

DISEÑO BÁSICO DE PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO
FOSFÓRICO CON ROCA FOSFÓRICA DE LA FORMACIÓN LA LUNA MIEMBRO
GALEMBO

DAVID FERNANDO CALDERÓN LÓPEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2009

DISEÑO BÁSICO DE PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO
FOSFÓRICO CON ROCA FOSFÓRICA DE LA FORMACIÓN LA LUNA MIEMBRO
GALEMBO

DAVID FERNANDO CALDERÓN LÓPEZ

Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Químico

Director

ÁLVARO RAMÍREZ GARCÍA Ph. D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2009

AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a la
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

A INGEMINERA LTDA. y todo su equipo de trabajo por acogerme y permitirme desarrollar esta práctica en sus instalaciones.

Al doctor ÁLVARO RAMÍREZ GARCÍA por su dirección y valiosas contribuciones en la realización de este proyecto.

Al apoyo incondicional de mis padres GONZALO Y LEONOR.

A LILIANA por acompañarme y guiarme día a día.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CADENA DE VALOR INDUSTRIAL DEL ÁCIDO FOSFÓRICO	3
1.1 Panorama mundial.	3
1.2 Panorama nacional.	3
2. DESCRIPCIÓN DE MATERIAL PRIMAS ACTUALES Y PRODUCTO DESEADO	4
2.1 Comparación entre métodos de producción y selección de propuesta.	6
3. ELECCIÓN DE EQUIPOS Y DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SELECCIONADO	13
4. BALANCES PARA EL PROCESO KPA	14
4.1 Balance de materia	15
4.2 Balance de energía	17
4.3 Balance económico	18
CONCLUSIONES	21
RECOMENDACIONES	22
BIBLIOGRAFÍA	23

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

	Pág.
Tabla 1. Capacidad de Producción Mundial de ácido fosfórico	3
Tabla 2. Importaciones de ácido fosfórico en el periodo 1997-2004	4
Tabla 3. Análisis elemental de roca fosfórica formación la Luna (Santander)	5
Diagrama 1. Diagrama de flujo producción de ácido fosfórico proceso húmedo	6
Diagrama 2. Diagrama de flujo producción de ácido fosfórico proceso térmico de reducción y oxidación de fósforo.	7
Tabla 4. Ventajas y desventajas del proceso húmedo de producción de ácido fosfórico	8
Tabla 5. Ventajas y desventajas del proceso térmico de reducción y oxidación del fósforo	10
Tabla 6. Costos de materias primas proceso húmedo	11
Tabla 7. Costos de materias primas proceso KPA	12
Ilustración 1. Diagrama de equipos planta de producción de ácido fosfórico.	13
Tabla 8. Caracterización de arcilla, muestra de la mina de roca fosfórica	14
Tabla 9. Caracterización de carbón de Cúcuta, análisis último.	15

Tabla 10.	Dimensiones Horno Rotatorio	16
Ilustración 2.	Determinación de características físicas del material aglutinado.	16
Tabla 11.	Corrientes globales del proceso.	16
Tabla 12.	Resumen balance de energía proceso KPA.	17
Tabla 13.	Costos preliminares del proceso. \$USD.	19
Tabla 14.	Proyección de ingresos a 15 años.	19

RESUMEN

TITULO: DISEÑO BÁSICO DE PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO CON ROCA FOSFÓRICA DE LA FORMACIÓN LA LUNA MIEMBRO GALEMBO.*

AUTOR: DAVID FERNANDO CALDERÓN LÓPEZ.**

PALABRAS CLAVES: Diseño, proceso KPA, roca fosfórica, ácido fosfórico, reducción, oxidación.

DESCRIPCIÓN

La producción de ácido fosfórico a nivel industrial en Colombia está limitada debido al alto costo del ácido sulfúrico y a la baja calidad de los yacimientos nacionales. La empresa Ingeminera LTDA. con un título minero de roca fosfórica en la formación la Luna y consciente de la problemática nacional está en búsqueda de nuevas alternativas para el procesamiento de este material. Megy[♦] demostró que es posible obtener ácido fosfórico integrando la tecnología de horno rotatorio y el antiguo proceso térmico de producción para obtener reducciones considerables en el consumo energético y eficiencias de recuperación superiores al 85% llamando esta alternativa proceso KPA.

El análisis de mercado de consumo de ácido fosfórico permitió determinar el impacto de su cadena de valor industrial a nivel mundial y nacional, siendo este último, determinante para justificar el desarrollo del diseño básico de una planta piloto para la producción de ácido fosfórico con la roca del yacimiento propio y el proceso KPA.

El diseño de la planta se basó en el concepto de horno rotatorio cementero integrando las reacciones de producción de ácido fosfórico a los materiales disponibles. Se realizó además una estimación de costos mediante el método basado en el equipo fundamental y la proyección de flujo de caja en la cual se calcularon utilidades positivas para el primer año de funcionamiento, calificando este proyecto como viable preliminarmente.

* Practica Empresarial

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director, ÁLVARO RAMÍREZ GARCÍA Ph. D.

♦ MEGY, Joseph. A credible alternative to the WPA process. En Fertilizers International. Vol 424. (Jun/2008).

ABSTRACT

TITLE: BASIC DESIGN FOR A PHOSPHORIC ACID PRODUCTION PILOT PLANT WITH PHOSPHATE ROCK FROM LA LUNA FORMATION GALEMBO MEMBER.*

AUTHOR: DAVID FERNANDO CALDERÓN LÓPEZ.**

KEYWORDS: Design, KPA Process, phosphate rock, phosphoric acid, reduction, oxidation.

DESCRIPTION

The phosphoric acid production at industrial level in Colombia is limited due to the high cost of sulfuric acid and low quality of domestic deposits. The company Ingeminera LTDA. with a mining title for phosphate rock and conscious of the national problem is in search of new alternatives for processing this material. Megy[♦] showed that phosphoric acid can be obtained by integrating rotary kiln technology and the old thermal production process for significant reductions in energy consumption and recovery efficiencies greater than 85% calling this alternative KPA process.

The analysis of the phosphoric consumer market allowed to determine the economic impact of its industrial value chain globally and nationally, the latter being crucial to justify the developing de basic design of a pilot plant for producing phosphoric acid with its own reservoir rock and the KPA process.

The plant design was based on the concept of incorporating cement rotary kiln and the reactions of phosphoric acid production to the available materials. It also carries out a cost estimate by the method based on the core team, the cash flow projection in which positive earnings were calculated for the first year of operation, qualify the project as preliminarily viable.

* Industrial Practice

** Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director, ALVARO RAMIREZ GARCIA Ph. D.

♦ Megy, Joseph. A credible alternative to the WPA process. En Fertilizers International. Vol 424, (Jun/2008)

INTRODUCCIÓN

El ácido fosfórico es un compuesto inorgánico de fórmula molecular H_3PO_4 , producto de alta demanda nacional utilizado principalmente como aditivo de bebidas no alcohólicas, pegamento de prótesis dentales, catalizador, en metales inoxidables, ablandador de aguas, en fertilizantes, sales minerales para alimentación animal y detergentes. La obtención industrial se realiza por métodos térmicos o por el método húmedo que consiste en la reacción de roca fosfórica con ácido sulfúrico para producir yeso y ácido fosfórico.

La empresa INGEMINERA LTDA dedicada a la explotación de calizas y yesos en la región de Santander tiene dentro de sus licencias de explotación un sector del yacimiento de roca fosfórica de la formación “La Luna” y va a iniciar la explotación de esta mina para comercializar la roca como materia prima del proceso de producción nacional de fertilizantes. Sin embargo es el deseo de esta empresa estudiar y participar en la cadena productiva de la roca fosfórica y los fertilizantes, iniciando este estudio con la producción de ácido fosfórico tarea para la cual ha dispuesto parte de su recurso humano y económico.

Actualmente existen tres métodos de producción de ácido fosfórico; el método térmico tradicional en el cual la roca se reduce en un horno eléctrico y el fósforo pasa a una cámara de combustión donde se oxida para ser tratado con vapor de agua y recuperar el ácido, esta tecnología fue reemplazada en 1842 debido a los altos costos energéticos por el proceso húmedo de producción en el cual la roca es tratada con ácido sulfúrico y posteriormente se filtra para separar el sulfato de calcio que se produce, en 1981 Hard Robert inicia investigaciones en un nuevo proceso para producir ácido reduciendo químicamente una mezcla de sílice, combustible y roca fosfórica generando fósforo metálico y monóxido de carbono aprovechando la energía de oxidación del fósforo producido para mantener la reacción de reducción, este proceso fue nombrado KPA (Kiln Phosphoric Acid)¹ y

¹ Hard, R. A., “Process for Reducing Phosphate Ore.” USP# 4,351,809, Sep 28, 1982.

aun no se ha aplicado a nivel industrial, sin embargo los rendimientos de conversión esperados superan el 90%.

El uso potencial de esta alternativa tecnológica es promisorio para la producción de ácido fosfórico de alta pureza pero teniendo como objetivo presentar a la empresa una alternativa de producción viable se compararon inicialmente los diferentes procesos mediante una factibilidad preliminar y posteriormente desarrollar el diseño piloto básico del proceso más favorable.

Como resultado principal se obtiene que el proceso KPA es viable para una planta piloto que elabore técnicamente 4400 ton ácido/año de producto con un contenido de P_2O_5 de 75%. La ubicación del piloto es la zona rural de Lebrija por disposición de Ingeminera LTDA. La inversión fija alcanza los US\$ 3.914.848. El capital de trabajo asciende a US\$1.564.710/año. El costo de producción de la planta es de US\$ 480/ton Acido Fosfórico. El principal costo de producción es el de la roca fosfórica (explotación y traslado) con valor US\$ 88/ton de Acido fosfórico. La TIR es del 45,9%.

Es necesario iniciar experimentación para corroborar la información de rendimientos reportada en la literatura e identificar las condiciones óptimas para la operación con los materiales locales.

1. Cadena de valor industrial del Ácido Fosfórico

1.1 Panorama mundial

El ácido Fosfórico es el precursor de fertilizantes fosfatados y alimentos animales más usado a nivel mundial, uno de los principales importadores es Europa occidental en donde la producción de ácido ha caído en más del 60% desde 1980 por razones económicas y ambientales², actualmente los principales productores son los países que cuentan con grandes reservas destacándose Norte América, África y el Cercano Oriente como se aprecia en la tabla 1.

Tabla 1 Capacidad de Producción de Ácido Fosfórico

Región	Ácido Fosfórico (kton de P ₂ O ₅)			
	1985	1990	1995	2000
Europa Occidental	4257	3386	1877	1797
Europa Oriental	2045	2048	1781	1725
Ex-Unión Soviética	5975	5941	6306	6198
América del Norte	12170	11677	11945	12757
América Latina	1339	1772	1593	1958
África	4244	5355	5446	6363
Cercano Oriente	2213	2255	2122	2743
Asia del Sur	726	553	773	1838
Asia del Este	1063	1357	2130	3700

Fuente: FAO 2001

El proceso de producción actual de ácido fosfórico más usado y difundido a nivel mundial es el método húmedo.

1.2 Panorama Nacional

En Colombia el ácido fosfórico importado es la materia prima para la producción de fosfato tricálcico de alta demanda en la industria de los concentrados, el DANE

² Unión temporal GI Georecursos, Análisis de la estructura productiva y mercados de la roca Fosfórica en Colombia, Bogotá, 2005.

reporta un crecimiento en las importaciones de este ácido del 218,51 % entre el 2001 y el 2002, lo cual muestra que la demanda nacional no está satisfecha y ha sido estable los últimos años como se puede ver en la Tabla 2. El costo actual del ácido fosfórico varía entre \$795 US/t y \$850 US/t CIF.

Tabla 2 Importaciones de Ácido Fosfórico en el periodo 1997-2004

Importaciones de Ácido Fosfórico en kton de 1997 a 2004									
Posición arancelaria	Fuente	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
280920	A. Fosfórico	6073	3724	4033	2176	4158	13244	10198	13226

Fuente: DANE 2005

En la producción nacional de fertilizantes fosfatados el ácido fosfórico tiene solo el 0,5% de participación, la razón principal de esta baja producción es el estricto control de la dirección nacional de estupefacientes sobre las materias primas de este proceso.

2. Descripción de materias primas actuales y producto deseado.

Con el fin de hacer una comparación de procesos útil y compensada es necesario primero determinar las características del producto deseado y de la materia prima con la que cuenta Ingeminera LTDA. ya que la calidad, tipo de yacimiento y reservas son esenciales para elegir el método de producción apropiado, también se hace necesaria la información de posibles fuentes y costos de las materias primas que no son propias de la empresa.

Para la obtención de estos datos se recurre a los trabajos de caracterización y propuestas de explotación de Ingeominas como fuente principal de información del yacimiento encontrando teóricamente reservas superiores a los 50 millones de toneladas con una calidad promedio de 22,5% de P_2O_5 el cual está entre un máximo de 28,98 y un mínimo de 15% y variaciones considerables de calidades y

espesores entre mantos³. Estas características lo convierten en un yacimiento de baja calidad. El principal contaminante del yacimiento es el carbonato de calcio lo que indica que es un yacimiento calcáreo de origen sedimentario.

Adicional a la caracterización general del yacimiento de Ingeominas, Ingeminera LTDA ha desarrollado ensayos de caracterización a muestras de proyección con los siguientes resultados:

Tabla 3 Análisis Elemental de roca Fosfórica formación La Luna (Santander)

ELEMENTO	EXPRESION	RESULTADOS
Fosforo Total	P_2O_5	19,3 %
Fósforo Asimilable	P_2O_5	2,66 %
Calcio Total	CaO	40,6 %
Carbonatos	$CO_3 =$	13,8 %
Sílice Total	SiO_2	14,9 %
Flúor	F	1,97 %

Fuente: Laboratorio de análisis para insumos Agrícolas (AGRILAB)

El producto deseado es ácido orto fosfórico con un porcentaje de P_2O_5 entre 75 y 85, este producto se encuentra en el mercado a un costo de dos millones novecientos mil pesos por tonelada de P_2O_5 y el 99,5% del ácido es importado, el costo CIF del producto importado de China está en dos millones ciento cincuenta mil pesos⁴ por tonelada de P_2O_5 .

Los principales criterios de elección en la factibilidad preliminar son: las características y disponibilidad de las materias primas ya que cada proceso tiene exigencias en cuanto a calidad y composición, los costos de producción, la disponibilidad de la tecnología y la inversión fija.

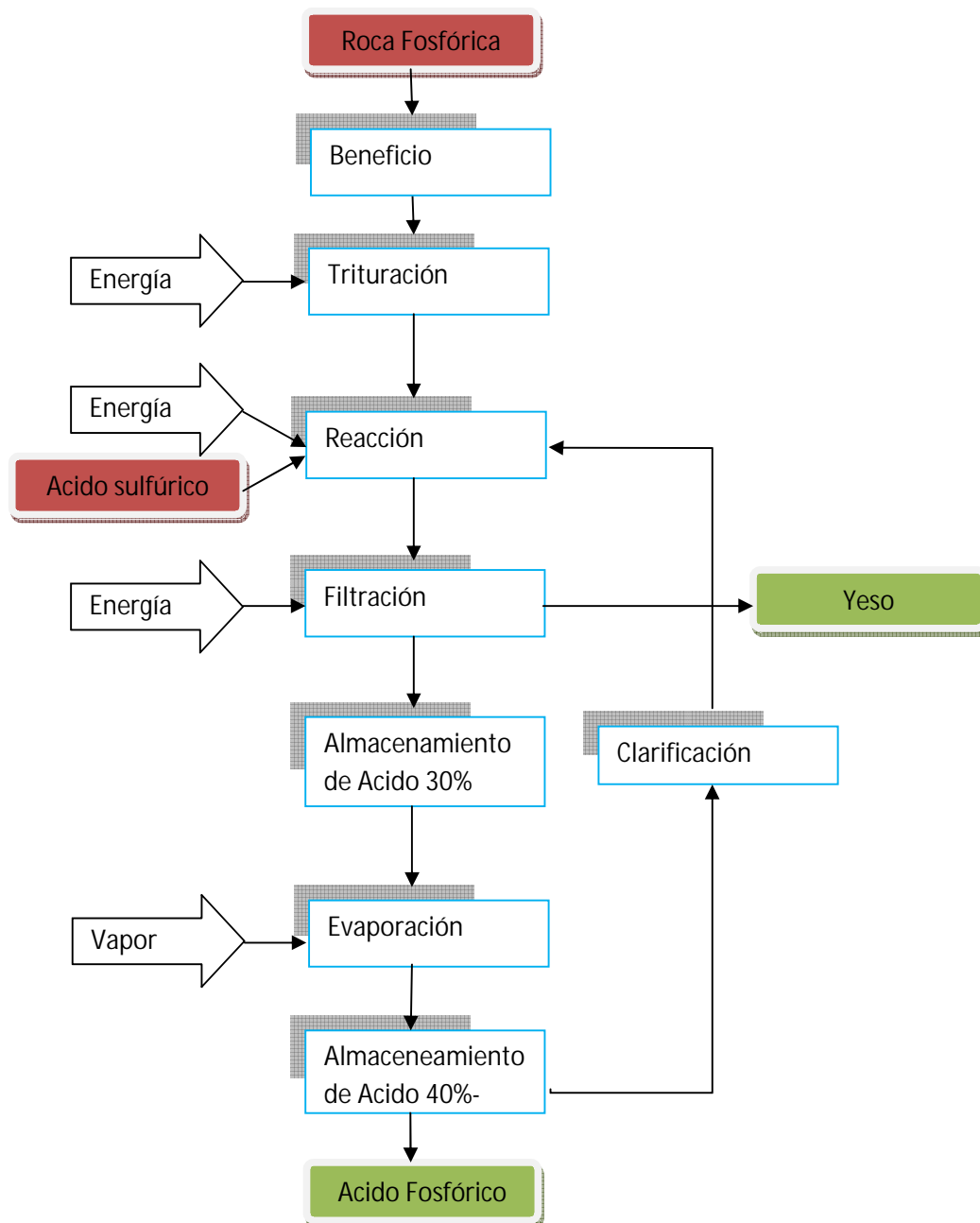
³ Mojica, Pedro E. Carta técnica #0010, "Roca fosfórica en el área de La Azufrada, El conchal, Santander", Bogotá, Julio (1969). P 13-18

⁴ Fuente de costos: Distribuidores nacionales de insumos Químicos.

2.1 Comparación entre los métodos de producción.

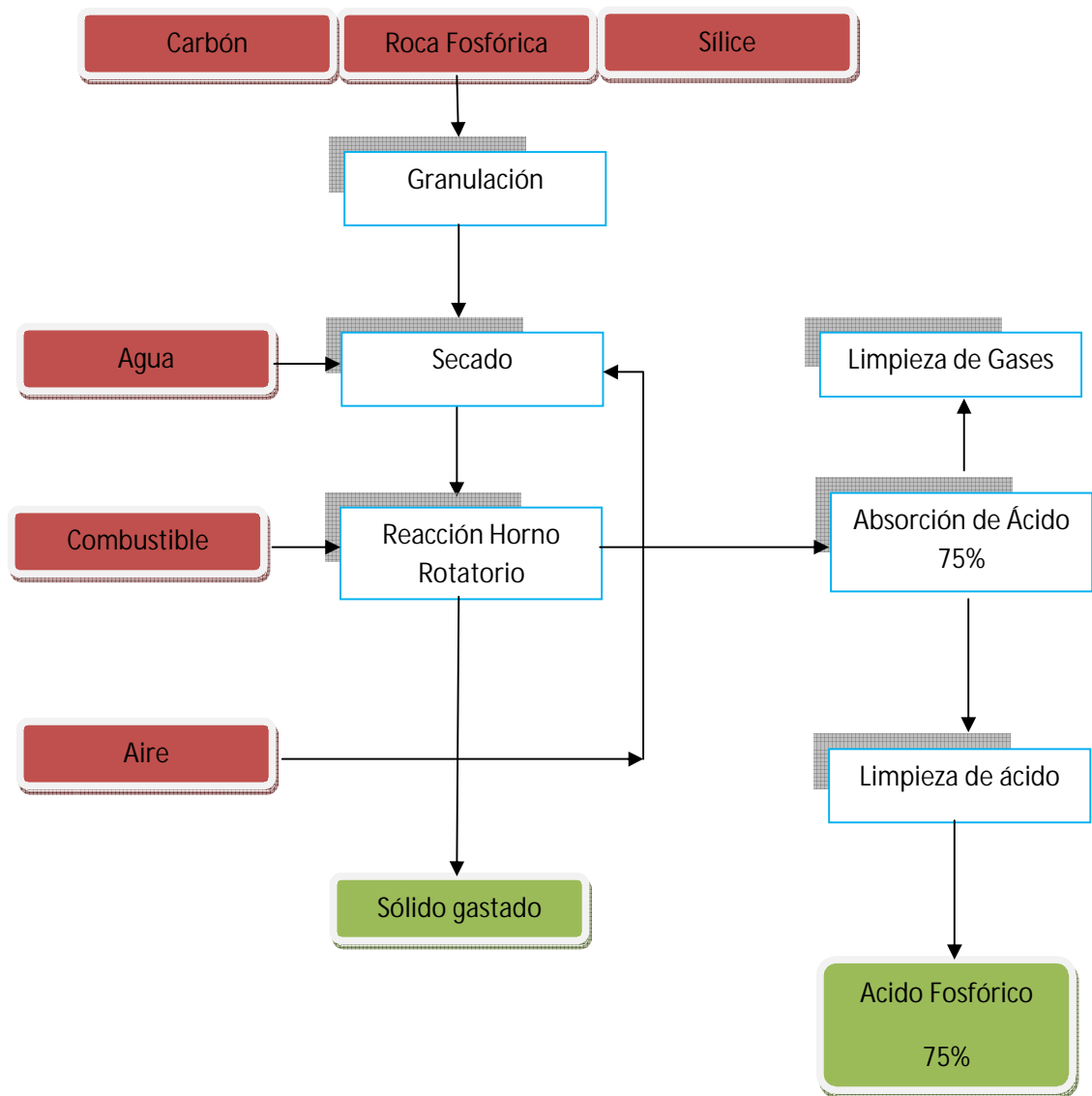
Los diagramas básicos de los dos procesos se presentan a continuación;

Diagrama 1. Diagrama de flujo producción de Ácido Fosfórico proceso Húmedo⁵



⁵ Morailon P, Gielly J.F., Bigot B. "Principles of Filter Design and Operation, in Phosphoric Acid, Vol. 1, Parte 1, Cap. 5. 1968

Diagrama 2. Diagrama de flujo producción de ácido fosfórico Proceso Térmico de Reducción y Oxidación de Fósforo⁶



En el proceso húmedo (diagrama 1) existen actualmente rutas con marcadas diferencias respecto a la cristalización del yeso, las etapas de filtración, la calidad del producto pero ya que la materia prima a utilizar es de calidad variable el diagrama que se presenta es útil para fines generales de comparación y la clarificación se necesita para obtener un ácido de 75% de P_2O_5 grado comercial.

⁶ Megy J.A. "A credible alternative to the WPA process". Fertilizer International. 2008, p 424-428.

Las materias primas para el proceso húmedo son Roca fosfórica beneficiada y ácido sulfúrico. En el contexto nacional el ácido sulfúrico es una sustancia controlada por la dirección nacional de estupefacientes la cual adjudica y regula los cupos y permisos de almacenamiento, producción y uso, su transporte también debe hacerse en vehículos autorizados lo cual incrementa el costo de este material, por ahora no será una limitante ya que es posible conseguirlo. La Roca Fosfórica necesita una etapa adicional de beneficio para lograr un incremento en su calidad y reducir el consumo de ácido sulfúrico, en un trabajo anterior J. Peñuela, et al. evalúan los métodos de concentración del pentóxido de fósforo de la roca perteneciente a la formación La Luna encontrando aplicación de los procesos posteriores a la reducción de tamaño (tamizado y clasificación por mallas) para concentrar un 23,18% entre las mallas 16 y 30 recuperando el 50% del material, sin resultados favorables para los procesos de flotación comúnmente usado lo que corrobora el origen del yacimiento, esta opción se vuelve poco atractiva al doblar los costos de explotación⁷ sin embargo es el único método aplicable demostrado en ese trabajo. Los equipos principales para el montaje de planta del método húmedo son: Molino, reactor o batería de reactores, filtro, evaporador y clarificador. Los subproductos del proceso son yeso contaminado sin valor comercial y ácido hidrofúosilícico. Las ventajas y desventajas del método se tabulan a continuación:

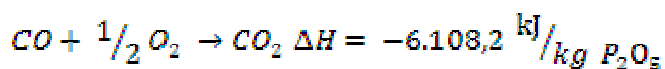
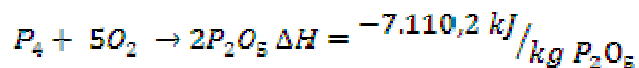
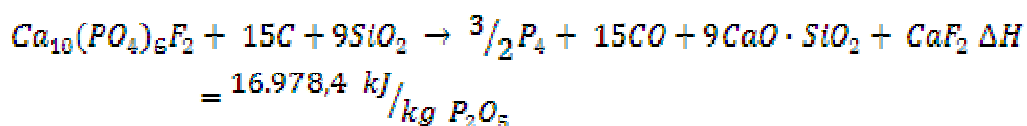
Tabla 4 Ventajas y Desventajas del proceso húmedo de producción de ácido Fosfórico

VENTAJAS	DESVANTAJAS
Diseño sencillo	Quedan en el ácido impurezas como Flúor y Aluminio.
Flexibilidad en la calidad de la roca	Produce acido con un % P ₂ O ₅ de 28 a 30.

⁷ Peñuela Janeth, Gaona Luz Estela, "Evaluación de métodos de concentración de Pentóxido de Fósforo a partir de roca fosfórica de la Azufrada (Santander). 2006.

Facilidad en operación y paro de planta	Usualmente se adiciona una etapa de concentración en la cual se usa vapor.
Los materiales de construcción son aceros inoxidables de baja denominación	Requiere etapa de molienda entre 100 y 200 mallas.
Permite trabajar con roca húmeda	Requiere clarificación para producción de ácido grado comercial.
Tiene una sola etapa de filtración	
Eficiencia del orden de 95%.	

En el método KPA (diagrama 2) se realiza inicialmente una mezcla de las materias primas (roca fosfórica, arcilla y carbón), esta mezcla tiene tres objetivos, el primero es lograr un contacto íntimo entre la roca y el carbón para el proceso de reducción, el segundo es bajar la relación $\frac{CaO}{SiO_2}$ de la mezcla por debajo de 1 con el fin de evitar la fusión del material que impediría la reducción del fósforo y tercero la arcilla también cumple la función de aglomerante para los pellets que se fabrican, estos pellets entran a un horno rotatorio donde ocurren dos reacciones principales con el fósforo y el carbón, la primera reducción a CO y P_4 y la segunda Oxidación representadas por las siguientes reacciones químicas⁸:



⁸ Lapple W.C. "Recovery of Phosphorus values and cement clinker from a phosphatic ore". Pat # 3,235,330. 1966.

La información termodinámica fue calculada a partir de los calores de formación de las tablas JANAF⁹, la reducción del mineral es una reacción endotérmica y la oxidación es exotérmica, para mantener la reacción es necesario el uso de un quemador que permita adicionar al sistema la energía que se pierde con el sólido caliente, la que se pierde por radiación de los equipos y en los gases de la oxidación. Los equipos principales usados en este método son: molino, granulador, secador, horno rotatorio y quemador, enfriador, sistema de absorción del ácido. Los subproductos del proceso son sólidos gastados inertes catalogados como residuo no peligroso útiles como agregado para concretos y ácido hidrofúosilícico. A continuación se presentan las ventajas y desventajas del método:

Tabla 5 Ventajas y Desventajas del proceso térmico de reducción y oxidación del fósforo.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Produce ácido fuerte directamente % P₂O₅ de 75 %	Requiere compra de equipo para control de gases de combustión.
El ácido producido es bajo en F, Al y SO₄	Tecnología insipiente sin pruebas industriales, escala piloto.
Alta tolerancia a impurezas y calidad de la roca	Uso de equipos con alta inversión fija y costo de mantenimiento debido al desgaste por altas temperaturas.
Reduce el impacto ambiental del Fosfo-yeso ya que el desecho sólido es inerte y útil como agregado	Riesgo de fusión de la roca y encapsulamiento del fósforo.
Proceso seco que no produce contaminación de suelos y/o aguas	Es necesario acondicionar la relación Calcio sílice para evitar formación de anillos y fusión de nódulos

⁹ M.W. Chase Jr. "JANAF thermodynamical tables", 3rd edition. J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol 14, Suppl.1, 1985

Permite el uso de carbón con alto contenido de Azufre ya que lo encapsula.

La mayor parte de la energía necesaria para la reducción es suministrada por la oxidación del fósforo y el monóxido de carbono

Los dos procesos permiten el uso de la materia prima con la que cuenta la empresa y trabajan con equipos de diseño convencional, así que se debe evaluar la relación de costos de producción de los procesos para determinar un criterio que permita la elección de un proceso de producción de ácido fosfórico.

Nuevamente la base de cálculo para el consumo de materiales es el procesamiento de un kilogramo de P_2O_5 . Los costos de materias primas se van a discriminar por proceso de la información recopilada.

Siendo la explotación de minas y el transporte la actividad económica actual de Ingeminera LTDA y conociendo la distancia de transporte se toma la información reportada por la empresa. El costo del ácido sulfúrico lo reporto Ecopetrol con el precio más bajo del mercado nacional, para los costos de producción se usan datos de producción americanos asumiendo una tasa de cambio de \$2.000/dólar, este costo de producción incluye la concentración del ácido de 26% P_2O_5 a ácido del 75 % P_2O_5 .

Tabla 6 Costos de Materias primas Proceso Húmedo

Materia prima	Pesos/kg	kg/kg P_2O_5	Pesos/kg P_2O_5
Roca Explotada	\$ 35	4,44	\$ 222,22
Transporte	\$ 15		
Roca beneficiada	\$ 65	4	\$ 260.00

Acido Sulfúrico	\$ 343,36	2,736	\$ 1.128,13
Transporte	\$ 80		
Costo de producción¹⁰			\$ 204,00
Total			\$ 1.592,13

Fuentes: Ingeminera LTDA, Ecopetrol, TFI¹⁰

En el proceso KPA la arcilla se obtiene del yacimiento de roca fosfórica para una relación roca/arcilla de 1,08 suficiente para la reacción y para bajar la relación CaO/SiO_2 a 1, el carbón es coque de Cúcuta con alto contenido de azufre y 85% de carbono fijo.

Tabla 7 Costos de Materias primas Proceso KPA

Materia Prima	Pesos/kg	kg/kg P_2O_5	Pesos/kg P_2O_5
Roca explotada	\$ 35	4,44	\$ 222,22
Transporte	\$ 15		
Arcilla Explotada	\$ 35	4,08	\$ 204,08
Transporte	\$ 15		
Carbón	\$ 90	0,689	\$ 89,57
Transporte	\$ 40		
Costo de Producción			\$ 108
Total			\$ 623,87

Fuentes: Ingeminera LTDA, Asocarbón, Megy⁴

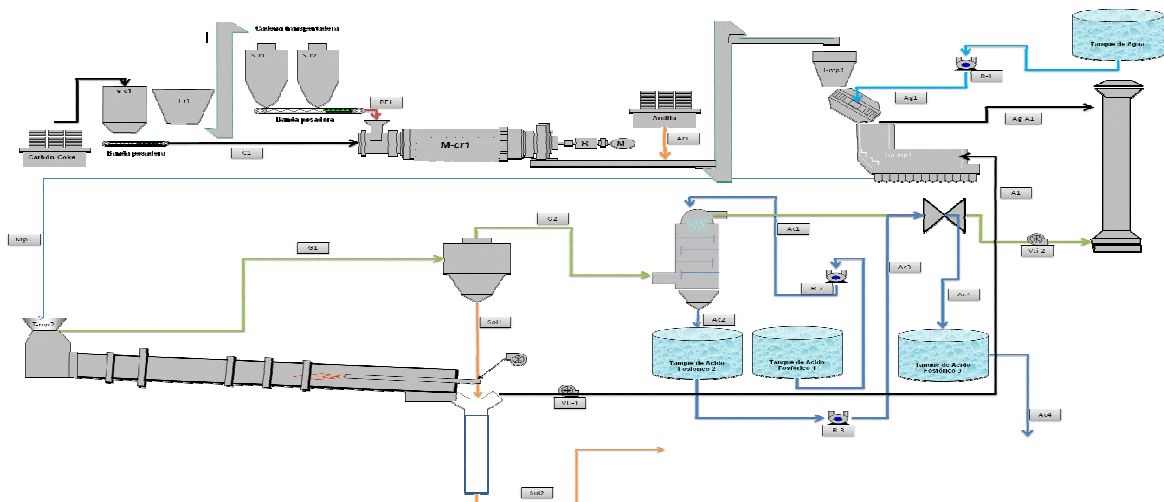
Es evidente la ventaja en costos que presenta el método de producción KPA obteniendo la misma producción con un 39,18% del costo del proceso húmedo, esta diferencia entre los dos métodos se reducirá a nivel nacional en la medida que el costo del ácido sulfúrico se regule y logre estar cercano al costo presente en países desarrollados donde la tonelada está en el orden de los 25 dólares. Así el método planteado a la empresa es el método de producción por reducción del fósforo en horno rotatorio con posterior oxidación.

¹⁰ Technology forecaster inc. "Study for phosphoric acid" 2003.

3. Elección de equipos y descripción del proceso seleccionado.

Para el proceso de producción por el método KPA los principales equipos son: un horno rotatorio en el cual se desarrolla la reacción de reducción y posterior oxidación del fósforo, los equipos de preparación del mineral para la entrada al horno entre los cuales se encuentran molinos, aglomerador, secador y equipo de transporte; y el equipo posterior al horno donde se hidratan los gases, se recupera el ácido fosfórico y se tratan los gases de desecho para ser emitidos al ambiente. El diagrama de equipos del proceso se presenta a continuación:

Ilustración 1 Diagrama de Equipos planta de producción de Ácido Fosfórico (Fuente: Elaboración propia a partir de Megy, 2008)



En el proceso anterior las materias primas se reciben con una granulometría adecuada para ingresar al proceso, primero se integran el carbón y la roca mediante la molienda. Este proceso es muy importante ya que la reducción exitosa depende de la integración del mineral y el carbón, posteriormente se añade la arcilla cumpliendo con una relación másica 1:1 de CaO/SiO_2 y la materia prima entra a un aglomerador de bandeja en el cual se forman los pellets mediante la adición de agua. Estos pellets se secan por acción del aire caliente con el que se enfría el producto sólido del horno. Los pellets se alimentan al horno precalentados con los gases de combustión; en el horno se llevan a cabo las reacciones de reducción y de oxidación y los gases abandonan el equipo a una

temperatura aproximada de 1100 C los gases son extraídos por medio de tiro forzado ejercido por un ventilador el cual dirige los gases a un ciclón en el cual se recuperan los sólidos, posteriormente pasan a una torre de acondicionamiento donde se reduce la temperatura de los gases y se recupera el 50% de fósforo por acción de agua y ácido fosfórico concentrado, los gases que abandonan la torre son tratados nuevamente en un venturi con el ácido fosfórico recuperado en la etapa anterior.

4. Balances para el proceso KPA.

El uso del horno rotatorio como reactor en este proceso se debe a la necesidad de un equipo eficiente respecto a la transferencia de energía pero que sea poco eficaz para la transferencia de masa, con el fin de que los gases que permiten la reducción permanezcan separados de los gases de oxidación.

Las reacciones fundamentales del proceso son la reducción del aglomerado de roca, arcilla y carbón; la oxidación de estos gases y la combustión que rige el arranque del horno y funciona como piloto para mantener la temperatura en el equipo.

Para los balances se hace necesario caracterizar la arcilla y el carbón disponible para ser usado en el proceso, estos análisis se desarrollaron con el apoyo de laboratorios externos con los siguientes resultados:

Tabla 8 Caracterización de Arcilla, muestra de la Mina de Roca Fosfórica.

ELEMENTO	EXPRESIÓN	RESULTADOS
Calcio Total	CaO	18,6 %
Sílice Total	SiO_2	51,9 %
Flúor	F	0,9 %

Fuente: Laboratorio de análisis para insumos Agrícolas (AGRILAB)

Tabla 9 Caracterización de carbón de Cúcuta Análisis Ultimo.

ELEMENTO	EXPRESIÓN	RESULTADOS
Carbono	C	84,64 %
Hidrogeno	H ₂	3,4 %
Nitrógeno	N ₂	1,67%
Cenizas	Cenizas	5,09%
Azufre	S ₂	1,07%
Oxígeno	O ₂	6,52%
Pci	kcal/kg	7170

Fuente: Laboratorio mineral SGS Colombia S.A.

4.1 Balance de Materia.

Para la aglomeración de la mezcla en la bandeja rotatoria se utiliza agua como aglutinante. El agua adicionada a la mezcla equivale a un 8% másico razón por la cual es necesario secar el material. Esta determinación se realizó en el laboratorio obteniendo pellets de $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro, con una resistencia promedio en verde de 10,8 lb/in² suficiente para el transporte y fuerzas iniciales en el horno. La densidad de este material es de 2 g/cm².

El horno propuesto tiene un grado de llenado entre 12 y 15%, este porcentaje es alto para la industria cementera y de cal pero en un horno para reducción es normal trabajar con altos grados de llenado, como ejemplo de este caso es posible citar el horno reductor de Tinfos Titan en Noruega que procesa ilmenita y trabaja con un grado de llenado de 15%¹¹. Las dimensiones para cumplir con este grado de llenado son:

¹¹ Mu, Jacob, et al. "Reduction of phosphate Ores by Carbon: Part I. Process Variables for design of Rotary Kiln System" Metallurgical Transactions B. Vol 17B, Dec. 1986 p. 861-868

Tabla 10 Dimensiones Horno Rotatorio

Dimensiones Horno Rotatorio	
Diámetro Útil (m)	1,3
Longitud (m)	16,25
% Llenado	13,09
Inclinación	4%
Tiempo de residencia (h)	1,5

Ilustración 2 Determinación de características físicas del material aglutinado



Ya que el producto deseado es ácido fosfórico con un 75% de P_2O_5 el balance global de materia por unidad de producto de los materiales presentados es:

Tabla 11 Corrientes globales del proceso

Reactivos	Unidades de masa/Unidad de Ácido	Productos	Unidades de masa/Unidad de Ácido
Roca Fosfórica	3,5	P_2O_5	0,75
Carbón	0,53	CaO*SiO ₂	1,86
Arcilla	1,14	Dióxido de Carbono	1,16
Oxígeno	1,01	Fluoruro de Calcio	0,14
Aire	4,38	Nitrógeno	3,37
Nitrógeno	3,37	Total sólidos gastados	4,11

Agua	0,13		
-------------	------	--	--

Adicional a las reacciones principales usadas en los balances anteriores también se presentan reacciones secundarias de los contaminantes presentes en la roca, en la arcilla y en el carbón, pero en esta etapa del proyecto no se tienen en cuenta, estas reacciones están determinadas y su influencia ha sido estudiada y reportada por Megy¹².

4.2 Balance de energía

El balance de energía se desarrolla con las pérdidas de energía básicas de un horno rotatorio para la producción de cemento con las dimensiones del piloto. Para este balance se consideran como combustibles aportantes de energía el fosforo y el monóxido de carbono que se queman en el horno y el coque que mantiene temperatura y entra por el quemador, los aportes de energía porcentuales de cada combustible son 22% coque en quemador, 36% oxidación de CO y 42% oxidación del fósforo. Los aspectos más importantes del balance se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 12 Resumen balance de energía proceso KPA

Concepto	Cantidad	Unidades
Energía de reacción	2853,48	kJ/kg solido gastado
Perdidas de energía en los sólidos en la salida del horno	37,65	kJ/kg solido gastado
Perdidas por radiación y convección de los ductos con gases oxidados	66,94	kJ/kg solido gastado
Perdidas por radiación y convección del casco del horno	422,58	kJ/kg solido gastado
Perdidas de energía en los gases oxidados	251,03	kJ/kg solido gastado

¹² Megy, Joseph A. KPA Process, Rev. Soc. Quim. Mex. Vol. 27 No 3 Mayo-Junio 1983.

El balance de energía arroja que para mantener las condiciones térmicas del sistema es necesario incrementar el coque que ingresa al proceso por el quemador o adicionarlo en la cama de material para asegurar la atmosfera reductora y que la reacción de oxidación en la superficie de contacto se lleve a cabo con este carbón y no con el que hace parte de los pellets. El carbón adicional es de 0,026 kg Coque/kg solido gastado.

El refractario a utilizar en un horno comercial para procesos de reducción es el mismo usado en la producción de vidrio, diferente a otros por su alto contenido de Zirconio y Sílice o también es posible utilizar refractario con composiciones diferentes de la mezcla sílice-mulita según el rango de temperatura.

4.3 Balance económico

Para los cálculos económicos se hacen las siguientes suposiciones: la producción del primer año es del 55%, la del segundo año del 70% y la del tercer año del 80% de la capacidad máxima de producción, en adelante se tiene un 100% de producción. El precio de venta es de USD 700/ton de ácido. El préstamo bancario tiene un año de gracia para amortización de la deuda. Los costos directos e indirectos que no se conocen se calculan con factores de la tabla de costos estimados para plantas químicas según Peters and Timmerhaus¹³. Los costos de equipos instalados se toman del reporte final de estimación de costo de equipos del centro nacional de tecnología energética de 1998¹⁴ para la actualización del costo se usan los índices de Marshall & Swift¹⁵. Se calcularon los costos de producción de acuerdo al método de cálculo expuesto por Vatauvuk William¹⁶. Los servicios públicos y salarios se toman de datos actuales colombianos¹⁷. A continuación se presenta el resumen general y discriminado de costos así como las tablas de proyección de ingresos a 15 años.

¹³ PETERS & TIMMERHAUSS. Plant design and economics for chemical engineering. McGraw-Hill. 4a ed. 1991.

¹⁴ Loh H.P., Lyons Jennifer, "Process equipment cost estimation Final Report". National Energy Technology center, Jan. 2002.

¹⁵ Marshall & Swift equipment cost index. Chemical Engineering. Economic Indicators. March 2009. P 64

¹⁶ Vatauvuk, William M. "How to Estimate Operating Costs". Chemical Engineering. July 2005. P: 33-37

¹⁷ Proexport Colombia. www.inviertaencolombia.com.co

Tabla 11 Tablas de costos USD.

Costo de mano de Obra (CL)	\$ 194.483.520,00		
Costos de supervisión (CSL)	\$ 29.172.528,00		
Costos de mantenimiento y materiales (CM)	\$ 51.381.150,00		
Aportes y Adicionales (CO)	\$ 74.803.986,90		
Costo de materia prima (CRMi)	\$ 2.439.072.700,00		
Servicios (Cui)	\$ 311.334.000,00		
Costos de Laboratorio (Clab)	\$ 29.172.528,00		
TOTAL COSTOS OPERATIVOS	\$ 3.129.420.412,90		
TOTAL COSTOS OPERATIVOS EN DOLARES	\$ 1.564.710,21		
Costos Directos	\$ 2.662.225,07		
Costo de equipos Instalados	\$ 1.284.528,75		
Obras civiles	\$ 321.132,19		
Instrumentación	\$ 192.679,31		
Aislamiento	\$ 67.476,99		
Pinturas y terminaciones	\$ 25.690,58		
Instalación eléctrica	\$ 128.452,88		
Instalaciones Auxiliares	\$ 385.358,63		
Edificios, servicios y otros	\$ 256.905,75		
Costos Indirectos	\$ 1.252.623,00		
Terreno	\$ 225.000,00		
Ingeniería	\$ 321.132,19		
Contingencias	\$ 449.585,06		
Construcción	\$ 256.905,75		
TOTAL	\$ 3.914.848,07		
Costos Directos	\$ 2.662.225,07		
Costos Indirectos	\$ 1.252.623,00		
Total inversión fija	\$ 3.914.848,07		
Capital de Trabajo	\$ 1.564.710,21		
Depreciación a 15 años activo inmov	\$ 138.945,81		
Depreciación edificaciones 25 años	\$ 23.121,52		
Total depreciación Anual	\$ 162.067,33		
Costo unitario del producto USD/ton P2O5	\$ 480,76		

Los costos de movimiento de materiales, terrenos y referentes a la explotación de la mina fueron suministrados por Ingeminera LTDA.

Tabla 12 Proyección de Ingresos a 15 años

año	ventas	Costo operación	Bancos	Utilidad bruta	Impuesto	Utilidad neta
0	0		\$ 780.042	-\$ 780.042		-\$ 780.042
1	\$ 1.694.000	\$ 782.355	\$ 780.042	\$ 131.603	\$ 6.580	\$ 125.023
2	\$ 2.156.000	\$ 1.095.297	\$ 780.042	\$ 280.661	\$ 14.033	\$ 266.628
3	\$ 2.464.000	\$ 1.564.710	\$ 780.042	\$ 119.248	\$ 5.962	\$ 113.286
4	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	\$ 780.042	\$ 735.248	\$ 36.762	\$ 698.486
5	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	\$ 780.042	\$ 735.248	\$ 36.762	\$ 698.486
6	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	\$ 780.042	\$ 735.248	\$ 36.762	\$ 698.486
7	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	\$ 780.042	\$ 735.248	\$ 36.762	\$ 698.486
8	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	\$ 780.042	\$ 735.248	\$ 36.762	\$ 698.486
9	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	\$ 780.042	\$ 735.248	\$ 36.762	\$ 698.486
10	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	0	\$ 1.515.290	\$ 75.764	\$ 1.439.525
11	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	0	\$ 1.515.290	\$ 75.764	\$ 1.439.525
12	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	0	\$ 1.515.290	\$ 75.764	\$ 1.439.525
13	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	0	\$ 1.515.290	\$ 75.764	\$ 1.439.525
14	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	0	\$ 1.515.290	\$ 75.764	\$ 1.439.525
15	\$ 3.080.000	\$ 1.564.710	0	\$ 1.515.290	\$ 75.764	\$ 1.439.525
				tir		45,9149%
				VPN		\$ 4.166.847,43

Se obtuvo un saldo negativo para el primer año que corresponde al montaje de la planta. Teniendo en cuenta estimativos de aumento de producción, costos totales e impuestos se calculó un ingreso positivo para el primer año de funcionamiento de la planta con una Tasa interna de retorno de 45,9% lo cual califica este

proyecto como viable preliminarmente. Sin embargo se requieren estudios más detallados para evaluar la factibilidad del montaje de esta planta ajustando costos de equipos, instalaciones y materias primas, entre otros.

CONCLUSIONES

- El proceso KPA es la opción adecuada para la utilización del yacimiento de Ingeminera LTDA. donde la calidad no supera el 30% de P_2O_5 .
- La proyección de flujo de caja estimada para la planta reportó utilidades a partir del primer año de funcionamiento calificando este proyecto como viable preliminarmente.
- El estudio del mercado colombiano mostró que el volumen de las importaciones de ácido fosfórico en los sectores agropecuarios y alimenticios justifican la instalación de plantas productoras de esta sustancia en el país.

RECOMENDACIONES

- Validación de la información bibliográfica sobre el método de producción KPA experimentalmente con el fin de determinar eficiencia de extracción y variables de proceso con uso de materias primas nacionales.
- Convocar por medio de los ministerios y asociaciones a los posibles actores de la cadena productiva de las rocas fosfóricas, los fertilizantes y los alimentos animales con el fin de impulsar acciones para superar las barreras que en la actualidad dificultan iniciativas de producción de materias primas esenciales para el desarrollo nacional como son el ácido sulfúrico y el ácido fosfórico.

BIBLIOGRAFÍA

1. MEGY, Joseph. Process for reducing phosphate ore. En United States Patent. No. 4.351.809, (Sep/1982); 12 p.
2. UNION TEMPORAL GI GEORECURSOS. Análisis de la estructura productiva y mercados de la roca fosfórica en Colombia, Informe Final Bogotá, 2005. 127 p.
3. MOJICA, Pedro. Roca fosfórica en el área de La Azufrada, El Conchal, Santander. En Carta técnica Ingeominas. No 0010, (Jul/1969). Bogota. 48 p.
4. MORALION, P Gielly, et al. Principles of filter design and Operation in phosphoric acid. New York: Collier-Macmillan. 1968. 253 p.
5. MEGY, Joseph. A credible alternative to de WPA process. En: Fertilizers International. Vol 424, (May-Jun/2008); p 81-85
6. PEÑUELA ARDILA, Janeth y GAONA, Luz Stella. Evaluación de métodos de concentración de pentóxido de fósforo a partir de roca fosfórica de la azufrada (Santander). Bucaramanga, 2006, 59 h. Trabajo de grado (ingeniera Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Disponible en el catalogo en línea de la Universidad Industrial de Santander: <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/index.jsp>
7. LAPPLE, W.C. Recovery of phosphorus values and cement clinker from a phosphatic ore. En United States Patent. No. 3.235.330, (Feb/1966); 16 p.
8. CHASE Jr, M.W. JANAF thermodynamical tables: 3rd edition. En J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol 14, Suppl. 1, (Mar/1985); 1856 p
9. TECHNOLOGY FORECASTER INC. Strategic environmental and Manufacturing consulting, Study for phosphoric acid. Del Technology Forecaster INC. USA, 2003. 16 p.

10. MU, Jacob. Et al. Reduction of phosphate ores by carbon: Part I. Process Variables for design of rotary kiln system. En Metallurgical transactions B. Vol 17B, (Dec/1986).
11. MEGY, Joseph A. KPA process. En Revista de la Sociedad Química Mexicana. Vol. 27 No 3, (Mar/1983).
12. PETERS, Max Stone y TIMMERHAUS, Klaus D. Plant design and economics for chemical engineering. McGraw Hill, 1991. 4a Ed.
13. LOH, H.P. y LYONS Jennifer. Process equipment cost estimation Final Report. Para National Energy Technology center. (Ene/2002). 80 p.
14. MARSHALL & SWIFT equipment cost index. Chemical engineering. Economic Indicators en Chemical engineering. Vol 116, No. 3 (Mar/2009) <www.che.com>.
15. VATAVUC, William. How to estimate operating costs. En Chemical engineering. Vol. 112 No 7 (Jul/2005). P 33-37. <www.che.com>.
16. Proexport Colombia. Indicadores sector productivo (en línea) <www.inviertaencolombia.com.co> [citado en 12 de Abril de 2009]
17. DA SILVA, Gil Anderi. Environmental performance comparison of wet and thermal routes for phosphate fertilizer production: a Brazilian experience. En Journal of clear production. Vol 13 (Jul/2005). P 1321-1325.
18. HIGNET, T.P, et al. Recovery of fluorine from stack gases. En Industrial and engineering chemistry. Vol 41, No 11, (Nov/1949). P 2943-2498.
19. NEGM, A.A. et al. Utilization of solid waste from phosphate processing plant. En Physicochemical Problems of Mineral Processing. Vol. 42, (Jul/2008).
20. SWAN, Theodore. Manufacture of the electric furnace by the condensation and electric precipitation method. En The journal of industrial and engineering chemistry. Vol. 14. No 7. (Jun/1922).
21. WAGGAMAN, William. Comparison of sulfuric acid and thermal reduction processing. En Industrial and engineering chemistry. Vol. 42, (Feb/1948).

22. WAGGAMAN, William. Manufacture of phosphoric acid by the volatilization process, some technical problems. En Industrial and engineering chemistry. Vol. 16, (Mar/1944). P 176-179