

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Química y Manufacturera



**“DESARROLLO DE PROCESOS DE OBTENCION
DEL ACIDO FOSFORICO GRADO FERTILIZANTE
A NIVEL DE LABORATORIO Y DISEÑO DE
PLANTA PILOTO”**

**Tesis para optar el Título Profesional de:
INGENIERO QUIMICO**

Mario Ismael Grados Bermitt

Dante Porfirio Gonzales Pisfil

PROMOCION 87 - 2

LIMA — PERU

1989

A mis padres y a mi abuelo;
en especial a mi madre por su
entereza en los momentos más
difíciles y por todos los
sacrificios que hizo por mí.

MARIO ISMAEL GRADOS BERMITT

A mis padres. Martín y María,
por los sacrificios hechos
por mí y a mis hermanos por
su constante apoyo.

DANTE PORFIRIO GONZALES PISFIL

A G R A D E C I M I E N T O

Queremos expresar nuestro mayor agradecimiento a todas las personas e instituciones que con su ayuda han hecho posible la realización del presente trabajo.

Nuestro más sincero agradecimiento a los ingenieros HUGO BARREZUETA OSCAR BERNUY, ALEJANDRO SILVA igualmente al señor WILVER MONTEAGUDO, que sin su ayuda no hubieramos podido culminar nuestra obra.

El más profundo agradecimiento a los profesores de nuestra facultad que nos brindaron su apoyo, en especial a la ingeniero EUGENIA MEDICO BAO por su constante estímulo , a la ingeniero AZUCENA GUERRERO por su ayuda incondicional y también al personal del laboratorio de Fisico Química.

I N D I C E

INTRODUCCION (1)

RESUMEN Y CONCLUSIONES (3)

I FERTILIZANTES Y SU USO EN EL PERU

1.0 INTRODUCCION (10)

1.1 TIPOS DE SUELOS EN EL PERU (11)

1.1.1 FERTILIDAD DE LOS SUELOS EN EL PERU (11)

1.2 NECESIDAD DE LOS FERTILIZANTES EN EL PERU (13)

1.3 TIPOS DE FERTILIZANTES USADOS EN EL PERU (14)

1.4 PROCEDENCIA DE LOS FERTILIZANTES USADOS EN EL PERU (15)

1.5 DEMANDA ACTUAL Y PROYECCIONES SOBRE FERTILIZANTES (19)

1.5.1 PROYECTOS NACIONALES SOBRE FERTILIZANTES (21)

1.5.2 PROYECCIONES DE PRODUCCION NACIONAL, IMPORTACION
Y CONSUMO DE FERTILIZANTES. (22)

1.6 EL SUPERFOSFATO TRIPLE COMO FERTILIZANTE (24)

II ACIDO FOSFORICO GRADO FERTILIZANTE (A.F.G.F.)

2.0 INTRODUCCION (28)

2.1 METODOS DE MANUFACTURA (31)

2.1.1 METODO DE REDUCCION TERMICA (31)

2.1.2 METODO DE LA VIA HUMEDA (32)

2.1.2.1 VIA SULFURICA ALTERNATIVA PERUANA (33)

2.1.2.2 PROCESOS DE LA VIA SULFURICA (36)

2.1.2.3 REACCIONES DE LA VIA SULFURICA (39)

2.1.2.4 RELACION ROCA/ACIDO EN EL VIA SULFURICA (39)

2.1.2.5 EL CRISTAL DE SULFATO EN LA FILTRACION (40)

2.1.2.6 PROCESO DIHIDRATADO FRENTE A OTROS PROCESOS (42)

2.2 ACIDO FOSFORICO COMO INSUMO PARA EL SFT (43)

- 2.3 PRODUCCION DE ACIDO FOSFORICO (44)
- 2.4 CARACTERISTICA DEL MERCADO DEL ACIDO FOSFORICO (46)
- 2.5 ESPECIFICACION DEL A.F.G.F. (47)

III MATERIAS PRIMAS PARA OBTENER A.F.G.F. EN EL PERU

- 3.0 INTRODUCCION (48)
- 3.1 ROCA FOSFORICA O FOSFORITA (48)
 - 3.1.1 YACIMIENTOS EN EL PERU (49)
 - 3.1.2 UBICACION Y GEOLOGIA DE LOS YACIMIENTOS DE BAYOVAR (50)
 - 3.1.3 RESERVAS GEOLOGICAS (53)
 - 3.1.4 TRATAMIENTO DEL MINERAL (54)
 - 3.1.5 PRODUCCION EN BAYOVAR (56)
- 3.2 ACIDO SULFURICO (57)
 - 3.2.1 NORMAS TECNICAS (58)

IV ESTUDIO EXPERIMENTAL

- 4.0 GENERALIDADES (60)
- 4.1 ESTUDIO DE LA MATERIA PRIMA (60)
 - 4.1.1 ROCA FOSFORICA (60)
 - 4.1.2 ACIDO SULFURICO (63)
- 4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL (64)
 - 4.2.1 EQUIPOS USADOS EN LABORATORIO (64)
 - 4.2.2 ANALISIS DE P2O5 (65)
 - 4.2.3 PRIMERA PARTE EXPERIMENTAL (65)
 - 4.2.4 SEGUNDA PARTE EXPERIMENTAL (70)
 - 4.2.5 DEFINICION DEL PROCESO Y DESCRIPCION (72)
- 4.3 EFECTOS DE VARIABLES EN EL PROCESO SELECCIONADO (75)
 - 4.3.1 EFECTOS DE TEMPERATURA (77)
 - 4.3.2 EFECTOS DE TIEMPO (80)
 - 4.3.2.1 TIEMPOS EN LA ETAPA DE REACCION (81)

- 4.3.2.2 TIEMPOS EN LA ETAPA DE FORMACION DE CRISTALES (85)
- 4.3.3 EFECTOS DE CANTIDAD DE REACTANTES (88)
 - 4.3.3.1 CANTIDAD DE RECICLO ALTO (89)
 - 4.3.3.2 CANTIDAD DE SULFURICO (92)
- 4.4 ESCALAMIENTO (94)
 - 4.4.1 PRIMERA ENSAYO (95)
 - 4.4.2 SEGUNDA ENSAYO (96)
- 4.5 PRUEBAS DE EVAPORACION (97)
- 4.6 PRODUCTO Y SUBPRODUCTO DEL PROCESO (101)
- 4.7 CONCLUSIONES (103)

V DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO PARA OBTENER A.F.G.F.

- 5.1 TECNOLOGIA (106)
- 5.2 INGENIERIA (109)
 - 5.2.1 SELECCION DE TAMANO (109)
 - 5.2.2 SECCIONES DE LA PLANTA (109)
 - 5.2.2.1 SECCION REACCION - FILTRACION (111)
 - 5.2.2.2 SECCION EVAPORACION (112)
 - 5.2.3 DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE LA PLANTA PILOTO (112)
 - 5.2.4 REQUERIMIENTO DE AREA (128)
 - 5.2.5 ESTIMACION DEL COSTO DE LA PLANTA PILOTO (128)

ANEXOS

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.

I N T R O D U C C I O N

El presente trabajo está orientado a desarrollar un proceso, a nivel de laboratorio, para obtener ácido fosfórico grado fertilizante, haciendo reaccionar roca fosfórica con ácido sulfúrico industrial.

La materia prima principal es el concentrado de roca fosfórica de Bayovar cuyo contenido de fósforo es de 30% en peso como P_2O_5 . Esta roca presenta una granulometría adecuada para ser utilizada sin molienda adicional. La actual cantidad de mineral que existe en Bayovar es suficiente para abastecer al mundo por espacio de 30 años. El ácido que se utiliza en la reacción puede ser cualquier ácido mineral fuerte, y de todos ellos el más adecuado es el ácido sulfúrico porque forma el sulfato de calcio que es una sal insoluble y puede separarse del ácido fosfórico producido mediante filtración, esto no se logra con los otros ácidos ya que forman sales solubles y su separación del ácido fosfórico no es sencilla.

El ácido fosfórico obtenido, es de gran importancia para la industria de fertilizantes y abonos, productos que tienen una gran demanda en nuestros días, además cuando dicho ácido es purificado puede usarse en otro tipo de industrias como las de bebidas, alimentos balanceados, y también puede ser usado para el control de la corrosión.

De todos los fertilizantes utilizados en el Perú, los fertilizantes fosfatados son los que aseguran el mejor

enraizamiento y el mayor crecimiento de las plantas y sus frutos. De estos fertilizantes, el más usado es el superfosfato triple, cuya manufactura solo requiere de ácido fosfórico grado fertilizante y roca fosfórica, fertilizante cuya demanda esta totalmente cubierta por la importación. De las tres regiones del Perú, la sierra y la selva son las regiones que necesitan la mayor cantidad de fertilizantes para mejorar su pobre contenido de nutrientes y elevar la productividad de sus suelos.

Actualmente en el país no se produce ácido fosfórico grado fertilizante a pesar de que existen las materias primas en grandes cantidades para su manufactura, esto ocurre porque se ha sostenido que es difícil extraer el fósforo de la roca fosfórica peruana, por lo que se entiende que la recuperación de fósforo es baja. Si se lograra la producción de ácido fosfórico podría elaborarse el superfosfato triple y el superfosfato diamónico, fertilizantes que en la actualidad están siendo importados en grandes volúmenes.

En vista de que el Perú, por diversos factores, no cuenta con una tecnología propia para iniciar la producción de ácido fosfórico grado fertilizante, surgió la necesidad de realizar estudios de laboratorio orientados a conseguir la mayor recuperación de P₂O₅ de la roca (a partir de los cuales se puedan realizar ensayos a nivel de planta piloto) y poder desarrollar una tecnología nacional para obtener un ácido fosfórico que presente características similares a las alcanzadas en procesos comerciales, lo cual ha sido el objetivo de este trabajo.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

A) RESUMEN:

CAPITULO I : FERTILIZANTES Y SU USO EN EL PERU.

El Perú, debido a sus tres regiones, cuenta con suelos de diversas características, pero todos ellos presentan poca fertilidad debido a su deficiente contenido de fósforo, nitrógeno y potasio, que son los nutrientes que aseguran la alta fertilidad de los suelos, es por eso que en nuestro país se hace necesario el uso de fertilizantes. Actualmente se usan diversos tipos de fertilizantes, algunos de ellos de procedencia nacional y otros de procedencia extranjera. El hecho de que la demanda de fertilizantes es creciente y la producción nacional no cubre tal demanda, se ha proyectado importar grandes cantidades de fertilizantes. Dado que nuestros suelos son pobres en fósforo se podría producir el superfosfato triple, fertilizante muy usado para elevar dichos niveles, y de esta manera evitar la gran fuga de divisas por la importación de este fertilizante, que en 1988 ascendió a más de 7 millones de dólares.

CAPITULO II : ACIDO FOSFORICO GRADO FERTILIZANTE (A.F.G.F)

El ácido ortofosfórico de fórmula H_3PO_4 , se conoce comúnmente como ACIDO FOSFORICO. Su producción se puede llevar a cabo por el método de reducción térmica y también

por el método de la vía húmeda. Este último método es también llamado de vía sulfúrica y es el más factible de llevarse a cabo en nuestro país, ya que se cuenta con la roca fosfórica y ácido sulfúrico que son las materias primas para la producción del A.F.G.F.. La vía sulfúrica consiste en atacar la roca fosfórica con el ácido sulfúrico, obteniéndose como producto un ácido fosfórico impuro denominado GRADO FERTILIZANTE, y según el proceso que se utilice, el sulfato de calcio, subproducto que también se forma, tendrá cierto grado de hidratación. La separación entre el A.F.G.F. y el sulfato de calcio, puede ser fácil ó difícil según la formación de los cristales de sulfato. El proceso convencional de la vía sulfúrica, es aquel donde se obtiene el sulfato de calcio dihidratado. El A.F.G.F. es muy usado en la industria de fertilizantes, y es la materia prima, junto con la roca fosfórica, para la producción del superfosfato triple. En el mundo la mayor producción de ácido fosfórico se realiza en Europa y América del norte, en cambio en América latina, su producción solo se realiza en algunos países, de los cuales destacan Brasil y México. De todo el ácido usado en el mundo el 90% se usa en la industria de fertilizantes, y el resto es un ácido purificado al que se le dá usos especiales.

Para el A.F.G.F., los consumidores internacionales solo exigen que contengan de 54-55 %P₂O₅, un contenido de sólidos de 1% y una densidad de 1.7 g/ml.

CAPITULO III : MATERIAS PRIMAS PARA OBTENER A.F.G.F.

Para producir A.F.G.F., solo se requiere roca fosfórica y ácido sulfúrico. La roca fosfórica ó fosforita, contiene minerales del grupo del apatito que son basicamente fosfatos de calcio acompañados con hidroxidos, cloruros ó fluoruros. El Perú cuenta con grán cantidad de este mineral en Bayovar, Piura, zona constituida de rocas sedimentarias dispuesta en capas de unos 200 m de espesor. En este lugar las reservas se estiman en unos 1000 millones de TM, suficiente cantidad para abastecer al mundo por espacio de 30 años. El mineral es concentrado a unos 30 %P₂O₅, mediante un tratamiento de lavados con lo cual se logra eliminar el contenido de diatomitas. La planta ubicada en Bayovar puede producir 90 mil TMA de concentrado de 30.5 % P₂O₅, pero la falta de demanda de este concentrado ha motivado su paralización.

El ácido sulfúrico requerido para obtener el A.F.G.F., es producido por empresas estatales y de toda su producción solo el 1% es usado en la industria de fertilizantes, mientras que grandes cantidades son exportadas.

CAPITULO IV : ESTUDIO EXPERIMENTAL

El método usado en la obtención del A.F.G.F., es el de la vía sulfúrica. Este estudio se lleva a cabo, solo a nivel de laboratorio. Ensayos preliminares, establecen que la roca debe ser fluidizada en un reciclo de ácido fosfórico diluido antes de su ataque con ácido sulfúrico, y pruebas posteriores determinan que es conveniente de un reciclo

más concentrado en cierta parte del proceso, con lo cual se obtiene un producto de concentración similar a la obtenida en procesos comerciales.

Basados en los ensayos anteriores, se define un proceso que consta de las siguientes etapas SUSPENSION REACCION , FORMACION DE CRISTALES , FLUIDEZ , FILTRACION y LAVADO. Proceso que es estudiado convenientemente para determinar las condiciones óptimas de trabajo.

Al estudiar los cambios de las variables principales del proceso con respecto a las variaciones de la temperatura, del tiempo de reacción y formación de cristales y de las cantidades de reciclado diluido y ácido sulfúrico, observamos que los cambios más importantes ocurren cuando variamos la temperatura y el tiempo de formación de cristales, así tenemos que a mayor temperatura se obtiene un producto de mayor concentración, mientras que la dificultad de filtración y pérdida de fósforo presentan un mínimo en el intervalo de temperaturas probadas ; en cambio trabajando con mayor tiempo de formación de cristales se consigue un producto de mayor concentración, mayor facilidad de filtración y mayor recuperación del fósforo de la roca.

Cuando se realizan pruebas de mayor tamaño, se puede observar que es conveniente reajustar la cantidad de reciclado diluido. En vista de que el producto conseguido es de 30 %P₂O₅ es necesario elevar su concentración, mediante evaporación, hasta 50 %P₂O₅ para su uso en la industria de fertilizantes. Trabajando a presiones

atmosféricas, se requiere altas temperaturas y largos tiempos para alcanzar la concentración requerida.

CAPITULO V : DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO

El diseño de la planta piloto es basado en el proceso definido en el capítulo IV. El tamaño elegido de planta piloto es de 200 Kg de roca fosfórica, la cual consta de dos secciones

Reacción-Filtración y Evaporación.

Los equipos principales de la planta piloto son: tanque Reactor, tanque Formador de cristales, Filtro rotatorio de vacío y tanque Evaporador. Los equipos secundarios de la planta son: tanque dosificador del filtro, tanques de almacenamiento y bombas centrifugas.

B) CONCLUSIONES:

- Mediante el proceso estudiado se logra una recuperación hasta 98-99% del P₂O₅ de la roca, y se puede obtener un producto de 30% P₂O₅ antes de la evaporación.
- La reactividad de la roca es relativamente alta, y la roca concentrada puede ser usada sin previa molienda en el proceso de manufactura del ácido fosfórico.
- Es posible obtener un yeso de buenas características, y conseguir una satisfactoria velocidad de filtración.
- El agua utilizada en el proceso, debe entrar en la etapa de lavado con el fin de extraer el producto remanente que queda en la torta, consiguiéndose de esta manera el ácido

que se usará como reciclaje.

- El proceso que brinda la posibilidad de obtener un producto de niveles comerciales es el que utiliza las siguientes etapas: Suspensión, Reacción, Formación de cristales, Fluidéz, Filtración y Lavado de torta.
- La temperatura conveniente de trabajo está en el rango de 80-85 C, menores y mayores temperaturas traen problemas de filtración y recuperación de P2O5.
- Es conveniente trabajar con bajos flujos de ácido sulfúrico, para impedir la abundante formación de espuma, evitando de esta manera recurrir al uso de antiespumante en la etapa de reacción.
- Trabajar con elevados flujos de ácido sulfúrico, trae problemas de control de temperatura, por tratarse de una reacción exotérmica.
- La etapa más importante para el éxito del proceso, es la formación de cristales: cuando los cristales de yeso están bien formados, se asegura una rápida y eficaz separación entre el ácido fosfórico y el yeso. El tiempo estimado para esta etapa fué de cuatro horas.
- La mayor facilidad de filtración trae como consecuencia la menor retención de líquido en la torta al final del proceso.
- El uso de un exceso de la cantidad estequiométrica de ácido sulfúrico, causa problemas en la facilidad de filtración debido a un incremento en la viscosidad de la masa reaccionante, esto a su vez origina pérdida considerable de P2O5 de la roca y demoras en la producción

del fosfórico.

Trabajando a presión atmosférica se presenta poca evaporación a medida que la concentración aumenta, esto implica la necesidad de más tiempo en la etapa de evaporación para alcanzar la concentración deseada (50% P2O5).

Es conveniente usar la cantidad de ácido sulfúrico lo mas proxima a la cantidad estequiométrica, poniendo atención en la presencia de reacciones secundarias. En el caso de la roca de Bayovar, la cantidad de ácido sulfúrico requerido es: Roca (30% P2O5) /Sulfúrico (100%) = 1.3

En las pruebas de evaporación , es recomendable probar presiones menores que la atmosférica, para ver la posibilidad de reducir la temperatura y el tiempo de evaporación.

- Se debe tener cuidado en el control de la temperatura durante la etapa de formación de cristales, ya que de lo contrario se logran cristales mal formados e inestables que causan problemas durante la filtración y una mayor retención de P2O5 en la torta.

CAPITULO I

FERTILIZANTES Y SU USO EN EL PERU

1.0 INTRODUCCION

La gran diferencia que existe entre los rendimientos de las cosechas de los diversos países, no se debe solo a las diferencias climáticas, sino también a una estrecha relación con el desarrollo agrícola y económico de cada país.

Por regla general, se conoce que los aumentos en la producción agrícola se origina por la combinación de factores tecnológicos aplicados bajo una estructura agrícola y condiciones económicas relativamente favorable. También es un hecho sin discusión, que el uso adecuado de fertilizantes aumenta grandemente el rendimiento de la tierra (1).

La experiencia de los países desarrollados, en el uso de fertilizantes, puede servir de base para estimar el grado de contribución de los fertilizantes en el incremento de la producción agrícola.

Los fertilizantes ó abonos constituyen un factor decisivo y rápido en la obtención de abundantes cosechas. En el Perú estos son usados desde la época de los incas, quienes hacian uso del guano de isla ó de la anchoveta enterrada. Actualmente la demanda de fertilizante en nuestro país no es cubierta por la producción nacional, y el Perú tiene que importar toda una gama de estos fertilizantes para poder reponer la fertilidad de los suelos (2).

1.1 CARACTERISTICAS DE SUELOS EN EL PERU

El cuadro I-1 muestra las características de los suelos en las tres regiones del Perú (3).

CUADRO I-1
CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS DEL PERU

REGION	COSTA	SIERRA	SELVA
TIPO Y CLIMA	Aluviales , áridos, alto nivel freático, mal drenaje.	Presencia de muchas heladas, no presenta sistema de riego.	Alta precipitación fluvial.
REACTIVIDAD DEL SUELO	Medianamente alcalina	Ligeramente ácido	Bastante ácido
CONTENIDO DE MAT. ORG.	Bajo	Medio	Alto
CONTENIDO DE NITROGENO	Bajo	Medio	Bajo
CONTENIDO DE POTASIO	Alto	Medio	Bajo
CONTENIDO DE FOSFORO	Medio	Bajo	Bajo

1.1.1 FERTILIDAD DE LOS SUELOS EN EL PERU

De acuerdo a numerosas investigaciones, realizadas en la estación experimental agrícola de la Molina , se establecen niveles críticos de fósforo (P), potasio (K) y nitrógeno indicado por la materia orgánica (M.O.), los cuales son indicativos de la fertilidad de los suelos, ver cuadro I-2 (4).

CUADRO I-2

NIVELES CRITICOS DE P , K y M.O.

calificativo	P	ppm	K	% peso M.O.
BAJO	0 - 6		0 - 250	0.2 - 2.0
MEDIO	7 - 15		255 - 350	2.1 - 4.0
ALTO	15 - mas		355 - mas	4.1 - mas

Otro indicativo de la fertilidad, es la reactividad de los suelos, el cuadro I-3 muestra los niveles criticos de pH:

CUADRO I-3

RECTIVIDAD DE SUELOS

calificativo	rango de pH
ACIDO	2.5 - 6.5
NEUTRO	6.5 - 7.5
ALCALINO	7.6 - más

Actualmente, para interpretar los análisis de suelos en terminos agronómicos, se cuenta con indices establecidos a partir de los niveles criticos mencionados anteriormente (4). Ver anexo I-A.

En el cuadro I-4 se describen los suelos del Perú, usando los indices (4), donde MB, B, M y A, significa que los suelos contienen, en el mismo orden, muy bajo, bajo, mediano y alto, contenido de nutriente; mientras que AC y ALC significa suelo ácido y alcalino respectivamente. Este cuadro nos indica que la fertilidad de nuestro suelo no es buena.

CUADRO I-4

INDICES DE P ,K , M.O. y PH PARA LOS SUELOS DEL PERU

REGIONES O SUBREGIONES	INDICES			
	P	K	M.O.	PH
COSTA NORTE	1.79 B	2.11 M	1.21 MB	2.58 ALC
COSTA CENTRO	1.87 M	2.48 A	1.36 MB	2.52 ALC
COSTA SUR	1.43 B	2.55 A	1.47 B	2.65 ALC
SIERRA NORTE	1.48 B	1.88 B	2.26 A	1.78 AC
SIERRA CENTRO	1.80 B	1.56 B	2.27 A	1.60 AC
SIERRA SUR	1.81 M	2.26 A	2.02 M	1.66 AC
SELVA	1.53 B	1.52 B	2.17 M	1.57 AC

PROMEDIO				
NACIONAL	1.67 B	2.05 M	1.82 M	2.05 N

1.2 NECESIDAD DE LOS FERTILIZANTES EN EL PERU

Los nutrientes fósforo (P), nitrógeno (N) y potasio (K), son los que ejercen gran influencia sobre las plantas. El fósforo asegura el fortalecimiento de la raíz, el crecimiento de la planta y el cuajado del fruto; el nitrógeno favorece el desarrollo vigoroso de la planta y el potasio es el que mejora la calidad y conservación de los frutos (5).

Del cuadro I-4, podemos concluir que los suelos del

Perú, no son ricos en nutrientes P, K y N, siendo el fósforo el nutriente que se encuentra en menor cantidad, seguido del nitrógeno y por último del potasio.

Esta razón hace necesario el uso de fertilizantes en nuestro país para que, utilizando la dosis adecuada, logremos incrementar el rendimiento de las cosechas.

La necesidad de utilizar fertilizantes en nuestro país crece cada vez más, por el hecho de que existen lugares, como en la sierra y selva, en los que se usan poco ó no se usan fertilizantes, debido a lo lejano de estos lugares, y también por que la gran mayoría de agricultores que usan fertilizantes, aplican solo un pequeño porcentaje de la cantidad requerida, devolviendo a la tierra solo una pequeña parte de los nutrientes extraídos durante las cosechas (1).

1.3 TIPOS DE FERTILIZANTES USADOS EN EL PERU

De los fertilizantes que actualmente se usan en el país, una parte son nacionales y la otra parte son importados. El cuadro I-5 se indica los fertilizantes que se usan y sus contenidos de nutrientes (5)

Los fertilizantes son denominados SIMPLES, cuando proporcionan un solo nutriente y pueden ser Fosfatados, Nitrogenados ó Potásicos, en cambio los fertilizantes son denominados COMPUESTOS cuando proporcionan más de un nutriente (5).

CUADRO I-5

FERTILIZANTES USADOS EN EL PERU

FERTILIZANTE	% peso NUTRIENTE		
	N	P2O5	K2O
SIMPLE			
Nitrogenados:			
- UREA	46.0	----	----
- NITRATO DE AMONIO	33.5	----	----
- SULFATO DE AMONIO	21.0	----	----
Fosfatados:			
- SUPERFOSFATO TRIPLE	----	46.0	----
- SUPERFOSFATO SIMPLE	----	20.0	----
- SUPERFOS-24	----	24.0	----
- ROCA FOSFORICA	----	30.0	----
Potasicos:			
- CLORURO DE POTASIO	----	----	60.0
- SULFATO DE POTASIO	----	----	50.0
- SULFATO DE Mg y K	----	----	22.0
COMPUESTOS:			
- FOSFATO DIAMONICO	18.0	46.0	----
- GUANO DE ISLA	10.0	10.0	2.0
- BAYOMIX 11-22-11	11.0	22.0	11.0
- ABONO COMPUESTO 7-14-7	7.0	14.0	7.0
- ABONO COMPUESTO 12-12-12	12.0	12.0	12.0

1.4 PROCEDENCIA DE LOS FERTILIZANTES USADOS EN EL PERU

Como se mencionò antes, los fertilizantes que se usan en el país son de procedencia nacional y extranjera. En el cuadro I-6 se muestra la procedencia de los fertilizantes nacionales y la capacidad de diseño de las plantas que los producen (5), y el cuadro I-7 muestra los volúmenes de producción nacional e importación de fertilizantes de los últimos años (5).

CUADRO I-6
FERTILIZANTES NACIONALES

FERTILIZANTE	PROCEDENCIA	CAPAC. DE DISEÑO (TMA)
UREA	PETROPERU	151 470
NITRATO DE AMONIO	FERTISA CACHIMAYO	41 580 35 050
SULFATO DE AMONIO	FERTISA	14 850
SUPERFOSFATO SIMPLE	INDUS	15 000
FERTILIZANTES COMPUESTOS	INDUS	30 000
GUANO DE ISLA	PESCAPERU	40 000
BAYOMIX	ENCI	

De los fertilizantes usados en el Perú, cuadro I-5, se observa, del cuadro I-6, que todos los fertilizantes nitrogenados son producidos en el país, pero en cantidades que no cubren la demanda, lo que motiva la importación de tales fertilizantes. En el caso de los fertilizantes fosfatados, la producción nacional de superfosfato simple es muy pequeña frente a la demanda de P₂O₅, razón por la cual se importa el superfosfato triple debido a su alto contenido de P₂O₅. El Perú no cuenta con plantas que produzcan fertilizantes potásicos, por lo que todos ellos son de procedencia extranjera como se puede ver en el cuadro I-7.

CUADRO I-7
VOLUMENES DE PRODUCCION NACIONAL E IMPORTACION DE FERTILIZANTES (miles TM)

Fertilizante	proced.	AÑOS								
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
UREA	NAC	124.4	153.4	126.6	43.8	108.1	119.0	136.3	132.0	143.0
	IMP	0.4	-----	10.4	60.7	54.1	-----	104.5	153.9	98.2
NITRATO DE AMONIO	NAC	50.1	47.6	43.3	43.0	40.8	35.0	31.3	34.5	35.0
	IMP	21.8	24.7	15.6	6.8	-----	-----	27.1	40.0	47.1
SULFATO DE AMONIO	NAC	5.0	5.6	3.8	4.0	1.5	0.5	3.0	-----	-----
	IMP	27.6	11.7	15.6	13.4	23.3	22.2	27.8	29.7	30.3
SUPERFOSFATO SIMPLE	NAC	7.0	8.8	7.6	7.0	7.0	6.5	3.1	10.0	0.5
	IMP	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
SUPERFOSFATO TRIPLE	NAC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	IMP	15.7	14.5	12.0	11.4	10.2	15.6	37.8	51.7	34.4
CLORURO DE POTASIO	NAC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	IMP	19.4	21.8	10.7	9.7	18.9	14.3	24.6	38.8	39.9
SULFATO DE POTASIO	NAC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	IMP	5.4	5.8	6.2	-----	5.6	2.9	5.7	5.7	8.4
SULFATO DE Mg y K	NAC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	IMP	1.5	1.5	1.5	-----	1.0	1.0	2.8	2.4	3.5
FOSFATO DIAMONICO	NAC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	IMP	19.4	18.6	13.9	12.2	16.7	18.6	30.2	34.8	43.8
GUANO DE ISLA	NAC	23.5	23.5	15.4	13.4	19.6	36.6	23.5	24.0	25.0
	IMP	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
COMPUESTOS	NAC	21.4	19.4	15.9	22.5	14.5	16.0	24.6	26.1	18.0
	IMP	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Como se indica en el cuadro I-7, la urea es el único fertilizante cuyo volumen de producción nacional va en aumento mientras que su importación disminuye. Los abonos compuestos nacionales aún mantienen sus niveles de producción, en cambio los demás fertilizantes incrementan sus volúmenes de importación o su producción nacional disminuye cada año.

En forma global, la producción nacional y la importación de fertilizantes se aprecia mejor en el cuadro I-8, donde se indica la cantidad de NPK, cantidad combinada de N, P₂O₅ y K₂O, que son producidas e importadas, expresadas en toneledas anuales y porcentajes (5).

CUADRO I-8

PRODUCCION NACIONAL E IMPORTACION DE NUTRIENTES (NPK)

AÑO	miles TM			%	
	NAC	IMP	TOTAL	NAC	IMP
1980	88.8	47.7	136.5	65.0	35.0
1981	97.8	45.7	143.5	58.2	31.8
1982	84.1	37.7	121.8	69.0	31.0
1983	47.9	52.0	99.9	47.9	52.1
1984	74.6	59.6	134.2	55.6	44.4
1985	81.7	35.4	117.1	69.7	30.3
1986	89.3	112.6	201.9	44.2	55.8
1987	88.9	150.4	239.3	37.2	62.8

Este cuadro refleja que la importación de fertilizantes va en aumento en los últimos años, y si no se incentiva la producción nacional, nuestra dependencia a los fertilizantes extranjeros llegará a niveles nunca antes alcanzados.

1.5 DEMANDA ACTUAL Y PROYECCIONES SOBRE FERTILIZANTES

En la actualidad la cantidad requerida de fertilizantes, para reponer los nutrientes gastados, es mucho mayor de lo que normalmente se aplica.

La cantidad de nutrientes que pierden los suelos cada año, se conoce como CONSUMO POTENCIAL (5). Este consumo nacional estimado, es el siguiente:

Nutriente	CONSUMO POTENCIAL (TMA)
N (N)	220 548
P (P2O5)	139 000
K (K2O)	50 750

Para mantener la fertilidad de las tierras, las cantidades de nutrientes, arriba mencionadas, deben ser aplicadas anualmente, sin embargo en nuestro país esto no ocurre ya sea por desconocimiento de las dosis que se deben utilizar ó por que el costo de los fertilizantes, en algunos lugares, limita su uso.

La deficiente reposición de nutrientes que se viene realizando en los últimos años es presentada en los cuadros I-9 y I-10, donde se indican los tonelajes de nutrientes que se reponen y el porcentaje que representan del consumo potencial (5).

CUADRO I-9

REPOSICION DE NUTRIENTES EN PERU
(miles TM)

AÑO	N	P	K
1980	86.9	22.8	13.5
1981	104.0	21.7	13.2
1982	72.7	15.6	9.7
1983	67.8	15.9	13.4
1984	78.4	18.0	13.8
1985	79.8	20.5	13.1
1986	118.7	29.4	18.0
1987	100.0	24.0	20.0
1988	156.0	20.0	22.2

CUADRO I-10

REPOSICION DE NUTRIENTES EN PERU
(% reposicion)

AÑO	N	P	K
1980	39.4	16.4	16.7
1981	47.1	15.6	16.3
1982	32.9	11.2	12.2
1983	30.7	11.4	16.6
1984	35.5	12.9	17.0
1985	36.1	14.7	16.2
1986	53.8	21.1	22.3
1987	45.0	17.2	24.7
1988	70.0	14.5	27.5

De estos dos últimos cuadros, se observa que la reposición de nutrientes en nuestro país, es baja con respecto al fósforo y potasio, mientras que la reposición de nitrógeno se acerca a lo requerido por el consumo potencial.

Podemos decir, también de los cuadros anteriores, que el uso de abonos fosfatados y potásicos deberá ir en aumento en los próximos años, los que tendrán que importarse si es que no se toman las acciones adecuadas para cubrir esta demanda con producción nacional.

1.5.1 PROYECTOS NACIONALES SOBRE FERTILIZANTES

La empresa estatal Minero-Perú, quien tiene a cargo la explotación de recursos naturales, ha venido realizando en los últimos años, muchos estudios varios de ellos a nivel de factibilidad, para construir plantas en el corto plazo.

El cuadro I-11 indica la lista de proyectos que tiene dicha empresa:

CUADRO I-11

PROYECTOS DE PLANTAS FERTILIZANTES

PRODUCTO	UBICACION	Capacidad (miles TMA)		
		N	P2O5	K2O
UREA	BAYOVAR	112.2	----	----
SUPERFOSFATO SIMPLE	BAYOVAR	----	138.8	----
FOSFATO DIAMONICO	BAYOVAR	32.1	82.1	----
CLORURO DE POTASIO	BAYOVAR	----	----	51.0

1.5.2 PROYECCIONES DE PRODUCCION NACIONAL, IMPORTACION Y CONSUMO DE FERTILIZANTES

La empresa nacional de comercialización de insumos (ENCI), es la encargada de proyectar los datos de producción nacional, volúmenes a importar y la cantidad que se destinará al consumo. Las cantidades proyectadas para los años 1989, y 1990, se muestran en el cuadro I-12 (5).

De este cuadro se observa que el consumo de fertilizantes nitrogenados siempre es el más alto de todos los tipos de fertilizantes usados, seguidos por los fertilizantes fosfatados y finalmente por los potásicos.

El fertilizante nitrogenado de mayor uso a nivel nacional es la Urea, donde el 50% del consumo es cubierto por la producción nacional.

De los fertilizantes fosfatados, el superfosfato triple es el que tiene mayor demanda, así como el cloruro de potasio es el fertilizante potásico de mayor consumo, estos deben ser importados en su totalidad, ya que no existe planta alguna que los produzca en el país.

El uso de abonos compuesto por lo general es bajo, y casi todos son de producción nacional a excepción del fosfato diamónico que es el de mayor consumo y debe ser importado.

CUADRO I-12

PROYECCIONES PARA PRODUCCION , IMPORTACION Y CONSUMO DE FERTILIZANTES (miles TM)

AÑO	1989				1990			
	FERTILIZANTE	STOCK INICIAL	PROD. NAC.	IMP.	CONSUMO	STOCK INICIAL	PROD. NAC.	IMP.
UREA	58.2	132.0	125.0	256.5	58.7	132.0	132.0	263.5
NITRATO DE AMONIO	19.6	34.5	35.0	69.0	19.5	36.0	35.0	70.0
SULFATO DE AMONIO	6.2	----	32.0	31.2	7.0	----	32.0	32.0
SUPERFOSFATO TRIPLE	8.0	----	52.0	51.6	8.4	----	53.0	53.0
SUPERFOS 24	2.6	10.0	----	9.5	3.1	10.0	----	10.0
CLORURO DE POTASIO	8.3	----	40.0	39.8	8.5	----	41.0	40.9
SULFATO DE POTASIO	2.6	----	6.5	6.4	2.7	----	6.5	6.6
SULFATO DE Mg y K	1.7	----	2.5	2.7	1.5	----	3.0	2.7
POSFATO DIAMONICO	7.8	----	36.0	35.4	8.4	----	36.0	36.4
ABONO COMPUESTO 12-12-12	4.5	19.0	----	19.0	4.5	19.0	----	19.5
ABONO COMPUESTO 7-14-7	0.33	0.6	----	0.7	0.23	0.7	----	0.7
GUANO DE ISLA 10-10-12	4.8	22.0	----	22.0	4.8	22.0	----	22.0
BAYOMIX 11-23-11	1.7	6.5	----	6.0	2.2	7.5	----	7.0
ROCA FOSFORICA	0.5	3.5	----	3.5	0.5	3.5	----	3.6

1.6 EL SUPERFOSFATO TRIPLE COMO FERTILIZANTE

Como se observó en los puntos 1.11 y 1.5, los suelos del Perú son deficientes en el nutriente fósforo, por lo que se hace necesario la aplicación de más fertilizantes que contribuyan a la reposición de este nutriente en los suelos peruanos.

El superfosfato triple (SFT) es el fertilizante más usado en el mundo para este fin, por su alto contenido de P_2O_5 (44-48%) y porque además, prácticamente, todo el fósforo se solubiliza y enriquece los suelos. Se trata de un fertilizante simple de alto contenido de P_2O_5 , principalmente como fosfato monocálcico, $Ca(H_2PO_4)_2$, soluble en agua, y por tanto, fácilmente asimilable por las plantas (6).

El SFT se obtiene por reacción directa entre la roca fosfórica y el ácido fosfórico grado fertilizante de 50-54 % P_2O_5 , su utilización ha venido determinada por el desarrollo de la industria del ácido fosfórico. El SFT se produce en forma de polvo ó en forma granulada, dependiendo de la finalidad de su uso.

La mayor cantidad de SFT producida en el mundo se comercializa en forma granulada para aplicación directa o bien para mezclas con otros fertilizantes simples ó compuestos (7).

Se utiliza SFT en polvo como materia prima en la fabricación de abonos complejos de alta graduación, ó cuando se amoniza con el fin de aportar una parte de

nitrógeno fertilizante antes de aplicación directa (3).
En la actualidad hay dos tecnologías para la producción del SFT las cuales son (8):

- a) Proceso continuo de manufactura (SFT en polvo).
- b) Proceso de lechada (SFT granulado).

Información adicional sobre estos procesos se da en el anexo I-B.

El SFT utilizado en el Perú (importado), tiene las siguientes propiedades (2):

PROPIEDADES FISICAS

Contenido de P2O5: 42-50 % peso

Aspecto: Se presenta en forma granulada

- Densidad aparente: 1.0-1.2 g/cc (segun apelmazamiento)
- Higroscopicidad: producto higroscópico
- Índice de salinidad: 10.1 (bajo)
- Humedad: 2%
- Tamaño de partícula: (tyler standar)

sobre malla	% peso
6	0.5
8	15.0
14	98.6
20	100.0

PROPIEDADES QUIMICAS

P2O5 asimilable: 40.0-49.0 % peso

Reacción: neutra

Con respecto a los requerimiento de roca fosfórica y de ácido fosfórico grado fertilizante para SFT, se presenta en el cuadro I-13 (9) las cantidades necesarias para la producción de 1000 TM de SFT (46% P2O5) y también los requerimientos para producir 52000 TM de SFT en caso de cubrir la demanda con producción nacional. Esta última cantidad es la que se ha programado importar para 1989 (5).

CUADRO I-13

REQUERIMIENTO DE MATERIAS PRIMAS PARA PRODUCIR SFT

SFT		1000 TM	52000 TM
Materia prima	% P2O5	TM	TM
Roca fosfórica	30.5	420.9	21 900
Acido fosfórico	50.0	672.4	34 970

Del cuadro podemos apreciar que la producción de ácido fosfórico grado fertilizante debe ser, por lo menos, de 35000 TMA con lo cual podríamos dejar de importar el superfosfato triple.

Para tener una idea de los desembolsos que se hacen por importación, en la tabla I-1 se presentan los pagos realizados por ENCI en los dos últimos años para importar SFT.

TABLA I-1
PAGO REALIZADO POR IMPORTACION DE SFT

AÑO	1987	1988
CANTIDAD IMPORTADA (TM)	51 730	51 430
PRECIO FOB (\$/TON)	125.05	156.17
PRECIO CIF (\$/TON)	146.20	189.13
TOTAL DESEMBOLSO (\$)	7'562,926	9'726,853

Los millones de dólares que se fugan del país por la importación del SFT, nos refleja la urgencia de producir el ácido fosfórico grado fertilizante para poder iniciar la producción de muchos fertilizante, ya que contamos con grandes cantidades de las roca fosfórica, para la producción de dicho ácido, y también para producir el SFT.

CAPITULO II

ACIDO FOSFORICO GRADO FERTILIZANTE

(A. F. G. F.)

2.0 INTRODUCCION

El ácido ortofosfórico de fórmula H_3PO_4 , conocido comúnmente como ácido fosfórico, es un ácido mineral tribásico fuerte en la primera disociación moderadamente débil en la segunda disociación y muy débil en la tercera. Las constantes de ionización a 25 C son: $K_1=0.75 \times 10^{-2}$ $K_2=0.6 \times 10^{-7}$, y $K_3=3 \times 10^{-13}$. El ácido fosfórico 100% puro, es un sólido blanco cristalino (monoclinico) que funde a 42.4 C y se convierte en líquido siruposo con fuerte tendencia al sobreenfriamiento (10).

El ácido fosfórico fuerte, a baja temperatura, no tiene la fuerza deshidratante y corrosiva de los ácidos sulfúrico y nítrico.

Las propiedades físicas del ácido fosfórico, como la densidad, el punto de ebullición, la viscosidad cinemática y la presión de vapor, a diferentes concentraciones se presentan en el anexo II-A.

Dentro de sus propiedades químicas podemos decir que el ácido fosfórico es químicamente inactivo a la temperatura ambiente. En algunos casos el fosfórico puede sustituir al ácido sulfúrico cuando no se desean las propiedades oxidantes de este último. La reducción del ácido fosfórico, incluso con el hidrógeno y el carbón, no es mensurable por debajo de 350-400 C; a temperaturas más altas este ácido es bastante activo con la mayoría de los metales y sus óxidos; ataca al cuarzo mediante calor y forma lodos cuyas estructuras químicas no se conocen. En

soluciones diluidas el ácido fosfórico tiene sabor ácido agradable semejante a los ácidos cítricos, tartárico, láctico y acético (10).

Dependiendo de su grado de pureza , el ácido fosfórico se divide en tres grandes categorías :

- a. Acido fosfórico Negro ó grado fertilizante.
- b. Acido fosfórico Verde claro purificado ó grado técnico.
- c. Acido fosfórico Blanco ó grado alimenticio.

En realidad se trata del mismo producto químico diferenciándose solo por su ruta de fabricación y su grado de pureza (9), donde el ácido fosfórico blanco es el de mayor pureza.

El ácido fosfórico grado fertilizante (A.F.G.F.), es un ácido impuro . Este ácido es un producto intermedio clave para la fabricación de todos los fertilizantes fosfatados, a excepción del superfosfato simples y los nitrofosfatos, tal como se indica en el DIAGRAMA A (6).

Para usos diferentes a fertilizantes el ácido debe purificado de acuerdo al uso que tendrá. Como grado alimenticio se usa para dar sabor a las bebidas, jaleas y conservas, clarificación de azúcar y fabricación de alimentos para animales Como grado técnico es utilizado en la manufactura de sales fosfatadas las cuales son utilizadas en la fabricación de detergentes, tratamientos de agua, en fabricas textiles, etc.(10).

Los usos del ácido fosfórico purificado se muestran en el DIAGRAMA B.

DIAGRAMA A : Usos del Acido Fosfórico Grado Fertilizante

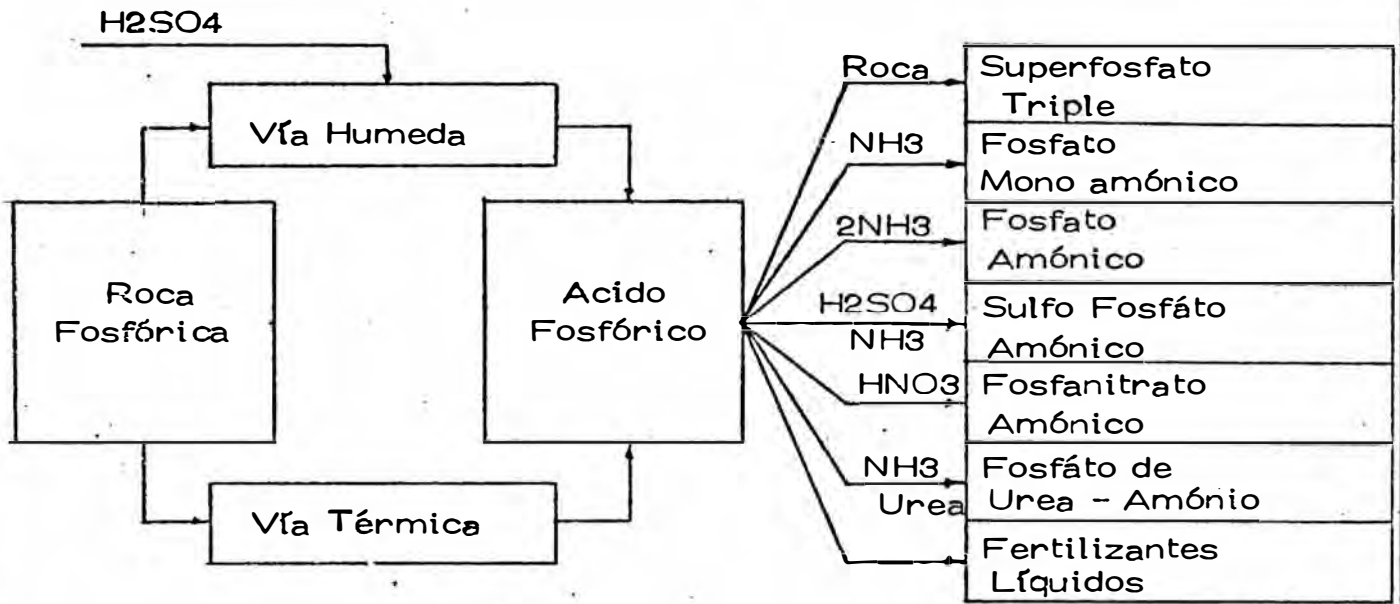
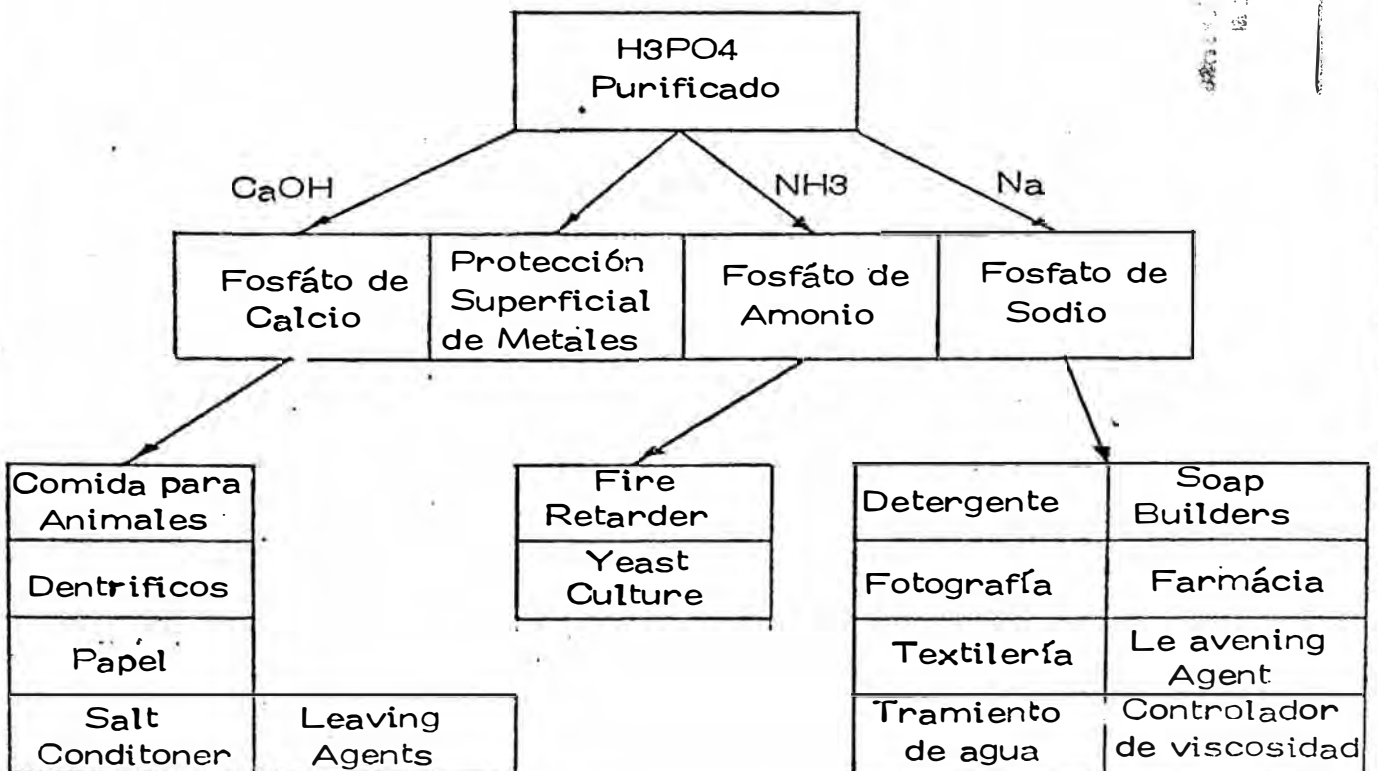


DIAGRAMA B : Usos del Acido Fosfórico Purificado



2.1 METODOS DE MANUFACTURA

Existen dos métodos para la producción de ácido fosfórico.

- El primero, denominado método de reducción térmica, en el que existen dos procesos según sea el medio en el que se realizan; es decir en horno eléctrico, ó en horno de tiro (9).

- El segundo es el llamado método de vía húmeda y existen cuatro procesos que son: El proceso Dihidratado, el proceso Hemihidratado, el proceso de la Anhídrita y el proceso combinado (6)

2.1.1 METODO DE REDUCCION TERMICA

El método de la reducción térmica es usado en los procesos de HORNO ELECTRICO y de HORNO DE TIRO, en los cuales se utilizan cargas que están formadas por las siguientes materias primas: Roca fosfórica, coke y agregado de arena (9).

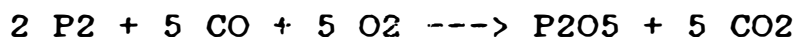
En el proceso de HORNO ELECTRICO, se utilizan tres electrodos que al ser conectados a una corriente eléctrica logran fundir la carga; en cambio el proceso de HORNO DE TIRO utiliza energía para desarrollar altas presiones en la carga a la cual se le insufla aire para lograr temperaturas capaces de fundirla (9).

Lo que ocurre en el método de reducción térmica puede ser resumido de la siguiente forma:

- Fundición y reacción de la mezcla cargada.



- Reacción entre gases producidos y aire.



Absorción del pentóxido de fósforo con agua.



2.1.2 METODO DE LA VIA HUMEDA

En este método la roca fosfórica es atacada con un ácido mineral, el cual puede ser ácido clorhídrico, ácido nítrico ó ácido sulfúrico, y como producto de la reacción tenemos el ácido fosfórico.

Cuando se hace reaccionar la roca con ácido clorhídrico ó nítrico, se obtiene la respectiva sal de calcio junto con el ácido fosfórico. Como estas sales son muy solubles es imposible la separación del ácido fosfórico mediante la filtración ó centrifugación, debiendo recurrirse a la extracción por solventes para recuperar el ácido fosfórico. En cambio usando ácido sulfúrico precipita el sulfato de calcio que es una sal insoluble y puede ser removida fácilmente mediante filtración (11).

El ácido fosfórico obtenido de esta manera, presenta una concentración que varía de 30 a 50 %P₂O₅ peso dependiendo del tipo de proceso de fabricación (6).

El producto que se obtiene mediante la vía sulfúrica es el ácido fosfórico negro, pero cuando la roca es calcinada se obtiene el ácido fosfórico verde. El ácido fosfórico negro ó A.F.G.F. es muy usado en la fabricación de fertilizantes y para ello solo es necesario, en algunos casos, elevar su concentración a los niveles requeridos para su uso; en cambio para usos distintos a los fertilizantes este ácido deberá ser purificado. La purificación varia desde la simple eliminación de impurezas que dan color como Fe y V, hasta la casi eliminación total de impurezas presentes en el A.F.G.F. (12).

El ácido obtenido, mediante la vía termica, es el fosfórico blanco ó grado alimenticio el cual tiene usos especiales, diferentes a los fertilizantes, por ser un ácido de alta pureza.

2.1.2.1 VIA SULFURICA ALTERNATIVA PERUANA

En vista de la necesidad de producir el ácido fosfórico en nuestro país, es necesario escoger la vía adecuada para la obtención de tal producto. El cuadro II-1 nos muestra una comparación de los métodos de obtención del ácido fosfórico, del cual podemos apreciar que es posible, la producción del ácido fosfórico mediante la vía sulfúrica en nuestro país ya que además contamos con las materias primas de calidad requerida.

CUADRO II-1

COMPARACION DE LOS METODOS DE OBTENCION DEL ACIDO FOSFORICO

ITEM	REDUCCION TERMICA	VIA HUMEDA
Materias primas	Roca fosfórica, arena y coke	Roca fosfórica, ácido sulfúrico
Disponibilidad en el Perú	No se dispone de coke de calidad requerida en el proceso.	Se dispone de ambas materias primas.
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> - Acido de gran pureza y bajo contenido de solidos. - Elevada concentración de P2O5 - Acido adecuado para la fabricación de productos quimicos muy puros. - La calidad de la roca fosfórica no tiene importancia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo consumo de energia - Implica el manipuleo de medios fluidos (liquidos). - Procesos sencillos.
DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> - Alto consumo de energia electrica. - Implica manipuleo de gases a elevadas temperaturas. - Elevados costos de inversión inicial. 	<ul style="list-style-type: none"> - El ácido obtenido es de baja concentración. - Acido impuro para aplicación directa diferente a fertilizantes.
FACTIBILIDAD EN NUESTRO PAIS	No factible	Muy factible

En cambio por el elevado costo de inversión y de energía para una planta de vía térmica, el Perú no está en condiciones de iniciar la producción de ácido fosfórico por esta vía.

Por estas mismas razones es que mundialmente se utiliza la vía sulfúrica en la obtención del ácido fosfórico, vía que presenta además menores costos de inversión y también de operación. Esto ha traído como consecuencia, el desarrollo de métodos de purificación para dar al ácido fosfórico usos diferentes a los fertilizantes.

Como ejemplo de que la vía húmeda es el método que más se utiliza, en el cuadro II-2 se muestran los volúmenes de ácido obtenidos mediante la vía húmeda y térmica en los Estados Unidos (13,14).

CUADRO II-2

PRODUCCION DE ACIDO FOSFORICO EN USA
(millones TM P2O5)

VIA	1980	1981	1982	1983	1984	1988
HUMEDA	9.27	8.38	7.23	8.50	9.48	9.84
TERMICA	0.59	0.62	0.56	0.60	0.60	0.63
TOTAL	9.86	9.00	7.79	9.10	10.08	10.47

De este cuadro se nota claramente que casi todo el fosfórico producido en Estados Unidos es mediante la vía húmeda, esto debido a los altos costos que implica el proceso de vía térmica.

2.1.2.2 PROCESOS DE LA VIA SULFURICA

El grado de hidratación del sulfato que se forma mediante la vía sulfúrica, es el que da el nombre a los diferentes procesos de fabricación.

Los nombres de los procesos más conocidos se presentan en el cuadro II-3, junto con algunas características de dichos procesos (9,11,15):

CUADRO II-3

CARACTERISTICAS DE PROCESOS DE VIA SULFURICA

proceso	característica
Dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	El sulfato producido lleva dos moléculas de agua de cristalización, se obtiene cuando se trabaja a temperaturas menores de 85 C. Cristaliza en el sistema prismático monoclinico.
Hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)	El sulfato producido tiene media molécula de agua de cristalización, y se obtiene cuando se trabaja a entre 85-105 C cristalizando en el sistema hexagonal.
Anhidrita (CaSO_4)	El sulfato producido no tiene agua de cristalización, es obtenido a temperaturas mayores de 105 C, cristalizando en el sistema ortorrómbico.
Combinado (Hemihidrato- Dihidrato , Anhidrita- Dihidrato etc.)	El proceso se lleva de manera que, en una primera etapa, se forman cristales de sulfato de cierto grado de hidratación y en otra etapa se recrystaliza en otras condiciones para obtener otro tipo de cristal

La obtención de uno u otro tipo de sulfato de calcio, está determinada principalmente por la temperatura del sistema, la concentración de P2O5 en la fase líquida de la suspensión, y el tipo de fosfato utilizado. Estos factores caracterizan, principalmente, las variedades del proceso, aunque hay otros factores, tales como, la concentración de alúmina y ácido sulfúrico que juegan un rol menos importante (11).

En el mundo hay tecnologías de los diferentes procesos de la vía húmeda, que han sido desarrolladas y patentadas por diversas compañías, obsérvese en el cuadro II-4 (6).

En todos los procesos de la vía sulfúrica se deben tener como metas, los siguientes aspectos (6):

- Transferir la máxima cantidad de P2O5 de la roca al ácido que se desea obtener
Lograr que el ácido producido contenga el mayor porcentaje de P2O5
- Obtener un lodo final que presente facilidad de filtración
- Cortos tiempos de operaciones
- Facilidad de operación y manipulación de materiales
- Menor gasto de energía

CUADRO II-4

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PROCESOS DE VIA HUMEDA

PROCESO / PROPIETARIO

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

DIHIDRATADO:

- Jacobs Engineering Company
- Products Chimiques
- Pechiney - Saint - Gobain
- Societe de Prayon S.A.

- Proceso sencillo de provada eficacia, bajo costo de inversión inicial, poca uso de energia, baja contaminación.
- Baja concentración de ácido fosfórico (30% P₂O₅), baja calidad de yeso, requiere roca fina.

HEMIHIDRATO:

- Fisons Ltd., Fertilizer división
- Dor Oliver

- Concentraciones elevadas de ácido fosfórico, (45% P₂O₅), permite el uso de roca no tan fina, el yeso obtenido es de calidad industrial.
- elevado costo inicial de la planta, se presentan problemas en la filtración, bajo coeficiente de recuperación de P₂O₅ (94%), esto supone mayor gasto de explotación.

ANHIDRITA:

- Se obtiene alta concentración de producto.
- Elevada temperatura de trabajo, se presenta problemas de incrustaciones.

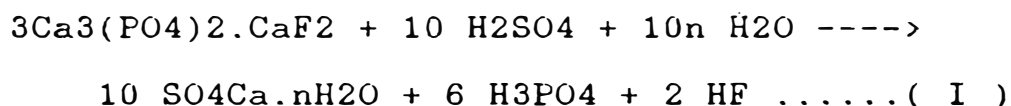
HEMIHIDRATO-DIHIDRATO:

- Nissan Chemical Industries Ltd.
- Mitsubishi Chemical Industries Ltd.

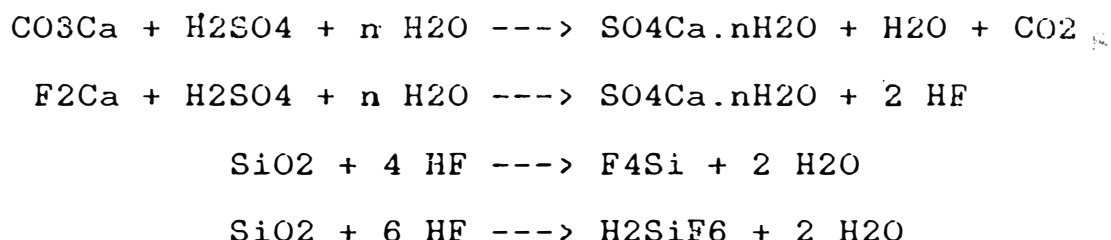
- Lechada de yeso con buenas propiedades filtrables, pocos problemas de incrustación, elevado coeficiente de recuperación (98%).
- Se requiere roca fina, alta inversión inicial, baja concentración de producto.

2.1.2.3 REACCIONES EN LA VIA SULFURICA

La reacción principal que se producen al atacar la roca fosfórica con el ácido sulfúrico, puede representarse de la siguiente forma (9,10):



Las reacciones secundarias pueden representarse como sigue:



2.1.2.4 RELACION ROCA/ACIDO EN LA VIA SULFURICA

De la ecuación de reacción (I) , se puede apreciar que la roca representada por $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$ (peso molecular = 1008) reacciona con 10 H_2SO_4 (peso molecular = 980) para formar el ácido fosfórico.

Se observa que $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$ equivale a 3 P_2O_5 (peso molec.= 426.), y como la concentración promedio de la roca es de 30 % P_2O_5 , podemos decir que 1420 gr de roca contiene una mol-gr de $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$. De estos datos se desprende que:

$$\text{Roca}(30\% \text{P}_2\text{O}_5) / \text{Acido sulfúrico}(100\%) = 1.54$$

Pero debido a las impurezas se recomienda:

$$\text{Roca}(30\%\text{P}_2\text{O}_5) / \text{Acido sulfúrico}(100\%) = 1.1 - 1.3$$

2.1.2.5 EL CRISTAL DE SULFATO EN LA FILTRACION

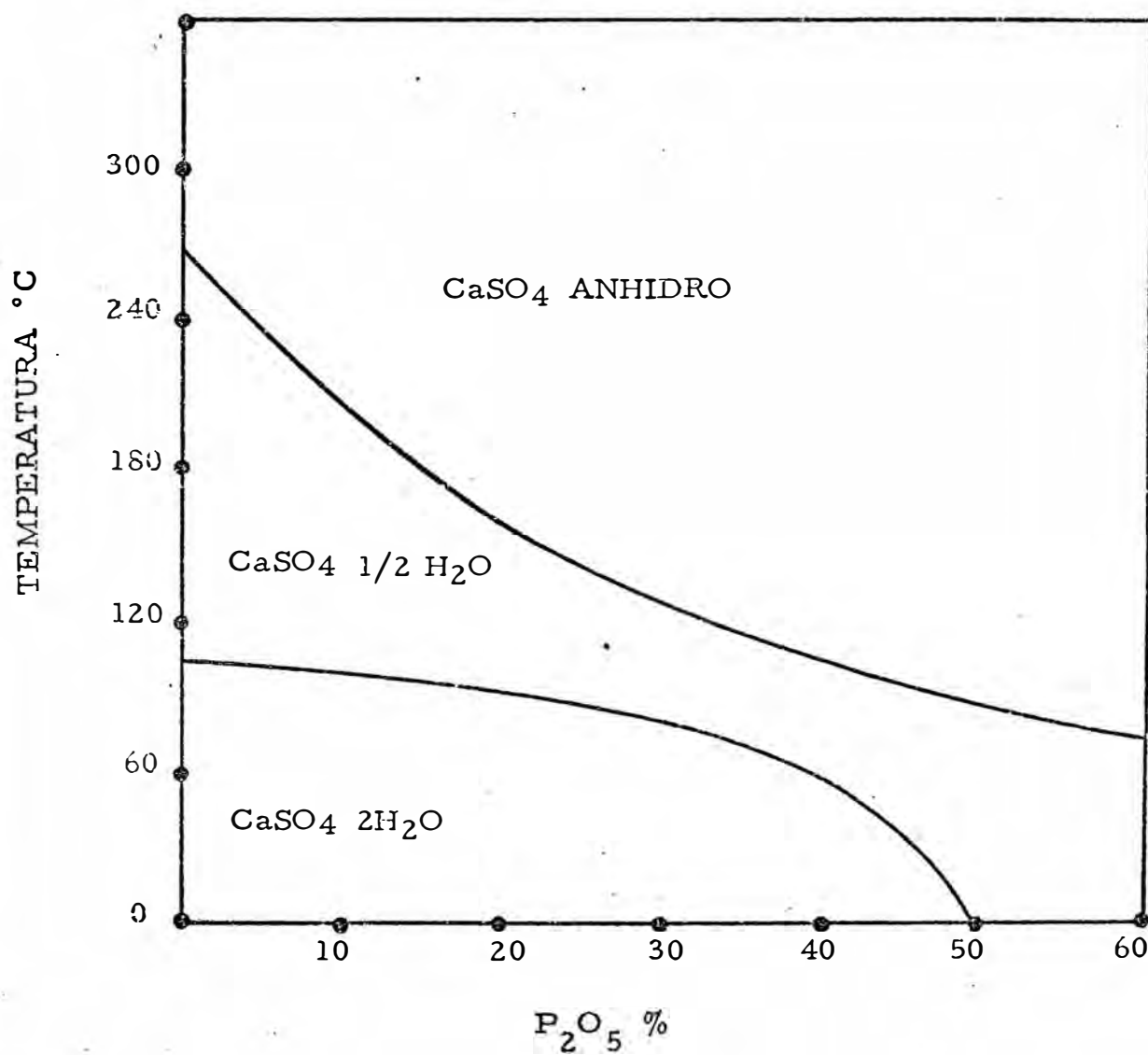
Según Sven Nordengren, científico sueco, la finalidad de un estudio para obtener ácido fosfórico por la vía húmeda debe orientarse a la búsqueda de un lodo filtrable, con cristales de sulfato de calcio estables, aún a altas velocidades de lavado y filtrado (10).

El tipo de cristal depende de la temperatura del lodo y de la concentración de fosfórico en el lodo, además pueden obtenerse cristales estables en todas sus formas (9). Según Van't Hoff, para producir una papilla de fácil filtración debe conducirse la reacción de modo que el sulfato de calcio forme cristales estables y grandes (10).

Este científico realizó los estudios relacionados con las condiciones de formación de los cristales de sulfato de calcio en agua, los estudios de Van't Hoff son resumidos en el gráfico II-1. Es evidente, del gráfico, que si se mantiene suficientemente baja la temperatura de reacción, pueden formarse cristales estables de dihidrato en papillas con una concentración de ácido fosfórico aún mayor de 32% P₂O₅. La dificultad de obtener cristales grandes y fáciles de filtrar, si las aguas madres tienen más de 32% P₂O₅, impone un límite (10).

GRAFICO II-1

INTERVALO DE CRISTALIZACION DE LOS
HIDRATOS DE SULFATO DE CALCIO
SEGUN VAN'T HOFF



2.1.2.6 PROCESO DIHIDRATADO FRENTE A OTROS PROCESOS

El proceso del dihidrato, es el más difundido y considerado como el proceso convencional de la vía húmeda. Su difusión es tal, que se han desarrollado varios procesos comerciales que difieren en las distintas combinaciones de los parámetros de operación, y en ciertas medidas de los costes, obteniéndose en general un producto de 29-32% P2O5. En el cuadro II-5 se presenta las ventajas y desventajas del proceso dihidratado frente a otros procesos (9).

CUADRO II-5

PROCESO DIHIDRATADO FRENTE A OTROS	
DIHIDRATADO	OTROS
VENTAJAS	
<ul style="list-style-type: none"> * Bajas temperaturas de trabajo. * Menores costos de equipos. * Puede usarse telas ordinarias para filtrar. * Pocos problemas durante la filtración. 	<ul style="list-style-type: none"> * La roca fosfórica no necesita molienda fina. * Se produce una mayor recuperación del P2O5 de la roca. * Se puede producir ácido fosfórico más concentrado.
DESVENTAJAS	
<ul style="list-style-type: none"> * La roca fosfórica necesita molienda fina. * Producto de concentración baja. * Tiempos más largos de proceso. * Se requiere una etapa de concentración. 	<ul style="list-style-type: none"> * Trabajar con altas temperaturas. * Alto costo de equipos. * Problemas durante la filtración. * A temperaturas elevadas se presenta el problema de incrustación.

2.2 ACIDO FOSFORICO COMO IMSUMO PARA EL SFT

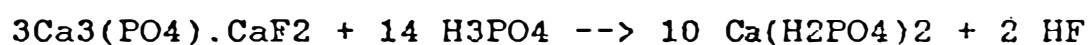
El ácido A.F.G.F. que se obtiene por la vía húmeda (30 %P2O5), concentrado hasta 50 %P2O5 ó más, es usado como insumo para la fabricación de SFT (6).

Un ácido con una concentración mayor que 50 %P2O5, reacciona rápidamente con el fosfato natural y la papilla resultante se solidifica de 3 a 4 minutos después de efectuada la mezcla. Esta propiedad hace posible un procedimiento continuo y bastante sencillo para la preparación del SFT (10).

Si se usa ácido fosfórico débil (menor que 50 %P2O5), se obtendrá un producto con elevado porcentaje de humedad, y habrá necesidad de secarlo puesto que el producto sin secar es bastante pegajoso, en estos casos tendrá que añadirse material seco al producto sin secar para que disminuya la tendencia a formar terrones y a apelmazarse en las paredes del secador (10).

El fabricante puede optar por usar el ácido débil y tener que realizar la desecación del SFT, ó concentrar el ácido hasta 50 %P2O5 o más y no desecar el SFT. Esto último es lo que comunmente se realiza (10).

La reacción que ocurre en la obtención del SFT se puede expresar de la siguiente manera (7):



Según la sociedad nacional de industrias, el Perú importa unas 5000 TMA de ácido fosfórico técnico y alimenticio, pero no se importa ningún volumen de

A.F.G.F., en cambio, como se mencionó en el capítulo I, se importan grandes cantidades de fertilizantes que usan A.F.G.F. como materia prima en su manufactura, estos son el superfosfato triple y el fosfato diamónico.

El cuadro II-6 presenta los volúmenes de estos fertilizantes importados y la cantidad de ácido fosfórico requerido para su manufactura:

CUADRO II-6
REQUERIMIENTO DE A.F.G.F. EN EL PERU

Fertilizante	miles TMA	
	Vol. importado	A.F.G.F. (50% P ₂ O ₅)
SFT	52	34.97
Fosfato diamónico	44	65.13

De este cuadro podemos decir que el Perú requiere de unas 100 mil TMA de A.F.G.F. de 50% P₂O₅, para poder producir tales fertilizantes y cubrir la demanda evitando la importación.

2.3 PRODUCCION DEL ACIDO FOSFORICO

Según investigaciones realizadas por empresas mineras, la mayor producción de ácido fosfórico se realiza en América del norte y Europa como se puede apreciar en el cuadro II-7 donde se muestra la distribución porcentual de la producción de ácido fosfórico en las distintas áreas del mundo (9).

CUADRO II-7

PRODUCCION MUNDIAL DEL ACIDO FOSFORICO

AREA	% Total mundial
AMERICA DEL NORTE	42.5
EUROPA DEL ESTE	20.3
EUROPA OCCIDENTAL	19.0
SUDESTE DE ASIA	4.2
AFRICA DEL NORTE y OESTE	3.8
AMERICA LATINA	3.3
AFRICA	2.8
ORIENTE MEDIO	2.0
ASIA DEL SUR	1.5
OCEANIA	0.6

La producción actual de ácido fosfórico en el mundo, se estima en unos 32 millones de TM de P₂O₅, y de ella solo el 3.3% corresponde a la producción de Latino América. En el cuadro II-8 se observa que México y Brasil tienen la mayor participación en la producción del ácido fosfórico en América Latina (9,16).

CUADRO II-8

PRODUCCION LATINA DEL ACIDO FOSFORICO

PAIS	miles TMA P ₂ O ₅	% TOTAL
BRASIL	378	37.8
MEXICO	500	49.9
VENEZUELA	120	12.1
ECUADOR	7	0.7
TOTAL	1003	100.0

En el anexo II-B se da una relación de los países importadores y exportadores de ácido fosfórico, donde se puede concluir que América Latina no abastece su propia demanda.

2.4 CARACTERISTICA DEL MERCADO DEL ACIDO FOSFORICO

En el cuadro II-9 se muestra la participación estimada del ácido fosfórico, en su gran variedad de usos a nivel mundial (14,17).

CUADRO II-9

CARACTERISTICA DEL MERCADO MUNDIAL

USO	PORCENTAJE (%)
Fertilizantes	92.0
Alimentos de animales	3.3
Detergentes	2.0
Alimentos y bebidas	0.7
Tratamiento de metal	0.7
Tratamiento de agua	0.3
Pasta dental	0.2
Otros	0.4

En Latino América, México y Brasil son los que manejan grandes volúmenes de ácido fosfórico (producción y consumo), siendo Brasil el mercado más representativo, por la gran cantidad de ácido fosfórico tratado.

El cuadro II-10 muestra la característica del mercado de Brasil, como representación del mercado Latino (16).

CUADRO II-10

MERCADO LATINOAMERICANO DEL ACIDO FOSFORICO

USO	PORCENTAJE (%)
Fertilizantes	89.90
Alimenticio	5.05
Galvanoplastia	0.21
Metalurgia	0.02
Otros	4.82

2.5 ESPECIFICACION DEL A.F.G.F.

En vista de que el A.F.G.F., utilizado en la industria de fertilizantes es un ácido impuro, no existen normas técnicas para su pureza, pero si existen ciertas especificaciones, que los consumidores internacionales exigen para este ácido, las cuales son (9):

- Concentración: 54-55 % P₂O₅
- Sólidos: 1 % peso (máximo)
- Densidad: 1.71 g/cc (15 C)

En el cuadro II-11 se presenta el análisis típico para este tipo de ácido.

CUADRO II-11

ANÁLISIS TÍPICO DEL A.F.G.F.

COMPUESTO	A	B
P ₂ O ₅	54 %	55 %
SO ₄	3.2 %	2.5 %
F	3500 ppm	9000 ppm
Fe	9600 ppm.	8500 ppm
Al	3300 ppm	8800 ppm
Ca	100 ppm	500 ppm
Mg	5100 ppm	2500 ppm

El caso A corresponde al ácido producido a partir de la roca de Carolina del Norte, y el caso B corresponde al ácido producido a partir de la roca de Florida (9).

Análisis para ácido fosfórico purificado son presentados en el anexo II-C.

CAPITULO III

MATERIAS PRIMAS PARA OBTENER A.F.G.F.

3.0 INTRODUCCION

En la manufactura del A.F.G.F., mediante el proceso húmedo de vía sulfúrica, solo se necesitan como materia prima, la roca fosfórica ó fosforita y el ácido sulfúrico industrial.

3.1 ROCA FOSFORICA O FOSFORITA

La fosforita, mineralógicamente hablando, contiene minerales del grupo del apatito, que son : Fluorapatito ($\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$), Cloroapatito ($\text{Ca}_5\text{Cl}(\text{PO}_4)_3$) y Hidroxilapatito ($\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$), donde el cloroapatito se presenta raras veces (6).

Prácticamente, todas las rocas fosfóricas que se comercializan mundialmente, contiene como mineral predominante al fluorapatito, y la roca peruana no escapa a esta regla (9).

La roca fosfórica de Bayovar, es comparable con otras rocas del mundo, ya que en la actualidad es el tercer yacimiento más grande del planeta. Esta roca presenta una alta solubilidad en ácido cítrico al 2 % y en citrato de amonio neutro, por lo tanto se le puede considerar como una roca reactiva (9).

Nuestra roca presenta un contenido de flúor, sílice, sodio, y CO_2 que la hacen ventajosa frente a otras

rocas conocidas a nivel mundial, ver anexo III-A, así como su baja e inestable formación de espuma (18).

Del anexo III-A se puede ver que el indeseable flúor, está en menor cantidad en la roca peruana, mientras que la mayor cantidad de sílice, y gran cantidad de sodio, aseguran la eliminación de este elemento como fluosilicato de sodio sólido en el yeso y en la concentración del ácido fosfórico en los procesos de obtención de dicho ácido (15).

3.1.1 YACIMIENTOS EN EL PERU

En el Perú son pocos los lugares que presentan yacimientos importantes de roca fosfórica, en el cuadro III-1 se indican estos lugares así como su contenido promedio de P₂O₅ y su potencial estimado de mineral (9).

CUADRO III-1
FOSFATOS EN EL PERU

YACIMIENTOS	% P ₂ O ₅ prom.	POTENCIAL estimado (millón TM)
BAYOVAR (PIURA)	12 - 20	300
OCUCAJE (ICA)	10 - 12	N.I.
SINCOS (HUANCAYO)	6 - 7	N.I.

N.I.: No hay información

De estos tres yacimientos, el más grande e importante es el de Bayovar.

3.1.2 UBICACION Y GEOLOGIA DEL YACIMIENTOS DE BAYOVAR

UBICACION:

Bayovar se encuentra en el departamento de Piura. La zona que actualmente es explotada, por la empresa Minero-Perú, corresponde al AREA I, cuya ubicación está al noroeste de la depresión del desierto de Sechura, ver FIGURA III-1.

GEOLOGIA:

La formación fosfática, se ubica en la parte superior de la formación Zapallal (mioceno medio), que consta de una secuencia marina de 200 m de espesor. Los estratos están formados por una serie intercalada de fosforita friable (desmenuzables), diatomitas, capas delgadas de areniscas y tufo gris.

El AREA I está formada por una secuencia de horizontes diatomíticos y delgadas capas de fosforita, ver FIGURA' III-2. En esta área se han reconocido 10 capas, que varían en espesor y contenido de P₂O₅, y son las capas C, B, A, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. La capa C tiene bajo contenido de yeso, y se encuentra próxima a la superficie. En esta área no se han producido deformaciones estructurales que hayan modificado las disposiciones de las capas.

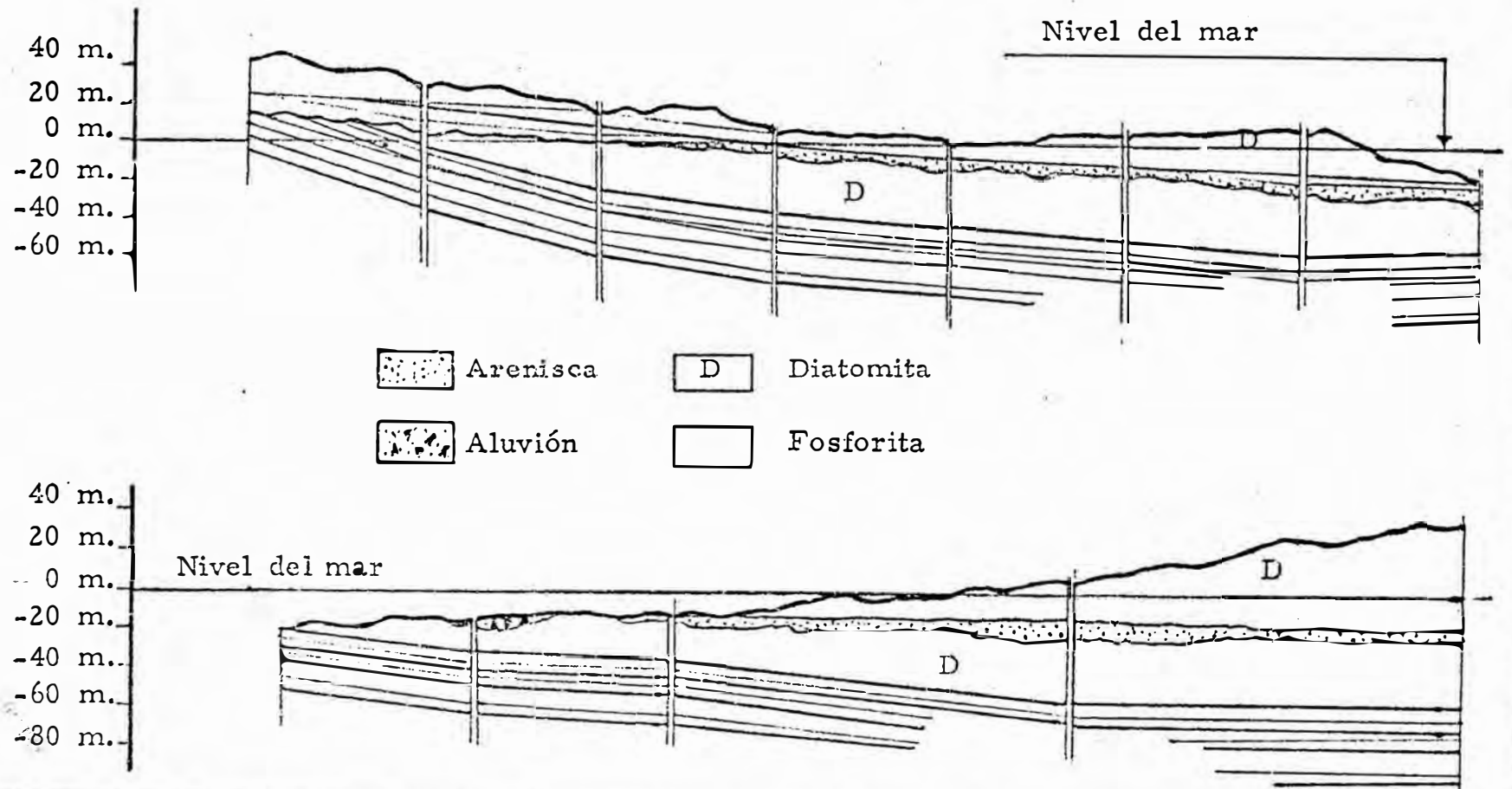
Los estratos, tanto de diatomita como de fosforita, son de consistencia friable, pero a su vez, se mantienen estables en operaciones de minado (9).

FIGURA III-1
UBICACION DEL YACIMIENTO
ACTUALMENTE EXPLOTADO
(AREA I)



FIGURA III-2

ESTRATOS QUE FORMAN EL AREA I DE LOS
YACIMIENTOS DE FOSFATO MINERAL



3.1.3 RESERVAS GEOLOGICAS

En 1983 Minero-Perú realizó el cálculo de reservas del AREA I, por el método poligonal solo en las capas C, B, A y 1. Los parámetros usados son:

- Potencia de las capas (espesor promedio, m)
- Area del poligono (m²)
- Gravedad especifica (G.E.)
- Ley de las capas (% P2O₅)
- Humedad de las capas ó intercapas.

En los cálculos no se tomó en cuenta las pérdidas metalúrgicas y de minado. El resumen de los cálculos realizados, se presentan en el cuadro III-2 (9). Los cálculos detallados se presentan en el anexo III-B.

CUADRO III-2
RESUMEN DE LAS RESERVAS

CAPA	T.M.S.	LEY prom.	POTENCIA prom.
C	6 128 156	23.24	1.140
B	1 807 927	17.52	0.534
A	1 752 329	15.07	0.633
1	5 133 295	19.42	0.980
TOTAL	14'821,707	20.25	0.951

T.M.S.: Tonelada metrica seca.

En forma global, Bayovar cuenta con una reserva probada de 280 millones TM de roca con 30% de P2O₅, además de una reserva potencial de más de 1000 millones TM, cantidad suficiente para abastecer al mundo por espacio de 30 años (3).

3.1.4 TRATAMIENTO DEL MINERAL

El mineral extraído de los minados, es sometido a un proceso de enriquecimiento de P_2O_5 , mediante lavados y restregados (7).

El proceso de concentración de la roca fosfórica, consta de las siguientes operaciones básicas:

- RESTREGADO.- Cuya finalidad es disgregar el mineral y liberar los •olitos de fosfatos, de los recubrimientos de diatomitas.
- DESLAMADO.- Que consiste en eliminar las lamas diatomíticas, material de granulometría muy fina y pobre en fosfatos.
- FILTRACION Y LAVADO CON AGUA DULCE.- Para eliminar los cloruros impregnados.
- SECADO.- Para disminuir la humedad de 14 a 2 %.

Las dos primeras operaciones se realizan utilizando agua de mar; después del deslamado la ley del producto, es de aproximadamente 30.5 % P_2O_5 cuando se beneficia la capa C, sin recurrir a la flotación.

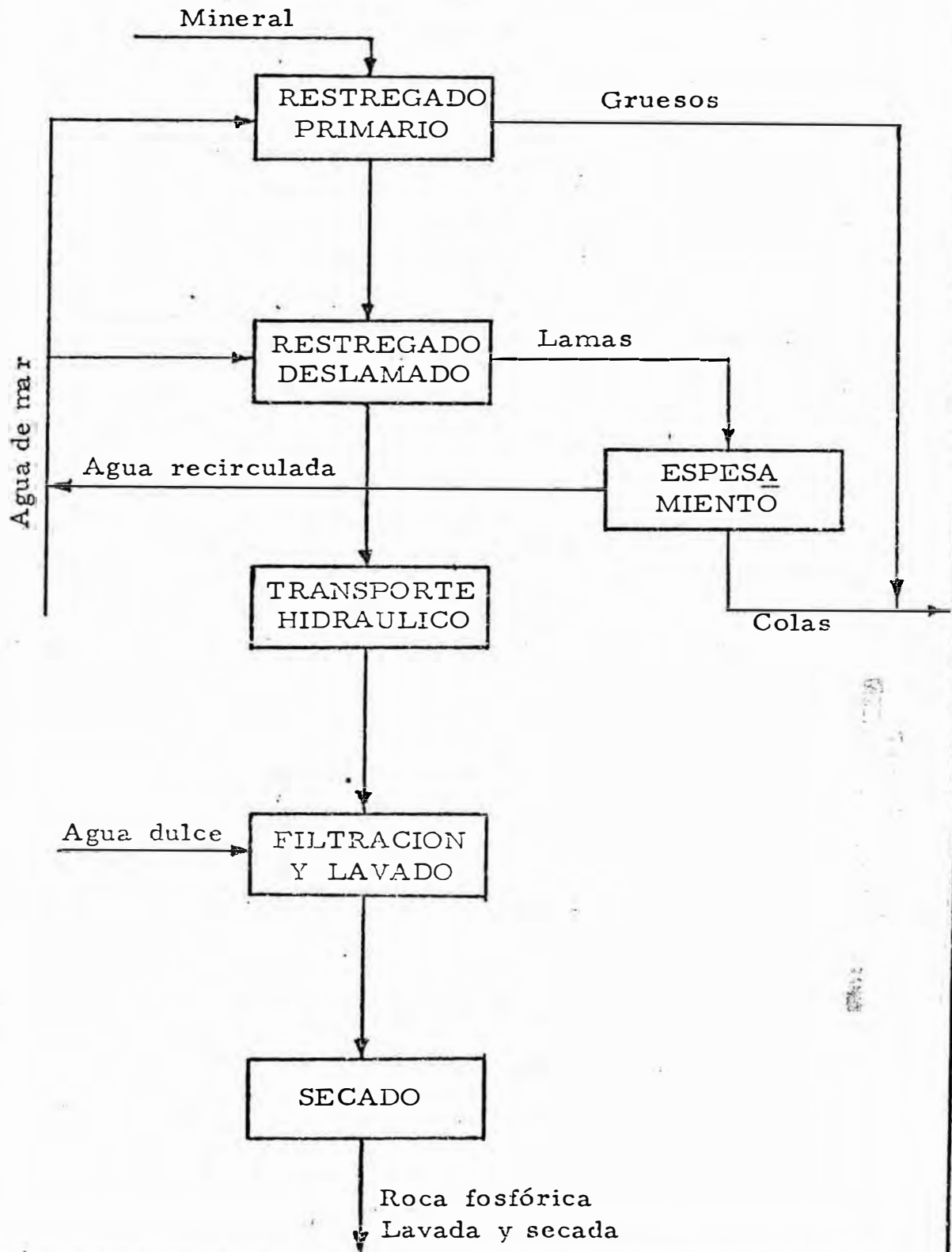
El lavado del mineral consta principalmente de varias etapas sucesivas de restregado y deslamado, así como dos etapas de tamizado. Al final de estas operaciones el material tiene una granulometría entre 35-200 mallas tyler.

El diagrama de bloques del proceso es presentado en la FIGURA III-3:

Las características principales del mineral a tratar y

FIGURA III-3

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL TRATAMIENTO QUE SE LE DA A LOS FOSFATOS MINERALES



del concentrado producido, son los siguientes:

MINERAL

- Ley 18 % P₂O₅ (mínimo)
- Humedad 15-20 %
- Sales solubles ... 2-8 %

CONCENTRADO (promedio)

- ley 30.5 % P₂O₅ (base seca)
- Humedad 8 %
- Cloruros 0.06 % (máximo)

De estos datos se deduce que en la planta concentradora, para producir 6 TM (base seca) de concentrado de 30.5 % P₂O₅, se necesita tratar aproximadamente 10 TM (base seca) de mineral.

3.1.5 PRODUCCION EN BAYOVAR

La empresa Minero-Perú cuenta con una planta concentradora, capaz de producir 90 mil TMA de roca con 30.5 % P₂O₅.

Actualmente el mercado para esta roca es muy reducido en nuestro país, ya que solo existe una compañía que consume aprox. 15 000 TMA para producir superfosfato simple, por lo que el stock de roca en Bayovar es muy grande, a tal punto que se ha detenido la producción de roca concentrada (9).

Por esta razón, urge darle uso a este recurso en la mayor brevedad posible.

3.2 ACIDO SULFURICO

El ácido sulfúrico industrial, de fórmula H_2SO_4 , generalmente tiene una concentración de 35 a 95 % peso. En el Perú gran parte del sulfúrico producido, se obtiene por aprovechamiento de los gases de tostación de los procesos metalúrgicos, los cuales son de gran importancia para el país (9).

Por esta razón, el costo del ácido sulfúrico es relativamente bajo, pero debido al incremento de su uso por los narcotraficantes, es que su venta ha sido restringida enormemente en nuestro país.

En el Perú, las empresas que producen importantes cantidades de ácido sulfúrico para el mercado nacional son:

- MINERO PERU (Refinería de zinc en Cajamarquilla)

CENTROMIN PERU (Cerro de Pasco)

La producción actual de Minero Perú es aproximadamente 180 mil TMA, de los cuales 100 mil TMA es para el consumo interno (ref. de zinc y Cerro verde), y de las 80 mil TMA restantes la mitad se exporta y la otra mitad es para el mercado nacional.

La producción de Centromin Perú es de aproximadamente 20 mil TMA, las que se destinan para el consumo nacional.

Minero Perú proyecta, para el futuro, reducir el consumo de ácido sulfúrico en Cerro verde, con lo cual dispondría de más ácido para el mercado nacional.

Ninguna de estas empresas tiene proyectada una ampliación de planta en un futuro próximo.

El cuadro II-3 presenta una distribución estimada del ácido sulfúrico en el mercado nacional (9).

CUADRO III-3

MERCADO NACIONAL DEL ACIDO SULFURICO

USO	PORCENTAJE (%)
Mineria	50
Ind. química	20
Ind. sulfatera	20
Fertilizantes	1
Otros	9

3.2.1 NORMAS TECNICAS

La norma técnica ITINTEC 311.001 establece tres grados para el ácido sulfúrico:

- Grado A , ó técnicamente puro
- Grado B , ó industrial
- Grado C , para baterías.

En los cuadros III-4 y III-5 se presentan las características físicas y las tolerancias de impurezas para cada uno de los grados mencionados anteriormente.

CUADRO III-4

CARACTERISTICAS FISICAS DEL SULFURICO

GRADO	A	B	C
% peso minimo H ₂ SO ₄	95	95	93
g/cc (20 C) DENSIDAD min.	1.834	1.834	1.828
ASPECTO	Ligeramente turbio	turbio	transparente

CUADRO III-5

TOLERANCIA DE IMPURESAS (p.p.m.)

GRADO	A	B	C
Amonio, NH ₄ ⁺	-	-	10
Sb	1	-	1
As	1	30	1
Cl ⁻	20	20	10
Cu	0.5	-	50
Fe	50	150	50
Mn	0.5	-	0.2
Met. pesados, como Pb	5	50	10
Ni	0.5	-	1
NO ₃ ⁻	5	10	5
Pt	-	-	0
Se	5	-	20
Zn	-	-	40
Oxidantes ó reductores, como SO ₂	40	40	10
Residuos por calcinación	100	500	300

CAPITULO IV

ESTUDIO EXPERIMENTAL

4.0 GENERALIDADES

El procedimiento de obtención a desarrollarse para obtener A.F.G.F. es el de la vía húmeda; haciendo reaccionar roca fosfórica con ácido sulfúrico, en el cual se obtiene como subproducto sulfato de calcio (yeso); la calidad de este subproducto depende de las condiciones de trabajo, principalmente de la temperatura (19).

Convencionalmente los procesos de vía húmeda trabajan a temperaturas menores de 100 C (6); por ello es que nuestro estudio se realizará tomando en consideración este límite de temperatura, también se recomienda el uso de roca que tenga una finura promedio tal, que un mayor porcentaje pase la malla 100 Tyler (18).

Este estudio tiene como fin, desarrollar un proceso de obtención de A.F.G.F. a partir de los fosfatos de Bayovar, tratando de conseguir la mayor extracción de P₂O₅ de la roca, mediante un lodo que brinde gran facilidad de filtración, y poder obtener un producto de concentraciones adecuadas para su uso en fertilizantes, tal como se mencionó en el capítulo II.

4.1 ESTUDIO DE LA MATERIA PRIMA

4.1.1 ROCA FOSFORICA

CARACTERISTICAS FISICAS:

Las características físicas del concentrado de roca

fosfórica de Bayovar, proporcionadas por Minero-Perú, se presentan en la tabla IV-1, y el tamaño de partícula en la tabla IV-2:

TABLA IV-1

PROPIEDADES FISICAS DE LA ROCA FOSFORICA

ASPECTO	Roca arenosa, color beige.
DENSIDAD APARENTE	1.51 g/cc
DENSIDAD REAL	2.65 g/cc
HUMEDAD	2.3 % peso
PERDIDAS A 800 C (sin humedad)	6.37 % peso

TABLA IV-2

TAMAÑO DE PARTICULAS DE LA ROCA DE BAYOVAR

Rango de mallas Tyler	% peso
--- - 60	3.95
60 - 80	5.18
80 - 100	41.30
100 - 120	32.90
120 - 140	11.42
140 - 150	0.08
150 - 170	2.86
170 - 180	0.65
180 - 200	0.55
200 - ---	1.11

Como se observa en la TABLA IV-2, el mayor porcentaje de las partículas del concentrado están en las mallas 80-100 y 100-120.

El tamaño de partícula es un factor importante en las reacciones químicas, puesto que partículas pequeñas brindan mayor área de ataque, y permite el trabajo a menor temperatura (6).

La siguiente toma corresponde al concentrado de Bayovar visto bajo el microscopio a una ampliación de 50 aumentos.



CARACTERISTICAS QUIMICAS:

El cuadro IV-1 nos muestra el análisis químico del concentrado de Bayovar proporcionado por Minero-Perú.

CUADRO IV-1
ANALISIS QUIMICO DE LA ROCA

Compuesto	% peso	Compuesto	% peso
P2O5	30.50	CaO	46.95
F	2.11	Al2O3	0.82
Na2O	1.27	Fe2O3	0.60
SiO2	2.55	CO2	3.94

El bajo contenido de flúor y la mayor presencia de

silice y sodio, comparado con otras rocas a nivel mundial, vease anexo III-A, presenta ventajas en lo que a contaminación ambiental y del producto se refiere. La silice y el sodio eliminan al flúor como precipitado de fluosilicato de sodio (15).

4.1.2 ACIDO SULFURICO

CARACTERISTICAS FISICAS:

En la tabla IV-3 se muestran las características físicas del ácido sulfúrico utilizado en las pruebas.

TABLA IV-3

PROPIEDADES FISICAS DEL ACIDO SULFURICO

Aspecto	Líquido aceitoso, color marrón
Densidad	1.84 g/cc
Viscosidad	27.16 cp
Concentración	35.68 N ; 17.84 M ; 95 % peso
Peso molecular	98

CARACTERISTICAS QUIMICAS:

El cuadro IV-2 nos muestra el análisis químico del ácido sulfúrico, proporcionado por Centromin Perú.

CUADRO IV-2

ANALISIS QUIMICO DEL SULFURICO

Compuesto	ppm	Compuesto	ppm
Fe	28.00	As	0.10
Cl	0.08	Pb	1.20
Sb	0.04	Mn	0.50
Se	0.50	SO ₂	43.00
Ni	0.08	Zn	0.53
Cu	0.20	NO ₃	0.10

4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 EQUIPOS USADOS EN EL LABORATORIO

Los principales equipos y materiales usados en el laboratorio, se detallan en la siguiente secuencia.

La muestra de roca es pesada en una balanza de plato, y es colocada en un vaso de vidrio de 1 litro junto con un fluido de volumen conocido, dándole agitación manual fuerte para suspender la roca y facilitar su ataque.

La temperatura de reacción es mantenida mediante una plancha eléctrica regulable. Finalizada la reacción se pasa a una etapa de filtración al vacío, para lo cual se usó un embudo bushner de 113 cm² de área y un kitasato de 500 ml, el vacío utilizado fué de 300 mmHg. Como filtro se utilizó una tela de poliseda blanca, posteriormente la torta fué lavada con agua la cual fué previamente calentada hasta más de 80 C en una cocinilla eléctrica, luego del lavado, la torta húmeda fué secada en una mufla.

El filtrado obtenido (30% P2O5) fué concentrado hasta 50% P2O5 en cristalizadores de vidrio de 62 cm² de área.

En todos los casos, la densidad se determinó usando picnómetros de 20 ml y una balanza analítica de un milésimo de precisión.

4.2.2 ANALISIS DE P2O5

El análisis de P2O5 utiliza como reactivo principal (selectivo) el molibdato de amonio, el cual hace precipitar exclusivamente al fósforo de la muestra, en forma de fosfomolibdato de amonio (sólido amarillo), este sólido se filtra y lava para eliminar la acidez, y luego es disuelto con NaOH en exceso, este exceso es valorado con HCl obteniéndose por diferencia la cantidad de base que reaccionó con el sólido; usando dicho valor se determina el contenido de P2O5 en la muestra analizada.

La marcha analítica de la determinación del fósforo como P2O5, se detalla en el anexo IV-A.

4.2.3 PRIMERA PARTE EXPERIMENTAL

Siendo la reacción entre la roca fosfórica y el ácido sulfúrico, una reacción sólido-liquido, esta etapa tiene como objetivos conocer el comportamiento de la reacción y esquematizar un proceso de obtención de ácido fosfórico.

Para determinar el comportamiento de la reacción se buscó conocer lo siguiente:

- a) Elevación de la temperatura de la mezcla reaccionante, debido a que es una reacción exotérmica.
- b) Dificultad en el mezclado

c) Liberación de gases

d) dosificación de reactantes

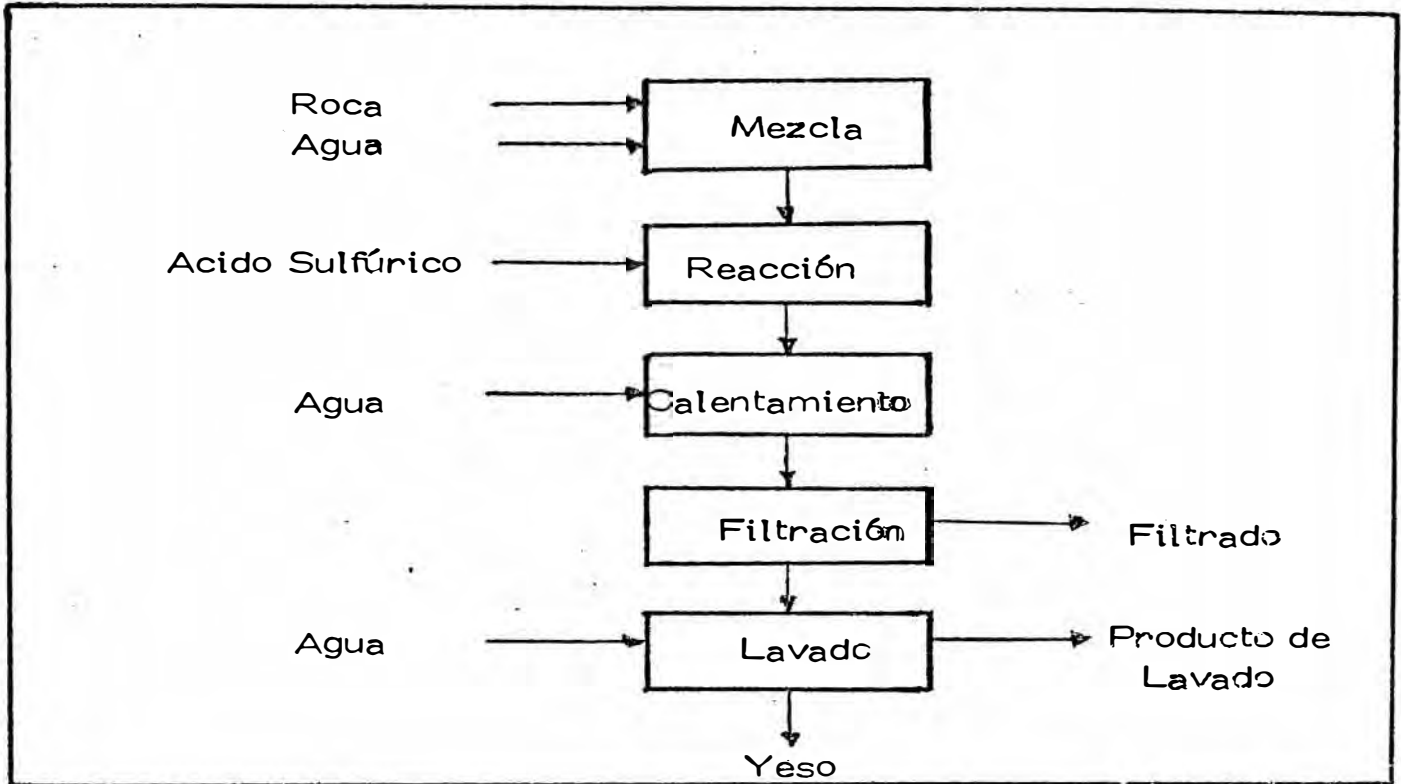
Para lo cual se recurrió a ensayos preliminares y a partir de ellos se establecieron ciertas condiciones adecuadas para la reacción.

Teniendo en cuenta los resultados de estos ensayos se pudo concluir que la roca debe estar suspendida en un medio fluido para poder lograr el ataque efectivo con ácido sulfúrico evitando la solidificación de la masa reaccionante. Se debe tener en cuenta que una alta concentración de H_2SO_4 en contacto con el mineral ocasiona una pobre recuperación de P_2O_5 , esto puede deberse a la precipitación del yeso formado sobre el fosfato mineral impidiendo la total digestión con ácido sulfúrico (19). Para evitar la elevada concentración de sulfatos durante el ataque de la roca, el flujo de ácido sulfúrico no debe ser alto para dar tiempo a su reacción completa.

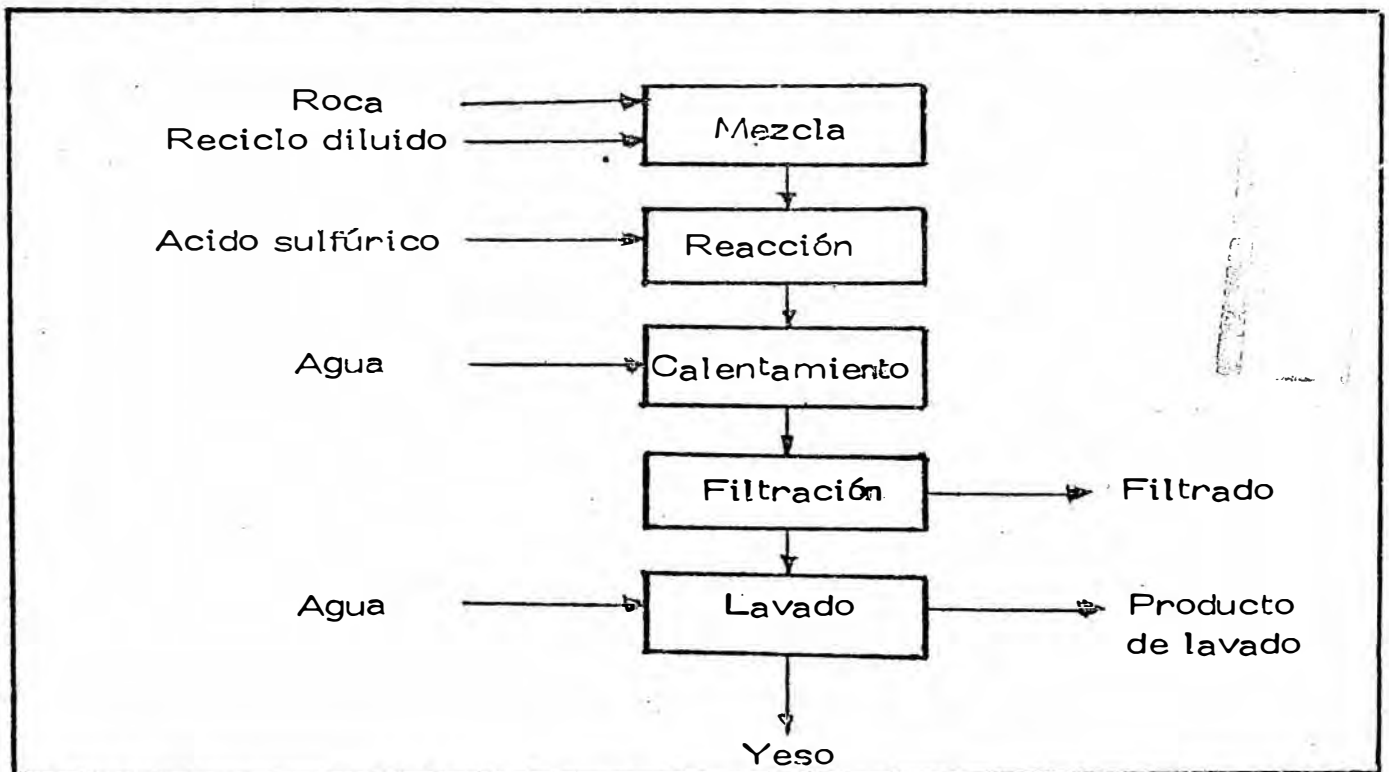
Una vez conocido el comportamiento de la reacción, se plantearon dos procesos para ser estudiado en forma sistemática, ver ESQUEMAS IV-1 y IV-2. El proceso seguido en el esquema IV-1 se caracteriza porque la roca es fluidizada con agua, mientras que en el proceso del esquema IV-2 la roca se fluidiza con un reciclo diluido.

Para estas pruebas se utilizaron tamaños de muestras de 50 gramos de roca.

ESQUEMA IV - I PROCESO USANDO AGUA EN LA MEZCLA



ESQUEMA IV - 2 PROCESO USANDO PRODUCTO DILUIDO EN LA MEZCLA



A fin de facilitar la mayor comprensión de los cuadros, donde se presentan los resultados de las pruebas que serán estudiadas, presentamos la siguiente nomenclatura que será utilizada en forma conveniente en los reportes de las pruebas:

RO: Peso de concentrado de roca fosfórica de 30% P2O5

AC: Peso de ácido sulfúrico al 100%

Ai: Peso de agua inicial

Aa: Peso de agua adicional

tf: Tiempo de filtración

Dp: Densidad del producto

Cp: Concentración del producto

P2O5 FI: Peso de P2O5 en el filtrado

P2O5 LA: Peso total de P2O5 en el producto de lavado

P2O5 EN: Peso total de P2O5 de entrada

P2O5 RT: Peso de P2O5 retenido en la torta al final
del proceso

P2O5 RO: Peso de P2O5 en la roca de alimentación

REi: Peso de producto diluido inicial

REa: Peso de producto diluido adicional

REs: Peso de producto semiconcentrado

T: Temperatura

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, siguiendo los ESQUEMAS IV-1 y IV-2, son reportados en el cuadro IV-3:

CUADRO IV-3

RESULTADOS DE LA PRIMERA PARTE EXPERIMENTAL

ITEM	PROCESO USANDO	PROCESO USANDO	
	AGUA	PRODUCTO DILUIDO A	PRODUCTO DILUIDO B
RO/AC (g/g)	1.3	1.3	1.3
Ai/RO (g/g)	2.0	---	---
Aa/RO (g/g)	3.6	2.6	2.6
REi/RO (g/g)	---	2.06	2.24
REa/RO (g/g)	---	---	---
T (C)	70-80	70-80	70-80
PRODUCTO:			
tf (min)	7	4	9
Dp (g/ml)	1.080	1.125	1.130
Cp (%P2O5)	8.6	14.1	14.9
RECUPERACION DE P2O5:			
P2O5 FI /P2O5 EN (%)	55.7	52.0	34.0
P2O5 LA /P2O5 EN (%)	30.0	46.0	54.6
P2O5 RT /P2O5 RO (%)	14.3	2.5	22.4

En el proceso del ESQUEMA IV-2, se realizan dos tipos de pruebas: la prueba A usó un producto diluido de 4% P2O5 y la prueba B un producto diluido de 13% P2O5.

Se puede observar que los procesos que usaron un reciclo diluido para humectar la roca, arrojan un producto de mayor concentración que el proceso que usó agua para humectar la roca. Por ello no conviene usar agua durante las etapas de mezcla y calentamiento, su uso debe limitarse solo al lavado de la torta para recuperar el P2O5 retenido y obtener un reciclo diluido.

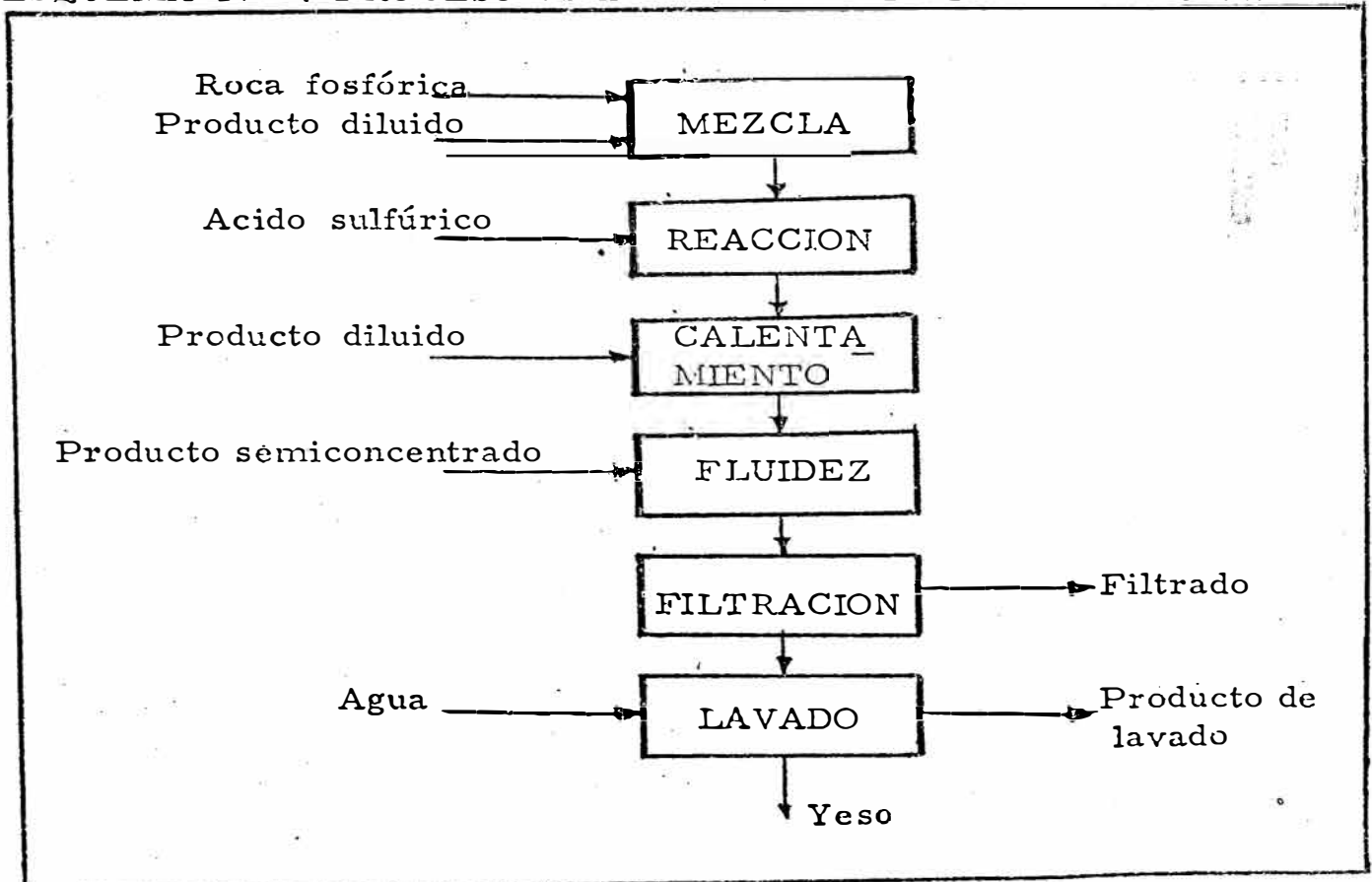
El proceso que utiliza reciclo diluido, presenta la posibilidad de obtener menor pérdida de P2O5 que el proceso que utiliza agua, como lo indica la variable P2O5 RT /P2O5 RO.

4.2.4 SEGUNDA PARTE EXPERIMENTAL

En vista de que aún el mejor proceso de la primera parte presenta un producto de baja concentración, respecto a los procesos comerciales, esta segunda parte tiene por objeto llegar a una mayor concentración del producto, y obtener un proceso óptimo para ser estudiado, es decir:

- a) Alcanzar mayores niveles de P205 en el producto, utilizando producto semiconcentrado despues del calentamiento (ver ESQUEMA IV-3).
- b) Definir un proceso adecuado para realizar el estudio de sus parametros.

ESQUEMA IV-3: PROCESO USANDO PRODUCTO SEMICONCENTRADO



Los resultados de las pruebas del proceso del ESQUEMA IV-3, se reportan en el cuadro IV-4.

CUADRO IV-4

RESULTADOS DE LA SEGUNDA PARTE EXPERIMENTAL

ITEM	PROCESO USANDO PRODUCTO SEMICONCENTRADO
RO/AC (g/g)	1.3
REi/RO (g/g)	3.3
REa/RO (g/g)	1.1
REs/RO (g/g)	1.24
T (C)	70-80
PRODUCTO:	
tf (min)	10
Dp (g/ml)	1.370
Cp (%P2O5)	29.0
RECUPERACION DE P2O5:	
P2O5 FI /P2O5 EN (%)	57.0
P2O5 LA /P2O5 EN (%)	40.5
P2O5 RT /P2O5 RO (%)	8.0

Se observa que usando reciclo semiconcentrado (20% P2O5) en la etapa de fluidez, la concentración del producto puede llegar hasta los 30% P2O5, concentración similar a la obtenida por el proceso del dihidrato.

Esta etapa de fluidez permite obtener un lodo que facilita la operación de filtración lograndose obtener una buena recuperación de P2O5 en el filtrado y en el lavado, como lo indican las relaciones P2O5 FI /P2O5 EN y P2O5 LA /P2O5 EN.

También este nuevo proceso ofrece una muy buena recuperación de P2O5 de la roca, como se puede deducir de la variable P2O5 RT /P2O5 RO.

Cabe indicar que en todas las pruebas anteriores se mantuvo el mismo tiempo de duración de cada etapa a excepción de la etapa de filtrado, la cual se considera finalizada cuando no se nota goteo de filtrado.

También se puede mencionar que la cantidad de agua utilizada durante la etapa de filtración debe ser la suficiente para obtener el reciclado necesario para el proceso, además de asegurar la recuperación del P205 atrapado en la torta después de filtrado el producto. El uso de agua caliente es conveniente para la mayor recuperación del P205.

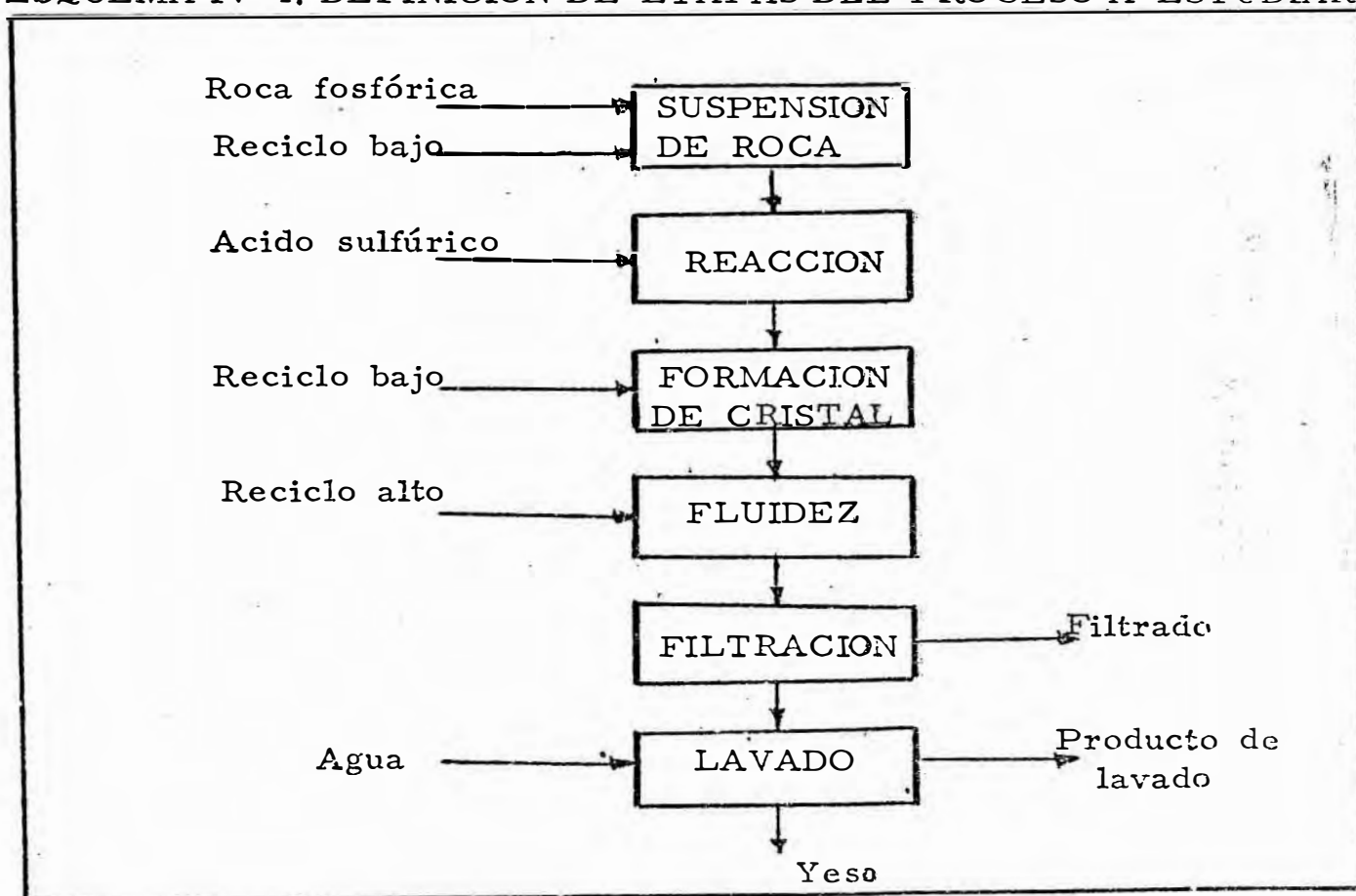
De los tres esquemas probados, el ESQUEMA IV-3 presenta el proceso cuyos resultados son los más próximos a los obtenidos en los procesos comerciales, por lo tanto este último es el proceso que conviene ser definido y estudiado.

4.2.5 DEFINICION DEL PROCESO Y DESCRIPCION

Basados en los resultados de las pruebas experimentales anteriores, se define el proceso adecuado, para realizar los estudios de parámetros como temperatura de proceso, tiempos de las etapas, y cantidades de los reactantes, con el fin de alcanzar las metas esperadas en todo proceso de vía húmeda comercial.

Las etapas de este proceso, donde se usa reciclaje de ácido fosfórico, son presentadas en el ESQUEMA IV-4 y la descripción en forma detallada de tales etapas es presentada en el cuadro IV-5.

ESQUEMA IV-4: DEFINICION DE ETAPAS DEL PROCESO A ESTUDIAR



CUADRO IV-5

DESCRIPCION DE ETAPAS DEL PROCESO DEFINIDO

=====

SUSPENSION.- Etapa donde se prepara a la roca para el ataque con sulfúrico. La roca se mezcla con un reciclo de ácido fosfórico diluido (RECICLO BAJO), para que la roca pase a la forma de monofosfato de calcio, y además poder tener a la roca dispersa, mediante agitación, para ser atacada por el ácido sulfúrico.

REACCION.- Etapa donde reacciona la roca formando ácido fosfórico. La mezcla anterior es atacada con sulfúrico industrial concentrado, controlandose su adición debido a que es una reacción exotérmica. El tiempo de esta etapa viene a ser el tiempo de adición del sulfúrico.

FORMACION DE CRISTALES.- Etapa donde ocurre la aglomeración, formación y estabilización de los cristales de sulfato de calcio dihidratado. La masa reaccionante concluye su reacción y se van desarrollando los cristales del yeso y para esto se recurre a una agitación lenta.

FLUIDEZ.- Etapa donde se obtiene una masa fluida, apta para la filtración. La masa anterior es fluidizada con un reciclo de ácido fosfórico semiconcentrado (RECICLO ALTO), y que mediante agitación, dicho reciclo alto eleva su concentración, resultando también una masa con facilidad de filtración

FILTRACION.- Etapa donde se separa el ácido fosfórico del yeso usando un filtro de vacío, al líquido obtenido lo llamaremos, FILTRADO.

LAVADO.- Etapa donde se recupera el producto retenido en la torta. La torta es lavada con agua caliente, a fin de recuperar la mayor cantidad de producto retenido en la torta. Al líquido obtenido en esta etapa lo llamaremos PRODUCTO DE LAVADO.

=====

4.3 EFECTO DE VARIABLES EN EL PROCESO SELECCIONADO

Este trabajo se realizó con la finalidad de conocer el comportamiento de las variables involucradas, y poder llegar a las metas deseadas, mencionadas en el capítulo II.

Para facilitar la comprensión de los resultados que se reportarán mas adelante, definimos las siguientes variables, adicionales a las definidas anteriormente:

RB: Peso de recicló bajo

RA: Peso de recicló alto

BT: Peso de líquido retenido en la torta al final del proceso

t R: Tiempo de reacción

t FC: Tiempo de formación de cristales

V.RA: Volumen de recicló alto

V.AC: Volumen de sulfúrico 95%

Durante todo el estudio de efectos de variables del proceso seleccionado, se trabajó con muestras de 50g de roca fosfórica, con un recicló bajo de 8-10% P205 y con un recicló alto de 17-20% P205.

Basados en las pruebas experimentales anteriores, asignamos los tiempos que serán tomados como base inicial para cada una de las etapas del proceso en estudio, los cuales son mostrados en el tabla IV-4:

TABLA IV-4

TIEMPOS BASE DE LAS ETAPAS DEL PROCESO DE ESTUDIO

ETAPA	TIEMPO
SUSPENSION	0.5 hrs
REACCION	1.5 hrs
FORMACION DE CRISTALES	3.0 hrs
FLUIDEZ	0.5 hrs
FILTRACION	5 min
LAVADO	2 min

Las variables que consideramos principales, dentro de los resultados, y que nos ayudan a visualizar si las metas buscadas están siendo alcanzadas, son:

1) La variable C_p nos representa la CONCENTRACION DEL PRODUCTO , la cual nos indica el contenido de P205 que se alcanza en el filtrado.

2) La relación RT/RO , nos representa el peso de liquido que es retenido en la torta luego del lavado; experimentalmente se pudo observar que cuando la filtración era más difícil, el valor de esta relación aumenta, por lo tanto este valor nos indica la FACILIDAD DE FILTRACION.

3) La relación $P205 RT / P205 RO$, nos representa el porcentaje de P205 que se pierde junto con la torta, luego este valor restado de 100 nos estará indicando la RECUPERACION DE P205 de la roca.

4.3.1 EFECTO DE TEMPERATURA

Como ya mencionamos los procesos convencionales trabajan a temperaturas menores que 100 C. En nuestro estudio se probaron los siguientes rangos:

70-75 C, 80-85 C y 90-95 C.

Cuando la roca no es muy fina, mas gruesa que la malla 200 Tyler, no conviene trabajar a menos de 70 C, porque la reactividad de la roca es baja (6).

Para este estudio los tiempos de las etapas son los que se indican en la tabla IV-4, y los resultados obtenidos se reportan en el cuadro IV-6; también se muestran en los GRAFICOS IV-1, IV-2 y IV-3, el comportamiento de las variables principales.

CUADRO IV-6

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE EFECTOS DE TEMPERATURA

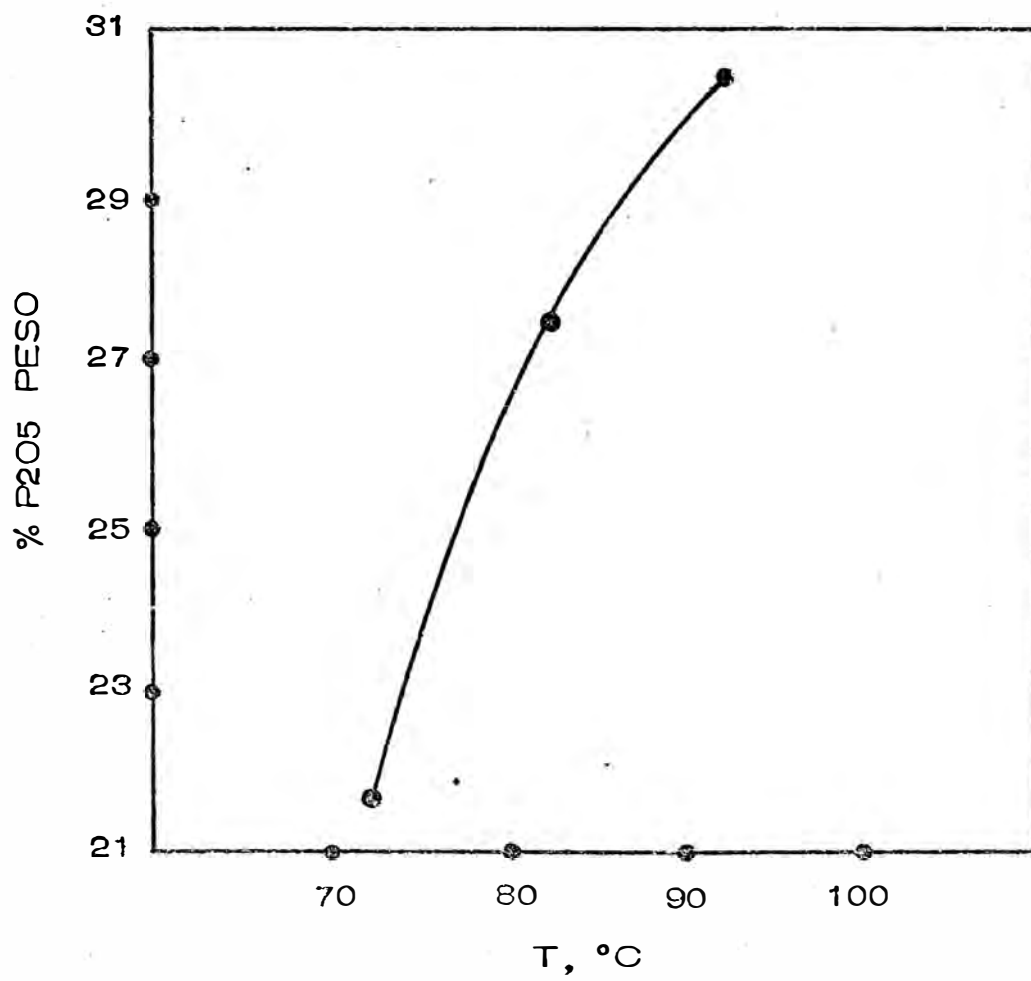
=====		=====		
VARIABLES		P R U E B A S		
=====		=====		
T (C)		70-75	80-85	90-95

RO/AC (g/g)		1.3	1.3	1.3
RB/RO (g/g)		4.3	4.3	4.3
RA/RO (g/g)		1.24	1.24	1.24
PRODUCTO:				
Dp (g/ml)		1.270	1.375	1.406
Cp (%P2O5)		21.73	27.53	30.43
RECUPERACION DE P2O5:				
P2O5 FI /P2O5 EN (%)		45.9	56.6	38.3
P2O5 LA /P2O5 EN (%)		39.4	43.2	47.3
P2O5 RT /P2O5 RO (%)		38.6	0.7	37.3

RT/RO (%)		146	58	74

GRAFICO IV - 1

Variación de la concentración del producto con la temperatura de trabajo



Variación del peso de líquido retenido en la torta al final del proceso, con la temperatura de trabajo

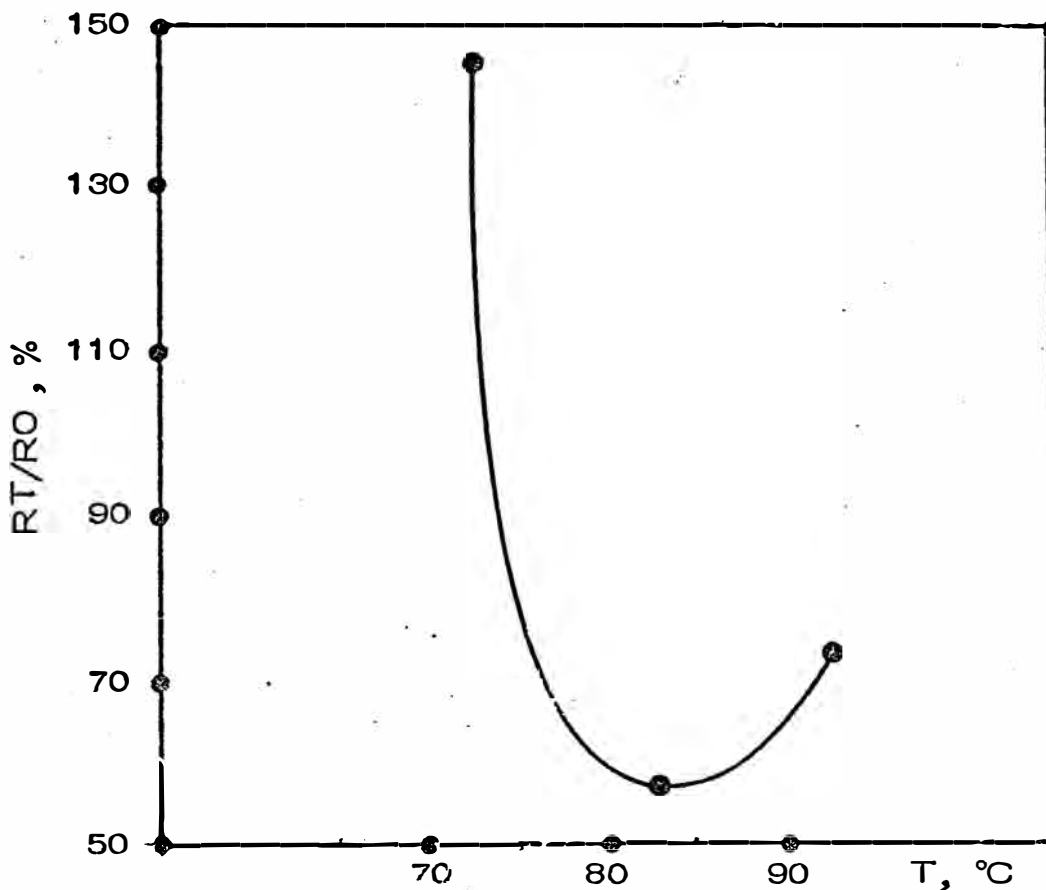
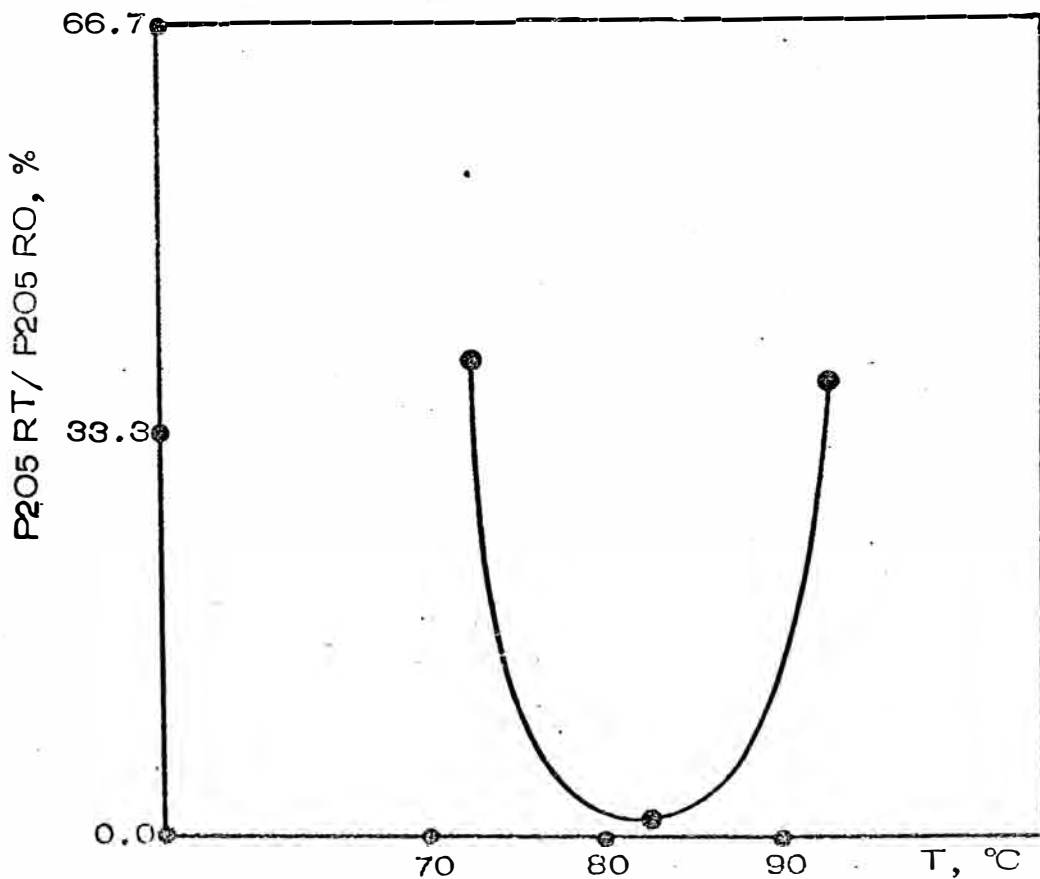


GRAFICO IV - 3

Variación del peso de P2O5 retenido en la torta al final del proceso, con la temperatura



En el GRAFICO IV-1 se observa que se logra concentraciones importantes del producto trabajando a mayor temperatura.

La mejor recuperación de P2O5 de la roca se logra trabajando a 80-85 C, según se indica en el GRAFICO IV-3.

Como se dijo con anterioridad, la mayor facilidad de filtración dá como consecuencia, un menor peso de liquido retenido en la torta al final del proceso, entonces del GRAFICO IV-2 podemos decir que la mayor facilidad de filtración se presentó cuando trabajamos a 80-85 C, todo lo contrario ocurrió trabajando a otras temperaturas.

En vista de que los mejores resultados de las pruebas fueron alcanzados cuando se trabajó a temperaturas de 80-85 C, se elige esta temperatura como la adecuada para continuar con el estudio de las variables.

4.3.2 EFECTOS DE TIEMPOS

En el proceso de estudio, el tiempo de suspensión y de fluidez, no influyen en gran forma sobre el producto, según pruebas preliminares, y podemos decir que con 0.5 hrs para cada una de estas etapas logramos cumplir su función.

Las etapas más importantes del proceso, cuyos tiempos influyen en el producto y en las metas perseguidas, son la etapa de reacción y la etapa de formación de

crisales (10), por esta razón estudiaremos los efectos del tiempo de dichas etapas, trabajando a 80-85 C.

4.3.2.1 TIEMPOS EN LA ETAPA DE REACCION

En las pruebas realizadas se utilizaron los siguientes tiempos para la etapa de reacción: 0.5 hrs, 1.5 hrs y 2.5 hrs. Los tiempos de las demás etapas son los que se indican en la tabla IV-4.

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas se presentan en el cuadro IV-7, y el comportamiento de las variables principales son presentados en los GRAFICOS IV-4, IV-5 y IV-6.

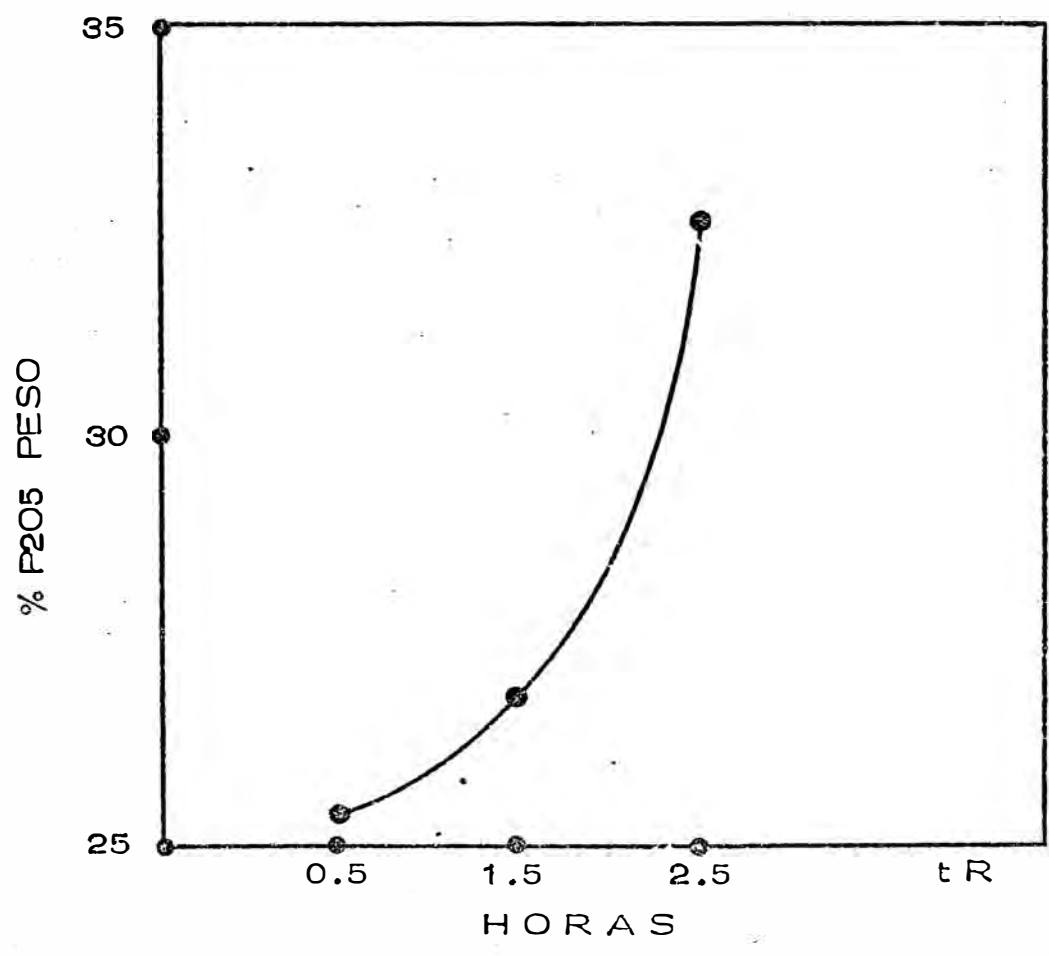
CUADRO IV-7

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS VARIANDO EL TIEMPO DE REACCION

VARIABLES	P R U E B A S		
	0.5	1.5	2.5
t R (hrs)	0.5	1.5	2.5
RO/AC (g/g)	1.3	1.3	1.3
RB/RO (g/g)	4.44	4.44	4.44
RA/RO (g/g)	1.23	1.23	1.23
PRODUCTO:			
Dp (g/ml)	1.333	1.379	1.416
Cp (%P2O5)	25.36	26.81	32.60
RECUPERACION DE P2O5:			
P2O5 FI /P2O5 EN (%)	44.3	44.0	42.8
P2O5 LA /P2O5 EN (%)	54.4	46.2	50.0
P2O5 RT /P2O5 RO (%)	4.0	30.0	22.0
RT/RO (%)	96	51	90

GRAFICO IV - 4

Variación de la concentración del producto con el tiempo de reacción



Variación del peso de líquido retenido en la torta al final del proceso con el tiempo de reacción

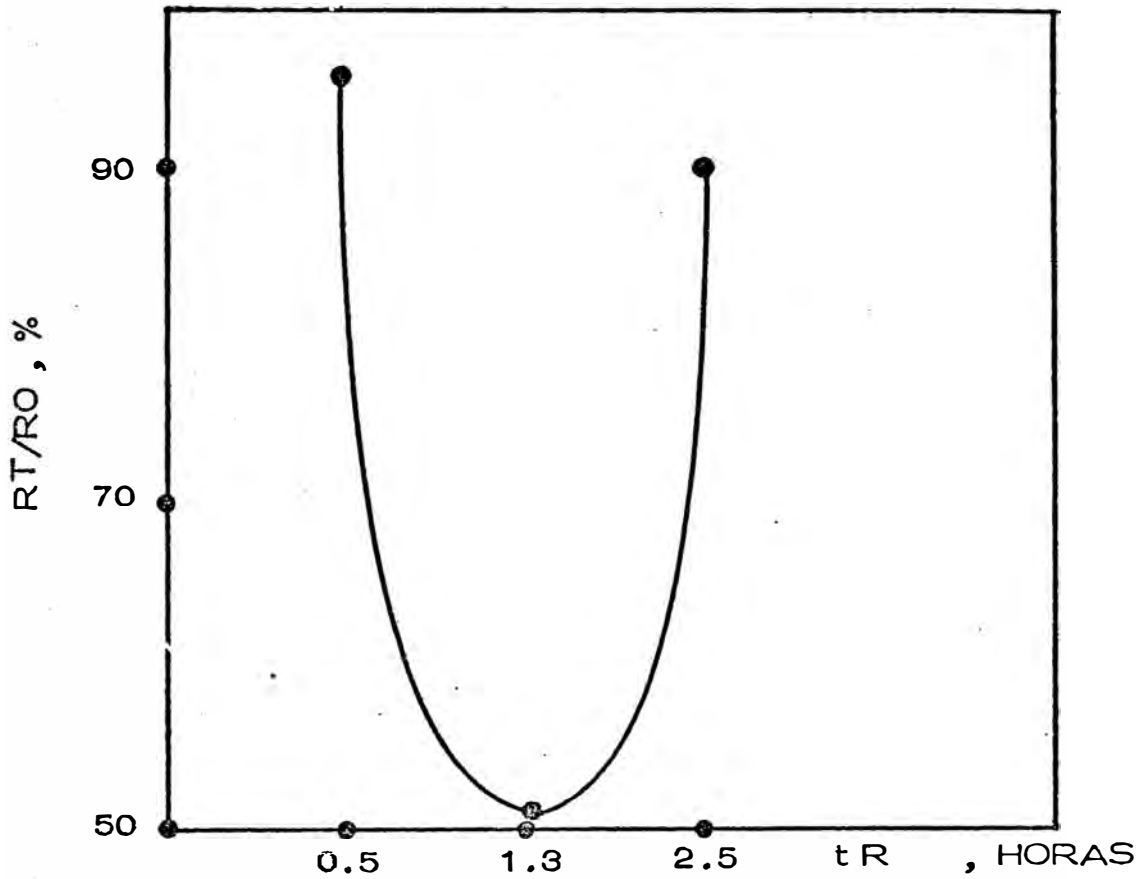
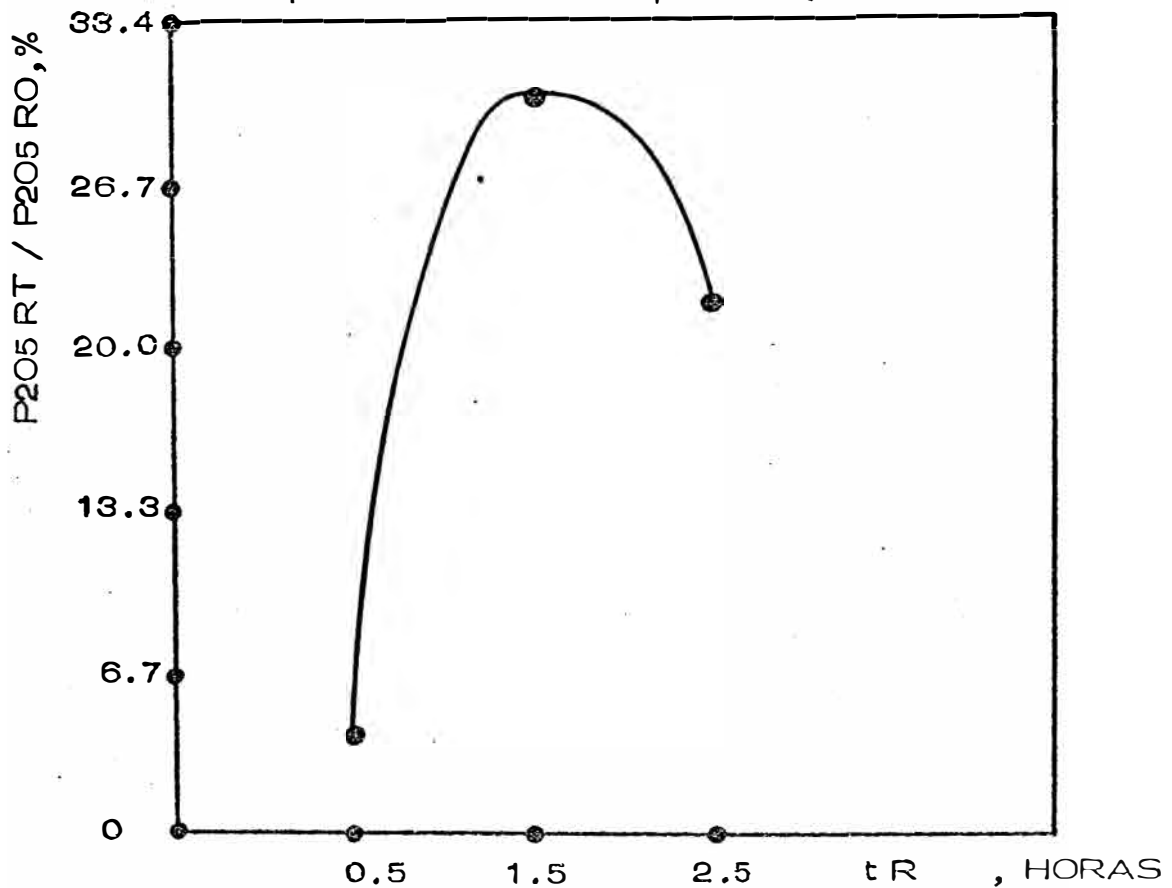


GRAFICO IV - 6

Variación del P2O5 retenido en la torta al final del proceso con el tiempo de reacción



El GRAFICO IV-4 nos indica que trabajando con mayor tiempo en la etapa de reacción, es decir ampliando el tiempo de adición del sulfúrico se consiguen importantes concentraciones del producto, esto significa que es bueno trabajar con bajos flujos de ácido sulfúrico.

Durante los ensayos se observó que un elevado flujo de ácido sulfúrico causa problemas de gran formación de espumas (inestables) y esto haría necesario el uso de antiespumantes (18), esto nos demuestra que un alto flujo de ácido sulfúrico no es conveniente.

La mayor pérdida de P2O5 de la roca ocurrió trabajando con 1.5 horas en la etapa de reacción, pero también se obtuvo la mayor facilidad de filtración, como se puede observar combinando los GRAFICOS IV-5 y IV-6.

La temperatura en la etapa de reacción se ve afectada por el flujo del sulfúrico, puesto que a mayor flujo la temperatura se eleva demasiado, por lo tanto es necesario fijar un tiempo para esta etapa ó tiempo de adición de ácido , donde la temperatura de trabajo se mantenga y la formación de espuma sea la menor.

4.3.2.2 TIEMPOS EN LA ETAPA DE FORMACION DE CRISTALES

En las pruebas realizadas se utilizaron los siguientes tiempos para la etapa de formación de cristales: 2, 3 y 4 hrs. Los tiempos de las demás etapas son los que se indican en la tabla IV-4.

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas se presentan en el cuadro IV-8, y el comportamiento de las variables principales con respecto al tiempo de formación de cristales son presentados en los GRAFICOS IV-7, IV-8 y IV-9.

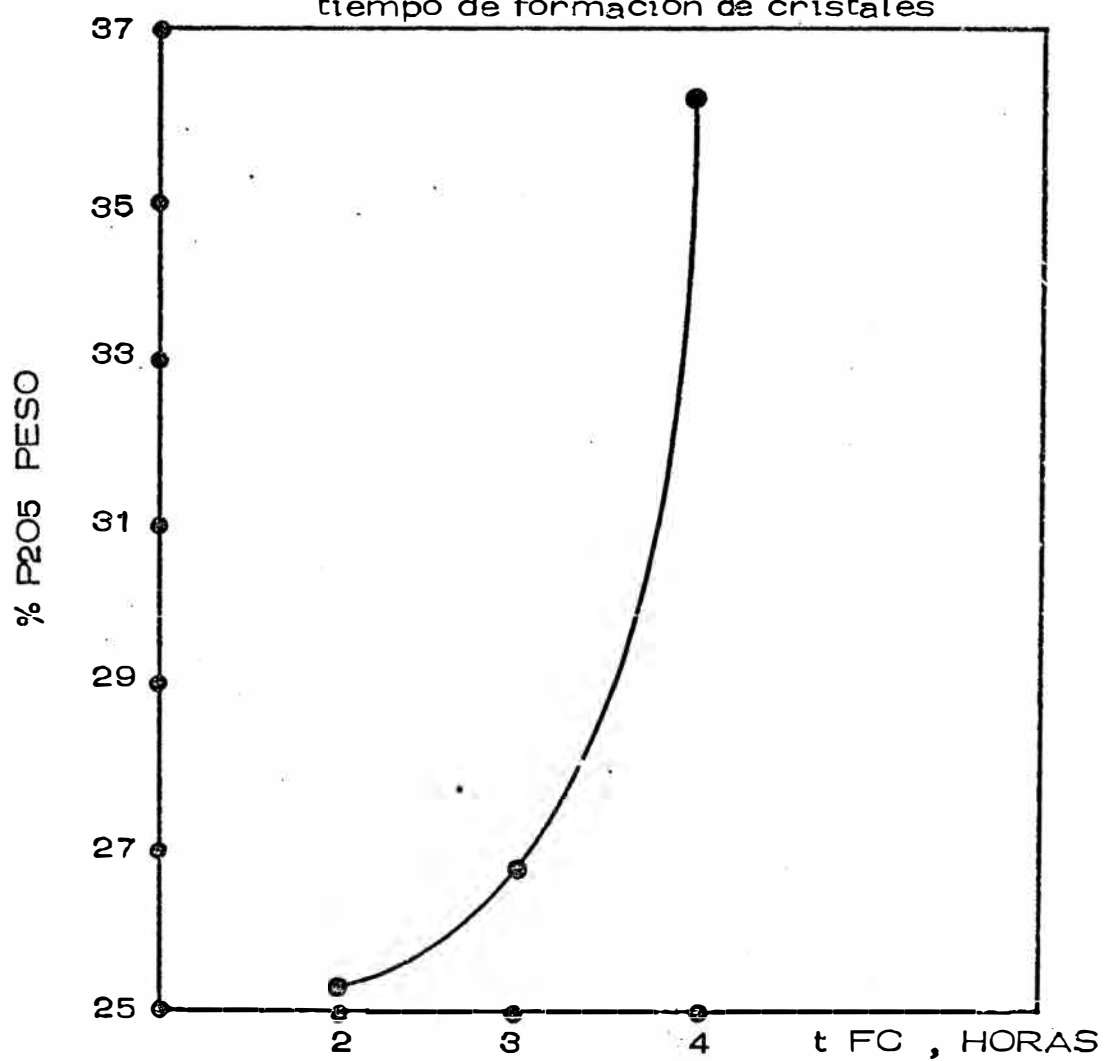
CUADRO IV-8

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS VARIANDO EL TIEMPO DE FORMACION DE CRISTALES

VARIABLES	P R U E B A S		
t FC (hrs)	2.0	3.0	4.0
RO/AC (g/g)	1.3	1.3	1.3
RB/RO (g/g)	4.44	4.44	6.0
RA/RO (g/g)	1.23	1.23	1.23
PRODUCTO:			
Dp (g/ml)	1.337	1.379	1.450
Cp (%P2O5)	25.36	26.81	36.22
RECUPERACION DE P2O5:			
P2O5 FI /P2O5 EN (%)	34.0	44.1	53.3
P2O5 LA /P2O5 EN (%)	31.3	46.3	44.5
P2O5 RT /P2O5 RO (%)	105.4	29.3	7.3
RT/RO (%)	117.6	51.2	35.0

GRAFICO IV - 7

Variación de la concentración del producto con el tiempo de formación de cristales



Variación del peso de liquido retenido en la torta al final del proceso con el tiempo de formación de cristales

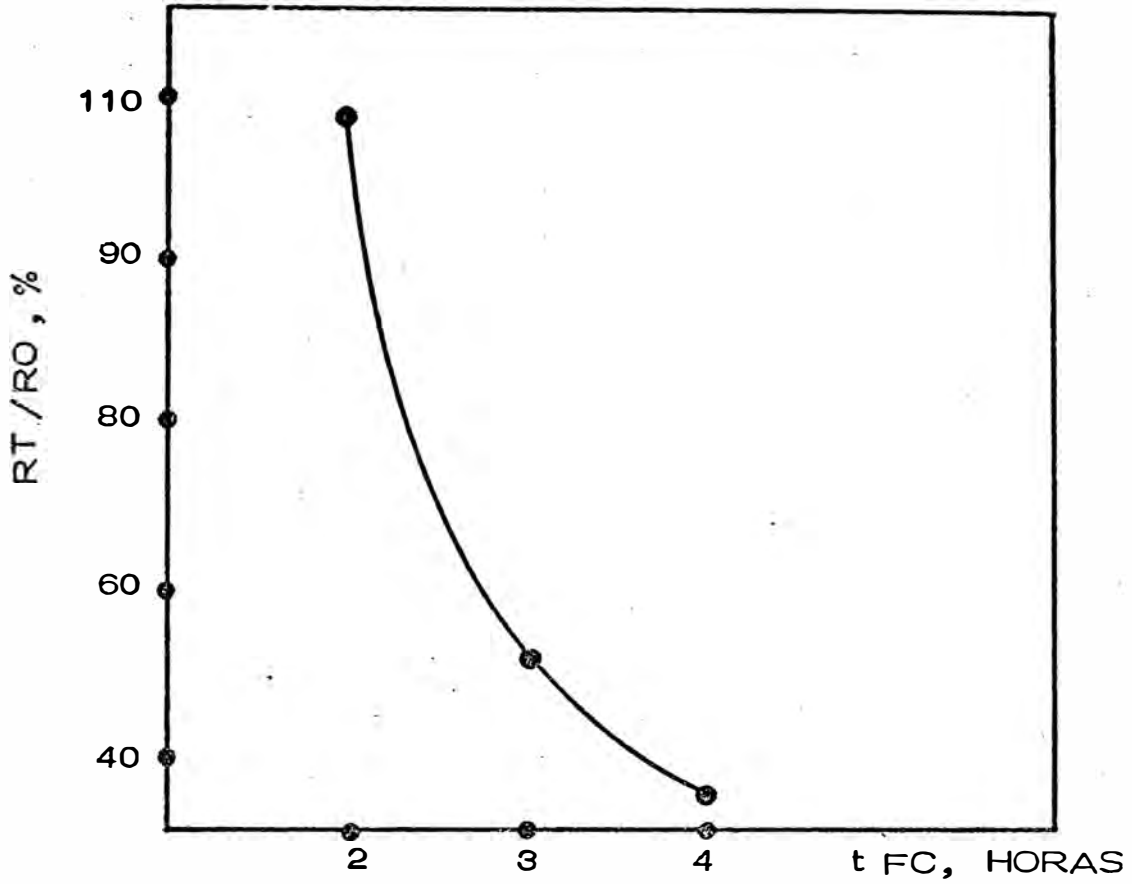
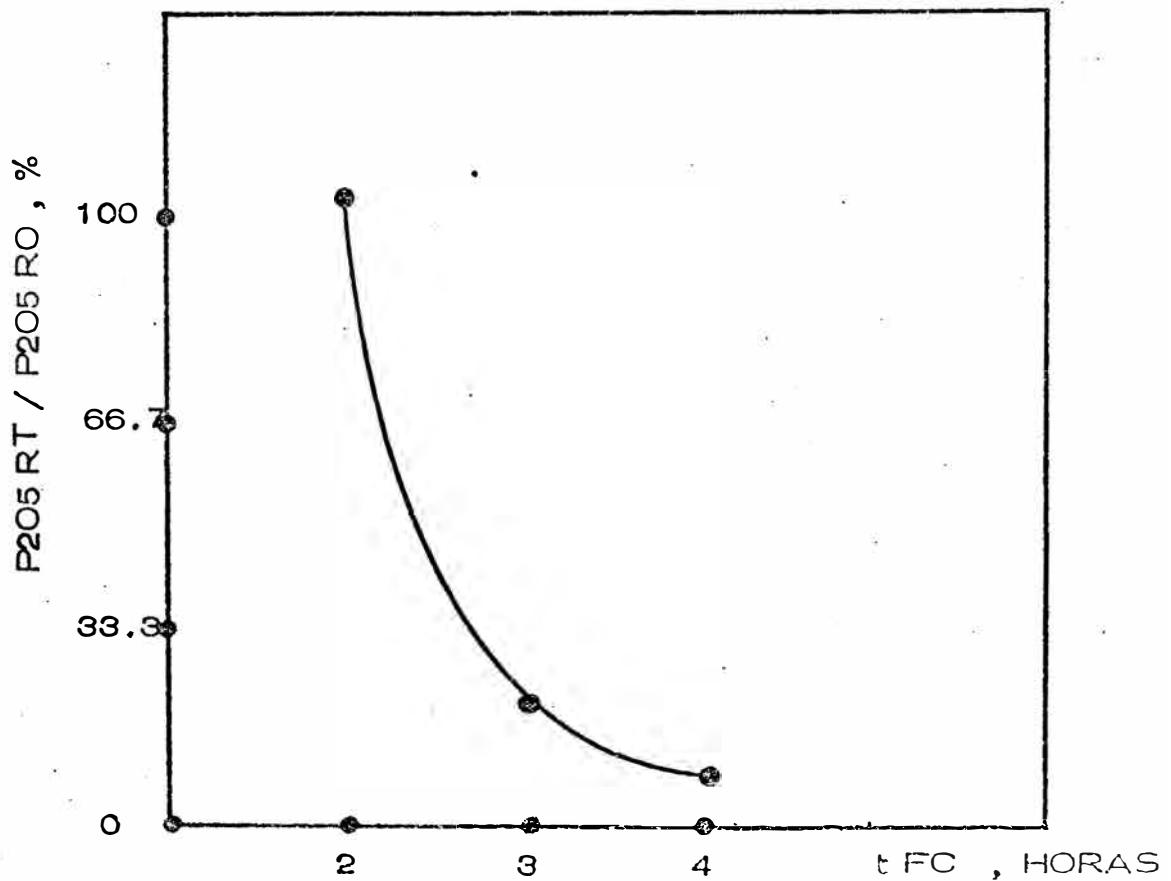


GRAFICO IV - 9

Variación del peso de P2O5 retenido en la torta al final del proceso con el tiempo de formación de cristales



Como se puede apreciar, combinando los GRAFICOS IV-7, IV-8 y IV-9, al trabajar con elevados tiempos de formación de cristales se obtienen múltiples ventajas, como alta concentración del producto, menor pérdida de P2O5 de la roca y mayor facilidad de filtración.

Del GRAFICO IV-9 se observa que la extracción de P2O5 de la roca es pésima trabajando con bajos tiempos de formación de cristales, ya que además de no extraer algo de P2O5 de la roca, termina quitándole P2O5 a los reciclos utilizados.

Se observó que a mayor tiempo de formación de cristales, la masa reaccionante tiende a separar los cristales de sulfato de calcio del producto, en forma espontánea. Esta etapa la consideramos muy importante por estar relacionada con la formación de un cristal óptimo, el cual brinda la facilidad de filtración que siempre es muy buscada.

4.3.3 EFECTOS DE CANTIDAD DE REACTANTES

De los reactantes del proceso, el reciclado bajo solo brinda facilidad para el ataque de la roca, el ácido sulfúrico extrae el P2O5 de la roca y el reciclado alto facilita la filtración de la masa reaccionante. Solo los dos últimos reactantes influyen directamente sobre el producto, tanto en su cantidad como en su

concentración, por ello estudiaremos los efectos al variar las cantidades de dichos reactantes.

CANTIDAD DE RECICLO ALTO

En el laboratorio se realizaron pruebas, usando 20, 40, 50 ml de reciclado alto, cambiando solo el tiempo de la etapa de formación de cristales de la tabla IV-4 (base), por 4hrs.

Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro IV-9, y el comportamiento de las variables principales se muestran en los GRAFICOS IV-10, IV-11 y IV-12.

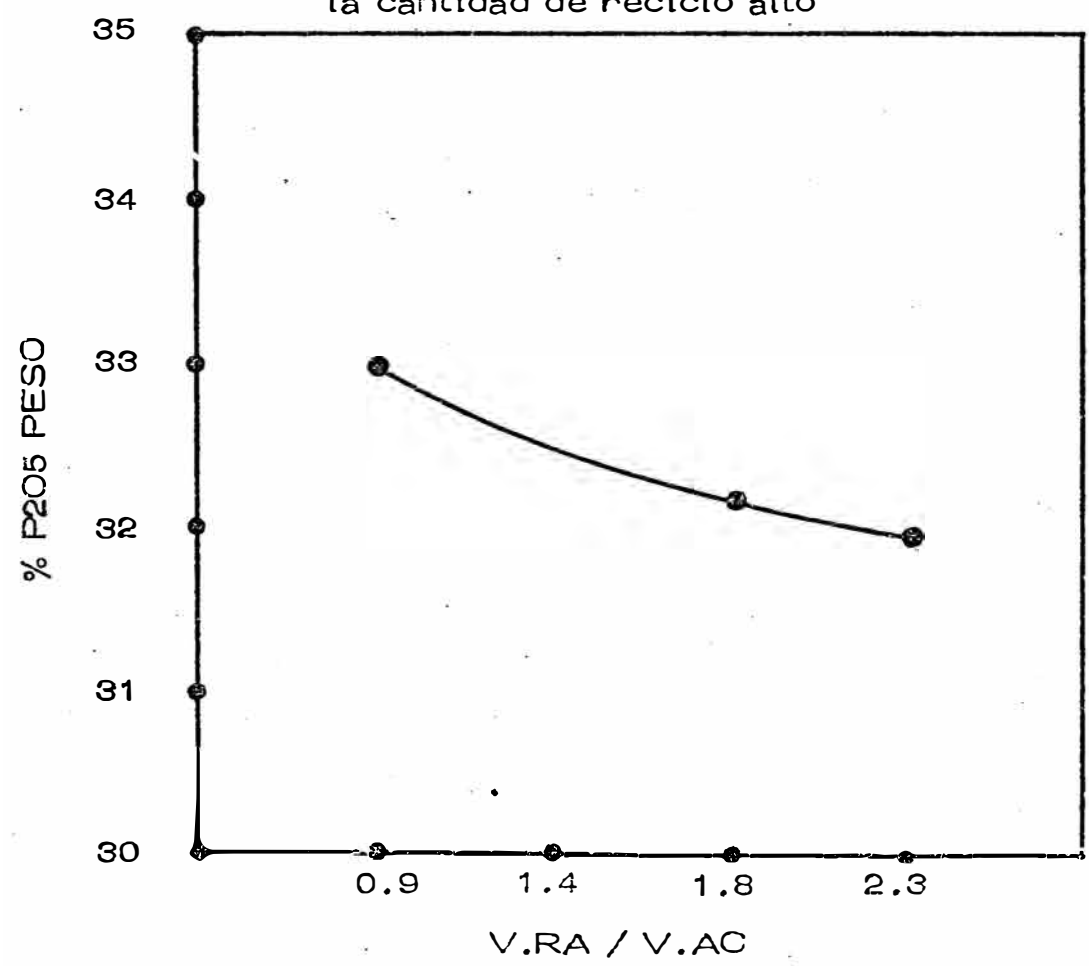
CUADRO IV-9

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS VARIANDO LA CANTIDAD DE RECICLO ALTO

VARIABLES	P R U E B A S		
V.RA (ml)	20.0	40.0	50.0
RO/AC (g/g)	1.3	1.3	1.3
RB/RO (g/g)	4.36	4.36	4.36
RA/RO (g/g)	0.48	0.97	1.21
PRODUCTO:			
Dp (g/ml)	1.434	1.422	1.410
Cp (%P2O5)	33.0	32.2	32.0
RECUPERACION DE P2O5:			
P2O5 FI /P2O5 EN (%)	16.5	53.3	63.0
P2O5 LA /P2O5 EN (%)	70.4	40.7	36.8
P2O5 RT /P2O5 RO (%)	34.0	17.3	0.7
RT/RO (%)	40.0	39.4	35.2

GRAFICO IV - 10

Variación de la concentración del producto con la cantidad de reciclo alto



Variación del peso de líquido retenido en la torta al final del proceso con la cantidad de reciclo alto

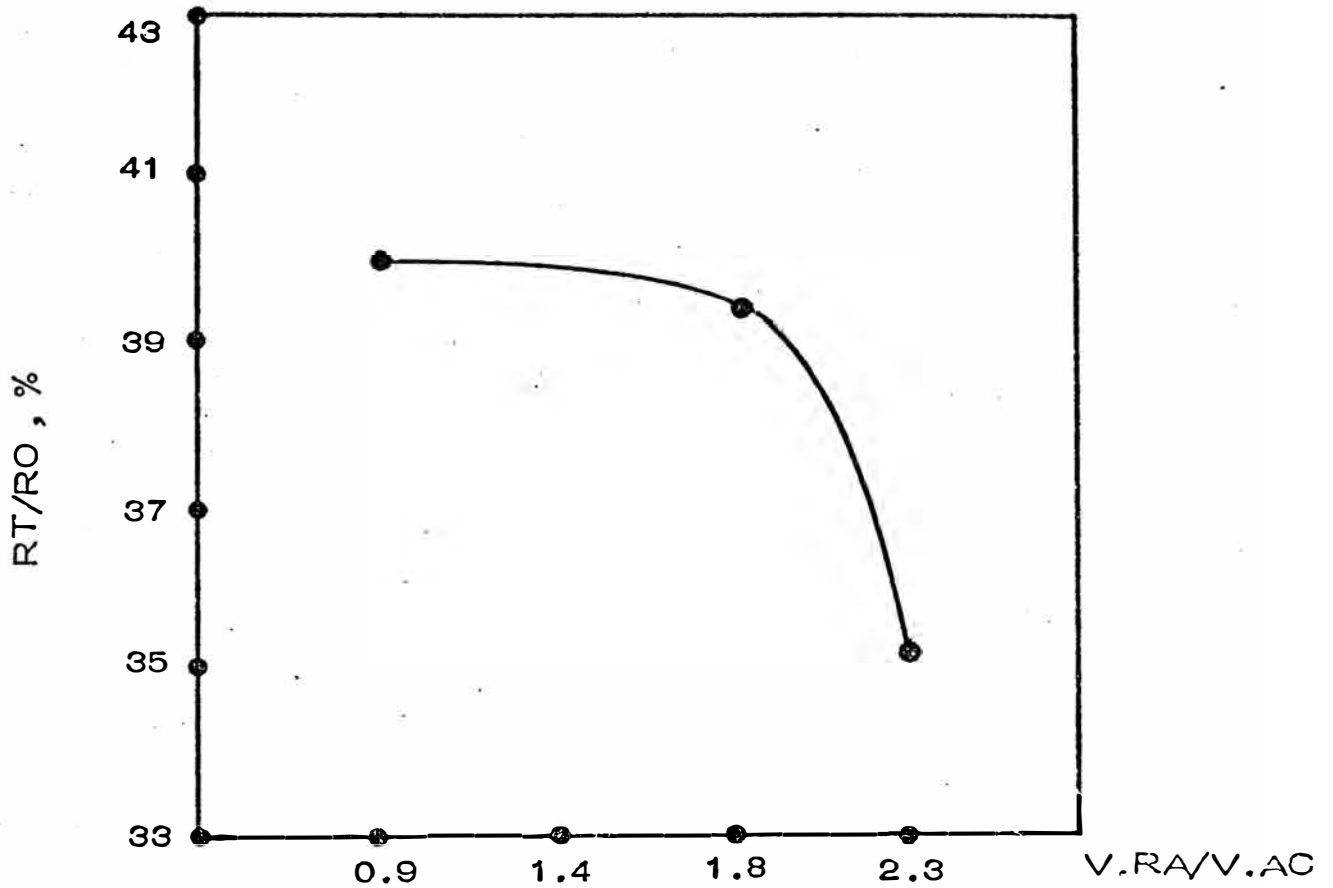
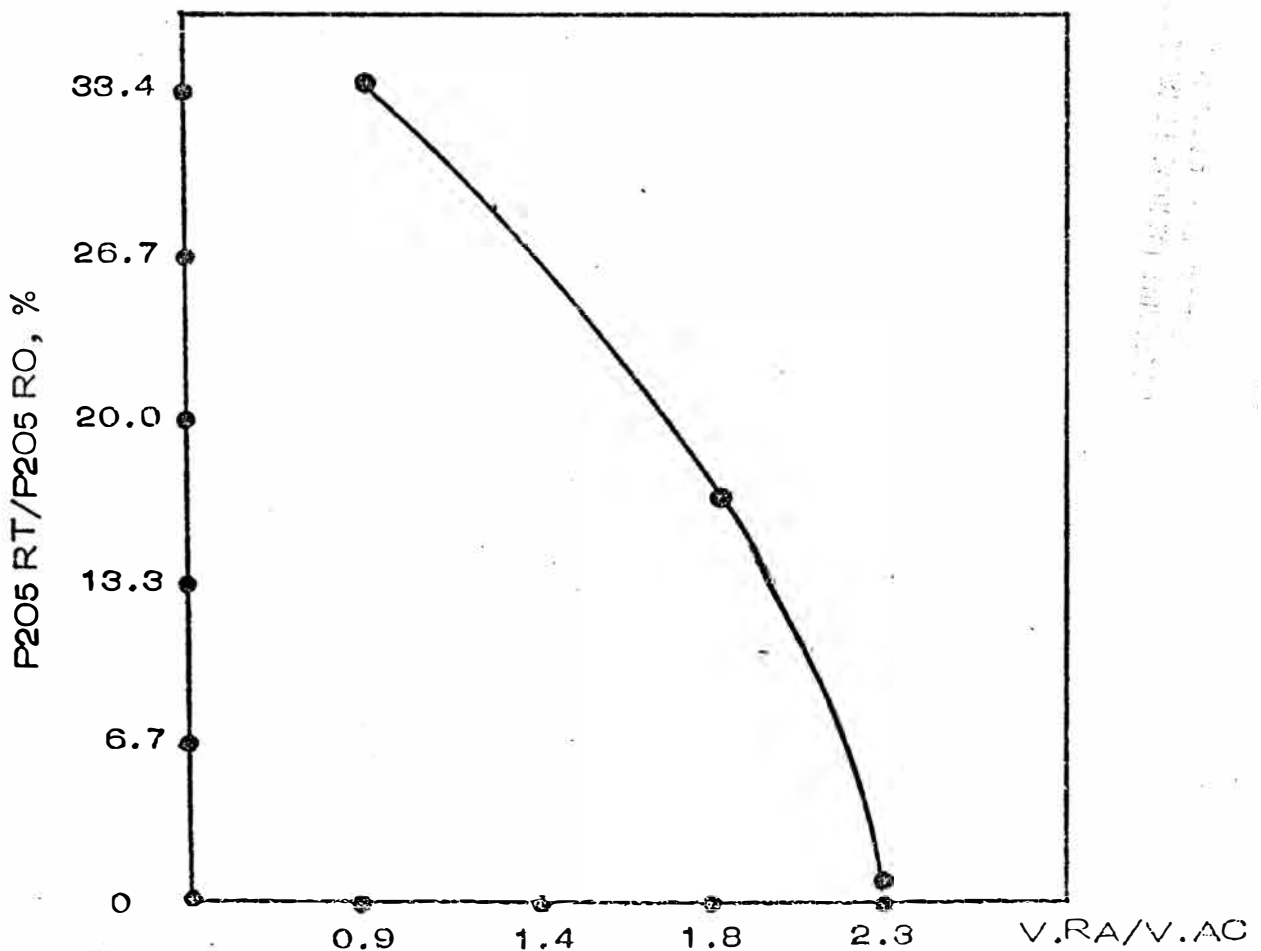


GRAFICO IV - 12

Variación del peso de P2O5 retenido en la torta al final del proceso con la cantidad de reciclo alto



De los GRAFICOS IV-10 y IV-11 se puede notar que usando poca cantidad de reciclado alto, se obtiene un producto de concentración ligeramente superior que usando mayor cantidad de este reciclado, presentando la desventaja de obtener una masa espesa no favorable para la filtración, consiguiéndose poca cantidad de producto.

La prueba que utilizó la mayor cantidad de reciclado alto arrojó la más pequeña pérdida de P205 de la roca, ver GRAFICO IV-12, además de presentar ventajas en la facilidad de filtración por la menor cantidad de líquido retenido en la torta al final del proceso como se vé en el GRAFICO IV-11.

Del filtrado obtenido, parte se usa para preparar el reciclado alto, y el resto viene a ser el producto; por esta razón es que la cantidad de reciclado alto tiene un límite.

4.3.3.2 CANTIDAD DE SULFÚRICO

Al variar la cantidad de sulfúrico, variamos la relación Roca/ácido mencionada en el capítulo II. El aumento de sulfúrico es justificable solo en rocas que difícilmente sueltan el P205.

En el laboratorio se realizaron pruebas aumentando la cantidad de ácido sulfúrico que era de 22 ml, a 25 y 28 ml, usando para las etapas del proceso los tiempos indicados en la tabla IV-4.

Los resultados de estas pruebas se muestran en el cuadro IV-10.

CUADRO IV-10

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS VARIANDO LA CANTIDAD DE SULFURICO

VARIABLES	P R U E B A S	
V.AC (ml)	25.0	28.0
RO/AC (g/g)	1.14	1.02
RB/RO (g/g)	4.56	4.56
RA/RO (g/g)	1.24	1.24
PRODUCTO:		
Dp (g/ml)	1.400	1.410
Cp (%P2O5)	28.11	29.79
RECUPERACION DE P2O5:		
P2O5 FI /P2O5 EN (%)	37.8	44.9
P2O5 LA /P2O5 EN (%)	59.4	50.0
P2O5 RT /P2O5 RO (%)	8.7	16.0
RT/RO (%)	60.4	84.6

La prueba que utilizó mayor cantidad de ácido sulfúrico, arroja un producto ligeramente más concentrado que la prueba que usó menor cantidad de sulfúrico, pero presenta una mayor pérdida de P2O5 de la roca.

La prueba que usó mayor cantidad de sulfúrico, presentó problemas en la facilidad de filtración, como lo refleja la variable RT/RO del cuadro IV-10, esto ocurre porque el exceso de sulfúrico dota de mayor viscosidad a la masa reaccionante.

El cuadro IV-10 también nos indica que trabajando

con la menor cantidad de ácido sulfúrico, se consigue recuperar la mayor cantidad de P₂O₅ de la roca, esto quiere decir que es preferible trabajar con cantidades de ácido sulfúrico lo más cercana a la cantidad estequiométrica.

El uso de un exceso de ácido sulfúrico no se justifica en el caso de la roca fosfórica peruana, porque nuestra roca presenta una gran reactividad según las pruebas realizadas, y se puede lograr extraer prácticamente todo el P₂O₅ que contiene utilizando ácido sulfúrico en cantidad estequiométrica.

4.4 EFECTO DE ESCALAMIENTO

Se realizan ensayos con la finalidad de observar las variaciones que ocurren, al trabajar con mayores cantidades de reactantes.

Las características de los reactantes se mantienen iguales que en las pruebas realizadas con 50g de roca ó de menor escala , y la temperatura de trabajo será de 80-85 C.

Los tiempos que se utilizaron, para cada etapa, se muestran en el cuadro IV-11. Se puede decir basados en las pruebas de menor escala, que estos tiempos son los que permiten obtener resultados de mucho interes al compararlos con los procesos comerciales más conocidos.

CUADRO IV-11

TIEMPOS PARA LOS ENSAYOS DE ESCALAMIENTO

ETAPA	TIEMPO
SUSPENSION	0.5 hrs
REACCION	1.5 hrs
FORMACION DE CRISTALES	4.0 hrs
FLUIDEZ	0.5 hrs
FILTRACION	5 min
LAVADO	2 min

PRIMER ENSAYO

Se trabajó con 200g de roca fosfórica, y se mantuvo la proporción de los demás reactantes. Debido a la cantidad de masa manipulada, se usó un bushner grande (435 cm²) para la filtración.

Los resultados de las pruebas realizadas se muestran en el cuadro IV-12.

CUADRO IV-12

RESULTADOS DEL PRIMER ENSAYO DE ESCALAMIENTO

VARIABLES	P R U E B A
RO/AC (g/g)	1.3
RB/RO (g/g)	4.4
RA/RO (g/g)	1.21
PRODUCTO:	
D _p (g/ml)	1.260
C _p (%P ₂ O ₅)	20.0
RECUPERACION DE P ₂ O ₅ :	
P ₂ O ₅ FI /P ₂ O ₅ EN (%)	36.5
P ₂ O ₅ LA /P ₂ O ₅ EN (%)	51.0
P ₂ O ₅ RT /P ₂ O ₅ RO (%)	37.5
RT/RO (%)	144.0

Se puede observar del cuadro IV-12 que se obtiene un producto de menor concentración que la obtenida en las pruebas de menor escala.

Observamos que la masa reaccionante se mantuvo muy fluida durante todo el proceso, por lo que se puede decir que la cantidad de reciclado es mayor que la necesaria.

Se presentó dificultad durante la etapa de filtración, por lo que se obtuvo más peso de líquido retenido en la torta, de lo que se esperaba, al final del proceso; esto se explica porque la fuerza de vacío por unidad de área fue menor que la usada en las pruebas de menor escala ya que se utilizó la misma bomba de vacío y se aumentó el área de filtración.

En este primer ensayo, la pérdida de P_2O_5 de la roca es bastante alta.

4.4.2 SEGUNDO ENSAYO

En las nuevas pruebas se realizan ajustes sobre la cantidad de reciclado bajo, y también se trabajará en la etapa de filtración, con un vacío por unidad de área similar al que se utilizó en las pruebas de menor escala.

Los resultados de estas nuevas pruebas se presentan en el cuadro IV-13.

CUADRO IV-13

RESULTADOS DEL SEGUNDO ENSAYO DE ESCALAMIENTO

VARIABLES	P R U E B A S	
RO/AC (g/g)	1.3	1.3
RB/RO (g/g)	3.45	2.81
RA/RO (g/g)	1.26	1.23
PRODUCTO:		
Dp (g/ml)	1.356	1.358
Cp (%P2O5)	28.11	29.10
RECUPERACION DE P2O5:		
P2O5 FI /P2O5 EN (%)	54.8	70.8
P2O5 LA /P2O5 EN (%)	41.4	28.6
P2O5 RT /P2O5 RO (%)	11.5	1.6
RT/RO (%)	66.2	36.6

Este cuadro indica que utilizando menor cantidad de reciclado bajo, se tienen resultados similares a las pruebas de menor escala. También se observa, que trabajando con mayor cantidad de reciclado bajo, se presentan problemas de filtración, como lo refleja la variable RT/RO.

Además se puede apreciar que la recuperación de P2O5 es muy buena, trabajando con la menor cantidad de reciclado bajo, como se deduce de la variable P2O5 RT /P2O5 RO del cuadro IV-13.

4.5 PRUEBAS DE EVAPORACION

Trabajando con el proceso definido, podemos obtener un producto de A.F.G.F. con una concentración de 28-31% P2O5.

Industrialmente, se requiere de un ácido de mayor concentración para la producción de fertilizantes, tales como el SFT y fosfatos de amonio, por esta razón en el laboratorio realizamos pruebas de evaporación a varias muestras del producto, mediante simple calentamiento sin agitación.

Las pruebas se realizaron a presión atmosférica y se hicieron ensayos para dos relaciones de diámetro entre altura inicial de líquido (D/h).

En las primeras pruebas realizadas, partimos de 100 ml de muestra de 22% P2O5 donde el diámetro es aproximadamente 6 veces la altura de líquido (D/h=6).

En el cuadro IV-14 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas.

CUADRO IV-14

RESULTADOS DE EVAPORACION PARA D/h = 6

T (C)	t (hr)	d (g/ml)	C (% P2O5)
70	1.5	1.420	31.5
	2.0	1.470	36.7
	2.5	1.540	39.2
80	1.5	1.515	38.2
	2.0	1.668	47.4
	2.5	1.720	51.5
90	1.25	1.519	38.5
	1.5	1.640	46.1

Trabajando a 70 C se necesitarán más de tres horas para alcanzar la concentración de 50% P2O5 que se desea.

Si trabajamos a 80 C es posible alcanzar la

concentración deseada, alrededor de las dos horas y media; mientras que a 90 C lo podemos hacer a lo mucho en dos horas de evaporación.

En todas estas pruebas se notó que con el aumento de tiempo, la cantidad de vapor era menor.

En pruebas posteriores se partió de 200 ml de producto de 29% P2O5, donde ahora el diámetro viene a ser 2.7 veces la altura ($D/h=2.7$), esta relación disminuye porque la altura aumenta con el volumen de la muestra.

En el cuadro IV-15, se muestran los resultados de estas nuevas pruebas.

CUADRO IV-15

RESULTADOS DE EVAPORACION PARA $D/h = 2.7$

T (C)	t (hr)	d (g/ml)	C (%P2O5)
80	2.5	1.502	37.7
	3.5	1.560	43.0
	4.0	1.615	46.0
90	1.0	1.420	32.5
	2.0	1.540	40.0
	3.0	1.620	45.4
	3.5	1.610	47.6
	4.0	1.620	50.0
100	1.0	1.470	35.0
	2.0	1.600	45.0
	3.0	1.646	50.0
	3.5	1.680	52.1
	4.0	1.730	54.1

Los GRAFICO IV-13 y IV-14, muestra la altura evaporada y la concentración alcanzada con el tiempo de evaporación cuando $D/h = 2.7$.

GRAFICO IV - 13

Altura evaporada de la Muestra con el tiempo de evaporación

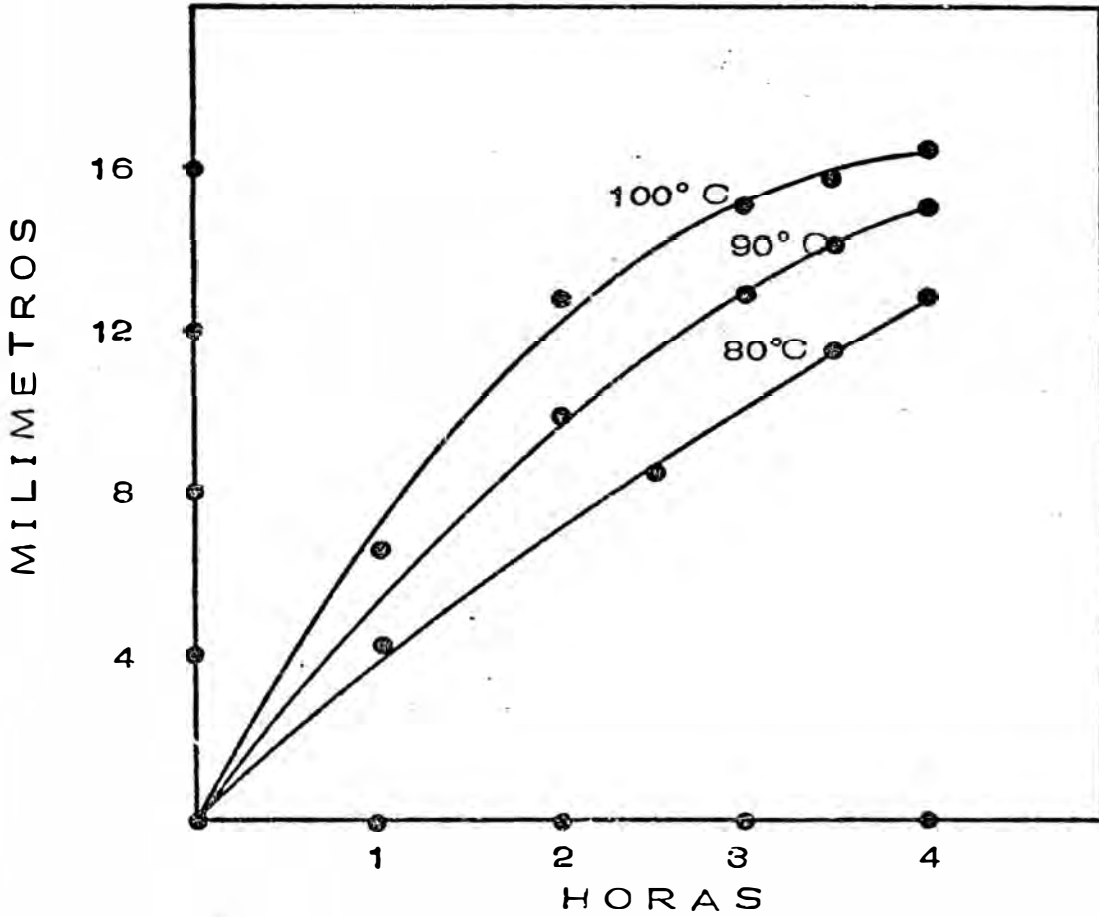
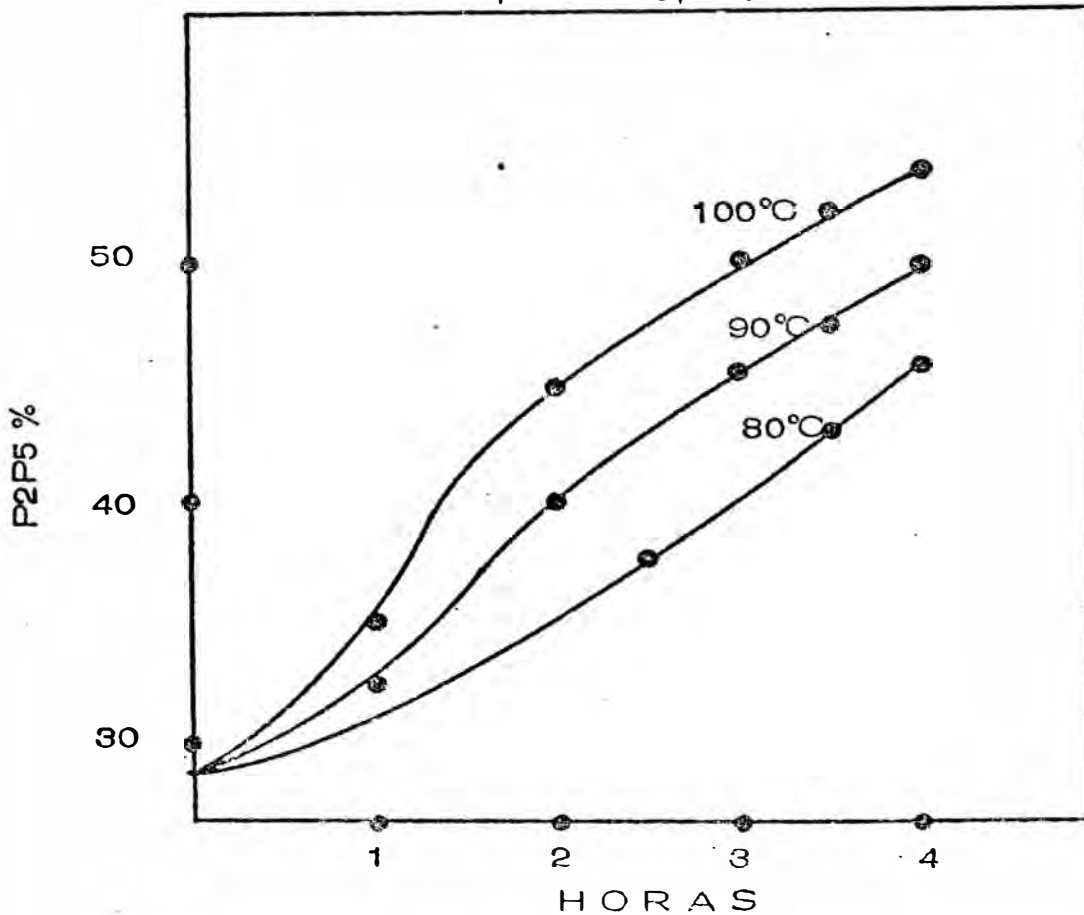


GRAFICO IV - 14

Concentración de la muestra con el tiempo de evaporación



Del GRAFICO IV-14, cuando la relación D/h es de 2.7, se observa que es necesario más de cuatro horas para llegar a 50% P₂O₅, trabajando a 80 C.

Para alcanzar la concentración deseada evaporando a 90 C, necesitamos cuatro horas de operación, mientras que trabajando a 100 C solo debemos evaporar durante tres horas, esto se puede apreciar en el cuadro IV-14

Si queremos llegar a la concentración deseada en menos de tres horas, para una relación D/h de 2.7, necesitaremos trabajar a más de 100 C.

El GRAFICO IV-13 demuestra que la evaporación se hace más difícil a medida que pasa el tiempo.

4.6 PRODUCTO Y SUBPRODUCTO DEL PROCESO

PRODUCTO:

El producto que se obtiene al final del proceso estudiado, considerando la etapa de evaporación para poder alcanzar las concentraciones requeridas en la industria de fertilizantes, es el ácido fosfórico negro ó A.F.G.F., producto líquido que en realidad es de color marrón oscuro y de apariencia aceitosa. Las características de este producto ácido son presentadas a continuación:

Concentración: 50 %P₂O₅

Contenido de sólidos: 1 %

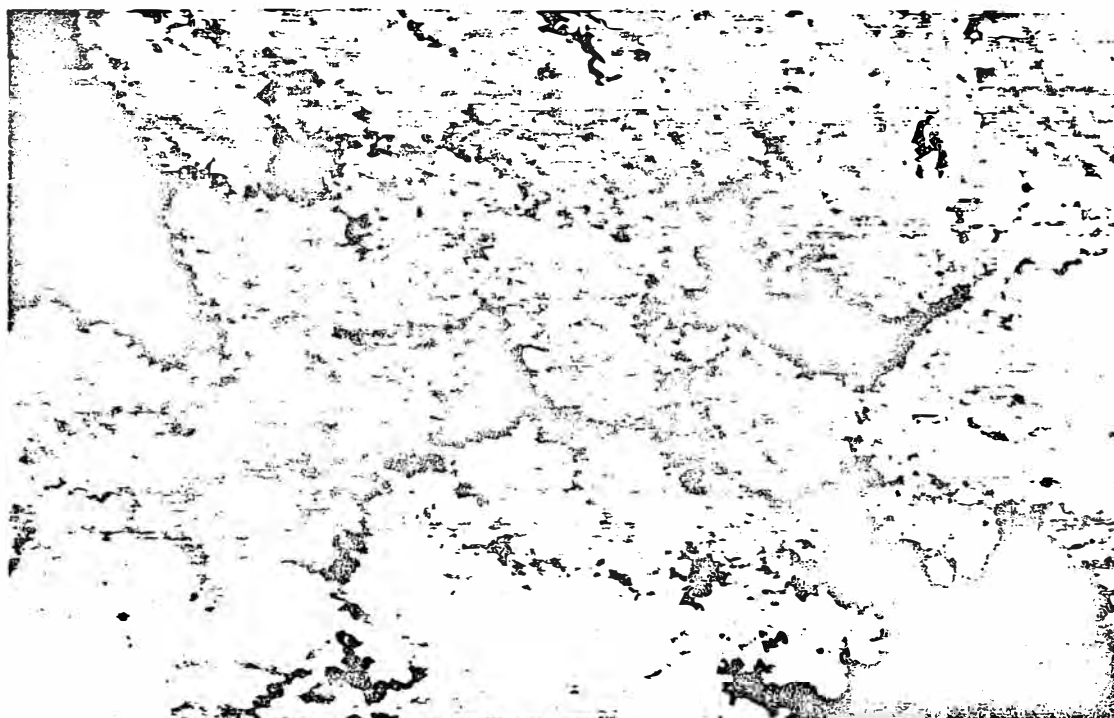
Densidad: 1.62 g/ml

Viscosidad (25 C): 22 cp

SUBPRODUCTO

Como subproducto del proceso desarrollado, se obtiene el sulfato de calcio ó yeso, el cual es un sólido blanco que según la formación de sus cristales puede presentar excelentes características durante la filtración.

La apariencia del yeso obtenido en el proceso de vía húmeda estudiado y que ofreció la mayor facilidad de filtración es vista bajo el microscopio a 50 aumentos y presentada en la siguiente fotografía:



4.7 CONCLUSIONES

De los procesos estudiados, los que usan reciclaje de ácido fosfórico siempre logran concentraciones importantes de producto.

El agua utilizada en el proceso, debe entrar en la etapa de filtración con el fin de extraer el producto remanente que queda en la torta, consiguiéndose de esta manera el ácido que se usará como reciclaje.

El proceso que brinda la posibilidad de obtener un producto de niveles comerciales es el que utiliza las siguientes etapas: Suspensión, Reacción, Formación de cristales, Fluidez, Filtración y Lavado de torta.

El reciclo bajo ó producto diluido que se usará en el proceso, debe tener una concentración entre 8-10% P₂O₅, concentraciones mayores o menores originan un producto pobre ó causan una significativa pérdida de P₂O₅ de la roca.

La temperatura conveniente de trabajo está en el rango de 80-85 C, menores y mayores temperaturas traen problemas de filtración y recuperación de P₂O₅.

Es conveniente trabajar con bajos flujos de ácido sulfúrico, para impedir la abundante formación de espuma, evitando de esta manera recurrir al uso de antiespumante en la etapa de reacción.

Trabajar con elevados flujos de ácido sulfúrico, trae problemas de control de temperatura, por tratarse de una reacción exotérmica.

La etapa más importante para el éxito del proceso, es la formación de cristales; mayor tiempo en esta etapa asegura la obtención de un producto de concentración importante así como la mayor recuperación de P₂O₅ de la roca.

Cuando los cristales de yeso están bien formados, se asegura una rápida y eficaz separación entre el ácido fosfórico y el yeso. El tiempo estimado para esta etapa fué de cuatro horas.

La mayor facilidad de filtración trae como consecuencia la menor retención de líquido en la torta al final del proceso.

El reciclo alto ó producto semiconcentrado usado en la etapa de fluidez debe tener una concentración entre 17-20% P₂O₅; mayor porcentaje de P₂O₅ causará una retención importante de producto en la torta, y una menor concentración provocará la obtención de un producto pobre.

El uso de un exceso de la cantidad estequiométrica de ácido sulfúrico, causa problemas en la facilidad de filtración debido a un incremento en la viscosidad de la masa reaccionante, esto a su vez origina pérdida considerable de P₂O₅ de la roca y demoras en la producción del fosfórico.

Al trabajar con mayores cantidades de reactantes y mantener las proporciones de trabajo, se observa que solo la cantidad de reciclo bajo ó producto diluido resulta ser demasiada para el proceso, este problema se

puede superar reduciendo su cantidad hasta obtener una reproducción de características del proceso de menor escala.

Trabajando a presión atmosférica se presenta poca evaporación a medida que la concentración aumenta, esto implica la necesidad de más tiempo en la etapa de evaporación para alcanzar la concentración deseada (50% P205).

CAPITULO V

DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO

5.1 TECNOLOGIA

Se tomará como base, el proceso de vía húmeda definido y estudiado en las pruebas de laboratorio. Debido a las condiciones de operación que son requeridas y a las características de los resultados obtenidos, podemos situar nuestro proceso dentro del proceso comercial dihidratado cuya característica es la obtención de un ácido fosfórico de 30% P₂O₅. La secuencia del proceso se resume a continuación:

La roca fosfórica, descrita en el capítulo IV, es fluidizada con un reciclo diluido de ácido fosfórico grado fertilizante de 8-10% P₂O₅ (reciclo bajo) para luego iniciar la adición de ácido sulfúrico. El flujo de este ácido debe ser el necesario para mantener una temperatura de 85 C y evitar la formación abundante de espuma, tiempo que fué estimado mediante pruebas experimentales en 1.5 horas.

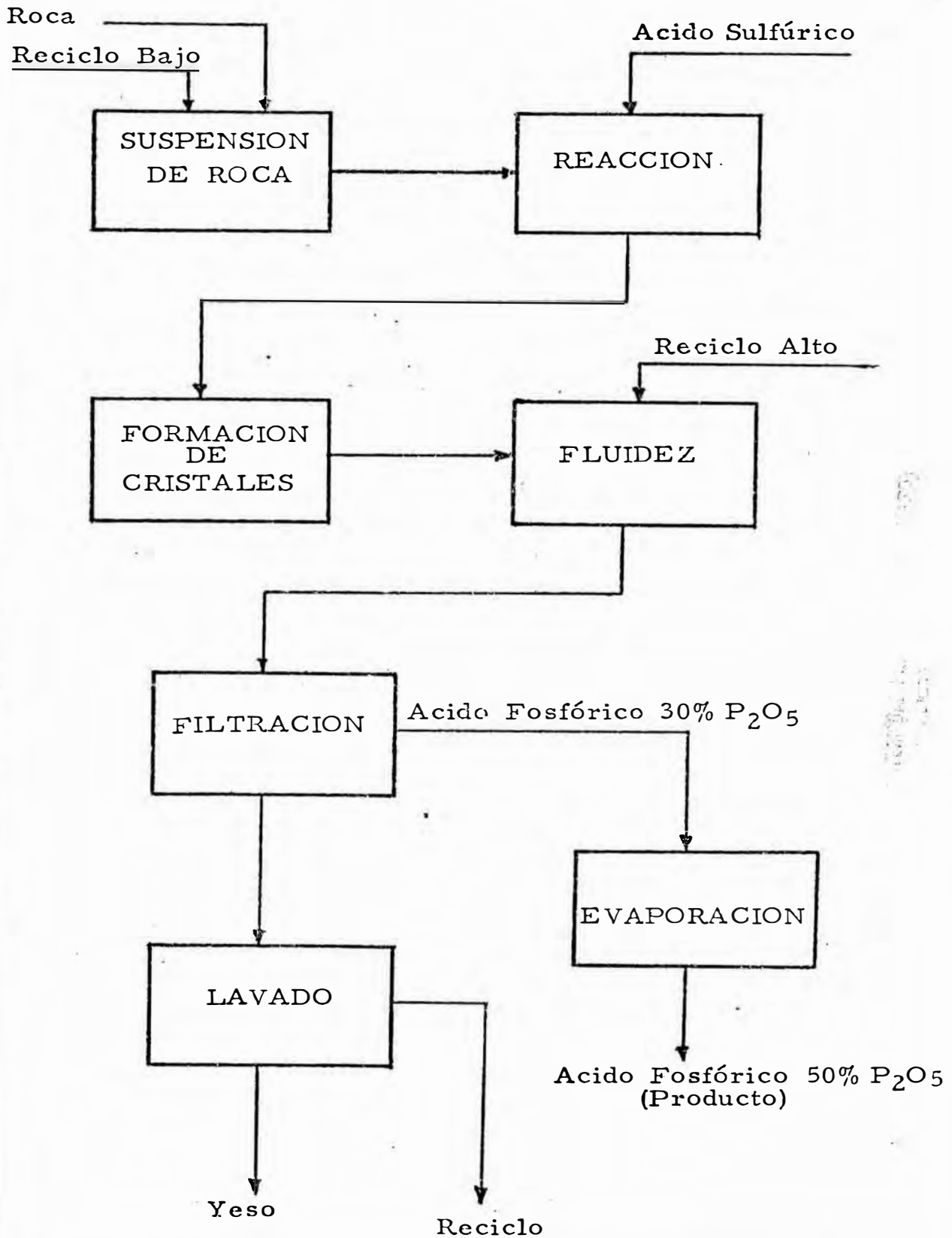
Finalizado el ataque de la roca fosfórica con el ácido sulfúrico, el lodo resultante pasa a una etapa de formación de cristales, con el propósito de conseguir cristales estables de sulfato de calcio dihidratado; el tiempo de duración de esta etapa es muy importante y se estima en cuatro horas. Al terminar esta etapa, el lodo espeso es fluidizado con un reciclo de ácido fosfórico grado fertilizante de 17-20% P₂O₅ (reciclo alto), con la finalidad de obtener un lodo que sea fácilmente manipulable en la filtración.

El lodo final es sometido a filtración, donde se separa el ácido fosfórico grado fertilizante producido, de 29-31% P₂O₅, del yeso formado; posteriormente la torta es lavada con agua caliente para recuperar el producto retenido en ella.

Finalmente el producto, ácido fosfórico grado fertilizante (A.F.G.F.) , es llevado de 30% P₂O₅ aprox. hasta 50% P₂O₅, que es la concentración requerida para ser utilizado en la industria de los fertilizantes, mediante una etapa de evaporación.

El ESQUEMA V-1 muestra las etapas del proceso que acaba de ser descrito y que ha sido seleccionado para realizar el diseño de la planta piloto.

ESQUEMA V-I
ESTAPAS DEL PROCESO USADO PARA EL DISEÑO
DE LA PLANTA PILOTO



5.2 INGENIERIA

La planta piloto que será diseñada seguirá un proceso batch ó por lotes.

5.2.1 SELECCION DEL TAMAÑO

El tamaño elegido para el diseño de la planta piloto es de 200 Kg de concentrado de roca fosfórica de 30% P₂O₅ peso.

Las razones de esta elección son las siguientes:

- Facilidad de construcción de equipos
- Manejo de volúmenes menores a 1 m³
- Facilidad de manipulación de materiales.

5.2.2 SECCIONES DE LA PLANTA

Se pueden establecer dos secciones las cuales son

a) Sección Reacción - Filtración:

Esta sección está constituida por todas las etapas involucradas para conseguir la producción de un A.F.G.F. de 29-31% P₂O₅ peso de concentración.

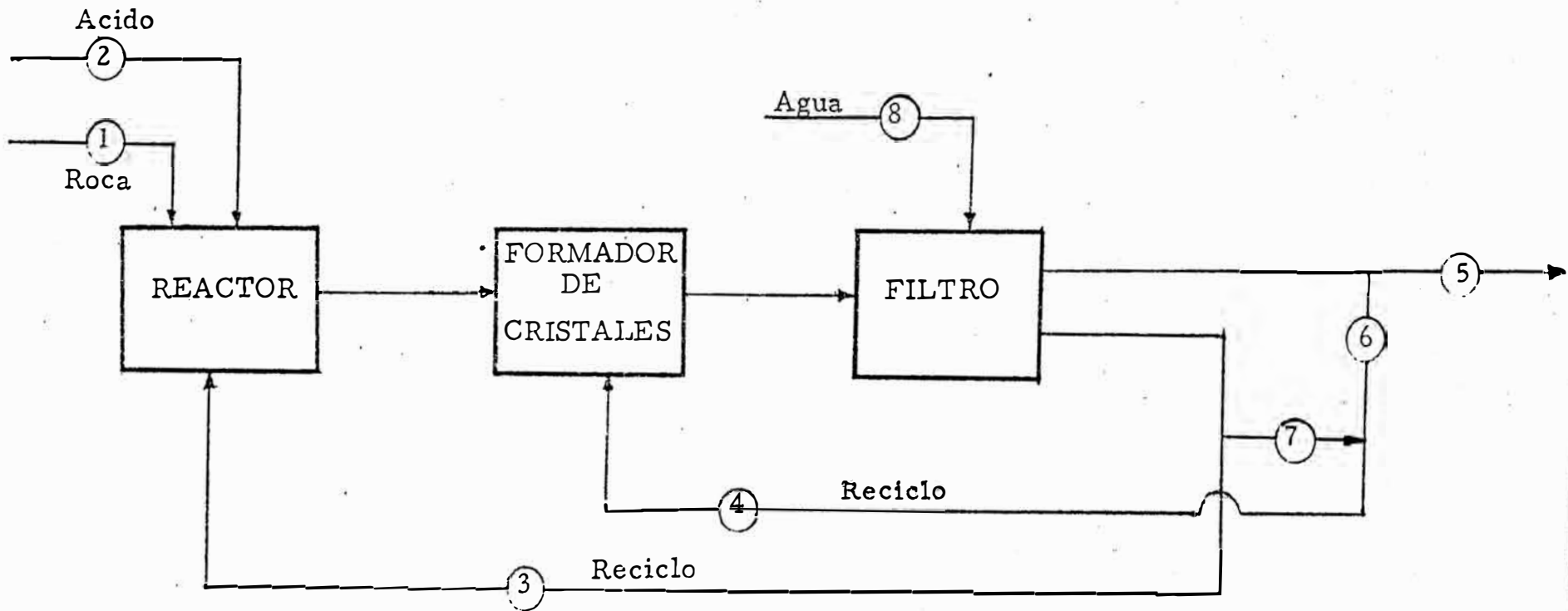
b) Sección evaporación:

En esta sección se eleva la concentración del A.F.G.F., de 29-31% P₂O₅ hasta 50-55% P₂O₅, mediante evaporación de su contenido de agua.

En el DIAGRAMA V-1 se muestra el diagrama de flujo de la sección reacción-filtración donde se indican los

DIAGRAMA V-I

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SECCION REACCION-FILTRACION



principales equipos y las corrientes que lo conforman, además en el cuadro V-1, se indica la cantidad de materias y productos utilizados en las corrientes principales, indicadas en el DIAGRAMA V-1, para un lote de trabajo en dicha sección.

CUADRO V-1

CANTIDADES QUE CIRCULARAN EN LAS CORRIENTES PARA UN LOTE DE 200 Kg DE ROCA EN LA SECCION REACCION-FILTRACION

CORRIENTE	CANTIDAD	% P2O5	g/ml	CARACTERISTICA
1	200 Kg	30	----	Roca fosfórica
2	88 Lt	--	1.84	Sulfúrico 95%
3	500 Lt	8	1.10	Reciclo bajo
4	200 Lt	18	1.23	Reciclo alto
5	143 Lt	29	1.41	Filtrado
6	90 Lt	29	1.41	Producto
7	110 Lt	8	1.10	Reciclo bajo
8	610 Lt	--	1.00	Agua

5.2.2.1 SECCION REACCION - FILTRACION

Como se indica en el DIAGRAMA V-1, existirán equipos que realizarán más de una etapa en esta sección.

Las etapas de Suspensión y Reacción, se realizarán en un solo tanque reactor; el tiempo total estimado de ambas etapas será de dos horas.

Las etapas de Formación de cristales y Fluides, también se llevarán a cabo en un tanque formador de cristales; el tiempo total estimado de estas etapas es de cuatro horas y media.

Las etapas de Filtración y lavado, serán realizadas en un equipo de filtración al vacío.

5.2.2.2 SECCION EVAPORACION

El único equipo requerido en esta sección es un evaporador que opera a presión atmosférica, así como un tanque de almacenamiento del producto final que es el ácido fosfórico grado fertilizante de 50% P₂O₅, apto para la industria de fertilizantes.

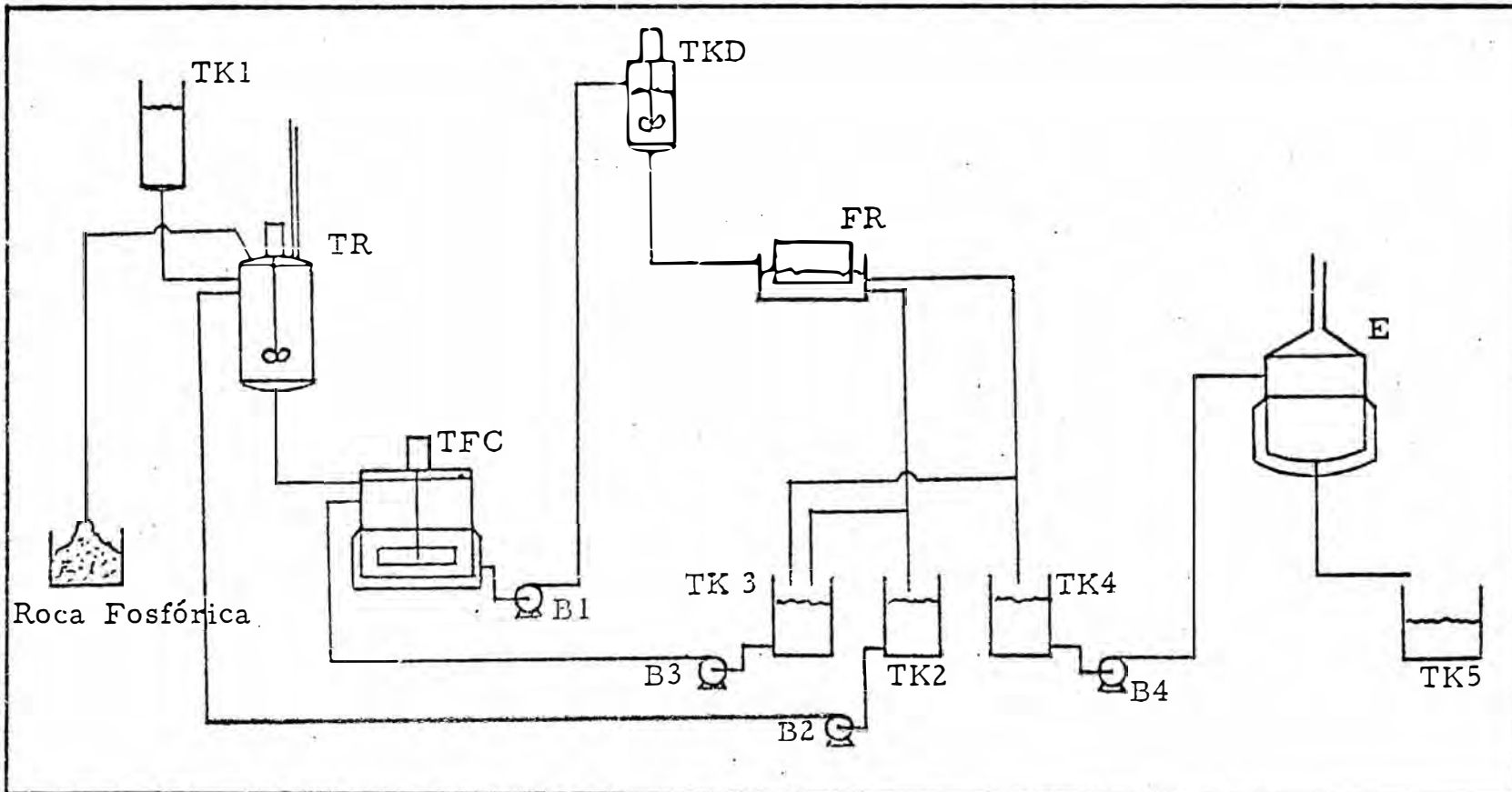
En esta sección se podrá trabajar en forma independiente de la sección reacción-filtración, para lo cual solo se debe tener disponible ácido fosfórico de 29% P₂O₅.

5.2.3 DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE LA PLANTA PILOTO

De acuerdo a la importancia de los equipos, primero realizaremos el diseño de los equipos principales que son: Tanque reactor, Tanque formador de cristales, equipo de filtración y el evaporador; luego diseñaremos los equipos secundarios que son: tanque de dosificador del filtro, tanques de almacenamiento de fluidos y bombas.

A continuación se muestra el diagrama de flujo de la planta piloto, donde se indican todos los equipos que toman parte en el diseño.

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA PILOTO



TR: Tanque Reactor
 TFC: Tanque Formador de Cristales
 FR: Filtro Rotatorio
 E: Evaporador
 TKD: Tanque Dosificador
 TK1: Almacén de Acido Sulfúrico

TK2: Almacén de A.F.G.F. 8% P_2O_5
 TK3: Almacén de A.F.G.F. 18% P_2O_5
 TK4: Almacén de A.F.G.F. 30% P_2O_5
 TK5: Almacén de A.F.G.F. 50% P_2O_5
 B1: Bomba de Lodos
 B2, B3, B4: Bombas de A.F.G.F.

A) DISEÑO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES:

REACTOR

En este equipo se manipula la roca con reciclo de ácido fosfórico, mediante agitación para conseguir la suspensión, y con ácido sulfúrico, para su ataque. Considerando que el reactor estará sometido a la acción de ácidos corrosivos y a una erosión fuerte, los aceros inoxidable austeníticos 316 y 317 son materiales que resisten muy bien estas condiciones de trabajo, siendo el acero 316 el material de uso más común (19).

La capacidad del tanque reactor, trabajando con 200 Kg de roca fosfórica, se estima en 1000 Lts. ver anexo V-A Considerando un tanque cilíndrico donde la altura del fluido (Hl) es igual que el diámetro del tanque (Dt), $Hl/Dt = 1$, las dimensiones del tanque son:

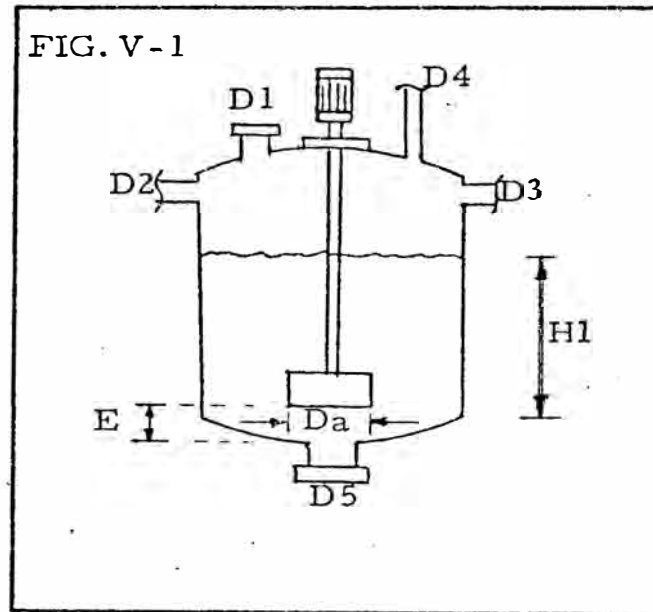
Diametro del tanque, $Dt = 0.95$ m

Altura del tanque, $Ht = 1.50$ m

Basados en pruebas de corrosión y erosión bajo condiciones similares (20), se puede usar un espesor de 1/8 de pulgada.

Otras características del tanque se indican en la FIGURA V-1.

FIGURA V-1: CARACTERISTICAS DEL TANQUE REACTOR



Diámetro de carga de roca,	D1= 2.5 pulg.
Diámetro de carga de reciclaje,	D2= 2.0 pulg.
Diámetro de carga de sulfúrico,	D3= 1.0 pulg.
Diámetro de escape de gases,	D4= 2.0 pulg.
Diámetro de descarga,	D5= 2.5 pulg.
Diámetro del agitador,	Da= 30 cm
Altura de fondo del agitador,	E = 30 cm
Altura del fluido,	H1= 0.95 cm

La agitación necesaria para la suspensión de sólidos, se puede lograr con un impulsor tipo turbina de palas inclinadas 45 grados, del mismo material que el tanque. La potencia de agitación basados en un artículo de la chemical engineering (21), se estima en 3/4 HP con una velocidad de 200 RPM para la turbina, ver anexo V-A.

FORMADOR DE CRISTALES

Este equipo trabaja con un lodo de yeso y ácido fosfórico a una temperatura máxima de 85 C y sometido a una agitación lenta para uniformizar la temperatura. Teniendo en cuenta la mezcla corrosiva que se manipula, y la temperatura de trabajo, los aceros inoxidable 316 y 317 soportan perfectamente estas condiciones de uso y aseguran una resistencia a la corrosión y erosión.

El volumen del tanque formador de cristales, para un batch de 200 Kg de roca, se estima en 1000 Lts, ver anexo V-B . El diseño del tanque cilíndrico se hace considerando $Hl/Dt = 1$, para mantener las mismas condiciones de trabajo que las pruebas en pequeña escala, resultando las siguientes dimensiones para el tanque:

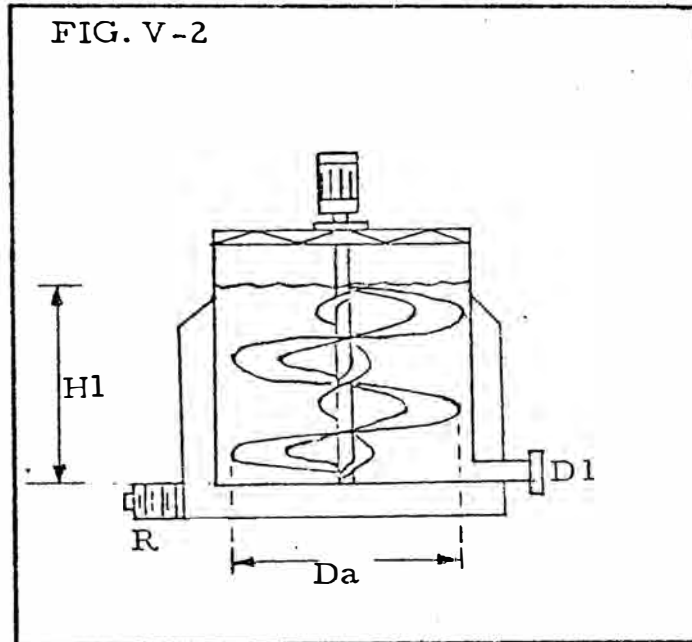
$$Dt = 0.96 \text{ m}$$

$$Ht = 1.37 \text{ m}$$

Al igual que el reactor, el espesor adecuado es de 1/8 de pulgada.

Otras características del formador de cristales se muestran en la FIGURA V-2.

FIGURA V-2: CARACTERISTICAS DEL TANQUE FORMADOR DE
CRISTALES



Diámetro de descarga, $D1 = 2$ pulg.

Diámetro del agitador, $Da = 0.90$ cm

Altura del fluido, $H1 = 0.96$ cm

R= Reóstato

Para mantener la temperatura necesaria en el tanque, se utilizará un calefactor de resistencia eléctrica regulado por un reóstato. El calor total, que se requiere, es estimado en 120000 Kcal, como se calcula en el anexo V-B.

La agitación necesaria, para mantener la uniformidad de la temperatura y no alterar la formación de los cristales, se puede realizar con un impulsor tipo Helical-ribbon (22), para lo cual se requiere una potencia de 3/4 HP. con una

velocidad de giro de 50 RPM aprox., ver anexo V-B.

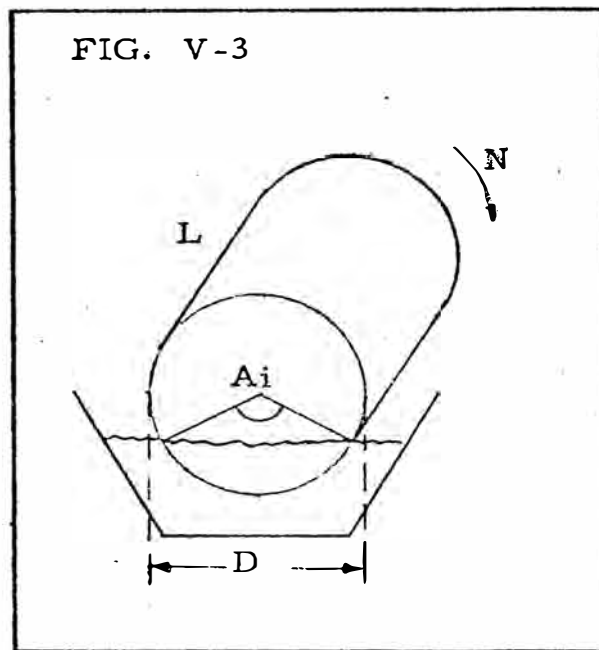
FILTRO DE VACIO

Las características de la lechada, la magnitud de la producción y las condiciones de operación, son los factores más importantes en la elección de un filtro. Nuestra lechada es un lodo ácido con un alto contenido de sólidos, 34%, donde el líquido es el producto más importante, por ello se elige un filtro continuo al vacío de tambor giratorio(23),(24)..

El filtro giratorio más conocido es el de Dorr Oliver, que trabaja con un vacío (DP) de 0.7 atm y, por el tipo de lodo tratado, el material del filtro debe ser de acero inoxidable. Debido a que solo firmas extranjeras construyen este tipo de filtros, los modelos y formas están determinados por dichas compañías.

Este tipo de filtro permite lavar y descargar la torta en forma rápida. Las dimensiones y parámetros principales del filtro, que se indican en la FIGURA V-3, son calculados en el anexo V-C.

FIGURA V-3 : CARACTERISTICAS DEL FILTRO DE VACIO



Diámetro del tambor, $D= 0.5 \text{ m}$

Longitud del tambor, $L= 0.5 \text{ m}$

Angulo de inmersión, $T= 120 \text{ grados}$

Velocidad de giro , $N= 2 \text{ RPM}$

EVAPORADOR

Este equipo llevará el ácido fosfórico de 30% P₂O₅ hasta 50-55% P₂O₅, donde la temperatura puede llegar a más de 100 C trabajando a presión atmosférica. Bajo estas condiciones, los aceros inoxidables 302, 304, 316 y 317 tienen muy buena resistencia a la corrosión , de todos ellos el más usado en la industria es el acero 316.

Para el diseño de las dimensiones del tanque evaporador, se considera que la altura del fluido es menor que la longitud del diametro del tanque, $H1/Dt=1/2$, consiguiendose una rápida uniformidad de temperatura en todo el liquido y una buena evaporación sin necesidad de agitación, al igual que las pruebas en pequeña escala.

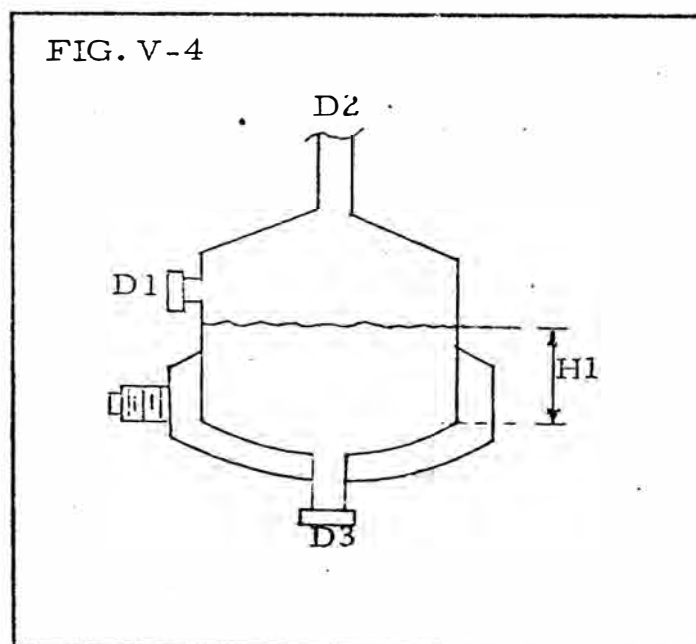
Los cálculos realizados, considerando 2 lotes de trabajo, establecen las siguientes dimensiones del tanque, ver anexo V-D.

$Dt= 0.90$ m

$Ht= 0.64$ m

Otras características se muestran en la FIGURA V-4.

FIGURA V-4: CARACTERISTICAS DEL EVAPORADOR



Donde:

Diámetro de carga, D1= 2.0 pulg.
Diámetro de escape de vapor, D2= 2.5 pulg.
Diámetro de descarga, D3= 2.0 pulg.
Altura del fluido, H1= 0.46 m

Considerando que se probarán temperaturas de 100 C o más en el evaporador, un espesor de 3/16 pulgadas es adecuado para soportar los aumentos de corrosión a esas temperaturas.

En este equipo el calentamiento puede realizarse mediante calefacción eléctrica, usando un reóstato.

El calor total que será necesario entregar al equipo es estimado en 175000 Kcal, ver anexo V-D.

B) DISEÑO DE LOS EQUIPOS SECUNDARIOS:

TANQUE DOSIFICADOR

Este recipiente debe mantener homogénea la concentración de sólidos en el lodo de alimentación del filtro, mediante agitación adecuada, lodo formado por ácido fosfórico y yeso que inicialmente están a 80 C.

Bajo estas condiciones de operación se puede usar un tanque de fibra de vidrio reforzado con resina antiácida o resina epóxica.

La capacidad de diseño del tanque, para un batch de trabajo, se estima en 750 lt (se manipula 500 lts de fluido aprox.). Para el dimensionamiento del tanque cilindrico se considera que $Ht/Dt = 2$ ver anexo V-E, las dimensiones del tanque son:

$$Dt = 0.78 \text{ m}$$

$$Ht = 1.56 \text{ m}$$

Usando fibra de vidrio reforzado con resina, el espesor llega hasta a unos 5.5 mm. El diametro de descarga se considera de 2 pulg.

La potencia requerida por el agitador de turbina de paletas inclinadas 45 grados, se calcula en el anexo V-E, estimandose una potencia de 3/4 HP con una velocidad de rodete de 250 RPM.

TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Cada tanque contendrá solo un tipo de ácido, sulfúrico o fosfórico, que permanecerá en reposo hasta su posterior descarga hacia otros equipos. Bajo estas condiciones de trabajo, no existe erosión y la velocidad de corrosión no es muy severa, por lo que se pueden utilizar tanques de fibra de vidrio reforzado con resina epóxica antiácida.

Para el dimensionamiento de los tanques se tiene en cuenta el numero de lotes que van a contener, ver anexo V-F, asi mismo se considera que todos los

tanques son cilindros de base plana donde se tiene que $Ht/Dt = 2$.

La tabla V-1 presenta el volumen de diseño, las dimensiones y el fluido, que contiene cada tanque de almacenamiento.

TABLA V-1
DIMENSIONES DE LOS TANQUES DE
ALMACENAMIENTO

TANQUE	FLUIDO	VOL.DIS (m3)	D (m)	H (m)
TK1	A.sulf.95%	0.50	0.68	1.36
TK2	A.fosf. 8%	1.00	0.86	1.72
TK3	A.fosf.18%	0.40	0.63	1.26
TK4	A.fosf.30%	0.75	0.78	1.56
TK5	A.fosf.50%	0.50	0.68	1.36

Para el ácido Fosfórico el porcentaje está dado en % P2O5.

En todos los tanques se tiene un diámetro de descarga de 2 pulg a excepción de TK1 cuyo diámetro de desgarga es 1 pulg.

BOMBAS

Todas las bombas que se usarán son del tipo centrífugas, este tipo de bomba es recomendable para sistemas bastantes corrosivos y para fluidos que contienen sólidos (23).

Los cálculos detallados se presentan en el anexo V-G.

* BOMBA PARA LODO, B1:

Esta bomba será usada para descargar el lodo del formador de cristales hacia el tanque dosificador del filtro. El lodo bombeado está a unos 85 C, y presenta las siguientes características:

Densidad = 1.2 g/ml

% sólidos = 30

Viscosidad = 150 cp

Se recomienda usar una bomba de hierro dulce con recubrimiento interno de resina epóxica. La potencia es estimada en 1/2 HP.

* BOMBAS PARA ACIDOS, B2,B3,B4:

Teniendo en cuenta que estas bombas manipulan ácidos prácticamente libres de sólidos, todas ellas presentan características similares.

En la tabla V-2 se presentan las principales características del fluido manejado y de la bomba.

TABLA V-2
BOMBAS PARA ACIDOS

BOMBA	CARACT. DEL FLUIDO	MATERIAL	POT. (HP)
B2	A. fosfórico 8% P2O5, a 30 C, con 1.10 g/ml.	Hierro dulce recubierto con resina epóxica	1/4
B3	A. fosfórico 18% P2O5, a 30 C, con 1.23 g/ml.	Hierro dulce recubierto con resina epóxica	1/4
B4	A. fosfórico 29% P2O5, a 30 C, con 1.41 g/ml.	Hierro dulce recubierto con resina epóxica	1/4

RESUMEN DEL DISEÑO DE EQUIPOS

En el cuadro V-2 se presenta un resumen de todos los equipos diseñados para la planta piloto, y en la FIGURA V-6 se presenta la vista isométrica de la distribución de los equipos de la planta piloto.

CUADRO V-2
RESUMEN DE LOS EQUIPOS DISEÑADOS

EQUIPO	MATERIAL	DIMENSIONES/ TIPO	CARACTERISTICAS
TR	Acero inox. 316	D = 0.95 m H = 1.50 m e = 1/8 pulg	Cilindro con tapa, base bombeada, con agitador de 3/4 HP y 200 RPM.
TFC	Acero inox. 316	D = 0.96 m H = 1.37 m e = 1/8 pulg	Cilindro, sin tapa, base plana, con agitador de 3/4 HP y 60 RPM.
FR	Acero inoxidable	D = 0.50 m L = 0.50 m	Filtro de tambor rotatorio a vacío, con 2 RPM de giro y un ángulo de inmersión de 120 grados.
E	Acero inox. 316	D = 0.90 m H = 0.64 m e = 3/16 pulg	Cilindro, con tapa cónica y base bombeada, sin agitación.
TKD	Fibra de vidrio reforzado con resina epóxica	D = 0.95 m H = 1.50 m e = 5.5 mm	Cilindro, sin tapa, base bombeada, con agitador de 3/4 HP y 250 RPM.
TK1	Fibra de vidrio reforzado con resina epóxica	D = 0.68 m H = 1.36 m e = 4 mm	Cilindro, con tapa y base bombeada,

..... CONTINUACION DEL CUADRO V-2

EQUIPO	MATERIAL	DIMENSIONES/ TIPO	CARACTERISTICAS
TK2	Fibra de vidrio reforzado con resina epóxica	D = 0.86 m H = 1.72 m e = 4 mm	Cilindro, sin tapa y base plana.
TK3	Fibra de vidrio reforzado con resina epóxica	D = 0.63 m H = 1.25 m e = 4 mm	Cilindro, sin tapa y base plana.
TK4	Fibra de vidrio reforzado con resina epóxica	D = 0.78 m H = 1.56 m e = 4 mm	Cilindro, con tapa y base plana.
TK5	Fibra de vidrio reforzado con resina epoxica	D = 0.68 m H = 1.36 m e = 4 mm	Cilindro, con tapa y base plana.
B1	Hierro fundido recubierto con resina epóxica	Centrifuga	Potencia de 1/2 HP
B2			
B3	Hierro dulce recubierto con resina epóxica	Centrifuga	Potencia de 1/4 HP
B4			

5.2.4 REQUERIMIENTO DE AREA

Teniendo en cuenta las dimensiones de los equipos principales y secundarios calculados anteriormente, y considerando la distribución de las áreas de los equipos indicados en la FIGURA V-6, podemos estimar el área del terreno requerido en 130 m².

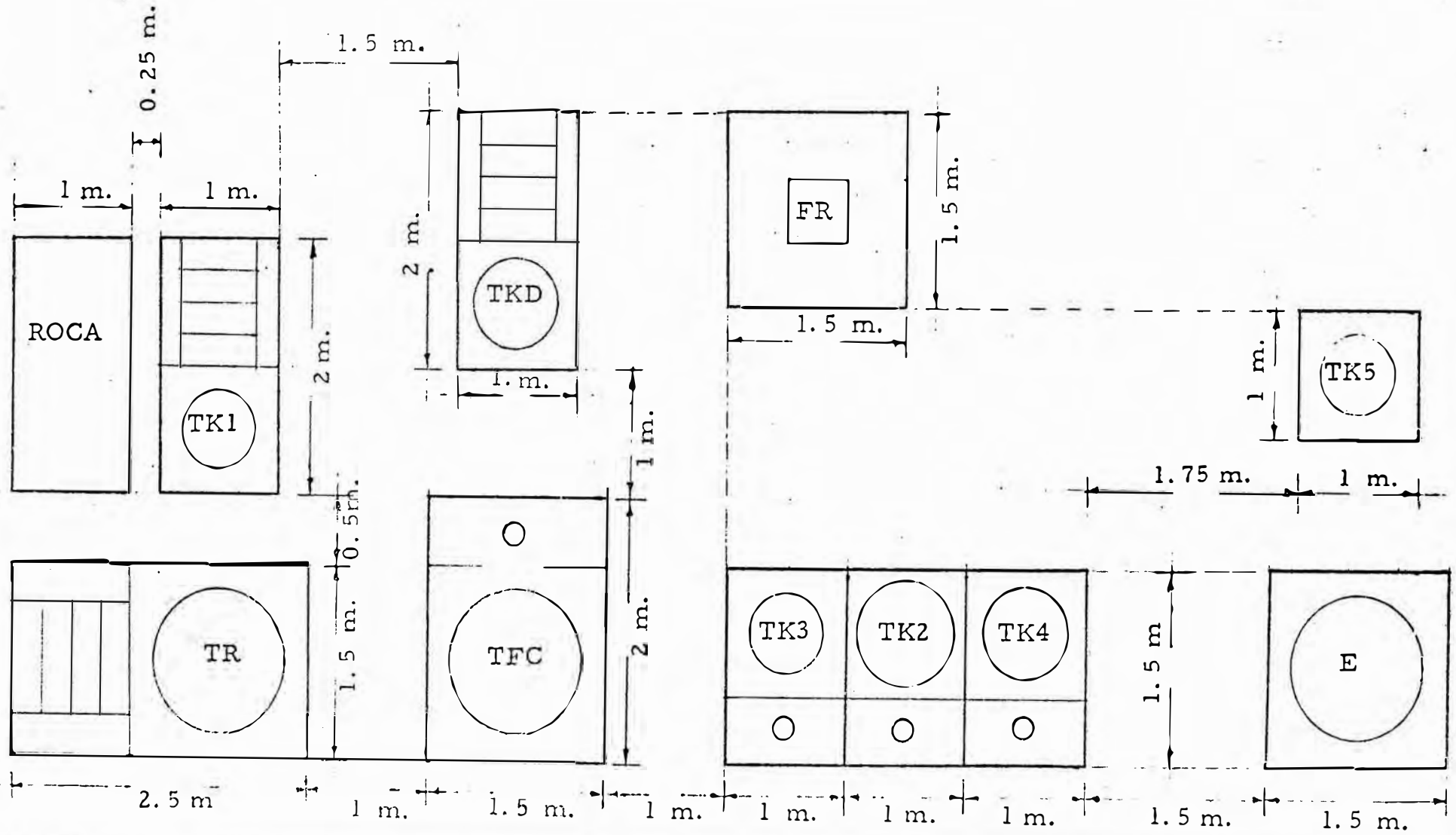
5.2.5 ESTIMACION DEL COSTO DE LA PLANTA

En el cuadro V-3 se indica el costo de los equipos que forman parte de la planta piloto, en dólares de Julio de 1989.

CUADRO V-3

COSTOS DE EQUIPOS (Dolares, Julio, 1989)		
EQUIPO	COSTO	SUBTOTAL
REACTOR:		
- Tanque	3 100	
- Agitador	4 500	7 600
FORMADOR DE CRISTALES:		
- Tanque	2 870	
- Agitador	4 500	7 370
FILTRO:		10 000
EVAPORADOR:		1 500
TANQUE TKD:		
- Tanque	350	
- Agitador	4 500	4 850
TANQUES:		
TK1	230	
TK2	365	
TK3	200	
TK4	300	
TK5	230	1 325

FIGURA V-6: AREAS REQUERIDAS EN LA PLANTA PILOTO



..... CONTINUACION DEL CUADRO V-3

EQUIPO	COSTO	SUBTOTAL
BOMBAS:		
B1	4 500	
B2	4 500	
B3	4 500	
B4	4 500	18 000
COSTO TOTAL DE EQUIPOS (CE)		50 645

Con el costo total de los equipos, se puede estimar el costo total de la planta piloto. El cuadro V-4 indica los rubros que consideramos en la estimación de dicho costo (25).

CUADRO V-4

ESTIMACION DEL COSTO DE LA PLANTA PILOTO

(Dólares de Julio, 1989)

RUBROS	COSTO
EQUIPOS	50 645
INSTALACION (7% CE)	3 545
CANERIAS Y TUBERIAS (6.5% CE)	3 290
INSTALACIONES ELECTRICAS (3% CE)	1 520
OBRAS CIVILES (6% CE)	3 000
TERRENO	3 000
COSTO TOTAL PLANTA PILOTO	\$ USA 65 000

A N E X O S

A N E X O I

A) INDICES USADOS PARA INTERPRETACIONES AGRONOMICAS

Estos indices han sido determinados a partir de los niveles criticos de los nutrientes y pH de los suelos.

INDICES PARA P , K y M.O.

Calificativo	rango de indices
MUY BAJO (MB)	1.00 - 1.40
BAJO (B)	1.41 - 1.80
MEDIO (M)	1.81 - 2.20
ALTO (A)	2.21 - 2.60
MUY ALTO (MA)	2.61 - 3.00

INDICES PARA PH

Calificativo	rango de indices
ACIDO (AC)	1.00 - 1.80
NEUTRO (N)	1.81 - 2.20
ALCALINO (ALC)	2.21 - 3.00

B) MANUFACTURA DEL SUPERFOSFATO TRIPLE (SFT)

Para la fabricación del SFT existen dos tipos de procesos, los cuales se detallan a continuación.

PROCESO CONTINUO DE MANUFACTURA: (SFT en polvo)

El ácido fosfórico grado fertilizante (ácido de aprox. 50 %P₂O₅ obtenido por la reacción entre roca fosfórica y ácido sulfúrico), y roca fosfórica fina se hacen pasar de manera continua y controlada a una mezcladora debidamente dosificada en proporciones de peso que depende de la concentración de ácido fosfórico usado, la lechada producida se descarga en un transportador de correa que actúa a modo de reactor y en que la masa se endurece en breve tiempo, si el producto contiene mucha humedad este se pasa por un secador (horno rotatorio) para llevar hasta 7% de humedad. Luego el producto es fragmentado mediante un desintegrador y enviado a una pila de curado. Tras un periodo de curado (4 semanas aprox.) el producto en forma pulverizado es ensacado para su comercialización.

PROCESO DE LECHADA: (SFT en granulos)

Este proceso es el más moderno y el más utilizado. La roca y el ácido fosfórico son mezclados en reactores dispuestos en cascada, la lechada del último reactor es

granulada en un agitador de paletas ó en un granulador de tambor. Los granulos son secados y luego cernidos para separar y reciclar los de tamaño excesivo y los finos. el producto obtenido es enviado a una pila de curado, tras un periodo de curado (4 semanas aprox.) el producto queda listo para su comercializacion.

Nota: Durante el periodo de curado es completada la reaccion entre la roca y el ácido fosfórico.

Las FIGURAS I-1 e I-2 muestran las secuencias de los procesos respectivamente mencionados.

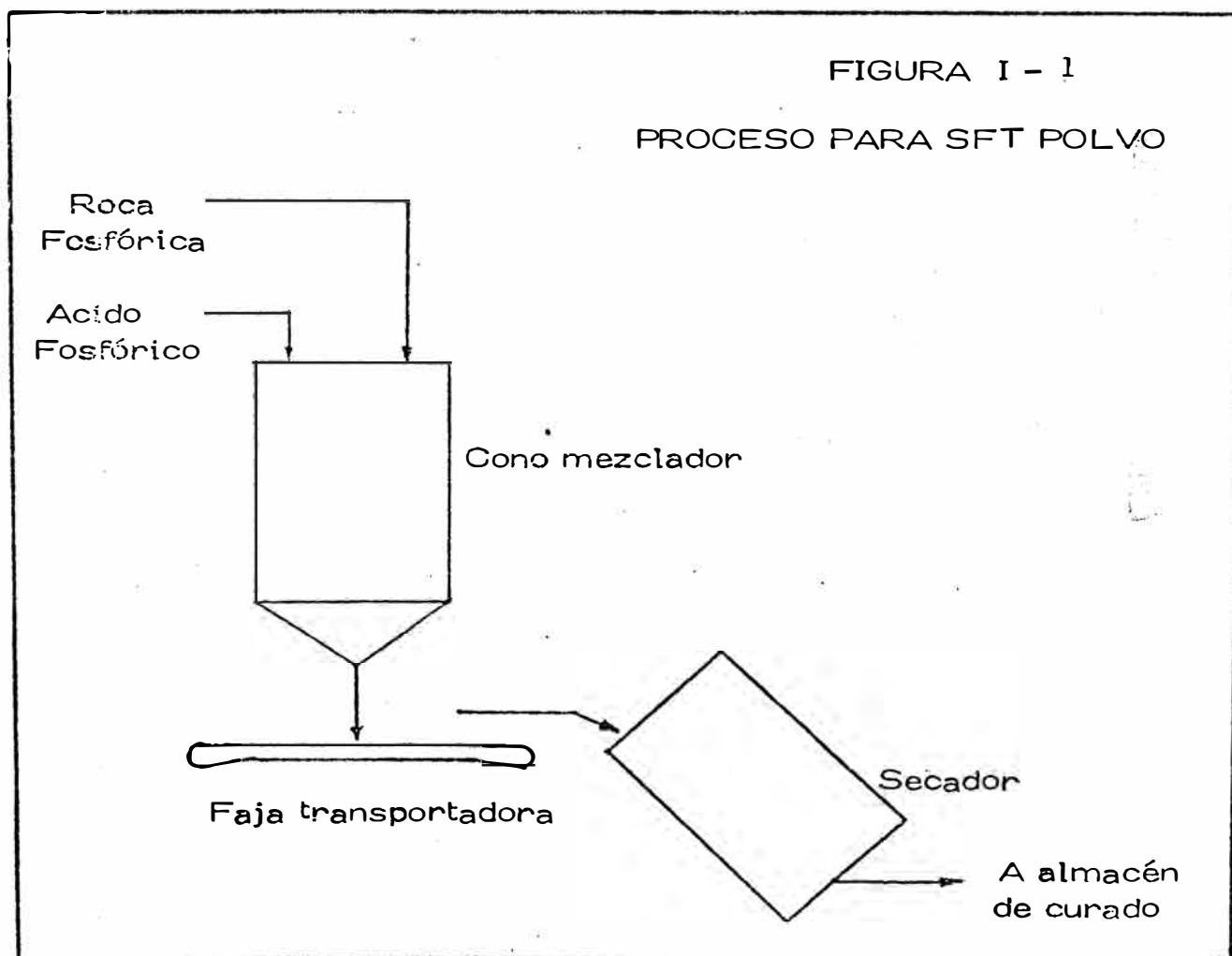
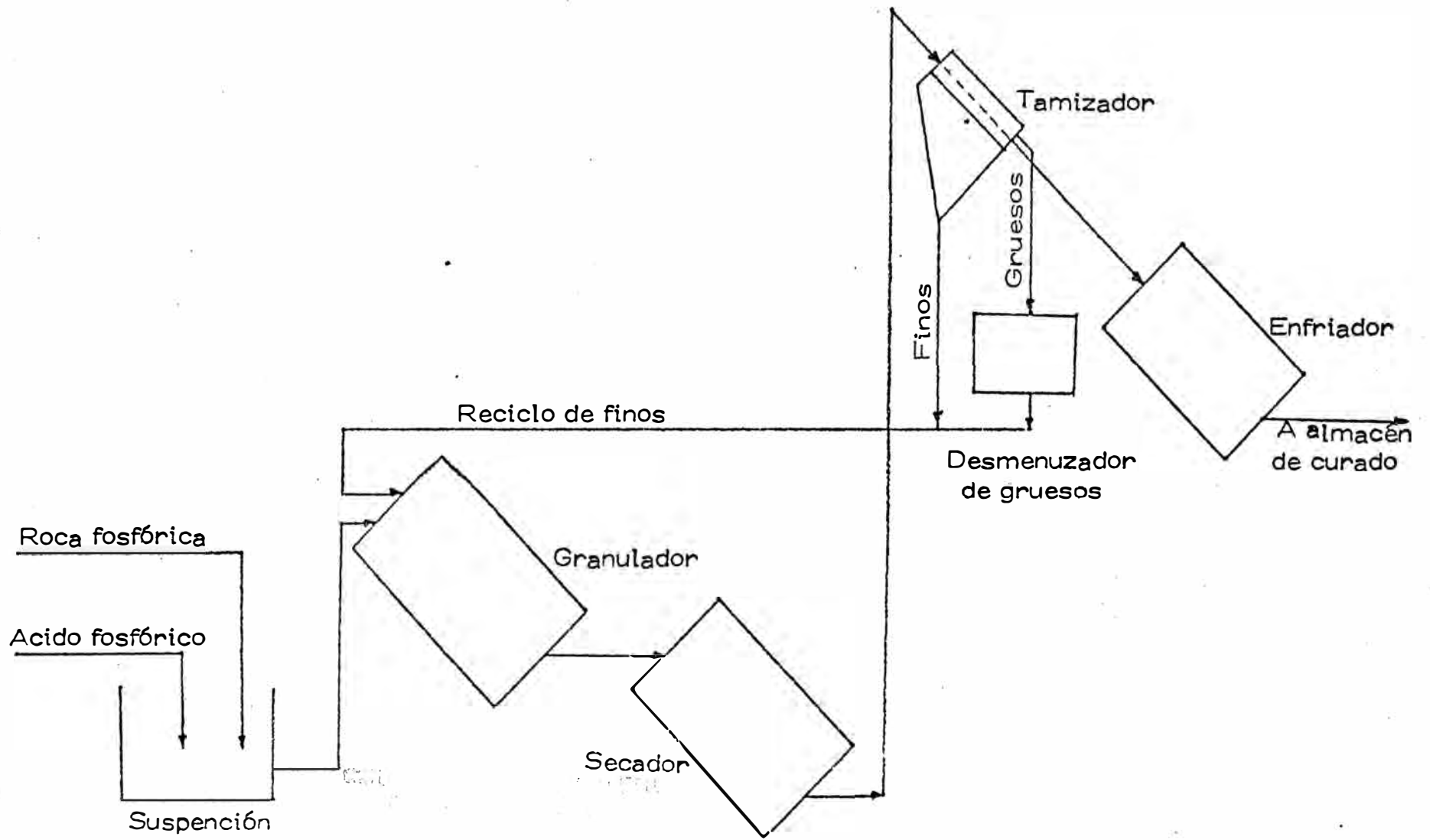


FIGURA I-2
PROCESO PARA SFT GRANULADO



A N E X O I I

A) PROPIEDADES DEL ACIDO FOSFORICO

PROPIEDADES FISICAS DE SOUCIONES ACUOSAS DE H3PO4

% H3PO4	% P2O5	DENS.RELAT.	Pto. eb. C
10	7.24	1.052	100.2
20	14.49	1.113	100.8
30	21.73	1.180	101.8
50	36.22	1.332	108.0
75	54.32	1.574	135.0
85	61.57	1.685	158.0

VISCOSIDAD Y PRESION DE VAPOR DE SOLUCIONES ACUOSAS DE H3PO4

% H3PO4		10	20	30	50	75	85
20 C	cts	1.2	1.6	2.2	4.3	15	28
	torr	17.3	17.0	16.3	13.0	5.65	2.16
40 C	cts	0.83	1.1	1.4	2.6	7.8	14
	torr	54.2	53.0	50.5	40.3	17.5	6.95
60 C	cts	0.61	0.78	1.0	1.8	4.8	8.1
	torr	146	141	136	108	47.0	19.7
80	cts	0.47	0.60	0.79	1.4	3.3	5.1
	torr	350	341	327	257	111	48.8
100 C	cts	0.38	0.48	0.62	1.1	2.4	3.8
	torr	753	735	705	575	240	111

cts : centistokes.

torr: mm Hg

Fuente: (10)

B) PAISES IMPORTADORES Y EXPORTADORES DE ACIDO FOSFORICO

PRINCIPALES PAISES EXPORTADORES DE ACIDO FOSFORICO (miles TM, P2O5)

PAIS	1980	1981	1982	1983
FRANCIA	242	236	198	150
MARRUECOS	221	292	358	470
NETHERLANDS	100	94	107	101
SUD AFRICA	---	152	151	129
USA	699	838	768	657
ESPAÑA	86	65	96	95
BLEU	75	88	83	114
TUNEZ	253	331	572	312

* Fuente: ROSKILL, The economics of phosphate rock, february 1986, second edition

PRINCIPALES PAISES IMPORTADORES DE ACIDO

FOSFORICO (miles TM, P2O5)

PAIS	1979	1980	1981	1982
AUSTRALIA	6.5	9.2	6.3	7.2
BRASIL	591.2	794.0	280.2	303.6
COLOMBIA	9.6	8.7	17.2	9.2
BLEU	27.7	19.7	34.6	54.1
CANADA	7.1	----	9.3	14.6
CHECOSLOVAQUIA	30.5	66.3	42.1	11.6
DINAMARCA	43.0	31.0	26.6	34.3
FRANCIA	74.4	87.6	86.2	81.0
ALEMANIA OESTE	170.8	156.3	149.4	174.2
INDIA	271.9	365.3	441.1	468.1
IRLANDA	36.3	32.3	29.6	19.6
ITALIA	115.3	113.5	109.0	152.1
JAPON	70.7	42.7	46.4	37.7
NETHERLANDS	117.9	67.3	107.0	134.1
POLONIA	29.1	22.6	----	----
RUMANIA	2.0	1.7	----	----
SUECIA	13.0	10.8	6.4	2.0
TURQUIA	37.6	59.8	208.1	197.0
UK	56.8	41.5	38.0	51.9
OTROS	488.8	293.8	727.6	817.5

* Fuente: ROSKILL, The economics of phosphate rock, february 1986, second edition.

C) ANALISIS DEL H3PO4 PURIFICADO

COMPUESTO	A	B
P2O5	54.32 %	49.00 %
Na2O	0.02 %	--
SO4	0.0 %	0.83 %
F	0.4 ppm	370 ppm
Fe	2.0 ppm	46 ppm
Al	0.0 ppm	3 ppm
Ca	0.0 ppm	3 ppm
Mg	---	2.5 ppm
Cl	2.0 ppm	---
H2S	0.1 ppm	---

El caso A corresponde al análisis de un ácido fosfórico grado alimenticio hecho por la TENNESSEE VALLEY AUTHORITY; es importante mencionar que la concentración de un ácido grado alimenticio puede variar entre 75-85 %H₃PO₄. El caso B corresponde al análisis de un ácido fosfórico grado técnico que es muy utilizado en la industria de sales fosfatadas.

A N E X O I I I

A) COMPARACION DE LA ROCA FOSFORICA DE BAYOVAR FRENTE A OTRAS DEL MUNDO

La procedencia de las rocas mas conocidas a nivel mundial, son en su mayoria de E.E.U.U. y Nueva Zelandia como se indica en la siguiente tabla:

Sigla	PROCEDENCIA
CI	CRISTMAS ISLAND (NUEVA ZELANDIA)
NI	NAURU ISLAND (NUEVA ZELANDIA)
TE	TENNESSEE (E.E.U.U.)
FL	FLORIDA (E.E.U.U.)
BA	BAYOVAR (PERU)
NC	NORTH CAROLINA (E.E.U.U.)

A continuacion se muestra la solubilidad del fósforo de las diversas rocas mencionadas en la tabla anterior, donde se indican los resultados de tres extracciones sucesivas:

SOLUBILIDAD EN ACIDO CITRICO AL 2 % Y
CITRATO DE AMONIO NEUTRO

Procedencia Sigla	% FOSFORO SOLUBLE TOTAL	
	Ac. Citrico 2% (*)	Cit. Amo. Neutro
CI	62	28
NI	60	28
TE	56	24
FL	62	40
BA	100	62
NC	92	65

(*) Estos resultados correlacionan bien con el comportamiento agronomico. (Fuente: MINERO-PERU)

La siguiente tabla muestra el contenido, en % peso, de los principales compuestos de las rocas mas conocidas:

COMPOSICION DE LAS DIVERSAS ROCAS

Proced. Sigla	% peso							
	P2O5	CaO	F	CO2	Al2O3	Fe2O3	Na2O	SiO2
CI	39.50	53.50	1.40	2.28	0.80	----	0.53	0.60
NI	38.92	54.42	2.70	2.04	0.30	----	0.45	0.20
TE	35.50	48.50	3.70	2.40	2.85	2.25	0.20	4.95
FL	33.50	48.25	3.75	3.06	0.90	1.51	0.36	8.56
BA	30.50	46.95	2.11	3.94	0.82	0.60	1.27	2.55
NC	30.25	49.15	3.65	5.60	0.55	0.65	0.95	2.95

B) ESTIMACION DE LAS RESERVAS GEOLOGICAS EN EL AREA I

El área I está formada por diez capas, C, B, A, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, y solo se han hecho las estimaciones de las capas C,B,A y 1, las que se presenta a continuación:

RESERVAS DE LA CAPA C

Polig.	Area	Potencia	G.E.	T.M.S.	Ley
P-1	167 000	1.646	1.848	507 982	25.84
P-2	191 000	0.549	1.771	175 982	20.74
P-3	700 000	0.671	1.840	86 425	25.34
P-4	84 000	0.975	1.819	148 976	23.90
P-5	168 000	2.377	1.787	713 613	21.80
P-6	85 000	0.701	1.840	109 636	25.30
P-7	120 000	1.067	1.832	234 569	24.78
P-8	30 000	0.762	1.847	42 222	25.78
P-9	194 000	0.853	1.818	300 846	23.88
P-10	106 000	1.433	1.846	280 404	25.70

..... CONTINUACION

Polig.;	Area	Potencia	G.E.	T.M.S.	Ley
P-11	257 000	1.463	1.820	684 304	23.92
P-12	200 000	1.067	1.774	378 572	20.90
P-13	141 000	0.823	1.831	212 475	24.74
P-14	165 000	1.067	1.837	323 413	25.14
P-15	59 000	0.640	1.717	64 834	18.40
P-16	92 000	0.762	1.799	126 117	22.60
P-17	62 000	0.762	1.813	85 653	23.54
P-20	45 000	2.133	1.668	160 103	16.56
P-21	63 000	1.981	1.785	222 773	21.68
P-22	50 000	1.219	1.791	109 161	22.04
P-23	61 000	1.676	1.785	182 491	21.66
B-63	153 000	0.213	1.850	60 290	26.00
B-64	10 000	0.884	1.813	16 027	23.54
B-65	95 000	1.372	1.813	236 306	23.50
B-83	144 000	1.067	1.786	274 415	21.70
B-86	94 000	1.219	1.832	209 922	24.30
B-94	31 000	0.894	1.804	49 996	22.94
B-96	48 000	1.524	1.786	130 649	21.75
TOT.	2'975,000	1.140	1.817	6'128,156	23.24

RESERVAS EN LA CAPA B

Polig.;	Area	Potencia	G.E.	T.M.S.	Ley
P-1	219 000	0.488	1.767	188 843	20.46
P-13	168 000	0.549	1.628	150 154	15.06
P-15	61 000	0.914	1.628	90 767	15.04
B-63	173 000	0.396	1.648	112 901	15.80
B-65	236 000	0.305	1.691	121 718	17.40
B-83	252 000	0.610	1.752	269 317	19.70
B-84	125 000	0.305	1.823	69 502	24.20
B-86	215 000	0.427	1.685	154 691	17.20
B-94	81 000	0.823	1.503	100 194	7.91
B-95	200 000	0.701	1.727	242 125	18.77
B-96	272 000	0.671	1.686	307 715	17.22
TOT.	2'002,000	0.534	1.691	1'807,927	17.52

RESERVAS EN LA CAPA A

Polig.:	Area	Potencia	G.E.	T.M.S.	Ley
P-1	219 000	0.549	1.709	205 475	18.10
P-13	168 000	0.762	1.567	200 601	12.34
B-63	173 000	0.305	1.886	99 515	28.40
B-64	80 000	0.457	1.709	62 481	18.10
B-65	236 000	0.457	1.841	198 555	25.40
B-86	194 000	1.254	1.520	449 397	10.00
B-94	122 000	0.274	1.641	54 855	15.55
B-95	253 000	0.640	1.552	251 300	11.61
B-96	266 000	0.549	1.576	230 150	12.80
TOT.	1'711,000	0.633	1.619	1'752,329	15.07

RESERVAS EN LA CAPA 1

Polig.:	Area	Potencia	G.E.	T.M.S.	Ley
P-13	280 000	1.006	1.778	500 827	21.20
P-16	193 000	1.524	1.708	502 377	18.06
P-19	137 000	1.372	1.749	328 749	19.58
B-63	258 000	1.067	1.772	487 807	20.80
B-64	90 000	0.762	1.775	121 730	21.00
B-83	252 000	0.610	1.771	272 238	20.70
B-84	161 000	0.610	1.844	181 099	25.60
B-86	194 000	0.457	1.784	158 166	21.60
B-92	208 000	0.610	1.719	218 107	18.47
B-93	245 000	1.036	1.727	438 437	18.78
B-94	238 000	0.762	1.765	320 093	20.31
B-95	257 000	0.701	1.796	323 562	22.39
B-96	272 000	1.433	1.674	652 485	16.78
TOT.	3'019,000	0.980	1.735	5'133,295	19.42

Datos: Archivo tecnico de Minero-Peru

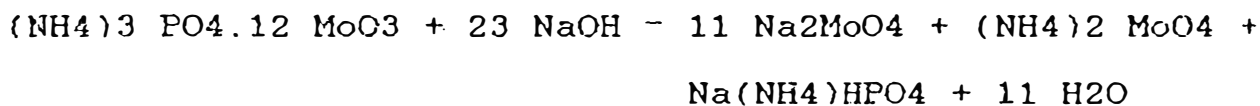
A N E X O I V

A) DETERMINACION DE FOSFORO

CONSIDERACIONES GENERALES

El fósforo debe estar como ortofosfato se precipita como fosfomolibdato de amonio $(\text{NH}_4)_3 \text{PO}_4 \cdot 12 \text{MoO}_3 \cdot 2 \text{HNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, a 20-45 C, con un gran exceso de solución de molibdato de amonio en presencia de ácido nítrico; el precipitado se transforma en $(\text{NH}_4)_3 \text{PO}_4 \cdot 12 \text{MoO}_3$ ó $(\text{NH}_4)_3 (\text{P Mo}_{12} \text{O}_{40})$, cuando se lava convenientemente con solución diluida de nitrato de potasio, puede determinarse el fósforo en el precipitado lavado, de la siguiente manera:

titulando con solución valorada de hidróxido de sodio, empleando fenolftaleína como indicador, se produce la siguiente reacción:



1 ml NaOH 1N = 0.001349 g de P = 0.003088 g de P₂O₅

TECNICA

El reactivo molibdato se prepara como sigue. se disuelve 100 g de molibdato de amonio p.a. en una mezcla de 400 ml de agua y 80 ml de solución concentrada de amoníaco; se filtra, si fuera necesario. Se agrega lentamente la solución de molibdato así obtenida, con agitación continua, a una solución que contenga 400 ml de ácido nítrico concentrado y 600 ml de agua; el extremo del tubo que lleva la solución de molibdato debe estar sumergido en

la solución del ácido nítrico diluido. Se mantiene la solución en un lugar templado durante varios días o hasta que una porción calentada a 40-45 C no produzca precipitado amarillo. La solución se decanta para separar cualquier sedimento y se conserva en frascos con tapa esmerilada.

Para el análisis se toma 0.5 ml de muestra y se lleva a 100 ml en una fiola. de esta solución se toma 1 ml sobre la cual se agregan 20 ml de solución de molibdato previamente calentado a 40-45 C, no debe calentarse a más de 45 C para evitar la contaminación del precipitado con anhídrido molibdico. Se tapa con tapón de goma y se agita fuertemente durante 10 minutos y se deja en reposo durante 30 minutos. Luego se filtra el precipitado con papel de filtro cuantitativo, y se lava el precipitado y el frasco con solución de nitrato de potasio al 1% hasta que 10 ml de lavado no decolore, aproximadamente, a 1 ml de agua que contenga 1 gota de fenolftaleína y 1 gota de NaOH 0.1N. Se coloca en el frasco original el papel de filtro junto con el precipitado.

El precipitado se trata con volúmenes conocidos de NaOH 0.1N hasta su total disolución, con ligero exceso, luego se diluye con agua a unos 150 ml, se agrega 5 gotas de fenolftaleína, como indicador, y se titula con HCl 0.1N hasta que el color rosado desaparesca totalmente.

Se calcula el volumen de álcali que ha reaccionado con el precipitado y con este valor el contenido de fósforo en la muestra.

A N E X O V

A) CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL REACTOR

* Capacidad = Vol. + Vol. + Vol. + Vol. + Vol.
del reactor roca recicló sulfúrico espuma libre

Vol. roca = 75.5 Lt

Vol. recicló = 500 Lt

Vol. sulfúrico = 88 Lt

Vol. mezcla = roca + recicló + sulfúrico = 633.5 Lt

Vol. espuma = 0.2 Vol mezcla = 133 Lt

Vol. libre = 0.3 Vol. mezcla = 199 Lt

Capacidad del reactor = 995.5 Lt

Vol. de diseño del reactor = 1000 Lt = 1 m³

H_l/H_t = Vol. mezcla / Vol. diseño = 0.6 aprox.

H_l/D_t = 1

$$\Rightarrow H_t = D_t / 0.6$$

Para un cilindro se tiene: Vol. = 3.1416 D_t² H_t / 4

Reemplazando H_t y despejando D_t tenemos:

D_t = 0.9 m

H_t = 1.5 m

* Potencia de agitación, se calcula mediante la ecuación:

$$HP = HP_{600} (T/600)^{2.74} f Ge Nt \dots\dots\dots (I)$$

Para lo cual se definen los siguientes terminos:

- Altura de líquido equivalente en agua (WELH), pulg.

$$WELH = Ge H_l$$

Gravedad específica del fluido: $Ge = 1.2$

Altura del fluido en el tanque, pulg., $H_1 = 35.5$

$$WELH = (1.2)(35.5) = 42.6$$

- Numero de rodetes (N_t)

$$N_t = WELH / D_t$$

Diametro del tanque, pulg., $D_t = 35.5$

$$N_t = (42.6)/(35.5) = 1.2 \quad \Rightarrow \text{Se toma } N_t = 2$$

- Velocidad periférica del rodete (T), ft/min

$$T = 600 (WELH / 2DaN_t)^{1/2}$$

Diametro del rodete, pulg., $Da = 11.5$

$$T = 600 (42.6 / 2(11.5)(2))^{1/2} = 577$$

- Velocidad rotacional (N), RPM

$$N = T / 0.26Da$$

$$N = 577 / 0.26(11.5) = 200 \text{ aprox.}$$

HP600 es la potencia cuando la velocidad periférica del rodete es 600 ft/min, este valor depende del tipo y diametro de la turbina, para una turbina inclinada 45 grados de 11.5 pulg., $HP600 = 0.23$; y f es un factor de corrección de potencia por viscosidad que se obtiene de una gráfica de la referencia (26), para una viscosidad de 28 cp se tiene que $f = 1.06$

Luego se calcula la potencia con la ecuación (I):

$$HP = 0.23 (577/600)^{2.74} (1.06)(1.2)(2) = 0.53$$

Para su normal aplicación usar un motor de 0.75 HP.

B) CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL FORMADOR DE CRISTALES

* Capacidad del tanque = Vol. lodo del reactor + Vol. de recicló + Vol. libre

Vol. lodo del reactor = 650 Lt

Vol. de recicló = 200 Lt

Vol. mezcla = lodo del reactor + recicló = 850 Lt

Vol. libre = 0.15 Vol. mezcla = 127.5 Lt

Capacidad del tanque = 977.5 Lt

Vol. de diseño del tanque = 1000 Lt = 1 m³

Hl/Ht = 0.7 (para tener suficiente altura libre)

Hl/Dt = 1

$$\Rightarrow Ht = Dt/0.7$$

Para un cilindro se tiene: Vol. = 3.1416 Dt² Ht/4

Reemplazando Ht y despejando Dt tenemos:

Dt = 0.96 m

Ht = 1.37 m

* Calor total entregado, se estima mediante la ecuación:

Calor requerido = Calor vaporización

Vaporización: $Q = m L$

m - masa de agua evaporada

L - calor latente del agua = 538.6 Kcal/Kg

Vol. total de reactivos que ingresa = 788 lts

Vol. total de producto que sale = 344 lts

La diferencia de estos volúmenes nos indica la masa de agua evaporada.

$$m = 788 - 344 = 222$$

$$\Rightarrow m = 222 \text{ Kg}$$

Luego: calor = (222)(538.6) = 119 569 Kcal

$$\Rightarrow \text{Calor requerido} = 120 000 \text{ Kcal}$$

* Potencia de agitación, se calcula mediante la ecuación (1):

$$HP = HP_{600} (T/600)^{2.74} f Ge Nt$$

que se usó en la agitación del reactor.

En este caso consideramos lo siguiente:

Agitador Helical-ribbon de dos pasos, y cada paso equivale a una turbina

Diametro de la turbina muy proximo al diametro del tanque,

$$D_a = 36 \text{ pulg.}$$

Los cálculos, siguiendo las ecuaciones usadas en la agitación del reactor, son:

$$Ge = 1.26 ; H_l = 38 \text{ pulg.} \Rightarrow WELH = (38)(1.26) = 45.5$$

$$D_t = 38 \text{ pulg.} \Rightarrow N_t = 45.5/38 = 1.26$$

considerando que el agitador equivale a dos turbinas tenemos: $N_t = 2(1.26) = 2.52 \Rightarrow$ Se toma $N_t = 3$

$$T = 600 (45.5 / 2(36)(3))^{1/2} = 275$$

$$N = 275 / 0.26(36) = 30 \text{ aprox.}$$

Finalmente para la potencia tenemos:

$$HP_{600} = 1.15 \text{ (turbina inclinada de diam. 36)}$$

$$f = 1.1 \text{ (para viscosidad de 150 cp)}$$

$$\Rightarrow HP = 1.15(275/6000)^{2.74} (1.1)(1.26)(3) = 0.56$$

Se debe usar un motor de 0.75 HP.

C) CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL FILTRO DE VACIO

De la ecuación V.961 de la referencia (27):

$$V = L D (3.1416 A_i N D P / R_g)^{1/2}$$

Obtenemos:

$$N = (V / L D)^2 Rg / (3.1416 A_i DP)$$

donde:

N = Velocidad de giro, rev/s

V = Volumen de filtrado por unidad de tiempo, m³/s

L = Longitud del tambor, m

D = Diametro del tambor, m

A_i = Angulo de inmersión, rad.

DP = Caida de presión, Kgf/m²

Rg = Resistencia de la torta, Kgf s/m⁴

* Resistencia de la torta:

La ecuación V.950 de la referencia (27) establece:

$$FI = (1/A)(dV/dt) = DP / (Rg(V/A) + R_f)$$

de ella obtenemos:

$$DP/FI = R_f + Rg(V/A)$$

Pruebas realizadas con DP = 0.5 atm = 5168 Kgf/m² y con Area A = 0.034 m² generan la siguiente tabla:

Vol.(m ³)	t(s)	dt/dV(s/m ³)	V/A(m)	DP/FI(Kgf s/m ³)
0.62 E-04	5	8 E+04	1.84 E-03	14057 E+03
1.25 E-04	15	16 E+04	3.68 E-03	28114 E+03
1.88 E-04	45	48 E+04	5.51 E-03	84342 E+03

Usando regresión lineal con la ecuación:

$$DP/FI = AA + BB(V/A)$$

tenemos: CORRELACION = 95%

$$BB = Rg = 19141 E+06 Kgf s/m^4$$

Para calcular la velocidad de giro, establecemos los siguientes valores:

$$L = D = 0.5 \text{ m}$$

$$A_i = 3.1416 (2/3) = 2.1 \text{ rad. (valor de uso común)}$$

$$DP = 0.7 \text{ atm} = 7235 \text{ Kgf/m}^2$$

$$V = 233 \text{ Lt de filtrado por lote / 1 hr} = 6.5 \text{ E-05 m}^3/\text{s}$$

Luego usando la ecuación mencionada tenemos:

$$N = (6.5 \text{ E-05} / ((0.5)(0.5))^2) \cdot 19141 \text{ E+06} / (3.1416)(2.1)(7235)$$

$$N = 0.027 \text{ 1/s} = 1.63 \text{ RPM} \implies \text{ Se puede tomar } N = 2 \text{ RPM}$$

D) CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL EVAPORADOR

$$* \text{ Capacidad evaporador} = \text{Vol. alimentación} + \text{Vol. libre}$$

$$\text{Vol. alimentación} = 2 (143) = 286 \text{ lts}$$

$$\text{Vol. libre} = 0.3 \text{ Vol. alim.} = 85.8 \text{ lts}$$

$$\text{Capacidad evaporador} = 371.8 \text{ lts}$$

$$\text{Vol. de diseño} = 400 \text{ lts} = 0.4 \text{ m}^3$$

$$H_l/H_t = 0.7 \text{ (para tener suficiente altura libre)}$$

$$H_l/D_t = 1/2 \implies H_t = D_t/1.4$$

$$\text{Para un cilindro se tiene: } \text{Vol.} = 3.1416 D_t^2 H_t/4$$

Reemplazando H_t y despejando D_t tenemos:

$$D_t = 0.90 \text{ m}$$

$$H_t = 0.64 \text{ m}$$

$$* \text{ Calor total} = \text{Cal. sensible} + \text{Cal. evap.}$$

$$\text{Cal. sensible} = \text{Cal. ácido 100\%} + \text{Cal. agua}$$

$$\text{Masa de ácido, 30\% P2O5} = (286 \text{ lts})(1.41 \text{ g/ml}) = 403.3 \text{ Kg}$$

Peso molec. P₂O₅ = 142

Peso molec. H₃PO₄ = 98

Masa de ácido puro = $0.3(403.3 \text{ g})(2(98)/142) = 167 \text{ Kg}$

Masa de agua = $403.3 - 167 = 236.3 \text{ Kg}$

C_p prom. del agua = 1 cal/g C

C_p prom. del ácido 100% = 4.375 cal/g C

DT = T_f - T_i = 100 - 25 = 75 C

Como sabemos: Calor = m C_p DT

entonces:

Calor sensible = $((167)(4.375) + (236.3)(1))(75) = 75947 \text{ Kcal}$

==> Calor sensible = 76 000 Kcal

Conc. de fosfórico = $(167)(100)/(403.3) = 41.4\% \text{ H}_3\text{PO}_4$

Osea: 30% P₂O₅ = 41.4% H₃PO₄

Masa de ácido, 55% P₂O₅ = $(403.3)(0.3/0.55) = 220 \text{ Kg}$

Masa de agua evaporada = $403.3 - 220 = 183.3 \text{ Kg}$

Calor latente de agua a 1 atm = 970.3 Btu/lb = 538.6 cal/g

Como sabemos: Calor = m L

entonces:

Calor de evaporación = $(183.3)(538.6) = 98725 \text{ Kcal}$

==> Calor de evaporación = 98 700 Kcal

Por lo tanto: Calor total entregado = 76 000 + 98 700

==> Calor total = 174 700 Kcal

E) CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL TANQUE DOSIFICADOR

* Capacidad = Vol. lodo + Vol. libre

Vol. lodo = 500 lts

Vol. libre = 0.5 Vol. lodo = 250 lts

Capacidad = 750 lts

Volumen de diseño = 0.75 m³

Ht/Dt = 1/2

Para un cilindro se tiene: Vol. = 3.1416 Dt² Ht/4

Reemplazando Ht y despejando Dt tenemos:

Dt = 0.78 m

Ht = 1.56 m

* Potencia de agitación, se calcula mediante la ecuación (I):

HP = HP₆₀₀ (T/600)^{2.74} f Ge Nt

que se usó en la agitación del reactor.

En este caso consideramos lo siguiente:

- Turbina curva de 10 pulg. de diametro

Los cálculos, siguiendo las ecuaciones usadas en la agitación del reactor, son:

Ge = 1.2 ; Hl = 39.5 pulg. ⇒ WELH = (39.5)(1.2) = 47.5

Dt = 30.7 pulg. ⇒ Nt = 47.5/30.7 = 1.55 se toma Nt = 2

T = 600 (47.5 / 2(10)(2))^{1/2} = 654

N = 654 / 0.26(10) = 250 aprox.

Finalmente para la potencia tenemos:

HP₆₀₀ = 0.2 (turbina curva de diam. 10 pulg)

f = 1.05 (para viscosidad de 30 cp)

⇒ HP = 0.2(654/6000)^{2.74} (1.05)(1.2)(2) = 0.64

Se debe usar un motor de 0.75 HP.

La tabla siguiente muestra los resultados:

TANQUE	Dt (m)	Ht (m)
TK1	0.68	1.36
TK2	0.86	1.72
TK3	0.63	1.26
TK4	0.78	1.56
TK5	0.68	1.36

G) CALCULOS PARA EL DISEÑO DE LAS BOMBAS

Para el cálculo del head de las bombas se hará uso de la siguiente ecuación (25):

$$H = Z + SS(K + 4 f L/D) V^2 / 2g$$

Donde:

H = Head de la bomba, m Kgf/kg

Z = Altura de bombeo, m

SS = Sumatoria

L = Longitud de la tubería, m

D = Diametro de la tubería, m

V = Velocidad del fluido en la tubería, m/s

g = Constanta gravitacional, 9.81

f = Factor de fricción de Fanning (23)

K = Coeficiente de resistencia por accesorios (23)

Los datos para el diseño de cada bomba se indican en la siguiente tabla:

BOMBA	Visc. (cp)	Dens. (g/ml)	Flujo (cc/s)	Reynold
B1	150.0	1.20	833	167
B2	27.5	1.10	833	834
B3	27.5	1.23	333	373
B4	27.5	1.41	1000	1230

Para Reynold $< 2000 \Rightarrow f = 16 / \text{Reynold}$

Trabajando con $D = 0.0508 \text{ m}$, y considerando los siguientes valores de K:

Codos de 90 $= 0.71$

valvulas abiertas $1/4 = 24.0$

Se elabora la siguiente tabla:

BOMBA	Z	L	V	# codos	Head	HP
B1	4.0	5.0	0.41	1	4.02	1/2
B2	4.5	10.5	0.41	2	4.52	1/4
B3	2.5	6.0	0.16	2	2.50	1/4
B4	3.0	7.0	0.13	2	3.01	1/4

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA:

- (1) V. Sauchelli, QUIMICA Y TECNOLOGIA DE LOS FERTILIZANTES, capitulo 9.
- (2) Sven Villagarcia, MANUAL DE FERTILIZANTES
- (3) P. Sanchez y J. Benites, OPCIONES TECNOLOGICAS PARA EL MANEJO DE LOS SUELOS EN EL PERU, 1983
- (4) Dirección general de investigaciones agropecuarias, Estación experimental de la Molina.
- (5) Oficina de la empresa nacional comercializadora de insumos (ENCI)
- (6) ONU, TECNOLOGIA DE LOS PROCESOS PARA LA FABRICACION DE FERTILIZANTES FOSFATADOS.
- (7) Waggaman, MANUFACTURA DEL ACIDO FOSFORICO, capitulos 12-16.
- (8) TRIPLE SUPERPHOSPHATE MANUFACTURE, Phosphorus and Potassium, N 80, Nov-Dec, 1975
- (9) Archivo tecnico de la empresa Minero-Perú.
- (10) Kirk Othmer, ENCICLOPEDIA DE LA TECNOLOGIA DE LA INDUSTRIA QUIMICA, tomo VIII, pag 450-490.
- (11) Nissan Chemical Industries LTD., BEAKER SCALE TEST ON PERUVIAN (BAYOVAR) PHOSPHATE ROCK, NISSAN PHOSPHORIC ACID PROCESS.
- (12) Patente 019-87AE, PROCESO PARA LA PRODUCCION DE ACIDO FOSFORICO GRADO DETERGENTE.
- (13) chemical week, Junio 1988
- (14) Roskill, THE ECONOMICS OF PHOSPHATE ROCK, February 1984, second edition.

- Q (15) Patente N 01026, PRODUCCION DE ACIDO FOSFORICO A PARTI^o DE FOSFATO MINERAL Y ACIDO SULFURICO.
- (16) Anuario de la industria Quimica Brasileira, 1988.
- (17) Phosphorus and potasium N 111, British sulphur corporation.
- (18) Jacobs Engineering Group INC., LABORATORY ASSESSMENT OF PRO-BAYOVAR PHOSPHATE FOR PHOSPHORIC ACID PRODUCTION BY FISIONS
- (19) Perry Chilton, MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO, 5ta edici3n (2da edici3n en espa3ol), 1984
- (20) Jacobs Engineering Group INC., TREATMENT AS PER THE PRAYON PROCESSES OF PERUVIAN PHOSPHATE.
- (21) A.P. Weber, SELECTING TURBINE AGITATORS, Cheemical Engineering, December 7, 1984
- (22) F. Bondy, HEAT TRANSFER IN AGITED VESSELS, Chemical engineering, April 4, 1983
- (23) G.M. Brown, OPERACIONES BASICAS DE LA INGENIERIA QUIMICA
- (24) P. Wuithier, PETROLEO REFINO Y TRATAMIENTO QUIMICO, editorial CEPESA, pag 1404
- (25) M.S. Peters, DISEÑO DE PLANTA PARA INGENIEROS QUIMICOS