



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
PRODUCCIÓN Y DE LA SALUD ANIMAL

**LIBERACIÓN RUMINAL EN CABRAS
DEL FÓSFORO DE INGREDIENTES
ENERGÉTICOS Y PROTEÍNICOS**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS

P R E S E N T A

ERIKA VALERIA HERNÁNDEZ GARCÍA

TUTOR: Dra. AURORA HILDA RAMÍREZ PÉREZ

COMITÉ TUTORAL: Dra. SILVIA ELENA BUNTINX DIOS

Dr. MARIO COBOS PERALTA

MÉXICO, D.F.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Este trabajo fue financiado por el proyecto PAPIIT IN 214309 **“Estudio del efecto de la materia prima y del tamaño de partícula del forraje sobre la utilización digestiva y metabólica del fósforo en ovinos y caprinos para ayudar a disminuir su excreción y el impacto ambiental”**. Bajo la supervisión del Dr. Aurora Hilda Ramírez Pérez.

DEDICATORIA

A ti mi Dios infinito, que me has brindado todo tu amor a través de los ángeles y experiencias que pones a mi paso, durante este hermoso camino que me ha tocado recorrer.

A ti mamá por ser el más grande ejemplo de amor, valor y trabajo. Por darme la vida y construir juntas cimientos indestructibles.

Te amo por sobre todas las cosas.

A ti papá por tu gran amor, confianza y apoyo incondicional. Por darme la vida. Porque me has enseñado a ser valiente e independiente. Te amo muchísimo.

A ti hermana por ser una mujer inteligente, valiente y una excelente madre.

Y a Bob por ser un padre para los niños y tu compañero.

A mis amados sobrinos Rodrigo y Leonardo por ser estrellas que brillan y reflejan el gran amor en mi familia.

A todos los miembros de mi familia y amigos que me han apoyado durante esta etapa de mi vida, los quiero...

Con todo mi amor y admiración: Mamá Chela y Papá Cuco porque siempre me acompañan, me protegen sin yo verlos, pero siempre sintiéndolos.

*A tía Evert, por tu inmenso amor, apoyo,
confianza, por ser un gran ejemplo de vida.
Por ayudar a todos, con la recompensa
que da la satisfacción de hacerlo.*

*A mis queridos amigos Aldo y Susana por llegar en el momento
justo y brindarme parte de su tiempo, compañía y paciencia.*

*Así como a todas las personas que han creído en mí y
compartieron su tiempo, sus palabras, sus experiencias.*

*A tí por tu inevitable presencia y con tu sonrisa
llenar de color el paisaje, así como por
coincidir...*

*Los cambios se dan en nuestras vidas
con una intensidad muy fuerte y son
contradictorios, porque:
donde antes existía debilidad
ahora solo se encuentra fortaleza,
donde antes existía miedo
ahora solo hay valentía,
donde antes existía oscuridad
ahora solo existe luz,
donde antes había cansancio
ahora solo existe energía,
donde antes había dolor
ahora solo existe sanación,
y sobre todo en donde antes había dudas
ahora solo existe la verdad..
Solo sé tú mismo, no te compares
y nunca, nunca olvides que eres un ser humano
único y excepcional.*

EVHG

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de llevar sus colores, de formarme desde el nivel bachillerato y de ser orgullosamente lo que al día de hoy soy.

A la Dirección General de Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, por el financiamiento del proyecto PAPIIT No IN214309

A CONACYT por la beca otorgada durante mi posgrado

A la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia por dejarme realizar un logro más.

Al Posgrado de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia por la oportunidad otorgada para realizar esta meta. Así como a todos sus integrantes, los cuales siempre me orientaron y apoyaron en todo momento.

Al Centro de Enseñanza, Práctica, Investigación en Producción y Sanidad Animal (CEPIPSA) por permitirme realizar la fase experimental del trabajo de investigación.

A las cabras y borregas que me permitieron aprender tanto acerca de su fisiología, comportamiento y compañía.

A todos mis profesores que me han dejado sus semillas de conocimientos, enseñanzas, experiencias y consejos.

Al Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica de la F.M.V.Z. por hacer realidad mis sueños, de entender un poco más el área de Nutrición Animal, así como al personal que lo integra y aprender de él cada día.

Gracias Dra. Aurora Hilda Ramírez Pérez por darme la oportunidad de ser su estudiante de posgrado, de creer en mí persona y de enseñarme a trabajar sistemáticamente y minuciosamente en cada circunstancia. Así como por todo su apoyo para la culminación de este trabajo de investigación. He aprendido de usted muchas enseñanzas que me hacen ser una mejor profesionalista día con día.

Gracias Dra. Silvia Elena Buntinx Dios por enseñarme tantas cosas, compartir conmigo conocimientos, experiencias y permitirme formar parte de su equipo de trabajo.

Gracias Dr. Mario Cobos Peralta por compartir conmigo sus conocimientos, por su apoyo, tiempo y comprensión.

Agradezco a mi Comité Tutorial: Dra. Aurora Hilda Ramírez Pérez, Dra. Silvia Elena Buntinx Dios y Dr. Mario Cobos Peralta, por caminar conmigo desde el comienzo de este trabajo de investigación, así como por todas sus observaciones y sus recomendaciones.

Mil gracias a mi honorable jurado por su tiempo, apoyo, comprensión, consejos y observaciones: Dra. Ma. Esther Ortega Cerrilla, Dra. Ofelia Mora Izaguirre, Dra. Aurora Hilda Ramírez Pérez, Dr. Luis Corona Gochí y Dr. Miguel Ángel Morales Arroyo.

Gracias Dr. Sergio Ángeles Campos por todo su apoyo y confianza para la realización de mis tesis en el Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica.

Gracias por sus clases, consejos, apoyo, tiempo y amistad: Dr. Luis Corona Gochí, Dr. Humberto Troncoso, Dr. Francisco Castrejón, Dr. Antonio Díaz Cruz, MPA. Manuel Cortez, MPA. Agustín Bobadilla, Dr. Carlos Gutiérrez, MPA. Javier Molotla, MPA. Javier Hernández, Q.A. Águeda García.

Gracias a Fer Palma por sus conocimientos, experiencia, ayuda y consejos compartidos conmigo durante mi estancia en el Laboratorio de Bromatología.

Gracias a todas las personas que han creído en mí y me han acompañado durante alguna etapa en mi vida.

“Porque el valor de las cosas no está en el tiempo que duran, sino en la intensidad con que suceden, por eso existen momentos inolvidables, cosas inexplicables y personas incomparables.”

Gracias a mi familia querida que son las raíces, con las que he ido creciendo, siempre me han acompañado y cuidado:

Papás, hermana, cuñado y sobrinos, los amo inmensamente,

Tía Evert, tío Salvador, tía Verónica así como a mis primos Dulce, Juan y Ana. Tía Ángeles, tío Ignacio y primos Carlos, Marco y Arturo. A tío Antonio y Mamá Tola.

A todos en verdad: Familia Hernández Líquidano y Familia García García.

Gracias especialmente a ustedes amigos que me acompañaron y me ayudaron en todo momento a realizar este experimento:

MVZ. Susana Zárate Epstein y MVZ. Aldo García Robledo, fueron luz que iluminó el camino.

Gracias a mis queridos amigos y colegas del CEPIPSA: Nicole Pineda, Juan de Dios Zavaleta, Eduardo M. Cabrera, Noemí, Jorge Vega, Eduardo García, Rodrigo, son parte de una familia que nació en Topilejo y hemos compartido momentos únicos.

Gracias a mis adorados amig@s, que son ángeles para mí, siempre me acompañan en cualquier situación: Janneth, Delia, Susana, Mary Toña, Magdalena, Samantha, Beatriz, Nicole, Miriam, Alicia, Erika Jazmín, Erika Rosas, Cristina, Nancy, Claudia, Ivonne, Adelina, Iris, Verónica, Hania, Fabiola, Blanca, Gabriela, Cinthya, Alejandra, Armando, Froylán, Raúl, Juan José, Aldo, Juan de Dios, Eduardo, Christopher, Luis Alberto, Carlos, Fernando, Gerardo, Rabindranath, César, Mauricio, Salvador, Jorge, Constantino, y Sergio, sin ustedes no estaría en donde estoy...

Gracias a ti por enseñarme lo que el amor puede llegar a significar y eso es "libertad"

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| LISTA DE CUADROS | X |
| LISTA DE FIGURAS | XII |
| RESUMEN..... | XIII |
| ABSTRACT | XIV |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA..... | 2 |
| 1.1.1 La caprinocultura..... | 2 |
| 1.1.2 Minerales | 4 |
| 1.1.3 Fósforo (P)..... | 5 |
| 1.1.3.1 Funciones del fósforo en el organismo animal | 6 |
| 1.1.3.2 Digestión, metabolismo y excreción del fósforo..... | 7 |
| 1.1.3.3 Requerimientos nutricionales de fósforo..... | 9 |
| 1.1.3.4 Fuentes dietarias de fósforo..... | 10 |
| 1.1.3.5 Ácido fítico y fósforo fítico (P _{phy})..... | 12 |
| 1.1.3.6 Fósforo y medio ambiente..... | 14 |
| 1.1.4 Técnica de digestibilidad <i>in situ</i> | 15 |
| 2. OBJETIVO GENERAL | 20 |
| 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 20 |
| 3. HIPÓTESIS..... | 20 |
| 4. MATERIAL Y MÉTODOS | 21 |
| 4.1 FASE DE CAMPO..... | 21 |
| 4.1.1 Lugar..... | 21 |
| 4.1.2 Animales..... | 21 |
| 4.1.3 Alimentación | 22 |
| 4.1.4 Ingredientes experimentales | 22 |
| 4.1.5 Prueba de digestibilidad <i>in situ</i> | 23 |
| 4.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO..... | 23 |
| 4.3 CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS | 24 |
| 5. RESULTADOS | 26 |
| 5.1 PESO VIVO Y CONSUMO DE MATERIA SECA | 26 |
| 5.2 pH DEL LÍQUIDO RUMINAL | 26 |
| 5.3 DESAPARICIÓN RUMINAL DE LA MATERIA SECA (MS) | 27 |
| 5.4 DESAPARICIÓN RUMINAL DEL FÓSFORO TOTAL (P _T)..... | 29 |
| 5.5 DESAPARICIÓN RUMINAL DEL FÓSFORO FÍTICO (P _{PHY})..... | 31 |

| | | |
|---------|--|----|
| 5.6 | DIFERENCIAS EN LA DESAPARICIÓN RUMINAL DE LA MATERIA SECA Y DE LAS FORMAS DE FÓSFORO | 32 |
| 5.6.1 | Alimentos proteínicos..... | 33 |
| 5.6.1.1 | Pollinaza..... | 33 |
| 5.6.1.2 | Harinolina..... | 33 |
| 5.6.1.3 | Pasta de soya | 34 |
| 5.6.2 | Alimentos energéticos | 34 |
| 5.6.2.1 | Sorgo | 34 |
| 5.6.2.2 | Salvado de trigo..... | 35 |
| 5.6.2.3 | Maíz..... | 35 |
| 6. | DISCUSIÓN..... | 37 |
| 6.1 | DEGRADACIÓN DE LA MATERIA SECA | 37 |
| 6.2 | DESAPARICIÓN RUMINAL DEL FÓSFORO TOTAL (P_T) Y FÍTICO (P_{PHY}) ... | 40 |
| 7. | CONCLUSIONES | 48 |
| 8. | LITERATURA CITADA..... | 50 |
| 9. | ANEXOS..... | 97 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Población caprina en México (1999-2009) Número de cabezas | 61 |
| Cuadro 2. Producción de leche caprina en México | 62 |
| Cuadro 3. Requerimientos de materia seca, calcio y fósforo para cabras lecheras en mantenimiento (NRC, 2007) | 63 |
| Cuadro 4. Contenido de fósforo total, fítico y fitasas en alimentos (Eeckhout y Paepe, 1994; NRC, 2001)..... | 64 |
| Cuadro 5. Requerimientos nutrimentales diarios para cabras de 50 kg de peso vivo en mantenimiento (NRC, 2007) | 65 |
| Cuadro 6. Composición química de los ingredientes utilizados en la ración para cabras lecheras (50 kg PV) en mantenimiento..... | 66 |
| Cuadro 7. Ingredientes y composición química de la ración para cabras lecheras (50 kg PV) en mantenimiento | 67 |
| Cuadro 8. Composición química de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz amarillo (Z) | 68 |
| Cuadro 9. Horarios de colocación (C) y recolección (R) de bolsas en las cabras experimentales | 69 |
| Cuadro 10. Coeficientes de la desaparición de la materia seca (MS) de pollinaza, harinolina, pasta de soya, sorgo, salvado de trigo y maíz..... | 70 |
| Cuadro 11. Relaciones de los coeficientes de la cinética de degradación de la materia seca (MS) con la composición química de los ingredientes..... | 71 |
| Cuadro 12. Coeficientes de la desaparición del fósforo total (Pt) de pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo. | 72 |
| Cuadro 13. Regresión de la desaparición ruminal de fósforo (g/kg Pt) en el tiempo de incubación (t) para sorgo y maíz. | 73 |
| Cuadro 14. Coeficientes de la desaparición del fósforo fítico (P_{phy}) de pollinaza, harinolina, pasta de soya, sorgo, salvado de trigo y maíz..... | 74 |
| Cuadro 15. Relaciones del contenido de fósforo fítico (P_{phy}) con componentes químicos de los alimentos y coeficientes de la cinética de degradación de la materia seca (MS) | 75 |
| Cuadro 16. Comparación de los coeficientes de la cinética de desaparición ruminal de MS (g/kg MS) y de fósforo total (g de Pt/kg Pt) de pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo..... | 76 |
| Cuadro 17. Comparación de los coeficientes de la cinética de desaparición ruminal del fósforo total (g Pt/kg Pt) y del fósforo fítico (g de P_{phy} /kg P_{phy}) de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y) y salvado de trigo (W)..... | 77 |
| Cuadro 18. Degradación de la materia seca, fósforo total y fítico (g/kg MS) de pollinaza, harinolina y pasta de soya a diferentes tiempos de incubación en bolsa de nylon en el rumen de cabras lecheras en mantenimiento. | 78 |

| | |
|--|----|
| Cuadro 19. Degradación de la materia seca, fósforo total y fítico (g/kg MS) de sorgo, salvado de trigo y maíz a diferentes tiempos de incubación en bolsa de nylon en el rumen de cabras lecheras en mantenimiento. | 79 |
| Cuadro 20. Relaciones de la degradación ruminal <i>in situ</i> del fósforo total (Pt) y la degradación de la materia seca (MS) para pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo, en cabras lecheras en mantenimiento. | 80 |
| Cuadro 21. Relaciones de la degradación ruminal del fósforo total (Pt) y la degradación del fósforo fítico (P _{phy}) para pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo, en cabras lecheras en mantenimiento. | 81 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Estructura química del ácido fítico | 82 |
| Figura 2. Bolsas de nylon sujetas a cadena plástica para su incubación en el rumen de cabras lecheras en mantenimiento | 83 |
| Figura 3. Consumo diario promedio de materia seca (MS) de cabras lecheras en condiciones de mantenimiento.. | 84 |
| Figura 4. pH del líquido ruminal de cabras lecheras en mantenimiento.. | 85 |
| Figura 5. Cinética de degradación de la materia seca (MS) de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz (Z) en el rumen de cabras lecheras en mantenimiento. | 86 |
| Figura 6. Cinética de degradación del fósforo total (Pt) de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y) y salvado de trigo (W) en el rumen de cabras en mantenimiento..... | 87 |
| Figura 7. Cinética de liberación de fósforo fítico (P_{phy}) de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz (Z) en el rumen de cabras en mantenimiento. | 88 |
| Figura 8. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de pollinaza en el rumen de cabras en mantenimiento..... | 89 |
| Figura 9. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de harinolina en el rumen de cabras en mantenimiento.. | 90 |
| Figura 10. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de pasta de soya en el rumen de cabras en mantenimiento..... | 91 |
| Figura 11. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de sorgo en el rumen de cabras en mantenimiento.. | 92 |
| Figura 12. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de salvado de trigo en el rumen de cabras en mantenimiento.. | 93 |
| Figura 13. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de maíz en el rumen de cabras en mantenimiento. | 94 |
| Figura 14. Relación entre la degradación de fósforo total (Pt) y la de materia seca (MS) para pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz (Z).. | 95 |
| Figura 15. Relación entre la degradación de fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}), para pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz (Z).. | 96 |

RESUMEN

Liberación ruminal en cabras del fósforo de ingredientes energéticos y proteínicos,
Hernández García EV.

El fósforo (P) desempeña innumerables funciones estructurales y metabólicas en los dominios biológicos. Los sistemas internacionales ajustan sus recomendaciones de alimentación fosforada para disminuir la excreción de P, el cual contribuye a los procesos de eutrofización. En este trabajo se estudió la cinética de liberación ruminal del P alimentario [total (P_t) y fítico (P_{phy})] de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz (Z), empleando la técnica de digestibilidad *in situ*. Se utilizaron tres cabras Alpinas en mantenimiento, canuladas del rumen, en dos periodos. Las cabras recibieron diariamente 1.18 kg de MS conteniendo 79 g de PC, 2.25 Mcal ED, 2.1 y 1.7 g de Ca y P, respectivamente. Los ingredientes experimentales se molieron (0.8 mm) e incubaron (5 g) en el rumen en bolsas de nylon (5×10 cm). Los tiempos de incubación fueron: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, 12.0, 24.0 y 48.0 h. Las bolsas del tiempo 0.0 se lavaron con agua destilada. Los datos de desaparición de MS, P_t y P_{phy} se ajustaron con el modelo: $Y = A + B(1 - e^{-Ct})$ de Ørskov y McDonald, donde A estima la fracción rápidamente soluble, B, la potencialmente degradable y C, la tasa constante de desaparición para B. Los coeficientes sirvieron para calcular la degradación potencial y efectiva. Los coeficientes de la cinética de desaparición ruminal de MS fueron estadísticamente diferentes ($P < 0.05$) entre ingredientes. Los resultados obtenidos para MS son consistentes con la literatura existente, siendo la H la que presenta menor coeficiente B_{MS} y menor degradación potencial y efectiva. En el caso de P_t sólo se ajustaron al modelo los datos de los ingredientes proteínicos y W, mostrando diferencias ($P < 0.05$) para la fracción (A_{P_t} , B_{P_t}), pero no para (C_{P_t} ; $P > 0.05$). Para Z y S se observó un comportamiento de incremento-decremento, por lo que se obtuvieron ecuaciones de regresión polinomial. En este estudio, el P_t se solubilizó más rápidamente que la MS. Para P_{phy} , los seis ingredientes se ajustaron al modelo, existiendo diferencias ($P < 0.05$) en los coeficientes. La liberación del fósforo en el rumen depende, entre otros factores, del alimento. Si bien se observaron diferencias estadísticas ($P < 0.05$) en los coeficientes de cinética de liberación, la degradación efectiva del P_t fue mayor a 0.6 y la del P_{phy} fue superior a 0.5, lo que destaca el papel de los microorganismos ruminales en la liberación de estos analitos.

ABSTRACT

Ruminal liberation of phosphorus from energy and protein feeds in goats, Hernández García EV.

Phosphorus (P) has many structural and metabolic functions in biological domains, but it also contributes to the eutrophication process. Therefore, international animal feeding systems have been adjusting their P recommendations in such a way as to diminish P excretion. The aim of this study was to determine the kinetics of P liberation [total (P_t) and phytic (P_{phy})] from poultry litter (E), cottonseed meal (H), soybean meal (Y), sorghum (S), wheat bran (W), and corn (Z) in the rumen of goats, using the *in situ* digestibility technique. Three Alpine goats in maintenance with rumen cannulae were used in two periods. Each day the goats were fed 1.18 kg of DM containing 79 g of crude protein, 2.25 Mcal of digestible energy, 2.1 and 1.7 g of Ca and P, respectively. The experimental feeds were ground (0.8 mm), placed in nylon bags (5 x 10 cm, 5 g) and incubated for 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, 12.0, 24.0 y 48.0 h. The bags from 0.0 h were washed with distilled water. Dry matter (DM), P_t and P_{phy} disappearance data were adjusted to the model $Y = A + B(1 - e^{-Ct})$ from Ørskov and McDonald, where A estimates the rapidly soluble fraction; B, the potentially degradable fraction, and C, the constant rate of disappearance for B. The coefficients were used to calculate the potential and effective degradation. The coefficients for DM disappearance were statistically different ($P < 0.05$) among feeds. Results obtained for DM were consistent with existing information and H was the ingredient with the lowest B_{MS} coefficient and the lowest potential and effective degradation. In the case of P_t only the data from the protein feeds and W could be adjusted to the model, which showed significant differences ($P < 0.05$) for the A_{P_t} and B_{P_t} fractions, but not for C_{P_t} ($P > 0.05$). Corn and sorghum showed an oscillating behavior and, thus, polynomial regression equations were obtained. In this study, P_t disappeared more rapidly than DM. For P_{phy} , all the ingredients were adjusted to the model and significant differences ($P < 0.05$) were found among the coefficients. Phosphorus liberation in the rumen depends, among other factors, on the feed. Although statistically significant differences ($P < 0.05$) were observed among the coefficients of liberation, the effective degradation of P_t was greater than 0.6 and that of P_{phy} was greater than 0.5, which points out the role of the rumen microbes in their liberation.

1. INTRODUCCIÓN

La nutrición animal es una parte fundamental e integral de la producción animal. En el pasado, los estudiosos de esta ciencia enfocaron sus esfuerzos a precisar los requerimientos de nutrientes para los animales y, por otro lado, a conocer la composición de los alimentos y de las dietas. Recientemente, la nutrición animal ha incorporado la utilización de modelos mecanistas para predecir el comportamiento productivo de los animales ante las dietas empleadas. La nutrición está siendo utilizada también para determinar las reacciones biológicas de los animales. Sin embargo, ante el crecimiento exponencial de la población mundial, la producción animal enfrenta nuevos retos. La FAO (2010) estima que para 2050 será necesario incrementar la producción de alimentos en un 70% para alimentar a una población de más de 9,000 millones. Al mismo tiempo, debido a la limitación de las tierras, los agricultores se verán obligados a obtener un mayor rendimiento de la tierra cultivada. Así, será necesario satisfacer una demanda cada vez mayor de alimentos de origen animal inocuos y de alta calidad nutrimental. La limitación de tierras por el crecimiento explosivo de las zonas urbanas conlleva también a la disminución de las áreas de producción pecuaria. Esto ha obligado a concentrar un gran número de animales en áreas pequeñas, concentrando también la generación de desechos y efluentes de las producciones pecuarias. Además, los animales que se producen en esas unidades han sido mejorados genéticamente para lograr incrementos sustanciales en su productividad. Sin embargo, el potencial productivo se expresará mejorando las raciones que los animales reciben, lo anterior implica incrementar la cantidad de concentrados en las raciones. Por otra parte, la sociedad está más consciente del impacto de la producción animal en el medio ambiente. Por ejemplo, en la Unión Europea se prepara una legislación que determinará la superficie destinada a los animales en relación con su excreción de fósforo (P) y nitrógeno (N). El principio de esta ley es básico: no más P y N que el que puedan incorporar las plantas, para evitar su pérdida al medio ambiente (Verstegen, 2007). De esta manera queda establecida la relación entre la nutrición animal y el medio ambiente. ¿Cómo nutrir al animal para disminuir la excreción de P y N y sus efectos en el medio ambiente? ¿Cómo reducir la excreción de P y N sin menoscabo de la salud y la productividad del animal? Para ello, deberán interpretarse mejor los requerimientos de alimentación fosforada de los animales y

formular las raciones con conocimientos más precisos sobre la utilización del fósforo de los ingredientes. Algunos equipos de investigación en el mundo se han dado a la tarea de generar información utilizando como modelos animales a la vaca lechera y la oveja, pero la información utilizando a la cabra como modelo es escasa. Es en este punto que el presente estudio busca incidir.

1.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA

1.1.1 La caprinocultura

En el transcurso de la historia de la humanidad, el ganado caprino, a pesar del papel tan importante que ha ocupado en el desarrollo de las civilizaciones, ha sido en términos generales, relegado y destinado a ocupar las zonas áridas y semiáridas con baja capacidad vegetativa, aprovechándose bajo condiciones de tipo extensivas. Por ello, esta especie ha desarrollado una gran capacidad de supervivencia y de selectividad alimenticia de la vegetación disponible, lo que ha llevado a que se le acuse de deterioro ecológico en sistemas que muchas veces incluyen bovinos y ovinos (Ducoing, 2005).

Actualmente, se estima una población mundial de 720 millones de cabras que están distribuidas de la siguiente manera: 55.4% en Asia, 29.8% en África, 7.3% en Sudamérica, 4.4% en Europa, 3% en Norte y Centroamérica, 0.1% en las Islas del Pacífico. Los países con mayores poblaciones son China, India, Paquistán y Sudán (con 20.61, 17.08, 6.58 y 5.25%, de la población mundial, respectivamente). La mayor proporción de cabras se encuentra a lo largo de una franja comprendida entre los Trópicos de Cáncer y Capricornio, donde confluye la mayor parte de las zonas áridas y semiáridas del planeta. Los países con mayor número de caprinos se caracterizan por la baja productividad de éstos, en comparación con países como Francia o España, cuyas poblaciones caprinas son comparativamente bajas, pero han logrado altos niveles de productividad (Dubeuf, 2004; Boyazoglu *et al.*, 2005).

Las cabras ofrecen perspectivas de desarrollo principalmente por su alto potencial productivo de leche y por las características organolépticas de su carne. Las ventajas de la producción caprina son: alta tasa de desarrollo, alta fertilidad, alta eficiencia alimentaria, alta eficiencia en la producción de leche, alta demanda de carne, alta demanda de piel y pelo, alta demanda de abono, excelente controlador de malezas y alta demanda de platillos de origen caprino. Así, la caprinocultura sigue jugando un papel social importante, pero comienza a transformarse en una actividad empresarial con enormes exigencias de planeación estratégica, programación racional y manejo integral (Lebiee, 2004; Dubeuf, 2004; Boyazoglu *et al.*, 2005).

México no está exento de este cambio. La caprinocultura tiende a la tecnificación y a la obtención de mejores rendimientos productivos, tanto para autoconsumo como para propósitos comerciales. Después de Brasil, México posee el rebaño más grande del continente y cuenta con 1.33% del total mundial. En México la especie caprina representó 18.46% del inventario nacional ganadero de rumiantes en 2011, con cifras de 8'952,144 cabezas y una producción nacional de 164,592 y 43,223 toneladas de leche y carne, respectivamente (SIAP, 2011). Los estados con mayor población caprina son: Puebla, Oaxaca, Guerrero, Coahuila y San Luis Potosí, como lo muestra el Cuadro 1.

El consumo de carne de caprino se ha incrementado de 35.9% en 1996 a 46.5% en 2011 (SIAP, 2011). El contenido de grasa de la canal caprina oscila entre 47 y 54% menos que el de las canales de ovinos y bovinos, ya que el caprino deposita alrededor de 45% de su grasa en el peritoneo y el bovino y el ovino, 25%. La carne de caprino se caracteriza por ser más magra, baja en colesterol y con mayor digestibilidad. En México se consume principalmente como cabrito, barbacoa, birria, chito, mole de caderas y machitos (Ducoing, 2005). En cuanto a la producción de leche caprina, se conoce que en los últimos 10 años ha registrado un importante crecimiento debido a que se utiliza para una más amplia gama de productos. De acuerdo con cifras de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2011), alrededor de 2.5 millones de personas se

dedican a la caprinocultura en el país. Datos del consejo Mexicano de Criadores de Ganado Caprino (Comecapril) revelan que en México el consumo de queso de cabra crece a una tasa anual de 40%. Debido a esta tendencia, actualmente el porcentaje de la producción total de leche de cabra destinada a la fabricación de quesos se ha incrementado de 20 a 40%. Los principales estados productores de leche son Coahuila, San Luis Potosí y Nuevo León, tal como lo muestra el Cuadro 2.

1.1.2 Minerales

Los minerales dentro del organismo animal se encuentran en diversas combinaciones funcionales y químicas y en concentraciones características dependientes del elemento y tejido. Los minerales se han clasificado en macroelementos y microelementos (oligoelementos o elementos menores o traza). Los macroelementos o elementos mayores esenciales para los procesos fisiológicos en los rumiantes se encuentran en el organismo en concentraciones altas (por encima de los 70 mg/kg peso vivo) y son: calcio (Ca), fósforo (P), sodio (Na), cloro (Cl), potasio (K), magnesio (Mg) y azufre (S). Los requerimientos de estos minerales se expresan en gramos/día y el aporte que hacen los alimentos se expresa en porcentaje o en g/kg de materia seca (MS). Los oligoelementos se encuentran en el animal en cantidades muy bajas (menos de 70 mg/kg peso vivo) y son: cobre (Cu), cobalto (Co), manganeso (Mn), cinc (Zn), iodo (I), hierro (Fe), selenio (Se), molibdeno (Mo), flúor (F), cromo (Cr), níquel (Ni) y silicio (Si). Su requerimiento se expresa en mg/día y el aporte por los alimentos en mg/kg de MS o en ppm o en porcentaje (Underwood y Suttle, 1999).

Los minerales desempeñan diversas funciones (Georgievskii, 1982; McDowell y Conrad, 1984; Underwood y Suttle, 1999):

- Estructural: pueden formar componentes estructurales de órganos y tejidos corporales, como sucede con el Ca, P, Mg, F, Si, en huesos y dientes, y con el P y el S en las proteínas musculares. El Zn y el P forman parte de moléculas y membranas, contribuyendo a su estabilidad estructural.

- Fisiológica: los electrolitos en tejidos y fluidos corporales intervienen en el mantenimiento de la presión osmótica, del equilibrio ácido-base, de la permeabilidad de membrana y de la irritabilidad tisular. El Na, K, Cl, Ca y Mg en sangre, líquido cefalorraquídeo y secreción gástrica realizan estas funciones.
- Catalítica: pueden actuar como catalizadores de sistemas enzimáticos y hormonales, como componentes integrales y específicos de la estructura de metaloenzimas o como activadores menos específicos de dichos sistemas. El número y la variedad de metaloenzimas identificadas ha incrementado en las dos últimas décadas.
- Reguladora: se ha descubierto que los minerales intervienen en la regulación de la replicación y diferenciación celular. El Ca, por ejemplo, influye en las señales de transducción, el Zn influye en la transcripción y el I es constituyente de la tiroxina.

Las concentraciones de los elementos esenciales deben mantenerse dentro de límites estrechos para salvaguardar la integridad funcional y estructural de los tejidos y para mantener inalterado el crecimiento, la salud y la productividad del animal. Una ingestión continua de una ración desequilibrada de un mineral provoca cambios en su forma o concentración en tejidos y fluidos corporales, lo que puede llevar a que las concentraciones alcancen valores por debajo o por encima de los límites críticos. En tales circunstancias, pueden desarrollarse alteraciones bioquímicas, afectándose negativamente las funciones fisiológicas y presentándose trastornos estructurales, que varían de acuerdo con el elemento, el grado y la duración de la deficiencia dietética o toxicidad, la edad, el sexo y la especie del animal afectado.

1.1.3 Fósforo (P)

El impacto ocasionado por las deficiencias de P en la producción del ganado fue estudiado por Sir Arnold Theiler en 1912, quien relacionó su deficiencia con una elevada mortalidad, pobre crecimiento, infertilidad, debilidad, fracturas óseas y periodos de osteofagia de los supervivientes, que ingieren los huesos de sus congéneres muertos. Una problemática mundial es que existe deficiencia de P en los pastos de los diferentes continentes,

particularmente los que se encuentran en el hemisferio sur. Se han realizado varios experimentos que confirman y cuantifican las necesidades de P y su sinergismo con el Ca para el desarrollo y mantenimiento del esqueleto, así como su importancia tanto en tejidos blandos como en tejidos duros, el intercambio entre ellos y la influencia en el desarrollo de anormalidades clínicas (Underwood y Suttle, 1999).

1.1.3.1 Funciones del fósforo en el organismo animal

El fósforo es esencial para todos los organismos vivos y es uno de los principales nutrientes para el crecimiento animal. Es el mineral con más funciones en el organismo; una de ellas es la participación en el desarrollo y mantenimiento del tejido óseo. Alrededor del 80% del fósforo presente en el organismo animal se localiza en los huesos y en los dientes como cristales de hidroxiapatita [$\text{Ca}^{2+}_{10}(\text{PO}^{3-}_4)_6(\text{OH})$], fosfato cálcico [$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$] y fosfato de magnesio [$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$]; el 20% restante se encuentra como P inorgánico en los tejidos muscular y nervioso y en los fluidos intra y extracelulares, particularmente en los glóbulos rojos. La sangre contiene entre 35 y 45 mg de P/100 mL, localizado en su mayor parte en el interior de los eritrocitos, ya que la fracción plasmática sólo posee entre 4 y 6 mg P/100 mL en adultos y entre 6 y 9 mg P/100 mL en animales jóvenes (Underwood y Suttle, 1999).

El fósforo es un componente del ácido desoxirribonucleico (ADN) y del ácido ribonucleico (ARN). Como componente de los fosfolípidos, contribuye a la fluidez e integridad de la membrana celular (Soares, 1995); como fosfato, ayuda a mantener el equilibrio osmótico y el balance ácido-base. El P juega un papel esencial en las funciones metabólicas del organismo, incluyendo la utilización y transferencia de energía a través de AMP, ADP y ATP. El mineral es importante en la glucogénesis, en el transporte de ácidos grasos, en la síntesis de aminoácidos y proteína y en la actividad de la bomba Na^+/K^+ (McDonald *et al.*, 1995). Cualquier limitación en el suministro de P se reflejará en un deterioro generalizado de las funciones del cuerpo (McDowell, 1992).

1.1.3.2 Digestión, metabolismo y excreción del fósforo

El animal ingiere el fósforo como mono, di y tri fosfato inorgánico o en forma orgánica como fosfolípidos y fosfoproteínas, que son hidrolizados en el intestino delgado, o bien como fitatos, que son degradados total o parcialmente por las fitasas microbianas producidas en el rumen y otros compartimientos fermentativos de los animales. Su degradación depende principalmente de la proporción de fitatos en la dieta y de los tratamientos físicos (calor) o químicos (formaldehído) a que son sometidos algunos ingredientes alimenticios, que reducen la tasa de degradabilidad de los fitatos a nivel ruminal (Konishi *et al.*, 1999; Park *et al.*, 2000).

Los requerimientos de fósforo para los microorganismos son de dos a tres veces superiores a los del animal (Komisarczuk *et al.*, 1985). Este elemento es necesario para los microorganismos para la digestión de la celulosa (Burroughs *et al.*, 1951) y para la síntesis de proteína microbiana (Breves y Schroeder, 1991). Durand y Kawashima (1980) señalan que el P disponible (de la dieta y del reciclaje de la saliva) para los microorganismos del rumen debe ser por lo menos de 5 g/kg de la materia orgánica digestible para optimizar la degradación de las paredes celulares de los ingredientes fibrosos. Para mantener la concentración de P inorgánico en la fase líquida del contenido ruminal, el P dietario debe ser rápidamente convertido a P inorgánico. Una deficiencia de P dietético se puede manifestar en una reducción en el consumo de alimento y en la digestibilidad de la materia seca (Bass *et al.*, 1981).

La cantidad de fósforo endógeno normalmente reciclado al rumen es de 200 mg/h (Georgievskii, 1982); esto significa que podría haber un exceso del elemento para los microorganismos del rumen debido al reciclaje. Sin embargo, el flujo de la saliva puede variar ampliamente, ya que está influido por el consumo y el tipo de alimento (forraje vs concentrado) y el tiempo de rumia. La absorción de P en el tubo gastrointestinal es rápida y se lleva a cabo por transporte activo y difusión pasiva. Como lo han demostrado los estudios con ³²P, mucho del P marcado se incorpora a los fosfolípidos de las células de la mucosa intestinal (Pond *et al.*, 2002). El fósforo se absorbe en la porción media (yeyuno)

del intestino delgado y en los rumiantes, también en la parte superior del tracto, principalmente en el duodeno. El P atraviesa la membrana celular del intestino contra un gradiente de concentración, en presencia de Ca y Na (Georgievskii, 1982). Solamente pequeñas cantidades son absorbidas en el rumen, omaso y abomaso. La absorción del P depende de una serie de factores, como la forma química, la relación Ca:P, el pH intestinal, los niveles dietéticos de Ca y P, la presencia de vitamina D, las grasas y otros minerales como el Fe, Al, Zn, Cu, Mo y Mg (Church *et al.*, 1971; Georgievskii, 1982). Muchos de los factores que aumentan la absorción de Ca, incluyendo la vitamina D, también incrementan la absorción del P (William y Ganong, 1994). La síntesis de la 1,25 dihidroxicolecalciferol, como en el caso del Ca, puede estimularse cuando la concentración de fosfatos en sangre es muy baja, lo cual ocasiona una mayor eficiencia en su absorción (Horst, 1986).

El fósforo en la sangre se encuentra como orgánico e inorgánico y su proporción varía entre 3-4:1 en los rumiantes (Georgievskii, 1982). La concentración de P inorgánico en el plasma normalmente es de 1.3 a 2.6 mmol/L (6 a 9 mg/100 mL para bovinos en crecimiento y de 4 a 6 mg/100 mL para animales adultos). La concentración intracelular de P total es de 45 - 60 mg/L (Georgievskii, 1982). Los rumiantes mantienen relativamente constante las concentraciones de P en el plasma sanguíneo (Van Soest, 1994) a través de su absorción desde el tracto digestivo y su liberación desde el hueso para el mantenimiento de su homeostasis en el plasma.

El metabolismo del mineral está relacionado con el del tejido óseo, el de los fosfolípidos y el de los compuestos fosfatados ricos en energía, como ATP, AMP cíclico, 2,3 difosfoglicerato y otros compuestos vitales para el organismo. El metabolismo óseo del P no está tan regulado, pero es similar al del Ca (William y Ganong, 1994). La homeostasis del P se mantiene predominantemente por el reciclaje salival y la excreción fecal endógena, que están relacionados directamente con la cantidad de P dietario absorbido. Las concentraciones de P en la saliva pueden ser de 4 a 5 veces la del plasma sanguíneo. En los bovinos, la cantidad de P secretado diariamente por la saliva se encuentra entre 30 y 60 g y

en las ovejas, entre 5 a 10 g (Breves *et al.*, 1988; Reinhardt *et al.*, 1988; Scott, 1998). Casi todo el P en la saliva es inorgánico (Reinhardt *et al.*, 1988) y la cantidad secretada parece estar regulada por la hormona paratiroidea (Wasserman, 1981). Sin embargo, la controversia sobre la regulación o control de la secreción del P inorgánico procedente de la saliva aún persiste, pues no se sabe si el control lo ejerce la hormona paratiroidea o la 1,25 dihidroxicolecalciferol (Compton *et al.*, 1980; Mañas *et al.*, 1982; Wright *et al.*, 1984). El P inorgánico de origen salival se absorbe a través del intestino delgado con igual o mayor eficiencia que el P dietario (Challa y Braithwaite, 1989). El exceso de P pasa al tracto digestivo a través de la saliva y se excreta en las heces. El incremento en su excreción vía urinaria ocurre cuando las dietas son relativamente ricas en P y bajas en Ca (Vipperman *et al.*, 1969) o cuando los animales tienen un consumo restringido de energía (Siebert y Cameron, 1978).

1.1.3.3 Requerimientos nutricionales de fósforo

El NRC (2007) utiliza el método factorial para estimar los requerimientos de P de las cabras. Los requerimientos de mantenimiento incluyen las pérdidas endógenas fecales y en orina. Los requerimientos de lactación serán considerados como la concentración del mineral en la leche multiplicada por la producción corregida a 4% de grasa. Los requerimientos de gestación están definidos como la cantidad del mineral retenida en el tracto reproductivo (feto y útero) en cada día de gestación. Los requerimientos de crecimiento están expresados como la cantidad del mineral retenida por cada kilogramo de peso ganado y se calculan con la ganancia de peso diaria esperada. La recomendación de P para mantenimiento es de 6.5 g de P/kg PV en cabras (Kessler, 1991; Haenlein, 1992). En el Cuadro 3 se presentan los requerimientos de Ca y P para cabras adultas con un peso entre los 20 y 90 kg.

1.1.3.4 Fuentes dietarias de fósforo

El contenido total de un mineral tiene poco significado a menos que se determine su disponibilidad biológica. Ningún elemento se absorbe o se utiliza totalmente y siempre se pierde cierta cantidad en los procesos digestivos y metabólicos. Antes de que un nutriente esencial pueda tener valor nutricional, debe estar en una forma que pueda ser digerido, absorbido y transportado a la parte del organismo donde se le pueda utilizar (Peeler, 1972). La absorción de los minerales se ve afectada por varios factores, entre ellos el tipo de ración, la forma química del elemento, la proporción de minerales presentes en la dieta, el pH intestinal, el tipo de alimento, la edad y el sexo del animal. Factores tales como el ambiente, niveles hormonales, enfermedades, parásitos, procesamiento del alimento y el contenido dietético de grasa, energía y otros minerales pueden tener también algún efecto (Peeler, 1972; McDowell, 2003).

Forrajes

Los estudios realizados por McDowell y Conrad (1977) y (McDowell et al., 1984) muestran una deficiencia de P en los forrajes y éste es probablemente el factor limitante más importante de la baja productividad de los rumiantes en pastoreo en el trópico mexicano. El contenido de P en los forrajes se modifica dependiendo del equilibrio del elemento en el suelo, estado de maduración de la planta y clima. Por ejemplo, un período seco y caliente puede acelerar la maduración de las plantas, Por lo tanto, en una estación seca, el pasto maduro es bajo en P. Estudios de Minson en 1990 y Jumba en 1995 demuestran que la concentración de P oscila entre 0.03 y 0.05 g/kg materia seca (MS) de P extraído del suelo. Los forrajes de climas templados contienen más P en relación con los forrajes tropicales (3.5 g vs 2.3 g/kg MS, respectivamente). Del mismo modo, las leguminosas contienen más P que las gramíneas (3.2 g vs 2.7 g/kg MS, respectivamente; Minson, 1990, citado por Underwood y Suttle, 1999). La distribución del P es uniforme en las hojas y tallo, aunque a medida que la planta madura, disminuye el contenido de P, sobretodo en épocas de sequía. Estudios en Reino Unido han señalado mayores cantidades de P en ensilados con respecto a henos (3.2 g vs 2.2 g/kg MS, respectivamente) debido al

estado inmaduro del forraje al ensilarlo (Underwood y Suttle, 1999). Los compuestos inorgánicos de P en los forrajes están principalmente en forma de ortofosfato. Otros compuestos inorgánicos menores incluyen el pirofosfato, aportado por el ATP, y el polifosfato de cadena larga, una forma de almacenamiento de P, compuestos que ocurren ampliamente en las plantas inferiores (Bielecki, 1973; Toor, *et al.*, 2005). Los fosfatos inorgánicos son importantes para la nutrición vegetal y la fisiología, ya sea como sustratos o productos de reacciones bioquímicas clave (Bielecki, 1973). Los compuestos orgánicos de P se componen principalmente de ADN, ARN, fosfolípidos y monoésteres ortofosfato, particularmente ácido fítico. A excepción del ácido fítico, el contenido de las otras tres fracciones de P orgánico es relativamente bajo (Bielecki, 1973).

Estudios de Jones y Betteridge (1994) demostraron que los animales en pastoreo prefieren pastos que recibieron fertilizantes fosforados y tienen la capacidad de seleccionar la hierba con mayor concentración de P. El problema aparece cuando la hierba contiene una mezcla de material joven, maduro y muerto y/o una mezcla de especies que varían en la concentración de P y su palatabilidad (McLean *et al.*, 1990, citado por Underwood y Suttle, 1999). Por lo tanto, se recomienda medir el contenido de P en las hierbas con métodos definidos y anotar los cambios en el aporte de P disponible de las plantas de un año a otro (Underwood y Suttle, 1999).

Concentrados

Los cereales presentan una concentración de P aparentemente adecuada y relativamente uniforme (2.7 – 4.3 g P/kg MS), especialmente los suplementos de origen proteínico (5 - 12 g P/kg MS). La mayoría de este P (50-80 %) se presenta en forma de ácido fítico, que es bien utilizado por los rumiantes; se han obtenido valores elevados de absorción de P de 0.78 – 0.81 para dos cereales y tres suplementos proteínicos de origen vegetal para ovejas. La situación de los no rumiantes es diferente. Se ha sugerido que los pavos tienen mayor capacidad para utilizar el P de las plantas que los cerdos y los pollos. Estudios demuestran que la superioridad del trigo se relaciona con su alto contenido de fitasa, especialmente en

las partes medias del trigo. Los suplementos proteínicos de origen animal, a excepción de la harina de pluma, son ricos en P disponible. Las harinas de carne y hueso y las harinas de pescado contienen > 30 g P kg/MS, con disponibilidades altas (Underwood y Suttle, 1999).

Fuentes inorgánicas

Las principales fuentes de fósforo utilizadas en las mezclas minerales para rumiantes son los fosfatos dicálcicos, monodicálcicos y tricálcicos (McDowell y Conrad 1977; McDowell et al., 1984). México es importador de fosfatos.

1.1.3.5 Ácido fítico y fósforo fítico (P_{phy})

Los alimentos de origen vegetal contienen sustancias denominadas factores antinutricionales, capaces de disminuir la disponibilidad de los nutrimentos. A este grupo de sustancias pertenece el ácido fítico o ácido mioinositol hexafosfato (IP_6 ; Figura 1), el cual se acumula preferentemente en las semillas, donde cumple una función de reserva de P, minerales y energía, que se utilizarán en la germinación (Cuadro 4). Por lo tanto, su contenido en tallos y hojas es muy bajo. En cereales y leguminosas constituye entre 1 y 2% del peso de la semilla, llegando a alcanzar concentraciones de 3 a 6% en algunos cereales. En las leguminosas, el ácido fítico está distribuido de manera uniforme en el cotiledón y asociado a estructuras proteínicas, mientras que en los cereales se encuentra en las capas externas, como la aleurona, y en el germen, en forma de subestructuras cristalinas en los cuerpos proteínicos (Sotelo *et al.*, 2002).

El ácido fítico fue descrito por Pasternak en 1903; consiste de una molécula de inositol con 28.2% de P, ya que posee seis grupos ortofosfato con carga eléctrica. Los fitatos son sales del ácido fítico con distintos cationes; la fitina es la sal del ácido fítico con Ca^{2+} y Mg^{2+} . Como consecuencia de tener un alto poder quelante, el IP_6 y el IP_5 (ácido fítico con cinco grupos ortofosfato) forman sales insolubles a pH neutro con numerosos cationes (Ca, Mg, Zn, Cu, Co, Fe, Mn). Los intermediarios del inositol con menos de cuatro grupos fosfato

pierden el poder quelante, lo que explica, en parte, la acción positiva de las fitasas sobre la absorción del Ca y otros minerales (Figura 1).

Las fuentes de fitasa (*mio*-inositol hexafosfato fosfohidrolasa) pueden ser las plantas o los microorganismos. La fitasa vegetal (EC 3.1.3.26) hidroliza el fosfato en la posición 4 o 6, mientras que la microbiana (EC 3.1.3.8.) se unirá en la posición 3. La fitasa vegetal hidroliza al ácido fítico, liberando el P inorgánico durante la germinación de las semillas (Reddy, *et al.*, 1989). En la mayoría de los cereales y sus subproductos industriales, que contienen cantidades relativamente altas de ácido fítico, la actividad de la fitasa es variable y no tiene relación con la concentración de P total o de ácido fítico (Cuadro 4; Eeckhout y Paepe, 1994; Martínez-Viveros *et al.*, 2000). El ácido fítico disminuye la disponibilidad de proteínas, Zn y otros minerales traza en animales no rumiantes (Haug y Lantzsche, 1983).

El valor nutrimental del fósforo fítico (P_{phy}) como fuente de P depende de varios factores, entre ellos, la actividad fitásica del alimento, el contenido de P y Ca de la dieta y la edad del animal. El uso de elevadas temperaturas ($> 84^{\circ}\text{C}$) durante el proceso de granulado puede inactivar a las fitasas del alimento. La hidratación de los cereales puede activar los efectos beneficiosos de las fitasas añadidas y la disponibilidad relativamente elevada del P en maíz y trigo húmedos (41-53%) pueden ser resultado de la activación de la fitasa (Underwood y Suttle, 1999). El P contenido en los fitatos está muy poco disponible en aves y cerdos, pues carecen de fitasas, como ya se indicó. En rumiantes y parcialmente en conejos, las fitasas producidas por los microorganismos del rumen y ciego liberan el P_{phy} . Varios estudios han determinado que la digestibilidad del ácido fítico en ovinos suplementados con fitato de calcio y fosfato monocálcico es de 63 a 69%. Lofgreen (1960) consignó que la digestibilidad verdadera de P_{phy} en carneros adultos complementados con fitato de calcio y fosfato monocálcico fue de 33 y 50%, respectivamente. Se informó que la digestibilidad verdadera de P_{phy} en ovejas alimentadas con dietas con alta inclusión de salvado de trigo fue de 25%, lo que indica una hidrólisis incompleta del ácido fítico (Ellis y Tillman, 1961). Sin embargo, menos de 1% del ácido fítico que se ingiere se encuentra en las heces de los terneros alimentados con una dieta rica en cereales, principalmente maíz y

sorgo (Nelson *et al.*, 1976). La variación en la digestibilidad del ácido fítico puede deberse a la composición de la dieta, que afecta el ecosistema ruminal y, en consecuencia, la producción de fitasa microbiana. En el rumen, varias cepas bacterianas producen fitasa para hidrolizar el ácido fítico y liberar el P inorgánico libre (Yanke *et al.*, 1998; Lan *et al.*, 2002). Yanke *et al.* (1998) encontraron que la actividad de la fitasa ruminal fue mayor en novillos alimentados con dietas altas en granos de cebada que en novillos alimentados con dietas de 100% heno. Utilizando placas de detección cualitativa y cuantitativa de la actividad fitásica, se descubrió que las bacterias productoras de la enzima son principalmente *Megasphaera elsdenii*, *Ruminicola prevotella* y *Selenomonas ruminantium*. Los fitatos que escapan de la degradación ruminal pueden hidrolizarse parcialmente y absorberse en el intestino delgado (Park *et al.*, 2002). En el intestino grueso el P fítico también es degradado por la acción de las fitasas microbianas.

Si bien el ácido fítico se considera un factor antinutricional, en los últimos años han surgido evidencias demostrando que este ácido ejerce una acción beneficiosa sobre el organismo, principalmente del ser humano. Numerosos estudios han demostrado que es un potente antioxidante, con propiedades anti-inflamatorias y antitumorales debido a su capacidad para inhibir la proliferación celular y la angiogénesis, inducir la apoptosis o muerte celular programada, así como regular la expresión de determinados oncogenes. El ácido fítico ha sido también reconocido por su capacidad para estimular el sistema inmune, prevenir la formación de cálculos renales y reducir el riesgo de aparición de enfermedades cardiovasculares (Graf *et al.*, 1987).

1.1.3.6 Fósforo y medio ambiente

El uso de fertilizantes de fosfato aumenta el contenido de P total en los cereales y las semillas al aumentar la cantidad de P inorgánico y mejorar su biodisponibilidad en los animales no rumiantes. A medida que el suministro de P de los fertilizantes inorgánicos y orgánicos, como el estiércol, excede el requerimiento de cultivo, no se encuentran mejoras en el rendimiento, pero el P excedente puede permanecer en el suelo y posteriormente

lixiviarse. La infiltración y acumulación de nitrógeno (N) y P en los mantos acuíferos o su escorrentía y acumulación en los cuerpos superficiales de agua provocan la eutrofización de esas aguas, ocasionando un daño ambiental. El exceso de P en el medio no afecta directamente a la salud humana, pero sí a los ecosistemas acuáticos. El N y el P acumulados favorecen el crecimiento de las algas, lo que resulta en su proliferación excesiva (Fontúrbel, 2005). El crecimiento excesivo de esta vegetación disminuye la oxigenación del agua y con ello se afectan los organismos acuáticos, que mueren, depositándose mayor cantidad de materia orgánica en el cuerpo de agua, lo que agrava el problema de falta de oxígeno. Estos efectos ya se han observado en México, en los lagos de Chapultepec, Tezomoc y Xochimilco, ubicados en el Distrito Federal; en el de Chapala en Jalisco, y en el de Pátzcuaro en Michoacán. La laguna de Chacahua, ubicada en Oaxaca, exporta al mar entre 15.40 y 89.22 toneladas de N y entre 0.31 y 183.3 toneladas de P al año. Otros ejemplos son la laguna costera La Joya-Buenavista en Chiapas y la Laguna Bojórquez en Cancún, Quintana Roo, así como la presa Valle de Bravo, en el Estado de México, y la presa Ignacio Allende, en Guanajuato (Chapa y Guerrero, 2010).

1.1.4 Técnica de digestibilidad *in situ*

La digestibilidad *in situ*, conocida también como *in sacco* o técnica de la bolsa de nylon, se utiliza con la finalidad de estudiar la digestibilidad o desaparición de los nutrimentos en el rumen. Es una técnica que ha ganado aceptación como una forma de medir la proporción en que los constituyentes del alimento (materia seca, fibra, N, minerales) son susceptibles a la degradación ruminal. Sin embargo, su utilidad y confiabilidad dependen principalmente de tres factores: la bolsa, el alimento y el animal (Ortega y Carranco, 1993).

- **Tamaño de poro de la bolsa.** Se ha observado que la parte del alimento que desaparece más rápidamente durante las primeras horas de incubación *in situ* corresponde a la parte soluble y partículas más finas de dicho alimento. Por lo tanto, varios investigadores han optado por lavar las bolsas con la muestra previa a la fermentación para eliminar la fracción soluble y además simular la salivación. El tamaño del poro afecta la entrada y

salida de materia seca a través de la bolsa, lo que puede representar una pequeña fuente de error si entra materia seca exógena y se toma como parte del alimento estudiado. Mehrez y Ørskov (1977) encontraron que las bolsas pueden retener materia seca exógena, aumentando 0.03 g el peso de las bolsas vacías. Es difícil establecer el tamaño de poro que debe tener la bolsa; depende más del tamaño de partícula de la muestra y de la naturaleza y tipo de alimento investigado. Sin embargo, una porosidad de 40 a 60 μm parece ser adecuada para permitir la entrada de microorganismos y líquido ruminal, así como la salida del material digerido; es muy importante conocer el tamaño del poro y el tipo de material del que están hechas las bolsas (Nocek y Grant, 1987).

- **Tamaño de partícula.** Al determinar la digestibilidad *in situ* de un alimento, éste no ha sido previamente masticado o sometido al proceso de rumia. Por lo tanto, debe molerse antes de someterlo a la incubación en el rumen. No existen resultados concluyentes sobre el grado en que el tamaño de partícula influye en la digestibilidad *in situ* del alimento. Es difícil establecer el tamaño de partícula más apropiado para estudios de digestibilidad *in situ*; un tamaño de 1-2 mm se considera como uno de los más adecuados (Lindberg, 1983).
- **Tamaño de la bolsa y cantidad de muestra.** Las dimensiones de la bolsa y la cantidad de muestra son factores importantes que pueden afectar la digestibilidad *in situ* del alimento. Investigadores como Playne et al. (1978) y Ørskov et al. (1980) demostraron que, a una cantidad constante de muestra, el tamaño de la bolsa repercutía sobre la digestibilidad *in situ* del alimento. Se indica que la relación entre la superficie de la bolsa y el tamaño de muestra debe ser de 10 a 20 mg/cm^2 para la mayoría de los forrajes y concentrados. Sin embargo, la cantidad de muestra y el tamaño de la bolsa dependerán del alimento estudiado, el tiempo que se va a incubar y el número de determinaciones o análisis que se quieran realizar en el residuo (Nocek, 1988).
- **Acumulación de gas dentro de la bolsa.** Esta puede afectar la digestibilidad *in situ* del alimento, ya que puede causar que las bolsas floten, lo que impide su libre movimiento dentro del rumen y limita cualquier acción mecánica causada por los movimientos

ruminales. También puede reducir el flujo de líquido ruminal a la bolsa y la entrada de sustancias y microorganismos para digerir el alimento (Ortega y Carranco, 1993).

- **Residuos microbianos.** La determinación de la degradación de la proteína del alimento con la técnica de digestibilidad *in situ* es una alternativa atractiva a los métodos de digestibilidad *in vivo*, debido a su simplicidad y reproducibilidad. La adherencia microbiana aumenta con el tiempo de incubación. Esto sugiere que las bacterias se unen a las partículas del alimento hasta un determinado tiempo de exposición ruminal; después, éstas se adhieren a otros sitios, según la disponibilidad del sustrato. Además del tamaño de la partícula, al aumentar el tamaño del poro de la bolsa se puede causar un aumento significativo en la adhesión de bacterias (Varvikko *et al.*, 1985).
- **Animales.** En la técnica de digestibilidad *in situ* se emplean diferentes especies animales: vacas adultas, vaquillas, borregos, cabras, caballos y cerdos, encontrando diferentes resultados. Inclusive dentro de la misma especie, las diferencias relacionadas con el sexo y el estado fisiológico pueden ocasionar variación. Muchas de estas diferencias pueden deberse a la relación entre el tipo de dieta que se proporciona y el estado fisiológico del animal, lo cual puede afectar otros factores ruminales además de la digestión (Siddons y Paradine, 1983).
- **Dieta.** La dieta es el principal factor que determina la cantidad y tipo de microorganismos que se encuentran en el rumen y, por lo tanto, el grado de digestión de los nutrientes dietarios. Por ejemplo, la alimentación con dietas altas en concentrados con un elevado contenido de carbohidratos fermentables reduce el pH ruminal y causa un cambio en la población microbiana, aumentando los organismos amilolíticos y disminuyendo los celulolíticos. Conviene que la digestibilidad *in situ* de la dieta o componentes de la dieta que se van a estudiar se realice en animales alimentados con esa dieta o con dichos componentes (Ortega y Carranco, 1993).

- **Posición de las bolsas dentro del rumen.** Investigadores han observado que la variabilidad entre duplicados en novillos se redujo cuando las muestras se incubaron en bolsas sujetas a un cordón de 50 cm de largo atado a la cánula ruminal, en comparación con las mismas muestras incubadas en bolsas atadas a cordones de 30 cm de largo. Mehrez y Ørskov (1977) llegaron a conclusiones similares y recomiendan que en borregos las bolsas deben estar sujetas a un cordón de 25 cm de largo. Es importante que las bolsas queden completamente sumergidas en el contenido ruminal, para reducir la variabilidad de los resultados obtenidos (Ortega y Carranco, 1993).

En términos generales la digestibilidad *in situ* presenta ventajas sobre la digestibilidad *in vitro*; entre ellas, que la digestión se lleva a cabo en el medio ruminal con la participación de los microorganismos en su ecosistema natural. Las bolsas recomendadas para la técnica *in situ* pueden tener un tamaño variable, pero éste debe ser suficiente para contener de 2 a 5 g de muestra. La tela utilizada debe ser uniforme en cuanto al tamaño y distribución de poros. Las materias primas o materiales a evaluar deben molerse con un tamaño de criba de 1 mm (Mehrez y Ørskov, 1977; Castellanos *et al.*, 1990; Ortega y Carranco, 1993).

JUSTIFICACIÓN

Ante la preocupación de conservar el medio ambiente para las generaciones futuras, la nutrición animal debe responder a las nuevas restricciones, una de ellas es la referente al control del P en los desechos animales. Para ello, es importante conocer en mayor grado la utilización del P en el animal, lo que depende de dos componentes; 1) el animal y 2) la disponibilidad del P en el alimento, que depende entre otros factores de la solubilidad del P dietario. Este aspecto se ha estudiado poco en rumiantes y sobre todo de los fosfatos inorgánicos. La absorción del P varía en función del animal (especie, raza, edad, estado fisiológico) y es tomada en cuenta para las recomendaciones de alimentación fosforada. Sin embargo, la disponibilidad del P dietario no es del todo conocida. En este punto, la disponibilidad en el rumen debe ser tomada en cuenta para mantener el equilibrio del ecosistema.

Así, el presente estudio buscó incidir en este aspecto. Se estudió la cinética de liberación del P alimentario de ingredientes energéticos (sorgo, maíz, salvado de trigo) y proteínicos (pasta de soya, harinolina y pollinaza) en el rumen de cabras. El uso de estas materias primas es común en las dietas nacionales para pequeñas rumiantes. Se pretende aportar información acerca de la cinética de liberación del P alimentario para optimizar su utilización en la formulación de raciones, con la finalidad de reducir su excreción al medio ambiente, sin menoscabo de la salud y de la producción animal. Al optimizar la utilización del P alimentario se disminuiría el impacto ambiental del P, así como el costo de la alimentación fosforada de los rumiantes.

2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo fue estudiar la cinética de liberación en el rumen de las diferentes formas de P alimentario de distintas materias primas utilizadas en la dieta de cabras, utilizando la técnica de la digestibilidad *in situ* (bolsa de nylon).

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Estudiar en cabras la cinética de liberación en el rumen del P total de diferentes materias primas (sorgo, maíz, salvado de trigo, pasta de soya, harinolina, pollinaza), utilizando la técnica de digestibilidad *in situ* (bolsa de nylon).

b) Estudiar en cabras la cinética de liberación en el rumen del fósforo fítico de diferentes materias primas (sorgo, maíz, salvado de trigo, pasta de soya, harinolina, pollinaza), utilizando la técnica de digestibilidad *in situ*.

3. HIPÓTESIS

1. Los coeficientes de la cinética de liberación del P total son diferentes para las materias primas analizadas.
2. Los coeficientes de la cinética de liberación del P fítico son diferentes para las materias primas analizadas.
3. Las cinéticas de liberación de la MS y del P total y P fítico de cada materia prima analizada son diferentes.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 FASE DE CAMPO

4.1.1 Lugar

El presente estudio se realizó en el Centro de Enseñanza Práctica, Investigación, Producción y Sanidad Animal (CEPIPSA), que pertenece a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (F.M.V.Z.) de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.). El centro está localizado en San Miguel Topilejo, Delegación Tlalpan, México D.F. Se encuentra ubicado a 19°12'33.31"N, 99°9'11.75"W y 2760 msnm. El clima de la zona es tipo c(w)b(ij), que corresponde a un clima semifrío, semihúmedo, con lluvias en verano. La precipitación pluvial alcanza entre 800 y 1200 mm anuales, en tanto la temperatura promedio anual alcanza los 19°C.

4.1.2 Animales

El protocolo de experimentación para la realización de este estudio fue aprobado por el Comité Institucional para Cuidado y Uso de los Animales de Experimentación (CICUAE) de la F.M.V.Z. – U.N.A.M. Se utilizaron tres cabras Alpino Francesa adultas, de un peso promedio 50 kg, en etapa de mantenimiento, que fueron sometidas a una cirugía de fistulización y colocación de cánulas ruminales. Los procedimientos quirúrgicos se realizaron bajo tranquilización (hidrocloruro de xilazina al 2.0%) y anestesia local (clorhidrato de lidocaína al 2.0%). La fase de campo se inició una vez que los animales se recuperaron de la intervención, con un peso promedio de 53.47 ± 10.91 kg. El peso promedio al final del periodo experimental (4 semanas) fue de 49.00 ± 8.32 kg. Durante el periodo de estudio, las cabras se alojaron en un corral techado, con piso de cemento, con cama de paja de avena. La limpieza del corral, así como de los comederos y bebederos, se realizó todos los días. Las cabras se examinaron clínicamente de manera periódica para asegurar su estado de salud.

4.1.3 Alimentación

La ración se elaboró con base en las necesidades de mantenimiento (Cuadro 5; NRC, 2007) para cabras lecheras de 50 kg de peso vivo; la composición química de los ingredientes y de la ración completa se presentan en los cuadros Cuadro 6 y 7, respectivamente. La ración totalmente mezclada se preparó semanalmente, distribuyéndose 780 g por la mañana (07:15h) y la misma cantidad por la tarde (17:00h).

El consumo diario de MS fue calculado mediante el registro cotidiano de la MS ofrecida menos la rechazada. Las cabras tuvieron agua de bebida y una premezcla mineral a libre acceso.

4.1.4 Ingredientes experimentales

Los ingredientes en estudio correspondieron a tres de tipo proteínico y tres de tipo energético. Su selección se realizó teniendo en cuenta que se incluyen con frecuencia en las raciones destinadas a alimentar pequeños rumiantes. Los ingredientes proteínicos seleccionados fueron: pollinaza (**E**), que provino de pollos de engorda alimentados sin fitasas, proporcionada por el Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Avícola (F.M.V.Z. – U.N.A.M.); harinolina (**H**) y pasta de soya (**Y**). En cuanto a los energéticos se seleccionaron: sorgo (**S**), salvado de trigo (**W**) y maíz amarillo (**Z**). Los ingredientes se caracterizaron (Cuadro 8) en el laboratorio de Bromatología del Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica (DNAB); los principios inmediatos del análisis químico proximal [proteína cruda ($N \times 6.25$), extracto etéreo, fibra cruda y cenizas] se cuantificaron conforme a los métodos de la AOAC (1990). El análisis de paredes celulares (FDN, FDA, lignina, celulosa y hemicelulosa) se realizó de acuerdo con Van Soest et al. (1991). Las concentraciones de Ca se obtuvieron con el método 927.02 de la AOAC (1990) y las de P_t por el método colorimétrico de Harris y Popat (Miles et al., 2001). Para cuantificar el P_{phy} se utilizó la técnica colorimétrica consignada por Haugh y Lantzch (1983). Las absorbancias se midieron en un espectrofotómetro ultravioleta visible (Genesys 10Vis, Thermo Scientific). Los alimentos se liofilizaron (Edwards, Freeze dryer super Modulyo) por 72h, como acondicionamiento para la cuantificación de P_t y P_{phy} .

4.1.5 Prueba de digestibilidad *in situ*

Con la finalidad de estimar la desaparición de MS, P_t y P_{phy} , se realizó una prueba de digestibilidad *in situ*, también conocida como técnica de la bolsa de nylon. Para ello, los ingredientes experimentales, se molieron en un molino Wiley con un tamaño de criba de 0.8 mm (Bravo et al., 2000), se pesaron 5 g de cada uno y se colocaron en bolsas de nylon (5×10 cm; 50 μ m tamaño de poro), fabricadas en el DNAB. Las bolsas se sellaron térmicamente y se llevaron a una cinética de 48 horas con los siguientes tiempos de incubación en el rumen: **0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, 12.0, 24.0 y 48.0** h. Las bolsas correspondientes al tiempo 0 no fueron incubadas, sólo enjuagadas con agua desionizada. En cada animal se introdujeron simultáneamente seis bolsas, dos de cada ingrediente energético o proteínico, que permanecieron en el rumen los tiempos señalados. Para ello, fue necesario atar las bolsas a una cadena de eslabones de plástico de 45 cm de longitud, la cual estaba sujeta al tapón de la cánula (Figura 2). Al final de la cadena se colocó peso para asegurar que las bolsas no permanecieran en el estrato de material grueso y se incubaran correctamente. Primero se trabajaron las materias energéticas y posteriormente, las proteínicas. En el Cuadro 9 se muestran los horarios de colocación y recolección de las bolsas. Cabe señalar que en estos horarios se obtuvo una muestra de líquido ruminal y se midió el pH (Conductronic pH 10), con la finalidad de contar con un indicador del metabolismo del rumen.

Al momento de la recolección, las bolsas se lavaron con agua desionizada hasta que el agua saliera clara. Posteriormente, las bolsas se congelaron en nitrógeno líquido (-196°C), para después preservarse a -20°C hasta su análisis en los laboratorios del DNAB.

4.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO

En el laboratorio de Bromatología (DNAB), las bolsas de nylon congeladas se sometieron a un proceso de liofilización (Edwards, Freeze dryer super Modulyo) por 72h, para acondicionar las muestras y cuantificar las pérdidas de MS, P_t y P_{phy} . Una vez liofilizadas, las muestras se conservaron en bolsas de polietileno con cierre hermético hasta ser analizadas. Las muestras liofilizadas se deshidrataron durante la noche en estufa de aire forzado a 80°C para la determinación de MS y, consecutivamente, se calcinaron a 500°C

por 12 h. Las cenizas obtenidas fueron suspendidas en una solución de ácido nítrico (HNO₃, 100 mL/L) y llevadas a 50 mL con agua destilada. El P_t se cuantificó por el método de Harris y Popat (Miles et al., 2001), mientras que para el P_{phy} se utilizó el método consignado por Haugh y Lantzch (1983). Las absorbancias se midieron en un espectrofotómetro UVVis (Genesys 10Vis, Thermo Scientific).

4.3 CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Las cantidades degradadas de MS, P_t y P_{phy} fueron ajustadas mediante un procedimiento de regresión no lineal (SAS 9.1.3, 2003), utilizando el modelo propuesto por Ørskov y McDonald (1970):

$$1) Y = A + B (1 - e^{-Ct})$$

Donde: *Y* es la cantidad real de material degradado (MS, P_t y P_{phy}); *A* es el intercepto de la curva de degradación en el tiempo cero, que describe la cantidad de material de rápida desaparición en relación al componente $B (1 - e^{-Ct})$; *B* es la cantidad de material potencialmente degradable; *C* es la tasa de degradación constante para la fracción *B*.

Una vez obtenidos los coeficientes de la cinética de degradación se procedió a calcular:

La degradación potencial (Ørskov y McDonald, 1970) de la cantidad de MS, P_t y P_{phy} en el rumen, cuando se da el tiempo suficiente:

$$2) A+B$$

La degradación efectiva (*d*) de los materiales (MS, P_t y P_{phy}), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$3) d = A + (B \times C) / (C + 0.06)$$

Donde: A , B y C corresponden a los coeficientes obtenidos por el primer modelo y 0.06 es la tasa de degradación por hora de la MS (Ørskov y McDonald, 1970). El modelo de Ørskov y McDonald (1970) se detalla en el Anexo 1.

Los resultados de consumo de materia seca se analizaron utilizando un ANDEVA de un solo factor, para un arreglo completamente al azar (Minitab 16, 2010):

$$4) Y_{ij} = \mu + w_i + \varepsilon_j$$

Donde: Y corresponde al consumo de MS; w es la semana experimental ($i = 1, \dots, 4$) y ε es el error experimental $\sim N(0, \sigma_e^2)$.

Los datos de los coeficientes de las cinéticas de degradación (A , B y C), la degradación potencial ($A+B$) y efectiva (d), la degradación observada a las 48h (48) se analizaron utilizando un ANDEVA de un solo factor, para un arreglo completamente al azar (Minitab 16, 2010):

$$5) Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_j$$

Donde: Y corresponde a la variable de respuesta; τ es el ingrediente experimental ($i = E, H, Y, W, S$ y Z) y ε es el error experimental $\sim N(0, \sigma_e^2)$.

Para la comparación entre medias se utilizó la prueba de Tukey. Las diferencias entre los valores de degradabilidad de la MS y del P_t , así como los de P_i y P_{phy} se compararon mediante una prueba de t para muestras no independientes. Además se realizó un análisis de correlación (Coeficiente de Pearson) entre las diferentes variables de respuesta para encontrar las asociaciones existentes. El nivel de significancia se fijó en $P < 0.05$ y las tendencias se consideraron a $P < 0.1$.

5. RESULTADOS

Los cuadros de los análisis de varianza para consumo de materia seca, degradación de la materia seca, degradación del fósforo total y degradación del fósforo fítico se presentan en los Anexos 2, 3, 4 y 5, respectivamente.

5.1 PESO VIVO Y CONSUMO DE MATERIA SECA

No se observaron diferencias estadísticas ($P < 0.05$) en el peso vivo de las cabras entre las semanas de experimentación. Así, el peso promedio durante el periodo de prueba fue de 51.75 ± 8.23 kg, con un coeficiente de variación de 15.9%.

El consumo de materia seca (CMS) por semana de experimentación se presenta en la Figura 3. Puede observarse una disminución significativa ($P = 0.017$; ANEXO 2) entre la primera semana ($1,381.7 \pm 33.7$ g MS/día) y las semanas 3 y 4 ($1,119.5 \pm 107.2$ g MS/día). La disminución del consumo de alimento se atribuye principalmente a los efectos inherentes a la experimentación y a factores medio ambientales. Este trabajo se desarrolló hacia el fin de la estación invernal, y aunque fue realizado en confinamiento, durante esta época del año las condiciones meteorológicas de la zona fueron extremas, predominaron las bajas temperaturas, precipitaciones y vientos fuertes. Es bien conocido que las bajas temperaturas favorecen el consumo de alimento, pero los vientos y lluvias fuertes y el impacto de ellos sobre las instalaciones afectaron el consumo de materia seca. Sin embargo, al examen clínico, las cabras no mostraron alteraciones fisiológicas.

5.2 pH DEL LÍQUIDO RUMINAL

El pH ruminal durante las semanas de experimentación osciló entre 5.5 y 6.9, como puede observarse en la Figura 4. Las líneas continuas unen a las mediciones hechas a intervalos cortos de tiempo y, después de $t = 4.0$, las líneas punteadas unen a las mediciones hechas a intervalos mayores. El pH ruminal en los tiempos de cinética mostró un patrón de

comportamiento similar en las cuatro semanas de muestreo y dentro de rangos normales, aunque se obtuvieron mediciones bajas en $t=48.0$ de la semana uno (5.59) y $t=24.0$ de la semana tres (5.53). Sin embargo, estos valores no se asociaron a una acidosis subclínica, ya que no persistieron. Además, la dieta utilizada no fue acidogénica (880.0 g de forraje/kg de MS), por lo que se considera que el funcionamiento ruminal fue adecuado durante las semanas de experimentación.

5.3 DESAPARICIÓN RUMINAL DE LA MATERIA SECA (MS)

La Figura 5 presenta las curvas de la desaparición de la MS para los seis ingredientes en estudio, expresada en g de MS degradados por kilogramo de MS incubada, en los tiempos de cinética estipulados para este trabajo (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, 12.0, 24.0 y 48.0). Como se verá más adelante, estos datos se ajustaron al modelo de Ørskov y McDonald (1970). El Cuadro 10 muestra los coeficientes de desaparición (A_{MS} , B_{MS} , C_{MS} , $A_{MS+B_{MS}}$ y MS_{48}) obtenidos a partir del modelo ya referenciado y la MS_{48} de los seis ingredientes en estudio.

El análisis estadístico de los coeficientes de cinética ruminal mostró diferencias entre ingredientes ($P<0.05$, ANEXO 3). La fracción de MS rápidamente soluble (A_{MS}) fue menor ($P<0.05$) para H (210.6 ± 7.1 g/kg MS) que para Y o S (311.4 ± 9.9 g/kg MS). Esto se puede apreciar en la Figura 5, donde se observa que al tiempo 0, la degradación de la MS de la harinolina fue menor a la de la pasta de soya y sorgo, pero no difirió ($P>0.05$) de la de E, W y Z.

El mayor valor ($P<0.05$) de la fracción potencialmente degradable (B_{MS}) fue para S (974.1 ± 58.1 g/kg MS) y el menor, para H y W (440.1 ± 15.15 g/kg MS). El valor de B_{MS} se asoció negativamente ($P<0.001$) con los siguientes principios de la composición química de los ingredientes experimentales: FDN ($r=-0.77$), FDA ($r=-0.86$), lignina ($r=-0.82$) y Pt ($r=-0.85$). Las ecuaciones de las asociaciones consideradas más importantes se presentan en el Cuadro 11.

La tasa de desaparición de la fracción potencialmente degradable de la MS (C_{MS}) para el salvado de trigo fue de 0.112/h, el valor más elevado de todos los ingredientes estudiados ($P<0.05$). Este coeficiente se correlacionó ($P<0.001$) con los componentes químicos FDN ($r=0.53$), FDA ($r=0.57$), lignina ($r=0.60$) y celulosa ($r=0.62$).

El sorgo mostró la mayor ($P<0.05$) degradación potencial ($A_{MS}+B_{MS}$) de la MS (1258.8 ± 72.9 g/kg MS), mientras que la menor ($P<0.05$) fue para harinolina y salvado de trigo (676.9 ± 15.4 g/kg MS). Este coeficiente se correlacionó negativamente ($P<0.001$) con los componentes químicos FDN ($r=-0.76$), FDA ($r=-0.84$), lignina ($r=-0.88$), celulosa ($r=-0.80$) y Pt ($r=-0.84$). La mayor ($P<0.05$) degradación efectiva de MS (MS_d) se obtuvo para la pasta de soya (662.70 ± 14.70 g/kg MS) y la menor ($P<0.05$), para harinolina (423.0 ± 13.6 g/kg MS). La MS_d mostró asociaciones ($P<0.001$), pero poco importantes con los siguientes principios de composición química: EE ($r=0.56$), FDN ($r=-0.55$), FDA ($r=-0.56$), lignina ($r=-0.50$), celulosa ($r=-0.56$). La degradación de la MS observada a las 48 h (MS_{48}) en los ingredientes proteínicos siguió la misma dirección que los resultados de MS_d . Los ingredientes con mayor degradación de MS a las 48 h de incubación ($P<0.05$) fueron pasta de soya, sorgo y maíz (942.6 ± 4.47 g/kg MS); el valor menor ($P<0.05$) fue para harinolina (610.8 ± 17.8 g/kg MS). La MS_{48} se asoció negativamente ($P<0.001$) con FND ($r=-0.83$), FDA ($r=-0.88$), lignina ($r=-0.81$), celulosa ($r=-0.87$) y Pt ($r=-0.81$).

Cabe señalar que las degradaciones efectiva (MS_d), potencial ($A_{MS} + B_{MS}$) y a las 48 h (MS_{48}) de la MS fueron siempre menores para harinolina ($P<0.05$) que para sorgo, maíz, pasta de soya y pollinaza (Cuadro 10). En la Figura 5 se aprecia cómo la curva de degradación de la MS de la harinolina alcanzó 610.8 g/kg MS a las 48 h. Además, es posible observar que la degradación más importante de la MS para las diferentes materias primas ocurrió en las primeras 24 h de incubación (E= 803.1 ± 18.5 ; H= 540.0 ± 18.4 ; Y= 862.5 ± 24.9 ; W= 662.3 ± 12.2 ; Z= 805.6 ± 12.2 g/kg MS).

5.4 DESAPARICIÓN RUMINAL DEL FÓSFORO TOTAL (Pt)

En la Figura 6 se presentan los datos de degradación del Pt, expresados en g de fósforo total por kilogramo de fósforo total, para pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y) y salvado de trigo (W). La desaparición ruminal del Pt fue diferente a la observada para la MS y en dos ingredientes, sorgo y maíz, el modelo de Ørskov y McDonald (1970) no ajustó los datos (ver más adelante). Los resultados de la desaparición ruminal del Pt para los otros cuatro ingredientes se presentan en el Cuadro 12, en tanto los análisis de varianza correspondientes se muestran en el ANEXO 4. La liberación de Pt fue relativamente inconstante en las primeras dos horas de incubación. Todos los ingredientes mostraron valores significativamente diferentes ($P < 0.05$) para la fracción rápidamente soluble de Pt (A_{Pt}), siendo el mayor el de salvado de trigo (647.3 ± 7.3 g Pt/kg Pt) y el menor, el de pasta de soya (400.9 ± 9.8 g Pt/kg Pt). Sin embargo, en lógica relación, la pasta de soya presentó la mayor ($P < 0.05$) proporción de Pt potencialmente degradable ($B_{Pt} = 696.4 \pm 34.7$ g Pt/kg Pt) y el salvado de trigo, la menor (371.2 ± 10.0 g Pt/kg Pt). En cuanto a la tasa de liberación constante para la fracción B_{Pt} (C_{Pt}), no se encontraron diferencias ($P > 0.05$; $0.05 \pm 0.003/h$) entre los ingredientes, lo que significa que el Pt desapareció a razón de $0.05/h$, independientemente de la materia prima de origen. Tampoco hubo diferencias ($P > 0.05$) en la degradación potencial de Pt ($A_{Pt} + B_{Pt} = 1035.7 \pm 15.0$ g Pt/kg Pt). La mayor ($P < 0.05$) degradación efectiva del Pt (Pt_d) fue para salvado de trigo (837.0 ± 10.1 g Pt/kg Pt), no observándose diferencias entre los otros ingredientes ($P > 0.05$; 714.3 ± 17.1 g Pt/kg Pt). La desaparición de Pt_{48} de la harinolina (913.9 ± 8.7 g Pt/kg Pt) fue significativamente diferente ($P < 0.05$) de la de los demás ingredientes (973.9 ± 3.5 g Pt/kg Pt).

Los datos obtenidos para la degradación potencial de la MS ($A_{MS} + B_{MS}$, Cuadro 10) y del Pt ($A_{Pt} + B_{Pt}$, Cuadro 12), pueden observarse valores superiores a 1000 g/kg de MS para pasta de soya, sorgo y maíz y a 1000 g/kg de Pt para pollinaza, pasta de soya y salvado de trigo. Estos resultados son, en parte, producto del ajuste que se realiza con el modelo y han sido observados previamente por otros autores (Bravo *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2008).

Sólo la fracción rápidamente soluble (A_{Pt}) se correlacionó negativamente ($P < 0.001$) con la cantidad de PC contenida en el alimento ($r = -0.91$).

Tomando en consideración los datos obtenidos para la desaparición de MS_{48} (Cuadro 10) y de Pt_{48} (Cuadro 12), puede concluirse que la desaparición del P de los ingredientes estudiados fue casi total. En sorgo, maíz y pasta de soya la MS_{48} fue mayor a 900 g/kg y la Pt_{48} fue mayor a 900 g Pt/kg Pt en todos los ingredientes en estudio, incluyendo sorgo (928.66 ± 7.56 g Pt/kg Pt) y maíz (941.70 ± 12.6 g Pt/kg Pt). De manera similar a lo observado para MS, la mayor liberación de Pt se presentó en las primeras 24 h (E, 0.87; H, 0.89; Y, 0.92; W, 0.95) y a las 48 h sólo se incrementó ligeramente (E, 0.94; H, 0.91; Y, 0.97; W, 0.97).

Como ya se mencionó, el modelo exponencial negativo de Ørskov y McDonald (1970) no fue adecuado para el ajuste de los datos obtenidos de la incubación de sorgo y maíz, cuya liberación de Pt mostró un comportamiento de ascenso y descenso. Por ello, se trabajó con un polinomio de tercer orden y sólo se utilizaron cinco de las seis repeticiones, ya que los valores correspondientes a la repetición 3 mostraron una variación mayor de 3 desviaciones estándar a las 24 h, lo cual debilitaba el ajuste del polinomio. Las ecuaciones obtenidas se presentan en el Cuadro 13 (ver también Figura 11 y Figura 13). La ecuación de regresión para la desaparición ruminal de Pt para sorgo presentó una ordenada al origen de 711.2 g Pt/kg Pt. De manera general, la desaparición del Pt (Figura 11) mostró un incremento entre los tiempos 0.5 (711.03 ± 31.40 g Pt/kg Pt) y 12.0 (808.31 ± 9.03 g Pt/kg Pt). A $t=24.0$ hubo una disminución importante en la liberación (735.36 ± 22.8 g Pt/kg Pt); el modelo polinomial indicó que hacia las 32.5 h de incubación se alcanzaría una disminución a 703.89 g Pt/kg Pt. La liberación a las 48 h fue de 931.43 ± 8.62 g Pt/kg Pt, mientras que con el modelo se estimó en 931.04 g Pt/kg Pt. El comportamiento del maíz fue más oscilatorio que el observado para el sorgo. La ecuación polinomial (Cuadro 13) calculó 752.2 g Pt/kg Pt para la ordenada al origen (ver Figura 13). Después, la liberación se incrementó hacia $t=4.0$ (806.98 ± 18.20 g Pt/kg Pt), se mantuvo rumbo a $t=12.0$ ($800.50 \pm$

8.86 g Pt/kg Pt) y descendió a t=24.0 (614.24 ± 48.50 g Pt/kg Pt), para nuevamente incrementarse hacia las 48.0 h (954.03 ± 3.15 g Pt/kg Pt).

5.5 DESAPARICIÓN RUMINAL DEL FÓSFORO FÍTICO (P_{phy})

El Cuadro 8 (ver el apartado de Material y Métodos) presenta el contenido de P_{phy} de los ingredientes, el cual representó diferentes proporciones del Pt, dependiendo de la materia prima (E=0.46; H=0.87; Y=0.86; S=0.90; W=0.94 y Z=0.96). En la Figura 7 se aprecia cómo se comportó la liberación del P_{phy} en los diferentes alimentos experimentales. En el caso de los granos (S y Z), se observó que la liberación fue más rápida en las primeras cuatro horas, mientras que para los otros alimentos (E, H, Y y W) este periodo se extendió hacia las seis horas. Sin embargo, el salvado de trigo mostró un comportamiento de ascenso – descenso en las primeras 1.5 horas de incubación, después de lo cual la liberación fue más constante. Los análisis de varianza para los coeficientes de degradación del P_{phy} se presentan en el ANEXO 5 y los resultados, en el Cuadro 14. A diferencia de los datos de liberación de Pt, el modelo de Ørskov y McDonald (1970) sirvió para el ajuste de los datos de liberación del P_{phy} de los seis ingredientes, aunque en el caso de salvado de trigo, el modelo no ajustó los datos provenientes de un animal ($P=0.0983$), por lo que no se incluyeron en el análisis estadístico.

El valor más elevado de P_{phy} rápidamente soluble (A_{Pphy}) correspondió al salvado de trigo ($P<0.001$; 461.30 ± 24.60 g P_{phy} /kg P_{phy}). La mayor concentración de P_{phy} potencialmente degradable (B_{Pphy}) se encontró en la pollinaza ($P<0.001$; 928.30 ± 12.1 g P_{phy} /kg P_{phy}), siguiéndole en importancia la pasta de soya (837.30 ± 25.00 g P_{phy} /kg P_{phy}), la harinolina y el salvado de trigo (706.90 ± 18.80 g P_{phy} /kg P_{phy} ; n=11) y, finalmente, el sorgo y el maíz (447.40 ± 15.50 g P_{phy} /kg P_{phy}). La tasa constante de liberación de la fracción B_{Pphy} (C_{Pphy}) fue mayor para el maíz (0.420 ± 0.087 /h), mientras que para los otros ingredientes no se encontró diferencia ($P>0.05$; 0.102 ± 0.012 /h; n=29).

La degradación potencial de P_{phy} ($A_{Pphy} + B_{Pphy}$) no fue diferente ($P > 0.05$) entre pollinaza y salvado de trigo (1090.01 ± 17.2 g P_{phy}/kg P_{phy} ; $n=11$) ni entre harinolina y pasta de soya (925.76 ± 8.88 g P_{phy}/kg P_{phy}) y la menor degradación potencial ($P < 0.001$) se obtuvo para el maíz (585.79 ± 8.86 g P_{phy}/kg P_{phy}).

De manera similar a lo observado para $A_{MS} + B_{MS}$ y $A_{Pt} + B_{Pt}$, se obtuvieron valores superiores a 1000 g/kg de $A_{Pphy} + B_{Pphy}$ en pollinaza y salvado de trigo. La harinolina y el salvado de trigo presentaron la mayor ($P < 0.001$) degradación efectiva del P_{phy} (P_{phyd} , 703.36 ± 7.89 g P_{phy}/kg P_{phy}). En lo referente a la liberación del P_{phy} observada a las 48 h (P_{phy48}), no se encontraron diferencias estadísticas ($P > 0.05$) entre pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo (939.87 ± 5.58 g P_{phy}/kg P_{phy}), el sorgo mostró un valor intermedio (754.8 ± 28.2 g P_{phy}/kg P_{phy}) y el maíz, la menor liberación ($P < 0.001$; 633.60 ± 10.60 g P_{phy}/kg P_{phy}).

El contenido de P_{phy} estuvo relacionado ($P < 0.001$) con otros componentes químicos del alimento: FDN ($r = 0.85$), FDA ($r = 0.94$), lignina ($r = 0.93$), celulosa ($r = 0.91$) y Pt ($r = 0.86$). La degradación potencial del P_{phy} ($A_{Pphy} + B_{Pphy}$) se correlacionó ($P < 0.001$) con FDN ($r = 0.77$), FDA ($r = 0.78$), celulosa ($r = 0.79$), hemicelulosa ($r = 0.76$) y Pt ($r = 0.80$). La degradación del P_{phy} observada a las 48 h estuvo relacionada ($P < 0.001$) con FDN ($r = 0.74$), FDA ($r = 0.83$), celulosa ($r = 0.84$) y Pt ($r = 0.75$). Algunos coeficientes de la degradación de la MS también se correlacionaron ($P < 0.001$) con el contenido de P_{phy} de los ingredientes: B_{MS} ($r = -0.90$), $A_{MS} + B_{MS}$ ($r = -0.88$), MS_d ($r = -0.91$). Las relaciones consideradas más importantes se muestran en el Cuadro 15.

5.6 DIFERENCIAS EN LA DESAPARICIÓN RUMINAL DE LA MATERIA SECA Y DE LAS FORMAS DE FÓSFORO

En el Cuadro 16 se presenta la comparación entre los coeficientes de la cinética de degradación de MS y de Pt, apreciándose que en la mayoría de los ingredientes, la materia

seca y el Pt no siguieron el mismo comportamiento de desaparición en el rumen de las cabras experimentales. También se encontraron diferencias estadísticas ($P < 0.05$) entre la desaparición del Pt y del P_{phy} , las cuales se muestran en el Cuadro 17.

5.6.1 Alimentos proteínicos

5.6.1.1 Pollinaza

En la Figura 8 se aprecia el ajuste del modelo de Ørskov y McDonald (1970) a los datos reales de cinética de liberación y la diferencia que existió entre la desaparición de la MS y los analitos referentes al fósforo (Pt y P_{phy}) en la pollinaza. Las diferencias entre los coeficientes de las cinéticas de degradación de MS, Pt y P_{phy} se presentan en los Cuadro 16 y 17. La fracción rápidamente soluble (A, ordenada al origen) fue menor ($P < 0.05$) para MS que para Pt (274.5 vs 594.4 g/kg) y mayor ($P < 0.05$) para Pt que para P_{phy} . En el caso de la fracción B, los valores obtenidos para la MS (608.7 g/kg) y el P_{phy} (928.3 g/kg) fueron mayores ($P < 0.05$) que para Pt (438.8 g/kg). La degradación de la fracción B de la MS fue más rápida ($C = 0.076$ /h, $P < 0.05$) que la del Pt y no hubo diferencias ($P > 0.05$) entre Pt y P_{phy} . La Pt_{48} (973.8 g/kg) fue mayor ($P < 0.05$) que la MS_{48} (853.7 g/kg MS) y que la P_{phy48} (931.36 g/kg). El Cuadro 18 presenta el promedio de las cantidades degradadas de MS, Pt y P_{phy} expresadas en g/kg de MS en los diferentes tiempos de cinética.

5.6.1.2 Harinolina

La Figura 9 muestra el ajuste del modelo de Ørskov y McDonald (1970) a los datos de degradación de la MS y de las formas de fósforo (Pt y P_{phy}) para la harinolina. Las diferencias entre los coeficientes de las cinéticas de degradación de MS, Pt y P_{phy} se presentan en los Cuadro 16 y 17. La ordenada al origen, que corresponde al valor A (fracción rápidamente soluble), fue menor ($P < 0.05$) para MS (210.57) y P_{phy} (198.7g/kg) que para Pt (521.15 g/kg). Las fracciones B (potencialmente degradables) de la MS y del Pt no fueron estadísticamente diferentes (455.30 ± 20.40 g/kg; $P < 0.05$), pero sí hubo diferencia significativa entre B_{Pt} y B_{Pphy} (427.90 vs 741.20 g/kg; $P < 0.05$). No se encontró

diferencia significativa en la tasa constante de degradación entre MS (0.06/h) y Pt (0.04/h), pero el coeficiente de variación para C_{MS} fue de 30.69%, mientras que para C_{Pt} fue sólo de 4.38%. El valor de C_{Pphy} (0.13/h) fue considerablemente mayor que el de C_{Pt} . Lo anterior se observa en la Figura 9, ya que las curvas para Pt y P_{phy} muestran diferente grado de inclinación. A las 48 horas de incubación la MS se degradó en menor grado que el Pt ($610.8 < 913.90$ g/kg, $P < 0.05$), lo que se aprecia también con claridad en la Figura 9. No hubo diferencia estadística entre Pt_{48} y P_{phy48} (935.8 ± 12.2 g/kg; $P < 0.05$). Las cantidades promedio de MS, Pt y P_{phy} que fueron degradadas en los tiempos estipulados de cinética se presentan en el Cuadro 18 y están expresadas con base en la MS.

5.6.1.3 Pasta de soya

Las curvas de degradación de MS, Pt y P_{phy} de la pasta de soya se presentan en la Figura 10. Las diferencias entre los coeficientes de las cinéticas de degradación de MS, Pt y P_{phy} se presentan en los Cuadro 16 y 17. La fracción rápidamente soluble de la MS (311.14 g/kg) y de P_{phy} (74.30 g/kg) fueron menores ($P < 0.05$) que la calculada para Pt (400.9 g/kg Pt). No hubo diferencia estadística ($P > 0.05$) entre B_{MS} y B_{Pt} (695.6 ± 17.20 g/kg), pero B_{Pphy} (837.3 g/kg) fue mayor ($P < 0.05$) que B_{Pt} . Lo mismo sucedió con las tasas constantes de degradación de la fracciones B: $0.06 \pm 0.01/h$ ($P > 0.05$) para MS y Pt; $0.01/h$ para C_{Pphy} ($P < 0.05$). La degradación a las 48 h fue menor para la MS que para el Pt (949.1 vs 969.2 g/kg; $P < 0.05$) y para P_{phy48} (909.1 g/kg, $P < 0.05$) que para Pt_{48} . Este fue el único ingrediente experimental cuyas MS, Pt y P_{phy} tuvieron una degradación de 90% al finalizar las 48 h. Las cantidades promedio de MS, Pt y P_{phy} degradadas en los tiempos de cinética experimentales se presentan expresadas con base en la MS en el Cuadro 18.

5.6.2 Alimentos energéticos

5.6.2.1 Sorgo

Los datos reales y los modelados matemáticamente de la cinética de degradación del sorgo se presentan en la Figura 11. Como se indicó anteriormente, el modelo de Ørskov y

McDonald (1979) no ajustó los datos obtenidos de degradación del fósforo total. Por esa razón y para establecer las diferencias entre la degradación de la MS y las formas de fósforo, se realizó la comparación entre la degradación de MS y P_{phy} . La fracción rápidamente soluble de la MS (304.53 g/kg) no fue diferente ($P > 0.05$) de la calculada para P_{phy} (235.11 g/kg). La fracción B_{MS} fue considerablemente mayor a la fracción $B_{P_{phy}}$ (932.52 vs 492.09 g/kg; $P < 0.05$). La tasa constante de degradación de la fracción B de la MS (0.03/h) fue menor ($P < 0.05$) que $C_{P_{phy}}$ (0.19/h). La degradación a las 48 h fue mayor para la MS que para el P_{phy} (929.4 vs 770.19 g/kg; $P < 0.05$). El Cuadro 19 presenta las cantidades promedio de MS, Pt y P_{phy} degradadas en los tiempos experimentales de cinética.

5.6.2.2 Salvado de trigo

La Figura 12 presenta las curvas de degradación de los datos reales y ajustados (Ørskov y McDonald, 1970) para MS, Pt y P_{phy} del salvado de trigo. En los Cuadro 16 y 17 se presentan las comparaciones entre MS y Pt y entre Pt y P_{phy} , respectivamente. La fracción A de la MS (263.1 g/kg) fue menor ($P < 0.05$) que la calculada para Pt (371.2 g/kg) y ésta fue menor que la calculada para P_{phy} (461.30 g/kg; $P < 0.05$). La fracción potencialmente degradable (B) para la MS (263.1 g/kg) fue menor ($P < 0.05$) que para Pt (371.2 g/kg), la cual, a su vez, fue menor ($P < 0.05$) que para P_{phy} (665.8 g/kg). La tasa constante de degradación de la fracción B de MS (0.11/h) fue mayor que C_{Pt} (0.07/h; $P < 0.05$) y ésta fue mayor ($P < 0.05$) que $C_{P_{phy}}$ (0.04/h). La degradación a las 48 h fue menor ($P < 0.05$) para la MS (705.7 g/kg) que para el Pt (978.6 g/kg) y no se encontraron diferencias estadísticas entre Pt_{48} y P_{phy48} (972.65 ± 3.88 g/kg; $P > 0.05$). El Cuadro 19 presenta las cantidades promedio de MS, Pt y P_{phy} degradadas en los tiempos de cinética experimentales.

5.6.2.3 Maíz

En la Figura 13 se presentan las curvas de los datos reales y los ajustados matemáticamente de la cinética de degradación del maíz amarillo. Como ya se consignó con anterioridad y en semejanza al sorgo, el modelo de Ørskov y McDonald (1979) no ajustó los datos obtenidos

de degradación del fósforo total. Así, por las mismas razones expuestas para el caso del sorgo, se compararon los coeficientes de la cinética de degradación de la MS y P_{phy} para establecer las diferencias entre ambas. La fracción rápidamente soluble de la MS (263.03 g/kg) fue mayor ($P < 0.05$) que la calculada para P_{phy} (176.32 g/kg). Entre B_{MS} y B_{Pphy} , el primer valor fue considerablemente mayor que el segundo (799.45 vs 410.48 g/kg; $P < 0.05$). La tasa constante de degradación de la fracción B de la MS (0.04/h) fue menor ($P < 0.05$) que C_{Pphy} (0.42/h). La degradación a las 48 h fue mayor ($P < 0.05$) para la MS (950.17 g/kg) que para el P_{phy} (633.64 g/kg). El Cuadro 19 presenta las cantidades promedio (g/kg de MS) de MS, Pt y P_{phy} degradadas en los tiempos de cinética experimentales.

Se encontraron relaciones globales importantes entre la totalidad de los datos de la degradación de Pt y de MS (Figura 14) y de Pt con P_{phy} (Figura 15).

Sin embargo, el grado de asociación no fue el mismo para todos los ingredientes en estudio; para el sorgo y el maíz la asociación fue débil ($R^2 = 20.0\%$, datos no presentados). Esta asociación poco importante repercutió de forma importante en la asociación global ($R^2 = 36.0\%$). El grado de asociación fue más importante para pasta de soya ($R^2 = 92.0\%$), pollinaza ($R^2 = 89.0\%$), harinolina ($R^2 = 84.0\%$) y salvado de trigo ($R^2 = 77.0\%$); sus líneas de ajuste se presentan en las figuras mencionadas y sus ecuaciones en el Cuadro 20.

En la asociación entre la degradación del Pt y la del P_{phy} (Figura 15) se observó también una asociación débil entre sorgo y maíz ($R^2 = 20.0\%$, datos no presentados), la cual, de forma similar a la relación anterior, impactó desfavorablemente en la asociación global ($R^2 = 49.0\%$). En esta relación, el grado de asociación fue más importante para pollinaza ($R^2 = 92.0\%$), pasta de soya ($R^2 = 83.0\%$), harinolina ($R^2 = 83.0\%$) y salvado de trigo ($R^2 = 82.0\%$). Las ecuaciones correspondientes se consignan en el Cuadro 21.

6. DISCUSIÓN

El objetivo de este trabajo fue estudiar *in situ* la cinética de liberación del fósforo total y fítico de tres ingredientes energéticos y tres proteínicos, que se utilizan en la formulación de dietas para cabras y otros rumiantes. Para ello, se utilizó la técnica de la bolsa de nylon, que, si bien presenta sus limitantes como cualquier otra, comparada con las técnicas *in vivo* es rápida, menos costosa y muestra repetibilidad. Por otro lado, el modelo matemático utilizado para los ajustes de los resultados de laboratorio de MS, Pt y P_{phy} fue el de Ørskov y McDonald (1970). Este modelo exponencial negativo ha sido ampliamente utilizado en estudios de degradación de la MS, nitrógeno (Hughes-Jones, 1979, citado por Ørskov y McDonald, 1970; Batajoo y Shaver, 1998; Kamalak et al., 2005), almidón (Cerneau y Michalet-Doreau, 1991; Batajoo y Shaver, 1998; Offner et al., 2003); P total (Bravo et al., 2000; Čerešňáková et al., 2007 y 2008; Mjoun et al., 2008; Wang et al., 2008; Tang et al., 2010) y recientemente para la liberación de P fítico (Martin-Tereso et al., 2009) de diferentes ingredientes.

6.1 DEGRADACIÓN DE LA MATERIA SECA

Previo a la discusión referente a la liberación del P total y del P fítico es necesario revisar la cinética de desaparición de la MS de los ingredientes en estudio, la cual mostró para todos los ingredientes el comportamiento modelado por Ørskov y McDonald (1970). De acuerdo con los coeficientes estimados por el modelo, A corresponde a la fracción rápidamente soluble, incluyendo la porción de alimento que se pierde durante el lavado de la bolsa al tiempo cero; la fracción B corresponde a la porción del alimento potencialmente soluble, y C corresponde a la tasa de degradación calculada para la fracción B . A partir de estos valores es posible estimar una degradabilidad potencial ($A+B$) que representa la cantidad de nutrimento que puede ser disuelto o degradado en el rumen cuando permanece el tiempo suficiente para ello. Los valores sirven también para estimar la degradabilidad efectiva [$A+(B*C)/(C*0.06)$], lo que representa la cantidad de nutrimento que puede ser realmente degradado en el rumen y también está definida por el tiempo de permanencia del nutrimento en el rumen. La degradabilidad efectiva corresponde a la cantidad de nutrimento

disponible para la degradación ruminal, es variable y está en función inversa a la tasa de recambio de la digesta en este órgano.

La mayoría de los trabajos que involucran la cinética de degradación de nutrientes se han realizado en bovinos u ovinos y muy pocos en caprinos. En referencia a los coeficientes de la cinética de degradación de la MS, Bravo et al. (2000) y Mjoun et al. (2008) consignaron valores mayores para A (489.0 y 437.0 g/kg MS, respectivamente) y C (0.078 y 0.075, respectivamente) para la pasta de soya. En el mismo sentido fueron los resultados de Mjoun et al. (2008) para maíz (A=373.0 g/kg MS; C=0.059/h). Sin embargo, ambos grupos de trabajo utilizaron vacas lecheras y la cinética fue llevada a 72 y 48 h, respectivamente. Por otra parte, tomaron observaciones a partir de las 2 h de incubación de la muestra en el rumen, mientras que en el presente estudio se tomaron observaciones a las 0.5, 1.0 y 1.5 h de incubación. Moreira et al. (2003) trabajaron con novillos cruzas de europeo \times cebú, con tiempos de incubación de 0, 6, 12, 24 y 48 h, estimando un valor mayor (729.3 g/kg) de la fracción de materia seca potencialmente degradable para la pasta de soya. Asimismo, reportaron una mayor fracción B_{MS} para la harinolina (633.7 g/kg MS) que la obtenida por Kamalak et al. (2005) y en el presente estudio (B_{MS} =437.80 g/kg MS). Estos últimos autores incubaron en ovinos Merino diferentes ingredientes a 0, 3, 6, 12, 24, 48 y 72 h, obteniendo los siguientes resultados para la degradación de la MS de pasta de soya: A=251.0 g/kg MS, B=563.3 g/kg MS, C=0.06/h, y de harinolina: A=195.0 g/kg MS, B=504.0 g/kg MS, C=0.05/h, valores más próximos a los obtenidos en este trabajo para los mismos ingredientes. Batajoo y Shaver (1998) utilizaron vacas lecheras a 200 días de lactación e incubaciones a 0, 2, 4, 6, 12, 24, 48, 72 h; el ajuste de datos estimó los siguientes coeficientes para la pasta de soya: A=354.0 g/kg MS, B= 636.0 g/kg MS y C=0.058/h, y para el maíz: A=144.0 g/kg MS, B= 816.0 g/kg MS y C=0.059/h. Sus resultados también son cercanos a los obtenidos en este trabajo. Cerneau y Michaellet-Doreau (1987), trabajando con vacas Holstein en periodo seco e incubaciones de 2, 4, 8, 16, 24 y 48 h, estimaron para el maíz los siguientes coeficientes: A= 263.0 g/kg MS, B=718.0 g/kg MS y C=0.043/h. Estos valores también están próximos a los del presente estudio, pero no los del salvado de trigo (A= 516.0, B=336.0, g/kg MS), para el cual estos

investigadores encontraron una tasa de desaparición de la MS ($C=0.03/h$) menos rápida que la consignada en este trabajo ($C=0.112/h$). En relación con la cinética de degradación de la MS de la pollinaza, los coeficientes obtenidos por otros investigadores (Abubakar et al., 2010) son mayores para A (296.40 g/kg MS) y C (0.085 /h) y menores para B (549.40 g/kg MS) que los del presente estudio. La degradabilidad potencial del trabajo de Abubakar et al. (2010) fue de 848.50 g/kg de MS, en tanto que la degradabilidad efectiva fue de 618.46 g/kg de MS. Este último valor es muy semejante a lo ajustado para la pollinaza utilizada en este estudio. Cabe señalar que Abubakar y sus colaboradores llevaron la incubación de pollinaza hasta las 96 h en el rumen de bovinos cebú. Kwak et al. (1998) obtuvieron coeficientes mayores de A_{MS} para una pollinaza que fue sometida a diferentes tratamientos (ensilaje, composteo). Sin embargo, el valor calculado para la degradabilidad efectiva promedio, utilizando 0.06/h de tasa de pasaje en el rumen, fue de 664.20 g/kg MS.

En el presente estudio, los valores más altos para la fracción B_{MS} se obtuvieron para el sorgo y el maíz y los menores, para el salvado de trigo y harinolina. El sorgo y el maíz presentan un endospermo de matriz proteínica que se resiste a la adhesión y penetración por los microorganismos ruminales y apenas los hongos tienen la capacidad de colonizar dicha estructura (McAllister et al., 1993). Lo anterior explicaría por qué estos cereales presentaron la mayor proporción de fracción B_{MS} (Rooney y Pflugfelder, 1986). De manera global, B_{MS} se asoció negativamente a los componentes de la pared celular, principalmente a la lignina ($R^2 = 0.79$), cuyas concentraciones fueron: 11.6, 34.9 y 36.3 g/kg MS para sorgo, salvado y harinolina, respectivamente. Así, los ingredientes con mayor concentración de lignina tuvieron una fracción B_{MS} menos elevada, lo que se reflejó en la degradabilidad potencial ($A_{MS}+B_{MS}$) y efectiva (MS_d). La concentración de FDA explicó 84 y 95% de la degradación potencial y de la degradación de la MS_{48h} , respectivamente. Ha y Kennelly (1984) trabajaron con pastas de soya y canola, alfalfa deshidratada, harinas de pescado y de sangre de cerdo y encontraron una estrecha relación entre la degradación efectiva del N y de la MS, mientras que Offner et al. (2003) la encontraron entre el almidón y la MS ($R^2 = 0.78$). Es decir, existe una relación entre la degradación del principal componente del ingrediente y la degradación *in situ* de la MS.

Por otra parte, la tasa de desaparición (C_{MS}) de la fracción potencialmente degradable estuvo correlacionada positivamente con el contenido de celulosa y lignina. Es importante tener en cuenta en este punto que los valores de estos dos polímeros en los ingredientes utilizados oscilaron entre 1.16 y 3.63% para lignina y entre 1.46 y 14.3% para celulosa, concentraciones que no se comparan con las de un forraje. El ingrediente con la mayor velocidad de desaparición de la MS potencialmente degradable (0.112/h) fue el salvado de trigo, que presentó concentraciones de 27.7% y 16.1% de FDN y FDA, respectivamente, y de 3.5% y 12.5% de lignina y celulosa, respectivamente. La asociación, entonces, entre C_{MS} y celulosa y lignina fue una asociación matemática más que biológica. La harinolina presentó un perfil de fibra (FDN, FDA, lignina y celulosa) muy similar al del salvado de trigo; sin embargo, la C_{MS} de la harinolina fue casi la mitad de la del salvado (0.060/h). Aunque la desaparición potencial de ambas materias primas fue similar (705.5 vs 684.4 g/kg MS para salvado y harinolina, respectivamente), la desaparición de la MS observada a las 48 h fue mayor para el salvado (705.5 g/kg MS) que para la harinolina (610.8 g/kg MS). Esto posiblemente se debió a la conformación molecular de los tejidos de los diferentes ingredientes, la que de acuerdo con Yu et al. (2009) afectaría la utilización de los nutrimentos.

Aun cuando los distintos trabajos de investigación presentan valores diferentes para los coeficientes de la cinética de liberación de la MS, hay algunos elementos constantes, como lo son la degradación de la MS en las primeras 24 h de incubación, la alta degradabilidad ruminal de la pasta de soya y el hecho de que la harinolina presentó en forma conjunta valores menores de los coeficientes de degradación estudiados, lo cual se atribuye, como ya se mencionó, a las características de su pared celular.

6.2 DESAPARICIÓN RUMINAL DEL FÓSFORO TOTAL (P_t) Y FÍTICO (P_{phy})

El contenido de fósforo de los ingredientes utilizados en este estudio es similar a lo ya publicado (Rebollar y Mateos, 1999; NRC, 2007; INRA, 2007; Feedstuffs, 2009). Sin embargo, el contenido de P de la pollinaza es variable, ya que depende de la composición de la dieta y de la cama del pollo. Por otra parte, algunos sistemas de alimentación indican

también el contenido de fósforo de los ingredientes en función de su disponibilidad (Feedstuffs, 2009) o de su absorción (INRA, 2007), la que depende del ingrediente y de la especie animal que lo consume. La literatura señala que las materias primas de origen vegetal tienen alrededor de dos tercios del contenido de fósforo en forma de fitatos, cuya disponibilidad para las especies no rumiantes es prácticamente nula (Rebollar y Mateos, 1999). Ravindran et al. (1995) cuantificaron colorimétricamente la proporción de fósforo fítico en diferentes cereales, sus subproductos y leguminosas, la cual oscila entre 0.55 y 0.85 g/g de fósforo. En el presente estudio, el fósforo fítico representó para los cereales (sorgo, salvado de trigo y maíz) 0.93 g /g Pt, en tanto que en la harinolina y la pasta de soya cada gramo de Pt contuvo 0.86 g de P_{phy}. Estos valores no difieren en gran medida de lo ya señalado. Sin embargo, la pollinaza sólo contuvo 0.46 g de P_{phy}/g Pt.

La liberación del fósforo en el rumen es un paso fundamental para mantener el ecosistema ruminal y para que el rumiante pueda utilizar el elemento. Por ello, resulta indispensable conocer los ingredientes que constituyen las raciones para conciliar adecuadamente el aporte de fósforo de los alimentos con las necesidades de los animales. Para lograrlo es necesario conocer con precisión la utilización digestiva y metabólica del elemento. La primera es el resultado de la desaparición del fósforo alimentario y de la absorción digestiva del elemento liberado en el rumen, requisito para su utilización por el rumiante (Mjoun *et al.*, 2008). Incluso existe la propuesta de un sistema de alimentación que contemple P_{Rumen} y P_{Animal} (Bravo y Bogaert, 2002).

Los trabajos sobre la liberación ruminal de fósforo de los ingredientes utilizados en alimentación animal son escasos y pocos se han realizado en cabras (Wang *et al.*, 2008). El presente estudio generó datos sobre la liberación ruminal *in situ* de fósforo de pasta de soya, harinolina, pollinaza y salvado de trigo en cabras. Los ingredientes experimentales (pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo) presentaron valores diferentes en los tres coeficientes (A, B y C) de cinética. El hecho de que la fracción A_{Pt} haya sido mayor para Pt que para MS significa que el Pt de los ingredientes estudiados tendría una rápida disposición en el rumen del animal. Dada la escasa literatura referente a la liberación

ruminal de fósforo, sólo se estableció la comparación de los resultados para pasta de soya en este estudio (A=400.9, B=696.4 g Pt/kg Pt) con los obtenidos por Bravo et al., (2000) y Mjoun et al., (2008). Estos dos equipos trabajaron con vacas lecheras y tiempos de cinéticas de 72 y 48 h, respectivamente, tomando observaciones a partir de las dos horas de incubación. Ambos grupos de investigación obtuvieron valores más altos para A (613.0 y 621.0 g Pt/kg Pt, respectivamente) y, consecuentemente, menores para B (471.0 y 351.0 g Pt/kg Pt, respectivamente), que los obtenidos en este trabajo. Čerešňáková et al. (2007) incubaron en novillos pasta de soya hasta las 24 h, obteniendo los siguientes valores: A=442.0, B=558.0 g de Pt/kg Pt, valores en acuerdo con lo hallado en este estudio. En lo referente a C, los investigadores consignaron valores de 0.073, 0.161 y 0.007/h (Bravo et al., 2000; Mjoun et al., 2008; Čerešňáková et al., 2007, respectivamente). Como puede observarse, el valor mayor supera 23 veces al menor. En este estudio se observó una tasa de 0.05/h para la pasta de soya. La fracción rápidamente degradable de Pt (A) para este ingrediente fue menor que para los otros ingredientes experimentales, lo que indicaría una menor disponibilidad inmediata del fósforo de esta materia prima para las bacterias ruminales, sobre todo cuando la pasta de soya sea uno de los ingredientes principales en la dieta de cabras. Es importante enfatizar que en el presente estudio, si bien existieron diferencias en A y B, la tasa de liberación para la fracción B no fue diferente entre los ingredientes, lo que podría explicar el hecho de que la desaparición de Pt observada a las 48 h fuera superior a 0.9 para los seis ingredientes. Bravo et al. (2000) señalaron que la liberación del Pt del salvado de trigo alcanza el 0.98 a las 48 h de incubación. Lo anterior destaca la importancia de la liberación del fósforo alimentario por parte de las bacterias del rumen productoras de fitasas, ya que en estos ingredientes el contenido de fósforo fítico fue superior a 0.9 g/g Pt. Inclusive, esta liberación fue considerablemente superior a la de la materia seca degradada, como fue el caso de la harinolina. Utilizando los coeficientes de la cinética de degradación de Bravo et al. (2000) y Mjoun et al. (2008), se calculó la degradabilidad efectiva del Pt de la pasta de soya que superó los 870 g/kg de Pt, mientras que lo obtenido en este trabajo y en el de Čerešňáková et al. (2007) fue de 697 y 726 g/kg de Pt, respectivamente. Si bien los diferentes investigadores llevaron la incubación de la

pasta de soya a diferentes horas, la degradabilidad potencial (A+B) fue superior a 970 g/kg Pt.

La desaparición del Pt en el caso de sorgo y maíz presentó una sucesión de incremento – decremento. Esta oscilación se atribuye a la contaminación de las muestras con bacterias ruminales adheridas fuertemente a las partículas de los ingredientes en estudio. Meyer y Mackie (1986) apuntan que la contaminación bacteriana contribuye a la fuente de variación en los estudios de degradación en bolsa de nylon. Así, la contaminación bacteriana puede representar 100, 175 y 220 g/kg de MS en el grano de maíz, en la envoltura de la mazorca y en la alfalfa, respectivamente, lo que demuestra que el grado de adherencia de las bacterias depende de la naturaleza del alimento (Wanderley et al., 1993). La adhesión bacteriana subestima la degradación de la proteína cruda en alimentos fibrosos (Nocek y Grant, 1987) y subestimaría también los valores de degradación del almidón (Batajoo y Shaver, 1998). Este comportamiento se ha observado para ingredientes con bajo contenido de fósforo (Bravo *et al.*, 2000), así como para forrajes (Playne *et al.*, 1978; Bravo *et al.*, 2000; Riestra et al., 2010). Por ello, la hipótesis de la contaminación bacteriana de las muestras de sorgo y maíz a las 24 h de incubación, subestimando la liberación del Pt, resulta plausible. Como fue descrito, se mostró que, en el caso de estos cereales, la degradación aparente de Pt no sigue la misma cinética de desaparición que la observada para la MS. En este punto, para medir la liberación de P en el rumen, los residuos obtenidos de la bolsa de nylon deberían someterse a un tratamiento para desprender las bacterias. Sin embargo, algunos investigadores, sin utilizar métodos para desprender las bacterias, lograron ajustar sus resultados. Así, Wang *et al.* (2008) reportaron los siguientes valores para sorgo: A=839.0 g Pt/kg Pt, B=78.0 g Pt/kg Pt y C=0.18/h y para maíz: A=888.0 g Pt/kg Pt, B=98.0 g Pt/kg Pt y C=0.28/h, utilizando cabras de 4 meses de edad, en una cinética de 72 h. Mjoun *et al.* (2008) encontraron para el maíz valores menos elevados (A=654.0 g Pt/kg Pt, B=270.0 g Pt/kg Pt y C=0.117/h) en vacas lecheras, en cinética de 48 h.

Como ya se mencionó, la liberación de Pt fue superior a 0.9 g/g de Pt, lo que destaca la actividad de las bacterias ruminales productoras de fitasas. En 1960, Raun et al.

mencionaron que la fitasa estaba presente en el rumen, lo que permitía al rumiante utilizar el P fítico. Sin embargo, se desconocía si su origen era microbiano o vegetal. Ese trabajo, bajo condiciones *in vitro*, concluye que la disponibilidad del fósforo presente en los vegetales es elevada y que su uso no depende de las enzimas accesorias en la planta. En la década de los 80's, los trabajos del Instituto Nacional de la Investigación Agronómica abordaron el problema de la variabilidad en la utilización del P "vegetal", con el objetivo de valorizar de mejor manera (fisiológica, productiva y económica) el aporte de P de los vegetales (Pointillart, 1994). Si bien los trabajos sobre la utilización del fósforo fítico datan de hace décadas, en la actualidad la información acerca de la liberación ruminal de P fítico de ingredientes utilizados en la alimentación de rumiantes es escasa (Park et al., 1999; Konishi et al., 1999; Martín-Tereso et al., 2009). Se han realizado algunos estudios bajo condiciones *in vitro* (Morse et al., 1992; Godoy y Meschy, 2001).

Con relación a la cinética de liberación del P_{phy} , Park et al. (1999) y Konishi et al. (1999) incubaron en ovinos Suffolk × Corriedale pasta de soya y de canola, demostrando que los tratamientos tecnológicos (calor y formaldehído, respectivamente) disminuyen la degradación de fitatos en el rumen. Los tiempos de incubación que utilizaron ambos grupos fueron 0, 3, 6, 12, 24, 36 y 48 h. Los coeficientes de cinética de liberación para la pasta de soya sin tratar fueron: $A=186.0 \text{ g/kg } P_{phy}$, $B=814.0 \text{ g/kg } P_{phy}$ y $C=0.17/h$. En este estudio, el valor para la fracción rápidamente degradable (A) fue 2.5 veces inferior a los trabajos referidos, estando más próximo al coeficiente obtenido para el tratamiento con 5 g de formaldehído/ kg de pasta de soya ($85.1 \text{ g } P_{phy}/\text{kg } P_{phy}$; Park et al., 1999). Dado que la pasta de soya utilizada en este ensayo no recibió ningún tratamiento adicional después de la extracción del aceite, la pregunta que surge es: ¿el valor de A obtenido en este trabajo es atribuible a la especie estudiada? Para ello se requiere de mayor investigación utilizando caprinos. Por otro lado, el valor de la fracción B o potencialmente degradable de este estudio fue similar al de los trabajos arriba mencionados (sólo 1.02 veces mayor), pero la tasa de desaparición de la fracción B (C) fue 1.8 veces menor. Las degradabilidades efectivas calculadas por Park et al. (1999) y Konishi et al. (1999) fueron, respectivamente, 782.9 y 790.8 $\text{g } P_{phy}/\text{kg } P_{phy}$ y las potenciales, 1000 $\text{g } P_{phy}/\text{kg } P_{phy}$ en ambos estudios. Las

degradabilidades efectiva y potencial de este experimento fueron 0.75 y 0.91, respectivamente, de las correspondientes a las calculadas para pastas de soya sin tratar (Park et al.; Konishi et al.; 1999). Comparada con la pasta de soya tratada con 5 g de formaldehído/kg de ingrediente (Park et al., 1999), la degradabilidad efectiva aquí encontrado fue 1.3 veces mayor. Morse et al. (1992) estudiaron *in vitro* la desaparición de fósforo fítico de diferentes ingredientes, entre ellos las pastas de soya y harinolina. A las 24 h de incubación obtuvieron valores de degradación de 1000 y 999.0 g/kg de P_{phy} para la soya y la harinolina, respectivamente. En este estudio, las degradaciones a las 24 h fueron de 795.0 y 868.2 g/kg de P_{phy} para las pastas referidas. La interrogante sobre una posible diferencia en la especie caprina para la degradación del fósforo fítico de algunas pastas persiste.

El contenido de fósforo fítico estuvo relacionado con los componentes de la pared celular, principalmente con la lignina. Schweizer et al. (1984) mencionan una asociación importante ($r=0.99$) entre el contenido de ácido fítico y las cenizas asociadas a la fibra en cascarillas de diferentes cereales (trigo, cebada, centeno y maíz) con una amplia variación en su contenido de ácido fítico. Frølich y Nyman (1988) cuantificaron la mayor cantidad de P fítico en la fracción soluble de la fibra de la avena, condición similar a la del grano de trigo. La asociación directa entre el P_{phy} y el P_t no requiere mayor explicación, ya que, como se ha apuntado anteriormente, el P_{phy} es la forma mayoritaria de P en los alimentos de origen vegetal.

De manera general, en el presente estudio se mostró que las degradaciones de la materia seca, del fósforo total y del fósforo fítico no tienen la misma cinética de liberación. La explicación de estas diferencias puede ser el arreglo estructural de los componentes del alimento. Las sales del ácido fítico se depositan en la aleurona, escutelo, cotiledón y endospermo durante la formación de las semillas. La microscopía muestra que las células de la aleurona de la cebada contienen organelos referidos como gránulos de la aleurona. En el trigo estos cuerpos proteínicos contienen dos tipos de inclusiones embebidos en una matriz proteínica. Las inclusiones de tipo I son globoides y desaparecen después de tratar el

grano con fitasas (Bergman et al., 2000). En el maíz, 80% del ácido fítico está distribuido en el germen, en tanto que en la cebada 87% se localiza en la aleurona y 13% en el germen (O'Dell et al., 1972). El ácido fítico se encuentra asociado a las estructuras parietales del grano; por ejemplo, en el arroz y el trigo se concentra en las envolturas (pericarpio, testa y aleurona). Tombs (1967) menciona que el P_{phy} interactúa fuertemente con la glicinina y supone que está ligado a la proteína en la semilla de soya. La literatura consigna que en la mayoría de las semillas de leguminosas, el fósforo fítico constituye 80% del fósforo total, localizándose principalmente en el cotiledón y ejes embrionarios. Sin embargo, estructuralmente su localización no se conoce bien (Godoy y Chicco, 2005). Como ya se señaló, se supone que el P_{phy} está integrado al cuerpo de las proteínas, formando complejos con proteínas y minerales (Yoon et al., 1996). La molienda expone las diferentes estructuras y componentes, haciéndolos más accesibles a los microorganismos ruminales, lo que ciertamente influye en la degradación de cualquier ingrediente así tratado. Sin embargo, la diferencia en los coeficientes de las cinéticas de degradación de MS, Pt y P_{phy} podría atribuirse también a la distribución de esos componentes en los diferentes ingredientes. En el caso del fósforo total y fítico es importante considerar con qué otro componente químico podrían interactuar, lo cual podría explicar las asociaciones observadas (e.g., P_{phy} y FAD). Si bien los coeficientes obtenidos de la cinética de degradación fueron globalmente diferentes, las asociaciones globales entre la degradación *in situ* de Pt y MS y P_{phy} y Pt permiten considerar que a mayor degradación de la MS, mayor degradación del Pt y a mayor degradación de P_{phy} , mayor será la degradación del Pt. Finalmente, son los diferentes géneros bacterianos en el rumen los encargados de degradar mediante sus exo- o endoenzimas los componentes químicos del alimento. Una de estas enzimas es la fitasa. Entre las bacterias productoras de fitasas se encuentran algunas cepas de *Selenomonas ruminantium*, *Megaesphaera elsdenii*, *Prevotella ruminicola* y *Mitsuokella multiacidus* (Yanke et al., 1998). Las fitasas reportadas son más activas a pH 4 – 5, por lo que se clasifican como fitasas ácidas; entre ellas están las histidina fitasas ácidas y fosfatasa ácida púrpura (Mullaney y Ullah, 2003). Huang et al. (2010) identificaron recientemente cisteína fitasas en bacterias provenientes del rumen de cabras Boer y vacas

Holstein, que presentan su máxima actividad a pH 6.0 – 6.5. Cabe señalar que la abundancia de estas enzimas fue mayor en el rumen de las cabras.

Desde 1947 se reconoce la liberación del fósforo fítico de los alimentos en el rumen (Reid y Franklin). Sin embargo, experimentos recientes han mostrado que incluso los forrajes liberan el P_{phy} principalmente a nivel intestinal (Riestra et al., 2010). Lo anterior demuestra que la disponibilidad del P_{phy} de los alimentos es variable y depende de varios factores como: la proporción de granos en la dieta; la concentración, localización y solubilidad de los fitatos; la presencia de las fitasas de los granos y semillas; la presencia de iones en la dieta; el contenido y especie de proteína; la degradabilidad del almidón, y los tratamientos tecnológicos que sufren los alimentos. En rumiantes, pocos son los trabajos realizados sobre la liberación del P_{phy} de la que son responsables los microorganismos ruminales. Además, la actividad fitásica de las bacterias ruminales puede verse afectada por los factores anteriormente mencionados.

7. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en las que se realizó este estudio se concluye lo siguiente:

1. Los coeficientes de la cinética de liberación del P total son diferentes para las materias primas analizadas. Así, la desaparición del P total de estos ingredientes es mayor al 0.90; lo que implicaría la disponibilidad en el rumen de casi el total del P para los microorganismos, principalmente las bacterias celulolíticas.
2. Los coeficientes de la cinética de liberación del P fítico son diferentes para las materias primas analizadas. La desaparición de este analito es mayor que 0.90 para salvado de trigo, pasta de soya, harinolina y pollinaza. En tanto, las menores desapariciones de P fítico son para el sorgo, seguido del maíz. Lo anterior refleja la actividad fitásica de las enzimas de los microorganismos ruminales.
3. Las cinéticas de liberación de la MS, del P total y P fítico de cada materia prima analizada son diferentes. La liberación del fósforo total y fítico en el rumen depende de la liberación de la materia seca del ingrediente, de su composición química y de las estructuras presentes en los ingredientes.

Implicaciones

Este estudio generó información sobre la cinética de liberación ruminal del fósforo de la pasta de soya, maíz, sorgo, salvado de trigo, harinolina y pollinaza en cabras lecheras en mantenimiento. Los resultados obtenidos servirán para caracterizar mejor el aporte de fósforo de los diferentes ingredientes empleados en la alimentación de cabras, con la finalidad de hacer más eficiente la utilización del mineral por el animal y contribuir a la conservación del medio ambiente.

Esta caracterización de ingredientes podría conllevar a una clasificación con relación a su liberación del P a nivel ruminal. Sugerimos que los ingredientes con un valor alto de fracción A (rápidamente soluble) podrían considerarse de rápida liberación de P total en rumen, en este estudio un ejemplo es el salvado de trigo. Los ingredientes de un valor alto de fracción B (potencialmente degradable) con valor también alto de tasa de liberación (C), serían considerados de liberación intermedia. En tanto, los de un valor alto de fracción B pero con valor bajo de C, serían considerados de liberación lenta. La combinación de ingredientes de rápida, intermedia y lenta liberación de P, aseguraría el aporte de este elemento para los microorganismos ruminales, principalmente después de la ingesta de alimentos. Momento en que el reciclaje salival de fosfatos no es tan importante ya que la mayor producción de saliva se presenta al momento de la masticación o de la rumia.

Se requiere generar más información sobre la liberación del fósforo alimentario a nivel ruminal, ya que de ella depende la utilización del elemento por las bacterias y el individuo. Además, se debe estudiar más la utilización del P de los ingredientes en el tracto digestivo completo del rumiante ante dietas altas en concentrados. Por otra parte, se deberá llevar a cabo mayor investigación en la especie caprina sobre los tópicos ya mencionados, dado que esta especie muestra diferencias respecto a los otros rumiantes domésticos.

8. LITERATURA CITADA

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Memorias de Perspectivas Alimentarias. Análisis de los mercados mundiales. SMIA. Sistema mundial de información y alerta sobre la alimentación y la agricultura. 2011.

Verstegen MWA. Nutrition, key factor to reduce environmental load from pig production. *Livest. Prod. Sci.* 2007; 109: 194-203.

Ducoing WA. Situación de la caprinocultura en México. Memorias del curso avances sobre la alimentación de la cabra lechera. Asociación Mexicana de especialistas en Nutrición Animal. AC. Querétaro, México, 2005.

Dubeuf JP. The market and organizational structural conditions for the development of systems of goat milk production. *Small Ruminant. Res.* 2004; 60: 67-74.

Boyazoglu J, Hatziminaoglou Y, Morand-Fehr P. The role of the goat in society: past, present and future prospects. *Small Ruminant. Res.* 2005; 60: 13-23.

Lebbie SHB. Goats under household conditions. *Small Ruminant. Res.* 2004; 51: 131-136.

Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. SIAP-SAGARPA. México. 2011.

Underwood EJ, Suttle NF. The mineral nutrition of the livestock. 3rd ed. CABI Publishing. New York, U.S.A. 1999.

Georgievskii VI. The physiological role of macroelements. En: Georgievskii VI. Anekov BN, Samokhin VT, editors. Mineral nutrition of animals. Butterworths. Londres, Reino Unido. 1982: 91-170.

McDowell LR, Conrad JH. Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales. Centro de Agricultura Tropical, Florida U.S.A. 1984.

Soares JH. Phosphorus bioavailability. In Bioavailability of nutrients for animals. Academic Press. 1995: 257-294.

McDonald P, Edwards RA, Greenhalgh JF, Morgan CA. Animal nutrition. 5th ed. John Wiley & Sons. New York. 1995.

McDowell LR. Minerals in animal and human nutrition. Academic Press. San Diego, CA. 1992.

Konishi C, Matsui T, Park W, Yano H, Yano F. Heat treatment of soybean meal and rapeseed meal suppresses rumen degradation of phytate phosphorus in sheep. Anim. Feed. Sci. Tech. 1999; 80: 115-122.

Park WY, Matsui T, Konishi C, Kim SW, Yano F, Yano H. Formaldehyde treatment suppresses ruminal degradation of phytate in soybean meal and rapeseed meal. B. J. Nutr. 2000; 81: 467-471.

Komisarczuk S, Durand M, Beaumatin P, Hannequart G. Effects of phosphorus deficiency on rumen microbial activity associated with the solid and liquid phases of a fermentor (RUSITEC). Reprod. Nutr. Dev. 1987; 27: 907-919.

Burroughs N, Latone A, De Paul P, Gerlaugh P, Bethke R. Mineral influences upon urea utilization and cellulose digestion by rumen microorganisms using the artificial rumen technique. J. Anim. Sci. 1951; 10: 693-697.

Breves G, Schroder B. Comparative aspects of gastrointestinal phosphorus metabolism. Nutr. Res. Rev. 1991; 4: 125-140.

Bass G, Fishwick RG, Hemingway JJ, Parkins JL, Ritchie NS. The effects of supplementary phosphorus on the voluntary consumption and digestibility of a low phosphorus straw-based diet given to beef cows during pregnancy and early lactation. J. Agr. Sci. Camb. 1981; 97: 365-372.

Durand M, Kawashima R. Influence of minerals in rumen microbial digestion. En: Ruckebusch Y, Thivend P, editors. Proc. 5th ed. Symp. Ruminant Physiol. Press Ltd, Lancaster. 1980: 375-408.

Pond WG, Church DC, Pond KR. Basic animal nutrition and feeding. 4th ed. McGraw-Hill. 2002.

Church DC, Smith GE, Fontenot JP, Ralston AT. The macro minerals: In: Digestive physiology and nutrition of ruminant. Church DC, Smith GE, Fontenot JP, Ralston AT, editors. Corvallis, Oregon. 1971: 413-451.

William F, Ganong MD. Fisiología médica. 16th ed. Editorial modernos, S.A. de C.V. México. 1994.

Horst RL. Regulation of calcium and phosphorus homeostasis in the dairy cow. J. Dairy Sci. 1986; 69: 604-616.

Van Soest PJ. Nutritional ecology of the ruminant. Comstock publishing associates a division of Cornell University Press. Second Edition. U.S.A. 1994.

Breves G, Höller H, Packheiser P, Gäbel G, Martens H. Flux of inorganic phosphate across the sheep rumen wall in vitro. J. Exp. Physiol. 1988; 73: 343-351.

Reinhardt TA, Horst RL, Goff JP. Calcium, phosphorus, and magnesium homeostasis in ruminants. In: Metabolic diseases of ruminant livestock. Veterinary clinics of North America: Food Anim. Pract. 1988; 4: 331-350.

Scott D. Control of phosphorus balance in ruminants. In aspects of digestive physiology in ruminants, A. Dobson and M.J. Dobson, eds. Cornell University Press: Stock publishing Associates. 1998: 156-174.

Wasserman RH. Intestinal absorption of calcium and phosphorus. Federation Proc. 1981; 40: 68-72.

Compton JS, Nelson J, Wright RD, Young JA. A micropuncture investigation of electrolyte transport in the parotid glands of sodium-replete and sodium-depleted sheep. J. Physiol. 1980; 309: 429-446.

Mañas Almendros, Ross M, Care AD. Factors affecting the secretion of phosphate in parotid saliva in the sheep and goat. J. Exp. Physiol. 1982; 67: 269-280.

Wright RD, Blair-West JR, Nelson JF, Tregear GW. Handling of phosphate by a parotid gland (ovine). Am. J. Physiol. 1984; 246: 916-926.

Challa J, Braithwaite GD. Phosphorus and calcium metabolism in growing calves with special emphasis on phosphorus homeostasis. *J. Agr. Sci.* 1989; 113: 285-289.

Vipperman FE, Peo ER, Cunningham PJ. Effect of dietary calcium and phosphorus level up on calcium, phosphorus and nitrogen balance in swine. *J. Anim. Sci.* 1974; 38: 758-765.

Siebert BD, Cameron DD. Phosphate mobilization and excretion in cattle and sheep during energy restriction. *Proc. Nutr. Soc. Aust.* 1978; 3: 80-86.

National Research Council. Nutrient Requirements of Small Ruminants. Washington D.C. U.S.A. 2007.

Kessler J. Mineral nutrition of goats. *Goat Nutr.* 1991; 46:104-119.

Haenlein GFW. Advances in the nutrition of macro and micro elements in goats. In *Proc. V Inter. Conference on Goats, New Delhi, India.* 1992: 933-950.

Peeler HT. Biological availability of nutrients in feeds: availability of major mineral ions. *J. Anim. Sci.* 1972; 35: 695-712.

Minson DJ. Phosphorus. In: *Forage in ruminant nutrition.* Academic Press, New York. 1990: 230-264.

Jumba IO, Suttle NF, Hunter EA, Wandiga SO. Effects of soil origin and composition and herbage species on the mineral composition of forages in the Mount Elgon region of Kenya. 1. Calcium, phosphorus, magnesium and sulphur. *Trop. Grass.* 1995; 29: 40-46.

Bieleski RL. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 1973; 24: 225-252.

Toor GS, Sims TJ, Duo Z. Reducing phosphorus in dairy diets improves farm nutrient balances and decreases the risk of nonpoint pollution of surface and ground waters. *Agr. Eco. Environ.* 2005; 105: 401-411.

Deitert C, Pfeffer E. Effects of reduced P supply in combination with adequate or high Ca intake on performances and mineral balances in dairy goats during pregnancy and lactation. *J. Anim. Phys. Anim. Nutr.* 1993; 69: 12-21.

Jones RJ, Betteridge K. Effect of superphosphate and its component elements (phosphorus, sulfur and calcium), on the grazing preference of steers on a tropical grass-legume pasture grown on a low phosphorus soil. *Aust. J. Exp. Agr.* 1994; 34: 349-353.

Sotelo A, Mendoza J, Argote RM. Contenido de ácido fítico en algunos alimentos crudos y procesados. Validación de un método colorimétrico. *Rev. Soc. Quím. Méx.* 2002; 46: 301-306.

Reddy NR, Pierson MD, Sathe SK, Salunkhe DK. *Phytates in cereals and legumes.* CRC Press, Boca Raton, FL. 1989: 152-160.

Eeckhout W, De Paepe M. Total phosphorus, phytate-phosphorus and phytase activity in plant feedstuffs. *Anim. Feed Sci. Tech.* 1994; 47: 19-29.

Martínez-Viveros O, Jorquera MA, Crowley DE, Gajardo G, Mora ML. Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by *Rhizobacteria*. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2010; 10: 293-319.

Haug W, Lantzsch H. Sensitive method for the rapid determination of phytate in cereals and cereal products. *J. Sci. Food Agr.* 1983; 34: 1423-1426.

Miles PH, Wilkinson NS, McDowell LR. *Analysis of minerals for animal nutrition research.* 3rd ed. Department of Animal Science, University of Florida. USDA/TSTAR. Gainesville, Florida USA. 2001: 118.

Lofgreen GP. The availability of the phosphorus in dicalcium phosphate, bone, meal, soft phosphate and calcium phytate for mature weathers. *J. Nutr.* 1960; 70: 58-66.

Ellis LC, Tillman AD. Utilization of phytin phosphorus in wheat bran by sheep. *J. Anim. Sci.* 1960; 50: 606-607.

Nelson J. The hydrolysis of phytate phosphorus by chicks and laying hens. *Poult. Sci.* 1976; 55: 2262-2268.

Yanke LJ, Bae HD, Selinger LB, Cheng KJ. Phytase activity of anaerobic ruminal bacteria. *Microbiol.* 1998; 144: 1565-1573.

Lan GQ, Abdullah N, Jalaludin S, Ho YW. Culture conditions influencing phytase production of *Mitsuokella jalaludinii*, a new bacterial species from the rumen of cattle. *J. Appl. Microbiol.* 2002; 93: 668-680.

Graf E, Katherinle E. Phytic acid a natural antioxidant. *J. Mol. Biochem.* 1987; 24: 11647-11650.

Chapa BC, Guerrero AR. Abundancia que mata, la eutrofización. ¿Cómo ves? *Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM.* 2010; 12: 22-25.

Fontúrbel RF. Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del lago Titikaka (Bolivia). *Ecol. Apl.* 2005; 4: 135-141.

Ortega CME, Carranco JME. Factores que afectan la digestibilidad *in situ* de los alimentos en el rumen. *Vet. Mex.* 1993; 24:1 55-60.

Mehrez AZ, Ørskov ER. Study of the artificial bag technique for determining the digestibility of feeds in the rumen. *J. Agric. Sci.* 1977; 88: 645-650.

Nocek JE, Grant AL. Characterization of *in situ* nitrogen and fiber digestion and bacterial nitrogen contamination of hay crop forages preserved at different dry matter percentages. *J. Anim. Sci.* 1987; 64: 552-564.

Lindberg JE. Factors affecting predictions of rumen degradability using the nylon bag (*in sacco*) technique and a comparison between *in vivo* and *in sacco* degradability measurements. Tesis. Sveriges Lantbruksuniv Uppsala, Suiza. 1983

Playne MJ, Khumntjalthong W, Echevarria MG. Factors affecting the digestion of oesophageal fistula samples and hay samples in nylon bags in the rumen of cattle *J. Agr. Sci. Camb.* 1978; 90: 193-204.

Ørskov ER, De Hovell FD, Mould F. The use of the nylon bag technique for the evaluation of feedstuffs. *Trop. Anim. Prod.* 1980; 5:3 195-213.

Ørskov ER, McDonald I. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage *J. Agr. Sci. Camb.* 1970; 92: 499-503.

Varvikko T, Lindberg E. Estimation of microbial nitrogen in nylon-bag residues by feed. *B. J. Nutr.* 1985; 54. 473-481.

Siddons RC, Paradine J. Protein degradation in the rumen of sheep and cattle. *J. Sci. Food Agr.* 1983; [34](#): 701–708.

Castellanos RA, Llamas LG, Shimada SA. Manual de técnicas de investigación en rumiología. Consultores en Producción Animal. México. 1990.

Association of Official Analytical Chemist. Official methods of analysis of Association of Official Analytical Chemists. 15th ed. Washington D.C. U.S.A. 1990

Van Soest PJ, Robertson JB, Lewis BA. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition *J. Dairy Sci.* 1981; 4: 3583–3597.

Miles PH, Wilkinson NS, McDowell LR. Analysis of minerals for animal nutrition research. 3rd ed. Department of Animal Science, University of Florida. USDA/TSTAR. Gainesville, Florida U.S.A. 2001: 118.

Bravo D, Meschy F, Bogaert C, Sauvant D. Ruminant phosphorus availability from several feedstuffs measured by the nylon bag technique. *Reprod. Nutr. Dev.* 2000; 40: 149-162.

Wang M, Hu Y, Tan Z, Tang S, Sun Z, Han X. *In situ* ruminal phosphorus degradation of selected three classes of feedstuffs in goats. *Livest. Sci.* 2008; 117: 233-237.

Batajoo KK, Shaver RD. *In situ* dry matter, crude protein, and starch degradability of selected grains and by-product feeds. *Anim. Feed Sci. Tech.* 1998; 71: 165-176.

Kamalak A, Canbolat O, Gurbuz Y, Ozay O. *In situ* ruminal dry matter and crude protein degradability of plant- and animal-derived protein sources in Southern Turkey Small Ruminant. Res. 2005; 58: 135-141.

Cerneau P, Michalet-Doreau B. *In situ* starch degradation of different feeds in the rumen. Reprod. Nutr. Dev. 1991; 31: 65-72.

Čerešňáková Z, Flák, P, Polacikova M, Chrenkova M. *In sacco* macromineral release from selected forages. Czech. J. Anim. Sci. 2007; 6: 175-182.

Čerešňáková Z, Kopčeková J, Flák P, Mlyneková Z. Effect of physical processing of cereals on rumen crude protein degradability. Slovak J. Anim. Sci. 2008; 41: 160-165.

Mjoun K, Kalscheur K, Hippen A, Schingoethe D. Ruminal phosphorus disappearance from corn and soybean feedstuffs. J. Dairy Sci. 2008; 91: 3938-3946.

Wang M, Hu Y, Tan Z, Tang S, Sun Z, Han X. *In situ* ruminal phosphorus degradation of selected three classes of feedstuffs in goats. Livest. Sci. 2008; 117: 233-237.

Tang SX, Sheng LX, Zhou CS, Tan ZL, Liao HY, Wang M, Sun H, Han XF, Bamikol MA. Effects of variety, sowing season and maturity stage on ruminal phosphorus release from whole maize stover and its morphological fractions. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. 2010; 94: 49-58.

Martín-Tereso J, Gonzalez A, Van Laar H, Burbano C, Pedrosa MM, Mulder K, Hartog LA, Verstegen MWA. *In situ* ruminal degradation of phytic acid in formaldehyde-treated rice bran. Anim. Feed Sci. Tech. 2009; 152: 286-297.

Moreira JFC, Rodríguez NM, Fernandes PCC, Veloso CM, Saliba EOS, Gonçalves LC, Borges I, Borges ALCC. Concentrados protéicos para bovinos: 1. Digestibilidade e *in situ* da matéria seca e da proteína bruta. Arq. Bras. Med. Vet. Zootec. 2003; 55: 315-323.

Abubakar M, Adegbola TA, Abubakar MM, Shehu Y. Comparative nutritive value and *in situ* rumen degradation of cotton seed cake and selected farm wastes. Sav. J. Agr. 2010; 5: 38-46.

Kwak W, Fontenot JP, Herbein JH. Effect of processing method on ruminal solubility and degradability of broiler litter. *Bioresource Technol.* 1998; 6: 13-18.

McAllister TA, Phillippe RC, Rode LM, Cheng KJ. Effect of the protein matrix on the digestion of cereal grains by ruminal microorganisms. *J. Anim. Sci.* 1993; 71:205-212.

Rooney LW, Pflugfelder RL. Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. *J. Anim. Sci.* 1986; 63: 1607-1623.

Ha JK, Kennelly JJ. *In situ* dry matter and protein degradation of various protein sources in dairy cattle. *Can. J. Anim. Sci.* 1984; 64: 443-452.

Offner A, Bach A, Sauvant D. Quantitative review of *in situ* starch degradation in the rumen. *Anim. Feed Sci. Tech.* 2003; 106: 81-93.

Yu P, Block HC, Doiron K. Understanding the differences in molecular conformation of carbohydrate and protein in endosperm tissues of grains with different biodegradation kinetics using advanced synchrotron technology. *Spectrochim. Acta A.* 2009; 71: 1837 – 1844.

Rebollar GP, Mateos GG. El fósforo en nutrición animal: necesidades, valoración de materias primas y mejora de la disponibilidad. En: Curso de especialización FEDNA, 15 ed. Madrid. Editores: Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. 1999:19-64.

INRA. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoin des animaux. Valeur des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quae, Paris.

Batal A, Dale N. Ingredient Analysis table: 2009 Edition Feedstuffs. 2009; 80: 16-17.

Waller JC. Byproducts and unusual feedstuffs. *Feedstuffs.* 2009; 80: 18-25.

Ravindran V, Ravindran G, Sivalogan S. Total and phytate phosphorus contents of various foods and feedstuffs of plant origin. *Food Chem.* 1995; 5: 133-136.

Bravo D, Bogaert C. Finally a rational phosphorus concept. *Feed Mix.* 2002; 10: 24-28.

Meyer JH, Mackie RI. Microbiological evaluation of the intraruminal *n sacco* digestion technique. Appl. Environ. Microbiol. 1986; 51: 622-629.

Wanderley RC, Huber JT, Wu Z, Pessarakli M, Fontes C. Influence of microbial colonization of feed particles on determination of nitrogen degradability by *in situ* incubation. J. Anim. Sci. 1993; 71: 3073-3077.

Playne MJ, Echevarría MG, Megarrity RG. Release of nitrogen, sulphur, phosphorus, calcium, magnesium, potassium and sodium from four tropical hays during their digestion in nylon bags in the rumen. J. Sci. Food Agr. 1978; 29: 520-526.

Riestra SP, Muir JP, Lambert BD, Tedeschi LO, Redmon LA. Phosphorus and other nutrient disappearance from plants containing condensed tannins using the mobile nylon bag technique. Anim. Feed Sci. Tech. 2010; 156: 19-25.

Pointillart A. Phytates, phytases: leur importance dans l'alimentation des monogastriques. INRA Prod. Anim. 1994 ; 7: 29-39.

Morse D, Head HH, Wilcox CJ. Disappearance of phosphorus in phytate from concentrates *in vitro* and from rations fed to lactating dairy cows. J. Dairy Sci. 1992; 75: 1979-1986.

Godoy S, Meschy F. Utilization of phytate phosphorus by rumen bacteria in a semi-continuous culture system (Rusitec) in lactating goats fed on different forage to concentrate ratios. Reprod. Nutr. Dev. 2001; 41: 259-265.

Schweizer TF, Frølich W, Del Vedovo S, Beson R. Minerals and phytate in the analysis of dietary fiber from cereals. I. Cereal Chem. 1984; 61: 116-119.

Frølich W, Nyman M. Minerals, phytate and dietary fibre in different fractions of oat-grain. J. Cereal Sci. 1988; 7: 73-82.

O'Dell BL, De Boland AR, Koirtiyohann SR. Distribution of phytate and nutritionally important elements among the morphological components of cereal grains. J. Agr. Food Chem. 1972; 20: 718-723.

Tombs MP. Protein bodies of the soybean. *Plant Physiol.* 1967; 42: 797-813.

Godoy S, Chicco C. Utilización del fósforo fítico en la nutrición de los rumiantes. *Revista Digital CENIP-9.* 2005; 9: 1690-1711.

Yoon SJ, Choi YJ, Min HK, Cho KK, Kim JW, Lee SC, Jung YH. Isolation and identification of phytase-producing bacterium, *Enterobacter* sp. 4, and enzymatic properties of phytase enzyme. *Enzyme Microb. Tech.* 1996; 18: 449-454.

Mullaney EJ, Ullah AHJ. The term phytase comprises several different classes of enzymes. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 2003; 312: 179-184.

Huang H, Zhang R, Fu D, Luo J, Li Z, Luo H, Shi P, Yang P, Diao Q, Yao B. Diversity, abundance and characterization of ruminal cysteine phytases suggest their important role in phytate degradation. *Environ. Microb.* 2011; 13: 747-757.

Reid RL, Franklin MC, Hallsworth EG. The utilization of phytate phosphorus by sheep. *Aust. J. Vet.* 1947; 23: 136-140.

Cuadro 1. Población caprina en México (1999-2009) Número de cabezas

| Estado | 1999 | 2001 | 2003 | 2005 | 2007 | 2009 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Puebla | 1,404,718 | 1,447,955 | 1,489,531 | 1,392,177 | 1,396,831 | 1,438,577 |
| Oaxaca | 1,085,705 | 1,108,824 | 1,123,535 | 1,154,964 | 1,180,885 | 1,186,789 |
| Guerrero | 712,913 | 605,514 | 699,276 | 672,757 | 674,937 | 676,613 |
| Coahuila | 492,946 | 591,645 | 628,265 | 615,623 | 653,289 | 656,555 |
| San Luis Potosí | 958,364 | 652,879 | 698,045 | 729,612 | 606,093 | 610,334 |
| Total Nacional | 9,068,435 | 8,701,861 | 8,991,752 | 8,870,312 | 8,885,116 | 8,952,144 |

Fuente: Sistema de Información Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. (2011) SIAP-SAGARPA.

Cuadro 2. Producción de leche caprina en México

| Estado | Miles de litros de leche |
|---------------------|---------------------------------|
| Coahuila | 155.54 |
| San Luis Potosí | 123.64 |
| Nuevo León | 83.37 |
| Guanajuato | 68.79 |
| Baja California Sur | 56.45 |
| Zacatecas | 55.70 |

Fuente: INEGI, Censo Agropecuario, 2009

Cuadro 3. Requerimientos de materia seca, calcio y fósforo para cabras lecheras en mantenimiento (NRC, 2007)

| Peso corporal (kg) | Materia seca (kg) | Calcio (g/día) | Fósforo (g/día) |
|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 20 | 0.59 | 1.3 | 0.9 |
| 30 | 0.80 | 1.6 | 1.2 |
| 40 | 1.00 | 1.9 | 1.5 |
| 50 | 1.18 | 2.1 | 1.7 |
| 60 | 1.35 | 2.4 | 2.0 |
| 70 | 1.52 | 2.6 | 2.2 |
| 80 | 1.68 | 2.8 | 2.4 |
| 90 | 1.83 | 3.0 | 2.6 |

Cuadro 4. Contenido de fósforo total, fítico y fitasas en alimentos (Eeckhout y Paepe, 1994; NRC, 2001)

| Ingrediente | Fósforo total (g/kg) | Ácido fítico (% del P total) | Fitasa (unidad/kg) |
|--------------------|---------------------------------|---|-------------------------------|
| Salvado de trigo | 1.16 | 84 | 2957 |
| Trigo | 0.33 | 67 | 1193 |
| Cebada | 0.37 | 60 | 582 |
| Destilados de maíz | 0.90 | 21 | 385 |
| Avena | 0.36 | 59 | 42 |
| Sorgo, grano | 0.27 | 70 | 24 |
| Maíz, grano | 0.28 | 68 | 15 |
| Pasta de soya | 0.66 | 53 | 40 |

Cuadro 5. Requerimientos nutrimentales diarios para cabras de 50 kg de peso vivo en mantenimiento (NRC, 2007)

| Nutrimento | Requerimiento |
|------------------------------|----------------------|
| Materia seca (g) | 1,180.00 |
| Energía metabolizable (kcal) | 2,250.00 |
| Proteína cruda (g) | 79.00 |
| Calcio (g) | 2.10 |
| Fósforo (g) | 1.70 |

Cuadro 6. Composición química de los ingredientes utilizados en la ración para cabras lecheras (50 kg PV) en mantenimiento.

| Ingrediente | Materia seca | Energía metabolizable | Proteína cruda | Calcio | Fósforo |
|------------------------|--------------|-----------------------|----------------|-----------|---------|
| | (g/kg) | (kcal/kg MS) | | (g/kg MS) | |
| Heno de avena | 919.1 | 2,282.0 | 51.5 | 2.4 | 2.5 |
| Heno de alfalfa | 930.0 | 2,097.0 | 170.0 | 13.0 | 2.3 |
| Concentrado comercial* | 888.7 | 2,689.0 | 70.4 | 3.8 | 4.8 |
| Melaza de caña | 740.0 | 1,952.0 | 29.0 | 8.2 | 0.8 |

* Forrajes y Semillas “La Herradura”

Cuadro 7. Ingredientes y composición química de la ración para cabras lecheras (50 kg PV) en mantenimiento

| Ingrediente | g/kg de MS |
|---------------------------|-------------------|
| Heno de avena | 800.00 |
| Heno de alfalfa | 80.00 |
| Concentrado | 80.00 |
| Melaza de caña | 40.00 |
| Materia seca | 865.05 |
| Proteína cruda (N × 6.25) | 73.90 |
| Extracto etéreo | 49.80 |
| Cenizas | 75.90 |
| FDN | 558.90 |
| FDA | 362.30 |
| Lignina | 70.50 |
| Celulosa | 233.50 |
| Hemicelulosa | 226.60 |
| Fósforo total (P_t) | 2.70 |
| Calcio (Ca) | 9.20 |

FDN, Fibra detergente neutro; FDA, Fibra detergente ácido

Cuadro 8. Composición química de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz amarillo (Z)

| Item | Ingrediente | | | | | |
|---|----------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| | Proteínicos | | | Energéticos | | |
| | E | H | Y | S | W | Z |
| Materia seca (g/kg) | 913.4 | 929.4 | 944.7 | 939.0 | 931.4 | 935.0 |
| | g/kg MS | | | | | |
| Proteína cruda (N×6.25) | 209 | 394 | 427.6 | 82.1 | 142.6 | 75.2 |
| Extracto etéreo | 21.8 | 23.4 | 48.2 | 24 | 30.5 | 33.7 |
| Fibra cruda | 73.9 | 68.4 | 29.9 | 7.1 | 95.9 | 1.6 |
| Cenizas | 137.1 | 115.3 | 64.8 | 16.2 | 59.1 | 13.8 |
| FDN | 278.6 | 289.2 | 149.8 | 162.8 | 277.5 | 108.9 |
| FDA | 130.6 | 179.8 | 100.4 | 64.2 | 161.4 | 33.8 |
| Lignina | 21.6 | 36.3 | 26.9 | 11.6 | 34.9 | 18.8 |
| Celulosa | 107.9 | 143 | 72.9 | 52.1 | 124.8 | 14.6 |
| Hemicelulosa | 148 | 109.4 | 49.4 | 98.7 | 116 | 75.1 |
| Fósforo total (P_t) | 14.4 | 14.6 | 5.9 | 3 | 14.3 | 2.6 |
| Fósforo fítico (P_{phy}) | 6.6 | 12.7 | 5.1 | 2.7 | 13.4 | 2.5 |
| Calcio (Ca) | 20.4 | 7.4 | 10.4 | 0.4 | 1.6 | 0.4 |

FDN, Fibra detergente neutro; FDA, Fibra detergente ácido

Cuadro 9. Horarios de colocación (C) y recolección (R) de bolsas en las cabras experimentales

| | | DÍAS | | | | | | | | | | | |
|---------------|---|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| | | 1 | | | | | 2 | | 3 | | 4 | 6 | |
| HORA | | 7:00 | 7:30 | 8:30 | 10:00 | 12:00 | 16:00 | 7:00 | 13:00 | 7:00 | 19:00 | 19:00 | 19:00 |
| TIEMPO | | | | | | | | | | | | | |
| 0.5 | C | R | | | | | | | | | | | |
| 1.0 | | C | R | | | | | | | | | | |
| 1.5 | | | C | R | | | | | | | | | |
| 2.0 | | | | C | R | | | | | | | | |
| 4.0 | | | | | C | R | | | | | | | |
| 6.0 | | | | | | | C | R | | | | | |
| 12.0 | | | | | | | | | C | R | | | |
| 24.0 | | | | | | | | | | C | R | | |
| 48.0 | | | | | | | | | | | C | R | |

Cuadro 10. Coeficientes de la desaparición de la materia seca (MS) de pollinaza, harinolina, pasta de soya, sorgo, salvado de trigo y maíz

| Item ¹ | Ingredientes | | | | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | Proteínicos | | | Energéticos | | |
| | Pollinaza | Harinolina | Pasta de soya | Sorgo | Salvado de trigo | Maíz |
| A_{MS} (g/kg MS) | 274.50 (16.00) ^{ab} | 210.57 (7.11) ^b | 311.14 (7.19) ^a | 311.70 (19.5) ^a | 263.10 (24.10) ^{ab} | 263.00 (14.0) ^{ab} |
| B_{MS} (g/kg MS) | 608.70 (18.10) ^c | 437.80 (24.00) ^d | 694.70 (10.20) ^{bc} | 974.10 (58.10) ^a | 442.40 (20.80) ^d | 807.00 (19.30) ^b |
| C_{MS} (/h) | 0.076 (0.007) ^b | 0.060 (0.008) ^{bc} | 0.065 (0.009) ^b | 0.026 (0.005) ^c | 0.112 (0.013) ^a | 0.044 (0.004) ^{bc} |
| A_{MS}+B_{MS} (g/kg MS) | 883.20 (10.20) ^c | 648.40 (24.30) ^d | 1005.90 (12.50) ^{bc} | 1258.80 (72.90) ^a | 705.50 (11.10) ^d | 1062.50 (28.50) ^b |
| MS_d (g/kg MS) | 613.00 (11.30) ^b | 423.00 (13.60) ^d | 662.70 (14.70) ^a | 574.00 (4.44) ^{bc} | 548.40 (11.50) ^c | 597.37 (4.06) ^b |
| MS₄₈ (g/kg MS) | 853.70 (10.30) ^b | 610.80 (17.80) ^d | 949.10 (8.93) ^a | 928.70 (5.32) ^a | 705.70 (10.30) ^c | 950.17 (6.01) ^a |

^{a,b,c,d} Literales diferentes en la misma hilera indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

¹ A_{MS}, fracción de la MS de rápida desaparición; B_{MS}, fracción potencialmente degradable de la MS; C_{MS}, tasa de desaparición de la fracción B_{MS}; A_{MS}+ B_{MS}, degradación potencial de la MS; MS_d, desaparición efectiva de la MS; MS₄₈, desaparición observada de la MS a las 48 h

Cuadro 11. Relaciones de los coeficientes de la cinética de degradación de la materia seca (MS) con la composición química de los ingredientes.

| Respuesta | Ecuación | R² | rsd | P |
|--------------------------------------|--|----------------------|------------|----------|
| B_{MS} | 1153.00 – 19.90×lignina | 0.79 | 90.88 | <0.001 |
| B_{MS} | 936.40 – 30.81× P _t | 0.72 | 105.38 | <0.001 |
| A_{MS}+B_{MS} | 502.0 + 25.38 × FDA – 0.27× FDA ² + 0.0008 × FDA ³ | 0.84 | 90.40 | <0.001 |
| A_{MS}+B_{MS} | 1244.00 + 34.69 × P _t | 0.70 | 124.66 | <0.001 |
| MS₄₈ | 843.3 + 3.49 × FDA – 0.03 × FDA ² | 0.95 | 30.86 | <0.001 |
| MS₄₈ | 877.1 + 29.73 × Pt – 2.80 × Pt ² | 0.68 | 75.96 | <0.001 |

R², coeficiente de regresión; rsd, varianza residual del modelo; P, nivel de significancia del modelo.

¹ B_{MS}, fracción potencialmente degradable de la MS; A_{MS}+ B_{MS}, degradación potencial de la MS; MS₄₈, desaparición de la MS observada a las 48 h. Pt, fósforo total (g/kg MS), FDA, fibra detergente ácido (g/kg MS).

Cuadro 12. Coeficientes de la desaparición del fósforo total (Pt) de pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo.

| Item ¹ | Ingredientes | | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | Proteínicos | | | Energético |
| | Pollinaza | Harinolina | Pasta de soya | Salvado de trigo |
| A_{Pt} (g/kg Pt) | 594.35 (7.24) ^b | 521.15 (6.39) ^c | 400.86 (9.80) ^d | 647.26 (7.27) ^a |
| B_{Pt} (g/kg Pt) | 438.80 (13.10) ^{bc} | 472.90 (33.70) ^b | 696.40 (34.70) ^a | 371.20 (10.00) ^c |
| C_{Pt} (/h) | 0.044 (0.004) | 0.044 (0.001) | 0.049 (0.009) | 0.070 (0.014) |
| A_{Pt}+B_{Pt} (g/kg Pt) | 1033.10 (16.70) | 994.10 (28.90) | 1097.20 (40.60) | 1018.40 (14.30) |
| Pt_d (g/kg Pt) | 726.00 (51.00) ^b | 720.14 (9.56) ^b | 696.80 (13.80) ^b | 837.00 (10.10) ^a |
| Pt₄₈ (g/kg Pt) | 973.80 (10.30) ^a | 913.90 (8.70) ^b | 969.20 (21.10) ^a | 978.60 (6.20) ^a |

^{a,b,c,d} Literales diferentes en la misma hilera indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

¹ A_{Pt}, fracción del Pt rápidamente degradable; B_{Pt}, fracción potencialmente degradable del Pt; C_{Pt}, tasa de desaparición de la fracción B_{Pt}; A_{Pt}+ B_{Pt}, degradación potencial del Pt; Pt_d, degradación efectiva del Pt; Pt₄₈, degradación del Pt observada a las 48 h .

Cuadro 13. Regresión de la desaparición ruminal de fósforo (g/kg Pt) en el tiempo de incubación (t) para sorgo y maíz.

| Item | n | Ecuación | R ² | rsd | P |
|-------|---|--|----------------|------|--------|
| Sorgo | 5 | $711.2 + 20.9 \times t - 1.3 \times t^2 + 0.02 \times t^3$ | 0.7 | 56.9 | <0.001 |
| Maíz | 5 | $752.2 + 18.3 \times t - 1.7 \times t^2 + 0.03 \times t^3$ | 0.7 | 44.2 | <0.001 |

R², coeficiente de regresión; rsd, varianza residual; P, nivel de significancia.

Cuadro 14. Coeficientes de la desaparición del fósforo fítico (P_{phy}) de pollinaza, harinolina, pasta de soya, sorgo, salvado de trigo y maíz

| Item ¹ | Ingredientes | | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | Proteínicos | | | Energéticos | | |
| | Pollinaza | Harinolina | Pasta de soya | Sorgo | Salvado de trigo | Maíz |
| A_{Pphy} (g/kg MS) | 131.00 (15.90) ^{cd} | 198.60 (7.62) ^{bc} | 74.30 (18.10) ^d | 230.40 (10.90) ^b | 461.30 (24.60) ^a | 176.30 (17.80) ^{bc} |
| B_{Pphy} (g/kg MS) | 928.30 (12.10) ^a | 741.20 (11.40) ^c | 837.30 (25.00) ^b | 484.40 (16.80) ^d | 665.80 (31.20) ^c | 410.50 (15.20) ^d |
| C_{Pphy} (/h) | 0.043 (0.001) ^b | 0.126 (0.012) ^b | 0.097 (0.004) ^b | 0.192 (0.017) ^b | 0.039 (0.007) ^b | 0.420 (0.087) ^a |
| $A_{Pphy}+B_{Pphy}$ (g/kg MS) | 1059.20 (8.65) ^a | 939.90 (13.20) ^b | 911.62 (9.58) ^b | 714.80 (24.30) ^c | 1127.10 (29.70) ^a | 586.79 (8.86) ^d |
| P_{phyd} (g/kg MS) | 520.00 (14.00) ^{bc} | 693.13 (4.27) ^a | 589.30 (12.20) ^{bc} | 597.60 (23.20) ^b | 712.00 (16.70) ^a | 513.80 (32.80) ^c |
| P_{phy48} (g/kg MS) | 931.36 (7.35) ^a | 957.61 (4.34) ^a | 909.06 (7.77) ^a | 754.80 (28.20) ^b | 965.79 (7.77) ^a | 633.60 (10.60) ^c |

^{a,b,c,d} Literales diferentes en la misma hilera indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

¹ A_{Pphy} , fracción del P_{phy} de rápida desaparición; B_{Pphy} , fracción potencialmente degradable del P_{phy} ; C_{Pphy} , tasa de desaparición de la fracción B_{Pphy} ; $A_{Pphy}+B_{Pphy}$, degradación potencial del P_{phy} ; P_{phyd} , desaparición efectiva del P_{phy} ; P_{phy48} , desaparición del P_{phy} observada a las 48 h

Cuadro 15. Relaciones del contenido de fósforo fítico (P_{phy}) con componentes químicos de los alimentos y coeficientes de la cinética de degradación de la materia seca (MS)

| Respuesta | Ecuación | R ² | rsd | P |
|-------------------|---|----------------|-------|--------|
| P_{phy} | $- 1.58 + 0.08 \times FDA$ | 0.89 | 1.76 | <0.001 |
| P_{phy} | $0.96 + 0.70 \times Pt$ | 0.83 | 2.68 | <0.001 |
| P_{phy48} | $427.60 + 6.66 \times FDA - 0.02 \times FDA^2$ | 0.94 | 33.99 | <0.001 |
| B_{MS} | $1073.00 - 84.56 \times P_{phy} + 2.76 \times P_{phy}^2$ | 0.82 | 86.19 | <0.001 |
| $A_{MS} + B_{MS}$ | $1258.00 - 45.23 \times P_{phy}$ | 0.84 | 90.40 | <0.001 |
| MS_{48} | $349.80 + 374.36 \times P_{phy} - 62.88 \times P_{phy}^2 + 2.76 \times P_{phy}^3$ | 0.95 | 30.22 | <0.001 |

R², coeficiente de regresión; rsd, varianza residual; P, nivel de significancia.

P_{phy} , fósforo fítico (g/kg MS); P_{phy48} , desaparición del P_{phy} observada a las 48 h; B_{MS} , fracción potencialmente degradable de la MS; $A_{MS} + B_{MS}$, degradación potencial de la MS; MS_{48} , desaparición observada de la MS a las 48 h; FDA, fibra detergente ácido (g/kg MS); Pt, fósforo total (g/kg MS).

Cuadro 16. Comparación de los coeficientes de la cinética de desaparición ruminal de MS (g/kg MS) y de fósforo total (g de Pt/kg Pt) de pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo

| Item | Coeficiente | | | | | | | | |
|------------------|--------------------|--------------------|--------|--------------------|--------------------|--------|-------------------|-------------------|-------|
| | A | | | B | | | C | | |
| | MS | Pt | P | MS | Pt | P | MS | Pt | P |
| Pollinaza | 274.5 ^b | 594.4 ^a | <0.001 | 608.7 ^a | 438.8 ^b | <0.001 | 0.07 ^a | 0.04 ^b | <0.05 |
| Harinolina | 210.6 ^b | 521.2 ^a | <0.001 | 437.8 | 472.9 | ns | 0.06 | 0.04 | ns |
| Pasta de soya | 311.1 ^b | 400.9 ^a | <0.001 | 647.7 | 696.4 | ns | 0.06 | 0.05 | ns |
| Salvado de trigo | 263.1 ^b | 647.3 ^a | <0.05 | 442.4 ^a | 371.2 ^b | <0.05 | 0.11 ^a | 0.07 ^b | <0.05 |

ns, no significativo. A, fracción rápidamente soluble; B, fracción potencialmente degradable; C, tasa de desaparición de la fracción B

Cuadro 17. Comparación de los coeficientes de la cinética de desaparición ruminal del fósforo total (g Pt/kg Pt) y del fósforo fítico (g de Pphy/kg Pphy) de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y) y salvado de trigo (W).

| Item | n | Coeficiente | | | | | | | | |
|------|---|---------------------|---------------------|--------|---------------------|---------------------|--------|-------------------|-------------------|--------|
| | | A | | | B | | | C | | |
| | | Pt | P _{phy} | P | Pt | P _{phy} | P | Pt | P _{phy} | P |
| E | 6 | 594.40 ^a | 130.95 ^b | <0.001 | 438.80 ^b | 928.28 ^a | <0.001 | 0.04 | 0.04 | ns |
| H | 6 | 521.20 ^a | 198.70 ^b | <0.001 | 472.91 ^b | 741.20 ^a | <0.001 | 0.04 ^b | 0.13 ^a | <0.001 |
| Y | 6 | 400.90 ^a | 74.29 ^b | <0.001 | 696.36 ^b | 837.33 ^a | <0.05 | 0.05 ^b | 0.10 ^a | <0.05 |
| W | 5 | 651.38 ^a | 461.29 ^b | <0.05 | 370.54 ^b | 665.77 ^a | <0.001 | 0.07 ^a | 0.04 ^b | <0.05 |

ns, no significativo. A, fracción rápidamente soluble; B, fracción potencialmente degradable; C, tasa constante de desaparición de la fracción B.

Cuadro 18. Degradación de la materia seca, fósforo total y fítico (g/kg MS) de pollinaza, harinolina y pasta de soya a diferentes tiempos de incubación en bolsa de nylon en el rumen de cabras lecheras en mantenimiento.

| Ingrediente | Tiempo de incubación (h) | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 | 12.0 | 24.0 | 48.0 |
| <i>Pollinaza</i> | | | | | | | | | |
| | g/kg de MS | | | | | | | | |
| Materia seca | 270.7 | 329.5 | 356.0 | 379.5 | 437.8 | 475.2 | 627.3 | 803.1 | 853.7 |
| Fósforo total | 8.3 | 8.7 | 9.2 | 9.3 | 9.8 | 10.1 | 10.9 | 12.6 | 14.0 |
| Fósforo fítico | 1.0 | 1.1 | 1.4 | 1.6 | 1.7 | 2.0 | 3.4 | 5.0 | 6.2 |
| <i>Harinolina</i> | | | | | | | | | |
| Materia seca | 193.9 | 243.7 | 265.6 | 287.7 | 287.2 | 323.4 | 429.4 | 540.0 | 610.8 |
| Fósforo total | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.2 | 9.0 | 9.9 | 13.0 | 13.3 |
| Fósforo fítico | 1.5 | 5.3 | 5.5 | 6.1 | 5.6 | 5.8 | 10.5 | 11.0 | 12.2 |
| <i>Pasta de soya</i> | | | | | | | | | |
| Materia seca | 305.5 | 380.5 | 392.0 | 419.8 | 432.5 | 505.8 | 686.2 | 862.5 | 949.1 |
| Fósforo total | 2.5 | 2.8 | 2.6 | 2.8 | 2.8 | 3.2 | 4.0 | 5.4 | 5.7 |
| Fósforo fítico | 0.5 | 0.8 | 1.0 | 1.3 | 1.6 | 1.9 | 3.7 | 4.1 | 4.6 |

Cuadro 19. Degradación de la materia seca, fósforo total y fítico (g/kg MS) de sorgo, salvado de trigo y maíz a diferentes tiempos de incubación en bolsa de nylon en el rumen de cabras lecheras en mantenimiento.

| Ingrediente | Tiempo de incubación (h) | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 | 12.0 | 24.0 | 48.0 |
| <i>Sorgo</i> | | | | | | | | | |
| | g/kg de MS | | | | | | | | |
| Materia seca | 315.9 | 317.0 | 368.2 | 377.8 | 385.3 | 437.7 | 529.1 | 729.4 | 928.5 |
| Fósforo total | 2.1 | 2.1 | 2.4 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.8 |
| Fósforo fítico | 0.5 | 0.9 | 1.0 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.7 | 1.9 | 2.0 |
| <i>Salvado de trigo</i> | | | | | | | | | |
| Materia seca | 302.0 | 287.9 | 349.8 | 338.2 | 427.2 | 483.4 | 585.3 | 662.3 | 705.7 |
| Fósforo total | 8.6 | 8.7 | 9.4 | 9.0 | 9.5 | 9.5 | 11.9 | 13.6 | 13.9 |
| Fósforo fítico | 9.0 | 8.2 | 5.9 | 6.0 | 6.5 | 6.1 | 10.4 | 12.2 | 12.9 |
| <i>Maíz amarillo</i> | | | | | | | | | |
| Materia seca | 284.1 | 295.4 | 327.4 | 332.1 | 386.1 | 431.7 | 569.0 | 805.6 | 950.2 |
| Fósforo total | 2.0 | 2.0 | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.1 | 1.6 | 2.5 |
| Fósforo fítico | 0.6 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 |

Cuadro 20. Relaciones de la degradación ruminal *in situ* del fósforo total (Pt) y la degradación de la materia seca (MS) para pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo, en cabras lecheras en mantenimiento.

| Item | Ecuación | R ² | rsd | P |
|------------------|--------------------|----------------|--------|--------|
| Global | 496.0 + 0.451 × MS | 0.36 | 122.90 | <0.001 |
| Pollinaza | 421.0 + 0.583 × MS | 0.89 | 42.77 | <0.001 |
| Harinolina | 325.0 + 0.931 × MS | 0.84 | 58.27 | <0.001 |
| Pasta de soya | 113.7 + 0.886 × MS | 0.92 | 59.40 | <0.001 |
| Salvado de trigo | 457.1 + 0.693 × MS | 0.77 | 57.25 | <0.001 |

R², coeficiente de regresión; rsd, varianza residual del modelo; P, nivel de significancia del modelo. MS, (g/kg MS); P_{phy}, (g/kg P_{phy}).

Cuadro 21. Relaciones de la degradación ruminal del fósforo total (P_t) y la degradación del fósforo fítico (P_{phy}) para pollinaza, harinolina, pasta de soya y salvado de trigo, en cabras lecheras en mantenimiento.

| Item | Ecuación | R^2 | rsd | P |
|------------------|--------------------------------|-------|--------|--------|
| Global | $492.3 + 0.439 \times P_{phy}$ | 0.49 | 109.28 | <0.001 |
| Pollinaza | $539.2 + 0.452 \times P_{phy}$ | 0.93 | 34.21 | <0.001 |
| Harinolina | $432.4 + 0.409 \times P_{phy}$ | 0.65 | 84.75 | <0.001 |
| Pasta de soya | $325.8 + 0.643 \times P_{phy}$ | 0.83 | 85.45 | <0.001 |
| Salvado de trigo | $484.4 + 0.455 \times P_{phy}$ | 0.62 | 76.46 | <0.001 |

R^2 , coeficiente de regresión; rsd, varianza residual del modelo; P, nivel de significancia del modelo. P_t , (g/kg Pt); P_{phy} , (g/kg P_{phy}).

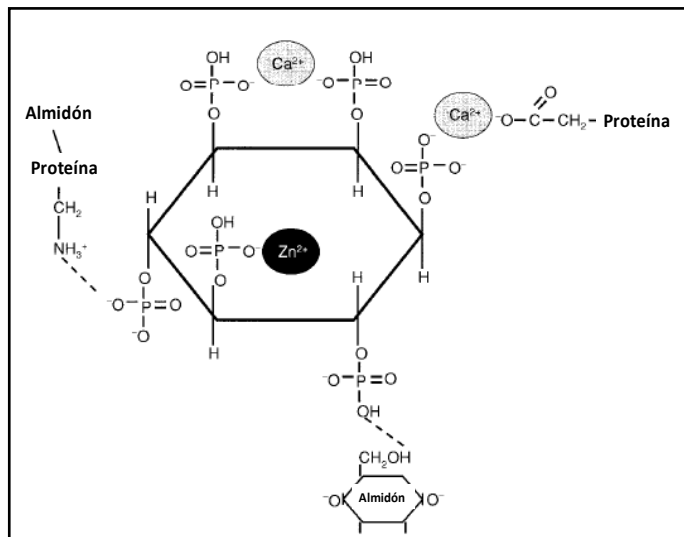


Figura 1. Estructura química del ácido fítico

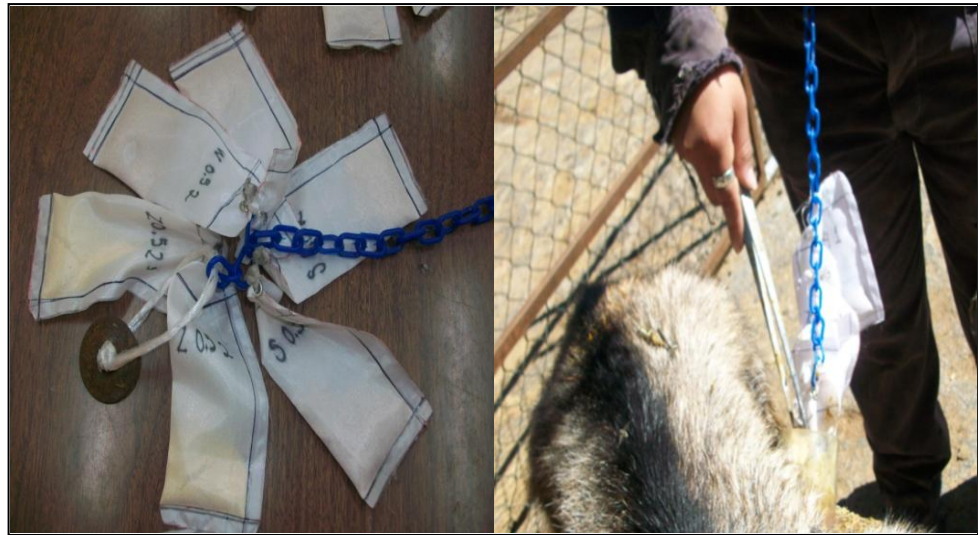


Figura 2. Bolsas de nylon sujetas a cadena plástica para su incubación en el rumen de cabras lecheras en mantenimiento

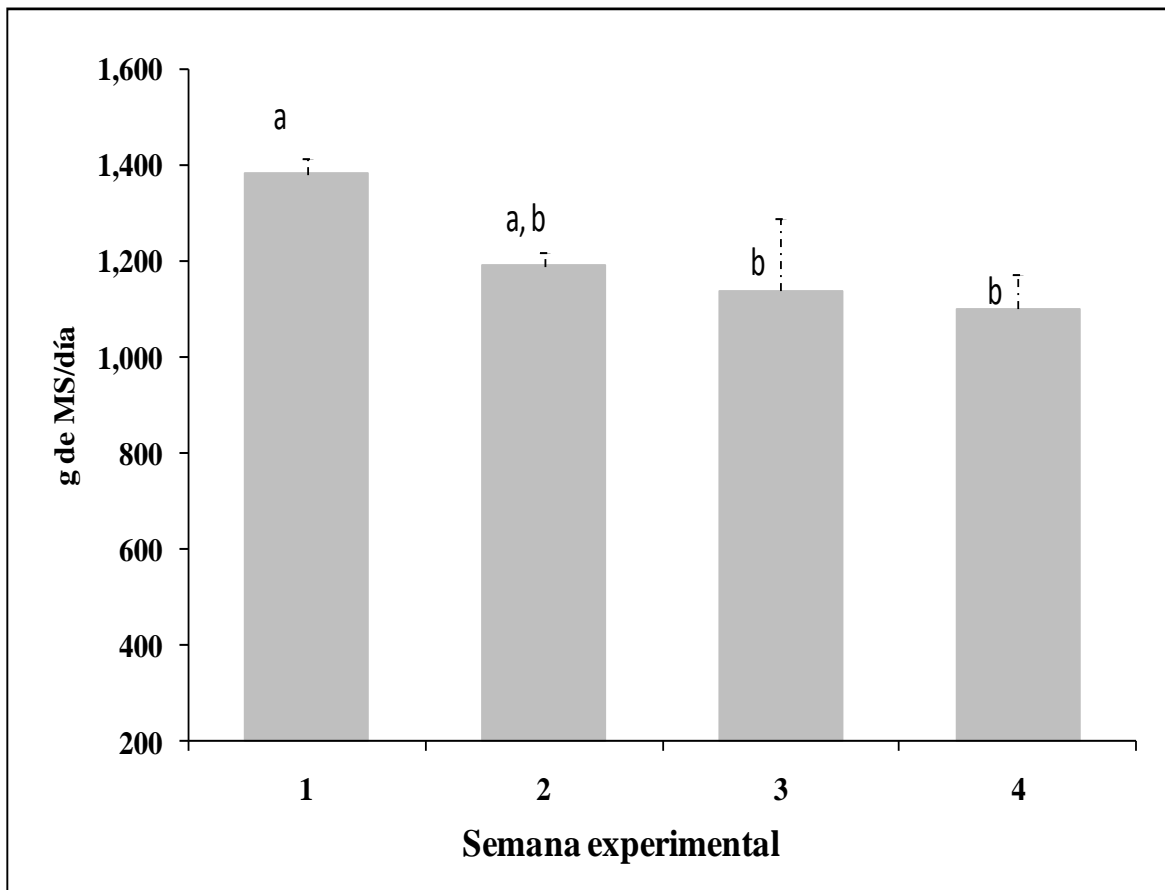


Figura 3. Consumo diario promedio de materia seca (MS) de cabras lecheras en condiciones de mantenimiento. Las líneas verticales punteadas corresponden a la desviación estándar. Literales disímiles indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

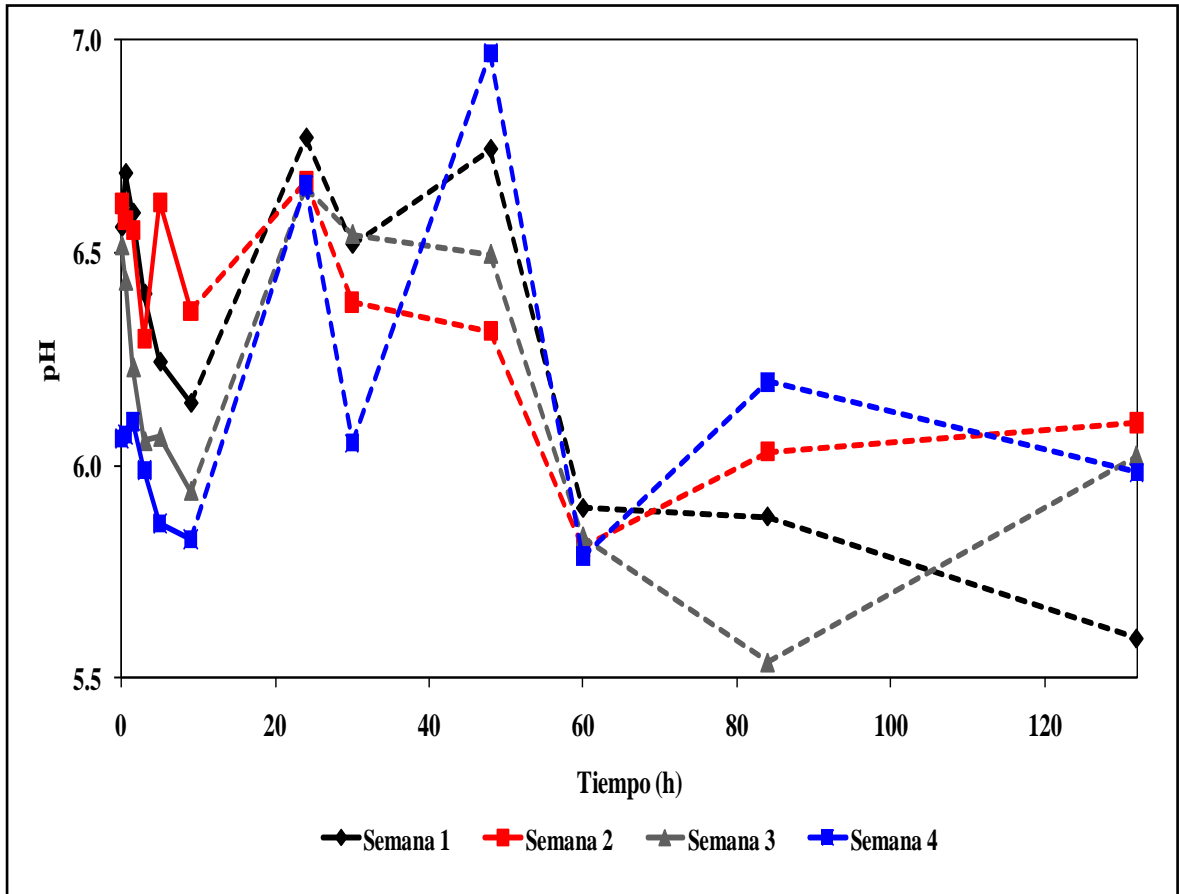


Figura 4. pH del líquido ruminal de cabras lecheras en mantenimiento. Las líneas punteadas unen a las mediciones tomadas a amplios intervalos de tiempo.

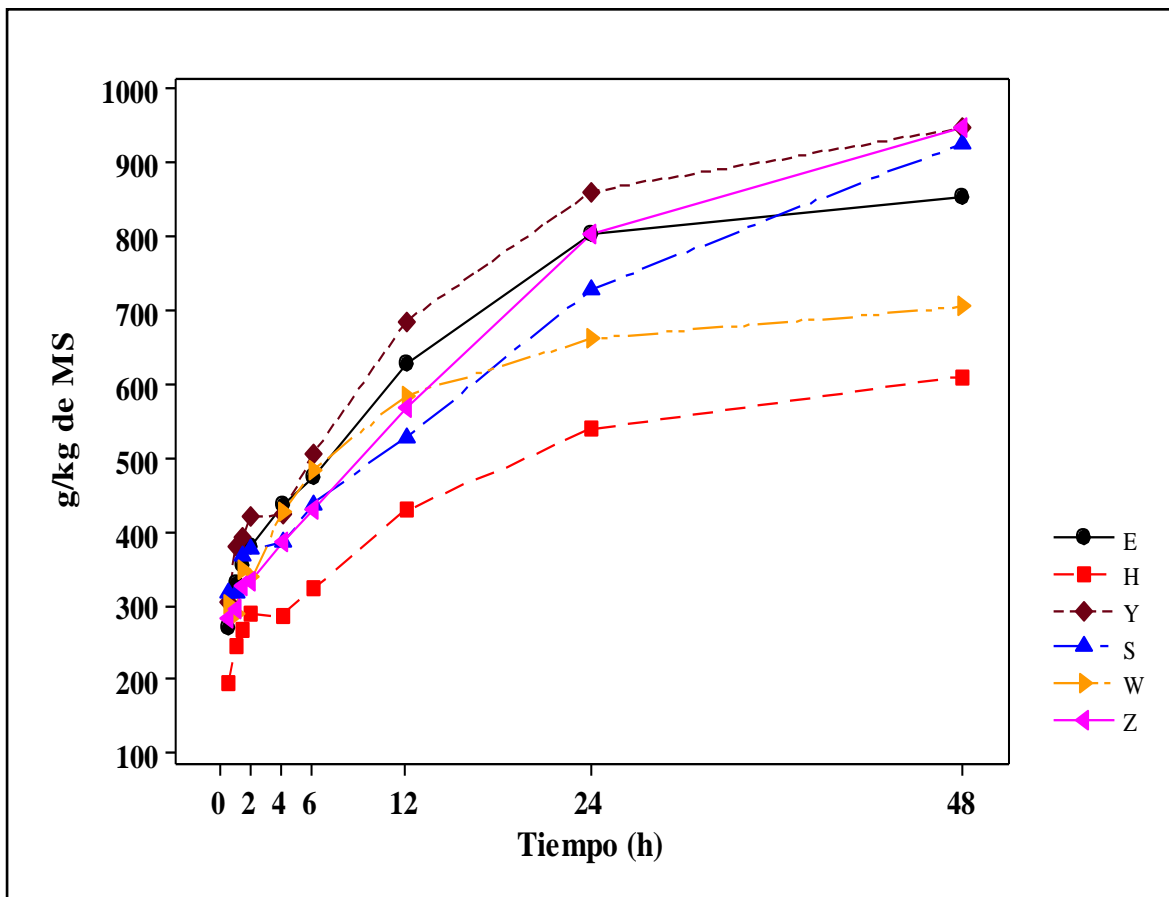


Figura 5. Cinética de degradación de la materia seca (MS) de pollinza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz (Z) en el rumen de cabras lecheras en mantenimiento.

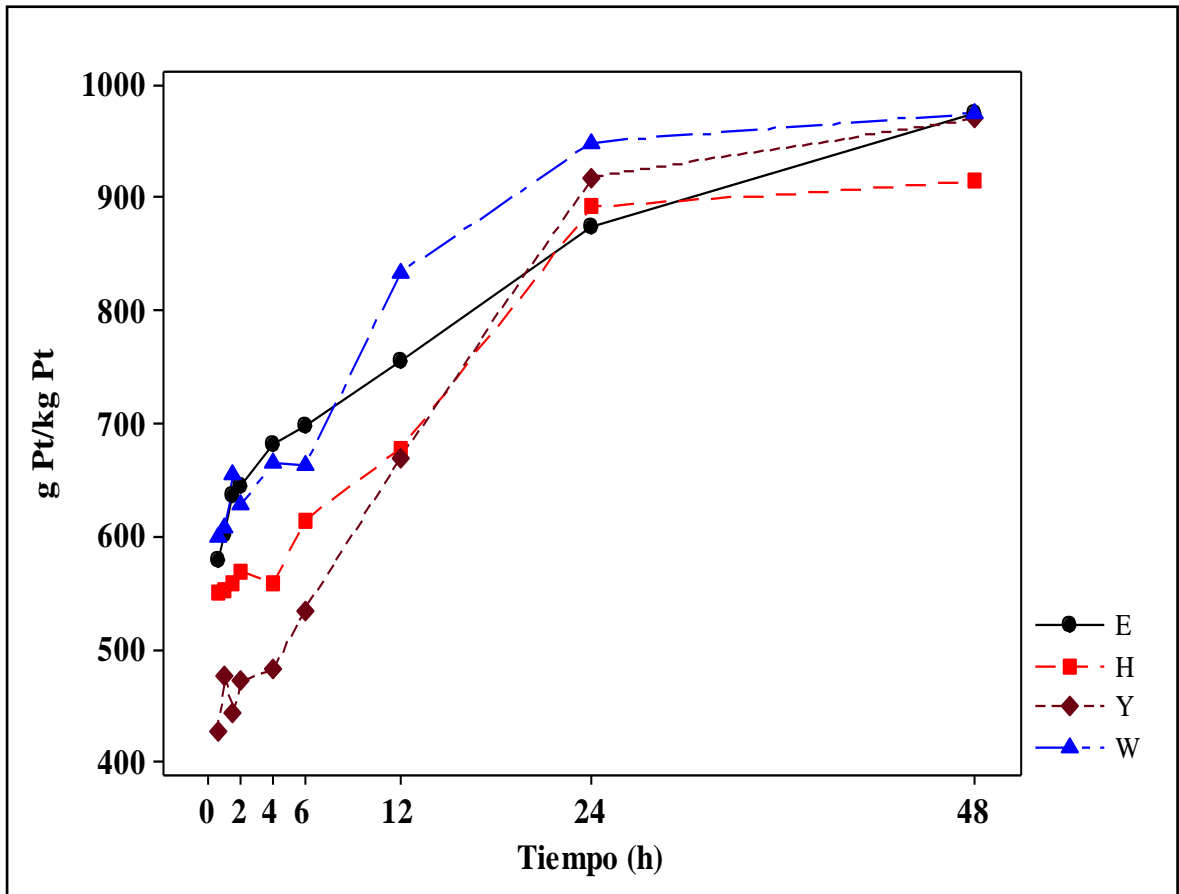


Figura 6. Cinética de degradación del fósforo total (Pt) de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soja (Y) y salvado de trigo (W) en el rumen de cabras en mantenimiento.

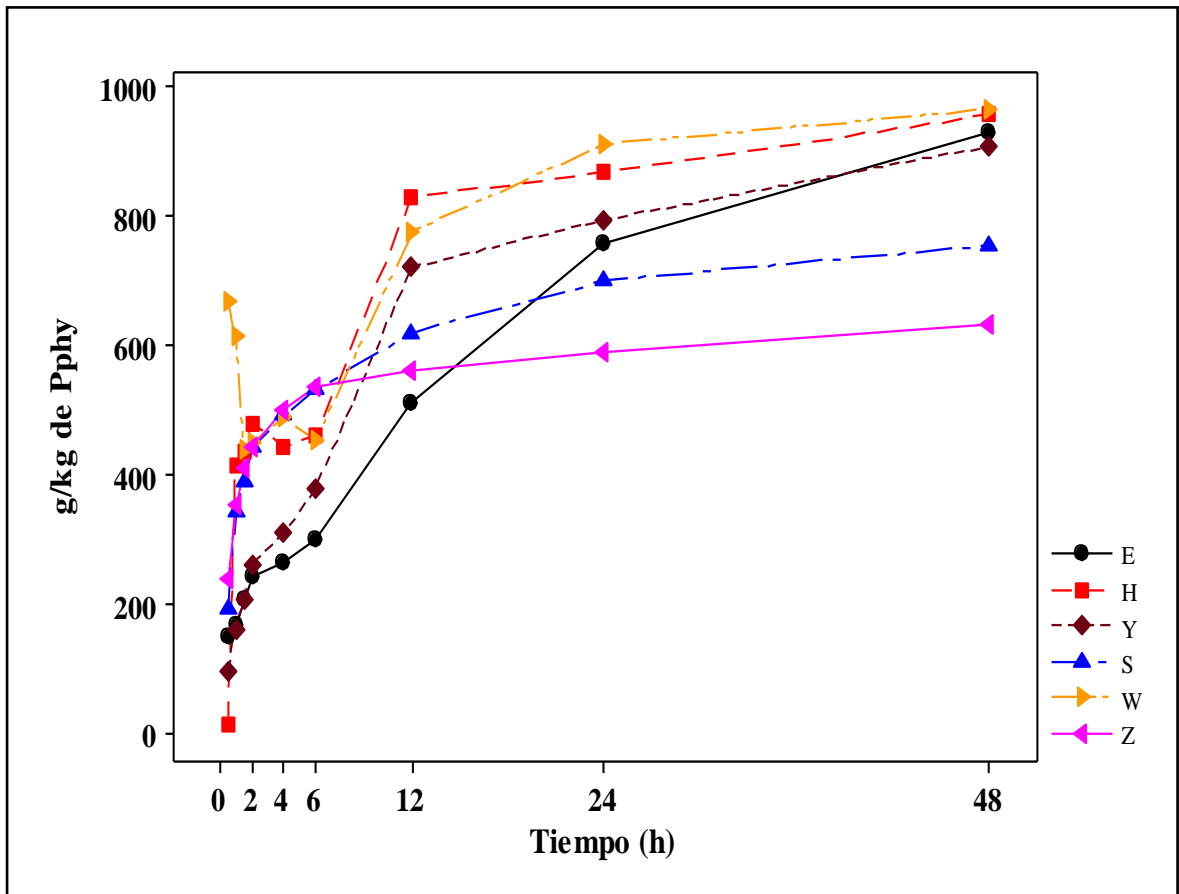


Figura 7. Cinética de liberación de fósforo fítico (P_{phy}) de pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soja (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz (Z) en el rumen de cabras en mantenimiento.

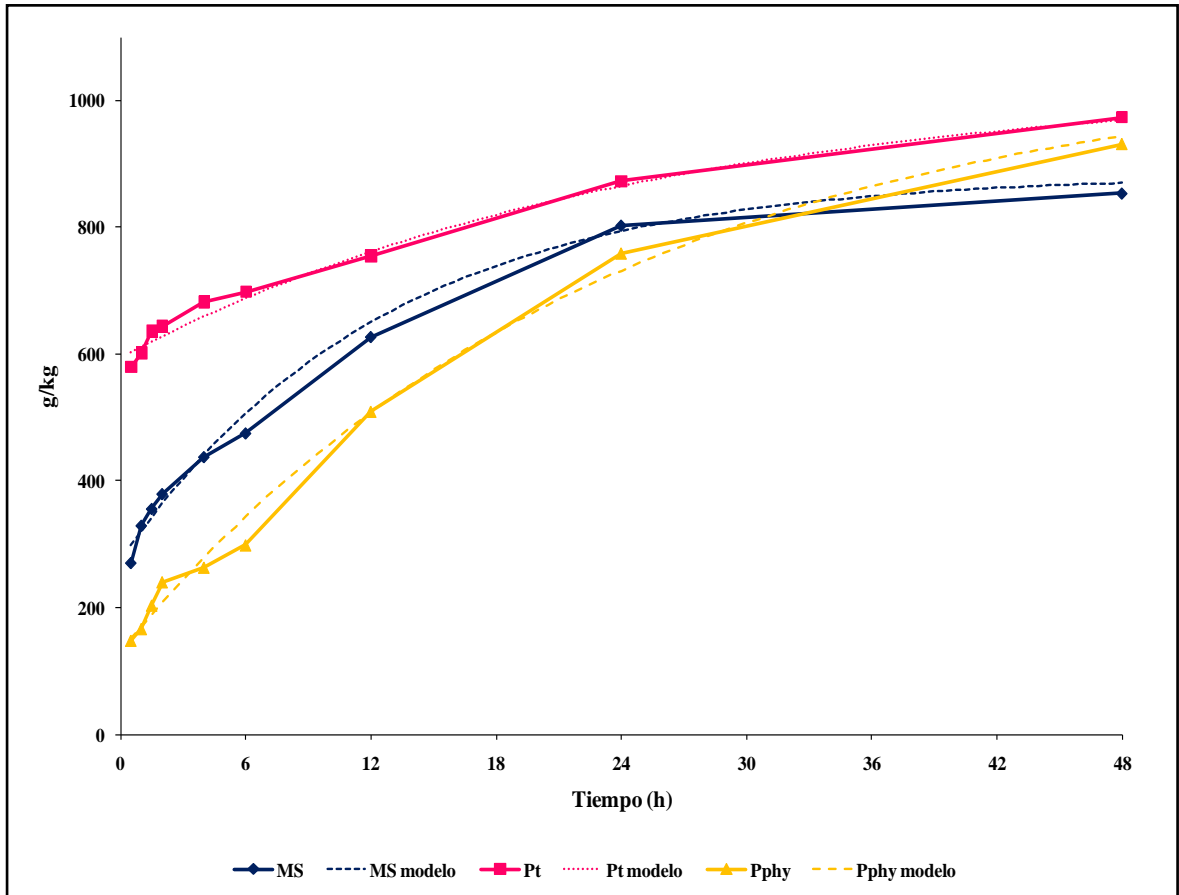


Figura 8. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de pollinaza en el rumen de cabras en mantenimiento. Las líneas sólidas corresponden a los datos reales y las punteadas, a los datos ajustados (Ørskov y McDonald, 1980).

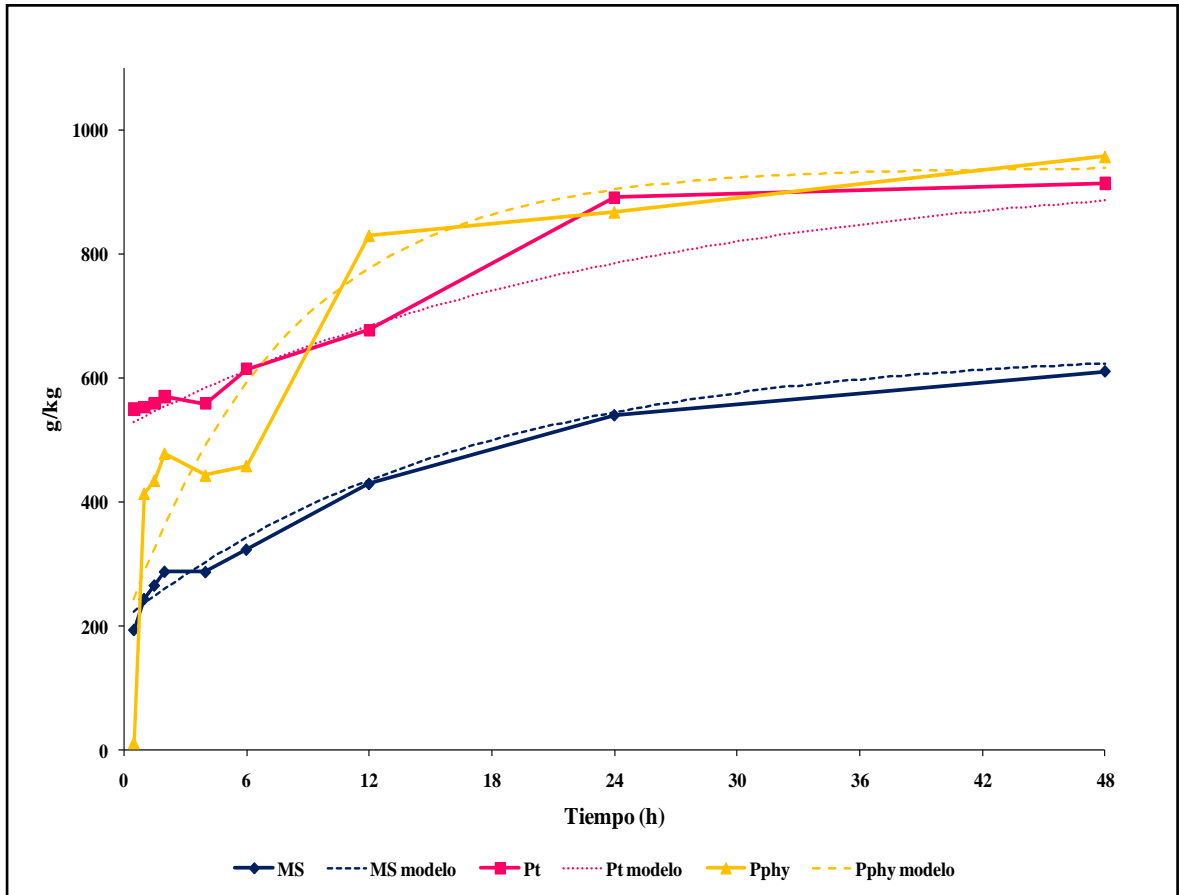


Figura 9. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de harinolina en el rumen de cabras en mantenimiento. Las líneas sólidas corresponden a los datos reales y las punteadas, a los datos ajustados (Ørskov y McDonald, 1970).

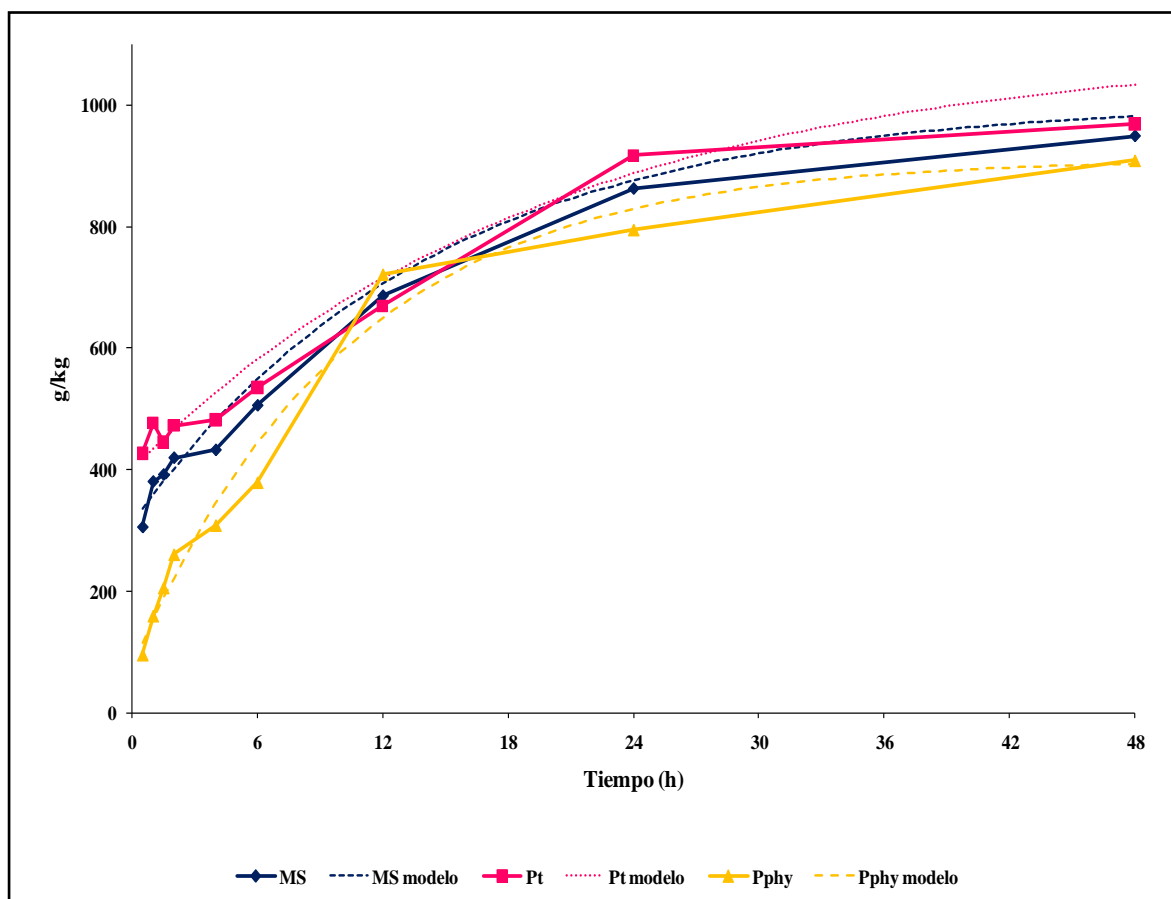


Figura 10. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de pasta de soja en el rumen de cabras en mantenimiento. Las líneas sólidas corresponden a los datos reales y las punteadas a los ajustados (Ørskov y McDonald, 1970).

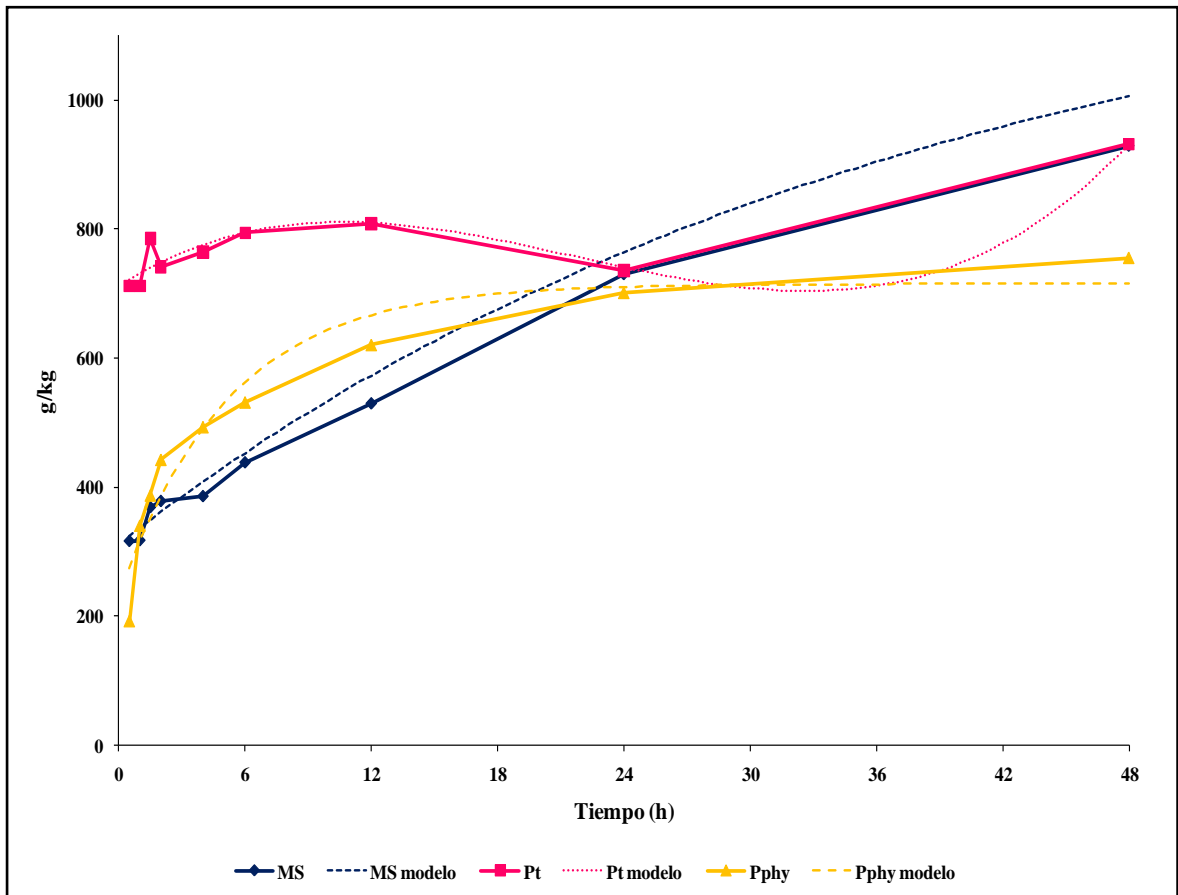


Figura 11. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de sorgo en el rumen de cabras en mantenimiento. Las líneas sólidas corresponden a los datos reales y las punteadas a los ajustados (MS, P_{phy} = Ørskov y McDonald, 1970; Pt = modelo polinomial del tercer orden).

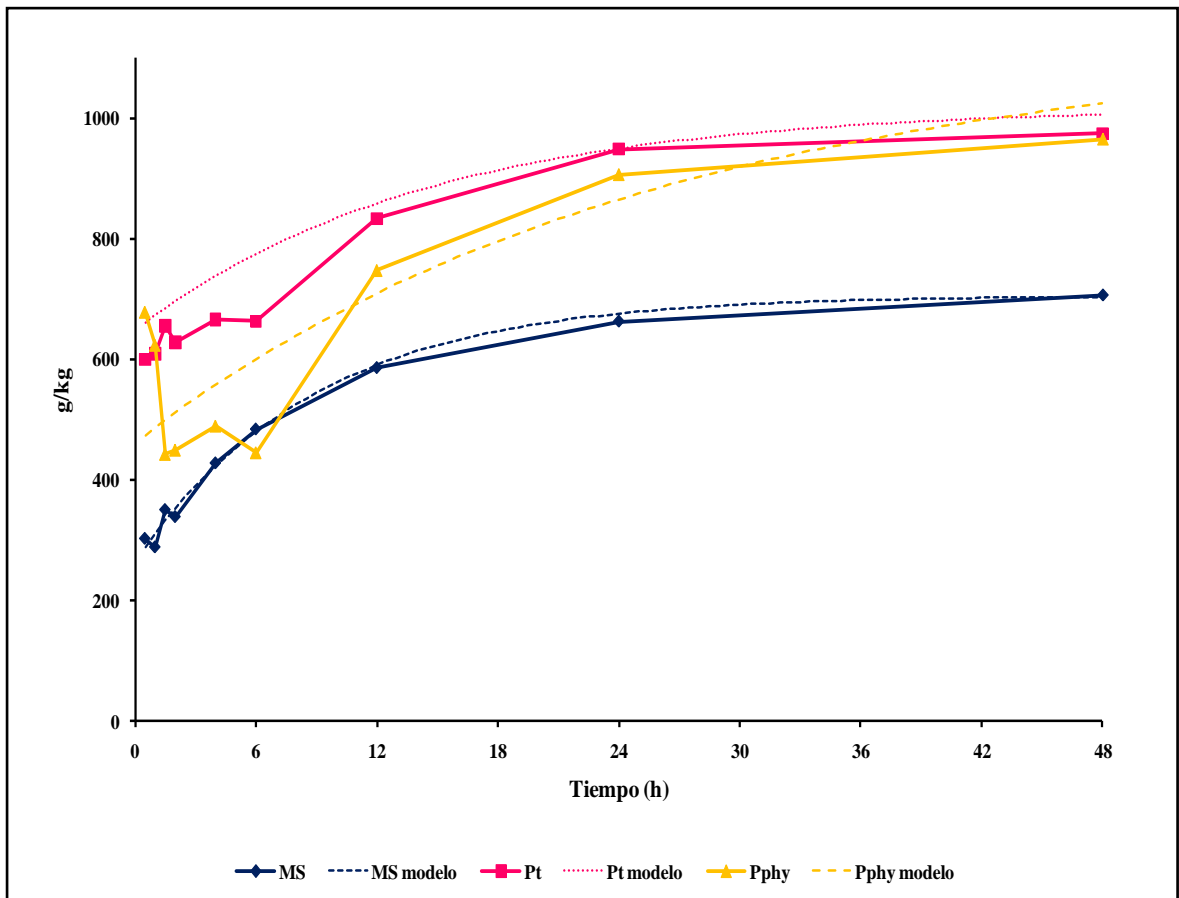


Figura 12. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de salvado de trigo en el rumen de cabras en mantenimiento. Las líneas sólidas corresponden a los datos reales y las punteadas a los ajustados (Ørskov y McDonald, 1970).

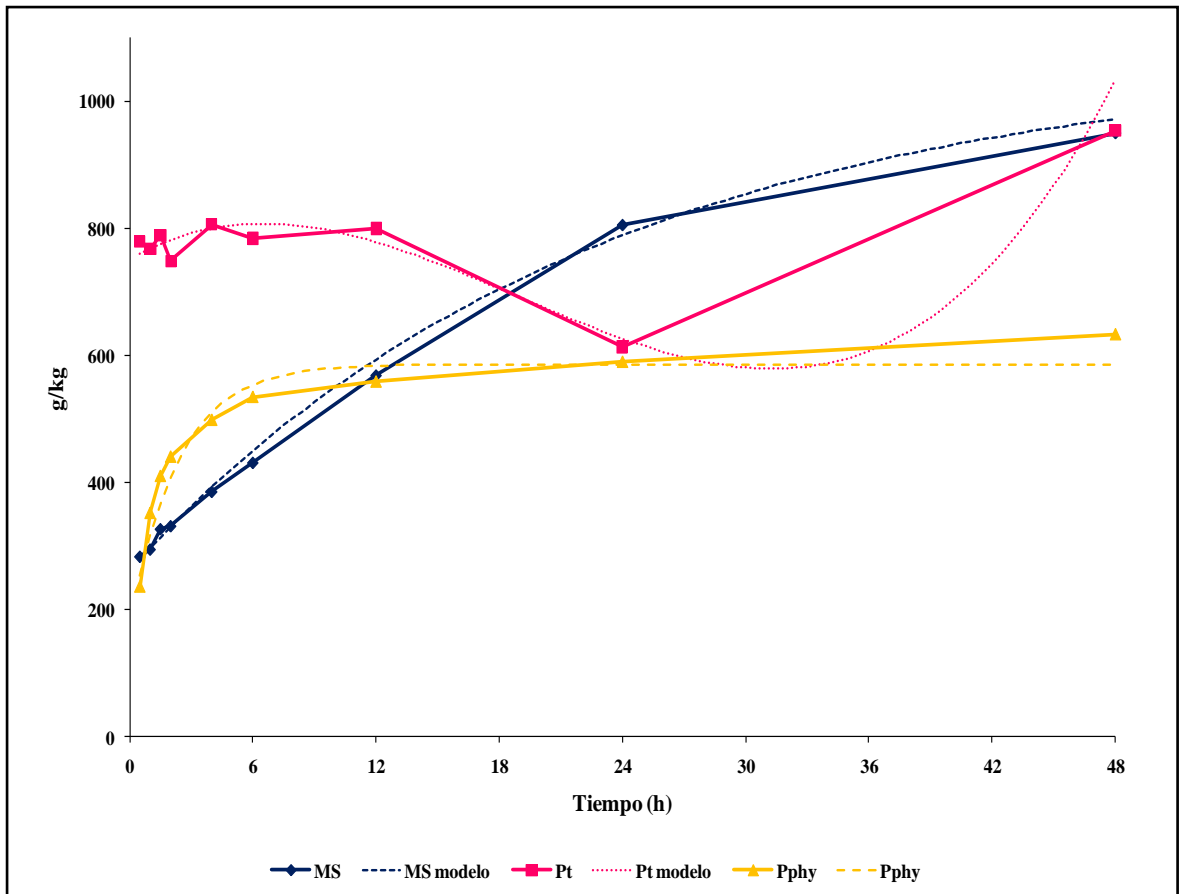


Figura 13. Cinética de liberación de la materia seca (MS), fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}) de maíz en el rumen de cabras en mantenimiento. Las líneas sólidas corresponden a los datos reales y las punteadas a los ajustados (MS, P_{phy} = Ørskov y McDonald, 1970; Pt = modelo polinomial del tercer orden).

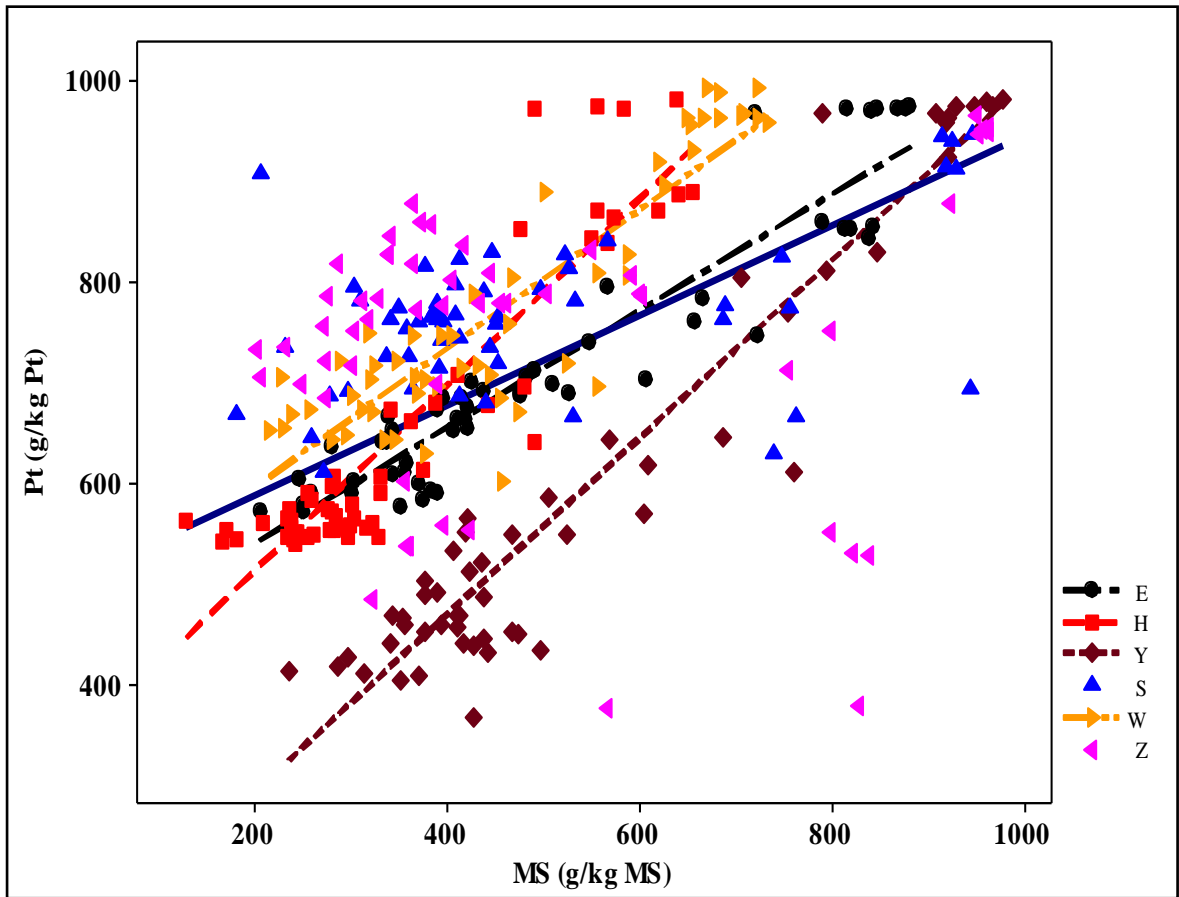


Figura 14. Relación entre la degradación de fósforo total (Pt) y la de materia seca (MS) para pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz (Z). Las líneas punteadas corresponden al ajuste de los diferentes alimentos, la línea sólida corresponde a la relación global.

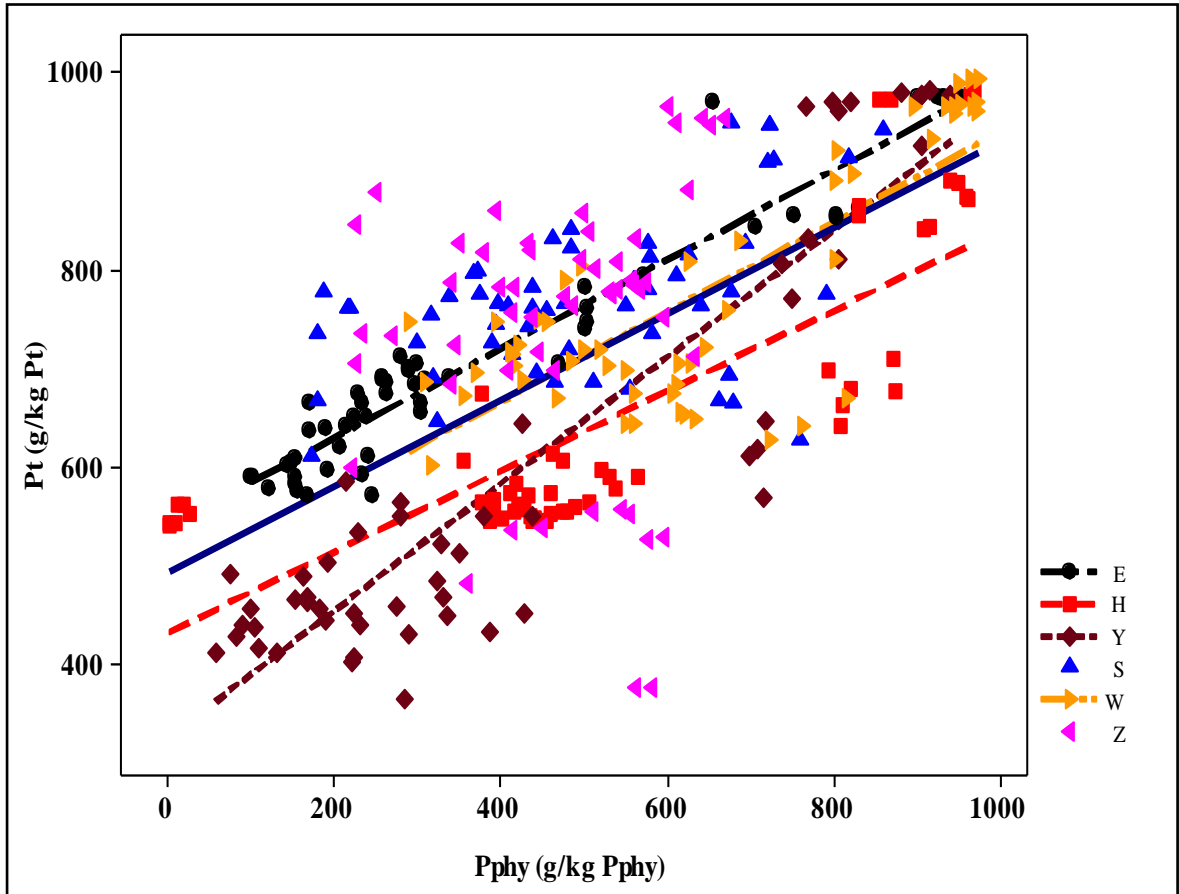


Figura 15. Relación entre la degradación de fósforo total (Pt) y fósforo fítico (P_{phy}), para pollinaza (E), harinolina (H), pasta de soya (Y), sorgo (S), salvado de trigo (W) y maíz (Z). Las líneas punteadas corresponden al ajuste de los diferentes alimentos, la línea sólida corresponde a la relación global.

9. ANEXOS

ANEXO 1

Modelo de Ørskov y McDonald, 1970

La descripción cuantitativa de los procesos biológicos puede realizarse mediante modelaciones que se ajusten óptimamente al conjunto de datos experimentales. Sin embargo, entre el modelo matemático y el proceso biológico existe un mecanismo desconocido que puede esclarecerse utilizando herramientas matemáticas, con su correspondiente interpretación biológica. El modelo de Ørskov y McDonald (1970) es un modelo matemático no lineal utilizado en la Nutrición animal para describir la cinética de degradación ruminal de nutrimentos (materia seca, proteína cruda, fibra detergente neutro (FDN), almidón, minerales como calcio, potasio, sodio, fósforo y fósforo fítico) consumidos por los animales. Utilizando para esto, los datos de la técnica de digestibilidad *in situ* (bolsas de nylon). El modelo de Ørskov y McDonald (1970), describe la fermentación de las fracciones nutricionales obedeciendo a una fase inicial de digestión lenta, seguida de una fase de aceleración y otra de desaceleración hasta alcanzar un valor asintótico, al que se le ha llamado digestibilidad potencial. Este valor puede variar de acuerdo al tipo de alimento, naturaleza, composición química y nivel de suplementación. Existen muchos modelos matemáticos que se han utilizado para ajustar los datos de degradabilidad ruminal (Waldo *et al.*, 1972; Ørskov y McDonald., 1980; McDonald, 1981; Mertens y Ely, 1982; Nocek y English, 1986). Sin embargo, el modelo propuesto por Ørskov y McDonald (1970) es el más usado, y se muestra a continuación:

$$Y = A + B (1 - e^{-Ct})$$

Donde: Y es la cantidad real de nutrimento degradado; A es el intercepto de la curva de degradación en el tiempo cero, que describe la cantidad de material de rápida desaparición en relación al componente $B (1 - e^{-Ct})$; B es la cantidad de material potencialmente degradable; C es la tasa de degradación constante para la fracción B .

ANEXO 2

Análisis de varianza (ANDEVA) para el consumo de materia seca (CMS) de cabras (50 kg PV) en mantenimiento, canuladas de rumen.

| Consumo de Materia Seca | | | | | |
|--------------------------------|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Semana experimental | 3 | 140060 | 46887 | 6.28 | 0.017 |
| Error | 8 | 59509 | 7439 | | |
| TOTAL | 11 | 199569 | | | |

$s = 86.2472$ $R^2 = 70.18\%$ $R^2 \text{ Ajustado} = 59.00\%$

ANEXO 3

Análisis de varianza (ANDEVA) para los coeficientes de degradación de la materia seca (MS) de los ingredientes experimentales pollinaza, harinolina, pasta de soya, sorgo, salvado de trigo y maíz

| Fracción rápidamente soluble: A_{MS} | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 42295 | 8459 | 5.57 | 0.001 |
| Error | 30 | 45540 | 1518 | | |
| TOTAL | 35 | 87835 | | | |

$s = 38.9662$

$R^2 = 48.15\%$

R^2 Ajustado = 39.50%

| Fracción potencialmente soluble: B_{MS} | | | | | |
|---|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 1227065 | 245413 | 47.34 | 0.000 |
| Error | 30 | 155520 | 5184 | | |
| TOTAL | 35 | 1382585 | | | |

$s = 72.0031$

$R^2 = 88.75\%$

R^2 Ajustado = 86.88%

| Tasa de degradación constante para la fracción B_{MS}: C_{MS} | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 0.026383 | 0.0052766 | 13.35 | 0.000 |
| Error | 30 | 0.012033 | 0.0004011 | | |
| TOTAL | 35 | 0.038416 | | | |

$s = 0.020028$

$R^2 = 68.68\%$

R^2 Ajustado = 63.46%

ANEXO 4

Análisis de varianza (ANDEVA) para los coeficientes de degradación del fósforo total (Pt) de los ingredientes experimentales pollinaza, harinolina, pasta de soya, sorgo, salvado de trigo y maíz

| Fracción rápidamente soluble: A_{Pt} | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 3 | 205017 | 68339 | 188.22 | 0.000 |
| Error | 20 | 7260 | 363 | | |
| TOTAL | 23 | 212277 | | | |

$s = 19.0549$
 $R^2 = 96.58\%$
 R^2 Ajustado = 96.07%

| Fracción potencialmente soluble: B_{Pt} | | | | | |
|---|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 3 | 357144 | 119048 | 30.39 | 0.000 |
| Error | 20 | 78360 | 3918 | | |
| TOTAL | 23 | 435504 | | | |

$s = 62.5922$
 $R^2 = 82.01\%$
 R^2 Ajustado = 79.31%

| Tasa de degradación constante para la fracción B_{Pt}: C_{Pt} | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 3 | 0.0028233 | 0.0009411 | 2.22 | 0.117 |
| Error | 20 | 0.008464 | 0.0004232 | | |
| TOTAL | 23 | 0.0112873 | | | |

$s = 0.0205713$
 $R^2 = 25.01\%$
 R^2 Ajustado = 13.77%

ANEXO 4

Análisis de varianza (ANDEVA) para los coeficientes de degradación del fósforo total (Pt) de los ingredientes experimentales pollinaza, harinolina, pasta de soya, sorgo, salvado de trigo y maíz (Continuación)

| Degradación potencial: $A_{Pt} + B_{Pt}$ | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 3 | 34938 | 11646 | 262 | 0.079 |
| Error | 20 | 89060 | 4453 | | |
| TOTAL | 23 | 123998 | | | |

$s = 66.7296$
 $R^2 = 28.18\%$
 R^2 Ajustado = 17.40%

| Degradación efectiva del fósforo total: Pt_d | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | DF | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 3 | 70617 | 23539 | 5.26 | 0.008 |
| Error | 20 | 8955 | 4478 | | |
| TOTAL | 23 | 79572 | | | |

$s = 66.9161$
 $R^2 = 44.09\%$
 R^2 Ajustado = 35.70%

| Degradación del fósforo total observada a las 48h: Pt_{48} | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|-----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 21467.5 | 4293.5 | 5.5066051 | 0.001 |
| Error | 30 | 23391 | 779.7 | | |
| TOTAL | 35 | 44858.5 | | | |

$s = 27.9233$
 $R^2 = 47.86\%$
 R^2 Ajustado = 39.16%

ANEXO 5

Análisis de varianza (ANDEVA) para los coeficientes de degradación del fósforo fítico (P_{phy}) de los ingredientes experimentales pollinaza, harinolina, pasta de soya, sorgo, salvado de trigo y maíz

| Fracción rápidamente soluble: A_{Pphy} | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 472885 | 94577 | 61.8 | 0.000 |
| Error | 29 | 44370 | 1530 | | |
| TOTAL | 34 | 517255 | | | |

$s = 39.1191$
 $R^2 = 91.42\%$
 R^2 Ajustado = 89.94%

| Fracción potencialmente soluble: B_{Pphy} | | | | | |
|---|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 1207230 | 241446 | 113.3 | 0.000 |
| Error | 29 | 61799 | 2131 | | |
| TOTAL | 34 | 1269029 | | | |

$s = 46.1634$
 $R^2 = 95.13\%$
 R^2 Ajustado = 94.29%

| Tasa de degradación constante para la fracción B_{Pphy}: C_{Pphy} | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 0.59765 | 0.11953 | 14.46 | 0.000 |
| Error | 29 | 0.23983 | 0.00827 | | |
| TOTAL | 34 | 0.83748 | | | |

$s = 0.0909237$
 $R^2 = 71.37\%$
 R^2 Ajustado = 66.43%

ANEXO 5

Análisis de varianza (ANDEVA) para los coeficientes de degradación del fósforo fítico (P_{phy}) de los ingredientes experimentales pollinaza, harinolina, pasta de soya, sorgo, salvado de trigo y maíz (Continuación)

| Degradación potencial: $A_{Pphy} + B_{Pphy}$ | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 0.59765 | 0.11953 | 14.46 | 0.000 |
| Error | 29 | 0.23983 | 0.00827 | | |
| TOTAL | 34 | 0.83748 | | | |

$s = 0.0909237$
 $R^2 = 71.37\%$
 R^2 Ajustado = 66.43%

| Degradación efectiva del fósforo fítico: P_{phy_d} | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 201775 | 40355 | 18.03 | 0.000 |
| Error | 29 | 64902 | 2238 | | |
| TOTAL | 34 | 266677 | | | |

$s = 47.3033$
 $R^2 = 75.67\%$
 R^2 Ajustado = 71.47%

| Degradación del fósforo fítico observada a las 48h: $P_{phy_{48}}$ | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--------------------|----------|-------------------|
| Fuente de variación | GL | SCM Ajustado | CM Ajustado | F | Valor de P |
| Ingrediente | 5 | 531320 | 106264 | 97.3 | 0.000 |
| Error | 29 | 31668 | 1092 | | |
| TOTAL | 34 | 562988 | | | |

$s = 33.0472$
 $R^2 = 94.37\%$
 R^2 Ajustado = 93.40%