

## Problemas ambientales, homeostasis, particionamiento y requerimientos de fosforo en ganado de leche (Environmental problems, homeostasis, partitioning, and phosphorus requirements of dairy cattle)

**Elizondo Salazar, Jorge A.** Estación Experimental Alfredo Volio Mata. Facultad de Ciencias Agroalimentarias. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. E-mail: [jaelizon@cariari.ucr.ac.cr](mailto:jaelizon@cariari.ucr.ac.cr)

### REDVET: 2007, Vol. VIII N° 9

Recibido: 01 Junio 2007 / Referencia: 090701\_REDVET / Aceptado: 11 Agosto 2007 / Publicado: 01 Septiembre 2007

Está disponible en <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n090907.html> concretamente en <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n090907/090701.pdf>

REDVET® Revista Electrónica de Veterinaria está editada por Veterinaria Organización®. Se autoriza la difusión y reenvío siempre que enlace con Veterinaria.org® <http://www.veterinaria.org> y con REDVET® - <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet>

### Resumen

El fósforo es esencial para todos los organismos vivos y es uno de los principales nutrientes para el crecimiento animal. Preocupaciones concernientes con el ambiente y diversas propuestas ambientales que regulan el manejo de nutrientes, han renovado el interés en la cantidad de P que debe ser alimentado a las vacas lecheras, ya que alimentar P en exceso aumenta su excreción, lo que conlleva a desequilibrios ecológicos. Reducir el contenido de P en la dieta para minimizar su excreción es un enfoque fundamental y rentable que se puede lograr estimando con precisión los requerimientos de los animales. El NRC (2001) calcula el requerimiento de P para mantenimiento como 1,0 g/kg de materia seca (MS) más una cantidad insignificante para recuperar la pérdida de P urinario (0,002 g/kg de peso corporal). El requerimiento de P para lactancia se calcula como 0,9 g/kg de leche, sin importar el contenido de grasa o proteína. El requerimiento para crecimiento se calcula utilizando una ecuación alométrica y solamente se aplica a animales en crecimiento. El requerimiento de P para gestación es significativo únicamente durante el último trimestre de la gestación. El presente estudio es una revisión de literatura que plantea de manera general la importancia del fósforo en la nutrición animal, su regulación en el organismo, los problemas ambientales que puede ocasionar la sobrealimentación de este importante nutriente y la forma en que el NRC (2001) estima los requerimientos de P para el ganado de leche.

**Palabras clave:** Fósforo | Ganado de leche | Requerimientos nutricionales | Nutrición animal | Contaminación ambiental |

### Summary

Phosphorus is essential to all living organisms, and is one of the main nutrients for animal growth. Increasing environmental concerns and diverse proposed environmental regulations of nutrient management have renewed the interest in the amount of P that should be fed to dairy cows, as overfeeding of P increases P excretion, leading to disturbances of environmental ecosystems. Reducing the P content of the diet to minimize P excretion is a fundamental and cost-effective approach to reducing P losses from the farm. This can be done by precisely meeting the P requirements of the animals. The NRC (2001) calculates the maintenance

requirement for P as 1.0 g/kg of dry matter intake plus a negligible amount to recover the urinary P loss (0.002 g/kg body weight). The lactation requirement of P is calculated as 0.9 g/kg of milk, regardless of milk fat or protein content. The requirement for growth is calculated using an allometric equation, and that applies only to growing animals. The P requirement for pregnancy is significant only in the last trimester. The present study is a review of literature that presents in a general format the importance of P in animal nutrition, its regulation in the organism, the environmental problems caused by overfeeding P, and the proposed method by the NRC (2001) to estimate the P requirements of dairy cattle.

**Key words:** Phosphorus | Dairy cattle | Nutrient requirements | Animal nutrition | Environmental pollution |

---

## Introducción

El fósforo (P) es esencial para todos los organismos vivos y es uno de los principales nutrientes para el crecimiento animal. El P está presente en cada célula del cuerpo y tiene más funciones que cualquier otro elemento mineral (Maynard y Looslie, 1979; Ternouth, 1990; NRC, 2001). El fósforo es también un constituyente importante de la leche, y por lo tanto es requerido en grandes cantidades por vacas con altos niveles de producción.

Preocupaciones concernientes con el ambiente y diversas propuestas ambientales que regulan el manejo de nutrientes han renovado el interés en la cantidad de P que se debe alimentar a las vacas lecheras, ya que alimentar P en exceso aumenta su excreción, lo que conlleva a desequilibrios ecológicos. Cuando se aplica en el campo, por encima de lo requerido para el crecimiento de las plantas, el P se acumula en la tierra en forma de fosfatos y entra a los sistemas acuíferos por medio del agua de escorrentía y la erosión. Un sistema acuático enriquecido con P se puede deteriorar dando como resultado el fenómeno conocido como eutrofización (Walker, 2000).

Una serie de estrategias, para aminorar las pérdidas de nutrientes a través del agua de escorrentía y erosión, se aplican cada vez más en las fincas lecheras, pero la mayor parte de los esfuerzos se han enfocado en estrategias a la hora de aplicar el estiércol en el campo, es decir, posteriormente a su excreción. Mientras que reducir el contenido de P en la dieta para minimizar su excreción es un enfoque más fundamental y rentable para reducir las pérdidas de P de la finca. Sin embargo, es importante recalcar que las dietas para vacas lecheras deben contener suficiente P para satisfacer los requerimientos para una producción óptima.

Tradicionalmente, los productores sobrealimentan P a las vacas lecheras (0,55 a 0,60% de P en la dieta) como una práctica para aumentar la producción y mejorar el desempeño reproductivo. Esto, sin embargo, no ha sido soportado por investigaciones recientes. Varios estudios (Brintrup et al., 1993; Valk y Sebek, 1999; Wu y Satter, 2000; Wu et al., 2000, 2001) mostraron que niveles de P en la dieta por encima de 0,36% no son necesarios.

El presente estudio es una revisión de literatura que plantea de manera general la importancia del fósforo en la nutrición animal, su regulación en el organismo, los problemas ambientales que puede ocasionar la sobrealimentación de este importante nutriente y la forma en que el NRC (2001) estima los requerimientos de P para el ganado de leche.

## EL FÓSFORO Y EL MEDIO AMBIENTE

El fósforo es un elemento esencial para los animales y debe proporcionarse en la dieta (Soares, 1995). Sin embargo, los animales lo utilizan de forma ineficiente. En vacas lecheras de 60 a 70% del P consumido es excretado (Dou et al., 2002), por lo que la mayoría de P que ingresa a la finca en forma de alimento permanece en ella misma en forma de abono, en lugar

de ser exportado en la leche o en animales vendidos (Beede y Davidson, 1999; Kowlton y Herbain, 2000). Una vez en el suelo, el P se almacena, principalmente en forma de compuestos inorgánicos con hierro, aluminio y calcio, o en formas orgánicas en microorganismos, residuos de cosecha y material en descomposición (McDowell y Condron, 2001).

La transferencia de P del suelo a las fuentes de agua se da principalmente a través del agua de escorrentía, específicamente como P adherido a partículas de compuestos minerales y como P inorgánico disuelto, siendo la primera, la forma predominante que se da en la mayoría de tierras agrícolas (Sharpley et al., 1992). Adicionalmente, el P aplicado al suelo a lo largo de los años o la aplicación de estiércol en exceso puede llegar a lixiviarse a aguas subterráneas (Eghball, 2003). La entrada de P a los cuerpos de agua superficiales puede resultar en eutrofización. El fósforo es a menudo el nutriente limitante en sistemas acuáticos, lo mismo que en suelos poco fértiles, con la diferencia de que los sistemas acuáticos tienen una baja capacidad amortiguante o habilidad para almacenar dicho elemento. Cuando el P entra a lagos, ríos o riachuelos, el crecimiento de algas y otros microorganismos acuáticos se estimula. La descomposición de algas consume el oxígeno disuelto y cuando el oxígeno disuelto es escaso o se agota, los organismos aeróbicos del ecosistema se ven afectados y comienzan a morir. Cuando la tasa de muerte de estos organismos aumenta, la demanda por el oxígeno en el sistema aumenta aún más. Mayores tasas de mortalidad tendrán como resultado una mayor demanda de oxígeno necesario para la descomposición hasta que eventualmente llega a ser limitante. Cuando esto sucede, el sistema pasa de ser un sistema aeróbico a uno anaeróbico (Sharpley et al., 1994; Walker, 2000; Knowlton et al., 2001). El agua de esta forma puede experimentar un crecimiento masivo de cianobacterias, las cuáles puede matar animales y exponer a los seres humanos a problemas de salud (Walker, 2000; Sharpley y Beegle, 2001). Otros problemas comunes asociados con cuerpos de agua eutrofizados son: un uso recreacional restringido, efectos negativos en la salud por el consumo del agua y un incremento en el costo para el tratamiento de las mismas (Van Horn et al., 1991; Walker, 2000).

La eutrofización se ha convertido en un problema grave en muchas áreas del mundo donde se da una producción animal intensiva, por lo que para proteger y preservar la calidad de los recursos acuáticos, es importante limitar el ingreso del P a los mismos.

## **FUNCIONES DEL FÓSFORO EN EL ORGANISMO**

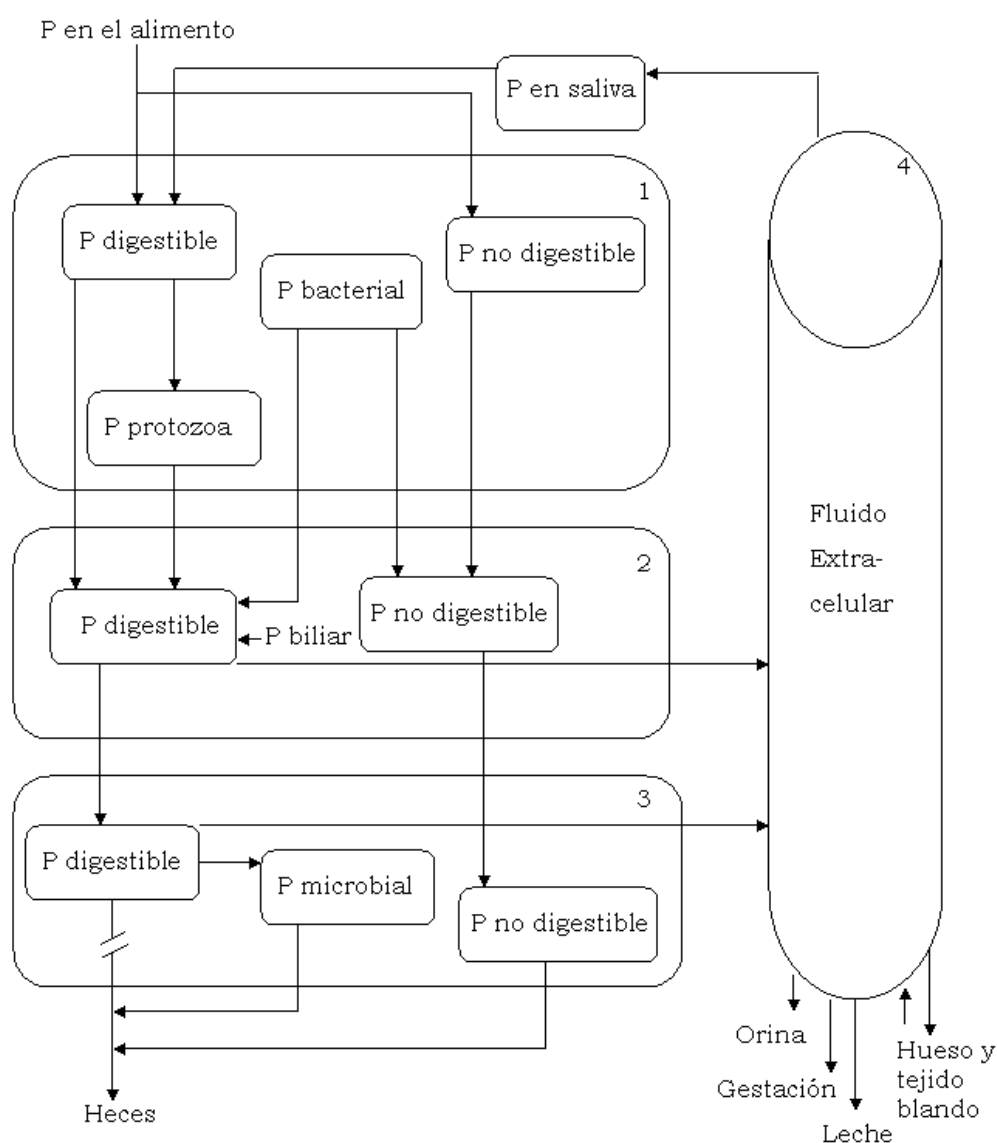
El fósforo tiene una serie de funciones en los animales. Los compuestos fosfatados dan rigidez al hueso, lo que asegura la función del sistema músculo-esquelético. Semejante al Ca, el P es importante para la formación y la conservación de los huesos. Los cambios en la estructura y composición de los huesos que resultan de la privación de P son semejantes a los causados por la deficiencia de Ca. Sin embargo, el P se requiere para la formación de la matriz orgánica del hueso así como de la mineralización de la matriz. Además del tejido esquelético, el P está distribuido ampliamente en los líquidos del cuerpo y tejido blando, donde está íntimamente ligado con una gran variedad de reacciones bioquímicas (Ternouth, 1990). El fósforo es un componente del ácido desoxirribonucleico (ADN) y ácido ribonucleico (ARN), que son esenciales para el crecimiento y diferenciación de las células. 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 fósforo juega un papel esencial en las funciones metabólicas del organismo, incluyendo la utilización y transferencia de energía AMP, ADP y ATP. El fósforo 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  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  (McDonald et al., 1995). Cualquier limitación en el suministro de P se reflejará en un deterioro generalizado de las funciones del cuerpo (McDowell, 1992).

La disponibilidad de P para los microorganismos del rumen es también importante y la síntesis de proteína microbiana en el rumen se puede ver afectada cuando los animales se alimentan con dietas deficientes en P (Witt y Owens, 1989; Ternouth, 1990; Spiekers et al., 1993). Una deficiencia de fósforo dietético se puede manifestar en una reducción en el consumo de

alimento y en la digestibilidad de la materia seca (Bass et al., 1981).

## EL FÓSFORO EN LOS RUMIANTES

El fósforo es el segundo mineral en abundancia presente en el cuerpo del animal (Ternouth, 1990). Constituye cerca de 1% del peso corporal y cerca de 80 a 85% del P en el cuerpo se encuentra en los huesos y dientes (Maynard y Looslie, 1979; Horst, 1986; Ternouth, 1990; Breves y Schroder, 1991; McDowell, 1992; Soares, 1995; Beede y Davidson, 1999; NRC, 2001), dependiendo de la edad, del estado nutricional y de la especie (Maynard y Looslie, 1979; Soares, 1995). El plasma sanguíneo de animales en crecimiento contiene normalmente entre 4 a 6 mg de P/dl. Aproximadamente de 1 a 2 g de P circula como P inorgánico en el plasma sanguíneo de un animal de 600 kg. Debido a que los eritrocitos presentan una mayor concentración de P, la sangre íntegra contiene de 6 a 8 veces mayor concentración que el plasma. Cerca de 5 a 8 g están presentes en el reservorio extracelular de una vaca de 600 kg. La concentración intracelular de P es cerca de 78 mg/dl y el P intracelular total es cerca de 155 g en una vaca de 600 kg (McDowell, 1992).



**Figura 1.** Representación esquemática del metabolismo de fósforo en el rumiante. Los compartimentos son el rumen (1), intestino delgado (2), intestino grueso (3) y fluido extracelular (4). Adaptado de Kebread et al. (2004).

## HOMEOSTASIS DEL FÓSFORO

El fósforo se encuentra en diferentes formas y en diferentes compartimentos del cuerpo. Kebread et al. (2004) desarrolló un modelo para describir el metabolismo del P en rumiantes (Figura 1). El modelo consiste de 10 componentes, representando los reservorios de P en el rumen, intestino delgado, intestino grueso, sangre y saliva.

El control hormonal de la homeostasis del P es secundario al de Ca (Breves y Schroder, 1991). Esto quiere decir, que varias de las hormonas implicadas en el control del metabolismo de Ca afectan la absorción y secreción de P en el tracto digestivo y la excreción de P en la orina (Scott, 1988). La concentración de Ca en la sangre se controla de manera precisa para regular la actividad neuro-muscular, mientras que la concentración de P plasmático puede variar considerablemente sin afectar gravemente la actividad metabólica o neuro-muscular en el corto plazo (McDowell, 1992). Representando el mayor reservorio de P en el cuerpo, el hueso no es un depósito estático de minerales que sirven sólo una función estructural, sino que es un sistema dinámico (McDowell, 1992; Vitti et al., 2000). Los huesos sirven como un depósito de Ca y P, y ambos se pueden movilizar cuándo el suministro dietético no es suficiente para satisfacer los requerimientos (Call et al., 1986). Así, el metabolismo mineral de hueso implica no sólo la acreción de Ca y P durante el crecimiento, sino también su intercambio continuo entre el hueso y la sangre (Liesegang et al., 2003).

### Hormona paratiroidea o parathormona (PTH)

La hormona paratiroidea (PTH) es secreta por las glándulas paratiroideas. Cualquier disminución en la concentración de Ca en la sangre causa que las glándulas paratiroideas secreten PTH. En un lapso corto de tiempo, la PTH aumenta la reabsorción renal de Ca en el filtro glomerular y aumenta la excreción de P. Si la necesidad de Ca en el plasma es poca, el nivel de calcio plasmático regresa a la normalidad y la secreción de PTH se estabiliza en los niveles también normales. Sin embargo, si el desequilibrio de Ca es grande, la continua secreción de PTH estimula la movilización de Ca y P almacenado en el hueso (Horst, 1986; Scott, 1988; Horst et al., 1997).

### Calcitonina (CT)

La calcitonin se puede considerar que tiene el efecto contrario a la PTH, ya que estimula la deposición de minerales en el hueso. Es secretada por la glándula tiroides en respuesta a concentraciones altas de Ca en la sangre y estimula la transferencia de Ca y P de la sangre al hueso. La hormona disminuye la absorción de Ca y P en el tracto gastrointestinal, estimula la secreción de P en saliva pero reduce la secreción de Ca (Matsui et al., 1984; Scott, 1988).

### 1,25 dihidroxicolecalciferol (1,25(OH)<sub>2</sub>D<sub>3</sub>)

La hormona 1,25(OH)<sub>2</sub>D<sub>3</sub> es secretada en respuesta a niveles altos de PTH o concentraciones bajas de P en el plasma sanguíneo. La hormona aumenta la absorción tanto de Ca como de P a través de la pared gastrointestinal y junto con la PTH, estimulan la reabsorción o movilización de Ca y P del hueso. En otras palabras, tiene la función de aumentar los niveles de Ca y P en la sangre (Horst, 1986; Scott, 1988; Ternouth, 1990; Horst et al., 1997).

## SECRECIÓN SALIVAL DE FÓSFORO EN RUMIANTES

Los rumiantes producen grandes cantidades de saliva por la acción de comer y rumiar. En la literatura se reportan valores de 12,9 a 14,9 l/kg de MS consumida (Cassida y Stokes, 1986); 3,52 a 4,43 l/h (Jacques et al., 1989); y 239 ± 17 l/d (Maekawa et al., 2002). La secreción de P salival durante la rumia puede representar la mayor fuente de P que llega al rumen (Cohen, 1980; McDowell, 1992; Valk et al., 2002). La concentración de P en saliva se relaciona con la concentración de P plasmático (Valk et al., 2002; Valk y Beynen, 2003). La concentración varía inversamente con la tasa de flujo de saliva para mantener así una producción diaria constante de P salival (Cohen, 1980). La cantidad de P salival es el producto de la producción

de saliva y el contenido de P en la misma. Según Valk et al. (2002), con consumos de MS y producciones de leche semejantes, diferentes niveles de consumo de P pueden resultar en diferentes concentraciones de P en saliva y excreciones de P endógeno fecal. La concentración de P en saliva puede ser 4 a 5 veces mayor que en el plasma sanguíneo (Cohen, 1980). En vacas, entre 30 a 90 g de P se secretan diariamente en la saliva (Goff, 1999), como P inorgánico en su mayoría (Cohen, 1980; Care, 1994).

El P inorgánico en la saliva tiene dos funciones importantes. Primero, actúa como un buffer o amortiguador contra depresiones grandes de pH como resultado de la producción de ácidos orgánicos, y segundo, proporciona niveles adecuados de P para los microorganismos de rumen. El retículo-rumen tiene concentraciones relativamente altas de P (200 a 600 mg/l), del cual 50 a 75% es secretada de manera endógena en la saliva (Ternouth, 1990; Care, 1994). Debido a que la eficiencia de absorción del P salival es alta (70 a 80%) el rumiante es capaz de reciclar el P eficientemente vía saliva (Challa et al., 1989).

### EXCRECIÓN DE FÓSFORO EN LAS HECES

En rumiantes, típicamente de 95 a 98% de la excreción total de P se da en las heces (Horst, 1986; NRC, 2001; Bravo et al., 2003). El P fecal se puede clasificar en las siguientes tres fracciones: 1) P de origen dietético, no disponible para absorción; 2) P de origen endógeno, una fracción que puede considerarse como pérdidas inevitables; y 3) P de origen dietético y endógeno, excretado como resultado de la homeostasis del P o eliminación del P en exceso (Spiekers et al., 1993; Knowlton et al., 2001; NRC, 2001; Bravo et al., 2003).

Diversas investigaciones han determinado que la excreción fecal de P está relacionada con su consumo (Dayrell y Ivan, 1989; Sansnon et al., 1990; Van Horn et al., 1991; Spiekers et al., 1993; Wu et al., 2000; Weiss y Wyatt, 2004; Ekelund et al., 2005). Weiss y Wyatt (2004) mostraron que la excreción fecal de P aumentada linealmente conforme el consumo de este mineral aumenta. Los autores utilizaron los datos de 8 experimentos que incluían 162 vacas y derivaron las siguientes dos ecuaciones que relacionan el consumo de P con la excreción de P fecal en vacas lecheras:

$$P \text{ fecal} = - 2.5 + (0.64 * \text{consumo de P})$$

$$P \text{ fecal} = 7.5 + (0.78 * \text{consumo de P}) - (0.702 * \text{producción láctea})$$

donde la unidad es g/d para el consume de P y P fecal y kg/d para producción láctea.

Wu et al. (2000) reportaron también una relación lineal entre el P consumido y el excretado en las heces. La ecuación obtenida es la siguiente:

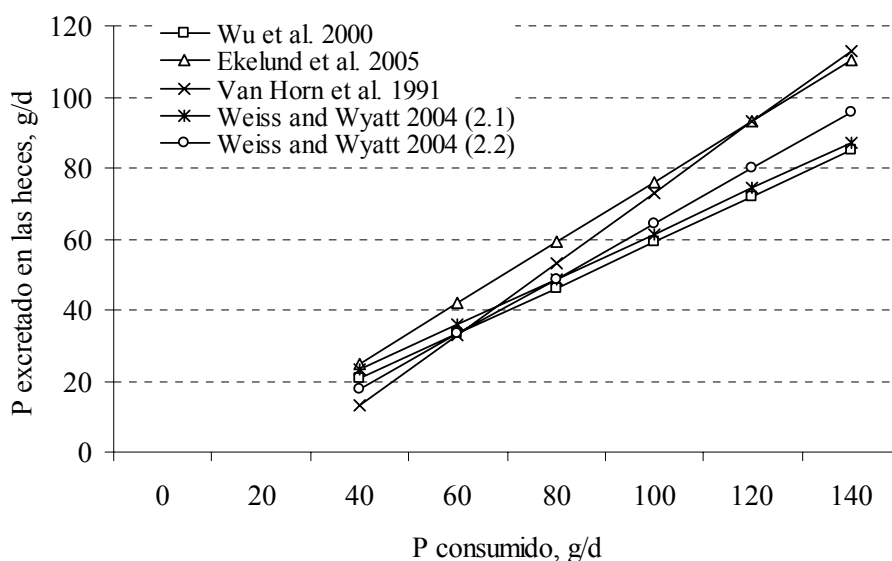
$$P \text{ fecal} = 0.643 * \text{consumo de P} - 5.2$$

donde la unidad es g/d tanto para el P fecal y como para el consumo de P.

Van Horn et al. (1991) propusieron que la excreción de P (g/d) se podía calcular como el P consumido menos el P secretado en la leche, el cual se puede calcular a partir de la producción láctea (kg/d) y el contenido de P en la leche (0.9 g/kg).

$$\text{Excreción de P} = P \text{ consumido} - (\text{leche} * 0.9)$$

La Figura 2 ilustra la relación entre el P excretado y el P consumido para una vaca produciendo 30 kg/d de leche, utilizando las ecuaciones anteriores.



**Figura 2.** Relación entre el fósforo total consumido y el excretado en vacas lecheras.

### EXCRECIÓN DE FÓSFORO EN LA ORINA

Los rumiantes generalmente excretan cantidades insignificantes de P en la orina, pero a menudo muestran una considerable variación. Manston y Vagg (1970) reportaron que la concentración de P en la orina en vacas lecheras fue menor de 10 mg/l, pero con un rango que oscila entre 1,0 y 2120 mg/l, sin ninguna tendencia asociada con el nivel de P dietético. Ekelund et al. (2006) reportaron un promedio de 12,6 mg de P/l. Asumiendo un volumen diario de orina de 30 litros, la excreción de P será generalmente menor a 1,0 g/d. El NRC (2001) estima 1,2 g/d para una vaca que pesa 600 kg.

### EL FÓSFORO Y EL DESEMPEÑO REPRODUCTIVO DE LOS ANIMALES

El fósforo ha sido utilizado por productores para mejorar el desempeño reproductivo de los animales. Algunos signos de bajo desempeño reproductivo en vacas lecheras como consecuencia de dietas deficientes en P incluyen actividad ovárica disminuida, bajas tasas de concepción y bajas tasas de preñez (Ternouth, 1990). Sin embargo, el bajo desempeño reproductivo ha sido raramente atribuido a la deficiencia de P y la relación a menudo ha sido confundida con una deficiencia en el consumo de MS u otros nutrientes.

Estudios recientes no han mostrado cambio alguno en el desempeño reproductivo de vacas lecheras cuando se varió el contenido de P en la dieta. Wu y Satter (2000) resumieron 8 estudios que incluían 785 observaciones y no encontraron diferencias en el desempeño reproductivo de los animales entre tratamientos al incrementar los niveles de P de 0,32 a 0,40% y de 0,39 a 0,61% (Cuadro 1). Valk y Ebek (1999) alimentaron vacas con niveles de 0,24, 0,28, o 0,33% de P por 2 años y tampoco encontraron diferencias significativas en el desempeño reproductivo.

**Cuadro 1.** Desempeño reproductivo de vacas lecheras alimentadas con diferentes niveles de fósforo.

Referencia	Vacas	P en la dieta (%)	Días al 1 <sup>er</sup> celo	Días al 1 <sup>er</sup> servicio	Días abiertos	Serv./ Conce pt.	Tasa de preñez (%)
De Boer et al., 1981	8	0.51	54.4	74.1	80.6	1.0	66.7
	11	0.34	44.7	66.1	74.4	1.5	72.7
	11	0.69	32.0	62.2	72.9	1.5	72.7

Call et al., 1986	12	0.24	45.0	77.0	82.0	1.3	92.0
	7	0.32	66.0	91.0	135.0	1.9	87.0
	10	0.42	50.0	72.0	87.0	1.5	76.0
Brintrup et al., 1993	26	0.33	-	47.0	109.0	2.3	-
	26	0.39	-	55.0	99.0	2.1	-
Wu and Satter, 2000	24	0.35	51.3	74.3	112.4	2.4	87.5
	24	0.45	42.5	75.5	120.1	2.6	79.2

Adaptado de Chase (1998).

## PRODUCCIÓN LÁCTEA Y SECRECIÓN DE FÓSFORO EN LA LECHE

Estudios recientes reportan rendimientos semejantes de leche cuando las vacas se alimentan con cantidades diferentes de P (Cuadro 2). Wu et al. (2000) no encontraron diferencias en la producción de leche durante la lactancia completa entre vacas que se alimentaron con dietas que contenían 0,40 y 0,49% de P. Igualmente, Ekelund et al. (2006) reportaron producciones similares de leche en vacas que fueron alimentadas con dietas que contenían 0,32 ó 0,43% de P. Steevens et al. (1971) alimentaron vacas con dietas de 0,37, 0,55 y 0,57% de P, obteniendo rendimientos de leche similares durante las primeras 24 semanas de lactancia. Brintrup et al. (1993) utilizaron dietas que contenían 0,33 y 0,39% de P durante 2 años, y ambos grupos de vacas produjeron aproximadamente 7500 kg de leche por año. Wu et al. (2001) alimentaron 37 vacas con 0,31 ó 0,39% de P durante 2 ó 3 años y no observaron diferencias en los rendimientos de leche o en el potencial de producción. Wu y Satter (2000) concluyeron que el reducir el nivel de P en la dieta de 48 a 38% no afectó la producción de leche en un experimento que se llevó a cabo por 2 años con 30 vacas. Finalmente, al alimentar vacas con dietas que contenían 0,33 ó 0,42% de P, Wu et al. (2003) no observaron diferencias en la producción láctea ni en la composición de la leche.

**Cuadro 2.** Producción y composición de la leche de vacas alimentadas con diferentes niveles de fósforo.

Referencia	P en la dieta (%)	Consumo MS (kg/d)	Leche (kg/d)	Grasa (%)	Proteína (%)
DeBoer et al., 1981	0.34	45.2	61.7	3.67	3.15 <sup>a</sup>
	0.51	45.4	59.9	3.69	3.26 <sup>b</sup>
	0.69	47.8	60.3	3.66	3.37 <sup>c</sup>
Call et al.; 1987	0.24	-	17.3	-	-
	0.32	-	22.2	-	-
	0.42	-	21.2	-	-
Brintrup et al., 1993	0.33	18.1	25.4	4.38	3.21
	0.39	17.4	24.5	4.21	3.27
Wu and Satter, 2000	0.35	45.5	69.7	3.41	3.05
	0.45	44.9	64.9	3.61	3.17

<sup>a,b,c</sup>Medias en la misma columna con diferente letra difieren significativamente ( $P < 0.05$ ).

Adaptado de Chase (1998).

El contenido de P en la leche es relativamente constante. Brintrup et al. (1993) y Wu et al.



(2001) reportaron un contenido promedio de P en la leche de 0,90 g/kg, mientras que Ekelund et al. (2006) reportaron 0,94 g/kg. En términos generales, la concentración P en la leche parece estar en 0,09% (Harris et al., 1990; NRC, 2001; CAST, 2002; Dou et al., 2002; Kowlton y Herbain, 2000).

## DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO EN LOS ALIMENTOS

Es importante comprender que el contenido total de un mineral en un ingrediente particular o en una ración completa tiene poco significado a menos que se determine su disponibilidad biológica. Ningún elemento se absorbe o se utiliza en su totalidad y alguna cantidad siempre se pierde en los procesos digestivos y metabólicos. Antes de que un nutriente esencial puede tener valor nutricional, debe estar en una forma tal que pueda ser digerido, absorbido y transportado a la parte del cuerpo donde se le pueda utilizar (Peeler, 1972). El NRC (1989) utilizó un solo valor de la disponibilidad de P para todos los alimentos. La edición del NRC 2001 propone valores separados para diferentes tipos de alimentos, incluyendo 64% para forrajes, 70% para granos y 90% para el fosfato monosódico. La absorción de P en la vaca lechera se ve afectado por varios factores, entre ellos están el tipo de ración, la forma química del elemento, la proporción Ca:P 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, hierro, aluminio, manganeso, magnesio y potasio, pueden tener también algún efecto (Peeler, 1972; McDowell, 1992; Soares, 1995; Chase, 1998). Dayrell y Ivan (1989) informaron coeficientes de absorción verdadera de 75,1, 67,3 y 48,1% de P en ovejas que se alimentaron con ensilaje de maíz sólo, ensilaje de maíz suplementado con fosfato dicálcico, o con ensilaje de maíz suplementado con roca fosfórica, respectivamente. Martz et al. (1990) reportaron valores de absorción verdadera en vacas lactantes de 74,6 y 64,4% para el ensilaje de alfalfa más ensilaje de maíz, y alfalfa sola, respectivamente. Martz et al. (1999) reportaron también que la absorción verdadera de P en ensilaje de maíz varió entre 84 a 94% en vacas lecheras, preñadas no lactantes y que incrementar el contenido de P en la dieta resultó en un aumento en el P absorbido lo mismo que en el P excretado. Ternouth y Coates (1997) reportaron niveles de absorción de P de 73,7, 76,6 y 83,9% para novillas de carne en preñez tardía, lactancia temprana y lactancia tardía, respectivamente. La eficiencia de absorción del P debe ser máxima en animales con demandas altas y que consumen dietas con niveles de P bajos o moderados (Vitti et al., 2000).

## FÓSFORO FÍTICO

El ácido fítico (myo-inositol 1-6 hexakisfosfato) puede representar de 65 a 85% del P total en granos (Reddy et al., 1982, citado por Kincaid et al. (2005). Los microorganismos del rumen poseen la habilidad de hidrolizar el fosfato fítico como resultado de la actividad de la fitasa (McDowell, 1992; Yanke et al., 1999). Cuando la proporción de P fítico es menor del 50% del suministro de P total, cerca del 90% del P fítico se hidroliza en el rumen (Yanke et al., 1999). Nelson et al. (1976) reportaron que el P fítico en la dieta fue prácticamente digerido por terneros y novillos. Similarmente, Clark et al. (1986) informaron que 98% del P fítico en la dieta fue digerido en vacas lecheras. Morse et al. (1992a) realizaron un estudio con vacas lecheras y ocho concentrados que contenían de 32 a 81% del P total en la forma fítica. Los resultados mostraron que más de 90% del P fítico se hidrolizó *in vitro* y la digestibilidad *in vivo* en el tracto digestivo total fue superior al 94%.

## FUENTES DE FÓSFORO

El fósforo está presente en todos los ingredientes o alimentos comunes (Cuadro 3). Sin embargo, hay una variación considerable en el contenido verdadero de P dentro de los diferentes tipos de forrajes y concentrados ofrecidos a los animales. Kertz (1998) informó que el coeficiente la variación en el contenido P en forrajes puede oscilar entre un 20 y 30%.

**Cuadro 3.** Contenido de fósforo en algunos ingredientes utilizados en la alimentación de vacas lecheras.

Ingrediente	Muestras	Promedio (%)	D.E	Rango
Heno de leguminosa	5514	0.25	0.05	0.20-0.30
Ensilaje de leguminosa	3705	0.31	0.06	0.25-0.37
Heno de pasto	1903	0.23	0.06	0.17-0.29
Ensilaje de pasto	2168	0.28	0.07	0.21-0.35
Ensilaje de maíz	15507	0.22	0.03	0.19-0.25
Subproductos de panadería	78	0.34	0.22	0.12-0.56
Cebada	124	0.40	0.06	0.34-0.46
Harina de sangre	8	0.35	0.24	0.11-0.59
Citro pulpa	33	0.12	-	-
Maíz	351	0.29	0.06	0.23-0.35
Semilla de algodón	189	0.60	0.09	0.51-0.69
Granos de destilería	111	0.84	0.14	0.70-0.98
Melaza de caña	17	0.97	1.22	-
Harina de carne y hueso	25	4.91	0.70	4.14-5.68
Harina de soya	147	0.71	0.07	0.64-0.78

Adaptado de Chase (1998).

La leche, granos, productos de harina de pescado y carne que contienen hueso, son buenas fuentes de P y generalmente el contenido de P en henos y pajas es bajo. Algunos estudios sugieren que una proporción uniformemente alta (64 a 86%) del P presente en forrajes secos o frescos es absorbible (Martz et al., 1990; Ternouth, 1990). Los cereales contienen cantidades relativamente uniformes de P y oscila entre 0,27 a 0,43%. Las fuentes vegetales de proteína contienen aún más P, pudiendo variar entre 0,5 a 1,2%. Sin embargo, la mayor parte del P (50 a 80%) en granos se encuentra como ácido fítico (Chase, 1998).

### REQUERIMIENTOS DE FÓSFORO PARA GANADO DE LECHE

Los requerimientos de P de vacas lactantes se estiman utilizando un enfoque factorial. En el NRC (2001), los requerimientos se calculan como la suma del P absorbido utilizado para mantenimiento, lactación, crecimiento y gestación. El P absorbido se divide luego por un coeficiente de absorción intestinal del P dietético para estimar la necesidad de P en la dieta. El NRC (2001) utiliza un 64% para forrajes, 70% para concentrados y 75 a 90% para suplementos minerales, como los coeficientes de la absorción.

El NRC (2001) calcula el requerimiento de P para mantenimiento como 1,0 g/kg de materia seca (MS) más una cantidad insignificante para recuperar la pérdida de P en la orina (0,002 g/kg de peso corporal). Esto difiere del NRC (1989), en el cuál el peso vivo del animal se utilizaba para calcular el requerimiento para mantenimiento. El cambio fue hecho como resultado de la investigación por Spiekers et al. (1993), quien demostró que la excreción de P fecal endógena está en función del consumo de materia seca (MS) más que en función del peso corporal.

El requerimiento de P para lactancia se calcula como 0,9 g/kg de leche, sin importar el contenido de la grasa o proteína. El requerimiento para crecimiento se calcula utilizando una ecuación alométrica y solamente se aplica a animales en crecimiento. El requerimiento de P para gestación es significativo únicamente durante el último trimestre de la gestación. El 2001 NRC utiliza una ecuación exponencial para calcular el requerimiento de P de acuerdo a los días de gestación, con valores obtenidos que oscilan entre 1,9 g/d para 190 días hasta 5,4 g/d para 280 días de preñez. La cantidad de P absorbible requerido para gestación durante los últimos 60 días de preñez es de 2,5 g/d como promedio.

El NRC 2001 ha reducido las cantidades recomendadas de P cuando se compara con el NRC anterior (1989). Wu et al. (2001) indicaron que el cambio está bien justificado y que de seguir

con estos lineamientos, la excreción P se puede reducir entre un 25 a 30%. En otro estudio, Wu et al. (2003) reportaron que al reducir la concentración de P en la dieta de 0,42 a 0,33%, se obtuvo una reducción del P excretado. Esto es consecuente con un estudio de Morse et al. (1992b) quienes obtuvieron una reducción de 22,7% del P fecal cuando el contenido de P en la dieta se redujo de 0,41 a 0,31% en vacas lecheras.

**Cuadro 4.** Requerimientos de fósforo de vacas lecheras con diferentes niveles de producción y consumos de MS<sup>1</sup>.

Producción láctea (kg/d)	Consumo de MS (kg/d)	Requerimiento de P	
		Absorbible, g/d	En la dieta, % <sup>2</sup>
8	15.0	22.2	0.21
10	15.6	26.6	0.23
12	16.3	27.1	0.24
14	16.9	29.5	0.25
16	17.6	32.0	0.26
18	18.2	34.4	0.27
20	18.9	36.9	0.28
22	19.5	39.3	0.29
24	20.2	41.8	0.30
26	20.8	44.2	0.30
28	21.5	46.7	0.31
30	22.2	49.2	0.32
32	22.8	51.6	0.32
34	23.5	54.1	0.33
36	24.1	56.5	0.33
38	24.8	59.0	0.34
40	25.4	61.4	0.35
45	27.1	67.6	0.36
50	28.7	73.7	0.37

<sup>1</sup>Calculado con base en el NRC (2001).

<sup>2</sup>Calculado utilizando un 70% de disponibilidad.

## LITERATURA CITADA

1. Bass, J. M., G. Fishwick, R. G. Hemingway, J. J. Parkins, and N. S. Ritchie. 1981. The effects of supplementary phosphorus on voluntary consumption and digestibility of a low phosphorus straw-based diet given to beef cows during pregnancy and early lactation. *J. Agric. Sci. (Camb)*. 97:365-372.
2. Beede, D. K. and J. A. Davidson. 1999. Phosphorus: Nutritional management for Y2K and beyond. *Proc. Tri-State Dairy Nutr. Conf.* Fort Wayne, IN. pp.50-97.
3. Bravo, D., D. Sauvant, C. Bogaert, and F. Meschy. 2003. Quantitative aspects of phosphorus excretion in ruminants. *Reprod. Nutr. Dev.* 43:285-300.
4. Breves, G. and B. Schroder. 1991. Comparative aspects of gastrointestinal phosphorus metabolism. *Nut. Research Rev.* 4:125-140.
5. Brintrup, R., T. Mooren, U. Meyer, H. Spiekers, and E. Pfeffer. 1993. Effects of two levels of phosphorus intake on performance and faecal phosphorus excretion of dairy cows. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 69:29-36.
6. Call, J. W., J. E. Butcher, J. L. Shupe, J. T. Blake, and A. E. Olson. 1986. Dietary phosphorus for beef cows. *Am. J. Vet. Res.* 47:475-481.
7. Care, A. D. 1994. The absorption of phosphorus from the digestive tract of ruminant animals. *Br. Vet. J.* 150:197-205.
8. Cassida, K. A., and M. R. Stokes. 1986. Eating and resting salivation in early lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 69: 1282-1292.
9. Challa, J. W., G. D. Braithwaite, and M. S. Dhanoa. 1989. Phosphorus homeostasis in growing calves. *J. Agric. Sci. (Camb.)*. 112:217-226.
10. Chase, L. E. 1998. Phosphorus in dairy cattle nutrition. Pages 212-223. *in Proc. Cornell Nutr. Conf. For Feed Manufacturers*, Ithaca, N.Y.

11. Clark, W. D., K. E. Wohlt, R. L. Gilbreath, and P. K. Zajac. 1986. Phytate phosphorus intake and disappearance in the gastrointestinal tract of high producing dairy cows. *J. Dairy Sci.* 69: 3151-3155.
12. Cohen, R. D. 1980. Phosphorus in rangeland ruminant nutrition: a review. *Liv. Prod. Sci.* 7:25-37.
13. Council for Agricultural Science and Technology (CAST). 2002. Animal diet modification to decrease the potential for nitrogen and phosphorus pollution. Issue Paper 21. Council for Agricultural Science and Technology, Ames, Iowa. U.S.A.
14. Dayrell, M. and M. Ivan. 1989. True absorption of phosphorus in sheep fed corn silage and corn silage supplemented with dicalcium or rock phosphate. *Can. J. anim. Sci.* 69:181-186.
15. Dou, Z.; K. F. Knowlton; R. A. Kohn; Z. Wu; L. D. Satter; G. Zhang, J. D. TOTH, and J. D. Ferguson. 2002. Phosphorus characteristics of dairy feces affected by diets. *J. Environ. Qual.* 31:2058-2065.
16. Eghball, B. 2003. Leaching of phosphorus fractions following manure or compost application. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34:2803-2815.
17. Ekelund, A., R. Sporndly, K. Holtenius. 2006. Influence of low phosphorus intake during early lactation on apparent digestibility of phosphorus and bone metabolism in dairy cows. *Livestock Sci.* 99:227-236.
18. Goff, J. P. 1999. Treatment of calcium, phosphorus, and magnesium balance disorders. *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Prac.* 15:619-639.
19. Harris, B., D. Morse, H. Head, H. Van Horn. 1990. Phosphorus nutrition and excretion by dairy animals. Circular 849. University of Florida, Cooperative Extension Service. Institute of Food and Agricultural Sciences. U.S.A. 14 p.
20. Horst, R. L. 1986. Regulation of calcium and phosphorus homeostasis in the dairy cow. *J. Dairy Sci.* 69:604-616.
21. Horst, R. L., J. P. Goff, T. A. Reinhardt, and D. R. Buxton. 1997. Strategies for preventing milk fever in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 80:1269-1280.
22. Jacques, K., D. L. Harmon, W. J. Croom, Jr., and W. M. Hagler, Jr. 1989. Estimating salivary flow and ruminal water balance of intake, diet, feeding pattern, and slaframine. *J. Dairy Sci.* 72:443-452.
23. Kebreab, E., J. A. Mills, L. A. Crompton, A. Bannink, J. Dijkstra, W. J. Gerrits, and J. France. 2004. An integrated mathematical model to evaluate nutrient partitioning in dairy cattle between the animal and its environment. *Anim. Feed Sci. Technol.* 112:131-154.
24. Kertz, A. F. 1998. Variability in delivery of nutrients to lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81:3075-3084.
25. Kincaid, R. L., D. K. Garikipati, T. D. Nennich, and J. H. Harrison. 2005. Effect of grain source and exogenous phytase on phosphorus digestibility in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 88:2893-2902.
26. Knowlton, K. F. and J. H. Herbein. 2000. Phosphorus partitioning during early lactation in dairy cows fed diets varying in phosphorus content. *J. Dairy Sci.* 85:1227-1236.
27. Knowlton, K. F., J. H. Herbein, M. A. Meister-Weisbarth, and W. A. Wark. 2001. Nitrogen and phosphorus partitioning in lactating Holstein cows fed different sources of dietary protein and phosphorus. *J. Dairy Sci.* 84:1210-1217.
28. Liesegang, A., M. L. Sassi, and J. Risteli. 2003. Diurnal variation in concentration of various markers of bone metabolism in growing female goats and sheep. *Animal Sci.* 77:197-203.
29. Maekawa, M., K. A. Beauchemin, and D. A. Christensen. 2002. Effect of concentrate level and feeding management on chewing activities, saliva production, and ruminal pH of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 85:1165-1175.
30. Manston, R. and M. J. Vagg. 1970. Urinary phosphate excretion in the dairy cow. *J. Agric. Sci. (Camb).* 74:161-167.
31. Martz, F. A., A. T. Belo, M. F. Weiss, and R. L. Belyea. 1999. True absorption of calcium and phosphorus from corn silage fed to nonlactating, pregnant dairy cows. *J. Dairy Sci.* 82:618-622.

32. Martz, F. A., A. T. Belo, M. F. Weiss, R. L. Belyea, and J. P. Goff. 1990. True absorption of calcium and phosphorus from alfalfa and corn silage when fed to lactating cows. *J. Dairy Sci.* 73:1288-1295.
33. Matsui, T., Y. Kanagawa, H. Yano, and R. Kawashima. 1984. Effect of calcitonin on salivary phosphorus and calcium excretion in sheep. *J. Endocrinol.* 102:365-368.
34. Maynard, L. and Looslie, J. 1979. *Animal nutrition*. 7<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, Inc. New York, U.S.A.
35. McDonald, P., R. A. Edwards, J. F. Greenhalgh, and C. A. Morgan. 1995. *Animal Nutrition*. 5<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, Inc., N.Y.
36. McDowell, L. R. 1992. *Minerals in Animal and Human Nutrition*. Academic Press, Inc., San Diego, CA.
37. McDowell, R. and L. Condron. 2001. Influence of soil constituents on soil phosphorus sorption and desorption. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32:2531-2547.
38. Morse, D., H. H. Head, and C. J. Wilcox. 1992a. Disappearance of phosphorus in phytate from concentrates in vitro and from rations fed to lactating cows. *J. Dairy Sci.* 75: 1979-1986.
39. Morse, D., H. H. Head, C. J. Wilcox, H. H. Van Horn, C. D. Hinsén, and B. Harris. 1992b. Effects of concentration of dietary phosphorus on amount and route of excretion. *Journal of Dairy Science* 75: 3039-3049.
40. National Research Council (NRC). 1989. *Nutrient requirements of dairy cattle*. 6<sup>th</sup> rev. ed. Natl. Acad. Sci., Washington, DC.
41. National Research Council (NRC). 2001. *Nutrient requirements of dairy cattle*. 7<sup>th</sup> rev. ed. Natl. Acad. Sci., Washington, DC.
42. Nelson, T. S., L. B. Daniels, J. R. Hall, and L. G. Shields. 1976. Hydrolysis of natural phytate phosphorus in the digestive tract of calves. *J. Anim. Sci.* 42: 1509-1515.
43. Peeler, H. T. 1972. Biological availability of nutrients in feeds: availability of major mineral ions. *J. Anim. Sci.* 35:695-712.
44. Sanson, D. W., G. L. Walker, D. C. Clanton, and K. M. Eskridge. 1990. Relationship between phosphorus intake and blood or fecal phosphorus in gestating cows. *J. Range Management*. 43:238-241.
45. Scott, D. 1988. Control of phosphorus balance in ruminants. Pages 156-174 *in* Aspects of digestive physiology in ruminants: Proceedings of a Satellite Symposium of the 30<sup>th</sup> International Congress of the International Union of Physiological Sciences. Cornell University, July 21-23, 1986. A. Dobson, and M. J. Dobson, ed. Comstock Publishing associates, Ithaca, new York.
46. Sharpley, A. and D. Beegle. 2001. *Managing phosphorus for agriculture and the environment*. Penn State University, College of Agricultural Sciences. Agricultural Research and Cooperative Extension. U.S.A.
47. Sharpley, A. N., O. R. Jones, W. A. Berg, and G. A. Coleman. 1992. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *J. Environ. Qual.* 21:30-35.
48. Sharpley, A. N., S. C. Chapra, R. Wedepohl, J. T. Sims, and T. C. Daniel. 1994. *Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options*. *J. Environ. Qual.* 23:437-451.
49. Soares, J. H. 1995. Phosphorus bioavailability. Pp 257-294. *In* Bioavailability of nutrients for animals. Academic Press.
50. Spiekens, H., R. Brintrup, M. Balmelli, and E. Pfeffer. 1993. Influence of dry matter intake on faecal phosphorus losses in dairy cows fed rations low in phosphorus. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* 69:37-43.
51. Steevens, B. J., L. J. Bush, J. D. Scott, and E. I. Williams. 1971. Effect of varying amounts of calcium and phosphorus in rations for dairy cows. *J. Dairy Sci.* 54:655-661.
52. Ternouth, J. H. 1990. Phosphorus and beef production in northern Australia. 3. Phosphorus in cattle-a review. *Tropical Grasslands.* 24:159-169.
53. Ternouth, J. H. and D. B. Coates. 1997. Phosphorus homeostasis in grazing breeder cattle. *J. Agric. Sci. (Camb).* 128-331-337.
54. Valk, H. and A. C. Beynen. 2003. Proposal for the assessment of phosphorus requirements of dairy cows. *Liv. Prod. Sci.* 79:267-272.

55. Valk, H., L. B. Sebek, and A. C. Beynen. 2002. Influence of phosphorus intake on excretion and blood plasma and saliva concentrations of phosphorous in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 85: 2642-2649.
56. Valk, H.; and L. B. Ebek. 1999. Influence of prolonged feeding of limited amounts of phosphorus on dry matter intake, milk production, reproduction and body weight of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 82:2157-2163.
57. Van Horn, H.; G. Newton, R. Nordstedt, E. French, G. Kidder, D. Graetz, and C. Chambliss. 1991. Dairy manure management: Strategies for recycling nutrients to recover fertilizer value and avoid environmental pollution. Circular 1016. University of Florida, Cooperative Extension Service. Institute of Food and Agricultural Sciences. U.S.A.
58. Vitti, D. M., E. Kebread, J. B. Lopes, A. L. Abdalla, F. F. De Carvalhos, K. T. De Resende, L. A. Crompton, and J. France. 2000. A kinetic model of phosphorus metabolism in growing goats. *J. Anim. Sci.* 78:2706-2712.
59. Walker, F. 2000. Best management practices for phosphorus in the environment. Publication No. 1645. Agricultural Extension Service. The University of Tennessee.
60. Weiss, W. P. and Wyatt, D. J. 2004. Macromineral digestion by lactating dairy cows: estimating phosphorus excretion via manure. *Journal of Dairy Science* 87: 2158-2166.
61. Witt, K. E. and F. N. Owens. 1989. Phosphorus: Ruminant availability and effects on digestion. *J. Anim. Sci.* 56:930-937.
62. Wu, Z. and L. D. Satter. 2000. Milk production and reproductive performance of dairy cows fed two concentrations of phosphorus for two years. *J. Dairy Sci.* 83:1052-1063.
63. Wu, Z.; L. D. Satter, A. J. Blohowiak.; R. H. Stauffacher, and J. H. Wilson. 2001. Milk production, estimated phosphorus excretion and bone characteristics of dairy cows fed different amounts of phosphorus for two or three years. *J. Dairy Sci.* 84: 1738-1748.
64. Wu, Z., L. D. Satter, and R. Sojo. 2000. Milk production, reproductive performance, and fecal excretion of phosphorus by dairy cows fed three amounts of phosphorus. *J. Dairy Sci.* 83:1028-1041.
65. Wu, Z.; S. K. Tallam, V. A. Ishler, D. D. Archibald. 2003. Utilization of phosphorus in lactating cows fed varying amounts of phosphorus and forage. *J. Dairy Sci.* 86:3300-3308.
66. Yanke, L. J., L. B. Selinger, and K. J. Cheng. 1999. Phytase activity of *Selenomonas ruminantium*: a preliminary characterization. *Letters in Applied Microbiology.* 29:20-25.