes SFT de lenta liberación (Fertahi y col., 2019; Fertahi y col., 2020), e investigación del potencial de engendrar híbridos del maíz bajo reducido fertilizante de arranque P, (Weiß

y col., 2021).

Aunque las investigaciones han arrojado otros métodos para producir SFT (vía monetita fosfato dicálcico) a partir de bruchita mediante uso de sonicación (Sánchez-Enríquez y Reyes-Gasga, 2013), y a partir de la utilización como materias primas de las ostras marinas y el ácido fosfórico todavía las producciones masivas de SFT se basan en las materias primas: roca fosfórica y ácido fosfórico.

El SFT se puede producir por varios métodos: el continuo y el discontinuo o fraccionado. El método continuo ofrece una producción más eficiente, con mejor control de la calidad, menores costos operativos y mayor potencial de crecimiento en comparación con el método discontinuo. Estas ventajas lo hacen más atractivos en las plantas de mayor escala de producción (International fertilizer Development Center, 1998).

2.1. *Procesos continuos de producción del SFT*

El SFT se produce utilizando varios procesos (Figura 1): (1) el conocido como Corrida de la Pila, por la reacción de roca fosfórica finamente molida con ácido fosfórico líquido en un mezclador cónico, y (2) el SFT granulado, casi de la misma manera que el (1), pero la solución resultante se rocía sobre partículas pequeñas para formar gránulos del tamaño deseado.

El producto resultante de ambos métodos se deja reposar un tiempo para que las reacciones químicas se completen lenta y adecuadamente.

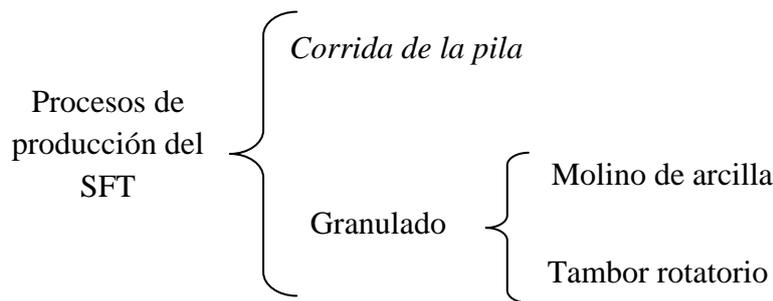


Figura 1. Procesos de producción de SFT

2.2. *Descripción del proceso seleccionado*

El proceso seleccionado para la producción del SFT es el Granulado (2) debido a que el producto se consume en Cuba en la forma resultante de este proceso. Se produce mediante una reacción química entre el ácido fosfórico, por lo general en una concentración del 45 a 55 % de P_2O_5 , y la roca fosfórica previamente secada y molida en exceso, de modo que el 94 % de la fluorapatita reacciona con el ácido fosfórico. Generalmente el ácido fosfórico obtenido por la vía del proceso húmedo tiene una concentración aproximadamente del 30 al 33 % de P_2O_5 , por estas razones, el ácido del proceso húmedo debe concentrarse por evaporación hasta una concentración de 38 a 55 % de P_2O_5 , dependiendo del uso del material, o importarse con los valores de concentración comercial de P_2O_5 (del 45 a 55 % de P_2O_5). Una vez completada la reacción y la cristalización del yeso, los compuestos líquidos y sólidos son separados mediante un proceso de filtración. Posteriormente el ácido fosfórico líquido obtenido al 28 % de P_2O_5 (Pentóxido de difósforo) va a un proceso de evaporación donde se

concentra hasta un 32 % y se almacena en tanques (Nasri y col., 2014b).

El proceso químico de obtención de SFT por el método continuo tiene las etapas que se muestran en la Figura 2:

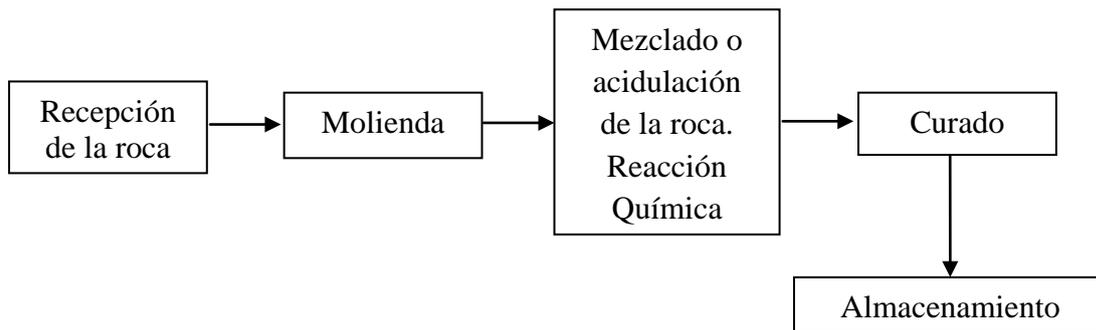
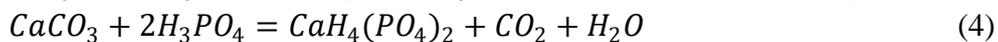


Figura 2. Etapas del método continuo

A continuación, se describe el proceso de obtención del superfosfato triple mediante el método de producción continua.

El superfosfato triple generalmente contiene entre un 43 a un 50 % en peso de P_2O_5 . Se utiliza para su fabricación el ácido fosfórico manufacturado a partir del proceso por vía húmeda. El otro insumo es la roca fosfórica.

Las principales reacciones químicas que definen este proceso son las que se relacionan a continuación:



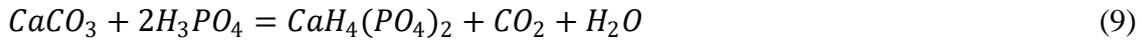
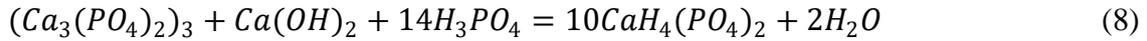
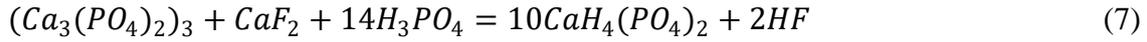
Si el ácido fosfórico se encuentra caliente y concentrado al acidular a la roca fosfórica una cantidad de gases que contienen flúor son liberados. Con la dilución y ácido fosfórico frío prácticamente no se liberan dichos gases. Si se utiliza entre el 70 a 78 % del ácido fosfórico con una concentración entre 51 a 51,6 % de P_2O_5 para la acidulación de la roca fosfórica, el producto resultante podría encontrarse suficientemente seco después de un curado adecuado, haciendo innecesario un secado artificial.

A 44 °C el H_3PO_4 de 70 a 78 % de P_2O_5 , reacciona con la roca fosfórica, formando la pasta al cabo de 3 o 4 minutos después de la mezcla. Se obtiene así un proceso continuo para la fabricación del superfosfato triple.

Para un volumen de producción de 100 000 t/año de superfosfato triple se diseña una planta con régimen de trabajo de 24 h y 333 días de trabajo al año, con 15 días de parada para mantenimiento y aproximadamente un día y medio de parada por mes para casos de imprevistos y mantenimientos puntuales. Esto equivale a una planta que produce 300 t/día de superfosfato triple, para estas condiciones se requiere una cantidad de materia prima que puede ser calculada a partir del balance estequiométrico.

Se procede a realizar el análisis estequiométrico de las reacciones principales que

ocurren en la producción de superfosfato triple por el método continuo. Las reacciones son las siguientes:



Las masas molares de reaccionantes y productos se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Masas molares de sustancias reaccionantes y productos

<i>Sustancias</i>	<i>Masas molares (g/mol)</i>
$(Ca_3(PO_4)_2)_3$	930,302
CaF_2	78,07
H_3PO_4	97,994
$CaH_4(PO_4)_2$	234,0525
HF	20,01
$Ca(OH)_2$	74,093
$CaCO_3$	100,0869
H_2O	18,015
CO_2	44,01

Balance estequiométrico de materiales.

Para la reacción 7:

$$y = m(Ca_3(PO_4)_2)_3 = \frac{m(CaH_4(PO_4)_2) \times M((Ca_3(PO_4)_2)_3)}{10 \times (M(CaH_4(PO_4)_2))} \quad (10)$$

$$z = m(CaF_2) = \frac{m(CaH_4(PO_4)_2) \times M(CaF_2)}{10 \times (M(CaH_4(PO_4)_2))} \quad (11)$$

$$x = m(H_3PO_4) = \frac{m(CaH_4(PO_4)_2) \times M(H_3PO_4) \times 14}{10 \times (M(CaH_4(PO_4)_2))} \quad (12)$$

Para la reacción 8:

$$y = m(Ca_3(PO_4)_2)_3 \quad (13)$$

$$z = m(Ca(OH)_2) = \frac{m(CaH_4(PO_4)_2) \times M(Ca(OH)_2)}{10 \times (M(CaH_4(PO_4)_2))} \quad (14)$$

$$x = m(H_3PO_4) \quad (15)$$

Para la reacción 9:

$$y = m(CaCO_3) = \frac{m(CaH_4(PO_4)_2) \times M(CaCO_3)}{10 \times (M(CaH_4(PO_4)_2))} \quad (16)$$

2.3. Evaluación económica

La evaluación económica incluye la estimación de costo de inversión, el costo de producción, la ganancia y un análisis de la rentabilidad, mediante la determinación de los indicadores dinámicos de rentabilidad: Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno, y Período de Recuperación al Descuento, (VAN, TIR, PRD), con el objetivo de proponer el presupuesto para la planta que se desea diseñar.

Los indicadores dinámicos se determinan de acuerdo con métodos establecidos en la literatura científica y que se explican a continuación.

Para realizar la estimación del costo de un proyecto hay que tener en cuenta el costo total de inversión, que incluye el costo del equipamiento, costo de la ingeniería, costo de materiales, entre otros indicadores que serán calculados por la metodología propuesta por (Peters y Timmerhaus, 2003).

Antes de realizar cualquier cálculo, primeramente, se deben actualizar los costos que se tienen como referencia, utilizando un índice de costo.

Para determinar el costo total de inversión se utiliza la metodología propuesta por (Peters y Timmerhaus, 2003), por lo que los costos directos e indirectos, así como el capital fijo invertido se calcularán utilizando como base la Tabla 17 de este libro. Para determinar los por cientos que se utilizan en este procedimiento se debe tener en cuenta que el cálculo se realiza para un circuito o sistema que está incluido dentro de una unidad de proceso, no para una planta completa, por lo que muchos de los aspectos que se tienen en cuenta en esta metodología para el presente caso de estudio son adaptados a las condiciones reales.

Después de calculado el costo total de la inversión se calcula el costo de producción, la depreciación y la ganancia para poder determinar el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Período de Recuperación al Descuento.

Para estimar el costo total de producción se utilizan los factores de proporción y las ecuaciones que se encuentran en la Tabla 27 de Peters y Timmerhaus, (2003).

En este caso el tipo de depreciación que se utiliza es lineal, de un 10 % del costo fijo invertido (CFI), la tasa impositiva utilizada es de 8 % del CFI y la tasa de interés 1,2 %. Entonces el valor actual neto (VAN) es el valor de los flujos de caja proyectados para los 20 años de vida útil estimados para la planta, siendo positivo si el saldo entre beneficios y gastos es favorable, y negativo en caso contrario.

Se define como aquella tasa de descuento que reduce a cero el Valor Actual Neto. La TIR representa el porcentaje o tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, de forma tal que, al finalizar el período de evaluación o vida útil, el saldo no recuperado sea igual a cero.

El análisis de la inversión se hace teniendo en cuenta dos factores: primero, debe ser tal su ganancia, que compense los efectos inflacionarios, y, en segundo término, debe poseer un premio o sobretasa por arriesgar el dinero en determinada inversión. Entonces, para esto se valora la tasa mínima aceptable de retorno (TMAR) que para el sector de los fertilizantes químicos es del 15 % al 18 %.

Si la TMAR es muy alta, el VAN puede volverse negativo, y en ese caso se rechazaría la inversión (Esparza, 2022).

Si el $TIR > TMAR$, se acepta la inversión. El criterio de aceptación de evaluación se analizará de la siguiente forma: si $VAN \geq 0$, acéptese el proyecto; si $VAN < 0$, rechácese.

El Periodo de Recuperación de la Inversión se considera como indicador que mide tanto la liquidez del proyecto como el riesgo relativo, pues permite anticipar los eventos en el corto plazo, (Towler y Sinnott, 2009).

Es importante anotar que este indicador es un instrumento financiero que, al igual que el VAN y la TIR, permite optimizar el proceso de toma de decisiones.

Para obtener el valor del PRI, a la inversión inicial se le van adicionando gradualmente los flujos de caja anuales hasta que el resultado sea cero, en ese momento se ha recuperado la inversión. El VAN, TIR y PRI pueden ser calculados mediante técnicas computarizadas, utilizando el *Microsoft Excel*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados del balance estequiométrico de materiales

La cantidad de materias primas requeridas para un día de producción de SFT por el método continuo según el balance estequiométrico de las reacciones químicas se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Materia prima requerida por día para la producción de SFT por el método continuo

<i>Materia prima (t)</i>		100 %	70 %	74 %	78 %
Roca fosfórica	Reacción 1	129,28	90,49	95,66	100,84
	R2	128,76	90,13	95,28	100,43
	R3	128,27	89,79	94,92	100,05
	Totales de roca (t)	386,31	270,41	285,87	301,32
Ácido fosfórico	R1	175,84	123,09	130,12	137,16
	R2	175,84	123,09	130,12	137,16
	R3	251,20	175,84	185,89	195,94
	Totales de ácido (t)	602,88	422,02	446,13	470,25
Total de materias primas (t)		989,19	692,43	732,00	771,57

Para los precios de ácido fosfórico reportados en la información comercial de 4229,16 USD/t, así como los de roca fosfórica de 1428 USD/t se tienen los costos de materia prima en la tabla 3.

Tabla 3. Costos de las materias primas para la producción de SFT por el método continuo (por día)

<i>Materia prima (t)</i>		100 %	70 %	74 %	78 %
Roca fosfórica	Reacción 1	16 599,17	15 239,17	16 109,98	16 980,79
	R2	16 532,79	15 178,23	16 045,56	16 912,88
	R3	16 469,87	15 120,47	15 984,49	16 848,52
	Totales de gastos (USD)	49601,82	45 537,87	48 140,03	50 742,20
Ácido fosfórico	R1	74 65,67	25 43,33	27 08,67	28 74,00
	R2	74 65,67	25 43,33	27 08,67	28 74,00
	R3	106 236,67	36 633,33	38 726,67	40 820,00
	Totales de costos (USD)	25 4968,00	87 920,00	92 944,00	97 968,00
Total de costos en materias primas (USD)		304 569,82	133 457,87	141 084,03	148 710,20

3.2. Estimación del Capital Fijo Invertido

Los costos de inversión de la planta para cuando las reacciones principales en la producción de SFT ocurren al 70, 74 y 78 %, considerando la variación necesaria de la capacidad a instalar, se determinaron por la regla de la punto seis (Peters y Timmerhaus, 2003). Para determinar el costo del equipamiento de la planta se utiliza la Tabla 24 de Peters y Timmerhaus (2003) lo cual se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Estimación del capital fijo invertido

<i>Costos Directos (CD) (USD)</i>	100%	70 %	74 %	78 %
Adquisición	312 130,00	218 491,00	230 976,20	24 3461,40
Instalación	124 852,00	87 396,40	92 390,48	97 384,56
Costo de instrumentación y controles	31 213,00	21 84,10	23 097,62	24 346,14
Instalación de tuberías	31 213,00	21 849,10	23 097,62	24 346,14
Instalación eléctrica	62 426,00	43 698,20	46 195,24	48 692,28
Edificios auxiliares	62 426,00	43 698,220	46 195,24	48 692,28
Servicios auxiliares	21 8491,00	152 943,70	161 683,34	170 422,98
Terrenos	12 485,20	8 739,64	9 239,05	9 738,46
Total de costos directos	855 236,20	598 665,34	632 874,79	667 084,24
Costos indirectos (USD)				
Ingeniería y supervisión	85 523,62	59 866,53	63 287,48	66 708,42
Gastos con el constructor	119 733,07	83 813,15	88 602,47	93 391,79
Imprevistos	623 819,35	436 673,54	461 626,32	486 579,09
Total de costos indirectos (TCI) (USD)	829 076,03	580 353,22	613 516,26	646 679,31
Costo Fijo Invertido (CFI) (USD)	1 247 638,69	873 347,08	923 252,63	973 158,18

3.3. Estimación del Costo Total del Producto

Se determina el costo total de producción (CTP) utilizando como apoyo la Tabla 25 de Peters y Timmerhaus, (2003).

3.4. Estimación Ganancias: para las diferentes alternativas

Siendo el precio de venta calculado del producto: 775 USD/t se tiene los resultados anuales que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Estimación del costo total del producto

<i>Conceptos (USD)</i>	100 %	70 %	74 %	78 %
Costos de materiales	101 421 749,70	70 995 224,79	75 052 095,00	79 108 964,77
Costos de trabajo	510 011,23	357 007,86	377 408,31	397 808,76
Costos de supervisión	510 011,23	357 007,86	377 408,31	397 808,76
Utilidades	510 011,23	357 007,86	377 408,31	397 808,76
Mantenimiento y reparación	2 552,77	1 786,94	1 889,05	1 991,16

Gastos de suministros	62 386,90	43 670,83	46 166,31	48 661,78
Gastos de laboratorio	255,28	178,69	188,91	199,12
Patentes	0	0	0	0
Total de costos directos	103 016 978,30	72 111 884,84	76 232 564,00	80 353 243,11
Gastos fijos				
Depreciación	124 763,87	87 334,71	92 325,26	97 315,82
Impuestos locales	0	0	0	0
Seguros	4 990,55	3 493,39	3 693,01	3 892,63
Alquileres	99 811,10	69 867,77	73 860,21	77 852,65
Total de gastos fijos	229 565,52	160 695,86	169 878,48	179 061,11
Total de costos de manufactura	103 246 543,90	72 272 580,70	76 402 442,00	80 532 304,21
Gastos generales				
Costos administrativos	1 190 482,10	863 790,56	913 150,02	962 509,48
Costos de distribución y ventas	1 190 482,10	863 790,56	913 150,02	962 509,48
Costos I +D	297 617,95	215 947,64	228 287,5	240 627,37
Interés de financiamiento	1 201 987,00	863 790,56	913 150,02	962 509,48
Total de gastos generales	2 888 993,57	2 807 319,32	2 739 450,10	3128 155,81
Costo total del producto	106 135 537,00	75 079 900,02	79 141 893,00	83 660 460,02
Ganancia o pérdida	-30 635 537,00	420 099,98	-3 641 893,00	-8 160 460,02
Por ciento de Ganancia o pérdida	-28,86	0,60	-4,60	-9,75
Por ciento de Retorno	-24,55	0,48	-3,94	-8,39

El análisis económico determinó que había pérdidas en tres de los porcentajes estudiados debido al precio del ácido fosfórico, por lo que se evaluó el 70 % que fue la única variante que mostró resultados positivos calculándose entonces los valores dinámicos para la misma variante, que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Estimación de los indicadores dinámicos

<i>Indicadores</i>	<i>Valor</i>
VAN	1 801 688,41 USD
TIR	48 %
PRD	3,5 años

El análisis de los indicadores dinámicos evidencian la factibilidad de la inversión para la variante del 70 % a partir de que el VAN muestra valores positivos, la TIR > 0 demuestra que la rentabilidad es mayor que la rentabilidad mínima requerida y por último recuperar la inversión en un término de 3,5 años permite la operación de la planta con márgenes de utilidad superiores por los 16,5 años restantes, según el tiempo considerado para la explotación de la tecnología.

4. CONCLUSIONES

1. Existen potencialidades de la fosforita cubana, quedando pendiente realizar un estudio más profundo, teniendo en cuenta los precios del mercado y su disponibilidad.
2. Tecnológicamente es factible la producción de superfosfato triple utilizando proporciones parciales del 70 % de ácido fosfórico.
3. Es adecuado emplear la tecnología de producción continua para superfosfato triple en Cuba utilizando ácido fosfórico demostrado con la existencia de plantas en operación.

REFERENCIAS

- Bononi, L., Chiamonte, J.B., Pansa, C.C., Moitinho, M.A., & Melo, I.S., Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth., *Scientific Reports*, Vol. 10, 2020, 2858. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59793-8>
- Elystia, S., Muria, S.R., & Furaida., E.H., Cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* as a raw material for the production of biofuels in palm oil mill effluent medium with the addition of urea and triple super phosphate., *Environmental Health Engineering and Management*, MaadRayan Publishing Company Print, 2020, pp. 1-6.
- Eroski, C., Tipos de fertilizantes., *EROSKI Consumer*, 29 de Octubre de 2021. <https://www.consumer.es/bricolaje/tipos-de-fertilizantes.html>
- Esparza, J.L., Análisis y evaluación de proyectos., Unidad 5 Método de evaluación de proyectos., Conferencia Universidad Autónoma del estado de Quintana Roo, 2022. <https://web.uqroo.mx/archivos/jlesparza/acpsc137/EvalFin.pdf>
- Fertahi, S., Bertrand, I., Amjoud, M.B., Oukarroum, A., Arji, M., & Barakat, A., Properties of coated slow-release triple superphosphate (TSP) fertilizers based on lignin and carrageenan formulations., *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, Vol. 7, No. 12, 2019, pp. 10371-10382. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00433>
- Fertahi, S., Bertrand, I., Ilsouk, M., Oukarroum, A., Amjoud, M.B., Zeroual, Y., & Barakat, A., Impact of plasticizers on lignin-carrageenan formulation properties and on phosphorus release from a coated TSP fertilizer., *Industrial and engineering chemistry research*, Vol. 6, No. 31, 2020, pp. 14172-14179. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.0c03143>
- International fertilizer Development Center., Organización de Naciones Unidas para el Desarrollo industrial., *Fertilizer Manual*, 3rd ed., Editorial Kluwer Academic Publishers, In cooperation with UNIDO, IFDC, Dordrecht, 1998, pp. 76-77.
- Habit, M.F., La importancia del fósforo en las plantas., octubre de 2020. <https://www.agrovitra.com/media/2022/12/Fosforo- Fernanda-Habit.pdf>
- Huan Z., & Chang, J., Novel bioactive composite bone cements based on the β -tricalcium phosphate–monocalcium phosphate monohydrate composite cement system., *Acta Biomater*, Vol. 5, No. 4, 2009, pp. 1253-1264. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.10.006>
- LOFA., Lista Oficial de Fertilizantes Autorizados., Ministerio de la Agricultura de la República de Cuba, Documento Oficial, Dirección de Suelos y Fertilizantes, 2023.
-

- Maru, A., Haruna, A.O., Asap, A., Majid, N.M.A., Maikol, N., & Jeffary, A.V., Reducing acidity of tropical acid soil to improve phosphorus availability and Zea mays L. productivity through efficient use of chicken litter biochar and triple superphosphate., *Applied Sciences*, Vol. 10, 2020, 2127. <https://doi.org/10.3390/app10062127>
- Musskaya, O.N., Krutko, V.K., Kulak, A.I., Safronova, T.V., & Shatalova, T.B., Thermal transformations in hardening compositions based on hydroxyapatite, monocalcium phosphate monohydrate, and polymeric binders., *Glass and Ceramics*, Vol. 77, 2020, pp. 256– 262. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10717-020-00283-8>
- Nasri, K., Chtara, C., Chekir, H., & El Feki, H., Solubility study and purification of industrial triple superphosphate in aqueous solution., *Journal of Advances in Chemistry*, Vol. 9, 2014a, pp. 1943– 1952. <https://doi.org/10.24297/jac.v9i2.2348>
- Nasri, K., Chtara, C., Hassen, C., Fiallo, M., Sharrock, P., Nzihou, A., & El Feki, H., Recrystallization of industrial triple super phosphate powder., *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 53, 2014b, pp. 14446-14450. <https://doi.org/10.1021/ie502033j>
- Nasri, K., El Feki, H., Sharrock, P., Fiallo, M., & Nzihou, A., Spray-dried monocalcium phosphate monohydrate for soluble phosphate fertilizer., *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 54, 2015, pp. 8043-8047. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02100>
- Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura., *Ecología y enseñanza rural, Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas.*, Tema No. 2, El suelo, 1996. <https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s04.htm>
- Peters, M.S., & Timmerhaus, K.D., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers.*, Chapter 6 and 7, McGraw-Hill Chemical, 2003, pp. 150-254.
- Phares, C.A., Atiah, K., Frimpong, K.A., Danquah, A., Asare, A.T., & Aggor-Woananu, S., Application of biochar and inorganic phosphorus fertilizer influenced rhizosphere soil characteristics, nodule formation and phytoconstituents of cowpea grown on tropical soil., *Heliyon*, Vol. 6, 2020, e05255. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05255>
- Safronova, T.V., Korneichuk, S.A., Shatalova, T.B., Lukina, Y.S., Sivkov, S.P., Filippov, Y.Y., Krutko, V.K., $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7\text{-Ca}(\text{PO}_3)_2$ ceramic obtained by firing β -tricalcium phosphate and monocalcium phosphate monohydrate based cement stone., *Glass and Ceramics*, Vol. 77, 2020a, pp. 165-172. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10717-020-00263-y>
- Safronova, T.V., Sadilov, I.S., Chaikun, K.V., Shatalova, T.B., & Filippov, Y.Y. Ceramics based on a powder mixture of calcium hydroxyapatite, monocalcium phosphate monohydrate, and sodium hydrogen phosphate homogenized under mechanical activation conditions., *Inorganic Materials Applied Research*, Vol. 11, 2020b, pp. 879– 885. <https://doi.org/10.1134/s2075113320040346>
- Safronova, T.V., Shatalova, T.B., Filippov, Y.Y., Krut'ko, V.K., Musskaya, O.N., Safronov, A.S., & Toshev, O.U., Ceramics in the $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7\text{-Ca}(\text{PO}_3)_2$ system obtained by annealing of the samples made from hardening mixtures based on calcium citrate
-

- tetrahydrate and monocalcium phosphate monohydrate., *Inorganic Materials Applied Research*, Vol. 11, 2020c, pp. 777-786. <https://doi.org/10.1134/s2075113320040334>
- Sánchez-Enríquez, J., & Reyes-Gasga, J., Obtaining $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, monocalcium phosphate monohydrate, via monetite from brushite by using sonication., *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 20, 2013, pp. 948-954. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.10.019>
- Seesanong, S., Laosinwattana, C., & Boonchom, B., Microparticles of calcium carbonate CaCO_3 , calcium hydrogen phosphate hydrate $\text{CaHPO}_4 \cdot 1.9\text{H}_2\text{O}$ and tricalcium phosphate $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ prepared from golden apple snail shells (*Pomacea canaliculata*)., *Research Journal of Chemistry and Environment*, Vol. 24, 2020, pp. 1-6. <https://vu.on.worldcat.org/oclc/8671965291>
- Sianturi, M., Bintang, & Sabrina, T., Effect of giving triple super phosphate and dolomite fertilizer on mushroom media (baglog) on production of white oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*)., *IOP Conf. Ser.: Environmental Earth Sciences*, Vol. 782, 2021, 042044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/782/4/042044>
- Sikdar, A., Wang, J., Hasanuzzaman, M., Liu, X., Feng, S., Roy, R., & Sial, X.W., Phytostabilization of Pb-Zn mine tailings with *Amorpha fruticosa* aided by organic amendments and triple superphosphate., *Molecules*, Vol. 25, 2020, 1617. <https://doi.org/10.3390/molecules25071617>
- Towler, G., & Sinnott, R., *Chemical Engineering Design*, Chapter 6, SI edition, 5th Edition - May 15, 2009, pp. 297-395.
- Ullmann, F., & Bohner, M., *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Chapter 2, Wiley-VCH, John Wiley & Sons, Weinheim, Germany, New York, 2009, pp. 183-184.
- Vance, C., Gaston, L., & Beasley, J., Bermudagrass establishment on infertile soil: growth and phosphorus losses with poultry litter ash and triple superphosphate., *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Vol. 52, 2021, pp. 886-895. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1869771>
- Weiß, T.M., Leiser, W.L., Reineke, A.-J., Li, D., Liu, W., Hahn, V., & Würschum T., Optimizing the P balance: How do modern maize hybrids react to different starter fertilizers? *Plos One*, Vol. 16, 2021, e0250496. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250496>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Lic. Jenny Castillo Serrano. Conceptualización, investigación, redacción - primera redacción, redacción - revisión y edición.
 - Ing. Teresa de la Caridad Iraola Reyes. Investigación.
 - Dr.C. Fernando Ramos Miranda. Supervisión.
-