



Theses and Dissertations

---

2005

## Development of a process of addition of tricalcium phosphate from burnt phosphate rock in feed for animal nutrition

Luis Fernando Nogales Grágeda  
*Brigham Young University - Provo*

Follow this and additional works at: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd>



Part of the [Agronomy and Crop Sciences Commons](#), and the [Animal Sciences Commons](#)

---

### BYU ScholarsArchive Citation

Nogales Grágeda, Luis Fernando, "Development of a process of addition of tricalcium phosphate from burnt phosphate rock in feed for animal nutrition" (2005). *Theses and Dissertations*. 5408.  
<https://scholarsarchive.byu.edu/etd/5408>

This Thesis is brought to you for free and open access by BYU ScholarsArchive. It has been accepted for inclusion in Theses and Dissertations by an authorized administrator of BYU ScholarsArchive. For more information, please contact [ellen\\_amatangelo@byu.edu](mailto:ellen_amatangelo@byu.edu).



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERAS DE QUIMICA Y ALIMENTOS**



**“DESARROLLO DE UN PROCESO DE ADICIÓN DE  
FOSFATO TRICÁLCICO A PARTIR DE ROCA FOSFÓRICA  
CALCINADA EN ALIMENTO BALANCEADO PARA  
NUTRICIÓN ANIMAL”**

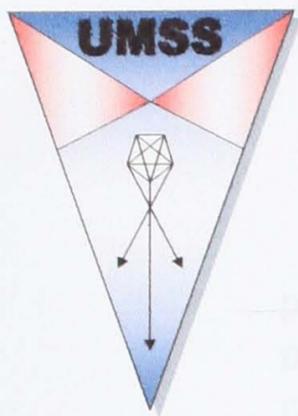
**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL DIPLOMA ACADÉMICO  
DE  
LICENCIATURA EN INGENIERIA DE ALIMENTOS**

**Por LUIS FERNANDO NOGALES GRÁGEDA**

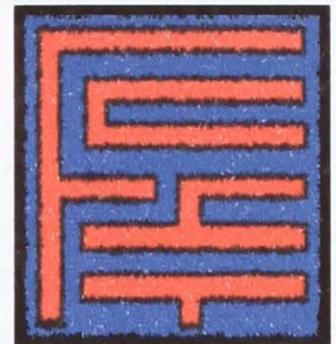
**Tutores Dr. JOSE OMAR ARZABE MAURE**

**Lic. LUZ MIRIAM VARGAS COCA**

**COCHABAMBA - BOLIVIA  
DICIEMBRE 2005**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERAS DE QUÍMICA Y ALIMENTOS**



**“DESARROLLO DE UN PROCESO DE ADICIÓN DE  
FOSFATO TRICÁLCICO A PARTIR DE ROCA FOSFÓRICA  
CALCINADA EN ALIMENTO BALANCEADO PARA  
NUTRICIÓN ANIMAL”**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL DIPLOMA ACADÉMICO  
DE  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

**Por : LUIS FERNANDO NOGALES GRÁGEDA**  
**Tutores : Dr. JOSÉ OMAR ARZABE MAURE**  
**Lic. LUZ MIRIAM VARGAS COCA**

**COCHABAMBA-BOLIVIA**  
**DICIEMBRE DE 2005**

**Development of a Process of Addition of Tricalcium Phosphate from Burnt Phosphate Rock in Feed for Animal Nutrition**

**Abstract**

This study took place in Bolivia with the purpose of using thermally treated Capinota phosphate rock as a phosphorous supplement in balanced feed diets. The objective was to produce a natural phosphate substance that would be more easily accessible to the local population than commercial feed supplements. An additional objective of this study was to increase the availability of low-fluoride phosphorous. The biological assays indicated that the diet with the added burned phosphoric rock produced similar yields to those using a commercial feed supplement (dicalcium phosphate). This indicates that the locally manufactured product, by partial acidification, can compete with similar commercial products.

## AGRADECIMIENTOS

A DIOS POR GUIARME A LO LARGO DE MI CAMINO, DARME LA OPORTUNIDAD DE SEGUIR ADELANTE.

A MIS PADRES POR EL APOYO, EL CARIÑO Y LA OPORTUNIDAD DE CONCLUIR CON MIS ESTUDIOS.

A LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN, CARRERAS DE QUÍMICA Y ALIMENTOS, POR SU PARTICIPACIÓN EN NUESTRA FORMACIÓN PROFESIONAL.

AL INSTITUTO "BENSON", POR LA AYUDA RECIBIDA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO, Y SIGAN ADELANTE CON ESTAS DECAS IFSIS. GRACIAS

AL DR. OMAR ARZABE MAURE POR CONFÍAR EN MÍ PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE PROYECTO Y POR SER UN EXCELENTE AMIGO.

A LA LIC. MIRIAM VARGAS POR TODA SU COLABORACIÓN Y SER UNA EXCELENTE COMPAÑERA Y AMIGA.

A LA DR. ADELINA HERBES POR TODA LA CONFIANZA Y AYUDA RECIBIDA PARA REALIZAR ESTE PROYECTO.

AL LABORATORIO CITEMA-LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA DE LOS ALIMENTOS, POR SU COLABORACIÓN Y AYUDA RECIBIDA PARA REALIZAR ESTE PROYECTO.

AL SEÑOR MILTON DIAZ DE OCHOA POR SU COLABORACIÓN Y AYUDA RECIBIDA PARA REALIZAR ESTE PROYECTO.

A TODAS LAS PERSONAS QUE DE ALGUNA MANERA ME AYUDARON A CONCLUIR ESTE PROYECTO.

A LOS SEÑORES MIEMBROS DEL TRIBUNAL LIC. PAOLA ANTIZANA, LIC. MARÍA ESTHER GIANNINI Y DR. ESCALERA POR LA ORIENTACIÓN Y SUGERENCIAS RECIBIDAS.

A MIS AMIGOS POR SU OPTIMISMO, COLABORACIÓN Y COMPANERISMO.

A TODOS SIEMPRE GRACIAS.

## DEDICATORIA

*Dedicado a Dios y a las personas que más amo en mi vida, por la cual sigo adelante, Evelyn y María Fernanda.*

## AGRADECIMIENTOS

A DIOS POR GUIARME A LO LARGO DE MI CAMINO, DARME LA OPORTUNIDAD DE SEGUIR ADELANTE.

A MIS PADRES POR EL APOYO, EL CARIÑO Y LA OPORTUNIDAD DE CONCLUIR CON MIS ESTUDIOS.

A LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN, CARRERAS DE QUÍMICA Y ALIMENTOS, POR SU PARTICIPACIÓN EN NUESTRA FORMACIÓN PROFESIONAL.

AL INSTITUTO "BENSON", POR LA AYUDA RECIBIDA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO, Y SIGAN ADELANTE CON ESTAS BECAS TESIS. GRACIAS

AL DR. OMAR ARZABE MAURE POR CONFIAR EN MÍ PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE PROYECTO Y POR SER UN EXCELENTE AMIGO.

A LA LIC. MIRIAM VARGAS POR TODA SU COLABORACIÓN Y SER UNA EXCELENTE COMPAÑERA Y AMIGA.

A LA DR. ADELINA HERBAŞ POR TODA LA CONFIANZA Y AYUDA BRINDADA

ASÍ MISMO AGRADEZCO AL PERSONAL DEL CAPN A MIMI, RAULITO, LUCIO, ABRAHAM, MARCELITA, DANIELA, RAQUEL, SERGIO, POR TODA LA AYUDA RECIBIDA PARA REALIZAR ESTE PROYECTO Y SER GRANDES AMIGOS.

AL LABORATORIO CITEMA-LAPROQUI POR LA AYUDA BRINDADA.

AL SEÑOR MILTON DÍAZ DE OROPEZA POR LA COLABORACIÓN PRESTADA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE PROYECTO

A TODAS LAS PERSONAS QUE DE ALGUNA MANERA NOS AYUDARON A CONCLUIR ESTE PROYECTO.

A LOS SEÑORES MIEMBROS DEL TRIBUNAL: LIC. AMALIA ANTEZANA, LIC. MARIA ESTHER GIANNINI Y DR. ESCALERA POR LA ORIENTACIÓN Y SUGERENCIAS RECIBIDAS.

A MIS AMIGOS POR SU OPTIMISMO, COLABORACIÓN Y COMPAÑERISMO.

A TODOS ELLOS GRACIAS

## FICHA RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el tratamiento térmico de la Roca Fosfórica de Capinota para su aplicación como suplemento de fósforo en alimentos balanceados, con el objetivo de producir un material fosfatado natural, que sea mucho más accesible que los comerciales y que además tenga la ventaja de mayor biodisponibilidad de fósforo con un contenido mínimo de flúor.

Se calcinó la Roca Fosfórica a diferentes temperaturas, de las cuales se pudo concluir que la temperatura adecuada para la calcinación es de 1400 °C porque tiene mayor contenido de la fase  $\alpha$ -fosfato tricálcico, un producto mas biodisponible de fósforo.

Los ensayos biológicos realizados demuestran que la dieta con la adición de la roca fosfórica calcinada, tuvo un rendimiento similar al comercial (fosfato bicálcico) lo que indica que el producto fabricado puede competir con este tipo de productos fabricados por acidulación parcial.

Para el diseño del horno se tomo en cuenta el consumó de combustible, una producción continua y el tipo de material. Teniendo como resultado la elección de un horno rotatorio, en base al cual se realizó el diseño del proceso de producción para la industrialización de la roca fosfórica.

## CONTENIDO GENERAL

<b>CAPITULO I</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS YACIMIENTOS DE ROCA FOSFÓRICA EN BOLIVIA	2
1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS DEPÓSITOS FOSFÁTICOS	3
1.2.2. DEPÓSITOS PRECÁMBRICOS	3
1.2.3. DEPÓSITOS ORDOVÍCICOS	4
1.2.4. DEPÓSITOS POR ACUMULACIONES RECIENTES	5
1.2.5. GRADO DE PROSPECCIÓN GEOLÓGICA	5
1.2.6. YACIMIENTO DE CAPINOTA	8
1.2.7. POTENCIAL DE RESERVAS FOSFÁTICAS	10
1.3. OBJETIVOS	11
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	11
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.4. JUSTIFICACIÓN	12
 <b>CAPITULO II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b>	 <b>13</b>
2.1. NATURALEZA DEL FÓSFORO	13
2.2. FITATOS	15
2.3. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA BIODISPONIBILIDAD DE FÓSFORO	18
2.3.1. ENZIMA FITASA	18
2.3.2. FITASAS INTESTINALES ENDÓGENAS	20
2.3.3. EFECTO DEL pH SOBRE LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA	20
2.4. COMPOSICIÓN DE LA DIETA	22
2.5. VALORACIÓN DEL CONTENIDO DE P BIODISPONIBLE DE LAS MATERIAS PRIMAS	22
2.6. HARINA DE PESCADO	23
2.7. ALMACENAMIENTO DEL P EN EL TEJIDO ÓSEO	23
2.8. DIGESTIBILIDAD	23
2.8.1. CÁLCULO DEL FÓSFORO RETENIDO COMO PORCENTAJE DE FÓSFORO CONSUMIDO	24
2.8.2. CÁLCULO DE RETENCIÓN NETA APARENTE (RNA) DE FÓSFORO EN EL ALIMENTO	25

2.9. MATERIAS PRIMAS DE ORIGEN MINERAL: FOSFATOS	26
2.10. IMPORTANCIA DE LOS ANIMALES DE LABORATORIO	26
2.10.1. RATA WISTAR	26
2.10.2. ALIMENTACIÓN Y AGUA	27
2.10.3. MANIPULACIÓN Y SUJECIÓN	27
2.10.4. CONTROL DE CALIDAD DEL AMBIENTE	27
2.10.5. PROCEDIMIENTOS CLÍNICOS	29
2.10.5.1. COLECCIÓN DE HECES Y ORINA	29
2.11. DISEÑO COMPLETAMENTE ALEATORIO (DCA).	30
2.12. REACTIVIDAD DE LAS ROCAS FOSFÓRICAS	30
2.12.1. PULVERIZACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA	31
2.12.2. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA ROCA FOSFÓRICA	31
2.12.3. EFECTO EN LA SOLUBILIDAD DE LA ROCA FOSFÓRICA POR PRESENCIA DE FLÚOR.	32
2.12.4. INTOXICACIÓN POR FLÚOR (FLUOROSIS)	32
2.13. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LA ROCA FOSFÓRICA	33
2.13.1. GRUPO DE APATITO	33
2.13.2. APATITO, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$	34
2.14. ROCAS SELECCIONADAS CON ALTO CONTENIDO DE % FÓSFORO	36
2.14.1. ESCALAS DE REACTIVIDAD PARA LAS ROCAS FOSFÓRICAS	37
2.14.2. INFLUENCIA DEL ÁREA SUPERFICIAL	37
2.14.3. INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA	38
2.14.4. REACTIVIDAD	39
2.14.5. REACTIVIDAD Y SOLUBILIDAD	40
2.14.6. ESCALA DE REACTIVIDAD	41
2.15. LIXIVIACIÓN.	43
2.16. TECNOLOGÍA DE PROCESOS TÉRMICOS	44
2.16.1. HORNO ROTATORIO	44
2.16.2. TIPOS DE HORNO ROTATORIO	45
2.16.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	46
2.16.4. GRADO DE LLENADO DEL HORNO	47
2.16.5. PENDIENTE DEL HORNO	49
2.16.6. VELOCIDAD ANGULAR DEL HORNO (NUMERO DE VUELTAS)	50
2.17. PROCESOS TÉRMICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTES FOSFATADOS	51
2.17.1. FOSFATOS CALCINADOS	51
2.17.2. FOSFATO TRICÁLCICO FUNDIDO	52

2.17.3. FOSFATO CÁLCICO MAGNÉSICO FUNDIDO	53
2.17.4. FUSIÓN CON SULFATOS	53
2.17.5. TERMOFOSFATO MAGNESIANO YOORIN	54
<b>CAPITULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>55</b>
3.1. ESTUDIO PRELIMINAR	55
3.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA ROCA FOSFÓRICA	56
3.2.1. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	57
3.2.1.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X	57
3.2.1.2. ANÁLISIS TÉRMICOS	60
3.3. ESTUDIO DE LABORATORIO CON MATERIAL DE CAPINOTA	64
3.4. EQUIPOS USADOS EN LA LIXIVIACIÓN DE LOS MATERIALES	64
3.5. TECNOLOGÍA EMPLEADA PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO	65
3.6. CALCINADO DE LOS MATERIALES	66
3.7. RESULTADOS DE CALCINACIÓN	67
3.7.1. PRUEBA DE ROCA FOSFÓRICA DE CAPINOTA	67
3.7.2. PRUEBAS DE LA ROCA FOSFÓRICA TRATADA A 1000 °C	68
3.7.3. PRUEBAS DE LA ROCA FOSFÓRICA TRATADA A 1200° C	69
3.7.4. ESTUDIO REALIZADO AL MATERIAL a 1400° C	70
3.7.4.1. ROCA FOSFÓRICA EN % P TOTAL EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA	71
3.7.5. PRUEBAS CON FOSFATO COMERCIAL	72
3.8. RESULTADO DE LIXIVIACIÓN CON DIFERENTES SOLVENTES	73
3.9. DETERMINACIÓN DE SOLUBILIDAD DE LOS MATERIALES	79
3.10.- EVALUACIÓN BIOLÓGICA	80
3.11. INFRAESTRUCTURA	80
3.12. COMPOSICIÓN DEL ALIMENTO BALANCEADO PREPARADO	83
3.12.1. PREPARACIÓN DE LAS DIETAS	85
3.13. PREPARACIÓN DE LOS ANIMALES	85
3.14. SUMINISTRO DE LAS DIETAS	86
3.15. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS BIOLÓGICOS	88
3.15.1. INCREMENTO DE PESO Y RETENCIÓN DE FÓSFORO	88
3.15.2. RETENCIÓN NETA APARENTE (RNA %)	91
3.16. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	92
3.16.1. PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DEL EXPERIMENTO	92
3.16.2. MODELO ESTADÍSTICO	94
3.16.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS	94

3.16.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	95
3.16.4.1. DESCRIPTIVOS	95
3.16.4.2. INCREMENTO DE PESO EN EL ANIMAL	96
3.16.4.3. GRÁFICO INTERACTIVO	96
3.16.4.4. ESTIMACIÓN CURVILÍNEA	98
3.16.4.5. GRÁFICOS Q-Q NORMALES DE INCREMENTO DE PESO	99
3.16.4.6. MEDIAS MARGINALES ESTIMADAS	100
3.16.4.7. PRUEBAS DE LOS EFECTOS INTER-SUJETOS	100
3.16.4.8. RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL ANIMAL	102
3.16.4.9. GRAFICO Q-Q DE RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL ANIMAL	102
3.16.4.10. MEDIAS MARGINALES ESTIMADAS	103
3.16.4.11. ESTIMACIÓN CURVILÍNEA	104
3.16.4.12. PRUEBAS DE LOS EFECTOS INTER-SUJETOS	105
<b>CAPITULO IV. CÁLCULOS DE INGENIERÍA PARA LA PLANTA PROPUESTA</b>	<b>107</b>
4. DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DEL FOSFATO TRICÁLCICO	107
4.1. TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA	107
4.2. DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN	107
4.3. CÁLCULOS DE INGENIERÍA PARA LA PLANTA PROPUESTA	109
4.3.1. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL HORNO	109
4.4. BALANCE DE MASA	109
4.4.1. MUESTRA DE ROCA CALCINADA A 1400 °C	109
4.5. BALANCE DE ENERGÍA	110
4.5.1. APORTE DE ENERGÍA	110
4.5.2. CALOR NECESARIO PARA CALENTAR LA ROCA FOSFÓRICA	110
4.5.3. PÉRDIDAS DE CALOR A TRAVÉS DE LA PARED COMPUESTA	111
4.5.4. PERDIDAS DE CALOR POR COMBUSTIÓN INCOMPLETA	113
4.5.5. PERDIDAS DE CALOR POR ARRASTRE DE LOS GASES QUE VAN A LA CHIMENEA	113
4.5.6. CÁLCULO DE LA RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE	115
4.5.7. DIMENSIONES DEL HORNO	116
4.5.8. TIEMPO DE RESIDENCIA	117
4.5.9. CAPACIDAD DEL HORNO	118
4.5.10. CÁLCULO DE LA CHIMENEA	118
4.5.11. DISEÑO DEL QUEMADOR	119

4.5.12. CÁLCULO DEL PESO DEL LADRILLO REFRACTARIO	120
4.5.13. COLOCACIÓN DEL LADRILLO	120
4.5.14. PESO DEL LADRILLO AISLANTE	123
4.5.15. ESPESOR DE LA PLANCHA DE ACERO	124
<b>CAPITULO V. EVALUACIÓN FINANCIERA</b>	<b>127</b>
5.1. INVERSIÓN Y FINANCIAMIENTO	127
5.2. COSTOS DE OPERACIÓN	128
5.3. FIJACIÓN DEL PRECIO.	129
5.5. EVALUACIÓN DEL PROYECTO	130
<b>CAPITULO VI. CONCLUSIONES</b>	<b>133</b>
6.1. CONCLUSIONES	133
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>136</b>
FIGURA 2.1. ESQUEMA DE HORNO ROTATORIO	45
FIGURA 2.2. TIPOS DE HORNO ROTATORIO	45
FIGURA 2.3. GRADO DE LLENADO DEL HORNO (A)	47
FIGURA 2.4. GRADOS DE LLENADO	48
FIGURA 2.12. VELOCIDAD ANGULAR DEL HORNO	50
<b>CAPITULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>52</b>
FIGURA 3.1. APILADO DE LA ROCA FOSFÓRICA	56
FIGURA 3.2. ROCA FOSFÓRICA MOLIDA A 200 $\mu$	58
FIGURA 3.3. ESPECTRO DE (DRA) DE LA ROCA FOSFÓRICA CAPRIOTA	57
FIGURA 3.4. UBICACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA EN EL DIAGRAMA PLSORAPATTA FRANCOLITA-OSHALITA	59
FIGURA 3.5. XRD, TG Y DTG DE LA ROCA FOSFÓRICA CAPRIOTA	61
FIGURA 3.6. ESPECTRO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X A DIFERENTES TEMPERATURAS	62
FIGURA 3.7. DIFRACCIÓN DE RAYOS X A TEMPERATURAS SUPERIORES A 700 $^{\circ}$ C	63
FIGURA 3.8. DIAGRAMA DE BALANCEO DE FASES WOLLASTONITA (W) - FRONTOALITA TRICALCICO (TCP)	65
FIGURA 3.9. ASITADOR CONTINUO CON TEMPERATURA CONTROLADA DE CALIENTE 1000 RPM (SHAKER) PARA EL LLENADO DE LOS MUESTRAS	66
FIGURA 3.10. FILTRACIÓN AL VACÍO PARA AYUDAR RAPIDEZ EN EL TIEMPO MUESTRAS	67

## ÍNDICE DE FIGURAS Y PLANO<sup>(\*)</sup>

<b>CAPITULO I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
FIGURA 1.1 MICROLOCALIZACIÓN DE YACIMIENTO CAPINOTA	8
<b>CAPITULO II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b>	<b>13</b>
FIGURA 2.1. NATURALEZA DEL P CONTENIDO EN LAS MATERIAS PRIMAS	14
FIGURA 2.2. ESTRUCTURAS QUÍMICAS QUE SE FORMAN PARTIR DEL MIOINOSITOL	16
FIGURA 2.3. CADA ENZIMA PUEDE CAMBIAR SOLAMENTE UN SUSTRATO ESPECÍFICO OTRO SUSTRATO NO PUEDE SER CAMBIADO	18
FIGURA 2.4. MÁXIMA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA A PH OPTIMOS	21
FIGURA 2.5: SISTEMAS ISOESTRUCTURALES DE LA APATITA	34
FIGURA 2.6: RED CRISTALINA DE LA HIDROXIAPATITA	35
FIGURA 2.7: IDENTIFICACIÓN DEL CRISTAL DE APATITA BASADO EN UN ANÁLISIS EDX.(20 A 30 $\mu$ M)	36
FIGURA 2.8. ESQUEMA DE HORNO ROTATORIO	45
FIGURA 2.9. TIPOS DE HORNOS ROTATORIOS	46
FIGURA 2.10. GRADO DE LLENADO DEL HORNO (A)	47
FIGURA 2.11. GRADOS DE LLENADO	48
FIGURA 2.12: VELOCIDAD ANGULAR DEL HORNO	50
<b>CAPITULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>55</b>
FIGURA. 3.1. APILADO DE LA ROCA FOSFÓRICA	56
FIGURA. 3.2. ROCA FOSFÓRICA MOLIDA A MALLA 200	56
FIGURA 3.3. ESPECTROS DE (DRX) DE LA ROCA FOSFÓRICA CAPINOTA	57
FIGURA. 3.4: UBICACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA EN EL DIAGRAMA FLÚORAPATITA FRANCOLITA-DAHALITA	59
FIGURA.3.5. ATD, TG Y DTG DE LA ROCA FOSFÓRICA CAPINOTA	61
FIGURA.3.6. ESPECTRO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X A DIFERENTES TEMPERATURAS	62
FIGURA.3.7. DIFRACCIÓN DE RAYOS X A TEMPERATURAS SUPERIORES A 1400 °C	63
FIGURA.3.8. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE FASES WOLLASTONITA (CS) – FOSFATO63 TRICÁLCICO (TPC),	63
FIGURA. 3.9. AGITADOR CONTINUÓ CON TEMPERATURA CONTROLADA DE C35°C/200 RPM (SHAKER) PARA EL LIXIVIADO DE LOS MATERIALES.	64
FIGURA. 3.10. FILTRACIÓN AL VACÍO PARA MAYOR RAPIDEZ EN EL TIEMPO INDICADO	

DE LIXIVIACIÓN	65
FIGURA.3.11. HORNO ROTATORIO	65
FIGURA. 3.12. FORMACIÓN DE NÓDULOS DE ROCA FOSFÓRICA	66
FIGURA. 3.13. ROCA FOSFÓRICA CON SU MICROESTRUCTURA	67
FIGURA. 3.14. ROCA FOSFÓRICA TRATADA A 1000° C CON SU MICROESTRUCTURA	68
FIGURA. 3.15. ROCA FOSFÓRICA TRATADA A 1000° C CON SU MICROESTRUCTURA	69
FIGURA. 3.16. ROCA FOSFÓRICA TRATADA A 1400° C CON SU MICROESTRUCTURA	70
FIGURA 3.17. % P TOTALES DE LA ROCA FOSFÓRICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA	72
FIGURA 3.18. FOSFATO BICÁLCICO CON SU MICROESTRUCTURA	73
FIGURA 3.19 CURVAS DE LIXIVIACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA A DIFERENTES TEMPERATURAS Y FOSFATO COMERCIAL CON ACIDO CÍTRICO AL 2%	77
FIGURA 3.20. CURVAS DE LIXIVIACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA A DIFERENTES TEMPERATURAS Y FOSFATO COMERCIAL CON ACIDO CLORHÍDRICO 0.4%	77
FIGURA 3.22. CURVAS DE LIXIVIACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA A DIFERENTES TEMPERATURAS Y FOSFATO COMERCIAL CON AGUA Y CITRATO DE AMONIO NEUTRO.	78
FIGURA. 3.23. ARMAZÓN METÁLICO CON SUS RESPECTIVAS JAULAS	82
FIGURA 3.24. PARTES DE LA JAULA METABÓLICA Y SU ARMADO	83
FIGURA 3.25. VISTA DE ARRIBA CON Y SIN ANIMAL	83
FIGURA 3.26. ANIMALES EN PESO LISTOS PARA LA EVALUACIÓN BIOLÓGICA	86
FIGURA 3.27. CANTIDAD DE MUESTRAS DE HECES/DÍA Y ORINA/DÍA	87
FIGURA 3.28. CANTIDAD DE MUESTRAS DE HECES/DÍA Y ORINA/DÍA	87
FIGURA 3.29. PESADO DE LAS RATAS DIARIAMENTE	87
FIGURA 3.30. RETENCIÓN NETA APARENTE (RNA) VS DIETAS	92
FIGURA 3.31. DIAGRAMA DE CAJAS DEL INCREMENTO DE PESO VS DIETAS	96
FIGURA 3.32. GRÁFICOS INTERACTIVOS DE INCREMENTO DE PESO VS RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL ANIMAL	97
FIGURA 3.33. GRÁFICOS INTERACTIVOS DE INCREMENTO DE PESO VS ALIMENTO BALANCEADO (DIETAS)	97
FIGURA 3.34. ESTIMACIÓN CURVILÍNEA CÚBICA DEL INCREMENTO DE PESO EN LOS ANIMALES	98
FIGURA 3.35. ESTIMACIÓN DE TENDENCIA PARA EL INCREMENTO DE PESO EN LAS DIETAS	99
FIGURA 3.36. EL INCREMENTO DE PESO VS DIETAS	100
FIGURA 3.37. RETENCIÓN DE FÓSFORO VS ALIMENTO BALANCEADO (DIETAS)	102
FIGURA 3.38. ESTIMACIÓN DE TENDENCIA PARA LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN LAS	

DIETAS	103
FIGURA 3.39. LA RETENCIÓN DE FÓSFORO VS ALIMENTO BALANCEADO (DIETAS)	104
FIGURA 3.40. ESTIMACIÓN CURVILÍNEA CÚBICA DE RETENCIÓN DE FÓSFORO	105
<b>CAPITULO IV. CÁLCULOS DE INGENIERÍA PARA LA PLANTA PROPUESTA</b>	<b>107</b>
FIGURA.4.1. DIAGRAMA DE PRODUCCIÓN DEL FOSFATO TRICÁLCICO	108
FIGURA 4.2. PERDIDAS POR CONDUCCIÓN A TRAVÉS DE LA PARED COMPUESTA	111
FIGURA 4.3. COLOCACIÓN DEL LADRILLO CON MORTERO	121
FIGURA 4.4. COLOCACIÓN DEL LADRILLO EN SECO	121
FIGURA 4.5. COLOCACIÓN DEL LADRILLO POR PEGADO	122
FIGURA. 4.6: LADRILLO REFRACTARIO	122
FIGURA 4.7. LADRILLO AISLANTE	124
<b>(*) PLANO DEL HORNO ROTATORIO</b>	<b>126</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>CAPITULO I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
TABLA 1.1: RESUMEN DE DEPÓSITOS FOSFÁTICOS BOLIVIA	7
TABLA 1.2: TIPOS DE RESERVA DE LA ROCA FOSFÓRICA	9
TABLA 1.3: POTENCIAL DE RESERVAS FOSFÁTICAS	11
<b>CAPITULO II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b>	<b>13</b>
TABLA 2.1: CONTENIDO EN P TOTAL, INORGÁNICO Y FÍTICO DE ALGUNAS MATERIAS PRIMAS (G/KG MATERIA SECA)	15
TABLA 2.2: CUADRO 2.- CONTENIDO EN FÓSFORO FÍTICO Y ACTIVIDAD FITÁSICA DE ALGUNAS MATERIAS PRIMAS	19
TABLA 2.3: CONDICIONES DE PH EN EL TRACTO GASTROINTESTINAL DE AVES Y CERDOS	21
TABLA 2.4: COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE UTILIZACIÓN DEL P (%) DE FOSFATOS MINERALES SEGÚN DISTINTAS FUENTES	25
TABLA 2.5: RANGOS DE TEMPERATURA (T) Y HUMEDAD RELATIVA (HR) ACEPTABLES	28
TABLA 2.6: TABLA DE REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES PARA LA RATA	29
TABLA 2.7: TABLA DE REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES PARA LA RATA	29
TABLA 2.8: VARIEDADES DEL APATITO	34
TABLA 2.9: ROCA SELECCIONADA CON ALTO CONTENIDO DE % DE FÓSFORO	37
TABLA 2.10: VARIACIÓN DEL ÁREA DE SUPERFICIE DE LA ROCA FOSFATADA EN MALLA 100-150.	38
TABLA 2.11: GRADOS DE FLUORINACIÓN Y CARBONATACIÓN DE FOSFATOS NATURALES	39
TABLA 2.12: DIVERSAS VARIACIONES DE REACTIVIDAD DE ROCA EN DISOLVENTES FERTILIZANTES	41
TABLA 2.13: DIVERSOS NIVELES DE REACTIVIDAD DE ROCA INDICADOS POR DIFERENTE PROCEDIMIENTOS VA EN ORDEN ASCENDENTE	42
TABLA 2.14: ESCALA DE REACTIVIDAD PARA LA ROCA FOSFATADA ES DE ORDEN ASCENDENTE	42
TABLA 2.15: SE MUESTRA EL ÁNGULO CENTRAL (A) Y EL LLENADO DEL HORNO (F)	48
TABLA 2.16: GRADOS DE LLENADO ÓPTIMOS	49
<b>CAPITULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>55</b>
TABLA 3.1. VALORES DEL PARÁMETRO DE RED DE LAS APATITAS POR LA SUSTITUCIÓN	

POR CARBONATO	59
TABLA 3.2: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ROCA FOSFÓRICA SIN CALCINAR	68
TABLA 3.3: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ROCA FOSFÓRICA CALCINADA A 1000° C.	69
TABLA 3.4: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ROCA FOSFÓRICA CALCINADA A 1200° C.	70
TABLA 3.5: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ROCA FOSFÓRICA CALCINADA A 1400° C.	71
TABLA 3.6: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL FOSFATO COMERCIAL (FOSFATO BICÁLCICO).	73
TABLA 3.7: CONTENIDO DE %P POR EL LIXIVIADO CON ACIDO CÍTRICO AL 2%	75
TABLA 3.8: CONTENIDO DE %P DESPUÉS DEL LIXIVIADO CON ACIDO CLORHÍDRICO AL 0.4%	76
TABLA 3.9: LIXIVIACIÓN DE LAS MUESTRAS CON ACETATO DE AMONIO NEUTRO	78
TABLA 3.10: CONTENIDO DE FÓSFORO PARA DETERMINAR LA SOLUBILIDAD EN AGUA Y CITRATO DE AMONIO NEUTRO	79
TABLA 3.11: INGREDIENTES DEL ALIMENTO BALANCEADO	84
TABLA 3.12: SU COMPOSICIÓN BROMATOLÓGICA Y QUÍMICA	84
TABLA 3.13: COMPOSICIÓN DE LA DIETA BASE DE LOS TRATAMIENTOS CON ADICIÓN DE FÓSFORO INORGÁNICO	85
TABLA 3.14: INCREMENTO DE PESO (IP) DE LOS TRATAMIENTOS	88
TABLA 3.15: CANTIDAD DE ALIMENTO CONSUMIDO EN LOS ANIMALES EN LA EVALUACIÓN BIOLÓGICA.	89
TABLA 3.16: CANTIDAD DE %P FÍTICO INGERIDO EN LAS DIETAS	89
TABLA 3.17: CANTIDAD DE %P INORGÁNICO INGERIDO EN LAS DIETAS	89
TABLA 3.18: CANTIDAD DE %P TOTAL (FÍTICO+INORGÁNICO) INGERIDO POR LAS DIETAS	90
TABLA 3.19: CONTENIDO DE FÓSFORO TOTAL (INORGÁNICO+FÍTICO) EXCRETADO POR LOS ANIMALES EN HECES Y ORINA.	90
TABLA 3.20: CONTENIDO DE FÓSFORO TOTAL (INORGÁNICO+FÍTICO) RETENIDO POR LOS ANIMALES.	90
TABLA 3.21: CONTENIDO DE FÓSFORO INORGÁNICO RETENIDO POR LOS ANIMALES	91
TABLA 3.22: RETENCIÓN NETA APARENTE (%RNA)	92
TABLA 3.23: CORRELACIONES	95
TABLA 3.24: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS	95
TABLA 3.25: VARIABLE DEPENDIENTE INCREMENTO EN PESO (GRAMOS)	100
TABLA 3.26 VARIABLE DEPENDIENTE: INCREMENTO EN PESO (GRAMOS)	101
TABLA 3.27. SUBCONJUNTOS HOMOGÉNEOS SOBRE EL INCREMENTO EN PESO DEL ANIMAL	101
TABLA 3.28 VARIABLE DEPENDIENTE: RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL ANIMAL	104
TABLA 3.29 PRUEBAS DE LOS EFECTOS INTER-SUJETOS. VARIABLE DEPENDIENTE:	

RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL ANIMAL	106
TABLA 3.30. SUBCONJUNTOS HOMOGÉNEOS SOBRE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL ANIMAL	106
<b>CAPITULO IV. CÁLCULOS DE INGENIERÍA PARA LA PLANTA PROPUESTA</b>	<b>107</b>
TABLA 4.1: RESUMEN DEL CALOR, TIPO DE CALOR Y PORCENTAJE	115
<b>CAPITULO V. EVALUACIÓN FINANCIERA</b>	<b>127</b>
TABLA 5.1: ACTIVOS FIJOS	127
TABLA 5.2: REQUERIMIENTO DE MATERIA PRIMA ANUAL	128
TABLA 5.3: RESUMEN DE COSTOS	129
TABLA 5.4: FIJACIÓN DEL PRECIO POR BOLSA DE 50 KG DE FOSFATO TRICÁLCICO	129
TABLA 5.5: PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN	130
TABLA 5.6: FLUJO DE INGRESOS Y GASTOS	131
TABLA 5.7: FLUJO DE CAJA (\$US)	131
TABLA 5.8: FLUJO DE CAJA PARA EL CALCULO DE INDICADORES FINANCIEROS EN (\$US)	132
TABLA 5.9: INDICADORES FINANCIEROS EN (\$US)	132

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A : Área  
Å : Anstrom  
°C : Grado Celsius  
D : Diámetro  
H : Altura  
J : Peso específico  
k : Conductividad térmica  
kg : Kilogramo (Sistema Internacional)  
kJ : Kilo Joule (Sistema Internacional)  
kW : Kilo Watt (Sistema Internacional)  
L : Longitud  
l : Litro (Sistema Internacional)  
M : Masa  
m : Metro (Sistema Internacional)  
ml : Mililitro (Sistema Internacional)  
n : Número de revoluciones  
P : Presión  
P<sub>cj</sub> : Poder calorífico  
ppm : Partes por millón  
Q : Cálor  
q : Caudal  
r : Radio  
S : Pendiente  
T : Temperatura  
 $\tau$  : Tiempo de residencia  
t : Tonelada (Sistema Internacional)  
U : Coeficiente total de transferencia de calor  
V : Volumen  
 $\alpha$  : Grado de llenado  
 $\delta$  : Densidad  
 $\mu$  : Micra  
cm: Centímetro

## CAPITULO 1

### 1.1. INTRODUCCIÓN

El fósforo fue aislado por primera vez en 1669, y reconocido como componente de los huesos en 1769. Constituye entre el 0,60 y 0,70% del peso vivo total de animales, distribuido en un 80% en los huesos y 20% en el resto de los tejidos. Los valores de fósforo sérico se consideran como elementos importantes de diagnósticos. <sup>(1)</sup>

El fósforo (P) es un mineral esencial para el metabolismo del organismo animal donde juega un papel muy importante en el desarrollo y mantenimiento de las estructuras óseas. Es un componente del ATP y los ácidos nucleicos, es también parte de los fosfolípidos que integran y dan flexibilidad a las membranas celulares. <sup>(1)</sup>

Se asocian con el P para la formación y mantenimiento del tejido óseo y muscular, desde el punto de vista metabólico es el nutriente de mayor versatilidad, ya que interviene en casi todas las reacciones que ocurren a nivel celular. Además de tener función fundamental (conjuntamente con el calcio) en la formación del hueso, el fósforo esta presente en todas las células e involucrado en todos los procesos metabólicos, incluyendo la capacidad tampón de los fluidos corporales. Prácticamente todos los procesos de transformación de energía en las células vivientes incluyen la formación o ruptura de uniones químicas de óxidos de fósforo con carbono, o compuestos de carbono-nitrógeno. Consecuentemente el fósforo juega un rol fisiológico vital en el metabolismo, tanto del animal como de la microflora del tracto digestivo, particularmente de los rumiantes. <sup>(1)</sup>

Una gran variedad de materias primas ricas en calcio y fósforo han sido evaluadas en raciones para aves y se han determinado diferentes combinaciones de las mismas, capaces de suplir las necesidades de estos minerales. Sin

embargo, estos ingredientes se hacen cada vez más escasos a nivel mundial y, por consiguiente, más costosos y su importación representa pérdida de divisas. <sup>(2)</sup>

En Venezuela las fuentes minerales más utilizadas en la alimentación de aves son la harina de hueso y el carbonato de calcio. Una roca fosfática natural "fosforita", que contiene 70% de fosfato tricálcico, 4,7% de sulfato de calcio y 2,7% de flúor y que es muy abundante en algunas regiones del país, se ha comenzado a incluir como fuente mineral en raciones y suplementos para animales. Sin embargo, su alto contenido de flúor puede limitar su utilización. <sup>(3)</sup>

## **1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS YACIMIENTOS DE ROCA FOSFÓRICA EN BOLIVIA**

La prospección y exploración de roca fosfórica en la actualidad reviste importancia en razón a que este material, casi en un 90 %, es empleado para fertilizante, debido a que su contenido de fósforo es fácilmente asimilado como alimento por los vegetales. <sup>(4)</sup>

Una mayoría de los depósitos de material fosfórico reconocidos que se indica en la tabla 1.1, son de origen sedimentario marino desarrollados en rocas de edad ordovícica superior, en menor porcentaje se ha determinado la presencia de mineral fosfórico en rocas ígneas de edad precámbrica y en prospección bastante reducida, se observan depósitos fosfóricos recientes formados por la acumulación de huesos y excrementos de animales. <sup>(4)</sup>

El territorio Boliviano tiene un elevado porcentaje de material de origen sedimentario marino, desarrollado en rocas de edad ordovícica superior y en menor proporción se observa de origen ígneo principalmente de edad precámbrica. <sup>(4)</sup>

Los depósitos fosfáticos identificados hasta el presente en Bolivia aproximadamente corresponden a 16 zonas de las cuales 12 encuentran desarrolladas en rocas ordovícicas aflorantes en la región de la cordillera oriental, 3 en la zona del escudo Brasílero ubicadas en la parte oriental del departamento de Santa Cruz y un depósito situado en la región altiplánica entre las localidades de Huari y Soledad del departamento de Oruro.<sup>(4)</sup>

De todos estos depósitos nombrados, como de importancia económica se ha definido el de Capinota, que se encuentra ubicado en la provincia del mismo nombre en el departamento de Cochabamba, cuyas características geológicas indican las capas de fosfatos que muestran espesores hasta de 1.60 m, tenores promedios que oscilan entre 12.17 % y 25.71 % de  $P_2O_5$ .<sup>(4)</sup>

Otra zona es la comprendida entre Capinota y el km 50 de la carretera a Oruro (Quiñi Pampa) , habiéndose determinado la existencia de zonas anómalas que muestran importantes afloramientos de horizontes fosfáticos que alcanzan hasta 1.20m de potencia, con tenores que varían de 18.15 a 27.65 % de  $P_2O_5$ , características que posibilitan estudios a mayor detalle.<sup>(5)</sup>

### **1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS DEPÓSITOS FOSFÁTICOS**

En los diferentes estudios de los yacimientos de roca fosfórica realizados hasta el presente, se identificaron a 16 sectores, los mismos que para su descripción más detallada se los clasifica considerando la edad de su formación, es decir en depósitos precámbricos.<sup>(4)</sup>

### **1.2.2. DEPÓSITOS PRECÁMBRICOS**

En la parte oriental del territorio boliviano se observan extensos afloramientos alterados de rocas ígneas y metamórficas de edad precámbrica, donde los estudios de exploración mineral, correspondiente al proyecto precámbrico, se ha determinado la existencia de lentes mineralizados conteniendo

minerales fosfáticos como ser apatita y fosforita en diferentes sectores de la región, de los cuales por sus características geomíneralógicas sobresalen los que se encuentran en el Cerro Chapioc (provincia Chiquitos, Santa Cruz) y el Cerro Manomó (provincia Velasco, Santa Cruz), constituyendo este último al sector de mayor interés por su contenido mineralógicos, ya que el mineral fosfático apatita viene asociado a otros minerales de valor económico como ser el uranio, niobio, torio.<sup>(4)</sup>

### 1.2.3. DEPÓSITOS ORDOVÍCICOS

Rocas sedimentarias de edad ordovícica se presentan en amplia difusión en la parte central del territorio boliviano, se hallan expuestas a lo largo de la Cordillera Oriental con un rumbo variable nor oeste a nor sur, desde la frontera con la República del Perú por el nor oeste, hasta los límites con la nación Argentina por el sur, formando una faja de aproximadamente 50 a 200 km de ancho y litológicamente conformada por una sedimentación cíclica de lutitas, areniscas y cuarcitas.<sup>(4)</sup>

Los reconocimientos geológicos efectuados evidencian que los horizontes fosfáticos se encuentran preponderantemente desarrollados en los niveles superiores de la secuencia ordovícica (piso Caradociano), con algunas variaciones locales como la de los afloramientos que se exponen en el extremo sur cerca de la frontera con la República Argentina donde las capas fosfáticas están relacionados con los pisos inferiores del sistema ordovícico.<sup>(4)</sup>

La secuencia ordovícica que contiene a los horizontes fosfáticos esta constituida por una deposición cíclica de siltitas, lutitas y arsenitas (y/o arsenitas cuarcitas), depositadas en un ambiente marino nerítico de aguas tranquilas con variaciones u oscilaciones del litoral que explican la alternancia de arseniscas con siltitas y lutitas.<sup>(5)</sup>

Dentro de este rubro se reconocen los yacimientos denominados: Aguirre, Sucre, Iscayachi, Caranavi, Camino Cochabamba-Oruro (Circa-Bombeo), Umabisa, Lagunillas, Quirvincha, Buey Tambo, Miculpaya y Capinota. (Mayor detalle en la tabla 1,1).

#### **1.2.4. DEPÓSITOS POR ACUMULACIONES RECIENTES**

En la región altiplánica oriental de Bolivia en un área comprendida entre las localidades de Soledad y Huari en el departamento de Oruro en Sepultura, se ha verificado la existencia de depósitos recientes de fosfatos, descritos como depósitos precoloniales de estiércol, localmente denominados depósitos de abono. Existen 7 emplazamientos que corresponden a Huari, Challapata, Pazña, Poopó, Machacamarca, Paria y Soledad.<sup>(4)</sup>

El origen de estos depósitos se halla relacionado con la deposición de excrementos y huesos de animales, mezclados en forma irregular con arcillas y sedimentos finos acumulados principalmente en recintos para animales, determinando que se trata de depósitos de extensión limitada, pobre en material fosfático y de escaso potencial económico.<sup>(4)</sup>

#### **1.2.5. GRADO DE PROSPECCIÓN GEOLÓGICA**

Los depósitos de fosfato considerados hasta el presente, son reconocidos de acuerdo al grado de prospección geológica obtenida <sup>(6)</sup>, estos pueden clasificarse:

- ☉ Prospectos ubicados por información o reconocidos superficialmente.
- ☉ Depósitos reconocidos a semidetalle.
- ☉ Depósitos reconocidos a detalle.

Dentro el primer rubro se encuentra los yacimientos de Villamontes, Laguan Mandiore, Cerro Chapioc, Cerro Manomó, Aguirre, Sucre y Izcayachi. El segundo rubro corresponde a los yacimientos de Caranavi, Camino, Cochabamba-Oruro, Umabisa, Lagunillas, Quirvincha, Buey tambo, Milculpaya y Sepulturas. Quedando solo el yacimiento de Capinota para el tercer rubro.<sup>(4)</sup>

En la tabla 1.1. muestra un resumen de los depósitos fosfáticos de Bolivia la mayoría son de origen sedimentario marino desarrolladas en rocas de edad ordovícica.

**Tabla 1.1:** Resumen de depósitos fosfáticos Bolivia (según Lemus Coronado, 1996)

N°	TIPO DE DEPOSITO	NOMBRE	UBICACIÓN	NÚMERO DE CAPAS	ESPESOR EN (cm)	LEY % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	POTENCIA DE RESERVAS
1	Ordovícico Superior	Caranavi	Nor-este de La Paz	55	3-20	1-17	-
2	Ordovícico Superior	Lagunillas	Este de Betanzos Potosí	2	20-45	17-23	Razonable
3	Ordovícico Superior	Miculpaya	Este de Betanzos Potosí	Algunas	24	<8	-
4	Ordovícico Superior	Buey Tambo	Este de Betanzos Potosí	Algunas	Delgadas	-	-
5	Ordovícico Superior	Quirvincha	Este de Betanzos Potosí	1	12	-	-
6	<b>Ordovícico Superior</b>	<b>Capinota</b>	<b>Sur de Cochabamba</b>	<b>37</b>	<b>5-160</b>	<b>6-26</b>	<b>Potencial Económico</b>
7	Ordovícico	Ischayachi	Oeste de Tarija	10	10-100	<2	-
8	Ordovícico Superior	Camino Cochabamba-Oruro	Km. 50-75 camino Cochabamba-Oruro	10	5-120	18-20	-
9	Ordovícico Superior	Aguirre	Nor-este de Cochabamba	Pocas	Delgadas	-	-
10	Ordovícico Superior	Umabisa	Norte de Potosí	30	2-40	8-24	Razonable
11	Ordovícico	Sucre	Oeste de Sucre	-	-	-	-
12	Precámbrico	Cerro Chapioc	Prov. Chiquitos Santa Cruz	-	-	10	-
13	Precámbrico	Cerro Manomó	rov. Velasco Santa Cruz	-	-	25	-
14	Acumulación Reciente	Sepulturas	Este de Oruro	1 Zona	Delgadas	<10	-
15	Ignorado	Villamontes	Este de Tarija	Sin Información	Sin Información	-	-
16	Ignorado	Laguna Mandiore	Frontera Brasil	Sin Información	Sin Información	0,46	Sin Información

### 1.2.6. YACIMIENTO DE CAPINOTA

El depósito de fosfato se halla ubicado en el departamento de Cochabamba, a 10 km al este de la localidad de Capinota. El medio de vinculación a la localidad de Capinota localizada dentro la zona andina de la cordillera oriental, con la ciudad de Cochabamba es a través de un camino carretero de aproximadamente 66 km de longitud, con un primer tramo de 40 km que corresponde entre la ciudad de Cochabamba hasta la población de Parotani, a partir de ese punto se desvía hacia el sudeste siguiendo un camino hasta la población de Capinota, abarcando una distancia de 26 Km. Otra vía de acceso, constituye la línea férrea en el tramo Cochabamba-Oruro, teniendo como estación mas cercana la de Irpa-Irpa, que se encuentra a 5 Km. al este del deposito de Paloma Pampa.<sup>(4)</sup>

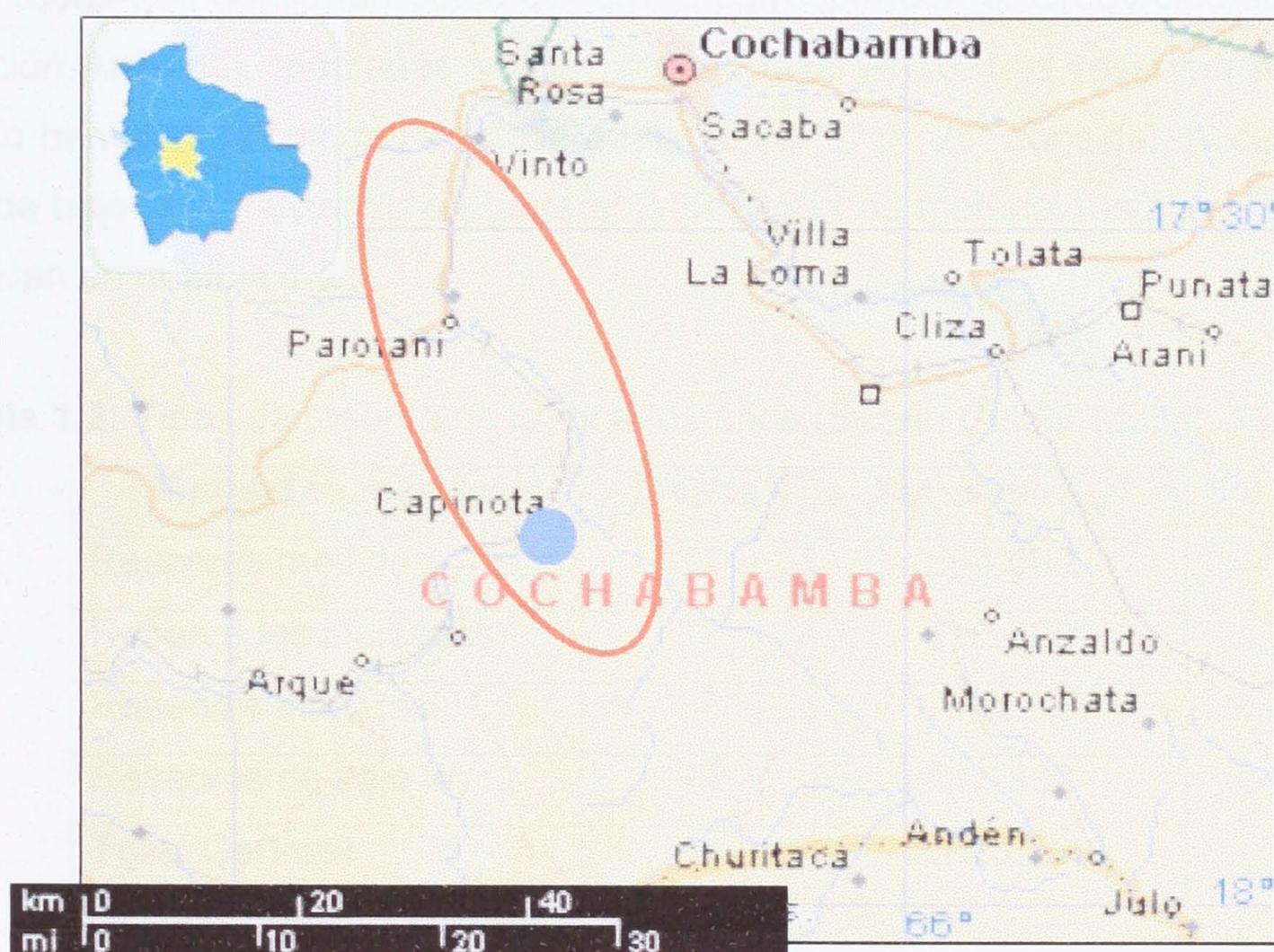


Figura 1.1 Microlocalización de yacimiento Capinota

De acuerdo a una observación macroscópica muestra que la coloración de los estratos fosfáticos varía del marrón claro a oscuro y en sectores hasta negrusco, pero cuando es más oscuro se espera mayor concentración de fosfato.<sup>(4)</sup>

La zona reconocida de topografía abrupta abarca un área aproximada de 1000 Has entre la quebrada de Tajra Mayu y el Rancho Paloma Pampa, determinándose dos capas de importancia denominadas capa "25" y "37" de las cuales la capa "37" representa el mayor potencial en la zona.<sup>(4)</sup>

La capa "25" presenta un espesor medio de 0.61 m y ley media de 12.17% de  $P_2O_5$ . La capa "37" presenta espesores promedios que oscilan entre 1.03 y 1.11 m de potencia y una ley promedio de 25 % de  $P_2O_5$ .<sup>(4)</sup>

Las rocas que contienen estos depósitos corresponden al Ordovícico superior (formación Anzaldo), afectadas por un intenso fallamiento. Las reservas en este depósito han sido calculadas en base a las capas "37" y "25" considerándose esta última de baja ley totalizando en general 2.823.250 t de material fosfático <sup>(5)</sup> estos se detallan en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2:** Tipos de reserva de la roca fosfórica (Según Golder Moffitt, 1979)

<b>Tipos de reservas</b>	<b>Capas</b>	<b>Toneladas (t)</b>
Reservas medidas	"37"	584.500
Reservadas indicadas	"37"	696.500
Reservas inferidas	"37"	1.394.750
Reservas de baja ley	"25"	147.500
<b>Total General</b>	-	<b>2.823.250</b>

Las reservas consideradas como de potencial económico-minero sobre las cuales se puede establecer una decisión futura, corresponden a la capa "37" y suman 1.189.000 t. con una ley promedio de 25.47 % de  $P_2O_5$ .<sup>(5)</sup>

Debe ponerse en consideración que también existen otros yacimientos de fosfato aledaños al de Paloma Pampa que pueden ser considerados de importancia económica, por sus reservas y cercanías al depósito principal de Capinota; además las capas de estos depósitos correlacionan con las capas presentes en Paloma Pampa. Estos depósitos son conocidos como: Zona de Huañuma, Zona de Jaraña-Mamani Punta, Zona de Muyu, Zona de Khara Launi y Zona de Quiñi Pampa.<sup>(5)</sup>

## 1.2.7. POTENCIAL DE RESERVAS FOSFÁTICAS

El potencial de los depósitos de la roca fosfórica existentes en el país es bastante considerable, tomando en cuenta que hasta el momento se conoce en detalle los yacimientos pertenecientes a la región de Capinota y adyacentes, y no así los demás depósitos considerados de importancia económica, además se estima que existe otros yacimientos que no han sido mencionados por una insuficiente información.<sup>(5)</sup>

**Tabla 1.3:** Potencial de reservas fosfáticas (Según Golder Moffitt, 1979)

<b>RESERVAS</b>	<b>TOTAL (t )</b>
Paloma Pampa	2.823.250
Zona de Huañuma	1.000.000
Zona de Jaraña-Mamani Punta	50.000
Zona Muyu Loma	13.000
Zona Kara Launi	200.000
Zona Quiñi Pampa	1.500.000
<b>TOTAL RESERVAS</b>	<b>5.586.250</b>

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- ☉ Desarrollar un proceso de adición de fósforo a partir de la roca fosfórica calcinada en alimento balanceado para nutrición animal

#### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ☉ Determinar químicamente la composición de la roca fosfórica del yacimiento Capinota para su aplicación en las mezclas del alimento.
- ☉ Realizar la lixiviación de la Roca Fosfórica cruda en ácido cítrico al 2% y ácido clorhídrico al 0,4%.
- ☉ Determinar la temperatura de calcinación adecuada para que el producto obtenido tenga mejores rendimientos en biodisponibilidad de fósforo.
- ☉ Realizar la calcinación de la roca fosfórica en un horno rotatorio.
- ☉ Realizar la estandarización del balance de energía del horno con la roca fosfórica.
- ☉ Realizar la lixiviación de la Roca Fosfórica calcinada en ácido cítrico al 2% y ácido clorhídrico al 0,4%.

- ☉ Determinar la formulación de la mezcla con la dosificación del fosfato tricálcico para el alimento balanceado (en ratas de la cepa wistar).
- ☉ Realizar el análisis bromatológico de las mezclas propuestas.
- ☉ Realizar ensayos biológicos de las mezclas propuestas para probar la asimilación del fósforo en el organismo animal aplicando un diseño experimental.
- ☉ Comparar los resultados de viabilidad de las mezclas propuestas del producto obtenido con relación a un producto comercial (fosfato bicálcico).
- ☉ Diseñar el proceso de producción.

#### 1.4. JUSTIFICACIÓN

El creciente aumento de población en nuestro país lleva a su vez a una gran demanda de alimentos (cárnicos), y en consecuencia a un elevado costo de materia prima extranjera, por tanto se recurre al uso de fosfato tricálcico mas económico y de fabricación boliviana.

En Bolivia el uso de fosfatos nacionales es mínimo, debido a una falta de promoción e impulso hacia la industria, la producción de superfosfatos a partir de roca fosfórica se hace en base a su lixiviación con ácido sulfúrico, buscando una manera más económica de obtener este producto, donde nace la idea de tratarla térmicamente. Con el tratamiento el producto terminado es más soluble, consiguiendo una eliminación de compuestos no deseados, por tanto el mismo adquiere una transformación ideal para la asimilación del animal.

El presente trabajo tiene como meta el obtener un mineral esencial que además de tener fósforo contenga otros nutrientes principales, y que sea accesible para los proveedores y de esta forma también explotar la riqueza natural que tiene nuestro país.

## CAPITULO 2

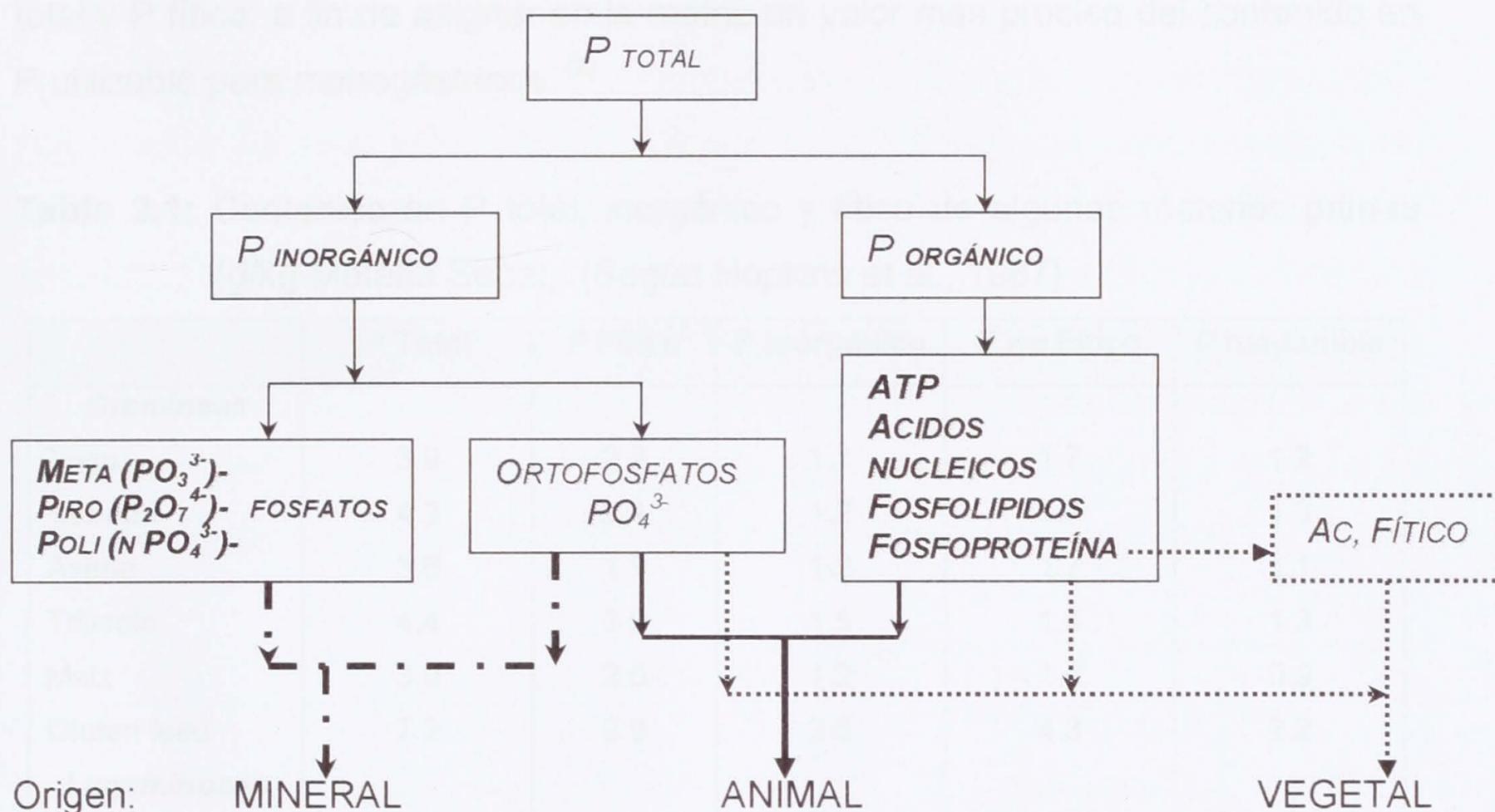
### MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

#### 2.1. NATURALEZA DEL FÓSFORO

El fósforo es un elemento no metálico y el segundo mineral más común en el cuerpo el 80% se encuentra en los huesos y los dientes y el 20% restante está en la sangre y los tejidos. El (P) contenido en las materias primas se encuentra bien en forma inorgánica principalmente como ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), bien en forma orgánica en el seno de las moléculas tales como el ATP, ácidos nucleicos, fosfolípidos, fosfoproteínas y fosfoglúcidos. La hidrólisis del (P) orgánico en el tracto gastrointestinal libera ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), que es la única forma en que el animal puede absorber y utilizar el P. En los ingredientes vegetales el P orgánico representa la fracción mayoritaria, siendo el ácido fítico el fosfoglucido más abundante. En torno a un 60-80% del P total contenido en los granos y sus subproductos se encuentra como parte del ácido fítico y sus sales, generalmente como fitatos de Ca, K, Mg. <sup>(1)</sup>

Por el contrario, en los alimentos de origen animal predomina el P inorgánico que se encuentra en forma de ortofosfatos en solución en medio celular y mayoritariamente como fosfatos de calcio en los tejidos óseos y en la leche. Alrededor del 85-90% del P presente en el organismo animal se localiza en el esqueleto como fosfato de cálcico  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  e hidroxiapatita  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  y el 15-20% restante se encuentra como P orgánico en los tejidos musculares y nervioso y especialmente en los glóbulos rojos. <sup>(7)</sup>

La figura 2.1 muestra la distribución de las dos formas del P (orgánico e inorgánico) en los ingredientes utilizados en alimentación animal. El P orgánico se estima por diferencia entre el P Total y el Inorgánico.



**Figura 2.1. Naturaleza del P contenido en las materias primas**  
(Según Latta y Eskin, 1980; Haugh y Lantzsch, 1983).

Desde el punto de vista práctico se admite que la disponibilidad del P inorgánico y del P orgánico no fítico es similar y cercana al 100% (rango 80-100%). Por el contrario, se considera que el P fítico no puede ser utilizado por los animales monogástricos (aves y cerdos) asignándole un valor de 0, y se asume que el contenido en P fítico de todas las materias primas de origen vegetal es del 70% del P total. <sup>(8)</sup>

La diferencia entre P no fítico y P orgánico indica que existe un nivel variable de P orgánico de naturaleza no fítica de alta disponibilidad en monogástricos. Los valores más altos corresponden a guisantes, habas y colza (50 a 80% del P total), lo que explica la mayor disponibilidad del P en leguminosas y oleaginosa que en cereales. En dietas para monogástricos debe considerarse la naturaleza del P de las materias primas vegetales, analizando sus contenidos en P

total y P fítico, a fin de asignar en la matriz un valor más preciso del contenido en P utilizable para monogástricos. <sup>(9)</sup>

**Tabla 2.1:** Contenido en P total, inorgánico y fítico de algunas materias primas (g/kg Materia Seca), (Según Hopkins et al., 1987)

	P Total	P Fítico	P Inorgánico	P no Fítico	P disponible
<b>Gramineas</b>					
Trigo	3.9	2.2	1.1	1.7	1.2
Cebada	4.3	2.4	1.2	1.9	1.3
Avena	3.6	1.9	1.2	1.7	1.1
Triticale	4.4	3.0	1.5	1.4	1.3
Maiz	3.0	2.0	1.2	1.0	0.9
Gluten feed	7.2	2.9	2.6	4.3	2.2
<b>Leguminosas</b>					
Guisantes	4.3	2.1	1.3	2.2	1.3
Habas	5.8	1.5	1.5	4.3	1.7
Hna de Pradera	2.6	1.1	1.2	1.5	0.8
Harina de Soya	7.0	3.0	1.4	4.0	2.1
Soya Integral	5.3	2.3	1.2	3.0	1.6
Hna de Girasol	9.4	3.0	1.4	6.4	2.8
Hna de Colza	12.4	2.1	1.7	10.3	3.7

## 2.2. FITATOS

El ácido fítico es un componente esencial de todas las semillas constituyéndose en una reserva de P y otros minerales que se liberarán durante la germinación. El ácido fítico fue descrito por primera vez en 1903 y consiste de una molécula de inositol con 1 a 6 grupos ortofosfato unidos mediante enlaces ester <sup>(10)</sup>. Químicamente, la molécula de IP-6 se define como mioinositol 1, 2, 3, 4, 5, 6, hexakis dihidrógeno fosfato, contiene un 28,2% de P y posee 6 grupos ortofosfato con afinidad variable por ciertos cationes y aminoácidos. Los fitatos son sales del ácido fítico con distintos cationes; así la fitina es la sal del ácido fítico con los

cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Fitatos y fitina no son pues términos equivalentes. En la práctica el término ácido fítico se usa tanto para el IP-6 como para los compuestos intermedios de su hidrólisis (desde IP-5 a IP-1). Mediante la espectroscopía de resonancia magnética se demostró que en los ingredientes habitualmente utilizados, el fosfato de inositol más abundante es el IP-6 (70 a 80% del P total en los cereales). Los penta (IP-5) y tetra (IP-4) fosfatos de inositol están presentes a niveles de 5 al 20% y de menos del 0,05%, respectivamente, en relación a las cantidades encontradas de IP-6. El resto de fosfatos de inositol (IP-3 a IP-1) no se detectan, lo que indica que se encuentran en cantidades despreciables. <sup>(11)</sup>

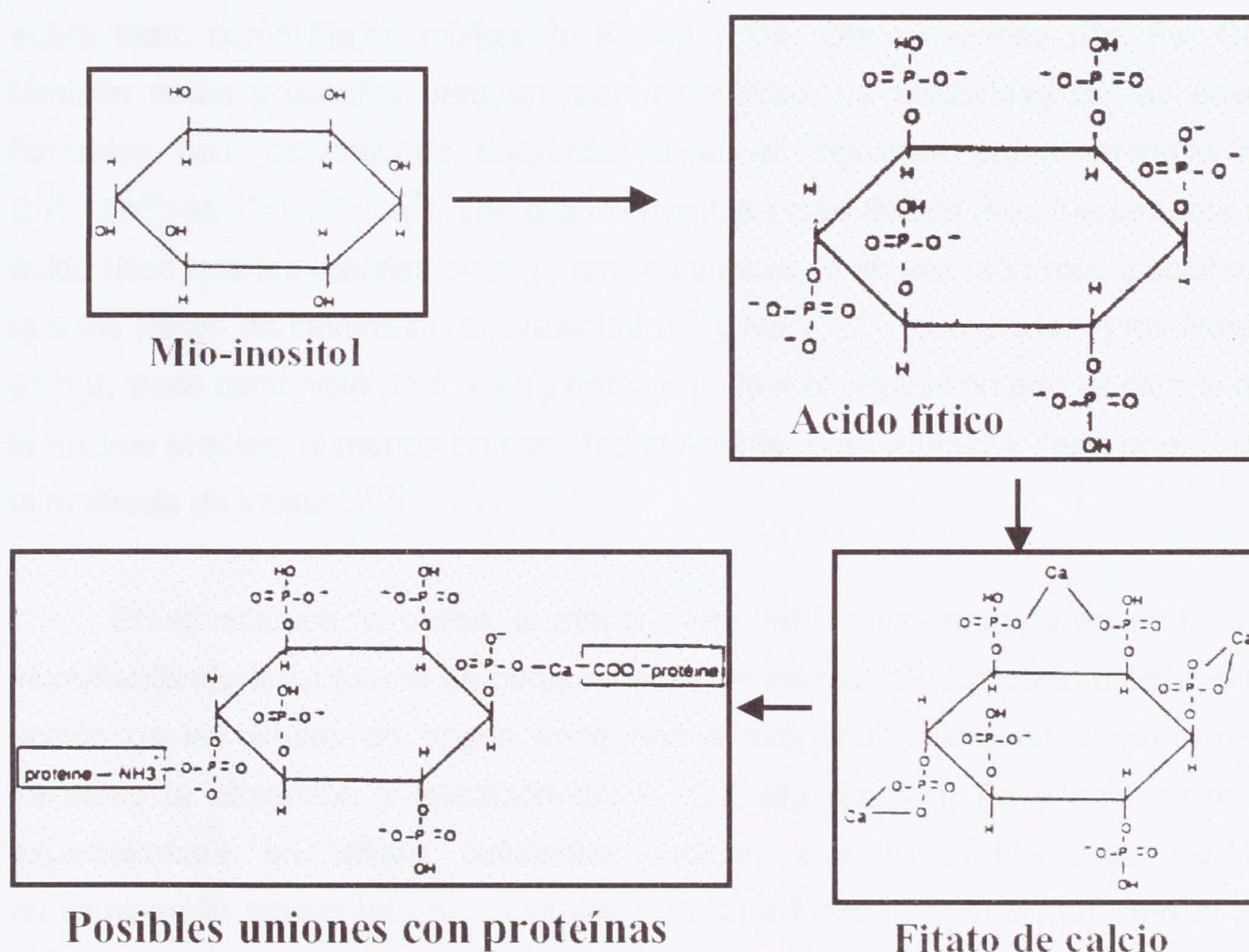


Figura 2.2. Estructuras químicas que se forman partir del Mioinositol

(Según Sauveur, 1989).

Los fitatos son de naturaleza vegetal y por tanto no aparecen en materias primas de origen animal o mineral. Se acumulan preferentemente en las semillas donde cumplen una función de reserva de P, minerales y energía y, por tanto, su contenido en tallos y hojas es muy bajo. <sup>(11)</sup>

Los fitatos contenidos en las diversas materias primas presentan características diferenciales que influyen en su hidrólisis y en la subsiguiente liberación del P. Así, se observan diferencias en la solubilidad de los fitatos de distintas fuentes que afectan al grado de degradación enzimática y a su utilización por el animal. En los granos, el ácido fítico está presente bajo forma de fitina y, sobre todo, como fitatos mixtos de K, Mg y Ca. Otros cationes (Zn, Fe, Cu) también están presentes pero en menor cantidad. La solubilidad de las sales formadas con los cationes divalentes sigue el siguiente orden decreciente:  $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ . Los oligoelementos están fijados más fuertemente al ácido fítico que los metales alcalino-terreos y éstos, a su vez, son más insolubles que los fitatos de cationes monovalentes ( $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ). El P contenido en los fitatos es muy poco disponible para aves y porcino ya que el organismo animal carece de la enzima precisa, al menos en cantidad suficiente, para romper y separar el P de la molécula de inositol. <sup>(10)</sup>

En situaciones normales, la mayor parte del P fítico aparece en las heces incrementando el problema de contaminación ambiental. Su hidrólisis mediante la acción de las fitasas de origen endógeno o exógeno mejora en proporciones variables la absorción y retención del P, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe y aminoácidos, especialmente en dietas deficientes indican que la problemática de la contaminación ambiental por minerales puede reducirse hasta en un 50% si se utilizan alimentos ricos en fitasas naturales o cuando se adicionan fitasas exógenas. En rumiantes y parcialmente en animales coprófagos tales como el conejo, la producción de fitasas por los microorganismos del rumen y ciego es abundante por lo que la utilización del P fítico no supone ningún problema. <sup>(12),(7)</sup>

## 2.3. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA BIODISPONIBILIDAD DE FÓSFORO

### 2.3.1. ENZIMA FITASA

El P contenido en los fitatos es muy poco disponible para aves y porcino ya que el organismo animal carece de la enzima precisa, al menos en cantidad suficiente, para romper y separar el P de la molécula de inositol. <sup>(13)</sup>

Las fitasas (mioinositol, hexafosfato fosfohidroxilasas) son fosfatasas acidas que catalizan el proceso de hidrólisis del ácido fítico liberando de forma secuencial hasta 6 grupos ortofosfatos libres. La hidrólisis de fitatos in vitro da lugar a una acumulación temporal de fosfatos de mioinositol con 3 a 1 grupos fosfato (IP-3 a IP-1), los cuales no se detectan en la digesta ileal de cerdos y aves que reciben dietas suplementadas con fitasas microbianas. Las fitasas están presentes de forma natural en numerosos cultivos de bacterias y hongos, así como en ciertos granos. También están presentes en el tracto intestinal de todos los animales debido bien a la ingestión de plantas. <sup>(13)</sup>

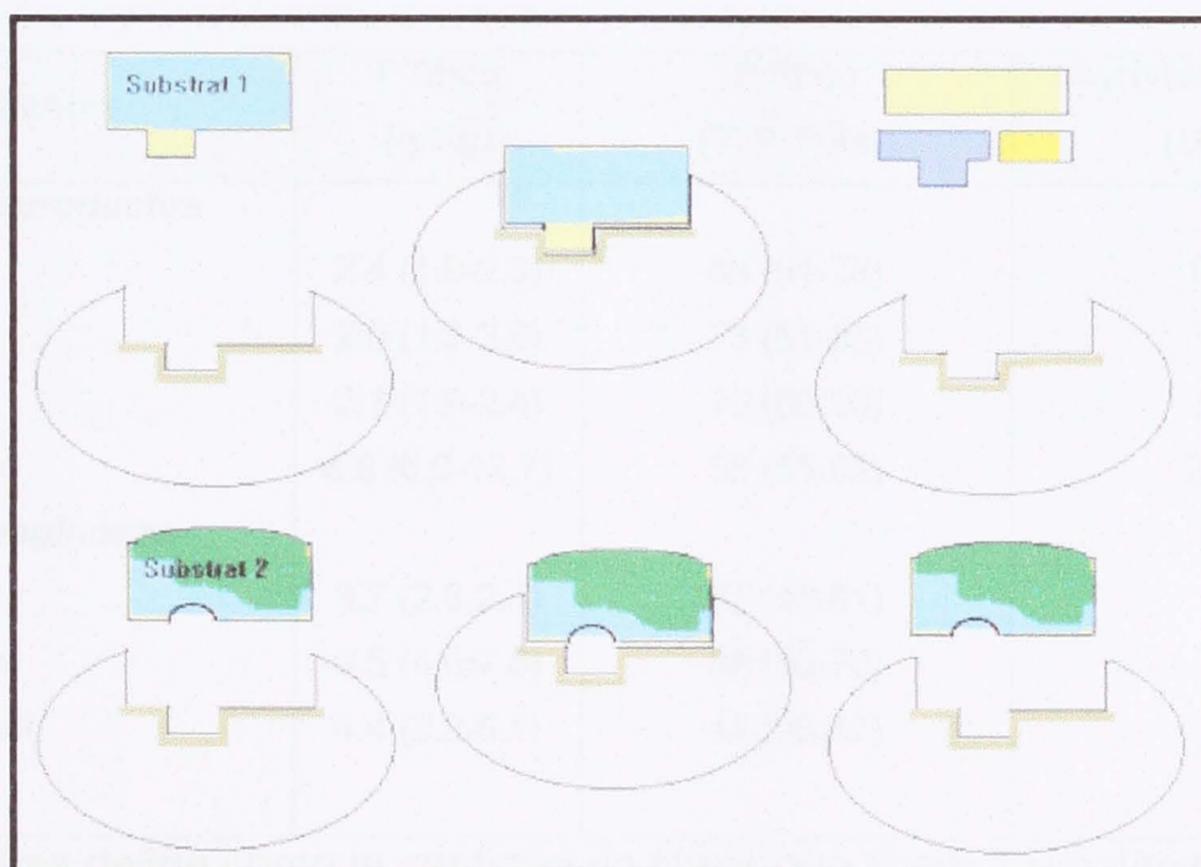


Figura 2.3. Cada enzima puede cambiar solamente un sustrato específico. Otro sustrato no puede ser cambiado, Según A. Herbas, 2005)

El ácido fítico también puede formar complejos insolubles con proteínas y almidón (Kornegay, 1999; Ravindran, 1999). La interacción de ácido fítico y proteínas es de tipo iónico y dependiente del pH. A pH bajo el ácido fítico se une con los residuos básicos (grupo amino) de la lisina, arginina y histidina formando complejos insolubles. A pH neutro dichos complejos se solubilizan y es el grupo carboxilo ( $\text{COO}^-$ ) quien se une al ácido fítico utilizando como intermediarios cationes multivalentes. <sup>(14)</sup>

Los complejos formados cambian la estructura de las proteínas reduciendo su solubilidad, digestibilidad y funcionalidad. El ácido fítico también puede inhibir la acción de ciertas enzimas tales como  $\alpha$ -amilasas, proteasas como la tripsina y pepsina y lipasas <sup>(15)</sup> formando complejos mediante mecanismos aún desconocidos. Probablemente, el nutriente más afectado por esta inhibición enzimática sea la proteína y, en particular, ciertos aminoácidos. <sup>(16)</sup>

**Tabla 2.2:** Cuadro 2.- Contenido en fósforo fítico y actividad fitásica de algunas materias primas, (Según Ravindran et al., 1995)

Ingredientes	P fítico (g/Kg)	P fítico (% P Total)	Actividad fitásica (U/Kg) <sup>1</sup>
<b>Cereales y subproductos</b>			
Trigo	2.4 (1.9-2.9)	68 (61-78)	1190
Maiz	2.0 (1.6-2.6)	73 (61-85)	15
Cebada	2.1 (1.9-2.4)	76 (68-93)	580
Salvado de trigo	8.8 (6.0-12.7)	58 (55-62)	2950
<b>Harinas De oleaginosas</b>			
Harina de soya	3.7 (2.8-2.4)	57 (46-61)	40
Harina de colza	6.5 (4.6-7.8)	58 (36-70)	15
Harina de girasol	4.4 (3.2-5.1)	44 (35-47)	60

<sup>1</sup> Una unidad se define como la cantidad de fitasa que libera 1  $\mu\text{mol}/\text{min}$  de fósforo inorgánico de una solución 5,1 mM de fitato sódico a pH 5,5 y 37 °C.

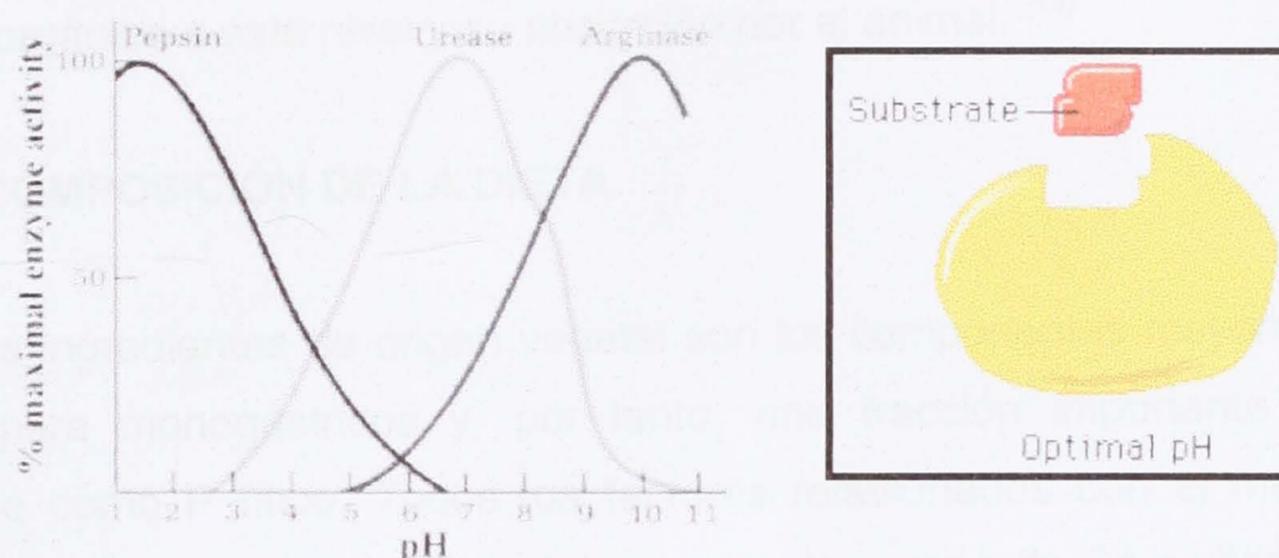
### 2.3.2. FITASAS INTESTINALES ENDÓGENAS

La actividad fitásica de la mucosa intestinal es muy reducida aunque demostrable experimentalmente. Al menos en el cerdo, las fosfatasas intestinales endógenas sólo son capaces de hidrolizar las moléculas de intermediarios del inositol fosfato con escaso número de iones ortofosfatos (IP-3 a IP-1) dando lugar a inositol libre. El contenido digestivo del estómago e intestino del cerdo y del buche, estómago e intestino de las aves tiene escasa actividad fitásica propia. La producción de fitasas en la mucosa intestinal puede verse favorecida por niveles bajos de P y Ca y altos de colecalciferol en la dieta. <sup>(17)</sup>

Se estima que las fitasas contenidas en las plantas son al menos un 10% menos eficiente que las de naturaleza fúngica. La razón podría ser el estrecho rango de pH al cual las fitasas vegetales son activas, ya que los valores óptimos de pH para su máxima actividad son superiores a los encontrados en el buche o en el estómago de aves y cerdos, principales punto de acción de las fitasas. <sup>(12)</sup>

### 2.3.3. EFECTO DEL pH SOBRE LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA

Las enzimas poseen grupos químicos ionizables (carboxilos -COOH; amino -NH<sub>2</sub>; tiol -SH; imidazol, etc.). Según el pH del medio, estos grupos pueden tener carga eléctrica positiva, negativa o neutra, habrá un pH en el cual la conformación será la más adecuada para la actividad catalítica Este es el llamado pH óptimo. <sup>(18)</sup>



**Figura 2.4. Maxima actividad enzimática a pH óptimos.**  
(Según A. Herbas, 2005)

**Tabla 2.3:** Condiciones de pH en el tracto gastrointestinal de aves y cerdos, según Herpol y Van Grembergen (1967), Chesson (1987).

Órgano	pH			
	Aves		Cerdos	
	Óptimo	(mín.-máx.)	Óptimo	(mín.-máx.)
Buche	6,3	4,0 - 7,8	-	
Proventrículo	1,8	0,3 - 4,1	-	
Molleja	2,5	0,4 - 5,4	-	
estomago	-	-	-	1,0 - 4,5
Duodeno	6,4	5,2 - 7,6	4,8	4,0 - 6,2
Yeyuno	6,6	5,5 - 7,7	6,0	5,5 - 6,9
Íleon	7,2	5,7 - 8,2	7,0	7,0 - 7,4
Ciego	6,9	5,7 - 8,4	6,3	5,9 - 6,8
Colon	7	5,4 - 8,4	6,2	5,8 - 6,5

La razón de estas diferencias entre especies no es conocida. En los alimentos de origen animal y fosfatos inorgánicos, la digestibilidad del P resulta favorecida en cerdos por el mayor tiempo de permanencia del alimento en el aparato digestivo (2 horas en el estómago de cerdos vs 15-60 minutos en el proventrículo/molleja de aves. Además, aunque las diferencias de pH entre el proventrículo/molleja en aves y el estómago en cerdos no son importantes, el pH

del duodeno es más bajo en cerdos (4,8 vs 6,4) lo que favorecería la solubilización del P inorgánico a este nivel y su absorción por el animal. <sup>(19)</sup>

## **2.4. COMPOSICIÓN DE LA DIETA**

Los ingredientes de origen vegetal son los componentes mayoritarios de las dietas para monogástricos y, por tanto, una fracción importante del P está presente como P fítico. Todos los factores relacionados con el metabolismo y absorción del P en el organismo, tales como los niveles de Ca y vitamina D, junto con aquellos factores que afecten a la eficacia de la actividad fitásica (endógena o exógena) pueden influir en el aprovechamiento del P de la dieta. <sup>(20)</sup>

## **2.5. VALORACIÓN DEL CONTENIDO DE P BIODISPONIBLE DE LAS MATERIAS PRIMAS**

Existen numerosos métodos para valorar la utilización del P de los alimentos por las distintas especies animales. Los primeros sistemas de valoración aceptaban que la biodisponibilidad del P de las materias primas de origen vegetal era del 30-35% en aves y porcino y del 100% en rumiantes y conejos. El sistema se basaba en considerar para todos los vegetales un contenido en P fítico del 70% y en admitir que como tal no podía ser asimilado por monogástricos. <sup>(20)</sup>

Paralelamente, estos sistemas asumían que el aprovechamiento del P para las materias primas de origen animal y los fosfatos minerales era del 100%. Teniendo en cuenta el amplio rango de variación del contenido en P fítico de las materias primas vegetales (0 a 90%), tal simplificación resultaba sin duda excesiva. La publicación de numerosos resultados y la inclusión de los valores de P fítico en las tablas de valoración de alimentos en los últimos años como se puede ver en el cuadro 2, permiten disponer hoy día de estimaciones más precisas del contenido en P no fítico de las materias primas. <sup>(21),(22), (23), (24)</sup>

## 2.6. HARINA DE PESCADO

Un gran número de países, las materias primas de origen animal, como la harina de pescado, juegan un papel muy importante en la formulación de dietas, suministrando aminoácidos (AA) esenciales a animales en etapa de desarrollo. La calidad de estas materias primas difiere grandemente entre lugares, origen y procedencia. Además, la digestibilidad y disponibilidad de los (AA) son influenciadas por la forma en que las harinas son preparadas, tecnológicamente tratadas y almacenadas. <sup>(24)</sup>

## 2.7. ALMACENAMIENTO DEL P EN EL TEJIDO ÓSEO

Dado que el 80% del P del organismo se almacena en el tejido óseo, la elección de parámetros relacionados con el desarrollo de este tejido (contenido en cenizas o resistencia del hueso a la rotura) parece apropiada. Además, las necesidades en P para conseguir la máxima mineralización ósea son mayores que las correspondientes a óptimos crecimientos o índices de conversión, lo que permite utilizar dietas experimentales con niveles de P y aumentar la precisión de las estimaciones. <sup>(19)</sup>

En aves, la consistencia ósea se estima valorando el contenido en cenizas de la tibia. En algunos casos, por su fácil ejecución, se ha recomendado su evaluación en el pico o en los dedos, aunque la precisión de las medidas es mayor cuando se usa la tibia. En cerdos la complejidad de las medidas es mayor y los huesos generalmente evaluados son el 3er y el 4º metacarpos y metatarsos. <sup>(25)</sup>

## 2.8. DIGESTIBILIDAD

Otro de los parámetros elegidos para valorar la utilización del P dietético es la digestibilidad, que depende fundamentalmente de los ingredientes utilizados y, en menor medida, de la forma de presentación y del valor nutritivo de la mezcla. En animales que consumen niveles de P apropiados a sus necesidades

metabólicas, una alta proporción (85-98%) del P digerido es retenido en el organismo. Por el contrario, cuando los niveles de P absorbido superan a las necesidades, se pone en marcha un mecanismo de control homeostático que incrementa la excreción del P en la orina. La utilización del P está, por tanto, estrechamente relacionada con la digestibilidad cuando se determina en animales que consumen niveles de P reducidos y lo más cercanos posible a sus necesidades metabólicas. <sup>(26)</sup>

Las materias primas de origen inorgánico, juegan un papel muy importante en la formulación de dietas animales en etapa de desarrollo. La calidad de estas materias primas difiere grandemente entre lugares, origen y procedencia. Además, la digestibilidad y biodisponibilidad son influenciadas por la forma en que las mezclas son preparadas, tecnológicamente tratadas y almacenadas. De acuerdo con esto, es necesaria una estimación precisa y cuantitativa de qué tanto, de cada nutriente, es retenido por el animal, para optimizar el crecimiento, reducir desperdicios de los nutrientes, incrementar la eficiencia alimenticia y reducir costos. Esta información necesita estar disponible antes de la producción de los alimentos balanceados. <sup>(26)</sup>

### **2.8.1. CÁLCULO DEL FÓSFORO RETENIDO COMO PORCENTAJE DE FÓSFORO CONSUMIDO**

La expresión matemática no indica el cálculo para determinar del fósforo retenido en el animal de estudio durante la evaluación biológica.

$$P \text{ retenido} = P \text{ Ingerido} - P \text{ en heces} - P \text{ en orina}$$

## 2.8.2. CÁLCULO DE RETENCIÓN NETA APARENTE (RNA) DE FÓSFORO EN EL ALIMENTO

La expresión matemática nos permite determinar la retención neta aparente en (%) en el animal durante una evaluación biológica para verificar si su absorción del mineral es eficiente.

$$\text{RNA (\%)} = \frac{\text{P Ingerido} - (\text{P Excretado en heces} + \text{P Excretado en orina})}{\text{P Ingerido}} \times 100$$

**Tabla 2.4:** Comparación de los valores de utilización del P (%) de fosfatos minerales según distintas fuentes, según Herpol y Van Grembergen (1967), Chesson (1987).

materiales	Aves		Cerdos		
	INRA (1994) P disponible	CVB (1998) P digestible	INRA (1994) P disponible	NRC (1998) P disponible	CVB (1998) P digestible
Fosfato monocálcico	100	85	100	100	83 (82,5-84,2)
Fosfato bicálcico 0H <sub>2</sub> O	85 (80-87)	55	-	-	64 (62,7-65,4)
Fosfato bicálcico 2H <sub>2</sub> O	93 (85-97)	78	90 (70-98)	95-100	70 (68,8-70,7)
Fosfato mono-bicálcico	95 (90-100)	79	-	-	82 (74,0-87,4)
Fosfato bisódico	98 (95-100)	91	100	100	87-89
Fosfato monoamónico	-	-	95	100	-
ácido fosfórico	-	-	100	-	-
Fosfato Ca-Mg-Na	98	-	-	-	81-85
Fosfato roca	60 (40-80)	-	-	40-60	-
Fosfato roca defluorinado (calcinado)	85 (80-90)	-	90	85-95	-
Harina de huesos	85 (80-90)	62	80 (60-95)	80-90	74

## 2.9. MATERIAS PRIMAS DE ORIGEN MINERAL: FOSFATOS

El aprovechamiento del P de las fuentes minerales en alimentos está directamente relacionado con su solubilidad en el medio ácido digestivo. Así, todas las fuentes coinciden en asignar valores superiores de utilización del P a los fosfatos monosódicos o monocálcicos que a las sales cálcicas o magnésicas y a las formas hidratadas frente a las anhidras. Cuando los valores de biodisponibilidad propuestos por INRA (Alimentación de animales monogástricos, 1989) y NRC (Requerimiento de nutrientes en la pollería, 1998) son similares a los del CVB (Sistema interno del Fósforo Disponible para la pollería, 1998) para los fosfatos monosódicos, monocálcicos y fosfatos naturales. <sup>(24)</sup>

## 2.10. IMPORTANCIA DE LOS ANIMALES DE LABORATORIO

En la actualidad el animal goza de autentica prioridad en los campos de la experimentación. Es un roedor dócil, cariñoso, que se deja manipular fácilmente, su hocico es puntiagudo, el cuerpo alargado y la cola larga recubierta de escamas. Su producción es de bajo costo, satisface un amplio rango de procedimientos en las investigaciones. Por todo esto hacen de la rata un sujeto ideal para experimentación. <sup>(27)</sup>

### 2.10.1. RATA WISTAR

Wistar albina, de cabeza ancha, con la cola mas corta que su cuerpo de orejas largas, resistente a ciertas enfermedades respiratorias pero menos prolíficas. Tiene un papel muy importante en las investigaciones de la nutrición en áreas afines a esta, por ejemplo estudios de metabolismo y la acción de vitaminas, hormonas, toxicología y farmacología. <sup>(27)</sup>

### 2.10.2. ALIMENTACIÓN Y AGUA

El alimento es elaborado comercialmente de acuerdo los requerimientos nutricionales de la rata y por lo general fabricado en forma de pellets. La calidad del alimento balanceado depende básicamente de su valor nutricional y de las condiciones de preservación. Un alimento administrado ad libitum debe renovarse dos veces por semana. Una rata consume una media de 5 g de alimento diariamente por cada 100 g de peso vivo. El agua debe ser fresca, potable y cambiada diariamente. <sup>(27)</sup>

### 2.10.3. MANIPULACIÓN Y SUJECCIÓN

En caso de experimentación, es aconsejable no manipular a la rata hasta que el equipo un material que vaya utilizarse este listo. Esto con el fin de evitar que el animal entre en tensión o estrés por un continuo manejo y pueda morder al manipulador. En caso de que el animal vaya a ser utilizado en una experimentación se recomienda manipular diariamente para que sea un poco más dócil y se acostumbre al manejo. <sup>(27)</sup>

### 2.10.4. CONTROL DE CALIDAD DEL AMBIENTE

Todo ser vivo requiere condiciones bióticas adecuadas a sus funciones vitales, un medio ambiente desfavorable puede colocar a los animales en condiciones de estrés, falseando mucho los resultados en la experiencia en desarrollo, es importante mantener estables los siguientes factores:

**Estabilidad:** No deben ocurrir cambios bruscos y extremos en el ambiente

**Iluminación:** los periodos de oscuridad y de luz establecen en una pauta, los periodos de luz-oscuridad proporcionados dependen de la ciclicidad reproductiva

de cada especie ya que varían entre 10 y 14 horas, estos son regulados con aparatos especiales.

**Temperatura y humedad:** la temperatura óptima para el alojamiento de los animales se encuentra generalmente dentro de la zona de termoneutralidad (rango ambiental dentro el cual se mantiene la temperatura corporal con un mínimo de actividad metabólica) o ligeramente inferior a esta.

**Tabla 2.5:** Rangos de temperatura (T) y humedad relativa (HR) aceptables, (Según la Asociación para el Estudio de Animales de Laboratorio, 1990)

Rangos de temperatura y humedad relativa aceptables		
Especie	T (°C)	HR (%)
Ratón	20-24	50-60
Rata	18-24	40-55
Hamster	20-24	45-55

**Cambio de aire:** El propósito de la ventilación es proveer al animal de sus requerimientos de oxígeno y calor así como remover los productos residuales propios de la respiración, recomendable el aire 100% fresco no recirculado.

**Ruido:** el ruido es indeseable porque afecta de manera adversa a los animales y al personal. <sup>(27)</sup>

La tabla 2.6 y 2.7 muestra los requerimientos nutricionales y minerales de la rata para un crecimiento óptimo del animal.

**Tabla 2.6:** Tabla de requerimientos nutricionales para la rata (Según la Asociación para el Estudio de Animales de Laboratorio, 1990)

Requerimientos nutritivos para la rata	
Proteína (Como proteína ideal)	12%
Grasa	5%
Energía	380-400 Kcal

**Tabla 2.7:** Tabla de requerimientos nutricionales para la rata (Según la Asociación para el Estudio de Animales de Laboratorio, 1990)

Minerales	Cantidad
Calcio	0.50 %
Magnesio	0.04 %
Fósforo	0.40 %
Sodio	0.05 %
Cobre	5.00 %
Flúor	1 mg/kg
Iodo	0.15 mg/Kg
Hierro	35 mg/Kg
Zinc	15 mg/Kg

## 2.10.5. PROCEDIMIENTOS CLÍNICOS

### 2.10.5.1. COLECCIÓN DE HECES Y ORINA

Para la colección de orina se ocupan cajas metabólicas que se pueden encontrar en el mercado o fabricarlas, las cuales colectan tanto orina como heces fecales. <sup>(27)</sup>

## 2.11. DISEÑO COMPLETAMENTE ALEATORIO (DCA).

Se asume unidades experimentales (UE) uniformes u homogéneas, de forma tal que las diferencias encontradas en la variable respuesta sean atribuibles al efecto de los tratamientos asignados. Los tratamientos son asignados a las UE de forma completamente aleatoria de manera que cada UE tenga la misma probabilidad de recibir cualquiera de los tratamientos en estudio. <sup>(28)</sup>

## 2.12. REACTIVIDAD DE LAS ROCAS FOSFÓRICAS

La reactividad concierne a la prontitud con la cual una sustancia reacciona bajo un cierto ambiente técnicamente importante. El interés se concentra en la reacción de las rocas fosfóricas a una variedad de reactivos, por otra parte cuando la roca se aplica directamente a la tierra, la atención se enfoca directamente a su reacción respecto al ambiente de la tierra. Finalmente deberán mencionarse los disolventes usados en pruebas de laboratorio de la calidad de fosfato en una solución de ácido clorhídrico 0.4%, citrato de amonio neutro y de ácido cítrico al 2%. <sup>(29)</sup>

El nivel de reactividad de fosfatos en el mercado, disponibilidad en lenguaje comercial, es una medida para propósitos de control de calidad utilizando una prueba de laboratorio aceptable. Determinación de la solubilidad en un disolvente elegido de acuerdo con un procedimiento estándar. <sup>(29)</sup>

Con respecto al fósforo los resultados son expresados en % de P en la muestra para un tiempo determinado de extracción y pueden ser interpretados como reactividades, los resultados de este tipo nos permitirán una clasificación aproximada de roca cruda, calcinada y comercial como un nivel probable de reactividad. <sup>(30)</sup>

### 2.12.1. PULVERIZACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA

Antes de que la roca fosfórica pueda ser usada, deben ser finamente pulverizadas para que se pueda obtener una reacción completa dentro los límites prácticos. Por lo tanto la óptima selección del pulverizado tiene una importante influencia sobre el material en bruto, así como las características físicas y químicas del producto. La experiencia en la aplicación de rocas fosfatadas pulverizadas en mallas 150 a 200 muestra niveles de reactividad óptimos. <sup>(30)</sup>

### 2.12.2. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA ROCA FOSFÓRICA

Los fosfatos pueden ser hechos por varios procesos que comprenden el calentamiento de la roca fosfórica a altas temperaturas bajo el punto de fundición del material o pueden incluir la fusión. Estos se llaman procesos de desfluorinización porque el desprendimiento del flúor de la roca es fundamental para la química de tales procesos. <sup>(30)</sup>

Se ha conseguido eliminar del fosfato natural más de 95% de flúor en experimentos de laboratorio. Se calentó en un horno eléctrico a 1400 °C, en presencia de vapor de agua, una carga finamente pulverizada. Más del 80% de fósforo se hizo soluble en los diferentes solventes. <sup>(29)</sup>

La preparación de los fosfatos que se obtienen de la roca fosfórica depende de la destrucción de la estructura de la apatita mineral y su reemplazo por un compuesto más soluble. <sup>(30)</sup>

El tratamiento a alta temperatura de la apatita procede en dos etapas:

- ◆ Un reemplazo isomorfo de los iones de flúor con hidroxilos.
- ◆ Convertir la hidroxiapatita en fosfatos de calcio.

En este proceso se obtiene una desfluorinización casi completa y la formación de fosfato soluble en ácido cítrico y clorhídrico cuando se llega a una temperatura de 1400°C bajo las siguientes condiciones:

- ◆ Un tamaño de partícula en malla #200.
- ◆ Un tiempo de calentamiento mínimo de 30 min.
- ◆ Vapor de agua dentro el horno
- ◆ Un enfriado rápido del material a la salida del horno.

La composición de fosfatos calcinados fue estudiada e identificaron el  $\alpha$ -fosfato tricálcico que es más soluble. <sup>(30)</sup>

### 2.12.3. EFECTO EN LA SOLUBILIDAD DE LA ROCA FOSFÓRICA POR PRESENCIA DE FLÚOR.

La disponibilidad de P disminuye cuando aumenta el contenido de flúor, señala que es de gran importancia el contenido de flúor en la Roca Fosfórica este no debe sobrepasar el 5 %. El flúor en la roca fosfórica reduce la asimilabilidad del P y por esta razón se trata de producir fosfatos desfluorados. La presencia de flúor ocurre en la forma natural en la roca fosfórica e influye grandemente en la disponibilidad del P para los animales. El rango establecido para el contenido de flúor en la roca fosfórica es de 0.1 a 0.2 %. <sup>(30)</sup>

### 2.12.4. INTOXICACIÓN POR FLÚOR (FLUOROSIS)

**Causa:** Ingestión de cantidades excesivas de flúor a través de los alimentos aire agua o combinación de estos.

**Síntomas:** Anormalidades dentarias (manchas en el esmalte) y óseas (huesos abultados y blandos, rigidez articular perdida del apetito, disminución de la secreción láctea, diarrea y hambre de sal.

**Tratamiento:** las lesiones pueden ser permanentes pero los animales que no presentan síntomas graves pueden beneficiarse hasta cierto punto si se elimina el exceso de flúor.

**Prevención:** Suspender el uso de alimentos, agua o suplementos minerales que contengan exceso de flúor.

Observaciones: el flúor es un veneno acumulativo, el fosfato de roca contiene alrededor de 2-4% (20000-40000 ppm) de flúor. <sup>(31)</sup>

## **2.13. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LA ROCA FOSFÓRICA**

La roca fosfórica contiene uno o más compuestos fosfáticos de los cuales el fosfato tricálcico se constituye como el más importante para su aprovechamiento, que puede ser utilizado directamente o a través de un beneficio posterior. <sup>(32)</sup>

Según estudios mineralógicos de los filones fosfáticos de origen sedimentario o fosforitas, se ha identificado a la francolita o colofana de carácter amorfo (un carbonato de fluorapatita) como el mineral de valor comercial. Este mineral está ligado a impurezas o ganga tales como la limonita, sílice, calcita, dolomita y otros. <sup>(32)</sup>

El color de los óvulos presenta una variación de pardo oscuro a gris oscuro, y las placas de ligeramente blanquecinos a gris oscuras con brillo nacarado. <sup>(32)</sup>

### **2.13.1. GRUPO DE APATITO**

Los miembros de este grupo forman dos series la del apatito y la piromorfita. Estos minerales son isoestructurales y dan lugar a extensas soluciones sólidas de sustitución entre los miembros de cada serie, pero solo limitadas entre los de una serie y otra. El volumen de la celda unidad es en las piromorfitas 1/5 mas grande que los apatitos.

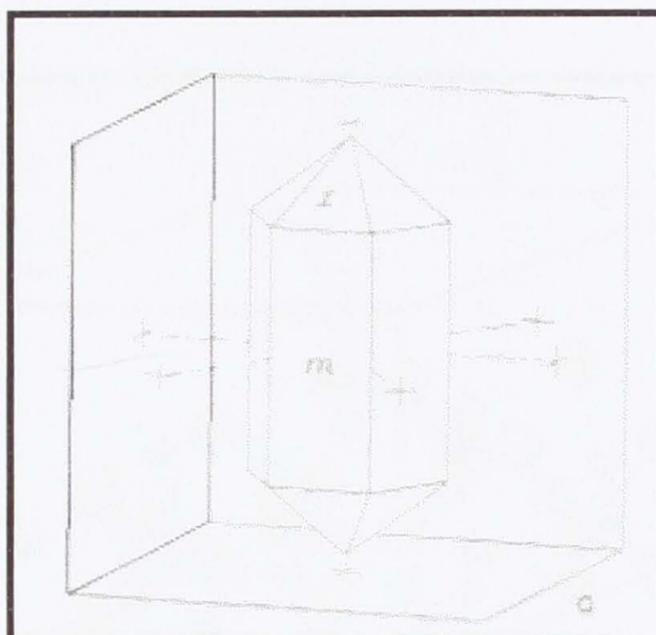


Figura 2.5: Sistemas isoestructurales de la apatita (Según Berry, 1968)

Tabla 2.8: Variedades del apatito, (Según Berry L.G., Manson, 1968).

Fluorapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$
Clorapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Hidroxiapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
Carbonato-apatito	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_3(\text{CO}_3)\text{H}_2\text{O}$

El calcio aparece sustituido en la serie del apatito por estroncio, manganeso, Cerio y en menor extensión por sodio. <sup>(32)</sup>

### 2.13.2 APATITO, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$

Sistema cristalino: Hexagonal

Clase de simetría: 6/m

Relación áxica:  $a=1$ ;  $c=0.735$

Celda unidad dimensiones:  $a=9,38$ ;  $c=6,89$ ; contenido:  $Z=2$

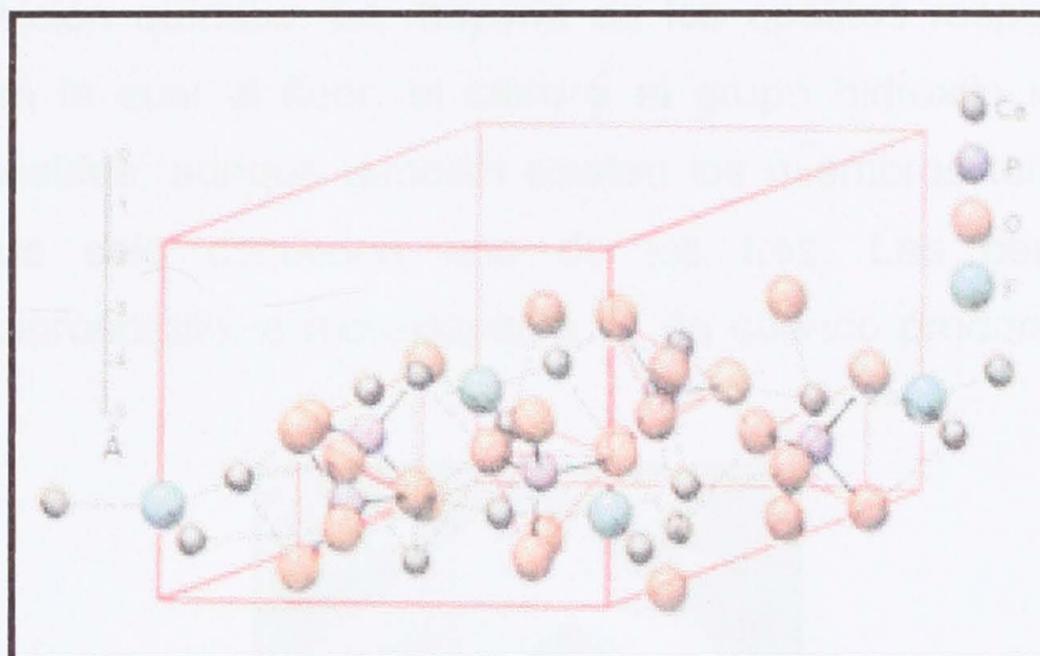


Figura 2.6: Red cristalina de la hidroxiapatita. (Según Berry, 1968)

Los cristales presentes en las calizas cristalinas y en rocas ígneas suelen ser prismas cortos o largos según  $c$ . Los cristales de origen hidrotermal de las pegmanitas y venas por lo general son tubulares gruesos. Las figuras de corrosión y los lauediagramas indican claramente la simetría  $6/m$ . Es común que se presente en masa, de grano grueso hasta compacto y a veces globular, reniforme, estalactítica, terrosa y eolítica. <sup>(32)</sup>

Exfoliación: Poco clara según  $\{0001\}$

Fractura: Concoide irregular

Tenacidad: Frágil

Dureza: 5

Densidad: 3,1-3,2

Color: Verde, verde azulado y grisáceo, y también azul, violeta, incoloro, pardo o rojo.

Raya: Blanca

Brillo: Vítreo.

Grado de opacidad: De transparente a opaco.

Composición química: La mayoría de los apatitos responde a la fórmula dada antes, en la cual el fluor, el cloro y el grupo hidroxilo se encuentran en cantidades variables, aunque también existen los miembros terminales puros de las series que solo contienen uno de los tres. Las denominaciones de fluorapatitos, cloroapatito, e hidroxiapatito se da cuando predomina uno de ellos.  
(32)



**Figura 2.7: Identificación del cristal de apatita basado en un análisis EDX.(20 a 30  $\mu\text{m}$ )  
(Según Berry L.G., Manson, 1968).**

## **2.14. ROCAS SELECCIONADAS CON ALTO CONTENIDO DE % FÓSFORO**

En este tipo de material se tiene después del lavado y cribado el mineral contiene la mayor cantidad de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , este se encuentra en forma de nódulos rocosos la selección de la roca es de forma manual. Al escoger una roca hay que tomar en cuenta su contenido de  $\text{P}_2\text{O}_5$  y su análisis químico en general, su tendencia a reaccionar. Podemos nombrar las siguientes rocas fosfóricas que seleccionan sus materias primas como se observa en la tabla 2.4. <sup>(30)</sup>

**Tabla 2.9:** Roca seleccionada con alto contenido de % de fósforo, (según Chemistry Research, London, Dept. of Scientific and industrial Research, H. M. Stationary Office, 1952).

Roca fosfórica	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Total	% P Total
Roca Marruecos	33,3	14,54
Roca Gafsa	29,0	12,66
Roca Safi	32,4	14,15
Roca Nauru	39,1	17,07
Roca Ocean Island	39,4	17,20
Roca de Florida	35,3	15,41
Roca Calcareo del Senegal	37,5	16,37
Roca Kola	39,0	17,03
Roca de Palabora y Sukulu	35,0	15,28
Roca de Capinota de Bolivia	35,8	15,62

#### 2.14.1. ESCALAS DE REACTIVIDAD PARA LAS ROCAS FOSFÓRICAS

La reactividad concierne a la prontitud con la cual una sustancia reacciona bajo un cierto ambiente técnicamente importante. El interés se concentra en la reacción de la roca fosfórica a una variedad de reactivos. Finalmente deberán mencionarse los disolventes usados en pruebas de laboratorio de la calidad de fosfato fertilizante, solución de citrato de amonio neutro, acetato de amonio y solución al 2% de ácido cítrico. <sup>(30)</sup>

#### 2.14.2. INFLUENCIA DEL ÁREA SUPERFICIAL

La mayoría de las rocas fosfóricas, son apatitas criptocristalinas, constituyendo agregados porosos de granos muy pequeños y consecuentemente, una partícula de la roca molida posee un área total de superficie más grande que el área de su superficie geométrica. <sup>(30)</sup>

Los resultados típicos se reproducen en la tabla 2.9. Estas cifras son para compararse con la superficie geométrica dada en una anotación de la tabla. En caso de la roca de Túnez el área de superficie medida en la fracción de malla 100 a 150 es casi 1300 veces la superficie geométrica. La apatita un material de mucho mas baja porosidad. <sup>(30)</sup>

**Tabla 2.10:** Variación del área de superficie de la roca fosfatada en malla 100-150.  
(Según Hhill, W.I. Caro, J.H.y Wieczorek, 1954)

Niveles de área de superficie	Variedad de orígenes de fosfatos	Área específica (m <sup>2</sup> /g)
A	Apatita	0,6
B	Roca de Idaho color oscuro	3,0
	Roca de Curacao	3,6
C	Roca de tierra South Carolina	6,5
	Roca café de Tennessee	6,8
	Roca redonda de Florida	10,3
D	Roca Túnez	19,4

### 2.14.3. INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA

El grado de fluorinación permite una base para la división de los fosfatos naturales semejantes a la apatita en dos amplios grupos. Por una parte están los materiales altamente fluorinados, como la roca fosfatada de la mayoría de los depósitos continentales y apatita por la otra, materiales que llevan cantidades mucho más pequeñas de flúor, como fosfato de hueso y de Curacao. La comparación productos de solubilidad de fluorapatita e hidroxiapatita indica que el tamaño de grano y otros factores siendo los mismos, los materiales en el último grupo son mas reactivos que en el primero. Esta circunstancia se ilustra por las reactividades medidas que se presentan después de la roca de Túnez y hueso vaporizado. La fluorinación de la apatita sobre cierto grado crítico, terminando

quizá aproximadamente a la mitad de la equivalencia del fósforo, tiene un efecto poco aparente en su reactividad intrínseca. <sup>(30)</sup>

**Tabla 2.11:** Grados de fluorinación y carbonatación de fosfatos naturales (Según Hhill, W.I. Caro, J.H. y Wieczorek, 1954)

Nivel de reactividad	Variedad u origen del fosfato	F : P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> % Peso	CO <sub>2</sub> : P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> % Peso	Área de superficie (m <sup>2</sup> /g)
A	Apatita	0,072	0,002	0,6
	Formula de la fluorapatita	0,089	-	-
B	Roca café de Tennessee	0,106	0,037	6,8
C	Roca De Idazo	0,103	0,055	3,0
	Roca redonda de Florida	0,105	0,06	-
D	Roca de Carolina del Sur	0,137	0,177	6,5
	Roca de Túnez	0,120	0,194	19,4

El encontrar que el grado de carbonatación es un índice superior de la calidad nutritiva de fosfatos altamente fluorinados proviene de la experimentación agronómica, mientras que el área de superficie observada para seguir el grado de carbonatación como un determinante de reactividad en este respecto. <sup>(30)</sup>

#### 2.14.4. REACTIVIDAD

El valor ideal, o límite de reactividad puede solamente obtenerse permitiendo que una parte muy pequeña de la muestra se disuelva en el volumen grande de disolvente. De otra manera, los productos de la reacción se formarán una concentración que retarda la reacción y conduce a un resultado muy inferior. A mayor numero de malla (finura) mayor el área superficial por ende mayor reactividad por el numero de puntos activos de reacción en el solidó.

### 2.14.5. REACTIVIDAD Y SOLUBILIDAD

El nivel de reactividad de fosfatos en el mercado disponibilidad en lenguaje comercial, es una medida para propósitos de control de calidad utilizando una prueba de laboratorio aceptable. Determinación de la solubilidad en un disolvente elegido de acuerdo con un procedimiento estándar. En los Estados Unidos el disolvente especial es la disolución de citrato de amonio neutro, en otros países lo indicado es la solución de ácido cítrico al 2% para ciertos materiales. En uno u otro caso, un peso estándar de material se digiere con un volumen medido de disolvente a una temperatura establecida por un tiempo especificado y la cantidad de fósforo disuelta se determina mediante un análisis adecuado. <sup>(30)</sup>

Con respecto al fósforo los resultados son expresados en unidades de reactividad, % de  $P_2O_5$  en la muestra para un tiempo determinado de extracción y pueden ser interpretados como reactividades, no obstante como el procedimiento convencional hace hincapié en “¿Cuánto?” en vez de “¿Cuánto tiempo?”, la duración de la prueba es demasiado larga para una buena aproximación del valor límite de la reactividad. Sin embargo los resultados de este tipo nos permitirán una clasificación aproximada de rocas típicas como un nivel probable de reactividad en la forma que se indica en la tabla 2.11. <sup>(30)</sup>

**Tabla 2.12:** Diversas Variaciones de reactividad de roca en disolventes fertilizantes, (Según Hhill, W.I.Caro, J.H.y Wieczorek, 1954)

Nivel de Reactividad	Variedad u origen de Fosfato	Reacción P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> de criba 100 en:	
		Citrato de amonio (%/h)	Ácido cítrico (%/0,5h)
A	Apatita	7,6	11,5
B	Roca redonda de Florida	2,0	18,9
	Roca de Idazo	7,8	21,8
	Roca café de Tennessee	6,1	24,1
C	Roca de Carolina del Sur	17,2	27,0
	Fosfato de Curacao	14,8	38,8
D	Roca de Túnez	20,0	37,8

La experiencia en la aplicación de las pruebas a rocas fosfatadas enseña que en las diferencias entre grados de grupo son reales y reproducibles. En esta forma parece que los materiales de criba 100 muestran cuatro niveles de reactividad con respecto a la solución de citrato de amonio. <sup>(30)</sup>

Cuando el disolvente es el ácido cítrico los valores son mas elevados, pero los grupos identificados persisten y muestran casi el mismo nivel relativo de reactividad. Los resultados apoyan la opinión de que el ácido cítrico es el mejor reactivo para diferenciar las reactividades de la roca. <sup>(30)</sup>

#### 2.14.6. ESCALA DE REACTIVIDAD

En las tablas anteriores se detallan los resultados obtenidos con siete variedades de roca fosfatada usando seis medidas independientes de reactividad. Los grados de los varios tipos de roca deducidos anteriormente de los resultados obtenidos con las pruebas respectivas se resumen en la tabla 2.12. Una característica obvia y tal vez también inesperada del resumen, es la forma tan parecida en que aparecen los grados de grupo. Esta consistencia de grados con

diversas pruebas, indica la importancia de la reactividad como una propiedad de los minerales fosfatados tal como se muestra en la tabla 2.13. <sup>(30)</sup>

**Tabla 2.13:** Diversos niveles de reactividad de roca indicados por diferentes procedimientos va en orden ascendente, (Según Armiger, W. H., 1957).

Tipo u origen de fosfato	Clasificación de grupo por las pruebas respectivas			
	Ácido cítrico	Citrato de amonio neutro	Superficie Especifica	Carbonatación
Apatita	A	A	A	A
Roca café de Tennessee	B	B	C	B
Roca de Idazo	B	B	B	C
Roca redonda de Florida	B	A	-	-
Roca de Carolina del Sur	C	C	C	D
Fosfato de Curacao	D	C	B	D
Roca de Túnez	D	D	D	D

La apatita es de todas, la menos reactiva, mientras que la roca de Túnez es siempre la más reactiva. La roca de Tennessee perdió la clasificación B solamente una vez; la roca de Idazo, dos veces. La roca redonda de Florida más reactiva está en el grupo C en cuatro de las seis pruebas. La tabla se muestra una escala de prueba de rocas. <sup>(30)</sup>

**Tabla 2.14:** Escala de reactividad para la roca fosfatada es de orden ascendente, (Según Armiger, W. H., 1957).

Nivel de Reactividad	Variiedad de fosfato
A	Apatita, macrocristalina
B	Roca café de Tennessee
C	Roca redonda de Florida
D	Roca de Túnez
E	Alimento de hueso vaporizado

El hueso vaporizado es un ejemplo típico de un alto nivel de reactividad más allá del grado de la roca fosfatada. Las cinco muestras de las cinco variedades de roca representan puntos de calibración en la escala.

Dos condiciones imparten carácter tentativo a esta escala. En primer lugar, los procedimientos de la prueba para la reacción con disolventes no fueron propiamente planeados para la medición precisa de la reactividad. El largo período de contacto de la muestra con el disolvente opera como un defecto para los materiales más reactivos. En segundo lugar, los patrones de diferencia no pueden obtenerse por distribución, de modo que pueden ser reproducidos los puntos de calibración en otros laboratorios. No obstante, el desarrollo ordenado de una escala de prueba demuestra la factibilidad de establecer una escala estándar de reactividad para roca fosfatada. <sup>(30)</sup>

## 2.15. LIXIVIACIÓN.

Lixiviación es el retiro de una fracción soluble en forma de solución a partir de una fase permeable e insoluble con que se asocia. La separación implica, por lo común, la disolución selectiva, con difusión o sin ella; pero en el caso simple, consiste en el desplazamiento (con cierta combinación) de un líquido intersticial por otro con el que es inmiscible. <sup>(33)</sup>

La lixiviación también es conocida como extracción, extracción sólido-líquido, percolación, infusión, lavado, y decantación por sedimentación que son algunos de los nombres que ha recibido con el tiempo y en sus diferentes aplicaciones. <sup>(8)</sup>

El mecanismo de la lixiviación puede incluir una solución física simple o la disolución facilitada por una reacción química. La velocidad de transporte de disolventes en la masa que se va a lixiviar o de la fracción soluble en el disolvente

o la solución de extracto del material insoluble, o algunas combinaciones de esas velocidades pueden ser importantes. Es posible que haya una resistencia membranosa. Así mismo, una reacción química puede afectar a la rapidez de la lixiviación. <sup>(33)</sup>

## **2.16. TECNOLOGÍA DE PROCESOS TÉRMICOS**

### **2.16.1. HORNO ROTATORIO**

El horno rotatorio tiene la ventaja principal con respecto a otros (vertical y los tradicionales), una producción continua, el tamaño de grano ofrece mayor superficie específica de contacto con el material con la energía calorífica, tiene una producción de calidad uniforme, existe menor consumo de energía calórica (partículas finas). <sup>(34)</sup>

El horno rotatorio fue diseñado y construido por Frederik Ransome para la introducción en la industria de cemento en Inglaterra por el decenio de 1.880 a 1.890. <sup>(34)</sup>

El horno que fue diseñado por Mr. Ramsome era calentado por gas ya que por entonces no se conocía la calefacción por carbón; luego se utilizó la calefacción por petróleo y por ultimo la calefacción por carbón y esta última fue la que predominó. <sup>(34)</sup>

## Partes del Horno Rotatorio

1. Aros de Rodadura
2. Rueda Dentada
3. Moto reductor
4. Chimenea
5. Bases

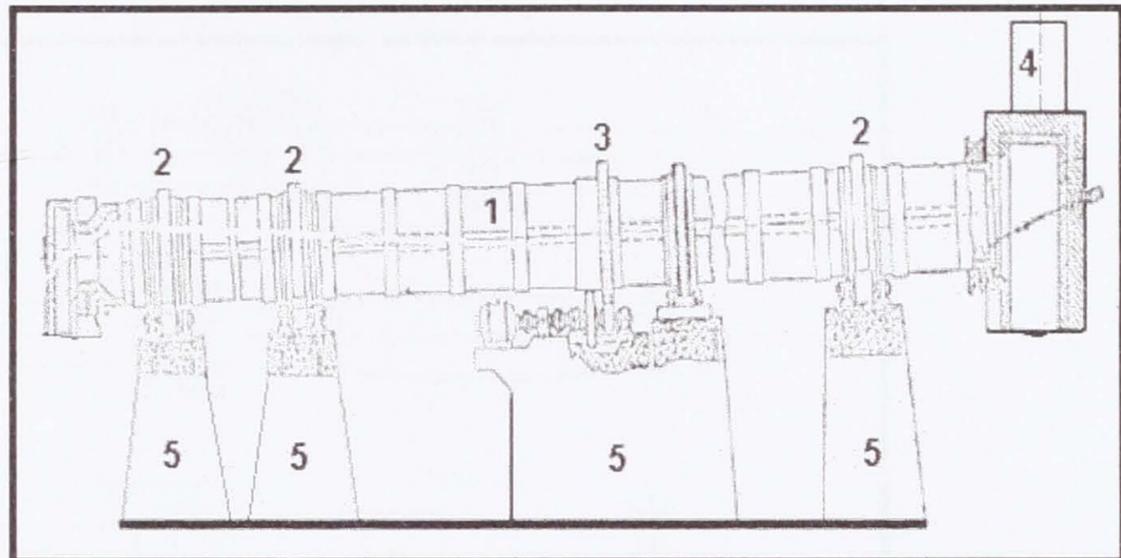


Figura 2.8. Esquema de horno rotatorio, (Según Waganoff N.P, (1972).

### 2.16.2. TIPOS DE HORNO ROTATORIO

Existen diversos tipos de cilindros (chapa de acero) para hornos rotatorios, que se describe a continuación:

- A. Horno rotatorio con diámetro unitario.
- B. Horno rotario con zona de sinterización ensanchada.
- C. Horno rotario con zona de calcinación.
- D. Horno rotario con zona de sinterización y calcinación ensanchada.
- E. Horno rotario con zonas de desecación, calcinación y sinterización ensanchadas (vía húmeda).
- F. Horno rotario de desecación o precalefacción ensanchadas (horno largo vía seca o vía húmeda).<sup>(35)</sup>

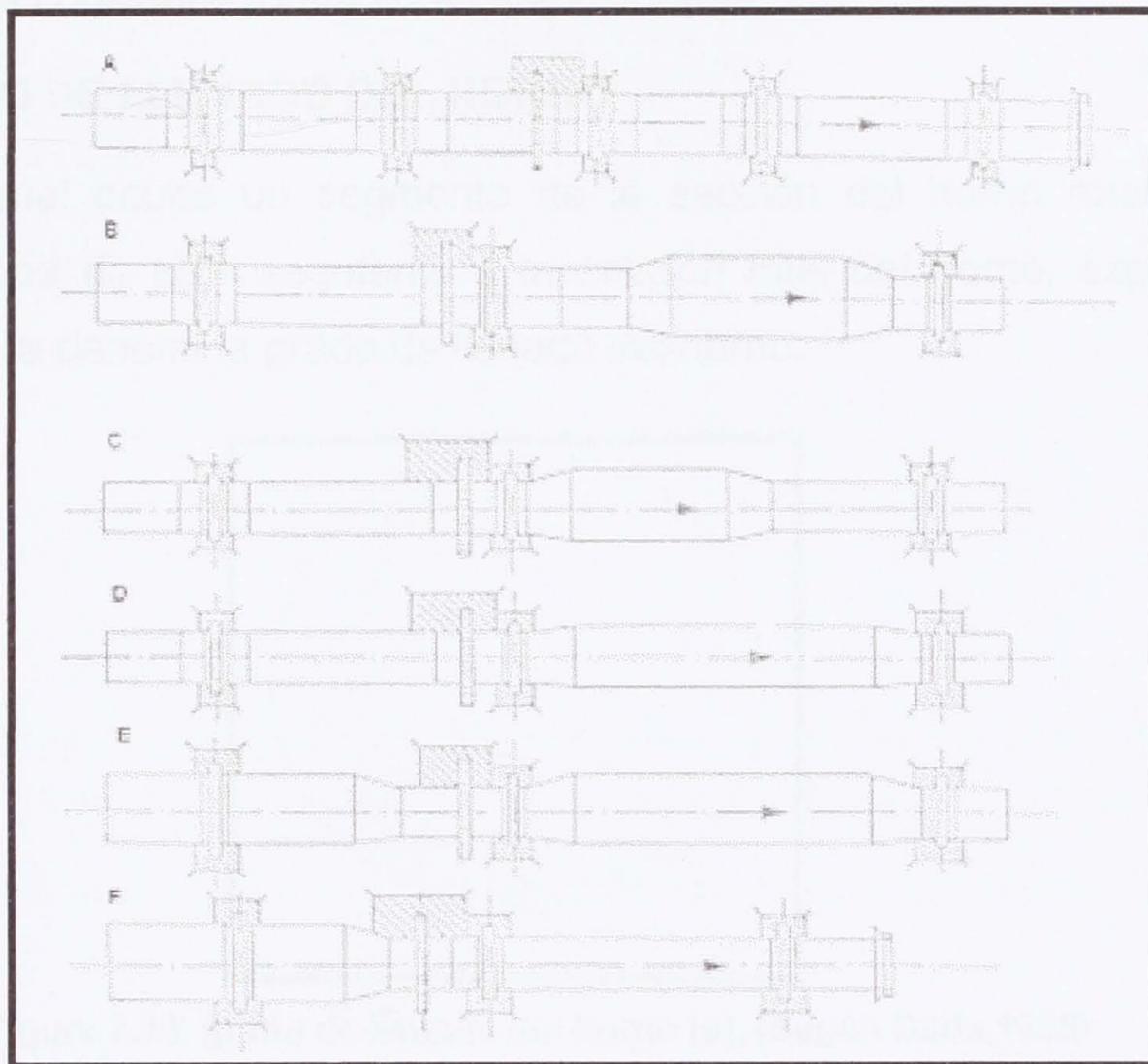


Figura 2.9. Tipos de hornos rotatorios (Según Duda, 985).

### 2.16.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El revestido del material refractario de las zonas de transición es sumamente complicado costoso en el trabajo humano, por lo tanto exige configuraciones especiales para los ladrillos. Una forma especial desfavorable, bastante corriente, presenta estrechez en la zona de salida del horno. <sup>(35)</sup>

Tanto la experiencia práctica como las consideraciones teóricas han llegado a la conclusión de que la forma mas favorable para el horno es aquella en que se han eliminado las ampliaciones a los estrechamientos de la sección. Los hornos rotatorios dotados con intercambiador de calor muestran ya, en todas partes, de

sección unitaria, porque es fácil la construcción y fácil revestimiento del horno con los ladrillos refractarios, por lo tanto, el diseño será para un horno de sección unitaria, por las consideraciones antes mencionadas. <sup>(35)</sup>

#### 2.16.4. GRADO DE LLENADO DEL HORNO

El material ocupa un segmento de la sección del horno rotatorio. A la relación del área de este segmento a la sección total del horno, expresada en porcentaje, se la denomina grado de llenado del horno.

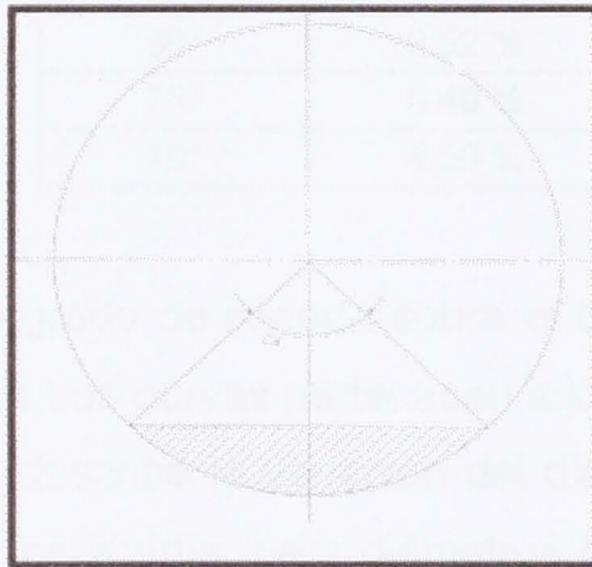


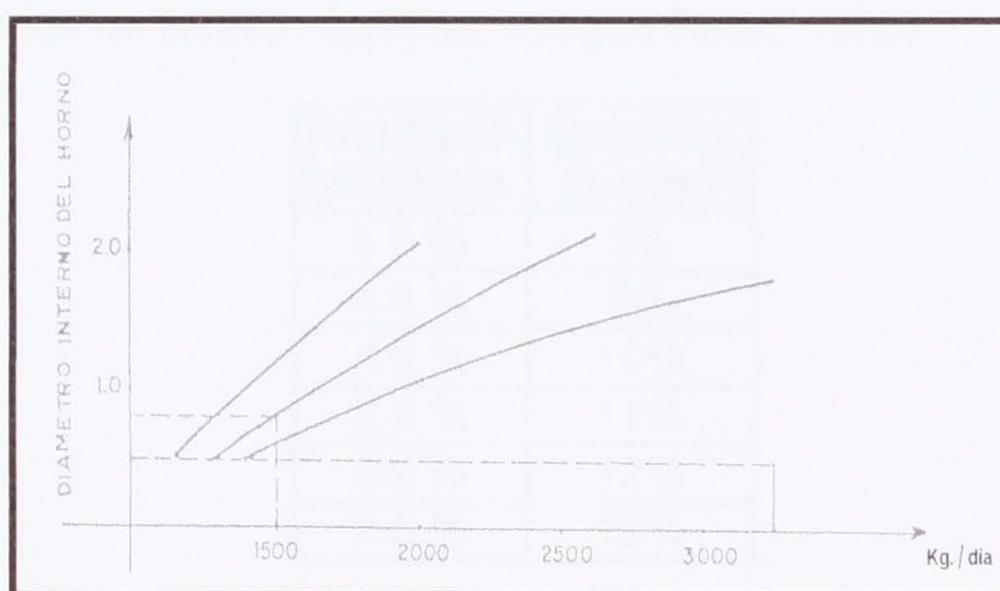
Figura 2.10. grado de llenado del horno ( $\alpha$ ), (Según Duda,1985)

El grado de llenado varía entre los siguientes límites, de 5 a 17 %. Esto en la forma independiente del diámetro del horno el grado de llenado (F), expresado en función del ángulo central, ( $\alpha$ ) del segmento ocupado por el material se indica el siguiente cuadro. <sup>(35)</sup>

**Tabla 2.15:** Se muestra el ángulo central ( $\alpha$ ) y el llenado del horno (F), (Según Duda, 1985).

Angulo central ( $\alpha$ )	Llenado del horno (F)
110°	15.65 %
105°	13.75 %
100°	12.10 %
95°	10.70 %
90°	9.09 %
85°	7.75 %
80°	6.52 %
75°	5.40 %
70°	4.50 %

La importancia del grado de llenado sobre el caudal del horno rotatorio se muestra en la Fig.2.13, las tres curvas pertenecen a los grados de llenado de 7 %, 10 %, y 13 %, cada una describe la variación del diámetro del horno en metros, como función del caudal, en Kg/día, para diámetros que van desde 0.5 hasta 2.0 metros. <sup>(35)</sup>



**Figura 2.11. Grados de llenado, (Según Duda, 1985)**

### 2.16.5. PENDIENTE DEL HORNO

No existe ninguna regla válida que establezca la pendiente de los hornos rotatorios. Su valor varía entre los 2 a 6 %. Pero la mayor parte de los hornos se hallan instalados entre 2 a 4 % con respecto a la horizontal. <sup>(35)</sup>

Aún principio en la construcción de hornos rotatorios mostraban elevadas pendientes y una reducida velocidad angular de unas 0.5 a .75 vueltas/minuto. Las pendientes pequeñas necesitan velocidades mas elevadas. Por lo tanto, esto ofrece la ventaja de favorecer la mezcla del material y origina un intercambio de calor mas intenso. También si la inclinación es pequeña se llega a un grado de llenado mucho más alto. Como producto de la experiencia de los diseñadores y constructores de los hornos rotarios se ha llegado a establecer en la siguiente tabla 2.13, que las pendientes de los hornos que se muestran a continuación representan los grados de llenado logrados como óptimos. Se toma una pendiente de 5 % para hornos rotatorios de hasta 2.8 metros de diámetro. <sup>(35)</sup>

**Tabla 2:16:** Grados de llenado óptimos, (Según Duda, 1985).

Pendiente del horno	Grado de llenado
5.0 %	8%
4.5 %	9%
4.0 %	10%
3.5 %	11%
3.0 %	12%
2.5 %	13%

En la explotación práctica del horno, el grado de llenado no debe exceder del 13 %, puesto que los valores superiores dificultan la transmisión de calor. <sup>(20)</sup>

La tangente del ángulo que es la pendiente se expresa en porcentaje, con lo que la tangente  $45^\circ = 100\%$ .

$$\text{tag. } 45^\circ = 1$$

$$100\% \text{ _____ } 1$$

$$4\% \text{ _____ } X$$

$$X = 0.04$$

$$\alpha = \text{arc. tag. } X$$

$$\alpha = \text{arc. Tag. } 0.04$$

$$\alpha = 2.2906^\circ$$

### 2.16.6. VELOCIDAD ANGULAR DEL HORNO (NUMERO DE VUELTAS)

Antes los diámetros de los hornos eran de 2 a 3 metros, por lo cual la velocidad se expresaba de un modo más general por el número de vueltas del horno. Sin embargo en la actualidad por la existencia de hornos de 6 metros o quizás más de diámetro, la velocidad del movimiento rotatorio se expresa por la velocidad tangencial en vez de hacerlo por el número de vueltas. Para la explotación económica del horno rotatorio se utilizan velocidades tangenciales de 30 a 40 centímetros/segundo. En la Fig. 2.12 se muestra el gráfico de número de vueltas, tomando en base una velocidad tangencial de 40 centímetros/segundo. <sup>(35)</sup>

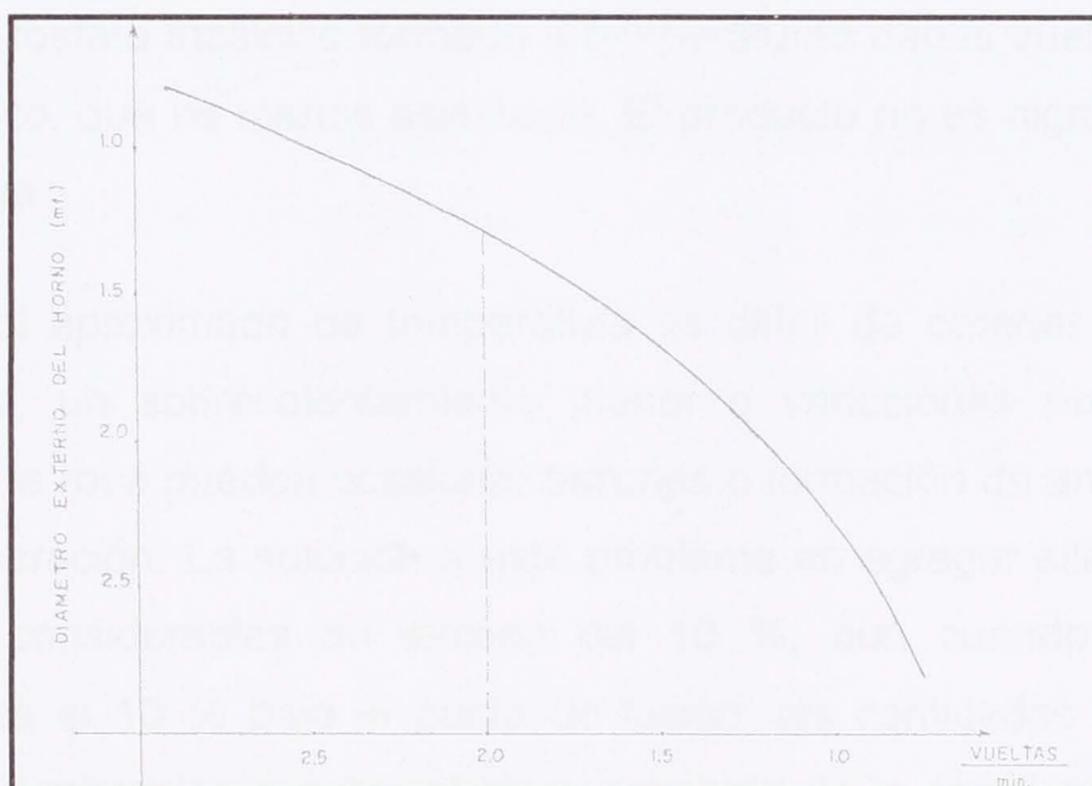


Figura 2.12: velocidad angular del horno, (Según Duda 1985).

## 2.17. PROCESOS TÉRMICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

Los fertilizantes pueden ser hechos por medio de varios procesos que comprenden el calentamiento de la roca fosfatada a altas temperaturas, seguido de apagado. Tales procesos pueden efectuarse bajo el punto de fundición del material o pueden incluir la fusión. Estos se llaman procesos de desfluorización, por que el desprendimiento del flúor de la fluorapatita de la roca es fundamental para la química de tales procesos. El flúor puede ser arrojado como gas o puede permanecer en el producto final en compuestos que no sean fluorapatita. <sup>(30)</sup>

### 2.17.1. FOSFATOS CALCINADOS

La Coronet Phosphate Company, en Plant City, Florida: Fosfato desfluorado calcinándolos en hornos rotatorios sin llegar a fundirlo. La roca se pulveriza a 150 mallas. La carga permanece 20 a 30 minutos a una temperatura de 1400-1480 °C en la zona de combustión, la carga se enfría con chorros de agua al salir del horno. De este modo se produce un exceso de vapor de agua necesario para una desfluorización eficaz. El enfriamiento rápido del material que sale del horno impide que el  $\alpha$ -fosfato tricálcico formado a temperaturas dadas vuelva a la forma  $\beta$ -fosfato tricálcico, que es menos asimilable. El producto no es higroscópico y es insoluble en agua.

Un control aproximado de temperatura es difícil de obtener en un horno rotatorio grande, un sobrecalentamiento menor o variaciones menores en la composición de la roca pueden ocasionar terrones o formación de anillos, un serio problema de operación. La solución a este problema es agregar sílice a la carga en cantidades considerables en exceso del 10 %, aun cuando la sílice en cantidades hasta el 10 % baja el punto de fusión, las cantidades mas grandes ayudan en forma mecánica a evitar el aterronamiento de la carga en el horno. El agua para la reacción se introdujo en el extremo caliente del horno. El material

apagado se pulverizo después en un molino de rodillos, el fosfato soluble es principalmente el  $\alpha$ -fosfato tricálcico. La mayor parte del producto de esta planta se usa en alimentos, aun cuando algo se emplea como fertilizante. <sup>(29)</sup>

**Fosfato de Renania y fosfato Rochling:** Agregando carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a una mezcla de roca fosfatada y sílice, permite el uso de una temperatura de calcinación mas baja; un procedimiento tal ha sido llevado a cabo comercialmente en Alemania desde 1917. El producto se conoce como fosfato de Renania. Una mezcla finamente pulverizada de ceniza de soda, roca fosfatada y sílice es humedecida con agua y alimentada en un horno de carbón calentada a 1100 a 1250 °C. El producto del horno se apaga con aspersiones de agua, secado y pulverizado antes de embarcarlo. La adición de soda actúa aparentemente en cierta forma para neutralizar los efectos adversos del Flúor, pues la mayor parte del Flúor permanece en el producto final. <sup>(30)</sup>

### 2.17.2. FOSFATO TRICÁLCICO FUNDIDO

En 1936 la TVA (Autoridad del Valle de Tennessee) hizo un estudio de la desfluorinización de la roca fosfatada fundida para la fabricación del fertilizante fosfático la mayor parte de este trabajo junto con el nuevo material, se reunió en un informe compilado por Brosheer y Hignett cuando estaba terminando este proyecto. La sílice y los óxidos de hierro y aluminio que se encuentran como impurezas en la roca fosfatada, sirven como fundentes para disminuir el punto de fundición de carga, por lo tanto aumenta la desfluorinización disminuyendo la viscosidad de la fundición y manteniendo a poca profundidad el charco de la fundición.

Una mezcla de briquetas de roca fosfatada y matriz en bruto de fosfato, se fundió en dos hornos encendidos con petróleo, el producto fundido de los hornos a una temperatura de 1400 a 1490 °C, fue decantado periódicamente en un

conducto de apagado provisto de chorros de agua de alta velocidad. El material apagado se dejó escurrir en el almacén, se secó y se granuló antes de transportarlo. <sup>(30)</sup>

### 2.17.3. FOSFATO CÁLCICO MAGNÉSICO FUNDIDO

En 1943 Walthall y Bridger, de la TVA encontraron que fundiendo una mezcla de roca fosfatada, magnesia y sílice, apagando la mezcla se obtenía un material vidrioso en que la mayor parte del  $P_2O_5$  era soluble en citrato este producto se elaboró en un horno eléctrico, este procedimiento se elaboró por la TVA. El consumo de energía es de 850 Kw/h por tonelada de producto, la temperatura en la zona de fusión en el horno es de 1500-1600 °C, el período de fusión es de 1-2 horas, el fosfato fundido se enfría rápidamente regándola con agua, por que el enfriamiento lento lo haría volver a la forma insoluble.

El material que se prepara en forma debida es predominantemente vidrioso. Pruebas de invernadero hechas en los Estados Unidos en el Departamento de Agricultura demostraron que el producto es más efectivo que el superfosfato cuando se usa en tierras ácidas. Mas aun el contenido de oxido de magnesio es en una gran parte aprovechado para el crecimiento de las plantas. El producto se utiliza en aplicación directa al suelo, sin ningún tratamiento ni adición de otros fertilizantes. <sup>(30)</sup>

### 2.17.4. FUSIÓN CON SULFATOS

Se encontraron que los fosfatos obtenibles pueden ser separados fundiendo mezclas de roca fosfatada y sulfato de magnesio y sulfato de potasio o langbeinita. Fusión de la mezcla conteniendo al menos 70 % de langbeinita y 30 % de roca redonda fosfatada de Florida, seguida de apagamiento con agua, dio un producto que contenía  $P_2O_5$  13, óxido de potasio 13, óxido de magnesio 11 y flúor 1.6. La

obtención de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y óxido de magnesio fue de 97 % y la de óxido de potasio fue de 95 %. Un horno encendido con gas, de 2 pies de diámetro y 8 1/2 pies de alto, se utilizó con una temperatura de 1315 °C. <sup>(30)</sup>

#### **2.17.5. TERMOFOSFATO MAGNESIANO YOORIN**

Estos termofosfatos son definidos como fertilizantes resultantes del tratamiento térmico de rocas fosfatadas, con la adición de otros materiales (silicato de magnesio), este tratamiento se hace con el fin de obtener un fósforo más disponible para las plantas. En la primera etapa se prepara la roca y los materiales conteniendo silicato de magnesio que son fundidos en hornos eléctricos de tipo arco directo, con temperaturas de operación entre 1400-1500 °C. Tanto en la alimentación del horno que cuando se descarga son operaciones continuas e intermitentes, al salir del horno el material es enfriado inmediatamente con chorros de agua formando granos, los cuales son posteriormente molidos en un molino de bolas, luego se embolsa añadiendo antes algunos micronutrientes. <sup>(30)</sup>

## CAPITULO 3

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.1. ESTUDIO PRELIMINAR

Basados en la literatura y los estudios realizados por distintas instituciones privadas, que trataron de convertir la roca fosfórica en fosfato utilizable, con el fin de aplicarla en la industria; permitieron delinear las bases de este estudio preliminar, y por consiguiente la aplicación inmediata de la tecnología.

La materia prima empleada en el presente estudio se encuentra en depósitos naturales. En la industria de estos materiales la disponibilidad de los nutrientes debe lograr la mayor eficiencia y ofrecer sus productos al menor costo posible al productor.

Para el proceso de fabricación de este material su estudio se baso en los siguientes objetivos:

- ☉ Convertir la cantidad máxima de P presente en este material, en P disponible.
- ☉ Producir un material con la concentración más elevada y económica de P de manera eficiente.
- ☉ Eliminar el flúor presente para evitar la fluorosis en el animal.

Estos objetivos se determinaron haciendo las pruebas de todo el proceso mantenido bajo un riguroso control, tanto física, química y biológicamente para obtener los resultados deseados.

La lixiviación con ácido cítrico al 2%, y ácido clorhídrico 0.4%, acetato de amonio neutro, citrato de amonio neutro y agua, estos métodos permiten a nivel de

laboratorio, y en corto espacio de tiempo, conocer el comportamiento de los materiales utilizados y poder extrapolarlo a su empleo en el campo de la alimentación.

### 3.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA ROCA FOSFÓRICA

En la Fig. 3.1, se observa la roca fosfórica en su estado natural, esta es preseleccionada antes de la molienda, Fig. 3.2, la roca molida a malla 200.



Figura. 3.1. Apilado de la Roca fosfórica



Figura. 3.2. Roca fosfórica molida a malla 200

### 3.2.1. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

#### 3.2.1.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El estudio de fases minerales se llevo a cabo por un DRX, utilizado en la técnica de polvo de DEBYE-SCHERRER mediante un equipo Siemens DIFRACKTOMETER D5000 con software propio DIFRACT/AT. Las condiciones de trabajo han sido 50 KV de voltaje, 30 mA de intensidad, radiación  $K\alpha$  del Cu ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) con filtro de Ni para ángulos  $2\theta$  comprendidos entre  $10^\circ$  y  $65^\circ$  velocidad de rotación de la muestra de 30 rpm y velocidades de barrido de  $2^\circ \text{ min}^{-1}$  para los espectros de identificación.<sup>(36)</sup>

El tamaño de la partícula ha sido  $<32 \mu\text{m}$ , el intervalo de recorrido para el goniómetro de  $25$  a  $54^\circ$  para  $2\theta$ , con una velocidad de  $0.5^\circ \text{ min}^{-1}$  y las reflexiones de los índices de millar 002, 302, 310, 222, 312, 312, 213, 321, 410, 410, 402 y 004.<sup>(36)</sup>

Con el fin de determinar las diferentes fases presentes en la materia prima se han obtenido el espectro de difracción de rayos X en polvo. Los resultados se muestran en la Fig.3.3.<sup>(36)</sup>

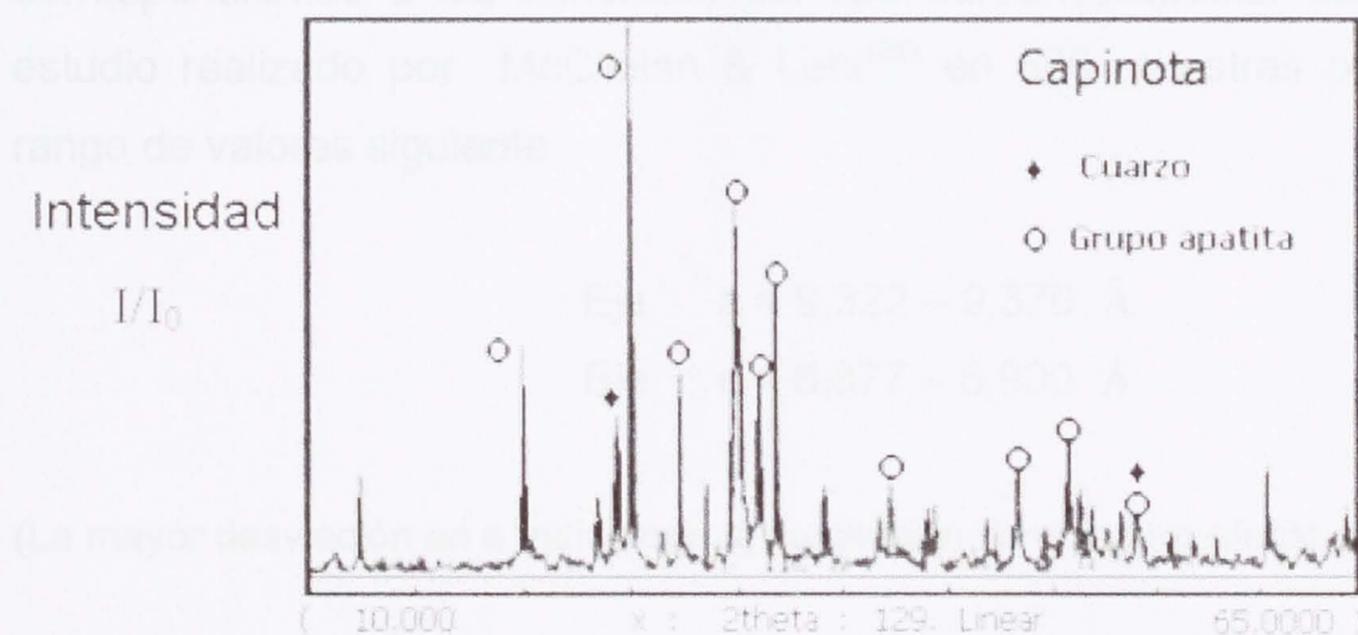


Figura 3.3. Espectros de (DRX) de la roca fosfórica Capinota (Según Arzabe, 1998).

Los picos de difracción se han asignado de acuerdo con las fichas ASTM. En el difractograma aparecen como fases el cuarzo y las correspondientes al grupo de las apatitas. La posibilidad de asignar los picos de difracción dentro de este grupo es compleja debido a la pequeña diferencia entre las distancias interplanares de los distintos tipos, a los que se une el efecto de las sustituciones parciales de los aniones que son los que fundamentalmente modifican los parámetros de red. <sup>(36)</sup>

Con el fin de identificar el tipo de roca fosfórica, se ha realizado el estudio de los parámetros de la red hexagonal de la apatita presente según el procedimiento indicado, dando los resultados de parámetros los siguientes resultados de parámetros de red.

$$\text{Eje } a = 9,348 \text{ \AA}$$

$$\text{Eje } c = 6,890 \text{ \AA}$$

Si comparamos estos resultados con los obtenidos por Carlström<sup>3</sup> para diferentes sustituciones de fluoroapatitas por carbonato, mostrados en la tabla 3.2, se puede indicar que la materia prima se encuentra dentro de estos valores correspondientes a los minerales del tipo carbonatoapatita. Los resultados del estudio realizado por McClellan & Lehr<sup>(36)</sup> en 500 muestras proporcionando el rango de valores siguiente:

$$\text{Eje } a = 9,322 - 9,376 \text{ \AA}$$

$$\text{Eje } c = 6,877 - 6,900 \text{ \AA}$$

(La mayor desviación en **a** indica que la sustitución tiene mayor efecto en esta dirección)



### 3.2.1.2. ANÁLISIS TÉRMICOS

Se han englobado dentro los análisis térmicos las técnicas de Análisis Térmico Diferencial (DTA), Termogravimetría (TG) y Termogravimetría Diferencial (TGD).

El DTA es una técnica que registra las diferencias de temperatura entre la muestra objeto de estudio y un material de referencia,  $\alpha$ -alúmina calcinada, cuando ambas muestras se someten a idénticos regímenes de temperatura en un horno calentado a velocidad controlada. Un termograma indica a que temperaturas tienen lugar cada uno de esos cambios energéticos, si las reacciones que los determinan transcurren con absorción o con desprendimiento de calor y cuál es la cantidad de calor consumido o cedido por la muestra.

La TG es una técnica que nos permite observar el cambio de peso de la muestra en función de la temperatura. La DTG nos permite observar la velocidad con la que se desarrolla el cambio de peso en función de la temperatura.

Se realizó todos estos ensayos, se ha utilizado un equipo simultáneo de análisis térmico NETZSCH STA 409 y controlador TASC 414/2, con crisol de Pt en un horno de alta temperatura, en atmósfera de aire seco con flujo de 7 l/h, siendo la velocidad de calentamiento de 10° C/min y la temperatura final de 1400°C. <sup>(36)</sup>

El fosfato de Capinota, al tratarse mayoritariamente de una fluorapatita con menor sustitución de carbonatos, es más estable, presentando una baja y gradual pérdida de peso debida fundamentalmente al agua de cristalización y otros componentes como el flúor. <sup>(36)</sup>

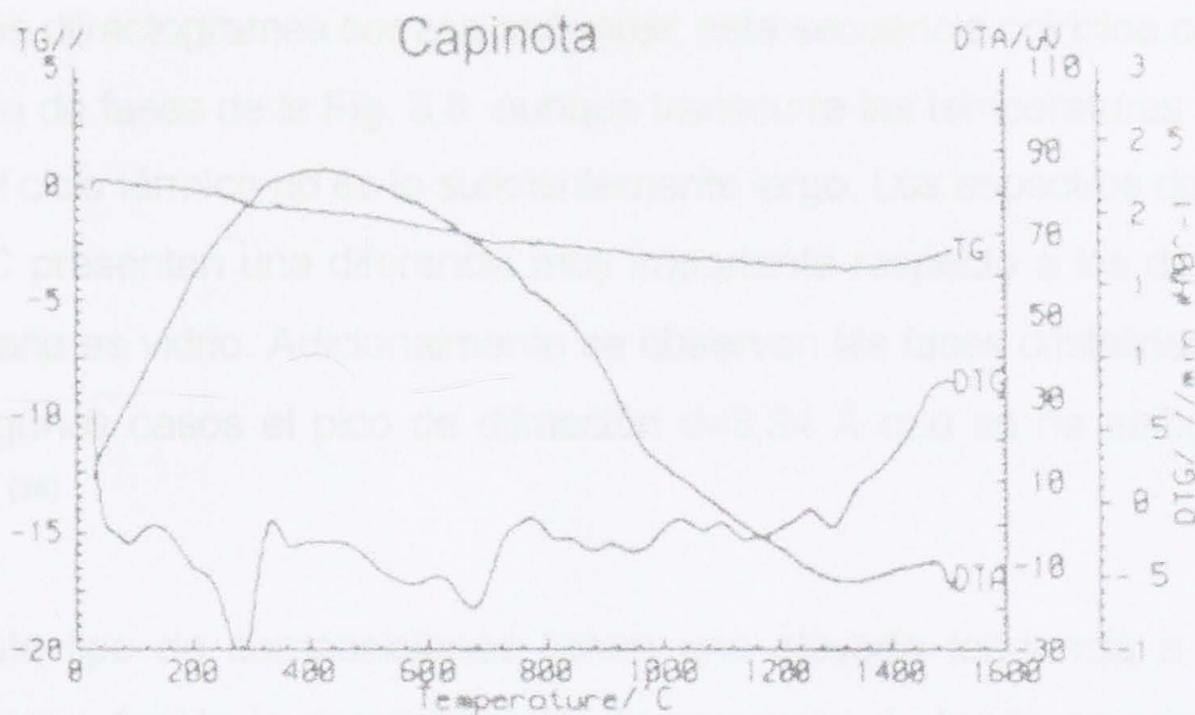
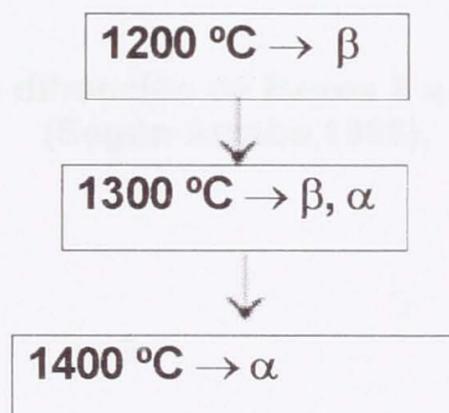


Figura.3.5. ATD, TG y DTG de la roca fosfórica Capinota (Según Arzabe, 1998).

Las fases cristalinas de fosfato se pueden identificar claramente  $\alpha$  y  $\beta$   $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  presentes en el material. La identificación de estas fases sostiene esta teoría que se justifica por el ciclo térmico empleado en la obtención de estos materiales (1), la reacción (2) daría lugar a la formación de  $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$  en fase cristalina y el  $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$  se incorpora en la fase vítrea. Las reacciones son:

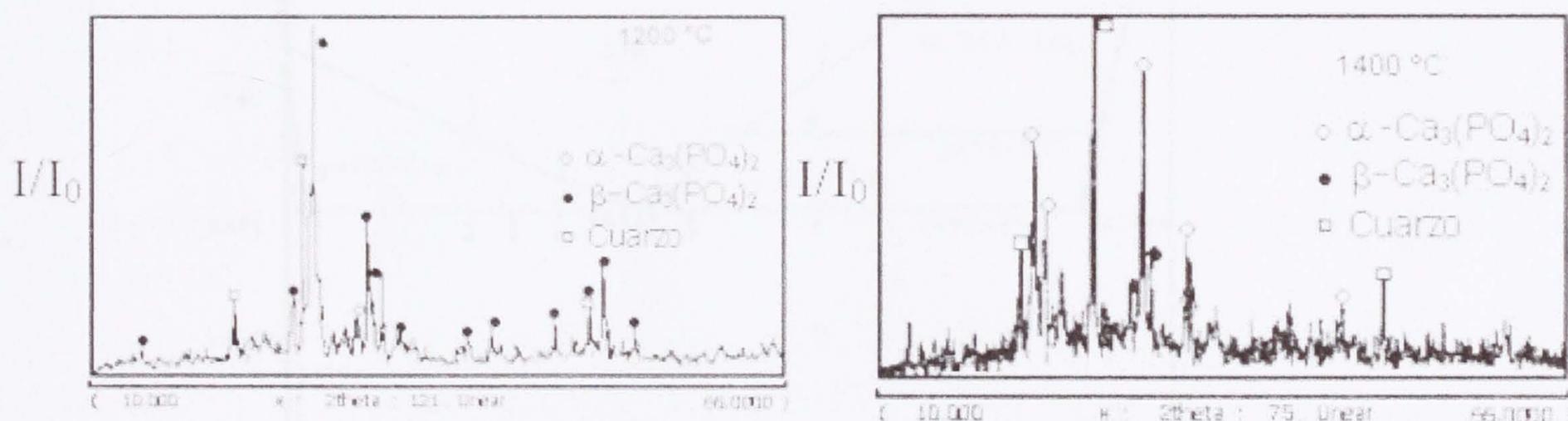


Las transformaciones de fase serían:



Los difractogramas correspondientes, esta secuencia coincide con el diagrama de equilibrio de fases de la Fig. 3.8 aunque transcurre las temperaturas superiores debido a que el ciclo térmico no es lo suficientemente largo. Los espectros de los materiales de 1400 °C presentan una diferencia muy importante respecto a los de 1200 °C, su fase mayoritaria es vidrio. Adicionalmente se observan las fases cristalinas:  $\alpha$  y  $\beta$   $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  y en algunos casos el pico de difracción  $d=3,34 \text{ \AA}$  que se ha atribuido a  $\text{SiO}_2$  como cuarzo. <sup>(36)</sup>

Este tipo de composiciones tienen una elevada tendencia a la separación de fases lo que facilita la desvitrificación, la presencia de las fases cristalinas se justifica por la amplia tendencia de estos materiales a desvitrificar, porque la velocidad de enfriamiento no es nunca lo suficientemente rápida como para impedir el fenómeno de la cristalización. <sup>(36)</sup>



**Figura.3.6. Espectro de difracción de Rayos X a diferentes temperaturas (Según Arzabe,1998).**

En la Fig. 3.7 el difractograma tiene un alto contenido de fase vítrea y fases cristalinas producto de la desvitrificación

Las muestras fueron calcinadas de la siguiente manera:

Roca fosfórica en calina

Roca calcinada a 1000°C

Roca calcinada a 1200°C

Roca calcinada a 1400°C

3.4. EQUIPOS

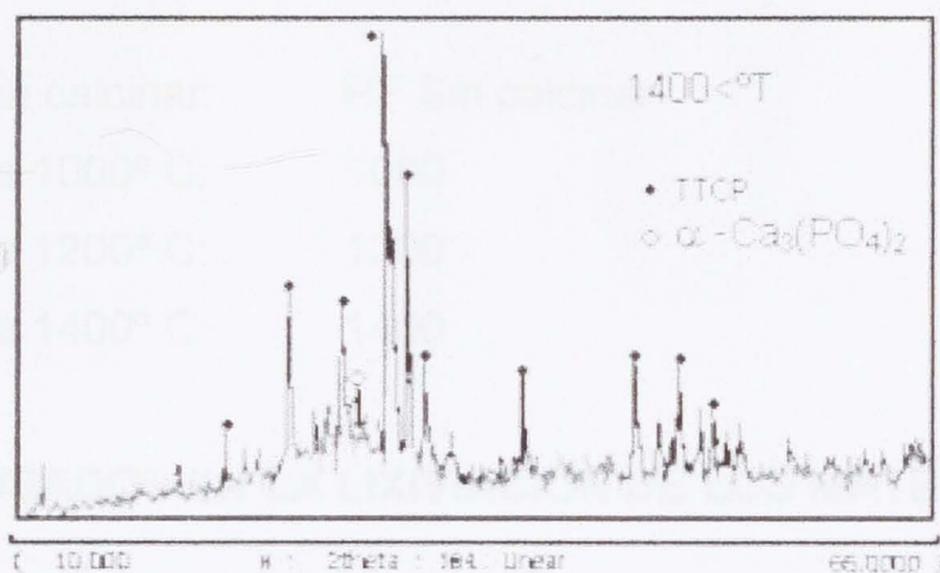


Figura.3.7. Difracción de Rayos X a temperaturas superiores a 1400 °C, (Según Arzabe, 1998)

con todos los solventes orgánicos. Con el objetivo de mejorar el tiempo de hidratación se realizó una serie de ensayos de hidratación en agua a diferentes temperaturas y tiempos de hidratación. La hidratación se realizó en un shaker a una temperatura controlada de 35 °C, en un recipiente con un volumen de 50 ml de agua y 10 mg de muestra. El shaker se utilizó para mantener la muestra en constante movimiento durante el tiempo de hidratación.

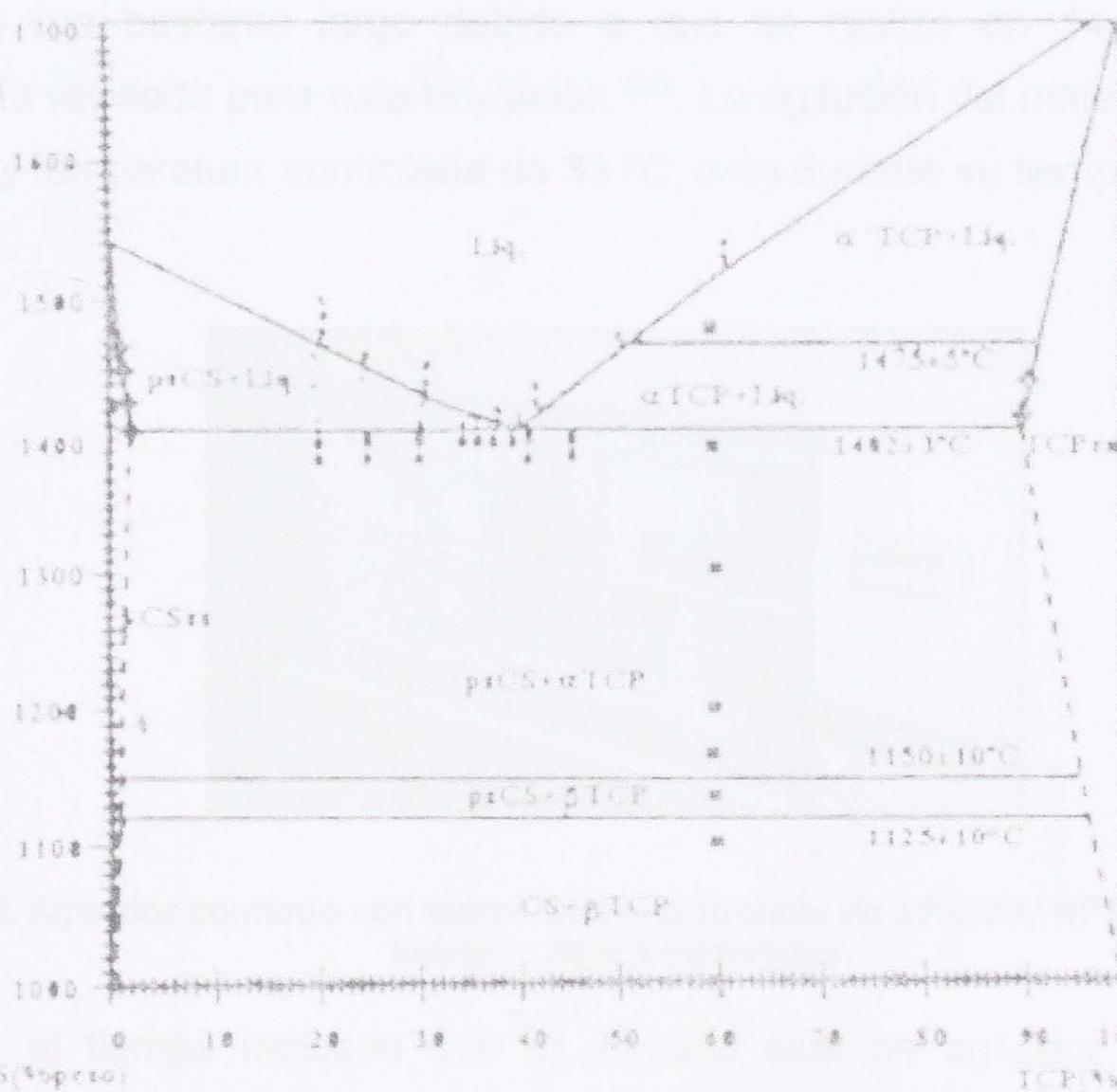


Figura. 3.8. Diagrama de equilibrio de fases wollastonita (CS) – Fosfato tricálcico (TCP), (Según Aza Moya, 1995).

En el presente trabajo se realizó una serie de ensayos de hidratación en agua para mayor información de la cinética de hidratación en un shaker.

Figura.3.8. Diagrama de equilibrio de fases wollastonita (CS) – Fosfato tricálcico (TPC), (Según Aza Moya, 1995).

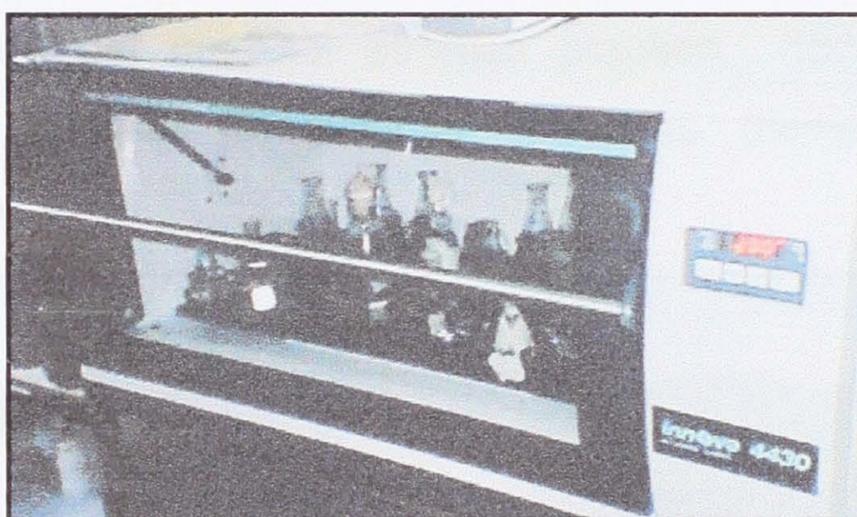
### 3.3. ESTUDIO DE LABORATORIO CON MATERIAL DE CAPINOTA

Las muestras fueron codificadas de la siguiente manera:

Roca fosfórica sin calcinar:	RF Sin calcinar
Roca calcinada a 1000° C:	1000
Roca calcinada a 1200° C:	1200
Roca calcinada a 1400° C:	1400

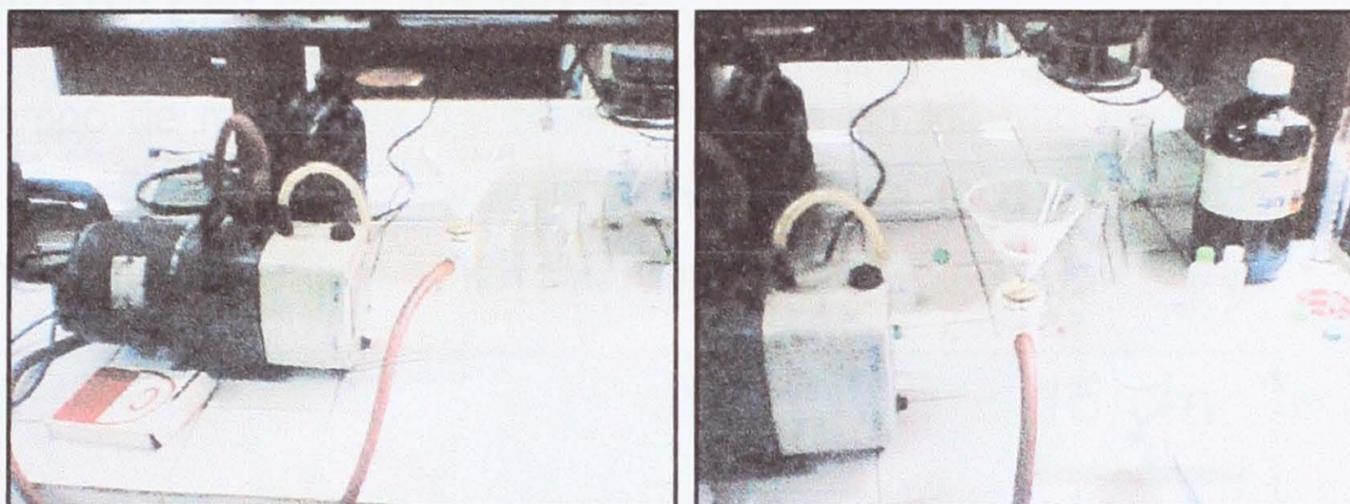
### 3.4. EQUIPOS USADOS EN LA LIXIVIACIÓN DE LOS MATERIALES

Se realizó la lixiviación de los materiales en el agitador continuo (Shaker), con todos los solventes indicados. Con el acetato de amonio neutro el tiempo de lixiviación fue bastante largo debido a que se realizó en 14 días según la bibliografía revisada para esta lixiviación <sup>(37)</sup>. La agitación del material a lixiviar era continua y temperatura controlada de 35 °C, esto durante su tiempo de estadía en el Shaker.



**Figura. 3.9. Agitador continuo con temperatura controlada de 35°C/200 RPM (Shaker) para el lixiviado de los materiales.**

En el tiempo indicado que el material sale de agitador se realiza una filtración en vacío para mayor rapidez y tengamos una muestra representativa en tiempo indicado. Los filtros usados son los indicados para este tipo de métodos de lixiviación.



**Figura. 3.10. Filtración al vacío para mayor rapidez en el tiempo indicado de lixiviación**

Este método de extracción sólido líquido dio excelentes resultados de confiabilidad para tomarlo en cuenta en posteriores investigaciones. Los análisis de los lixiviados se los realizo por el método de molibdato vanadato por colorimetría con el espectrofotómetro.

### **3.5. TECNOLOGÍA EMPLEADA PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO**

La calcinación de las muestras a temperaturas de 1000, 1200 y 1400 °C se realizo en horno rotatorio con diámetro unitario debido el calcinado del producto es uniforme y la salida del material es mas practico, todas las muestras se sometieron a las mismas condiciones indicadas (tiempo de residencia y enfriamiento brusco).



**Figura.3.11. Horno rotatorio**

### 3.6. CALCINADO DE LOS MATERIALES

El tiempo de residencia del material fue de un máximo de 30 minutos, a medida que se elevó la temperatura el material se funde formando nódulos (concreción del mineral) después del choque térmico.



Figura. 3.12. Formación de nódulos de roca fosfórica

Un problema fue el sobrecalentamiento del horno puede ocasionar terrones o formación de anillos, este es un problema muy serio de operación, el flujo másico del material no debe exceder los límites permitidos en el uso de este horno rotatorio. El material a la salida del horno tiene que tratar de mantener todas sus características deseadas, en el diseño del horno se consideró todos estos puntos para tener un producto deseado con un alto rendimiento, esto implica que se debe seguir todas las normas de control de calidad del producto.

El sistema de enfriamiento tiene que estar diseñado para que el material de salida enfrie lo más rápido posible para congelar la fase  $\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , a esta temperatura se evapora el agua y se libera el flúor obteniendo una desfluorinización, posteriormente se lleva el material al buzón de producto terminado en proceso para su secado y luego a la molienda.

### 3.7. RESULTADOS DE CALCINACIÓN

#### 3.7.1. PRUEBA DE ROCA FOSFÓRICA DE CAPINOTA

El fosfato Capinota presenta una microestructura compleja, se puede apreciar láminas, nódulos y fragmentos, característica del yacimiento de origen sedimentario, determinado con la ayuda de micrografías del material (ver figura 3.11).

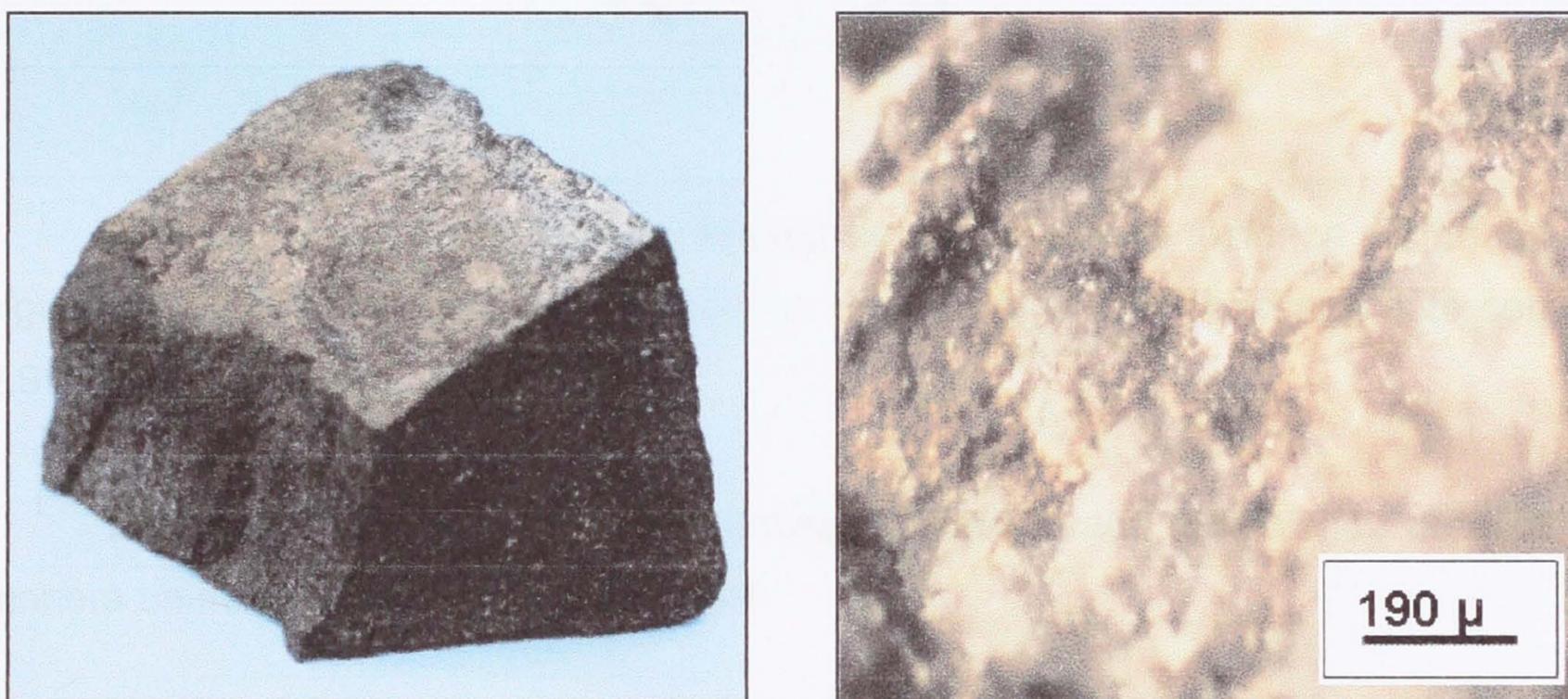


Figura. 3.13. Roca fosfórica con su microestructura

En la tabla 3.2 se tenemos la composición química de la roca fosfórica sin ningún tratamiento térmico. El contenido de %P es de 15,63 se considera que tiene un alto contenido de fósforo.

**Tabla 3.2:** Composición química de la roca fosfórica sin calcinar.

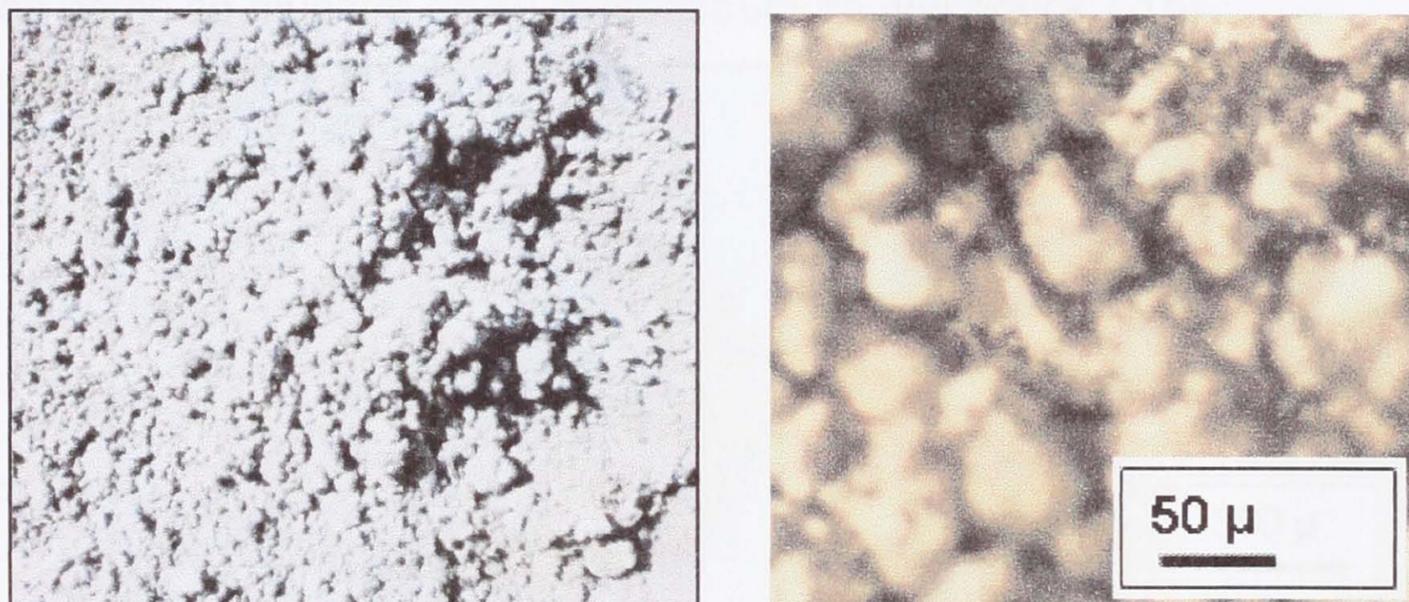
ROCA FOSFÓRICA	
Óxidos	% Peso
P%	15,63
CaO %	31,32
K <sub>2</sub> O %	0,41
MgO %	0,22
SiO <sub>2</sub> %	23,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	2,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	2,42
Na <sub>2</sub> O %	0,24
F	2,31

Se determino las propiedades fisicoquímicas de la roca fosfórica dando los siguientes resultados de: Densidad real fue de 2.89 g/ml, Densidad aparente con 2.99 g/ml y Porosidad de 3.46 %.

Esta roca fue clasificada, seleccionada y luego lavada, obteniendo de esta manera un mineral de alta pureza de %P.

### 3.7.2. PRUEBAS DE LA ROCA FOSFÓRICA TRATADA A 1000 °C

Se empezó con esta temperatura porque la transformación del mineral empieza a los 1000° C con el  $\beta$ -fosfato tricálcico.



**Figura. 3.14.** Roca fosfórica tratada a 1000° C con su microestructura

En la tabla 3.3 se tiene la composición química de la roca calcinada a 1000° C, en este material existe un leve incremento de %P de 15,83, el contenido de %F se mantiene constante 2,30 todavía no existe eliminación de este compuesto. Se determino la densidad aparente nos dio el siguiente resultado de 3,18 g/ml.

**Tabla 3.3:** Composición química de la roca fosfórica calcinada a 1000° C.

ROCA CALCINADA 1000 °C	
Óxidos	% Peso
P%	15,83
CaO %	30,2
K <sub>2</sub> O %	0,53
MgO %	0,24
SiO <sub>2</sub> %	23,68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	1,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	2,54
Na <sub>2</sub> O %	0,27
F %	2,30

### 3.7.3. PRUEBAS DE LA ROCA FOSFÓRICA TRATADA A 1200° C

A esta temperatura de 1200° C la transformación del mineral esta en la fase  $\beta$ -fosfato tricálcico en mayor cantidad, donde hay formación de una fase vítrea en la roca como se muestra en su microestructura (ver figura 3.15).



**Figura. 3.15.** Roca fosfórica tratada a 1000° C con su microestructura

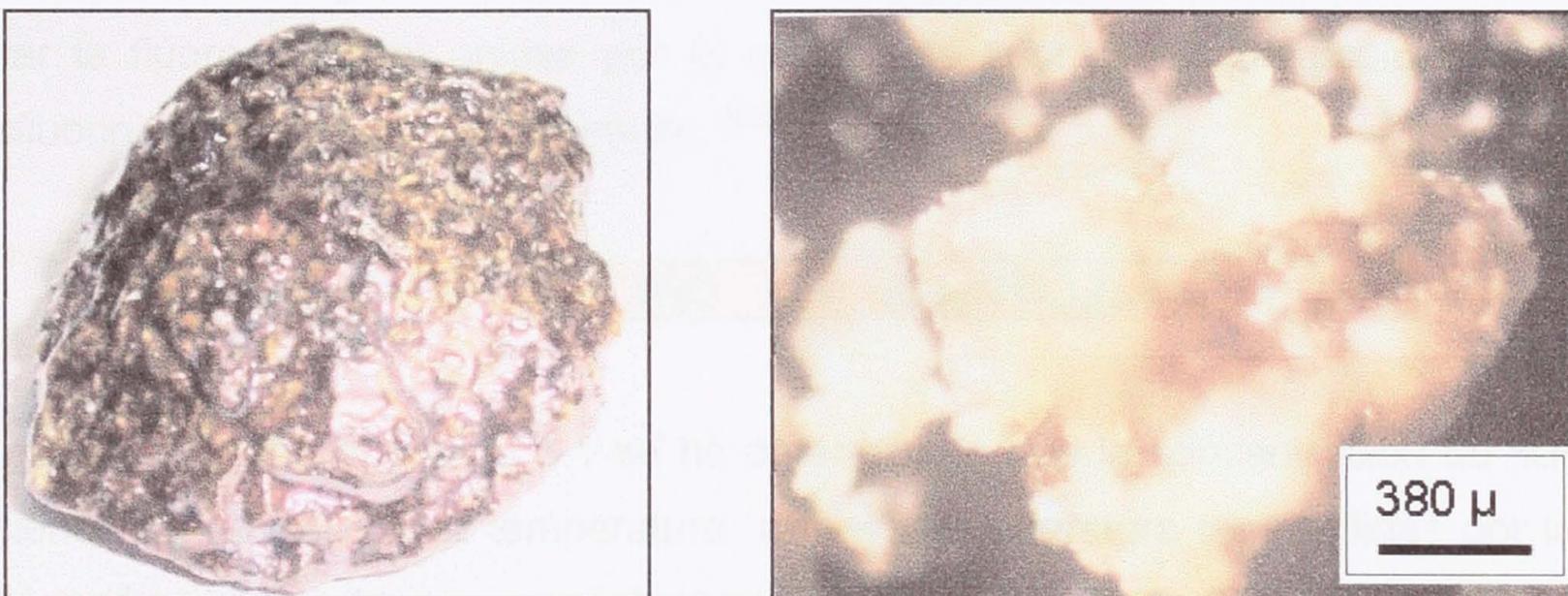
En la tabla 3.4 la cantidad de %P de 16,63 existe un incremento a esta temperatura, lo que nos indica que existe eliminación de compuestos, el %F disminuye a 2,00. La densidad aparente calculada es de 3,19 g/ml.

**Tabla 3.4:** Composición química de la roca fosfórica calcinada a 1200° C.

ROCA CALCINADA 1200 °C	
Óxidos	% Peso
P %	16,63
CaO %	31,32
K <sub>2</sub> O %	0,71
MgO %	0,23
SiO <sub>2</sub> %	23,72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	1,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	2,68
Na <sub>2</sub> O %	0,28
F %	2,00

#### 3.7.4. ESTUDIO REALIZADO AL MATERIAL A 1400° C

A la temperatura de 1400° C la transformación del mineral es completa en la fase  $\alpha$ -fosfato tricálcico en mayor cantidad, donde hay mayor formación de fase vítrea en la roca como se muestra en su microestructura (ver figura 3.16).



**Figura. 3.16.** Roca fosfórica tratada a 1400° C con su microestructura

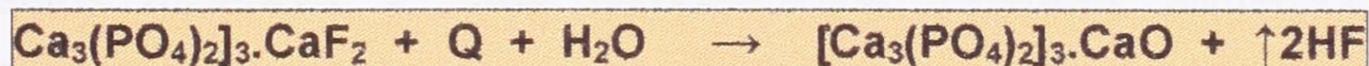
En la tabla 3.5 la cantidad de %P de 16,86 existe mayor cantidad a esta temperatura, la eliminación del %F disminuye a 0,08 lo cual nos indica que hubo una buena desfluorinización. La densidad aparente de este material es de 2,80 g/ml.

**Tabla 3.5:** Composición química de la roca fosfórica calcinada a 1400° C.

ROCA CALCINADA 1400 °C	
Óxidos	% Peso
P %	16,86
CaO %	33,56
K <sub>2</sub> O %	0,76
MgO %	0,25
SiO <sub>2</sub> %	23,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	2,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	2,70
Na <sub>2</sub> O %	0,30
F %	0,08

### 3.7.4.1. ROCA FOSFÓRICA EN % P TOTAL EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

El tiempo de residencia, la temperatura alta y el vapor de agua en el interior del horno en el proceso de la roca fosfatada para producir el fosfato tricálcico mas asimilable, se consigue eliminar del fosfato natural más del 95 % de flúor a fin de evitar la flúorosis en el animal por el exceso de flúor. Reacción posible en la desfluorinización en el choque térmico. <sup>(63)</sup>



Observando el gráfico 3.1 se ha determinado que la concentración de %P asciende en función de la temperatura, a mayor temperatura las perdidas por la calcinación van subiendo, ocasionando de este modo el aumento de la concentración de P de la roca fosfórica.

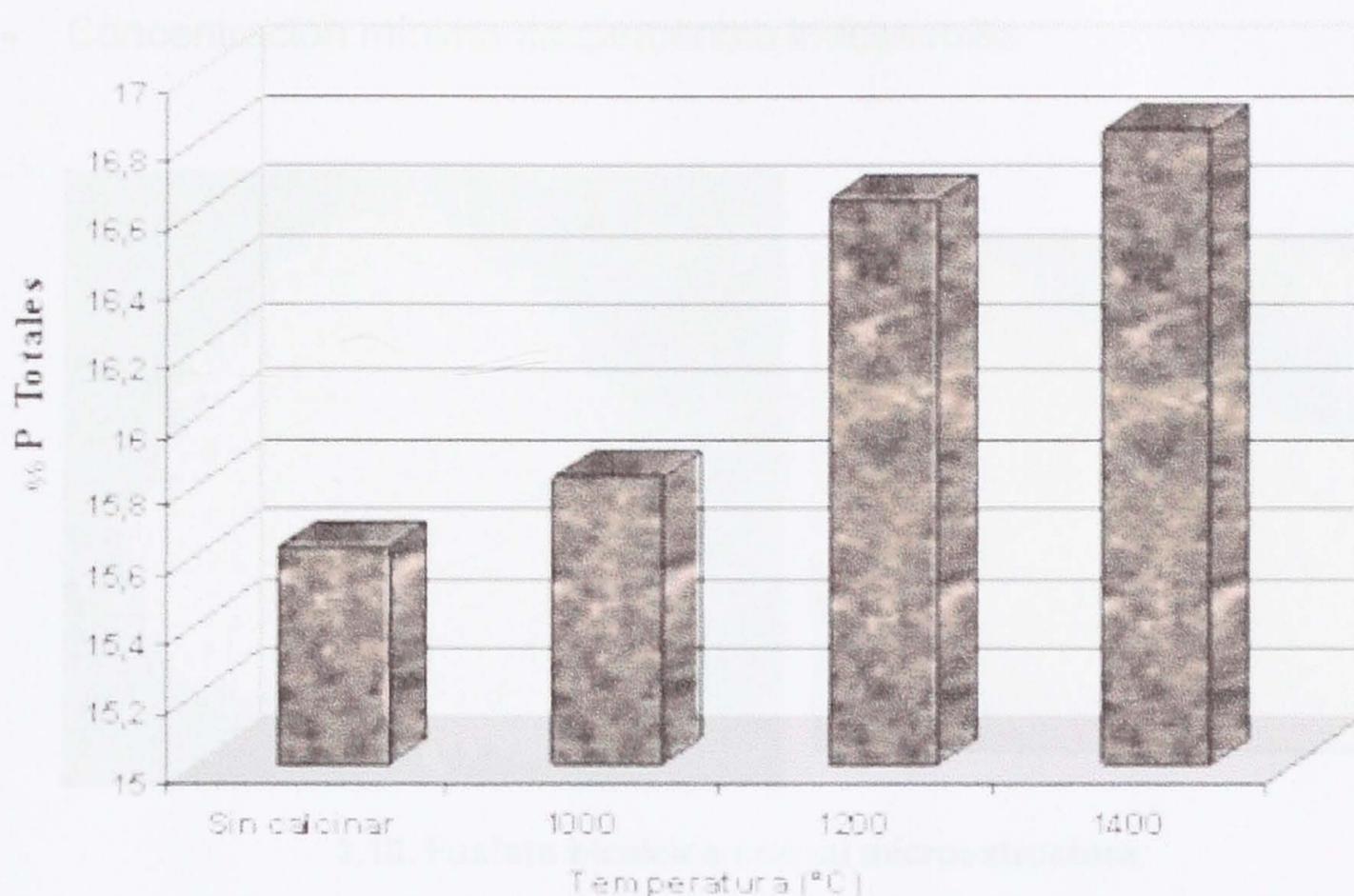


Figura 3.17. % P totales de la roca fosfórica en función de la temperatura

### 3.7.5. PRUEBAS CON FOSFATO COMERCIAL

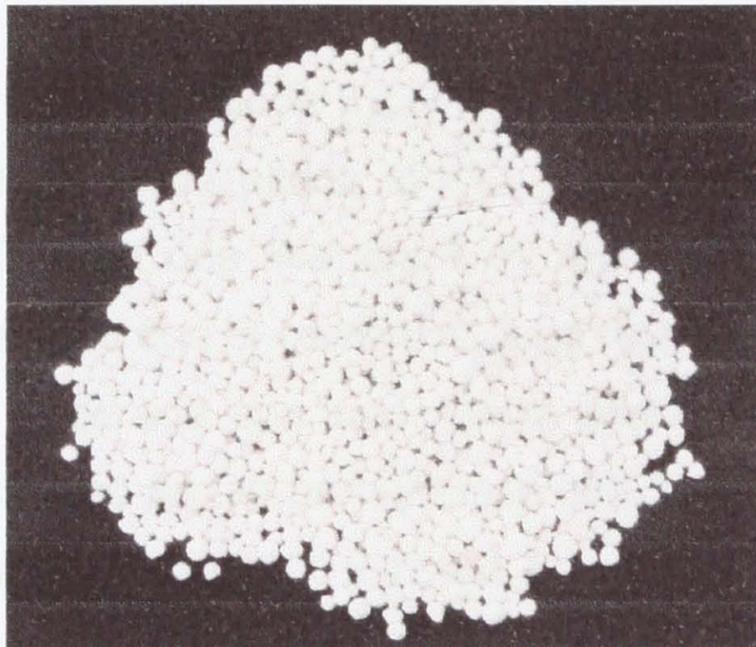
Fosfato bicálcico para alimentación animal. Material obtenido por acidulación parcial de la roca fosfórica como se muestra en la figura 3.18 con su respectiva microestructura. Con este proceso se consigue un producto de excelente calidad, se presenta en forma de gránulos grises y tiene una excelente solubilidad en agua y ácidos diluidos. Solubilidad química y disponibilidad biológica excelente. Su Formula química es  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

La elevada solubilidad química y asimilación biológica hacen de este producto una de las fuentes de Fósforo recomendada par el uso en raciones, suplementos minerales y otros complementos minerales alimenticios para vacunos, cerdos, aves y otros animales. <sup>(38)</sup>

#### Ventajas Especiales

- Producto granulado, de fácil manejo, lo que hace menos polvoriento y de menor impacto ambiental.

- Concentración mínima de elementos indeseables



**3.18. Fosfato bicálcico con su microestructura**

En la tabla 3.6 se determinó el %P siendo un 18 y el contenido de %F es de 0.17 se encuentra dentro los límites permisibles de la sustancia. La densidad aparente es de 0.9 g/ml.

**Tabla 3.6:** Composición química del fosfato comercial (fosfato bicálcico).

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>	
<b>Óxidos</b>	<b>% Peso</b>
<b>P %</b>	18.0
<b>Ca %</b>	24.0
<b>pH</b>	6.2
<b>F%</b>	0.17

### **3.8. RESULTADO DE LIXIVIACIÓN CON DIFERENTES SOLVENTES**

En las tablas 3.7 y 3.8 los lixiviados con ácido cítrico al 2% y ácido clorhídrico al 0.4%, se observa que en el fosfato comercial la liberación de fósforo es bastante elevada en los primeros intervalos de tiempo y libera el mineral lentamente hasta casi en su totalidad, comparando con el material de 1400°C tiene una liberación ascendente en forma gradual en cada intervalo establecido, lo

que nos indica que la transformación del material a  $\alpha$ -fosfato tricálcico se realizó de forma exitosa.

En los gráficos 3.2 y 3.3 se observa con más claridad la liberación en los dos casos ácido cítrico al 2% y ácido clorhídrico 0.4%, el material calcinado a 1400°C tiene una liberación de fósforo muy aceptable al terminar las pruebas, comparadas con el comercial, esto nos confirma que la transformación del mineral fue la esperada con una mayor liberación de fósforo. Los otros materiales su liberación no es tan pronunciada debido a que la transformación del mineral no es la deseada, la de 1000 y 1200°C.

**Tabla 3.7:** Contenido de %P por el lixiviado con ácido cítrico al 2%

<b>Contenido de Fósforo después del lixiviado</b>										
<b>Tiempo de Lixiviación (min.)</b>	<b>Sin Calcinar</b>		<b>1000 °C</b>		<b>1200 °C</b>		<b>1400 °C</b>		<b>Fosfato Comercial</b>	
	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>
15	0,80	5,12	1,53	9,09	4,18	25,14	4,83	28,70	13,03	86,87
30	0,83	5,31	2,53	15,03	4,46	26,82	5,09	30,24	13,09	87,27
60	0,97	6,21	2,93	17,41	4,69	28,20	5,96	35,41	13,28	88,53
90	1,25	8,00	3,12	18,54	5,00	30,07	6,64	39,45	13,47	89,80
120	2,01	12,86	3,25	19,31	5,21	31,33	7,25	43,08	13,54	90,27
150	2,56	16,38	3,67	21,81	5,73	34,46	8,14	48,37	13,57	90,47
180	2,94	18,81	3,98	23,65	6,11	36,74	8,58	50,98	13,61	90,73
210	3,21	20,54	4,24	25,19	6,72	40,41	9,16	54,43	13,76	91,73
240	3,34	21,37	4,51	26,80	7,08	42,57	10,43	61,97	13,86	92,40
270	3,48	22,26	4,87	28,94	7,89	47,44	11,08	65,83	13,92	92,80
300	3,65	23,35	4,99	29,65	8,57	51,53	11,58	68,81	14,12	94,13
330	3,85	24,63	5,15	30,60	9,17	55,14	12,10	71,90	14,20	94,67
360	4,68	29,94	5,49	32,62	9,68	58,21	12,82	76,17	14,41	96,07
400	5,36	34,29	5,93	35,23	10,10	60,73	13,21	78,49	14,64	97,60

**Tabla 3.8:** Contenido de %P después del lixiviado con ácido clorhídrico al 0.4%

<b>Contenido de Fósforo después del lixiviado</b>										
<b>Tiempo de Lixiviación (min.)</b>	<b>Sin Calcinar</b>		<b>1000 °C</b>		<b>1200 °C</b>		<b>1400 °C</b>		<b>Fosfato Comercial</b>	
	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>	<b>%Extraído</b>	<b>%Extracción</b>
15	0,81	5,18	1,78	11,24	5,11	30,73	8,01	47,59	13,03	87,96
30	1,02	6,53	2,08	13,14	5,64	33,91	8,17	48,54	13,09	88,67
60	1,25	8,00	2,15	13,58	5,72	34,40	9,07	53,89	13,28	89,83
90	1,87	11,96	2,38	15,03	6,17	37,10	9,24	54,90	13,47	90,05
120	2,36	15,10	2,85	18,00	6,64	39,93	9,78	58,11	13,54	90,18
150	2,45	15,67	3,20	20,21	7,15	42,99	10,11	60,07	13,57	90,64
180	2,72	17,40	3,68	23,25	7,68	46,18	10,74	63,81	13,61	91,43
210	3,10	19,83	4,14	26,15	8,21	49,37	11,28	67,02	13,76	92,68
240	3,68	23,54	4,36	27,54	8,76	52,68	11,53	68,51	13,86	92,87
270	4,19	26,81	4,73	29,88	9,12	54,84	11,91	70,77	13,92	93,00
300	4,65	29,75	5,21	32,91	9,67	58,15	12,27	72,91	14,12	94,24
330	5,11	32,69	5,35	33,80	10,31	62,00	12,89	76,59	14,2	96,10
360	5,87	37,56	5,92	37,40	10,64	63,98	13,48	80,10	14,41	97,24
400	5,9	37,75	6,00	37,90	10,78	64,15	13,54	80,45	14,64	98,60

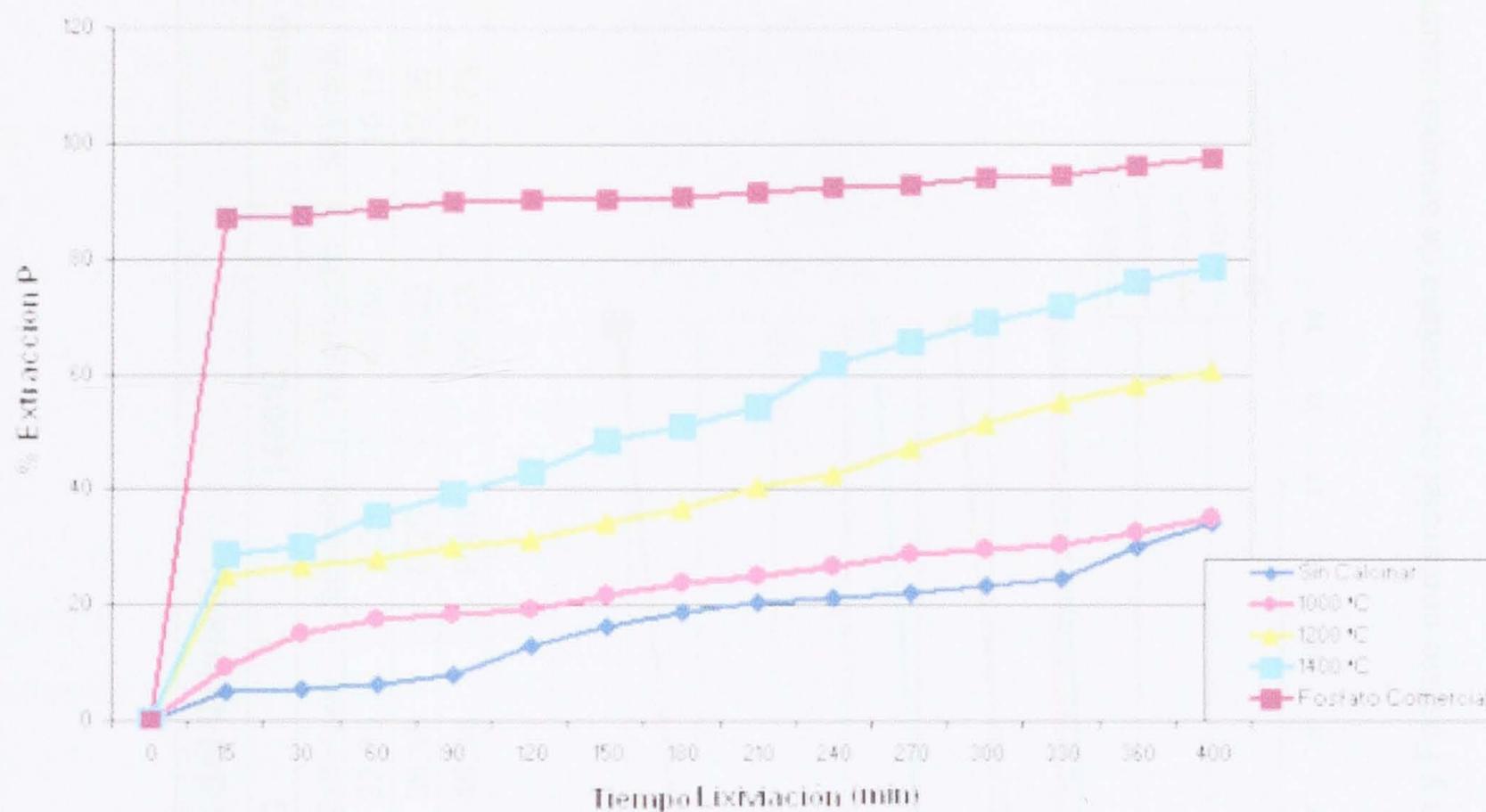


Figura 3.19. Curvas de lixiviación de la roca fosfórica a diferentes temperaturas y Fosfato comercial con ácido cítrico al 2%

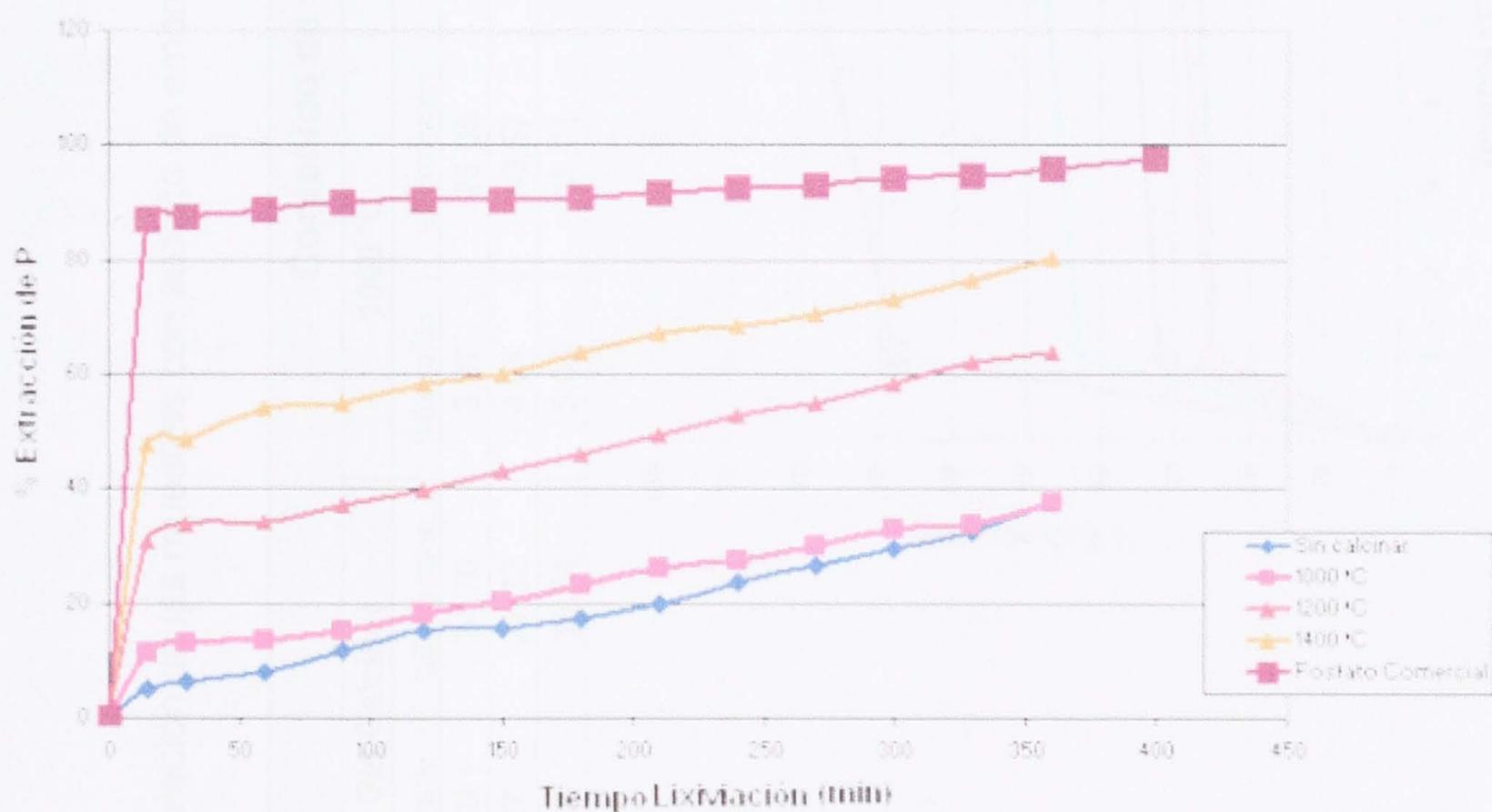
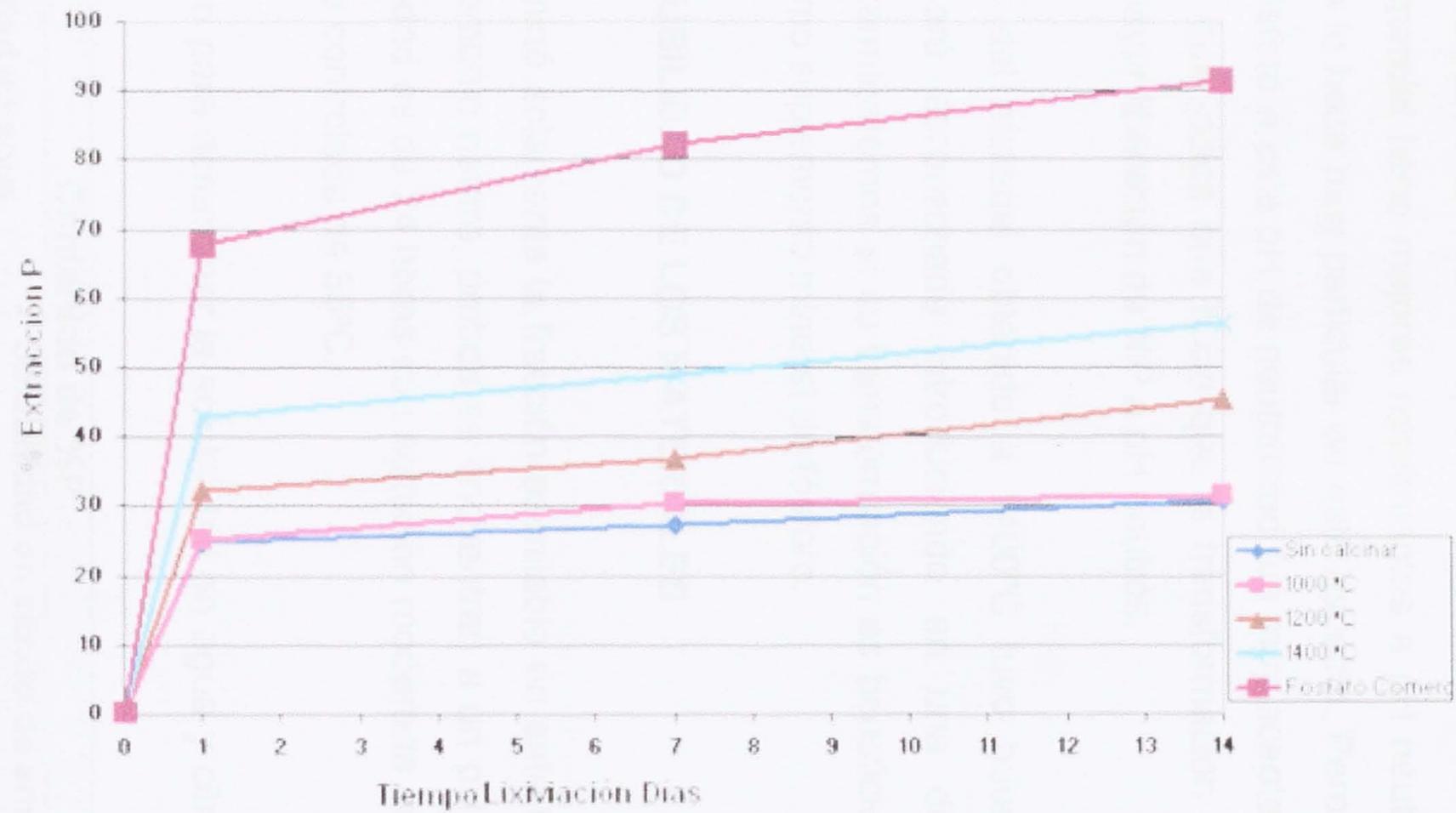


Figura 3.20. Curvas de lixiviación de la roca fosfórica a diferentes temperaturas y Fosfato comercial con ácido clorhídrico 0.4%

**Tabla 3.9:** Lixiviación de las muestras con acetato de amonio neutro

Contenido de %P después del lixiviado										
Días Lixiviación	Sin Calcinar		1000 °C		1200 °C		1400°C		Fosfato Comercial	
	%Extraído	%Extracción	%Extraído	%Extracción	%Extraído	%Extracción	%Extraído	%Extracción	%Extraído	%Extracción
1	3,86	24,70	3,97	25,08	5,38	32,35	7,21	42,84	10,15	67,67
7	4,27	27,32	4,84	30,57	6,12	36,80	8,25	49,02	12,36	82,40
14	4,82	30,84	5,02	31,71	7,54	45,34	9,48	56,33	13,73	91,53



**Figura 3.21.** Curvas de lixiviación de la roca fosfórica a diferentes temperaturas y Fosfato comercial con acetato de amonio neutro.

En la tabla 3.9 y la figura 3.21 observamos que el solvente acetato de amonio neutro en el fosfato comercial tiene mejores rendimientos a pH neutros que el material a 1400°C, lo que lo hace muy particular en este aspecto. Pero se comprobó que la liberación de fósforo a este pH de neutralidad fue muy aceptable llegando a un 56.33% de P, lo que indica que hubo que la transformación del mineral influye para que exista mayor liberación de %P a pH neutros.

La liberación de fósforo del material obtenido a 1400°C tuvo buenos rendimientos, esta cualidad será aprovechada introduciendo en una dieta balanceada para animales y determinaremos si su transformación es beneficiosa para adicionarlo en las dietas como suplemento mineral de fósforo.

### 3.9. DETERMINACIÓN DE SOLUBILIDAD DE LOS MATERIALES

En este estudio se determinó solamente la fracción asimilable en este tipo de solventes agua y citrato de amonio neutro, ambos se encuentran a un pH de neutralidad. El tiempo de solubilidad es de 24 horas con agitación moderada en el shaker de 200 rpm y temperatura controlada de 35°C.

**Tabla 3.10:** Contenido de fósforo para determinar la solubilidad en agua y citrato de amonio neutro.

Muestra	Contenido de %P			
	Solubilidad en agua		Solubilidad en citrato de amonio Neutro	
	% Extraído	% Extracción	% Extraído	% Extracción
Roca sin calcinar	0,87	5,57	1,64	10,49
1000 °C	1,14	7,20	1,79	11,31
1200 °C	2,05	12,33	4,25	25,56
1400 °C	3,80	22,58	5,86	34,82
Fosfato comercial	9,36	52,27	7,84	62,40

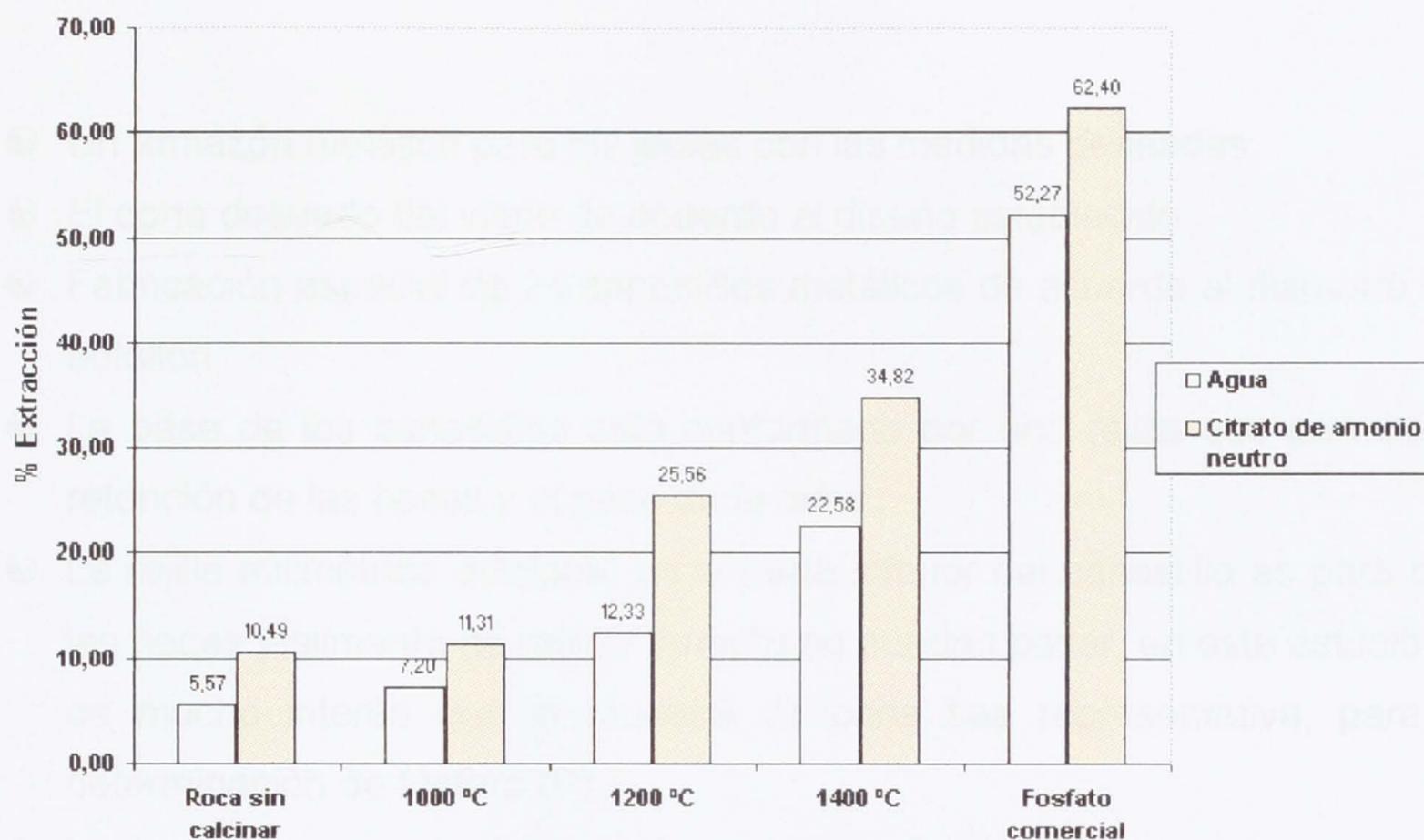


Figura 3.22. Curvas de lixiviación de la roca fosfórica a diferentes temperaturas y Fosfato comercial con agua y citrato de amonio neutro.

### 3.10.- EVALUACIÓN BIOLÓGICA

Las pruebas de evaluación biológica se realizaron en las instalaciones del Bioterio perteneciente al Centro de Alimentos y Productos Naturales (CAPN), ubicado en la Facultad de Ciencias y Tecnología de la UMSS de la ciudad de Cochabamba.

### 3.11. INFRAESTRUCTURA

Las pruebas fueron llevadas a cabo en 24 jaulas metabólicas individuales especiales que tuvieron las siguientes características:

- ☯ Un armazón metálico para las jaulas con las medidas deseadas.
- ☯ El corte deseado del vidrio de acuerdo al diseño establecido.
- ☯ Fabricación especial de 24 canastillos metálicos de acuerdo al diámetro del botellón.
- ☯ La base de los canastillos esta conformada por una rejilla que permite la retención de las heces y el paso de la orina.
- ☯ La rejilla milimétrica adicional en la parte inferior del canastillo es para que las heces y alimento de menor tamaño no puedan pasar, en este estudio es de mucho interés que la muestra de orina sea representativa, para la determinación de fósforo (P).
- ☯ La forma de embudo del botellón nos da la facilidad de recolectar la orina de manera mas practica sin perdidas.
- ☯ También la jaula consta de un comedero, bebedero para suministrarle alimento pesado y agua ad libitum (a voluntad).

En la figura 3.23 se puede observar el armazón metálico tiene una altura de 187.5 [cm], ancho 156 [cm] y espesor 40 [cm]. Con capacidad para 24 animales, se realizaran 4 tratamientos por cada fila de 6 jaulas. El diseño es especial para que el botellón descansa firmemente y no tenga ningún movimiento, no sufra una caída. También garantiza el movimiento cómodo del animal en el interior de la jaula.



**Figura. 3.23. Armazón metálico con sus respectivas jaulas**

El canastillo tiene un diámetro de 17.5 [cm] y una altura de 24 [cm]. Con rejilla en la parte inferior de 4[mm<sup>2</sup>] que sirve para retener el alimento pequeño y heces que excrete el animal (Ver figura 3.24). En la figura 3.25 se observa desde arriba la jaula con y sin animal.

### 3.12. COMPOSICIÓN DEL ALIMENTO QUE SE USARÁ PREPARADO

Las medidas nutricionales de los alimentos se obtienen de acuerdo al porcentaje de los nutrientes que se encuentran en el alimento. Las medidas de los nutrientes se obtienen en cinco ensayos experimentales son: Control, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, haciendo un total de 25 animales.

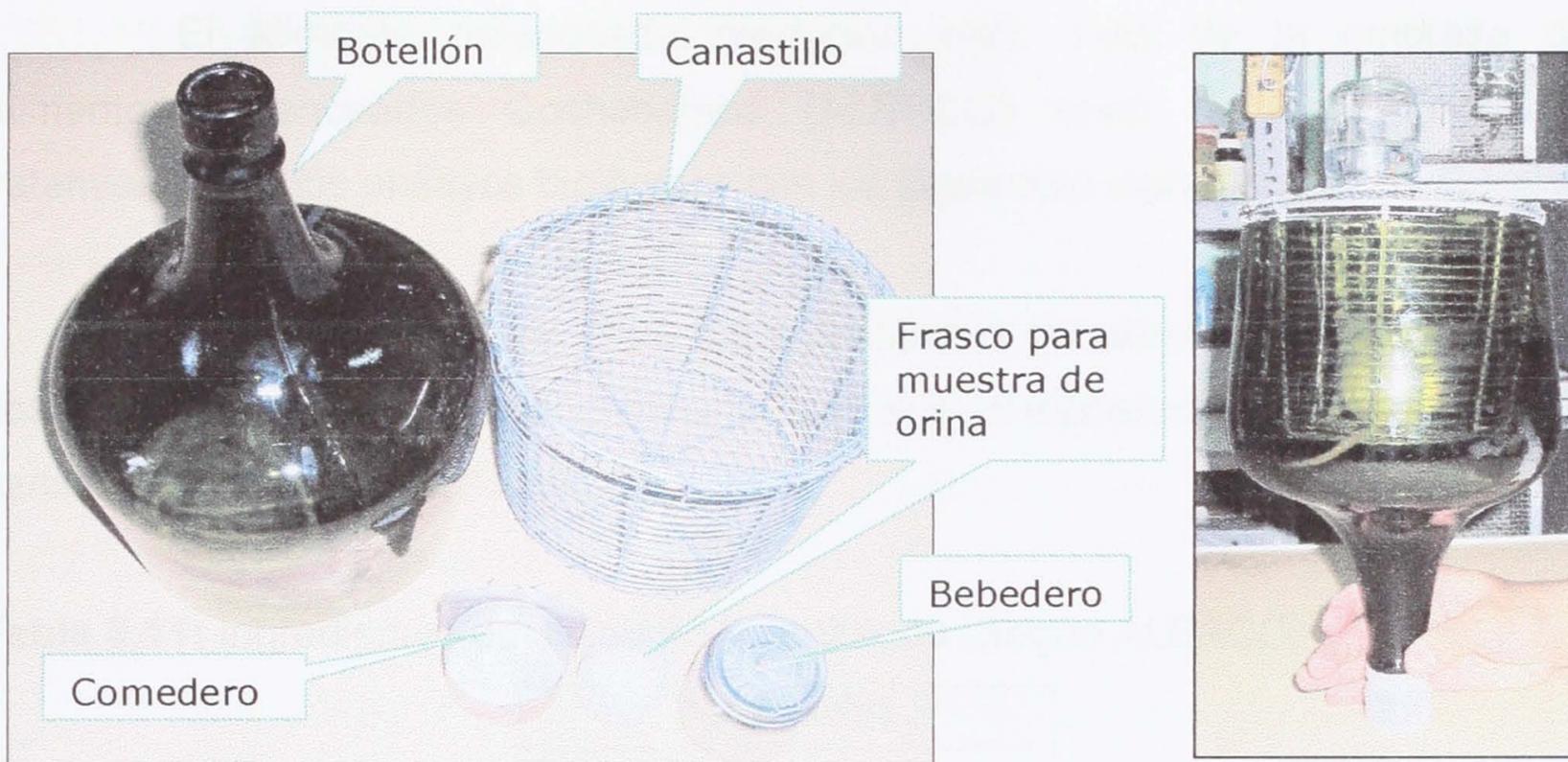


Figura 3.24. Partes de la jaula metabólica y su armado

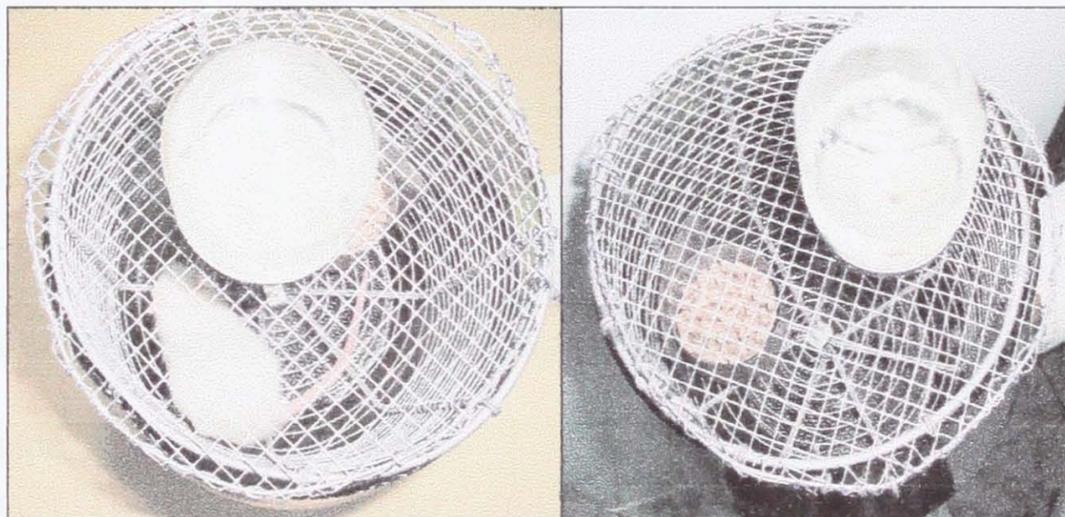


Figura 3.25. Vista de arriba con y sin animal

### 3.12. COMPOSICIÓN DEL ALIMENTO BALANCEADO PREPARADO

Las mezclas alimentarias para la evaluación biológica, se ajustaron de acuerdo al porcentaje de proteína y energía requeridos por las ratas en crecimiento. Las mezclas con las que se trabajó en cinco ensayos experimentales son: Control, A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub>, constituidos por seis repeticiones en cada grupo haciendo un total de 30 animales.

El alimento balanceado producido para aves de la empresa de Alimentos Balanceados Cochabamba (ALBACO) sirvió de base para los tratamientos en los ensayos biológicos con los siguientes ingredientes.

En la tabla 3.11 se tiene los ingredientes del alimento base, el cual la dosificación es desconocida debido a que sus composiciones son de interés particular de la empresa ALBACO.

**Tabla 3.11:** Ingredientes del alimento balanceado (Según ALBACO)

Ingredientes
harina de maíz
harina de soya
Afrechillo
Conchilla
premezcla de vitaminas
Minerales
Sal

**Tabla 3.12:** Su composición bromatológica y química (Según ALBACO)

Proteína (%)	Energía Kcal/kg	Grasa (%)	Fibra (%)	Calcio (%)	Fósforo Fítico (%)
18.3	2950	3.8	3.6	0.9	0.55

Es un alimento balanceado peletizado en 10 mm y embolsadas en sacos de 46 kg

### 3.12.1. PREPARACIÓN DE LAS DIETAS

Las dietas con las que se trabajaron fueron:

**Dieta A<sub>0</sub>:** Es la dieta patrón (Leche 50% y 50% de almidón de maíz)

**Control:** Sin adición de fosfato (Solo alimento balanceado Base)

**Dieta A<sub>1</sub>:** Adición de fosfato sin tratamiento (roca sin calcinar)

**Dieta A<sub>2</sub>:** Adición de fosfato con tratamiento (roca calcinada)

**Dieta A<sub>3</sub>:** Adición de fosfato comercial (Bicálcico)

La tabla 3.13 representa la composición de las dietas en Kcal/100 g y %P son de acuerdo a los requerimientos y peso del animal.

**Tabla 3.13:** Composición de la dieta base de los tratamientos con adición de fósforo inorgánico

Dietas	Kcal/100g	% Proteína	% Fósforo Fítico	% Fósforo Inorgánico
A <sub>0</sub>	413	11	-	-
Control	384	11	0,33	-
A <sub>1</sub>	384	11	0,33	0,35
A <sub>2</sub>	384	11	0,33	0,35
A <sub>3</sub>	384	11	0,33	0,35

### 3.13. PREPARACIÓN DE LOS ANIMALES

- ☉ Se utilizaron ratas albinas hembras de la cepa wistar, después del destete con un peso promedio de (60-65 g) (Ver figura 3.26). El ensayo tuvo una duración de 31 días, en condiciones ambientales óptimas de temperatura (22°C) y 12-14 horas luz, humedad relativa ambiente de 50-60% y ventilación constante.
- ☉ Se asignaron 6 animales por cada dieta o tratamiento

- ☉ Los animales utilizados en el ensayo fueron previamente sometidos a un ayuno de 4-6 horas para la eliminación de residuos de la alimentación anterior.
- ☉ Las ratas fueron escogidas al azar y colocadas en jaulas metabólicas individuales (provistas de comederos, bebederos y frascos colectores de orina y una rejilla milimétrica que retenga los elementos pequeños como las heces y alimento rechazado. (Ver figura 3.24).



Figura 3.26. Animales en peso listos para la evaluación biológica

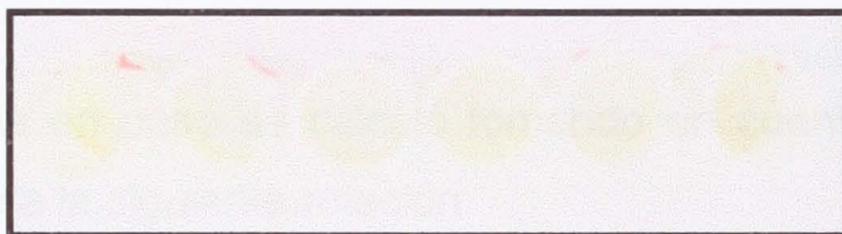
### 3.14. SUMINISTRO DE LAS DIETAS

El protocolo seguido para el suministro de dietas fue el siguiente:

- ☉ Las dietas fueron pesadas y suministradas a las unidades de medición (rata) en forma ad libitum cada día a la misma hora.
- ☉ El tiempo que de suministro de la dieta fue de 31 días, periodo de duración de una evaluación biológica.
- ☉ El suministro de agua fue también ad libitum, cambiando diariamente.
- ☉ El alimento rechazado por cada animal, se colecto y peso diariamente para determinar el alimento consumido.

- Se colecta la orina y heces de cada animal diariamente, los cuales fueron depositados en frascos individuales debidamente identificados, para el análisis químico de fósforo.

La figura 3.27 muestra la cantidad de orina recolectada por día siendo aproximadamente 1-2 ml.



**Figura 3.27. Cantidad de muestras de Heces/día y orina/día**

La figura 3.28 muestra la cantidad de heces recolectada por día siendo aproximadamente 10 g.



**Figura 3.28. Cantidad de muestras de heces/día y orina/día**

La figura 3.29 muestra el pesado del animal, este es codificado y se controla el incremento de peso diariamente.



**Figura 3.29. Pesado de las ratas diariamente**

### 3.15. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS BIOLÓGICOS

Al finalizar la evaluación biológica, se calcularon los parámetros indicados que son: Incremento de peso, retención de fósforo en el animal, y Retención Neta Aparente de fósforo (%RNA).

#### 3.15.1. INCREMENTO DE PESO Y RETENCIÓN DE FÓSFORO

La ganancia en peso se calculó tomando en cuenta los pesos finales e iniciales de acuerdo a la siguiente relación:

$$IP (g) = \text{Peso}_{\text{FINAL}} - \text{Peso}_{\text{INICIAL}}$$

Para realizar un seguimiento preciso de la ganancia en peso de cada animal, se realizó un registro diario del pesaje. En la tabla 3.14 a continuación se tiene los datos registrados durante la investigación.

**Tabla 3.14:** Incremento de peso (IP) de los tratamientos

Mezclas	Incremento de peso (IP) gramos por los animales						
	1	2	3	4	5	6	Promedio
A <sub>0</sub>	101	93	104	99	96	108	100
Control	53	59	62	54	51	55	56
A <sub>1</sub>	62	60	57	68	67	58	62
A <sub>2</sub>	85	92	89	86	90	94	89
A <sub>3</sub>	89	93	90	91	96	99	93

En la tabla 3.15, 3.16 y 3.17 se tiene la cantidad de alimento consumido por cada uno de los animales, calculando la cantidad de porcentaje de fósforo Fítico e inorgánico ingerido por la dieta de acuerdo a la cantidad de alimento consumido.

**Tabla 3.15:** Cantidad de alimento consumido en los animales en la evaluación biológica.

Mezclas	Cantidad de Alimento Ingerido por los animales (gramos)						
	1	2	3	4	5	6	Promedio
A <sub>0</sub>	415	426	435	420	440	408	424
Control	341	348	350	342	344	345	345
A <sub>1</sub>	332	330	335	337	328	332	332
A <sub>2</sub>	365	369	360	361	357	368	363
A <sub>3</sub>	380	375	377	372	382	379	378

**Tabla 3.16:** Cantidad de %P Fítico ingerido en las dietas

Mezclas	Cantidad de %P Fítico suministrado por cantidad de gramos ingerido						
	1	2	3	4	5	6	Promedio
Control	1,535	1,566	1,575	1,539	1,548	1,553	1,553
A <sub>1</sub>	1,494	1,485	1,508	1,517	1,476	1,494	1,496
A <sub>2</sub>	1,643	1,661	1,620	1,625	1,607	1,656	1,635
A <sub>3</sub>	1,710	1,688	1,697	1,674	1,719	1,706	1,699

En la tabla 3.17 el control no tiene adición de fósforo inorgánico, se considera como "0 %".

**Tabla 3.17:** Cantidad de %P Inorgánico ingerido en las dietas

Mezclas	Cantidad de %P Inorgánico suministrado por cantidad de gramos ingeridos						
	1	2	3	4	5	6	Promedio
Control	0	0	0	0	0	0	0
A <sub>1</sub>	1,162	1,155	1,173	1,180	1,148	1,162	1,163
A <sub>2</sub>	1,278	1,292	1,260	1,264	1,250	1,288	1,272
A <sub>3</sub>	1,330	1,313	1,320	1,302	1,337	1,327	1,321

En la tabla 3.18 se indica el contenido de fósforo total que se determino terminada la evaluación biológica.

**Tabla 3.18:** Cantidad de %P total (Fítico+Inorgánico) ingerido por las dietas

Mezclas	Cantidad de %P Total (Fítico+Inorgánico) Suministrado por gramos de la dieta						
	1	2	3	4	5	6	Promedio
Control	1,535	1,566	1,575	1,539	1,548	1,553	1,553
A <sub>1</sub>	2,656	2,640	2,680	2,696	2,624	2,656	2,659
A <sub>2</sub>	2,920	2,952	2,880	2,888	2,856	2,944	2,907
A <sub>3</sub>	3,040	3,000	3,016	2,976	3,056	3,032	3,020

En las tablas siguientes 3.19 y 3.20 se determino el contenido de fósforo total (Fítico + Inorgánico) excretado y retenido por los animales en los tratamientos.

**Tabla 3.19:** Contenido de fósforo total (Inorgánico+Fítico) excretado por los animales en heces y orina.

Mezclas	Animales cantidad de % P Total excretado (Heces + orina)						
	1	2	3	4	5	6	Promedio
Control	1,151	1,175	1,181	1,154	1,161	1,164	1,164
A <sub>1</sub>	1,760	1,749	1,776	1,786	1,738	1,760	1,761
A <sub>2</sub>	1,487	1,504	1,467	1,471	1,455	1,500	1,481
A <sub>3</sub>	1,309	1,292	1,299	1,282	1,316	1,306	1,300

En la tabla 3.20 el control solo se determino %P Fítico debido a que no tiene ninguna adición de fósforo.

**Tabla 3.20:** Contenido de fósforo total (Inorgánico+Fítico) retenido por los animales.

Mezclas	Cantidad de % P Total retenido por los animales						
	1	2	3	4	5	6	Promedio
Control	0,384	0,392	0,394	0,385	0,387	0,388	0,388
A <sub>1</sub>	0,896	0,891	0,905	0,910	0,886	0,896	0,897
A <sub>2</sub>	1,433	1,448	1,413	1,417	1,401	1,444	1,426
A <sub>3</sub>	1,625	1,603	1,612	1,590	1,633	1,620	1,614

En la tabla 3.21 se tiene el contenido de P inorgánico retenido haciendo la diferencia con el %P fítico retenido de la dieta control para todas columnas respectivamente, el análisis nos determina %P total, no diferencia entre los dos tipos de fósforo.

**Tabla 3.21:** Contenido de fósforo Inorgánico retenido por los animales

Mezclas	Cantidad de % P Inorgánico retenido por los animales						Promedio
	1	2	3	4	5	6	
Control	0	0	0	0	0	0	0
A <sub>1</sub>	0,509	0,500	0,511	0,523	0,499	0,508	0,508
A <sub>2</sub>	1,046	1,057	1,019	1,030	1,014	1,056	1,037
A <sub>3</sub>	1,238	1,212	1,218	1,203	1,246	1,232	1,225

### 3.15.2. RETENCIÓN NETA APARENTE (RNA %)

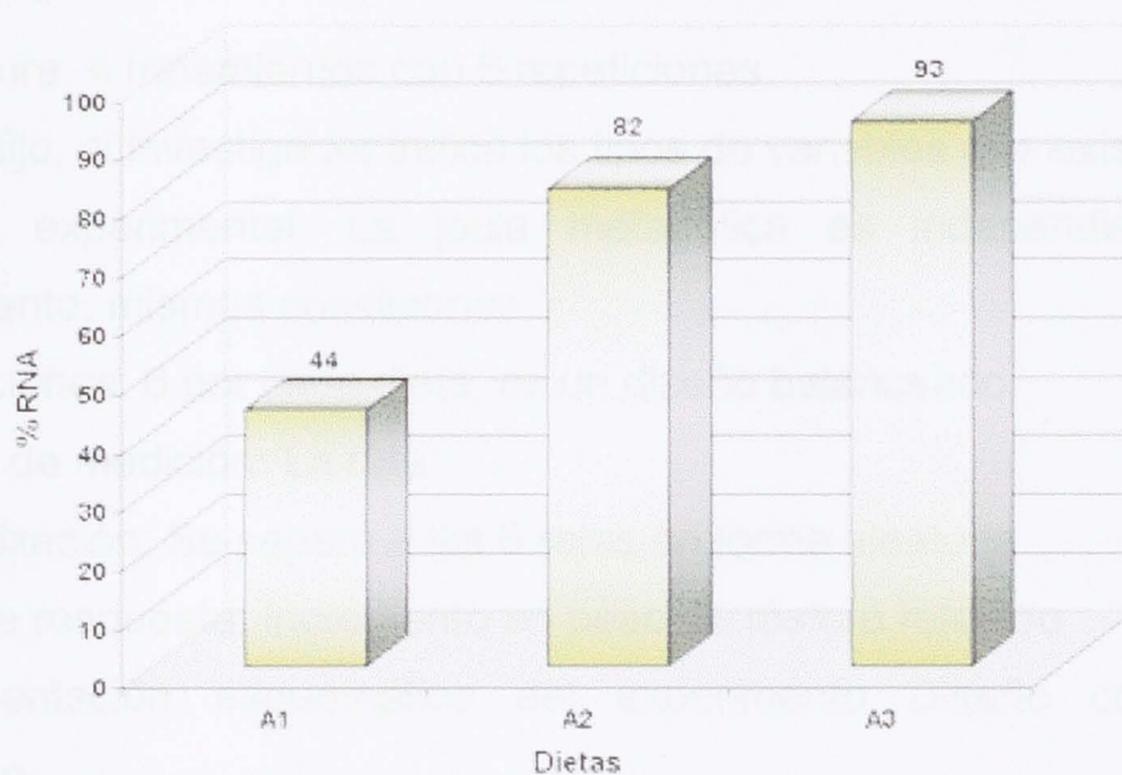
Con la cantidad de fósforo inorgánico ingerida y la excretada en las heces y orina se calculó el porcentaje de retención neta aparente, al final de la evaluación biológica, la formula usada es la siguiente:

$$\text{RNA (\%)} = \frac{\text{P Ingerido} - (\text{P Excretado en heces} + \text{P Excretado en orina})}{\text{P Ingerido}} \times 100$$

Las dietas A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub> tienen mayor % (RNA) de fósforo inorgánico durante la evaluación biológica. En la tabla 3.22 el mayor % es el fosfato comercial con un 92.682%, seguida de la dieta A<sub>2</sub> con un 81.521%. La mayor retención neta aparente de fósforo esta relacionada con la mayor disponibilidad del elemento. Sin embargo la proximidad con los valores obtenidos para los fosfatos de yacimiento y el comercial son suplementos con una fuente de alta disponibilidad.

**Tabla 3.22:** Retención neta aparente (%RNA)

Mezclas	Retención neta aparente de fósforo (RNA)%						Promedio
	1	2	3	4	5	6	
A <sub>1</sub>	43,804	43,290	43,564	44,322	43,467	43,718	43,694
A <sub>2</sub>	81,847	81,811	80,873	81,487	81,120	81,988	81,521
A <sub>3</sub>	93,083	92,308	92,273	92,396	93,194	92,841	92,682

**Figura 3.30.** Retención neta aparente (RNA) vs dietas

### 3.16. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

#### 3.16.1. PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Los objetivos de la investigación son los siguientes.

- ☉ Determinar la ganancia en peso de las ratas con 4 dietas diferentes en suplementos minerales de P
- ☉ Determinar la retención de % de fósforo en las ratas con 4 dietas diferentes en suplementos minerales de P.

## Diseño de los tratamientos:

- ☯ Diseño completamente aleatorio (DCA)
- ☯ Factores: Dietas → Control
  - Dieta A<sub>1</sub>
  - Dieta A<sub>2</sub>
  - Dieta A<sub>3</sub>
- ☯ Niveles: 4
- ☯ Estructura: 4 tratamientos con 6 repeticiones
- ☯ Efecto fijo, el investigador indica los tipos de variables que existiran
- ☯ Unidad experimental: La jaula metabólica es independiente de otro tratamiento, mismas condiciones.
- ☯ Repeticiones: 6 por cada dieta, es un diseño balanceado.
- ☯ Unidad de medición: La rata
- ☯ Aleatorización: Se separa a las 6 ratas en forma aleatoria
- ☯ Variable respuesta: Incremento en peso, % fósforo retenido
- ☯ Representación esquemática del experimento Diseño completamente aleatorio

Dietas	Animales					
	1	2	3	4	5	6
Control	A	B	D	B	C	A
A1	C	E	F	D	A	F
A2	D	A	D	C	B	C
A3	E	F	B	E	F	E

Ratas: A, B, C, D, E, F

N = 24 (Nr de UE)

r = 6 (Nr de UE/trat)

### 3.16.2. MODELO ESTADÍSTICO

Se empleo el modelo de análisis de varianza con criterio de clasificación ANOVA, que cumple con los supuestos de la prueba de normalidad y homogeneidad el modelo matemático es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:  $i = 1, 2, 3, 4$  (Dietas)

$j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  (Ratas por dieta)

$$\varepsilon_{ij} \approx NIID(0, \sigma_e^2)$$

Es una distribución/ Normal Idéntica Independiente Distribuida de los supuestos del modelo.

$Y_{ij}$  = Valor variable de respuesta observado en la j-ésima unidad experimental

$\mu$  = Media General

$\tau_i$  = Efecto fijo del i-ésimo tratamiento

$\varepsilon_{ij}$  = Efecto aleatorio de los residuales  $\varepsilon_{ij} \sim \sigma_e^2$

### 3.16.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS

Si P\_Value < 0.05 = Diferencias significativas \* (se rechaza la  $H_0$ )

Si P\_Value < 0.01 = Diferencias altamente significativas \*\* (se rechaza la  $H_0$ )

Si P\_Value  $\geq$  0.05 = No hay diferencias significativas (se acepta la  $H_0$ )

1.  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$  (las dietas son iguales para las variables de respuesta).
2.  $H_1$ : Al menos una dieta es diferente
3.  $\alpha = 0.05$

4. Estadístico de prueba:  $F = CM_f/CMe$

5. Región de rechazo

Rechazar  $H_0$  si  $P\_value < \alpha$

6. Conclusiones

### 3.16.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

#### 3.16.4.1. DESCRIPTIVOS

Los estadísticos descriptivos de la tabla 3.22 nos determina los datos generales de las variables de estudio, Incremento de peso (gramos) y retención de fósforo (%)

**Tabla 3.23** Estadísticos descriptivos

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza
Incremento en peso (gramos)	24	51	99	75	17,14	293,74
Retención de fósforo en el animal	24	0	1,245	0,692	0,49	0,24
N válido (según lista)	24					

En la tabla 3.23 las correlaciones nos indican que el incremento de peso esta en función a la retención de fósforo en el animal con una pendiente positiva.

**Tabla 3.24** Correlaciones

		Incremento en peso (gramos)	Retención de fósforo en el animal
Incremento en peso (gramos)	Correlación de Pearson	1	0,94(**)
	Sig. (bilateral)		0,00
	N	24	24
Retención de fósforo en el animal	Correlación de Pearson	0,94(**)	1
	Sig. (bilateral)	0,00	
	N	24	24

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

### 3.16.4.2. INCREMENTO DE PESO EN EL ANIMAL

En este diagrama de caja la dieta A<sub>1</sub> reportado es casi similar al del control tiene tendencia a aumentar de peso pero se mantiene. Las dietas A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub> son casi similares por el cuartil 2 (50%) entre ellos. Forman dos grupos similares no existe una diferencia significativa entre ellos.

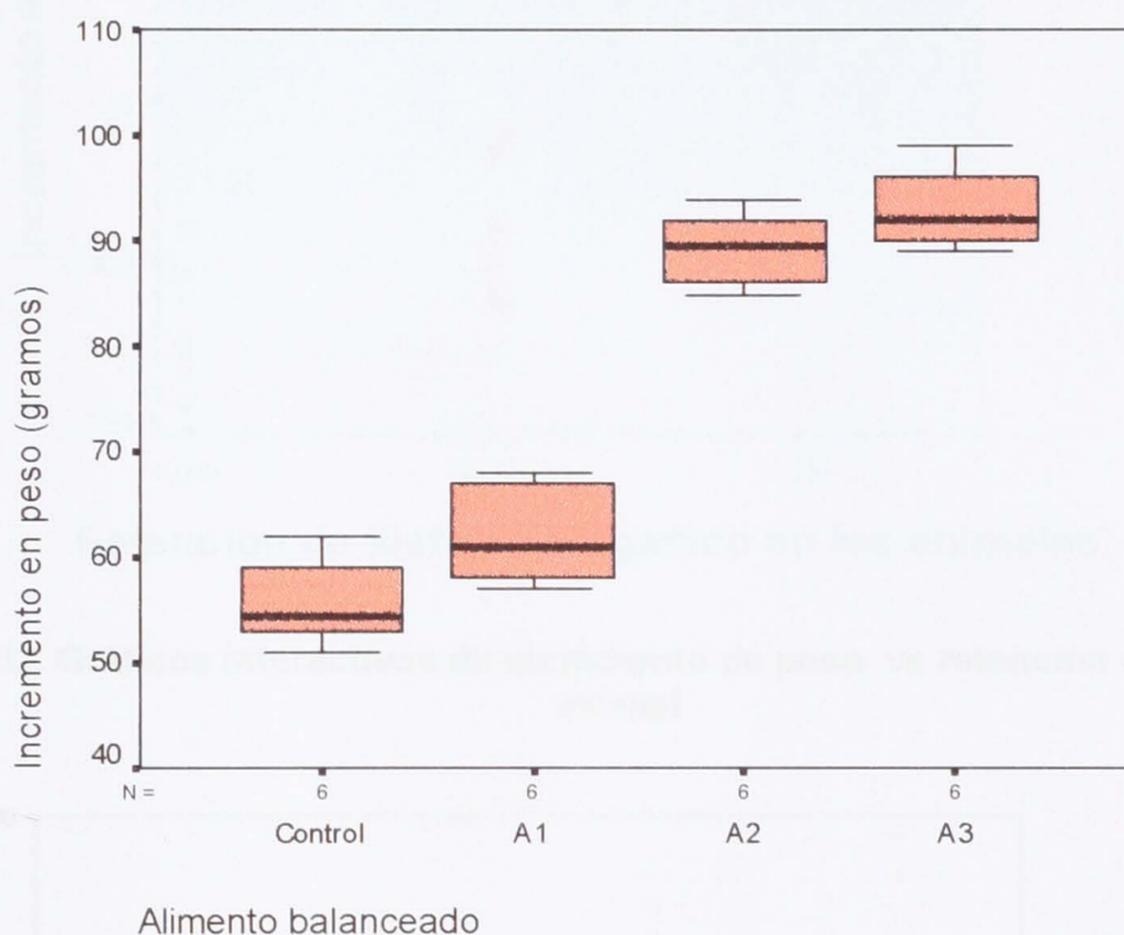
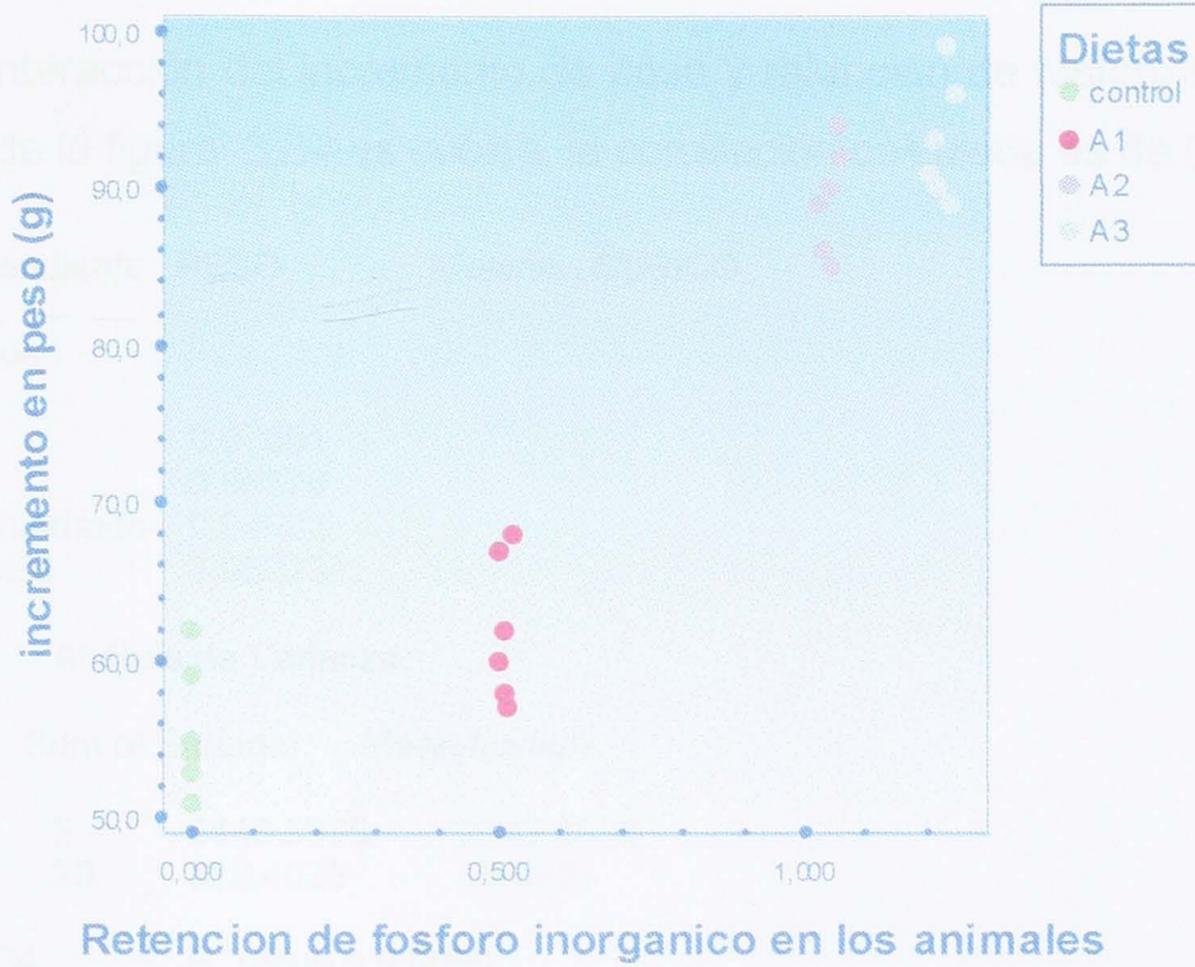


Figura 3.31. Diagrama de cajas del incremento de peso vs dietas

### 3.16.4.3. GRÁFICO INTERACTIVO

Estas figuras 3.32 y 3.33 muestran gráficos que representan la interacción de las variables de estudio, nos indica que la retención de fósforo influye en el incremento de peso. También el tipo de suplemento en las dietas influye en el incremento de peso del animal.



Retencion de fosforo inorganico en los animales

Figura 3.32. Gráficos interactivos de incremento de peso vs retención de fósforo en el animal

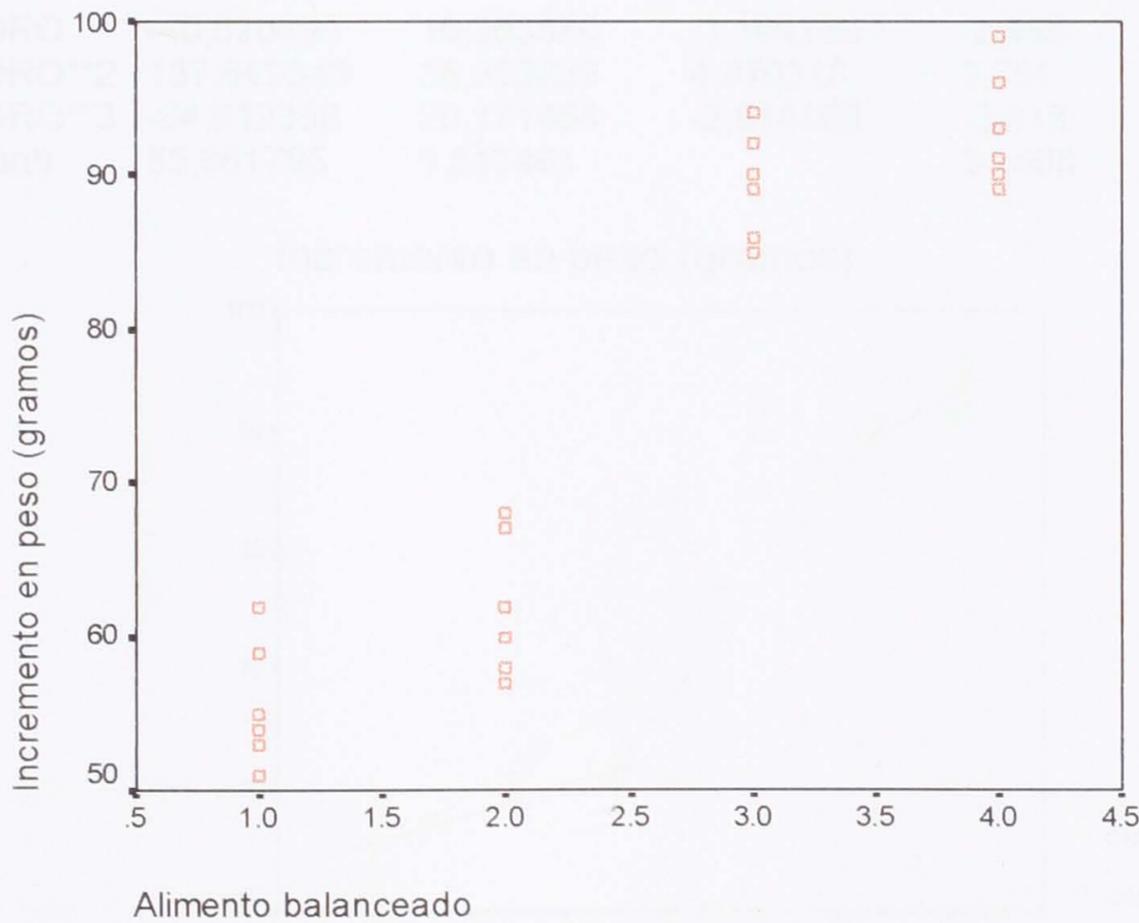


Figura 3.33. Gráficos interactivos de incremento de peso vs alimento balanceado (dietas)

Figura 3.34. Estimación curvilínea global del incremento de peso en los animales

### 3.16.4.4. ESTIMACIÓN CURVILÍNEA

La interacción del incremento de peso y retención de fósforo su estimación curvilínea de la figura 3.34 es cúbica, la correlación calculada es de 0.97667

Variable dependiente.. PESO                      Metodo.. CUBICO

Datos perdidos

Multiplo R                      0,97661  
 R Cuadrado                      0,95376  
 Ajustado R Cuadrado        0,94682  
 Error Estandar                3,95223

Análisis de Varianza:

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regresion	3	6443,5975	2147,8658
Residuales	20	312,4025	15,6201

F = 137,50634                      P\_Value = 0,0000

----- Variables dentro la Ecuación -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
FOSFORO	-40,820698	16,363670	-1,164356	-2,495	0,0215
FOSFORO**2	137,849349	36,652229	4,979318	3,761	0,0012
FOSFORO**3	-64,912358	20,171464	-2,914169	-3,218	0,0043
(Constant)	55,661795	1,613461		34,498	0,0000



Figura 3.34. Estimación curvilínea cúbica del incremento de peso en los animales

### 3.16.4.5. GRÁFICOS Q-Q NORMALES DE INCREMENTO DE PESO

Estas figuras nos determinan las líneas de tendencia que tienen cada una de las dietas en función al incremento de peso. Las tendencias son positivas para cada una de las dietas.

#### Gráfico Q-Q normal de Incremento en peso (gramos)

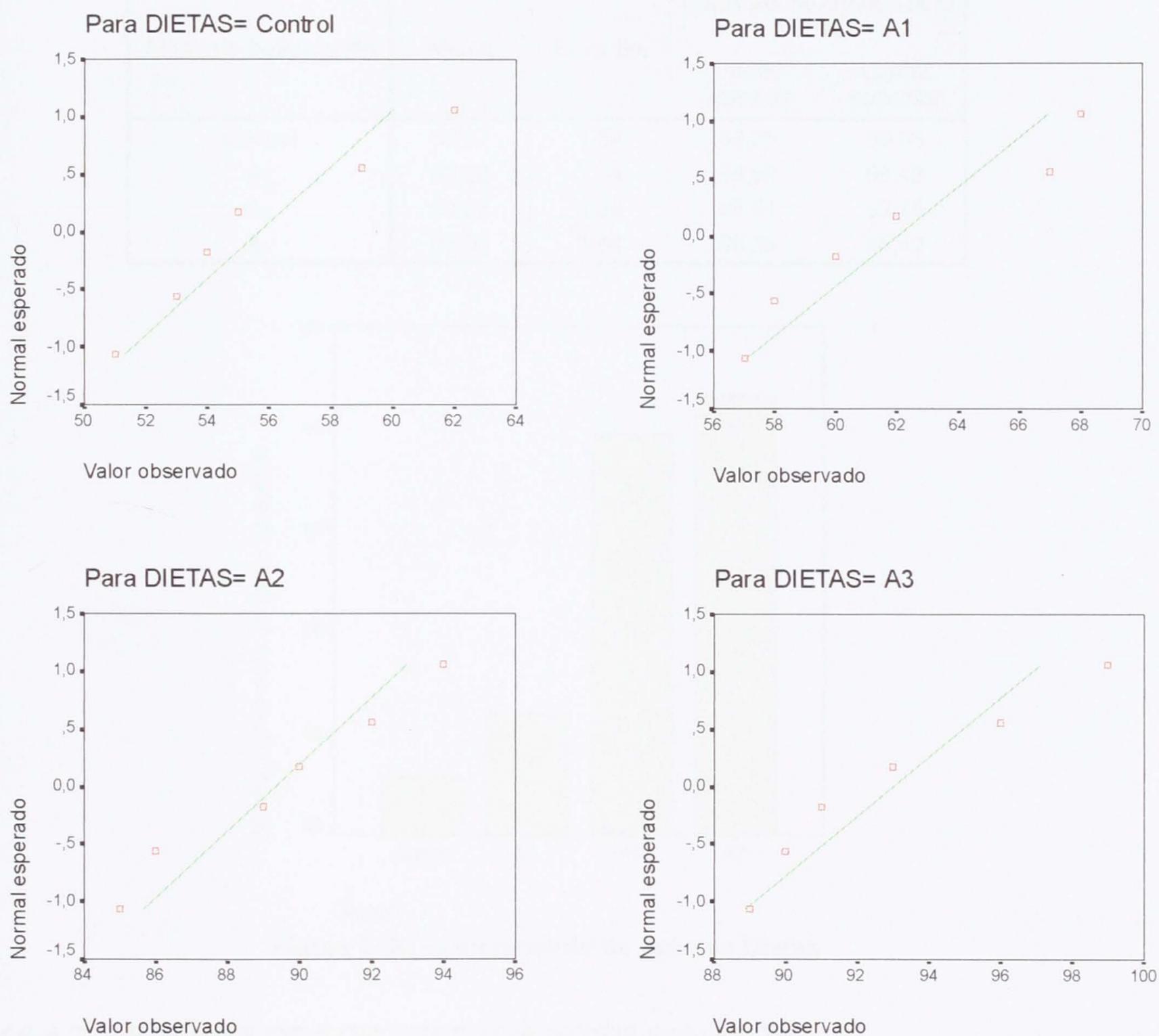


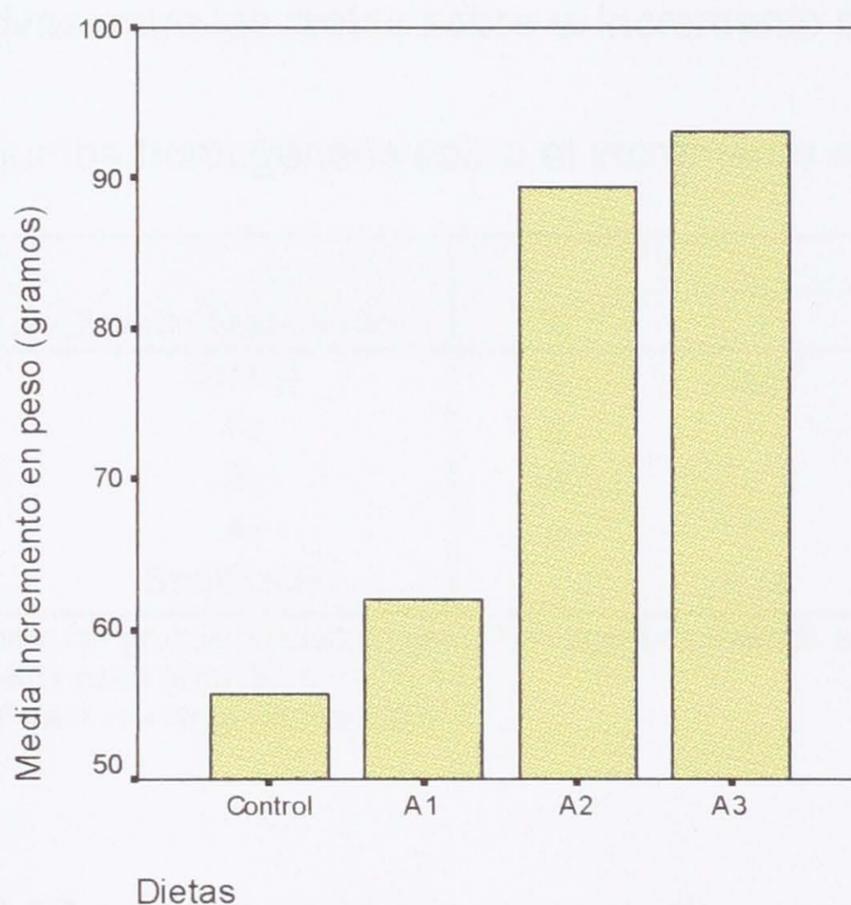
Figura 3.35. Estimación de tendencia para el incremento de peso en las dietas

### 3.16.4.6. MEDIAS MARGINALES ESTIMADAS

En la tabla 3.25 y la figura 3.36 se determinan las medias marginales de cada dieta en función al incremento de peso con un intervalo de confianza del 95% ( $P < 0.05$ ).

**Tabla 3.25** Variable dependiente Incremento en peso (gramos)

Alimento balanceado	Media	Error típ.	Intervalo de confianza al 95%.	
			Límite inferior	Límite superior
Control	55,67	1,64	52,25	59,08
A <sub>1</sub>	62,00	1,64	58,58	65,42
A <sub>2</sub>	89,33	1,64	85,91	92,75
A <sub>3</sub>	93,00	1,64	89,58	96,42



**Figura 3.36.** El incremento de peso vs Dietas

### 3.16.4.7. PRUEBAS DE LOS EFECTOS INTER-SUJETOS

Contrasta la hipótesis nula de que la varianza error de la variable dependiente es igual a lo largo de todos los grupos. En la tabla 3.26 la variable

incremento de peso rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), aceptamos la hipótesis alternativa ( $H_1$ ).

**Tabla 3.26** Variable dependiente: Incremento en peso (gramos)

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	6433,33(a)	3	2144,44	132,92	0,00
Intercept	135000,00	1	135000,00	8367,78	0,00
DIETAS	6433,33	3	2144,44	132,92	0,00
Error	322,67	20	16,13		
Total	141756,00	24			
Total corregida	6756,00	23			

a R cuadrado = 0,952 (R cuadrado corregida = 0,945)

**Conclusión:** Con un 99% de confianza concluimos que existen diferencias altamente significativas entre las dietas sobre el incremento de peso.

**Tabla 3.27** Subconjuntos homogéneos sobre el incremento en peso del animal

	Alimento balanceado	N	Subconjunto		
			1	2	3
Student-Newman-Keuls(a,b)	Control	6	55,67		
	A <sub>1</sub>	6		62,00	
	A <sub>2</sub>	6			89,33
	A <sub>3</sub>	6			93,00
	Significación		1,00	1,00	0,13

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos. Basado en la suma de cuadrados tipo III el término error es la Media cuadrática (Error) = 16,133.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 6,000

b Alfa = 0,05.

En la tabla 3.27 se los agrupa por subconjuntos para determinar que en el subconjunto 3 tienen un comportamiento similar en el incremento de peso de acuerdo a la dieta, lo que nos indica que las dietas A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub> no presentan diferencias significativas, lo que indica que ambas dietas son similares y por consiguiente pueden formar un mismo grupo homogéneo.

### 3.16.4.8. RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL ANIMAL

En el grafico figura 3.37 se muestra que la dietas son diferentes entre ellas pero la A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub> no tienen una diferencia muy significativa de retención de fósforo.

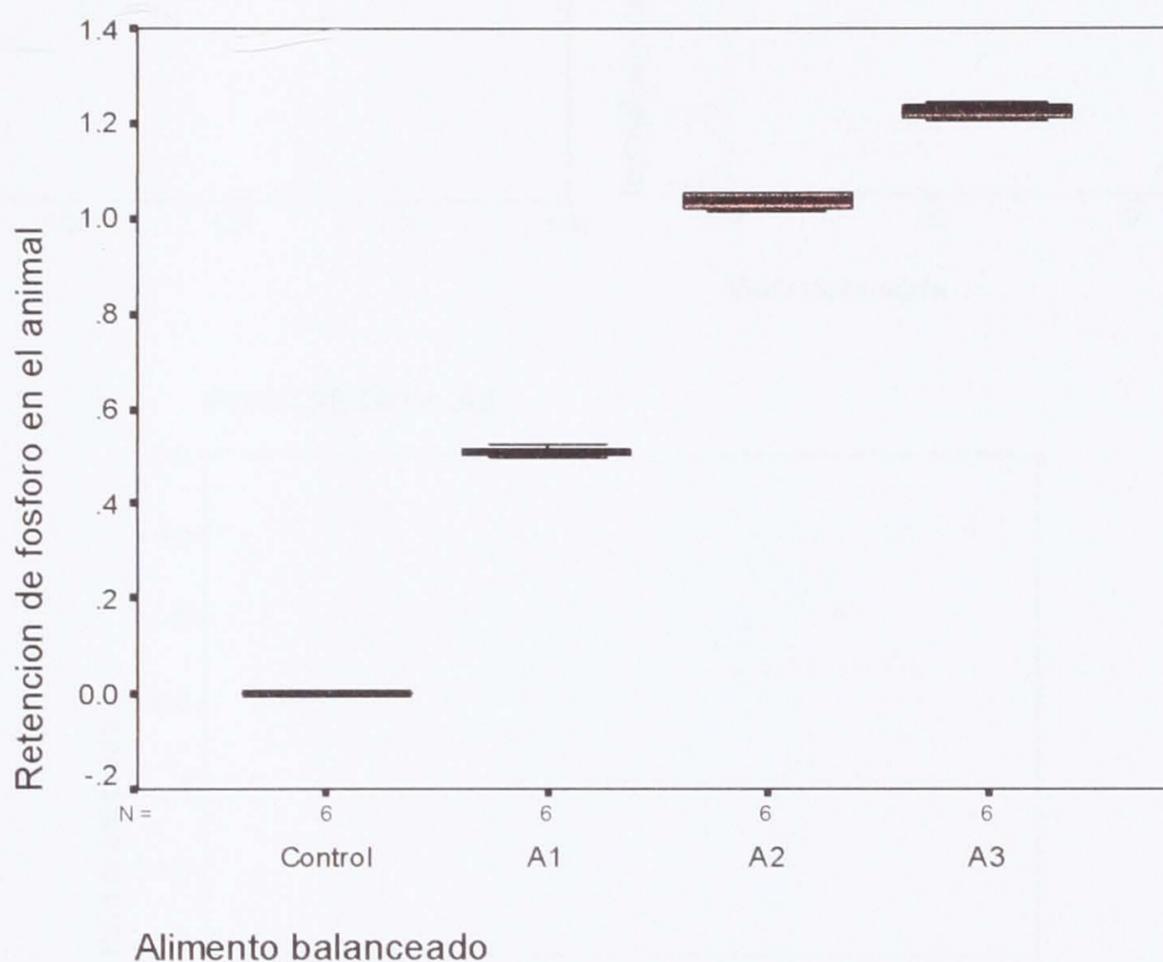


Figura 3.37. Retención de fósforo vs Alimento balanceado (Dietas)

### 3.16.4.9. GRAFICO Q-Q DE RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL ANIMAL

En las figuras 3.38 se determinan las líneas de tendencia que tienen cada una de las dietas en función a la retención de fósforo en el animal. Las tendencias son positivas para cada una de las dietas, estos gráficos no consideran la presencia del control debido a que su adición de P inorgánico es "0".

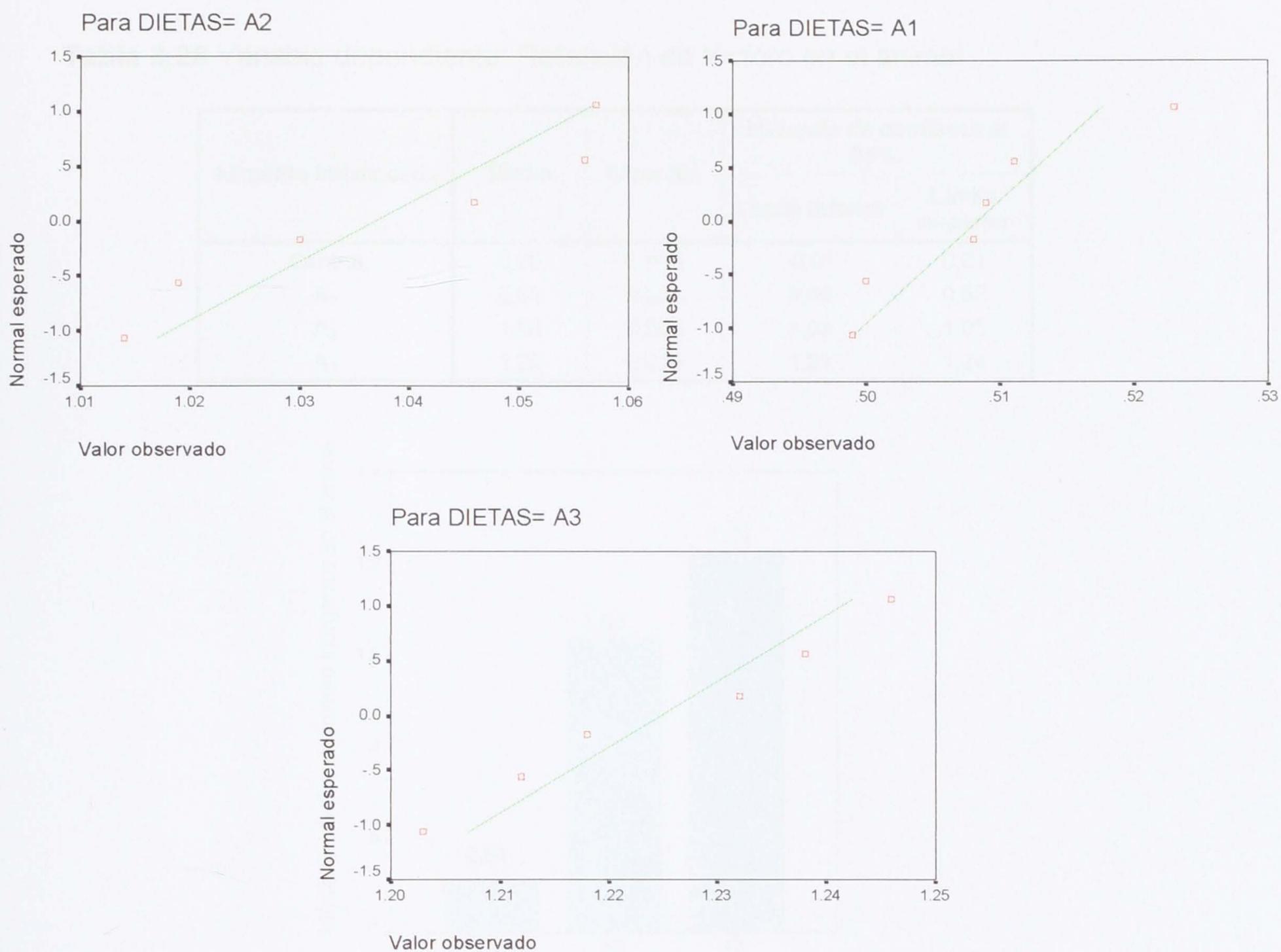


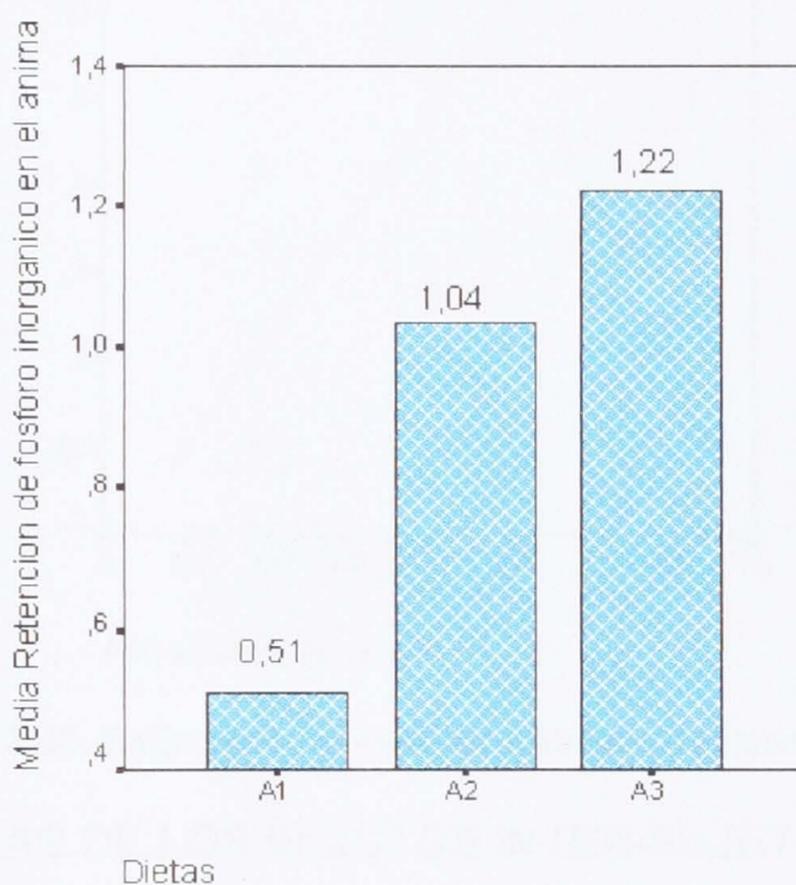
Figura 3.38. Estimación de tendencia para la retención de fósforo en las dietas

### 3.16.4.10. MEDIAS MARGINALES ESTIMADAS

En la tabla 3.28 y la figura 3.39 se muestran las medias marginales de cada una de las dietas están en función de la retención de fósforo inorgánico en el animal, con un intervalo de confianza del 95% ( $P < 0.05$ ).

**Tabla 3.28** Variable dependiente: Retención de fósforo en el animal

Alimento balanceado	Media	Error tip.	Intervalo de confianza al 95%.	
			Límite inferior	Límite superior
Control	0,00	0,005	-0,01	0,01
A <sub>1</sub>	0,51	0,005	0,49	0,52
A <sub>2</sub>	1,04	0,005	1,03	1,05
A <sub>3</sub>	1,22	0,005	1,21	1,24

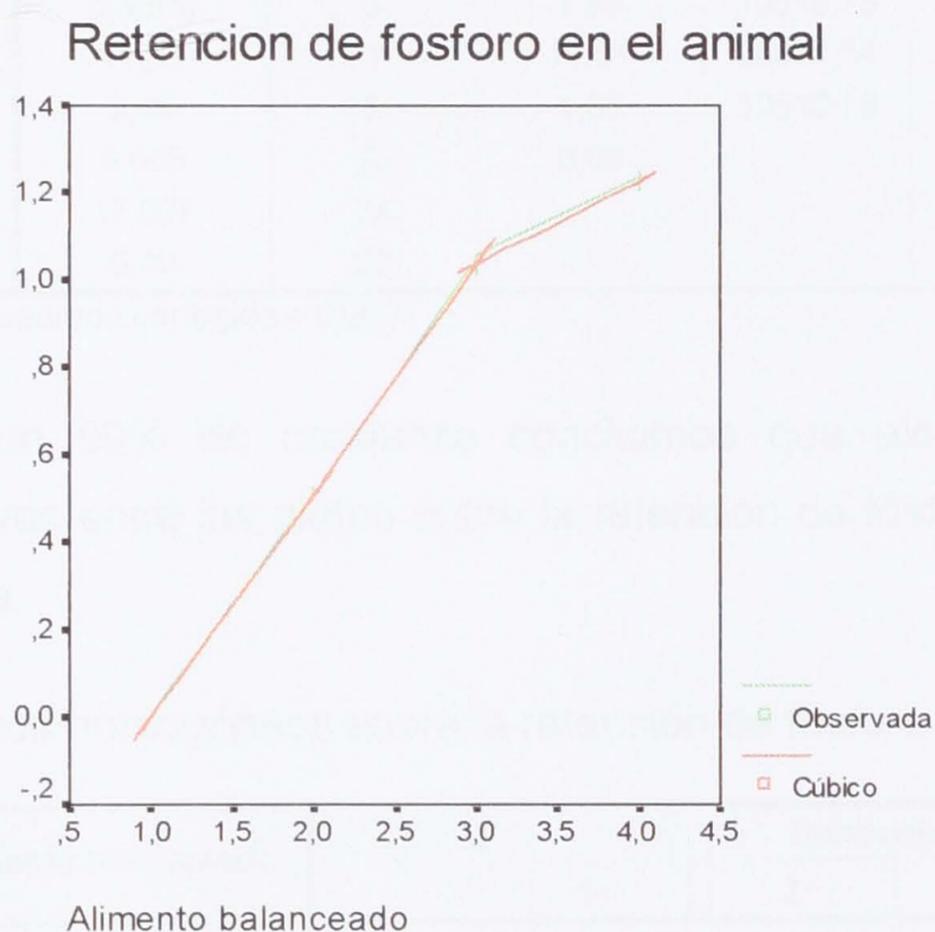
**Figura 3.39.** La retención de fósforo vs Alimento balanceado (Dietas)

### 3.16.4.11. ESTIMACIÓN CURVILÍNEA

La estimación de la retención de fósforo en el animal en función a las dietas se observa en la figura 3.40 es cúbica, la correlación calculada es de 0.999

MODELO: MOD\_1.  
Independiente: DIETAS

Dependiente	Método	R Cuadrado	DF	Sigf	b0	b1	b2	b3
FOSFORO	CÚBICO	0,999	20	10510,8	0,000	-0,1268	-0,1843	,3713 -0,0602



**Figura 3.40. Estimación curvilínea cúbica de retención de fósforo**

### 3.16.4.12. PRUEBAS DE LOS EFECTOS INTER-SUJETOS

Contrasta la hipótesis nula de que la varianza error de la variable dependiente es igual a lo largo de todos los grupos. En la tabla 3.29 la variable retención de fósforo rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), aceptamos la hipótesis alternativa ( $H_1$ ).

**Tabla 3.29** Pruebas de los efectos inter-sujetos. Variable dependiente: Retención de fósforo en el animal

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	Gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	5,49(a)	3	1,83	10510,78	0,00
Intersección	11,51	1	11,51	66074,54	0,00
DIETAS	5,49	3	1,83	10510,78	0,00
Error	0,003	20	0,00		
Total	17,007	24			
Total corregida	5,49	23			

a R cuadrado = 0,999 (R cuadrado corregida = 0,999)

**Conclusión:** Con un 99% de confianza concluimos que existen diferencias altamente significativas entre las dietas sobre la retención de fósforo en el animal de acuerdo a la dieta.

**Tabla 3.30** subconjuntos homogéneos sobre la retención de fósforo en el animal

	Alimento balanceado	N	Subconjunto			
			1	2	3	4
Student-Newman-Keuls(a,b)	Control	6	0,00			
	A <sub>1</sub>	6		0,51		
	A <sub>2</sub>	6			1,04	
	A <sub>3</sub>	6				1,22
	Significación		1,00	1,00	1,00	1,00

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos. Basado en la suma de cuadrados tipo III El término error es la Media cuadrática (Error) = .000.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 6.000

b Alfa = .05.

En la tabla 3.30 su agrupación los clasifica en subconjuntos diferentes para cada dieta, debido a que la retención varía de acuerdo al tipo de fósforo utilizado, este es diferente para todas las dietas. Pero no existen diferencias significativas entre las dietas A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub>, lo que indica que ambas dietas llegarían a ser similares si aumentamos la cantidad de fósforo a la dieta A<sub>2</sub> para que la retención sea la misma para ambos materiales y formen un grupo homogéneo.

## CAPITULO 4

### CÁLCULOS DE INGENIERÍA PARA LA PLANTA PROPUESTA

#### 4. DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DEL FOSFATO TRICÁLCICO

##### 4.1. TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

Considerando los factores condicionantes, tales como; la capacidad financiera, disponibilidad de insumos, el mercado y la tecnología, han permitido determinar el tamaño del proyecto de tal forma que tenga carácter comercial, el proyecto tendrá una capacidad producción de 60 toneladas por día.

La disponibilidad de materia prima, energía eléctrica, gas natural, mano de obra, mercado y la infraestructura de transporte y costos, incidieron en la determinación de la localización, para tal fin se recurrió a la técnica de puntajes ponderados; resultando como mejor alternativa de localización, la localidad de Parotani a 40 km de la ciudad de Cochabamba.

El yacimiento estará localizado en la zona denominada Khara Launi (sobre la senda antigua que une Itapaya-Ecia y Wichu Rayo). Tiene una vinculación directa de 2 km a la carretera Cochabamba-Oruro, en dirección sudeste de esta, y a 47 km de la ciudad. El acceso en detalle se describe a continuación:

Cochabamba- Parotani	40,0 km (camino asfaltado)
Parotani-Punto de desvió	7,0 km (camino asfaltado)
Punto de desvió-Yacimiento	2,0 km (camino de tierra)
Total acceso desde Cochabamba:	47,9 km.

##### 4.2. DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

El diagrama del proceso de producción permite visualizar el flujo de los materiales, las operaciones unitarias que intervienen, y llega a constituirse en la

base de referencia para preparar la distribución de los equipos en función al diseño o disposición elegida. En la figura. 4.1 se muestra el diagrama del proceso.

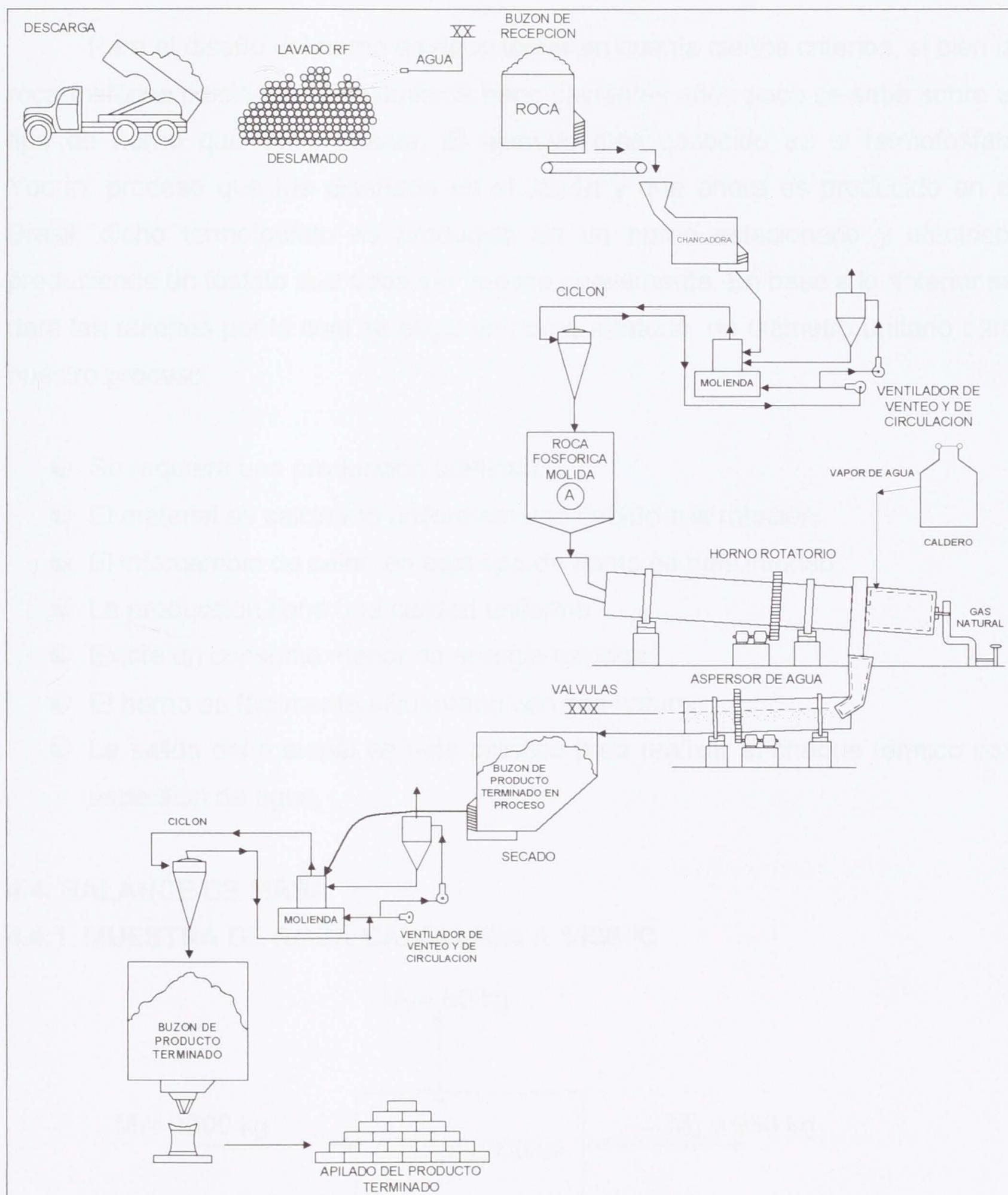


Figura.4.1. Diagrama de producción del Fosfato tricálcico

### 4.3. CÁLCULOS DE INGENIERÍA PARA LA PLANTA PROPUESTA

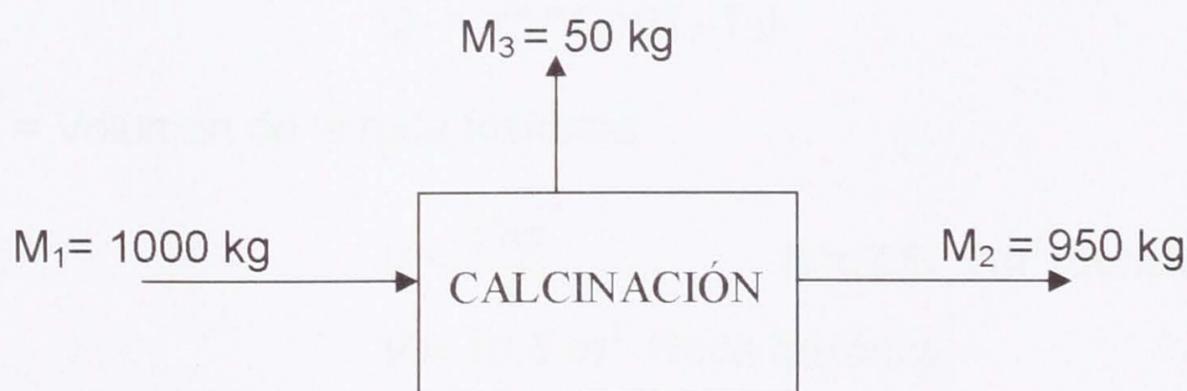
#### 4.3.1. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL HORNO

Para el diseño del horno se debe tomar en cuenta ciertos criterios, si bien la roca fosfórica calcinada fue estudiada hace bastantes años poco se sabe sobre el tipo de horno que debe usarse. El ejemplo mas conocido es el termofosfato Yoorin, proceso que fue diseñado en el Japón y que ahora es producido en el Brasil, dicho termofosfato es producido en un horno estacionario y eléctrico, produciendo un fosfato que debe ser molido nuevamente. En base a lo anterior se dará las razones por la cual se eligió un horno rotatorio de diámetro unitario para nuestro proceso.

- ☉ Se requiere una producción continua.
- ☉ El material es calcinado uniformemente debido a la rotación.
- ☉ El intercambio de calor en este tipo de horno es más intenso.
- ☉ La producción tiene una calidad uniforme.
- ☉ Existe un consumo menor de energía calórica.
- ☉ El horno es fácilmente alimentado con gas natural.
- ☉ La salida del material es más práctico para realizar el choque térmico con aspersión de agua.

### 4.4. BALANCE DE MASA

#### 4.4.1. MUESTRA DE ROCA CALCINADA A 1400 °C



$M_1$  = Roca fosfórica  
 $M_2$  = Roca fosfórica calcinada  
 $M_3$  = Perdidas por calcinación

#### 4.5. BALANCE DE ENERGÍA

Para realizar el balance de energía se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- El movimiento físico que ocurre dentro del horno, de la pendiente, su rotación, la materia prima que se utiliza y su densidad.
- La transmisión de calor, así como también las pérdidas de calor por convección, conducción y radiación.
- El proceso termoquímico dentro del horno y los factores que afectan en la combustión.
- La formación del revestimiento, sus causas, los efectos y los remedios que se debe observar.

##### 4.5.1. APORTE DE ENERGÍA

$$Q_{ap} = P_{cj} * M$$

$P_{cj}$  = Poder calorífico del gas natural =  $4,2 * 10^4$  kJ/kg

$M$  = Masa del gas natural

$$Q_{ap} = 4.2 * 10^4 * M \text{ kJ/kg}$$

##### 4.5.2. CALOR NECESARIO PARA CALENTAR LA ROCA FOSFÓRICA

Es el calor necesario para calentar la roca fosfórica desde la temperatura ambiente hasta la temperatura deseada ( $1400^{\circ}\text{C}$ ).

$$Q_1 = V * J * C_p * (T_2 - T_1)$$

$V$  = Volumen de la roca fosfórica

$$V = \frac{Cap}{\delta} \quad \delta = 2,87 \text{ t/m}^3 \text{ (densidad R.F)}$$

$$V = 10.5 \text{ m}^3 \text{ Roca fosfórica}$$

$J = \text{Peso específico de la R.F} = 3030 \text{ kg/m}^3$   
 $C_p = \text{Calor específico de la R.F} = 0.7273 \text{ kJ/kg}$   
 $T_2 = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

$Q_1 = 31351176 \text{ kJ}$  Roca fosfórica

#### 4.5.3. PÉRDIDAS DE CALOR A TRAVÉS DE LA PARED COMPUESTA

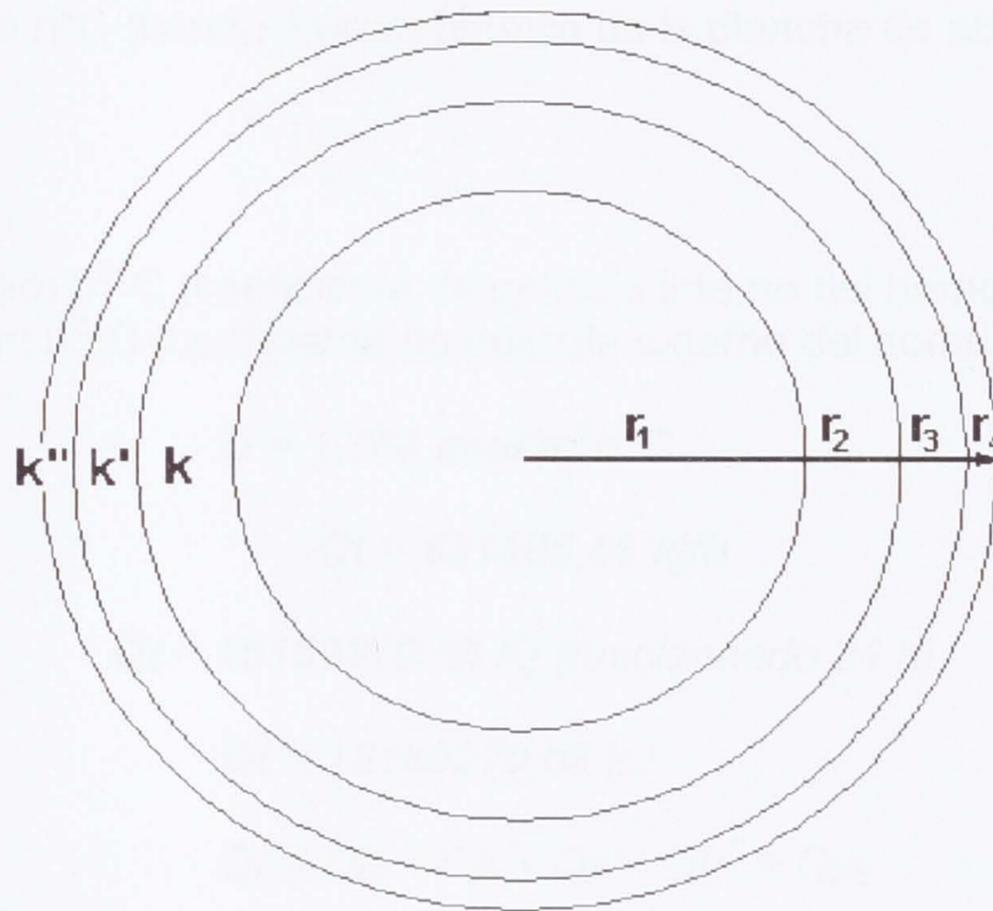


Figura 4.2. Pérdidas por conducción a través de la pared compuesta

Las pérdidas de calor del horno ( $Q_t$ ) se pueden calcular con la siguiente ecuación:

$$Q_t = U \cdot A \cdot (T_H - T_a)$$

$$U = \frac{1}{r_1 \cdot \left( \left[ \frac{1}{h_0 \cdot r_1} \right] + \left[ \frac{\ln(r_1/r_2)}{k} \right] + \left[ \frac{\ln(r_3/r_2)}{k'} \right] + \left[ \frac{\ln(r_4/r_3)}{k''} \right] + \left[ \frac{1}{h_1 \cdot r_4} \right] \right)}$$

Donde:

$U$  = Coeficiente total de transferencia de calor

$T_H = 1400$  °C

$T_a = 25$  °C

$A_i = 62.83$  m<sup>2</sup>

$A_e = 79.32$  m<sup>2</sup>

$k = 0.67$  kcal/m h°C (conductividad térmica del ladrillo refractario)

$k' = 0.43$  kcal/m h°C (conductividad térmica del ladrillo aislante)

$k'' = 42.99$  kcal/m h°C (conductividad térmica de la plancha de acero)

$r_1 = 1$  m

$r_2 = 1.23$  m

$r_3 = 1.2625$  m

$r_4 = 1.2725$  m

$h_0 = 8.4901$  kcal/m h<sup>2</sup>°C (coeficiente de película interno del horno)

$h_1 = 9.933$  kcal/m h<sup>2</sup>°C (coeficiente de película externo del horno)

$$U = 1.764 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$Q_t = 631685,46 \text{ kJ/h}$$

$$Q_t = 15160270.06 \text{ KJ (funcionando 24 h)}$$

$$Q_t = 15160270.06 \text{ kJ}$$

$$Q_t = Q_{HI} + Q_k + Q_{k'} + Q_{k''} + Q_{HE}$$

$$Q_{HI} = h_0 * A_i (T_H - T_1)$$

$$Q_{HE} = h_1 * A_e (T_3 - T_a)$$

$$Q_k = \left( \frac{2\pi * r_1 * k}{\ln(r_2/r_1)} \right) * (T_1 - T_2)$$

$$Q_{k'} = \left( \frac{2\pi * r_2 * k'}{\ln(r_3/r_2)} \right) * (T_2 - T_3)$$

$$Q_{k''} = \left( \frac{2\pi * r_3 * k''}{\ln(r_4/r_3)} \right) * (T_3 - T_4)$$

$$Q_{HI} = 533.43 * (1400 - T_1)$$

$$Q_{HE} = 787.88 * (T_3 - 25)$$

$$Q_k = 20.33 * (T_1 - T_2)$$

$$Q_k' = 130.79 * (T_2 - T_3)$$

El sistema de ecuaciones se resuelve usando el solver del excel con los siguientes resultados:

$$T_1 = 1224 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 29.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 28.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

#### 4.5.4. PÉRDIDAS DE CALOR POR COMBUSTIÓN INCOMPLETA

Es la pérdida de calor por la presencia de gases no quemados, para el gas natural se toma el 5,02 % del calor aportado:

$$Q_3 = 0,0502 * Q_{ap}$$

$$Q_3 = 2108,4 * M$$

#### 4.5.5. PÉRDIDAS DE CALOR POR ARRASTRE DE LOS GASES QUE VAN A LA CHIMENEA

Se supone que en la combustión (relación aire-combustible) va existir un exceso del 20 % de aire, por bibliografía se deduce que el calor de los productos de la combustión son: <sup>(20)</sup>

Calor en los productos de la combustión perfecta = 1500 kcal/m<sup>3</sup>

Calor en el aire necesario para la combustión perfecta = 1200 kcal/m<sup>3</sup>

Como se ha supuesto el 20 % de aire en exceso se tiene 240 kcal/m<sup>3</sup> más.

El calor de los gases de la combustión es:

$$1500 + 240 = 1740 \text{ kcal/m}^3 = 7285,03 \text{ J/m}^3 \text{ de gas de combustible}$$

Capacidad calorífica del GN = 4,2 \* 10<sup>4</sup> kJ/kg

Densidad del GN = 0,601 kg/m<sup>3</sup>

$$\frac{7285,03 \text{ kJ/kg}}{0,601 \text{ kg/m}^3} = 12121,51 \text{ kJ/kg}$$

Para saber el porcentaje de calor que se va por la chimenea:

$$\frac{12121,51 \text{ kJ/kg}}{4,2 * 10^4 \text{ kJ/kg}} = 0,2886$$

Por lo tanto el 28.86 % del calor es arrastrado por los productos de la combustión, o sea no se produce ninguna energía sino que se va como producto quemado el resto se queda en el horno, el 71.14 % del calor se queda en el horno.

El calor que se arrastra por la chimenea es el 28.86 % del calor aportado:

$$Q_4 = 0.2886 * Q_{ap}$$

$$Q_4 = 12121,51 * M \text{ kJ}$$

El calor aportado es igual a la suma de las perdidas de calor.

$$Q_{ap} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$M = 1675 \text{ kg}$$

El consumo de combustible del horno por día va a ser con exceso del 7,5 %, por lo tanto el consumo va ser.

$$M = 1800 \text{ kg/día}$$

$$V = 2996 \text{ m}^3$$

En la tabla 4.1 se muestra un resumen del calor, el tipo de calor y el porcentaje de este calor.

**Tabla 4.1:** Resumen del calor, tipo de calor y porcentaje

Q	Tipo de calor	Roca fosfórica	
		kJ	%
Q1	Calor necesario para calentar la materia prima	31351175,63	44,56
Q2	Perdidas a través de la pared compuesta	15160270	21,55
Q3	Perdidas por combustión incompleta	3531570	5,02
Q4	Perdidas por arrastre de los gases que van a la chimenea	20303529,65	28,86
Qap	Calor total aportado	70350000	100

#### 4.5.6. CÁLCULO DE LA RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE

Para hallar la relación aire-combustible, se debe saber la composición del gas natural (Según EBR)

Metano = 87,2 %  
 Etano = 6,5 %  
 Propano = 2,9 %  
 Nitrógeno = 1,6 %  
 Iso butano = 0,9 %  
 N butano = 0,6 %  
 Iso pentano = 0,4 %

Los principales componentes son el metano, etano y propano.

Realizando el balance estequiométrico:

**Metano:**



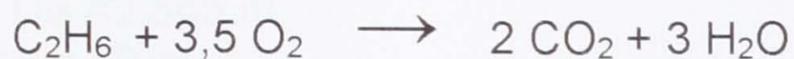
$\text{CH}_4 = 1 \text{ mol}$

Aire = 9,52 mol

$R = 9,52 / 1$

**$\text{CH}_4 = 8,3 \text{ m}^3$**

**Etano:**



$$\text{C}_2\text{H}_6 = 1 \text{ mol}$$

$$\text{Aire} = 16,66 \text{ mol}$$

$$R = 16,66 / 1$$

$$\mathbf{C_2H_6 = 1,11 \text{ m}^3}$$

**Propano:**



$$\text{C}_3\text{H}_8 = 1 \text{ mol}$$

$$\text{Aire} = 23,8 \text{ mol}$$

$$R = 23,8 / 1$$

$$\mathbf{C_3H_8 = .62 \text{ m}^3}$$

**El aire total de GN es:**

$$At = 10,03 \text{ m}^3$$

Con el 20 % de exceso:

$$\mathbf{At = 12,036 \text{ m}^3}$$

#### 4.5.7. DIMENSIONES DEL HORNO

Las dimensiones del horno deben cumplir la siguiente relación:<sup>(35)</sup>

$$L / (De)^2 = 1.5 \text{ a } 5$$

Donde:

$$De = 2.545 \text{ m}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

$$L / (De)^2 = 1.54$$

#### 4.5.8. TIEMPO DE RESIDENCIA

El paso de las partículas a través del horno se expresa con la siguiente ecuación: <sup>(35)</sup>

$$\tau = \frac{.19 * L}{N * Di * S}$$

Donde:

$$L = 10 \text{ m}$$

$$N = \text{Rotación del horno} = 0.8 \text{ RPM}$$

$$Di = \text{Diámetro interno del horno} = 2 \text{ m}$$

$$S = \text{Pendiente del horno}$$

Para hallar el ángulo del horno se tiene:

$$\text{Tang } 45^\circ = 1 = 100 \%$$

$$\text{Tang } 45^\circ = 100 \%$$

$$\text{Para el 10\% de llenado} \quad 4 \% = X$$

$$X = 0,04 = \text{Tang } \alpha$$

$$\alpha = 2,2906^\circ$$

$$y = \text{sen } (2,2906) * 10 = 0,39967 \text{ m}$$

$$x = \text{cos } (2,2906) * 10 = 9,9920 \text{ m}$$

$$S = 0,04$$

$$\tau = 30 \text{ min}$$

#### 4.5.9. CAPACIDAD DEL HORNO

La capacidad del horno viene expresada por la siguiente ecuación: <sup>(39)</sup>

$$Cap = \frac{k * L * Di^2}{100}$$

$$Cap = 30 \text{ T/día}$$

$$k = 75$$

El parámetro k depende de la materia prima que se utiliza y de otras variables como ser: granulometría, humedad, coeficiente de difusibilidad y el tiempo de residencia.

Otra forma más sencilla de calcular la capacidad de un horno rotatorio es.

$$Cap = \pi * r_1^2 * L * \delta * \left(\frac{1}{3}\right)$$

$$Cap = 30 \text{ t/día}$$

#### 4.5.10. CÁLCULO DE LA CHIMENEA

Se hace un cálculo simplificado porque no se sabe con exactitud la densidad de los gases de combustión. <sup>(35)</sup>

Según datos experimentales se puede adoptar para la altura de la chimenea la siguiente relación:

$$H = 30 * D$$

D = 0.55 m (diámetro de la chimenea)

$$H = 16.5 \text{ m}$$

La velocidad de los gases dentro de la chimenea es:

$$V = 0,1 * H$$

$$V = 1,75 \text{ m/s}$$

La fuerza de tiro requerida por la chimenea debe estar entre los valores de:

$$Z = (0,5-0,55)*H$$

$$\mathbf{Z = 9,08 \text{ mm de H}_2\text{O}}$$

El paso de los humos del horno a la chimenea será primero a una base de ladrillo refractario, que va a soportar la chimenea y mediante ventiladores se expulsa el humo.

#### 4.5.11. DISEÑO DEL QUEMADOR

Presión del gas natural =  $96523,5 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$

Presión del aire en Cbba =  $74948,4 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$

Tomando un diámetro de  $0,0254 \text{ m}$ .

$$A = \pi*(d/4)$$

$$\mathbf{A = 5,06*10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$q = A*V$$

$V = 12 \text{ m/s}$  (velocidad del GN)

$$\mathbf{q = 6.072*10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$P_1 + \left( \left[ \frac{\delta}{2} \right] * V_1^2 \right) = P_2 + \left( \left[ \frac{\delta}{2} \right] * V_2^2 \right)$$

$$V_2 = \sqrt{(2/\delta * [P_1 - P_2]) + V_1^2}$$

$$\mathbf{V_2 = 268,2 \text{ m/s}}$$

Haciendo el tubo coaxial de un diámetro de  $0.2 \text{ m}$  se tiene el consumo de aire:

$$A = \pi * (D^2 - d^2)$$

$$\mathbf{A = 0.0309 \text{ m}^2}$$

$$q = A \cdot V_2$$

$$q = 8.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### 4.5.12. CÁLCULO DEL PESO DEL LADRILLO REFRACTARIO

Se utilizará en el horno ladrillos refractario del tipo Sílico (70%) – Aluminoso (40%).

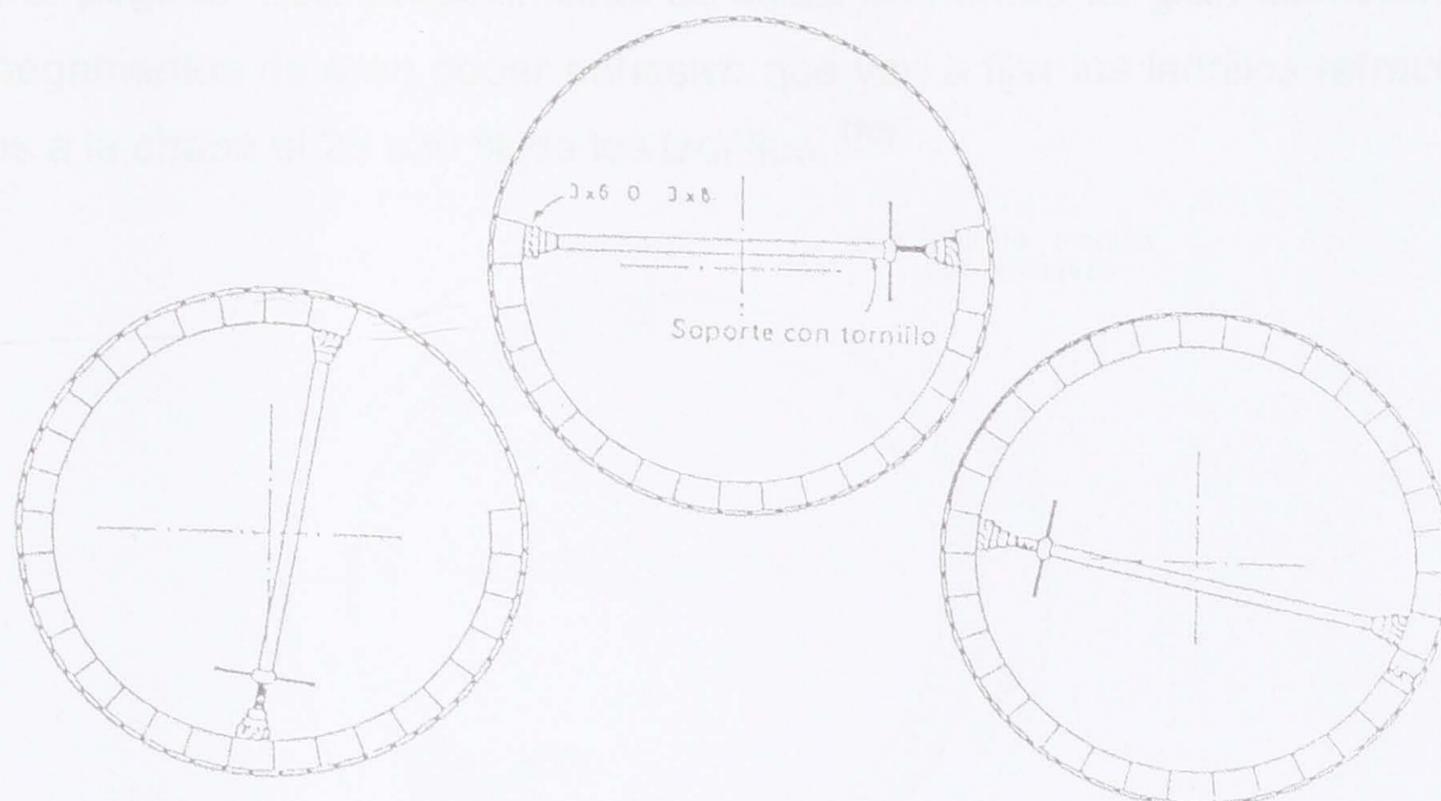
Las características del refractario son (Según SICOBOL, 2005):

- ☉ Temperatura de servicio = 1400 °C
- ☉ Densidad aparente = 2,1 g/cm<sup>3</sup>
- ☉ Porosidad aparente = 15-17 %
- ☉ Compresión en frío = 65 N/mm<sup>2</sup>
- ☉ Cambio lineal permanente a 1400 °C = 0,8 % Lin
- ☉ Resistencia a la compresión bajo temperatura eleva = 1650 °C
- ☉ Cono Seger = 35
- ☉ Coeficiente de conductividad térmica = 1,4 W/m K (1200 °C)
- ☉ Peso específico = 3 kg

#### 4.5.13. COLOCACIÓN DEL LADRILLO

La colocación del ladrillo refractario en el horno se realiza, según tres modalidades que a continuación se describe.

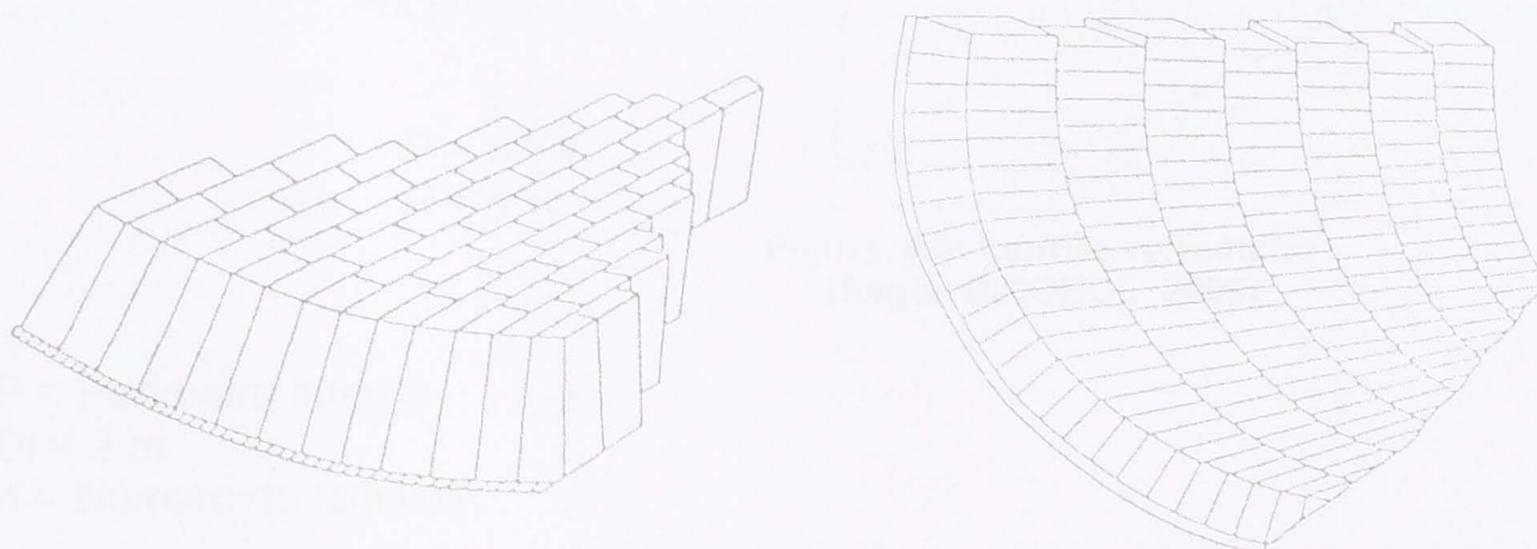
- ☉ Con mortero. Se utiliza morteros especiales para diferentes tipos de ladrillos y consiste: después de haber colocado los ladrillos en el semicírculo inferior del horno, sobre mortero, hasta la línea media horizontal del horno, es asegurado por presión sobre la chapa del horno mediante usillos, después de la cual es girado el horno 90° dos veces para disponer el ladrillo restante el otro semicírculo tal como se muestra en la figura 4.3. <sup>(35)</sup>



**Figura 4.3. Colocación del ladrillo con mortero (Según Duda, 1985)**

En seco. Es más ventajoso que el anterior por que no es necesario el giro del horno para realizarla y consiste en la colocación del ladrillo individualmente por anillos completos paralelos a la circunferencia del horno, tal cual se muestra en la figura 4.4. <sup>(35)</sup>

Después de hacer la colocación en el semicírculo inferior se coloca un andamio, sobre el que después se realiza la colocación de la mitad superior, y el que cierra el anillo, se sujeta sobre la chapa mediante tornillos. <sup>(35)</sup>



**Figura 4.4. Colocación del ladrillo en seco (Según Duda, 1985)**

Por pegado. Este procedimiento se utiliza en hornos de gran diámetro, y se utiliza pegamentos de gran poder adhesivo que van a fijar los ladrillos refractarios pegados a la chapa el 25 a 30 % de los ladrillos. <sup>(35)</sup>

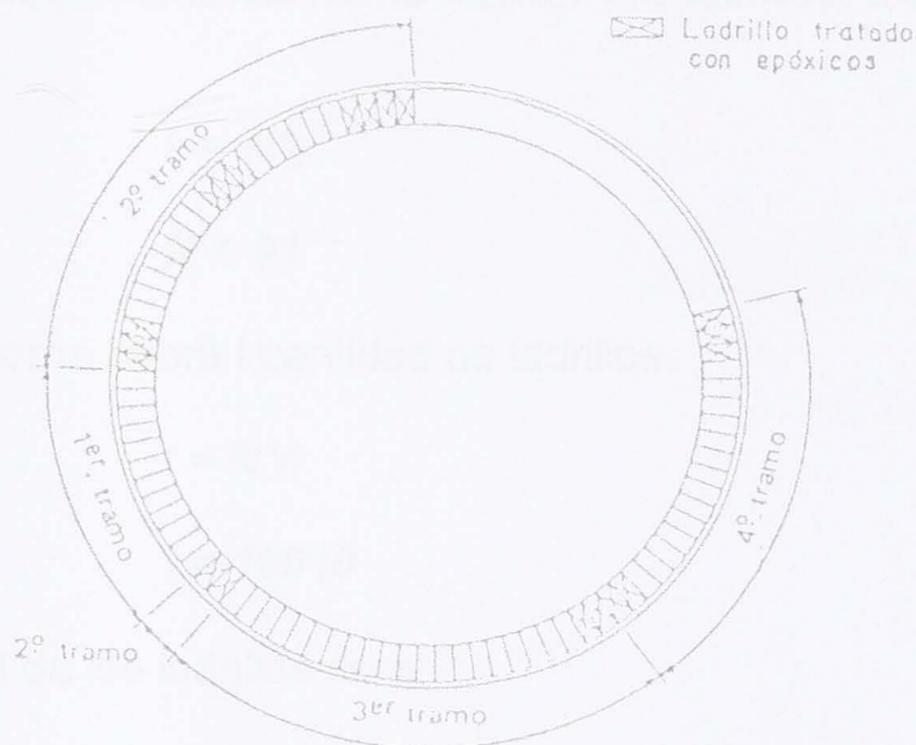


Figura 4.5. Colocación del ladrillo por pegado (Según Duda, 1985)

Las medidas del ladrillo refractario son:

$$\begin{aligned} x &= 22,5 \text{ cm} \\ y &= 11,5 \text{ cm} \\ z &= 6,4 \text{ cm} \\ w &= 5,7 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P &= \pi \cdot Di \\ P &= n \cdot w \end{aligned}$$

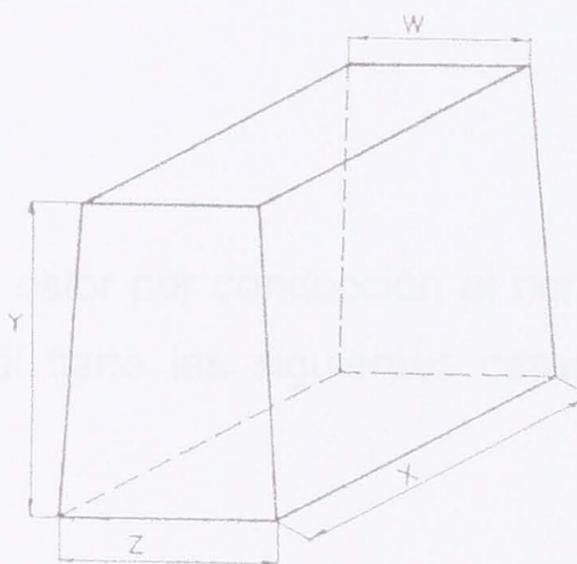


Figura 4.6: Ladrillo refractario (Según SICOBOL, 2005)

P = Perímetro interno  
 $Di = 2 \text{ m}$   
 n = Número de ladrillos

$$n * w = \pi * Di$$

$$n = 110$$

En el perímetro interno del horno habrán 110 ladrillos, a lo largo existirán N filas.

$$L = N * y$$

$$N = 91$$

En todo el horno habrá l cantidad de ladrillos.

$$l = N * n$$

$$l = 10010$$

El peso total de los ladrillos será:

$$Pt = P * l$$

$$P = 30030 \text{ kg} = 30,03 \text{ t}$$

El peso por unidad de longitud es:

$$Pu = 3,003 \text{ kg/m}$$

#### 4.5.14. PESO DEL LADRILLO AISLANTE

Con el fin de reducir las pérdidas de calor por conducción el horno tendrá un revestimiento de ladrillo aislante, el cuál tiene las siguientes características (Según SICOBOL, 2005):

- ☉ Densidad 0 1,3 g/cm<sup>3</sup>
- ☉ Porosidad = 40-45 %
- ☉ Resistencia a la compresión en frío = 10 N/mm<sup>2</sup>
- ☉ Resistencia a temperaturas elevadas = 1400 °C
- ☉ Cono Seger = 19
- ☉ Dilatación térmica = 0,2 (1200 °C)
- ☉ Coeficiente de conductividad térmica = 0,5 W/m K (1000 °C)
- ☉ Peso específico = 1,3 kg

Las medidas del ladrillo aislante son:

$$x = 22.5 \text{ cm}$$

$$y = 11.5 \text{ cm}$$

$$z = 6.5 \text{ cm}$$

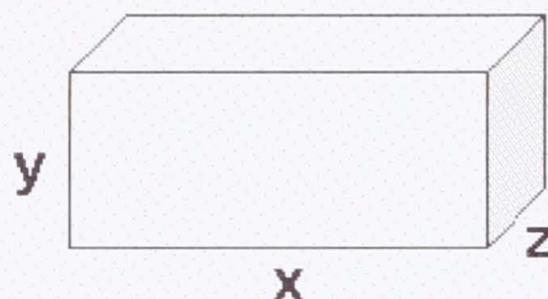


Figura 4.7. Ladrillo aislante  
(Según SICOBOL, 2005)

$$P = \pi * D_2 = n * x$$

$$D_2 = 2.43 \text{ m}$$

$$n = 40$$

$$L = N * y$$

$$N = 87$$

$$l = N * n$$

$$l = 3480$$

El peso total del ladrillo aislante es:

$$Pt = 4524 \text{ kg} = 4,542 \text{ t}$$

El peso por unidad de longitud es:

$$Pu = 452,4 \text{ kg}$$

#### 4.5.15. ESPESOR DE LA PLANCHA DE ACERO

Se considera una plancha de espesor mínimo de  $3/8''$  porque considerando plancha más delgada se tuviera el problema de la ovalidad debido al peso de los ladrillos refractarios y de la temperatura de la plancha, de no considerarse estos aspectos durante el funcionamiento del horno se presentaría, primero el afloje de

los ladrillos con la consiguiente caída de estos y entonces vendría el efecto de la ovalidad del cilindro de acero. <sup>(20)</sup>

$$D = 2,545 \text{ m}$$

$$d = 2,525 \text{ m}$$

$$e = 9,525 \text{ mm}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

$$\delta = 7,92 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$A = \frac{\pi * (D^2 - d^2)}{4}$$

$$A = 0,0796 \text{ m}^2$$

$$V = A * L = \text{volumen}$$

$$V = 0,796 \text{ m}^3$$

$$P_{pla} = \delta * V = \text{peso de la plancha}$$

$$P_{pla} = 6304,32 \text{ kg}$$

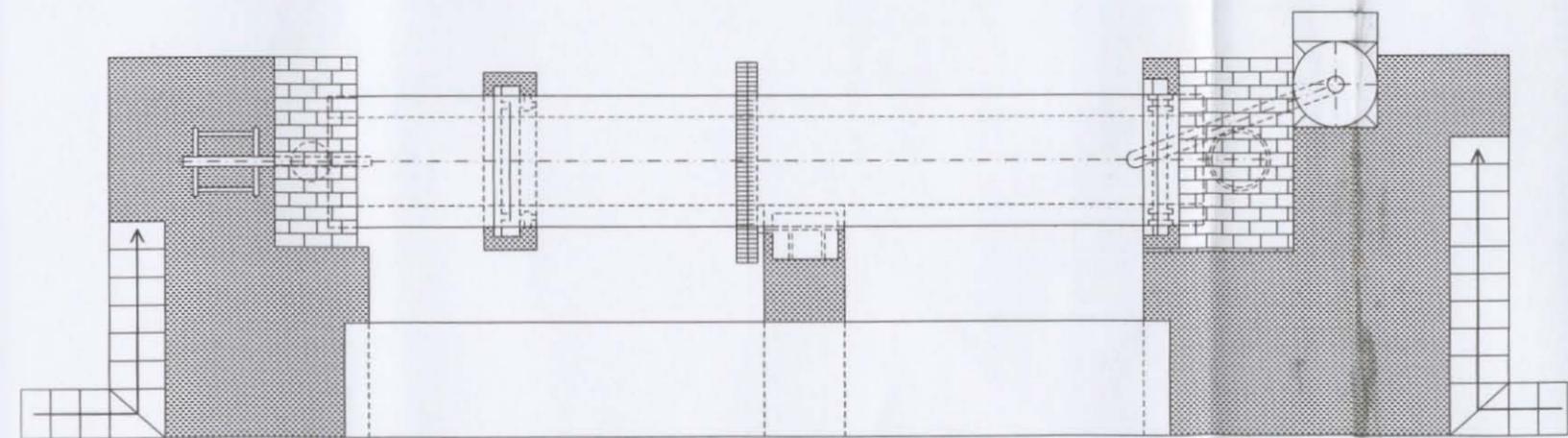
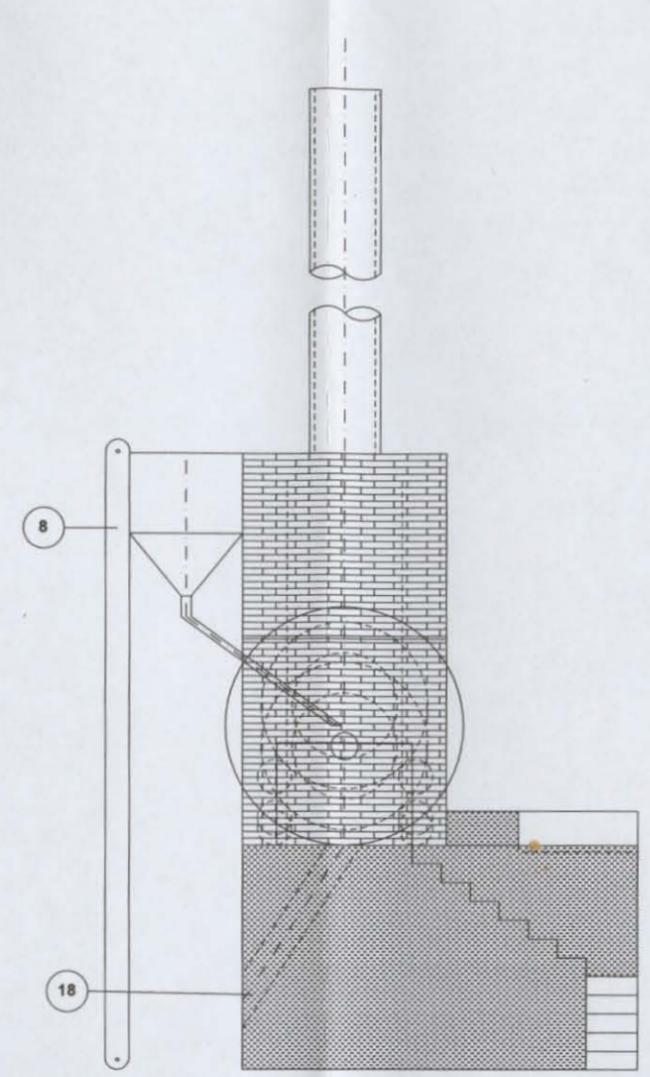
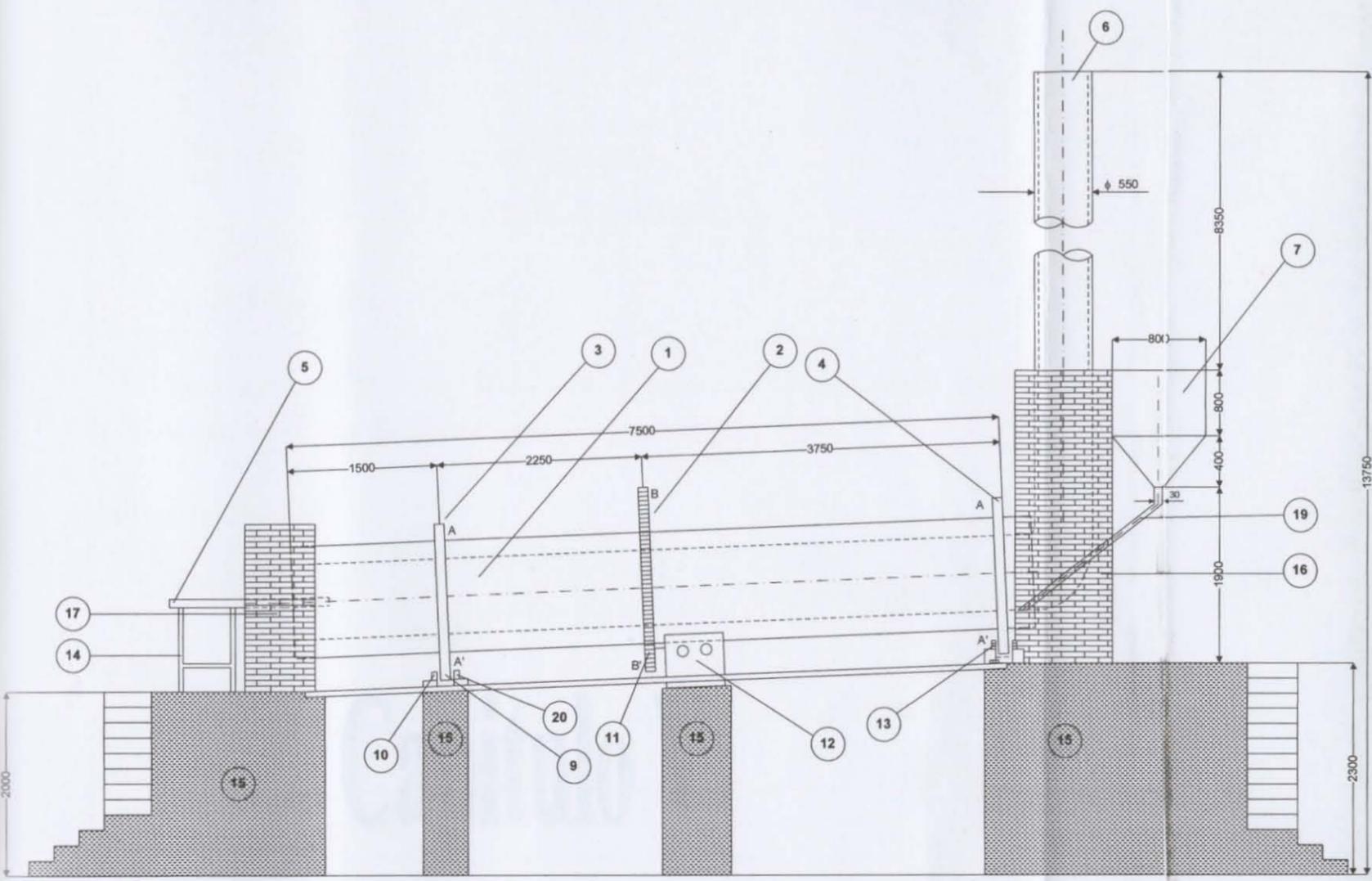
El peso por unidad de longitud es:

$$P_{up} = 630,43 \text{ kg}$$

El peso que va a soportar la plancha es:

$$W = P_u + P_u' + P_{up} + (0.25 * (P_u + P_u' + P_{up})) + (0.4 * P_{up})$$

$$W = 5359,46 \text{ kg}$$



9	Soporte con resorte	DIN	SAE-1045	20	Acero	2 Kg	-----
1	Tubo Alimentador	SAE-1010	19	Plancha de fierro	10 Kg	-----	-----
1	Salida del Producto	-----	18	Ladrillo Refractario	-----	-----	-----
1	Pared Anterior	-----	17	Ladrillo Refractario	-----	-----	-----
1	Pared Posterior	-----	16	Ladrillo Refractario	-----	-----	-----
4	Brazo de Vaciado	-----	15	Herrigon Cidropes	-----	-----	-----
1	Soporte Quismador	SAE-1010	14	Plancha de fierro	10 Kg	-----	Plano 3
1	Soporte F. Vertical	DIN	-----	13	Plancha de fierro	3 Kg	-----
1	Mulo - Reductor	ABNT-NBR7084	SAE-1045	12	-----	500 Kg	-----
1	P/ten	DIN	SAE-1010	11	Plancha de fierro	5 Kg	Plano 4
8	Soportes de Rodillos	DIN	SAE-1020	10	Eje de Acero	3 Kg	Plano 6
4	Rueda Soporte Aro Rodadura	DIN	SAE-1010	9	Plancha de fierro	30 Kg	-----
1	Elevador por Cangilones	-----	-----	8	Goma y fierro	200 Kg	-----
1	Tolva de Almacenamiento	SAE-1010	7	Plancha de fierro	200 Kg	-----	-----
1	Chimenea	SAE-1010	6	Tornillos	100 Kg	-----	-----
1	Quismador	SAE-1045	5	Tubo de Acero	10 Kg	-----	Plano 3
1	Aro de Rodadura Posterior	DIN	SAE-1010	4	Plancha de fierro	200 Kg	Plano 2
1	Aro de Rodadura Anterior	DIN	SAE-1010	3	Plancha de fierro	200 Kg	Plano 2
1	Rueda Dentada	DIN	SAE-1010	2	Plancha de fierro	50 Kg	Plano 5
1	Cilindro de Acero	DIN	SAE-1010	1	Plancha de fierro	2400 Kg	Plano 8
N°	DENOMINACION	NORMA	MATERIAL	N°	SEMIPRODUCTO	PESO	-----

Dibujo	06	Norma		F.C.yT.	UMSS
Comp.	03				
Norma	88	DIN			
Esc.	1:30	HORNO ROTATORIO		Plano N° 1-0	Sustituye Plano Original

## CAPITULO 5

### EVALUACIÓN FINANCIERA

#### 5.1. INVERSIÓN Y FINANCIAMIENTO

Las inversiones de activos fijos estarán divididas en: construcciones civiles, maquinaria y equipo, vehículos, gastos de instalación y montaje.

**Tabla 5.1:** Activos fijos

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO U\$	TOTAL U\$
<b>CONSTRUCCIONES Y TERRENO</b>			<b>55.000,00</b>
TERRENO	1	30.000,00	
OBRAS CIVILES	1	25.000,00	
<b>MAQUINARIA Y EQUIPO</b>			<b>91.300,00</b>
Volqueta 20 TN.	1	25000	
Horno Rotatorio 30 TN	1	31300	
Camioneta	2	10000	
Sistema de Aspersión	1	1500	
Caldero	1	5000	
Extractor de aire	1	500	
Correa Transportadora P.T.	1	5000	
Molino	2	10000	
Envasadora	1	3000	
<b>INSTALACIÓN Y MONTAJE</b>		2500	<b>2.000,00</b>
<b>CAPITAL DE TRABAJO</b>			<b>85.000,00</b>
<b>PROYECTO EXPLOTACIÓN</b>			<b>98.463,75</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>			<b>331.763,75</b>

## 5.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Son aquellos gastos que se erogan para cubrir las necesidades de operación de la planta, que comprende desde la recepción de la materia prima hasta la comercialización del producto terminado; están divididos en costos de fabricación, costos de administración y costos de comercialización.

Los costos de fabricación se los desglosa de la siguiente manera: La materia prima, mano de obra directa, combustibles y lubricantes, energía eléctrica, ropa de trabajo, asistencia técnica, depreciaciones, mantenimiento y seguros.

**Tabla 5.2:** Requerimiento de materia prima anual

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad mensual</b>	<b>Cantidad anual</b>	<b>Precio U\$/TN</b>	<b>Costo anual U\$.</b>
Roca Fosfórica molida (t)	780	9360	87,5	819.000,00
Agua (m <sup>3</sup> )	273	3276	0,75	2.457,00
Total Costo				<b>821.457,00</b>

Son gastos que se erogan para la administración de la planta de termofosfato y se detallan en: Mano de obra de administración y gastos generales (material de oficina, limpieza y otros).

Para poner el producto al alcance del consumidor se requiere el control, transporte y distribución del producto que es costo de comercialización, además de un costo financiero que comprende los intereses contraídos por la inversión realizada tanto en la explotación como en el proceso mismo.

**Tabla 5.3:** Resumen de costos

<b>Detalle</b>	<b>Monto Mensual</b>	<b>Monto Anual</b>
<b>1. COSTO DE FABRICACIÓN</b>	<b>14.009,34</b>	<b>168.112,08</b>
Materia Prima e insumos	12.612,34	151.348,08
Mano de obra directa	1.100,00	13.200,00
Combustibles y lubricantes	65	780,00
Energía eléctrica	200	2.400,00
Ropa de trabajo	32	384,00
<b>2. COSTO DE ADMINISTRACIÓN</b>	<b>3.050,00</b>	36.600,00
M.O. administración	2.700,00	32.400,00
Gastos Generales	350	4.200,00
<b>3. COSTO DE COMERCIALIZACIÓN</b>	<b>1.100,00</b>	13.200,00
M.O. comercialización	950	11.400,00
Propaganda y publicidad	150	1.800,00
<b>TOTAL</b>	<b>18.159,34</b>	<b>217.912,08</b>

### 5.3 FIJACIÓN DEL PRECIO.

El método para la fijación del precio conocido como “recargo de precios” es el más utilizado por su sencillez y naturaleza mecánica. Bajo este procedimiento se determina agregando un margen de ganancia fijo (en porcentaje) al costo del producto.

**Tabla 5.4:** Fijación del precio por bolsa de 50 Kg de fosfato tricálcico

<b>Ingresos anuales por venta</b>			
<b>Detalle</b>	<b>Unidad</b>	<b>año 1</b>	<b>año 2-10</b>
Capacidad	%	75	100
Fosfato Tricálcico (50 Kg)	bolsa	135000	180000
Precio de venta	U\$./Bolsa	4,09	4,09
Total	U\$.	552795,002	737060,003
<b>Desembolso por IVA.</b>	<b>U\$.</b>	<b>71863,3503</b>	<b>95817,8004</b>

**Tabla 5.5:** Programación de la producción

<b>Programación de la Producción</b>			
	<b>Día</b>	<b>mes</b>	<b>año</b>
Unidad	750	15000	180000
\$us.	3071,08335	61421,6669	737060,003

#### **5.4. FLUJO DE INGRESOS Y GASTOS**

El estado de resultados muestra la pérdida o ganancia del proyecto, cuyo detalle se muestra a continuación en la tabla 5.6, 5.7 y 5.8.

#### **5.5. EVALUACIÓN DEL PROYECTO**

Para determinar la rentabilidad del proyecto se toma en cuenta los indicadores económicos mas conocidos, (TIR y VAN) que miden la ganancia de la inversión y el valor actual del proyecto respectivamente. El flujo de caja neto se muestra en la tabla 5.9.

**Tabla 5.6:** Flujo de ingresos y gastos

<b>Calculo de Imp. Util. Empr (IUE)</b>										
<b>Detalle</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>	<b>Año 7</b>	<b>Año 8</b>	<b>Año 9</b>	<b>Año 10</b>
Ingreso (ventas brutas)	552795,00	737060,00	737060,00	737060,00	737060,00	737060,00	737060,00	737060,00	737060,00	737060,00
Costo Total	217912,08	217912,08	217912,08	217912,08	217912,08	217912,08	217912,08	217912,08	217912,08	217912,08
<b>UTILIDAD BRUTA</b>	<b>334882,92</b>	<b>519147,92</b>								
Desembolso por IVA	71863,35	95817,80	95817,80	95817,80	95817,80	95817,80	95817,80	95817,80	95817,80	95817,80
Descuento s/ventas 3.5%	19347,83	25797,10	25797,10	25797,10	25797,10	25797,10	25797,10	25797,10	25797,10	25797,10
Impuesto IT	25797,10	773,91	773,91	773,91	773,91	773,91	773,91	773,91	773,91	773,91
<b>UTILIDAD NETA</b>	<b>217874,65</b>	<b>396759,11</b>								
Impuesto 25% s/Util. N.	54468,66	99189,78	99189,78	99189,78	99189,78	99189,78	99189,78	99189,78	99189,78	99189,78
<b>UTILIDAD NETA GESTIÓN</b>	<b>163405,99</b>	<b>297569,33</b>								

**Tabla 5.7:** Flujo de Caja (\$us)

<b>FLUJO DE CAJA EN U\$.</b>										
<b>AÑO</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>	<b>Año 7</b>	<b>Año 8</b>	<b>Año 9</b>	<b>Año 10</b>
<b>UTILIDAD NETA</b>	163405,99	297569,33	297569,33	297569,33	297569,33	297569,33	297569,33	297569,33	297569,33	297569,33
DEPRECIACIÓN	205231,15	205231,15	205231,15	205231,15	205231,15	137235,01	137235,01	137235,01	18453,76	18453,76
<b>FLUJO DE CAJA</b>	<b>-41825,16</b>	<b>92338,18</b>	<b>92338,18</b>	<b>92338,18</b>	<b>92338,18</b>	<b>160334,32</b>	<b>160334,32</b>	<b>160334,32</b>	<b>279115,57</b>	<b>279115,57</b>

**Tabla 5.8:** Flujo de caja para el calculo de indicadores financieros en (\$us)

BALANCE MONETARIO	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Inversión	<b>-331.763,75</b>										
Flujo de Caja		-41825,16	92338,18	92338,18	92338,18	92338,18	160334,32	160334,32	160334,32	279115,57	279115,57
Valor Residual											125000
Recup de K. W.											85000
Flujo Monetario	-331763,75	-41825,16	92338,18	92338,18	92338,18	92338,18	160334,32	160334,32	160334,32	279115,57	489115,57
<b>Valor actualizado</b>		<b>-36369,71</b>	<b>80294,07</b>	<b>80294,07</b>	<b>80294,07</b>	<b>80294,07</b>	<b>139421,15</b>	<b>139421,15</b>	<b>139421,15</b>	<b>242709,20</b>	<b>425317,89</b>

**Tabla 5.9:** Indicadores financieros en (\$us)

<b>VAN (15%)</b>	<b>\$b 211.612,59</b>
<b>TIR (15%)</b>	<b>25%</b>

## CAPITULO 6

### 6.1. CONCLUSIONES

- Se ha logrado diseñar las formulaciones de alimentos balanceados que incluyen los suplementos minerales de fosfato tricálcico utilizando como fuente la roca fosfórica.
- La composición química de la roca fosfórica seleccionada y determinada en las condiciones del presente trabajo incluye para los materiales 1000, 1200, 1400°C y fosfato bicálcico, 15.83; 16.63; 16.86; 18.0, % de P total respectivamente.
- Con el análisis hecho por difracción de rayos X (DRX) se determinó que la estructura cristalina de la roca fosfórica está dentro de las flúorapatitas.
- La temperatura de calcinación óptima para este tipo de materiales es la de 1400°C, hubo mayor formación de  $\alpha$ -Ca<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> en las pruebas de lixiviado con la roca fosfórica nos determina que la disponibilidad del fósforo es elevada comparado con los otros casos.
- La calcinación de la roca fosfórica a 1400°C fue realizada en un horno rotatorio, por que se requiere una producción continua y es mas practico para realizar el choque térmico con aspersión de agua.
- Los resultados obtenidos en la lixiviación con acido clorhídrico son mayores obtenidos que con acido cítrico en el material calcinado a 1400 °C, esto se debe a una mayor formación de  $\alpha$ -fosfato tricálcico, confirmando teoría de que existe el cambio isomorfo de la molécula a esta temperatura siendo un compuesto mas soluble.
- Los resultados de los lixiviados con solventes neutros demuestra que el material de 1400 °C su reactividad es baja a estos pH y por lo contrario el fosfato comercial tiene buena respuesta a este solvente, pero demostramos que a pH neutros el material de 1400 °C libera mayor cantidad de P que los demás a 1000 y 1200 °C

- ☉ Se puede confirmar que hay una eliminación del flúor por que existe desprendimiento en el proceso durante el choque térmico con agua dando paso a la formación del material deseado  $\alpha$ -fosfato tricálcico desfluorinado.
- ☉ El desprendimiento del flúor fue bastante eficaz, analizando con el método SPADNS, el cual nos determino una cantidad mínima de este mineral en la roca calcinada a 1400 °C fue de 0.08% F.
- ☉ En el estomago del animal las digestiones son a pH bajos, el cual nos garantiza una buena biodisponibilidad de P en medio ácido y a pH neutros los resultados no llegan a ser muy relevantes en este estudio.
- ☉ De acuerdo con estos resultados se ha evidenciado que la solubilidad de un fosfato inorgánico en varios solventes puede ser considerada como una metodología a utilizar para determinar la disponibilidad biológica de dicho fosfato.
- ☉ Los animales de la dieta A<sub>1</sub> alimentados durante el periodo de la evaluación biológica, su bajo rendimiento puede ser atribuido al alto contenido de flúor de esta fuente, indicando un efecto negativo de este elemento en el animal dando resultados sin cambios importantes en el peso corporal, bastante estrés y diarrea, este se debe descartar su uso en dietas alimentarias, por su alto contenido de flúor (2.31 %).
- ☉ Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten concluir que para el nivel de consumo de fósforo, las mejores respuestas estuvieron dadas por el fosfato calcinado a 1400 °C y el bicálcico.
- ☉ La biodisponibilidad biológica de estos fosfatos 1400°C y bicálcico, produce resultados satisfactorios en las dietas, hubo cambios importantes en el incremento de peso y la retención de fósforo fueron muy parecidas entre si, se obtuvieron los mayores valores de disponibilidad biológica in vitro e in vivo fueron altamente solubles en ácidos clorhídrico y cítrico.
- ☉ Parece conveniente continuar estudiando alternativas que hagan factible el uso de este tipo de materiales en la nutrición animal, por la abundancia de

los yacimientos del país y el elevado costo en el mercado internacional de las principales fuentes fosfóricas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) **McDowell, L.R. (1992)** "Minerals in Animal and Human Nutrition", Ed. L.R. McDowell. Academic Press, New York, p. 27-77.
- (2) **Mateos, G.G. y García, M. (1998)** "En: XIV Curso de Especialización FEDNA", Editorial P. García, C. Mateos Expoaviga 98, Barcelona, p.173-190.
- (3) **McGillivray, J.J. (1974)**, "Biological availability of phosphorus in feed ingredients", Editorial C.B. Ammeerman Nutrition, p.83-94.
- (4) Lemus Coronado, A.M, (1996) "Fabricación de Fertilizante Fosfatado Parcialmente Acidulado a Partir de la Roca Fosfórica" Tesis de grado inédita, Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia, p.30-45.
- (5) **Mojica, D.F., et al (1984)** "Explotación de Roca Fosfórica en Colombia". Tomo I, "Roca Fosfórica", Ed. por S.J. Escalera, Publicaciones GLIRF, Cochabamaba, Bolivia, p.20-43.
- (6) **Gonzales A.C.(1983)** "Primera Conferencia Latino Americana de Roca Fosfórica". Revista Resúmenes de trabajos técnicos, Colombia, p.37.
- (7) **Harter-Denis, J. (1999)** "En: Biotechnology in the feed industry". Proc. Alitech's 15<sup>th</sup> Annual Symposium. Ed. T.P. Lyons y K.A. Jacques Nottingham University Press. p. 511-522
- (8) **Herpol, C. y Van Grembergen, G. (1967)** "Ann. Biol. Anim. Biochem. Biophys", Ed. W. Haresing y D.W.A. Cole, Londres, p. 33-41.
- (9) **Hopkins, Ballantyne y Jones, (1987)** "En: Recent Advances in Animal Nutrition", Ed. W. Haresing, Londres, p. 39-46.
- (10) **Wodzinski, R.J. y Ullah, A.H. (1995)** "Adv. Microbiologic application", Nottingham University Press. Reino Unido, p. 263-302.
- (11) **Sauveur, B. (1989)** "INRA (Alimentación de Animales monogástricos) Producción Animal", Ed. INRA, Francia, p.343-351.

- (12) **Kornegay, E.T. (1996)** "Nutrient management of food animals to enhance and protect the environment", Ed. T.P. Kornegay CRC Press, Inc., New York, p277-302.
- (13) **Sebastian, S. Tochburn, S.P., Chavez, F.R., y Lague P.C. (1997)** "Poultry Science", Ed. Sebastian, S. Tochburn, S.P., Reino Unido, p.1760-1769.
- (14) **Anderson P.A. (1985)** "En: Digestibility and amino acid availability in cereals and oilseeds", . Eds.G.W. Finley y D.T. Hopkins. American Association of Cereal Chemists, Minneapolis, p.31-46.
- (15) **Knuckles B.L. (1988)** "Journal Food Science", p. 250-252
- (16) **Kornegay, E.T.** "Biotechnology in the feed industry. Proc. Alltech's 15th Annual Symposium", Ed. T.P. Lyons y K.A. Reino Unido . p. 461-490
- (17) **Jongbloed, A.W., Everts, P.A. y Kemme, P.A. (1994).** "Verteerbaar Fosfornormen Voorvarkens", CVB, Documentation rapport N° 10, Países Bajos.
- (18) **Herbas, A. (2005)** "Modulo de Enzimología", "Maestría de Ciencia de Alimentos y Nutrición Humana", Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Bolivia.
- (19) **Moran, E. (1982)** "Comparative nutrition of fowl and swine: the gastrointestinal systems", Ed. E. Moran. University of Guelph, Ontario, Canadá.
- (20) **NRC (1994)** "Nutrient requirements of poultry", 9th revised ed. National Research Council, National Academy Press, Washington D.C.
- (21) **NRC (1998)** "Nutrient requirements of swine", 10th revised ed. National Research Council, National Academy Press, Washington D.C.
- (22) **CVB (1998)** "Veevoedertabel: Gegevens over chemische samenstelling, verteerbaarheid en voederwaarde van voedermiddelen", Centraal Veevoeder Bureau, Países Bajos.
- (23) **SETNA (1998)** "Tablas de composición de materias primas", Grupo SETNA, Madrid, p.97-99.
- (24) **FEDNA (1999)** "Normas FEDNA para la formulación de piensos compuestos", Eds. C. de Blas, G.G. Mateos y P.G. Rebollar, Fundación Española para el desarrollo de la nutrición animal, Madrid.

- (25) **Ammerman, C.B. (1995)** "En: Bioavailability of nutrients for animals: amino acids, minerals and vitamins", Eds. C.B. Ammerman, D.H. Baker y A.J. Lewis. Academic Press Inc, p.83-94.
- (27) **Olivares, A. (1996)** "Manual para El manejo de animales de laboratorio", Universidad Juarez Autonoma de tabasco, Villa Hermosa, Tabasco, p.54-63.
- (28) **Cochran y Cox (1980)** "Experimental Design", Sampling Theory, p.76-150.
- (29) **Whitney, W.T, Hollingsworth C.A. (1949).**, "Production of Defluorinated Phosphate Rock", Ind. Eng. Chem., Florida, p.1325-27.
- (30) **Sauchelli, V. (1996)** "Química y Tecnología de los Fertilizantes", Editorial Continental, Washington D.C., p.423-489
- (31) **Asociación mexicana para el Estudio de Animales de Laboratorio (1990)**, "Actualización en manejo y producción de animales de laboratorio", México D.F.
- (32) **Berry, L.G. y Manson B (1968)** "Mineralogía", p.57-74
- (33) **Balderrama, S. (2005)** "Estudio de la Cinética de Lixiviación en Materiales de Fosfato", Tesis de grado inédita, Carrera de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Bolivia, p.62-66.
- (34) **Waganoff N.P., (1972)** "Hornos Industriales", Ed. N.P. Waganoff, Alemania, p.120-170.
- (35) **Duda, W.H., (1985)** "Manual Tecnológico del Cemento", Ed. Duda, W.H. Alemania, p.264-300.
- (36) **Arzabe, J.O. (1998)** "Materiales Vitrocristalinos Obtenidos a Partir de Residuos para su Aplicación como Fertilizante de Liberación Controlada", Tesis Doctoral inédita, para Doctorado en Ciencias Químicas, Instituto de Ingeniería de España, Universidad de Madrid , p.48-62.
- (37) **Bunker, B. C., Arnold, G. W. y Wilder J. K. (1984)** "Phosphate glass dissolution in aqueous solutions", Journal of Non-Crystalline solids, New York , p.84-105.
- (38) **Boliform (2005)** "Especificaciones Técnicas de Fosfato, Asociación de Avicultura", Venezuela.

- (39) **Trinks W. y Mawhinney M.H. (1975)** "Hornos Industriales" Ed. W. Trinks, Alemania, p.95-150.G
- (40) **Anscombe F. (1959)** "Quik analysis methods for random balance experimentation", Londres, p.48-53
- (41) **Austin, J.G. (1193)** "Manual de Procesos Químicos en la Industria", Austria, p.57-59.
- (42) **Hoppe, U. (1996)** "A structural model for phosphate glasses", Journal of Non-Crystalline Solid, Reino Unido, p.21-30
- (43) **INRA (1989)** "Alimentation des animaux nonogastriques" 2da. Ed. Institute National de la Recherche Agronomique, Paris.
- (44) **Jacob K.D y Hill W.I. (1990)** "Soil and Fertilizer Phosphorus in Crop Nutrition", Vol IV, New York, p.69-75
- (45) **Mateos y Rebollar, P.G. (1998)** "Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal", Madrid, p.150-200.
- (46) **Navia, M., Bellot J., (1986)** "Avance del Proyecto AGRUCO en la Investigación con Roca Fosfórica Capinota", Serie técnica AGRUCO, Bolivia, p.20-23.
- (47) **Perry , R.H. (1993)** "Manual del Ingeniero Químico", Tomo I, II.
- (48) **Ravindran, V., Bryden,W.L. y Kornegay, E.T. (1995)** "Poultry Av. Biology Rev", Reino Unido, p.200-210.
- (49) **Rico, Augstburger, Bellot, Villarroel (1980)** "Evaluación Agronómica de la Roca Fosfórica Capinota en la Zona Andina", Serie técnica AGRUCO, Bolivia, p.45-47
- (50) **SICOBOL, (2002)** "Catalogo de Ladrillo Refractario", Bolivia-Cochabamba.
- (51) **Skoog-Leary (1997)** "Análisis Instrumental"
- (52) **Standar Methods (1995)**
- (53) **Vogel A.I (1996)** "Química Analítica Cuantitativa"

