

MICROMINERALES EN ALIMENTACIÓN DE MONOGÁSTRICOS. ASPECTOS TÉCNICOS Y CONSIDERACIONES LEGALES

G.G. Mateos, D. García Valencia y E. Jiménez Moreno
Departamento de Producción Animal
Universidad Politécnica de Madrid

1.-INTRODUCCIÓN

Los elementos traza son necesarios para una producción animal eficiente pero las necesidades varían en función del tipo de animal, estadio productivo y objetivos de producción. Un problema relacionado con su estudio es que la mayor parte de las investigaciones en las cuales nos basamos hoy día para recomendar niveles de inclusión fueron realizadas hace más de 30 años por lo que probablemente no sean aplicables en producción intensiva moderna con animales más productivos. Hasta hace pocos años los microminerales se añadían a las dietas para controlar deficiencias nutricionales tales como la anemia (hierro), la paraqueratosis (zinc) y el bocio (yodo). Sin embargo, trabajos publicados en los últimos años han demostrado de forma fehaciente que cantidades adicionales de ciertos elementos traza mejoran aspectos productivos distintos de los clásicos síntomas de deficiencia. A este particular, la suplementación extra de zinc y selenio mejora el estado inmunitario y la resistencia a enfermedades y la de cromo y manganeso la calidad de la canal. De gran importancia práctica es la inclusión de niveles farmacológicos de cobre y zinc para reducir problemas digestivos y mejorar el crecimiento en lechones. Como consecuencia, numerosos elementos traza son hoy día incorporados a la dieta con una finalidad distinta a la de evitar síntomas típicos de deficiencia. Por ello, los niveles de uso en piensos son superiores a lo recomendado por instituciones científicas tales como el ARC (1981), el INRA (1989) o el NRC (1998). Sin embargo, un trabajo reciente ha puesto sobre la mesa un problema de interés; en contra de criterios preestablecidos, Peters y Mahan (2004) observaron que la suplementación mineral extra en base a fuentes inorgánicas de piensos para cerdas reproductoras no solo no mejoró la productividad, sino que incluso fue contraproducente.

En los últimos diez años ha aumentado la presión legislativa para limitar la utilización de minerales y reducir la contaminación ambiental. Esta presión que afecta a numerosos países, es especialmente intensa en la Unión Europea (UE-25). Gran parte de los oligoelementos ingeridos por las diversas especies domésticas (hasta el 99 %) no es retenida y aparece en heces y orina (Mohana y Nys, 1998; Nys, 2001). La emisión de elementos traza al medio ambiente aumenta la polución, especialmente en el caso del Cu y del Zn, un problema que puede reducirse mediante la inclusión juiciosa de los minerales en la dieta (Ferket et al., 2002; Jondreville et al., 2002; Revy et al., 2003).

El objetivo de este trabajo es revisar la información disponible para conocer mejor las necesidades y el uso por el animal de las distintas fuentes minerales existentes. Una parte importante de esta información se refiere al uso de niveles farmacológicos de cobre y zinc en distintas especies, fundamentalmente lechones recién destetados. Otra parte importante trata de las interacciones existentes entre minerales y nutrientes o entre minerales entre sí reducen la absorción y utilización en condiciones prácticas. Esta puesta al día puede ayudar a modificar la composición actual de los correctores comerciales.

2.- ELEMENTOS TRAZA INCLUIDOS EN DIETAS PARA MONOGÁSTRICOS

Hierro, cobre, zinc, manganeso, selenio y yodo son normalmente añadidos en los correctores para aves, conejos y porcino. En numerosas situaciones los correctores incorporan cobalto (razonable en el caso de los conejos) y ocasionalmente se añade molibdeno (más frecuente en el caso de rumiantes y a veces pollos). El presente estudio se va a centrar en porcino y por ello ofrecemos las recomendaciones de diversos centros de investigación y desarrollo sobre la composición de los correctores microminerales para lechones (cuadro 1), cerdos en crecimiento (cuadro 2) y cerdas lactantes (cuadro 3). Así mismo, en los cuadros 4, 5 y 6 se detalla la composición media, moda y coeficiente de variación de muestras representativas de correctores para lechones, cerdos en crecimiento-cebo y cerdas reproductoras utilizados en la Península Ibérica. Los datos han sido tomados de un total de 32 premixes (28 de España y 4 de Portugal) para cada categoría de cerdos. De ellos catorce pertenecen a empresas que comercializan correctores, diez a integradores de porcino y el resto a fabricantes de venta libre de piensos. En total representan más del 55% del pienso producido en la Península Ibérica para esta especie. En general, los correctores estudiados incluyen niveles de microelementos superiores a lo recomendado por la mayoría de las instituciones y centros de investigación. Las mayores diferencias se observan para el cobre y el manganeso en cerdas y para cobalto y yodo en los tres tipos de animales. En el cuadro 7 se ofrece un estudio comparativo entre la composición actual de los correctores para porcino (Mateos et al., 2004) y la composición media de los mismos hace veinte años (Mateos, 1987). Se observa que los niveles de zinc y selenio han aumentado en las dos últimas décadas mientras que los de cobre, yodo y cobalto han disminuido.

Cuadro 1.- Recomendaciones sobre las necesidades en elementos traza (mg/kg de pienso) en lechones

	INRA 1989	NRC 1998¹	Hypor 1999	NSU 2000^{1,2}	Rostagno 2000	KSU 2003³	BSAS 2003⁴	Mateos et al., 2004
Fe	100	100	80	90-150	100	150	120	90
Cu	10	6	10	6-15	10	15	6	8
Zn	100	100	70	90-150	100	+ ⁵	100	120
Mn	40	4	40	3-30	30	36	30	40
Se	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,27	0,20	0,30
I	0,60	0,14	0,50	0,15-0,50	1,00	0,27	0,20	0,60
Co	0,30	-	0,25	-	0,20	-	0,20	-

¹ 5 a 10 kg de peso vivo. ² Nebraska y South Dakota State University.

³ Kansas State University. ⁴ 10 a 30 kg PV. ⁵ 2.700 ppm en forma de óxido de Zn como preventivo.

Cuadro 2.- Recomendaciones sobre las necesidades en elementos traza (mg/kg de pienso) en cerdos en crecimiento

	INRA 1989	KSU 1995¹	NRC 1998²	Hypor 1999	Rostagno 2000	NSU 2000³	BSAS 2003⁴	Mateos et al. 2004
Fe	80	150	60	60	100	70-150	80	75
Cu	10	15	4	10	10	4-15	6	6
Zn	100	150	60	60	100	70-150	100	110
Mn	40	36	2	30	30	3-30	30	25
Se	0,10	0,09	0,15	0,20	0,30	0,30	0,20	0,30
I	0,20	0,27	0,14	0,50	1,00	0,15-0,50	0,20	0,40
Co	0,10	-	-	0,20	0,20	-	0,20	-

¹ Kansas State University. ² 20 a 50 kg PV. ³ Nebraska y South Dakota State University. ⁴ 30 a 60 kg PV

Cuadro 3.- Recomendaciones sobre las necesidades en elementos traza (mg/kg de pienso) en cerdas lactantes

	INRA 1989	KSU 1997¹	NRC 1998	Hypor 1999	NSU 2000²	Rostagno 2000	BSAS 2003	Mateos et al., 2004
Fe	80	150	80	80	80-150	100	80	70
Cu	10	15	5	10	5-15	10	6	10
Zn	100	150	50	50	80-150	100	80	110
Mn	40	36	20	40	20-40	30	20	35
Se	0,1	0,27	0,15	0,2	0,3	0,3	0,25	0,3
I	0,6	0,27	0,14	0,75	0,15-0,5	1	0,2	0,7
Co	0,1	-	-	0,15	-	0,2	0,2	-

¹ Kansas State University. ² Nebraska y South Dakota State University

Cuadro 4.- Composición en elementos traza de los correctores para lechones fabricados en la Península Ibérica (mg/kg de pienso) (Mateos et al., 2004)

	Media ¹	Moda ¹	CV,% ¹	NRC 1998	BSAS 2003
Fe	103	100	32,9	100	120
Cu	131 ²	150 ²	36,3	6	6
Zn	123	100	39,7	100	100
Mn	51	50	15,4	4	30
Se	0,20	0,20	38,2	0,30	0,20
I	0,97	1,00	48,1	0,14	0,20
Co	0,34	0,40	60,3	-	0,20

¹ Coeficiente de variación. ² Utilizado como promotor de crecimiento.

Cuadro 5.- Composición en elementos traza de los correctores para cerdos en crecimiento-cebo utilizados en la Península Ibérica (mg/kg de pienso) (Mateos et al., 2004)

	Media	Moda ¹	CV,% ¹	NRC ² 1998	BSAS ³ 2003
Fe	94	80	35,4	60	80
Cu	99	90	46,7	4	6
Zn	109	110	29,6	60	100
Mn	46	50	18,3	2	30
Se	0,19	0,10	46,9	0,15	0,20
I	0,77	1,00	44,2	0,14	0,20
Co	0,27	0,40	61,5	-	0,20

¹ Coeficiente de variación. En el caso del Cu, se utilizaba como promotor de crecimiento.

² 20 a 50 kg. ³ 30 a 60 kg.

Cuadro 6.- Composición en elementos traza de los correctores para cerdas utilizados en la Península Ibérica (mg/kg de pienso) (Mateos et al., 2004)

	Media	Moda	CV, % ¹	NRC 1998 ²	BSAS 2003 ²
Fe	82	100	27,1	80	80
Cu	16	10	63,6	5	6
Zn	105	100	21,2	50	80
Mn	55	50	25	20	20
Se	0,22	0,2	47	0,15	0,25
I	0,95	1,00	34,9	0,14	0,20
Co	0,41	0,50	60,9	-	0,20

¹ Coeficiente de variación. ² Dietas de lactación

Cuadro 7.- Cambios en la concentración de minerales traza utilizados en los correctores de la Península Ibérica desde 1986 a 2004¹

	Lechones		Cebo		Cerdas	
	1986	2004	1986	2004	1986	2004
Fe	90	103	85	94	95	82
Cu	175	131	125	99	19	16
Zn	100	123	90	109	100	105
Mn	40	51	50	46	60	55
Se	0,18	0,20	0,16	0,19	0,19	0,22
I	1,30	0,97	1,00	0,77	0,90	0,95
Co	0,36	0,34	0,30	0,27	0,50	0,41
Vit. E	15	44	10	17	12	32

¹ 12 fuentes en el año 1986 (Mateos, 1987) y 32 fuentes en el año 2004 (Mateos et al., 2004).

2.1.- Hierro

El hierro (Fe) es el elemento traza más abundante en el organismo animal, donde aproximadamente el 60% forman parte de la hemoglobina. El Fe es preciso en reacciones bioquímicas tales como síntesis de DNA, transporte de oxígeno y metabolismo general de los nutrientes. Su capacidad para oxidarse y reducirse, hacen del Fe un elemento traza único en reacciones redox intracelulares. Una deficiencia prolongada en Fe produce anemia, pérdida del apetito, letargia, aumento del índice respiratorio y muerte del animal. La deficiencia en Fe es la deficiencia más frecuente en el hombre a nivel mundial. Sin embargo, en producción ganadera la suplementación con Fe no siempre va acompañada por una mejora de los rendimientos productivos lo que indica que, en general, el suministro es superior a las necesidades. Por ejemplo, las cerdas lactantes son muy exigentes en nutrientes pero las necesidades extras de Fe son limitadas porque la leche es pobre en Fe, debido a que este mineral no es capaz de atravesar la barrera de la glándula mamaria.

Los ingredientes vegetales utilizados en piensos comerciales contienen grandes cantidades de Fe, aunque su concentración y biodisponibilidad es muy variable dependiendo de la fuente y del tipo y grado de contaminación por tierra. Los granos de cereales contienen entre 30 y 70 ppm, las semillas de leguminosas entre 60 y 100 ppm y las harinas de oleaginosas entre 200 y 400 ppm y aún más en el caso del turtó de palmiste. Los ingredientes de origen animal, excepto los derivados lácteos son buenas fuentes de Fe (cuadro 8). Además, las fuentes de cobre, caso del sulfato, contienen cantidades variables de Cu, normalmente superiores a 25-60 ppm. La biodisponibilidad en ratas y aves del Fe de las materias primas con respecto al sulfato de hierro utilizado como patrón varía entre el 30 y el 70% para los forrajes, es algo superior para la harina de soja y los granos de cereales y aún más elevada para las

fuentes de origen animal. Las fuentes de calcio (Ca) y fósforo (P) utilizados de forma rutinaria en piensos comerciales, son ricas en Fe. Así, el NRC (1998) y FEDNA (2003) indican que el contenido en Fe varía entre 600 y 800 ppm para el carbonato cálcico y entre 1.500 y 8.000 ppm para los diversos fosfatos de calcio. Poco es sabido sobre la naturaleza de estos contaminantes ferrosos y de su disponibilidad en monogástricos. Ammerman et al. (1993) encuentran en pollos que la biodisponibilidad del Fe, en comparación con el Fe del sulfato patrón, es del 71% para el fosfato bicálcico y del 50% para el fosfato tricálcico.

Las mayores necesidades de Fe se dan en lechones jóvenes con alta capacidad de crecimiento. En estos casos, el metabolismo está acelerado por lo que se precisa más oxígeno y por tanto más Fe. El Fe interviene en el proceso de elaboración del ácido clorhídrico estomacal por lo que la deficiencia reduce la digestibilidad de las proteínas, sobre todo las de origen vegetal. Además, los tejidos del lechón recién nacido son deficientes en Fe ya que este mineral atraviesa con dificultad la barrera placentaria. Se estima que las necesidades en Fe en el lechón joven podrían estar cercanas a los 100 ppm (Rincker et. al., 2004).

Numerosos estudios han intentado mejorar el estatus de Fe del lechón mediante la suplementación de los piensos de gestación con diversas fuentes de Fe. Los resultados han sido pobres, especialmente cuando se han utilizado fuentes inorgánicas (ARC, 1981). Sin embargo, la inclusión de quelatos de Fe, bien en forma de proteínatos bien de aminoácidos, en dietas para cerdas a la dosis de 60 mg/kg ha aumentado el contenido en Fe del hígado, la formación de hemoglobina y el crecimiento de los lechones (Ashmead, 1979). Una posible explicación de estos resultados es que el Fe en forma de quelatos pasa mejor que el inorgánico las barreras placentaria y mamaria. También pudiera ocurrir que el lechón haya tenido acceso a las heces maternas ricas en Fe y pasar así, sin graves problemas la barrera digestiva. Por ello, no todos los autores están de acuerdo en la necesidad o conveniencia de suplementar con Fe orgánico las dietas para reproductoras (Fox et al., 1997).

La importancia del Fe en relación con la inmunidad empezó a estudiarse a finales de los años 1960's y principios de los 1970's y, en general, se asociaba con estados anémicos del animal. En ratas, pollos y lechones la resistencia a la infección es menor cuando reciben dietas pobres en Fe. Por ejemplo, Osborne y Davis (1968) han observado que lechones deficientes en Fe son más susceptibles a las endotoxinas producidas por *Escherichia coli* que lechones controles. Más recientemente numerosos autores han encontrado una asociación negativa entre el estatus del Fe y la incidencia de procesos infecciosos, de forma que numerosas respuestas inmunes se alteran en caso de deficiencia en Fe (Kuvibidla y Surendra, 2002). Sin embargo, el Fe también es esencial para el crecimiento bacteriano y el exceso favorece su crecimiento. Knight et al. (1983) han demostrado que una inyección de Fe redujo el índice de supervivencia de pollitos infectados en laboratorio con *Clostridium perfringens* o con *Salmonella typhimurium*. Por tanto, dosis extras de Fe por encima de las necesidades podrían estimular el crecimiento bacteriano y perjudicar el estado sanitario del animal. En situaciones prácticas,

una contaminación férrica crónica del agua de bebida podría contribuir a mantener la persistencia de infecciones en granja debido a *Escherichia coli*. En caso de infecciones insidiosas por bacterias coliformes es recomendable controlar tanto el nivel de Fe del pienso como su concentración en el agua de bebida. La concentración de Fe en plasma varía durante la respuesta inmunitaria de fase aguda que tiene lugar ante cualquier agresión. Así, Klasing (1984) observó una reducción del Fe y un aumento del Cu en plasma durante los procesos de inflamación. La reducción del nivel de Fe plasmático durante los procesos infecciosos puede ser un mecanismo defensivo del organismo que bloquea el Fe orgánico para evitar su utilización por bacterias patógenas.

Es bien conocida la interacción Cu y Fe en el sentido de que el exceso del primero reduce la absorción del segundo. Por tanto, la nueva normativa Europea (DOCE, 2003) que limita los niveles máximos de utilización de cobre en pienso va a reducir la necesidad de suplementar con Fe.

Por otra parte, el contenido en Fe del organismo animal como porcentaje del peso vivo (PV) disminuye desde los 20 hasta los 145 kg PV (Mahan y Shields, 1998), lo que indica que las necesidades de este mineral disminuyen con la edad. Por tanto, los niveles actuales de inclusión de Fe en el corrector no están justificados en cerdos en cebo y probablemente tampoco en broilers, gallinas ponedoras y conejos.

En el cuadro 8 se ofrece el contenido en Fe de diversos ingredientes de uso común en dietas para monogástricos. El valor varía en función de la fuente consultada. Para el gluten feed el rango va desde 169 ppm (CVB, 2002) a 460 ppm (NRC, 1998), a pesar de que probablemente en ambos casos el producto sea de procedencia americana. Para la harina de soja los valores varían entre 202 y 373 ppm y para el haba de soja entre 80 y 230 ppm (NRC, 1998 y CVB, 2002). Para la mandioca encontramos un rango entre 15 ppm (INRA-AFZ, 2002) y 635 ppm (CVB, 2002) e incluso 700 ppm (Ainprot, 1984). En los derivados del haba de soja, las diferencias podrían ser debidas a la distinta procedencia de los muestras analizadas; en general las habas de origen sudamericano, especialmente las brasileñas, tienen un mayor contenido en Fe que las producidas en los Estados Unidos lo que podría deberse al diferente contenido en Fe de los suelos. Para la mandioca, la variabilidad podría explicarse por el distinto nivel de contaminación con tierra de las muestras analizadas.

En el cuadro 9 se detallan valores de Fe de diversos ingredientes de uso común en piensos comerciales según análisis realizados en España. Los valores son muy dispares pero en general, no difieren en demasía de los tabulados en FEDNA (2003). Los valores FEDNA parecen infravalorar el contenido en Fe de los cereales y mandioca y supervalorar el de las harinas proteicas. Se precisan más análisis sobre el contenido en Fe de las fuentes de P y Ca utilizados en nuestro país.

Cuadro 8.- Contenido en hierro de ingredientes utilizados en fabricación de piensos (mg/kg)

	NRC 1998	INRA-AFZ 2002	CVB 2002	Ainprot 1984	FEDNA 2003
Cereales					
Maíz	29	32	29	40	35
Trigo blando	60	47	51	32	55
Cebada 2C	78	158	54	10	85
Leguminosas y semillas oleaginosas					
Guisantes	65	92	80	100	82
Altramuces	54 ¹	61 ^{2,3}	52 ²	60 ²	80 ²
Soja integral tostada	80	143	230	80	100
Harinas de oleaginosas					
Harina de girasol, 32 %	254	207	313	280	280
Harina de soja, 44 %	202	283	373	132	180
Harina de palmiste, 15%	-	534	611	190	480
Harina de colza, 34%	142	172	578	80	260
Productos de origen animal					
Harina de pescado, 66%	181 ⁴	351	359	360	300
Suero dulce, 70/12	130	10	4	10	1,5
Otras materias primas					
Gluten feed	460	218	169	300	260
Salvado de trigo	84	143	158	110	150
Mandioca, 65% almidón	18	15	635	700	280
Melaza de caña	68	188	157	60	190
Harina de alfalfa, 16%	333	312	712	210	300

¹ Altramuz blanco (*Lupinus albus*).

² Altramuz azul (*Lupinus angustifolius*).

³ 24 ppm para el *Lupinus albus*.

⁴ Harina de arenque.

Cuadro 9.- Contenido en hierro de materias primas utilizadas en la fabricación de piensos en España (mg/kg)¹

	Media	Rango	CV %	Número de muestras	FEDNA 2003
Cereales					
Maíz	17	-	-	1	30
Trigo	37	-	-	1	45
Cebada	53	46-60	19	2	80
Leguminosas y oleaginosas					
Guisantes	84	68-116	23	5	85
Altramuz blanco	49	-	-	1	38
Altramuz azul	79	49-103	33	4	75
Harinas de oleaginosas					
Harina de girasol, 32 %	227	196-282	17	5	240
Harina de soja, 44 %	173	125-247	24	9	180
Harina de palmaste, 15%	307	175-796	81	9	430
Harina de colza, 34%	238	-	-	1	230
Proteínas animales					
Harina de pescado, 70%	146	-	-	1	250
Suero dulce ²	10	8-12	18	4	10
Otros					
Gluten feed	243	100-340	42	4	220
Salvado de trigo	124	89-150	17	7	140
Mandioca	896	-	-	1	490
Melaza caña	159	-	-	1	180
Harina de alfalfa, 16%	255	110-789	88	8	300
Fosfato monocálcico ³	721	178-1475	94	3	1500
Fosfato bicálcico ³	767	269-1707	106	3	1800
Carbonato cálcico ³	742	8-1600	109	5	560
Cloruro sódico	14	12-15	16	2	13

¹ Análisis realizados por Alkemi, S.A, Labocor, S.A y Nutral, S.A.

² No se incluye en el análisis una muestra que dio 68 ppm de Fe.

³ Variabilidad alta debido al origen de las muestras (2 fuentes para el fosfato monocálcico, 2 fuentes para el fosfato bicálcico y 3 fuentes para el carbonato cálcico).

2.3.- Cobre

El cobre (Cu) es necesario para la actividad de numerosas enzimas relacionadas con el transporte y metabolismo del Fe, la formación del colágeno y el desarrollo armónico de los huesos, la producción de melanina y la integridad del sistema nervioso central. Sin embargo las necesidades del animal para prevenir estas deficiencias fisiológicas son muy reducidas. En general, las gramíneas contienen menos Cu que las leguminosas y los granos más que tallos y hojas. Cereales, semillas de leguminosas y derivados lácteos son pobres en Cu (2 a 10 ppm) mientras que las harinas oleaginosas son fuentes aceptables (15 a 30 ppm) (cuadro 10).

Cuadro 10.- Contenido en cobre de ingredientes utilizados en fabricación de piensos (mg/kg)

	NRC 1998	INRA-AFZ 2002	CVB 2002	Ainprot 1984	FEDNA 2003
Cereales					
Maíz	3	2	1	3	3
Trigo blando	7	5	3	8	6
Cebada 2C	7	9	4	6	7
Leguminosas y semillas oleaginosas					
Guisantes	9	7	7	12	8
Altramuces	6 ¹	5 ²	5 ²	4 ²	4 ²
Soja integral tostada	16	34	12	16	17
Harinas de oleaginosas					
Harina de girasol, 32 %	26	62	36	25	33
Harina de soja, 44 %	20	18	8	14	19
Harina de palmiste, 15%	-	21	23	42	28
Harina de colza, 34%	6	7	7	5	7
Productos de origen animal					
Harina de pescado, 66%	6	7	6	16	8
Suero dulce, 70/12	13	2	1	4	3
Otras materias primas					
Gluten feed	48	5	5	4	8
Salvado de trigo	10	17	10	10	13
Mandioca, 65% almidón	4	4	3	4	5
Melaza de caña	17	29	6	22	19
Harina de alfalfa, 16%	10	5	9	7	15

¹ Altramuz blanco (Lupinus albus).

² Altramuz azul (Lupinus angustifolius)

Un problema adicional es que la biodisponibilidad del Cu en los ingredientes de origen vegetal es sólo del 50% en relación con los ingredientes de origen animal, aunque el Cu de los granos de cereales es hasta diez veces más disponible que el de los forrajes. A menudo olvidado, pero no por ello falto de interés, es la contribución del Cu de cañerías, utensilios y equipos para satisfacer las necesidades en animales en intensivo. Aunque la deficiencia en Cu no sea frecuente en monogástricos es preciso suplementar los piensos con pequeñas cantidades (5 a 15 ppm según especie) a través del corrector.

Estudios realizados en el Reino Unido en los años 1960's con ganado porcino, indican que la inclusión de 250 ppm de Cu en forma de sulfato mejora las ganancias de peso en torno al 8% y el índice de conversión en torno al 5,5% en comparación con cerdos controles (Braude, 1980). Por ello, numerosos productores incluyen niveles farmacológicos de Cu en la dieta (125 a 250 ppm) para mejorar la salud y los parámetros productivos en lechones y en cerdos en crecimiento-cebo (Barber et al., 1955, 1957; Davis et al., 2002). Efectos similares, aunque probablemente de menor magnitud, han sido observados en pollos (Pesti y Bakalli, 1996; Ewing et al., 1998; Nilipour et al., 1999), pavos (Guenthner et al., 1978) y conejos (Mateos y De Blas, 1998). La revisión bibliográfica de Nys (2001) indica que aportes de 100 a 240 mg Cu/kg de pienso tienden a incrementar las ganancias de peso en pollos en un rango comprendido entre 0 y 6,6%, valores inferiores a los observados para porcino. De hecho, dosis superiores a las 200 ppm redujeron el consumo y la productividad en varios ensayos. En cualquier caso la utilización de altas dosis de Cu en estas especies está prohibida en la UE-25.

Las razones del efecto beneficioso del Cu sobre el crecimiento y la productividad de los cerdos (y otras especies) no es conocido pero el Cu podría contribuir al menos mediante cuatro mecanismos diferentes: 1) agente antimicrobiano; 2) mejora de la digestibilidad de ciertos nutrientes; 3) mejora de la respuesta inmune; y 4) protección de las células contra la oxidación y los daños producidos por los radicales libres. El efecto estimulante del Cu va unido a un mayor consumo de pienso, lo que indica que su mecanismo de acción podría ser similar al observado para los promotores de crecimiento de tipo antibiótico (Johnson et al., 1985; Zhou et al., 1994a). De hecho niveles altos de Cu en el pienso son más eficaces en lechones post-destete en situaciones precarias de manejo y pobre estatus sanitario, que en cerdos en cebo bajo buen sistema de crianza (Bradley et al., 1983). Zhou et al. (1994b) han observado que inyecciones intravenosas de Cu también estimulan el crecimiento de los lechones, lo que parece indicar que el modo de acción del Cu podría ser doble y que la acción sistémica podría complementar la acción antimicrobiana directa. Este mecanismo sistémico podría explicar los beneficios que se obtienen al sustituir el Cu inorgánico de la dieta por fuentes orgánicas (Carlson, 2004). La respuesta de los lechones a niveles farmacológicos de Cu parece ser independiente de la presencia de antibióticos (Cromwell et al., 1998; Hill et al., 2001) pero no de altos niveles de zinc en la dieta (Smith et al., 1997; Hill et al., 2000; Vieira y Shigueru, 2003). Hill et al. (2000) indican que tanto el Cu a 250 ppm como el zinc a 3.000 ppm reducen la incidencia de diarreas y mejoran el crecimiento del lechón. Sin embargo, los efectos de la combinación de 250 ppm de Cu en forma de sulfato y de 3.000 ppm de zinc

como óxido no fueron aditivos (cuadro 11). En aves, Nys (2001) indica que el efecto positivo del Cu sobre el crecimiento puede deberse a su acción antimicrobiana o a un aumento de la secreción de neuropéptidos activos. Xia et al. (2004) han observado que la utilización de montmorillonita (arcilla del tipo aluminosilicato) enriquecida con Cu reducía el número de *Escherichia coli* y *Clostridium ssp* en intestino delgado y ciego de pollos broilers.

Cuadro 11.- Productividad en lechones alimentados con dietas con alta concentración de zinc y (o) cobre (Hill et al., 2000)¹

Zn, ppm	Dieta				SEM
	125	3.125	125	3.125	
Cu, ppm	12	12	262	262	
Ganancia de peso, g/d ^{abc}	375	422	409	415	4,7
Consumo de pienso, g/d ^{ac}	637	690	671	681	7,9
I. conversión, g/g ^{abc}	586	611	611	612	4,7

¹ 22 a 50 d de edad.

^a Aporte de Zn (P < 0,01). ^b Aporte de Cu (P < 0,01). ^c Interacción Zn x Cu (P < 0,01)

El Cu se utiliza en numerosos países vía agua en forma de sulfato para el tratamiento fúngico y el control de microorganismos en aves de carne y puesta (Stewart et al., 1977; Applegate et al., 2004). Diversos trabajos de campo han demostrado que la suplementación extra con Cu reduce la incidencia de micosis en el buche de los pollos y de ruptura de aorta en pavos (Applegate et al., 2004; Shivaprasad, 2004). En Estados Unidos se suele añadir sulfato de cobre al agua de bebida durante cinco o más días en la fase de crecimiento de pollos y pavos y periódicamente en ponedoras (Ward et al., 1994). En porcino, niveles altos de Cu reducen el olor de las heces disminuyendo el impacto ambiental de las explotaciones (Armstrong et al., 2000) lo que podría deberse a un mejor control de la población microbiana presente en el intestino (McDowell, 2003). Por otra parte, la suplementación con Cu a niveles farmacológicos (en torno a 250 ppm) en gallinas ponedoras y pollos de carne durante períodos largos reducen de forma significativa el nivel de colesterol en plasma, músculo y yema de huevo (Bakalli et al., 1995; Ankari et al., 1998). Ankari et al. (1998) indican que la suplementación con 50 a 250 mg/kg de Cu reduce la cantidad de triglicéridos de la yema hasta en un 30% y la del colesterol hasta en un 14%. Sin embargo, altos niveles de Cu reducen la productividad y empeoran la puesta y los índices de conversión (Stevenson y Jackson, 1981; Nys, 2001). Dove (1995) ha observado que la suplementación de las dietas de lechones con Cu mejora de forma significativa la utilización de la grasa animal, cuya digestibilidad pasó de un 75,6% a 85,1%. En gallos cecotomizados, Oayagi y Baker (1995) también han observado que niveles farmacológicos de Cu mejoraban el contenido en energía metabolizable de los piensos y la digestibilidad de la materia seca y de la fracción hemicelulosas, lo que podría explicar parte de sus efectos beneficiosos.

El Cu regula la actividad de numerosos enzimas con carácter antioxidante y facilita o potencia la respuesta inmunológica del animal ante una agresión (Strain, 1994). La acción protectora del Cu en los tejidos corporales contra el estrés de la oxidación tiene lugar al menos mediante dos vías; una relacionada con el metabolismo del Fe y otra como componente de la enzima superóxido dismutasa. La actividad de la catalasa hepática, enzima que contiene grupos hemos ricos en Fe, disminuye en casos de deficiencia en Cu. Niveles elevados de ceruloplasmina, enzima que contiene Cu, han sido observados en pollos tras sufrir una infección por *Salmonella spp* y *Escherichia coli*. También, el Cu a través de la superóxido dismutasa, enzima que contiene Zn, Mn o Cu, está relacionado con los fenómenos de fagocitosis y puede influenciar la acción de neutrófilos y macrófagos. Sin embargo, Kornegay et al. (1989) no observaron influencia alguna de la inclusión de 200 ppm de Cu sobre el estatus inmunitario de los lechones.

El Cu es un metal de transición y, como tal, muy eficiente catalizando reacciones de oxidación-reducción. El Cu ionizado favorece la oxidación de los lípidos y de las vitaminas liposolubles de la dieta, lo que puede afectar a la palatabilidad y la calidad general del pienso, reduciendo el consumo y el rendimiento productivo del animal. La inclusión de sulfato de cobre en partículas finas da lugar a índices de oxidación de la grasa dietética superior a los que se obtienen con la inclusión de sulfato de cobre grosero (Miles et al., 1998). Ciertas vitaminas son muy susceptibles a la degradación durante el almacenaje y el proceso de fabricación del pienso en presencia de sulfato de cobre. La suplementación de la dieta con 250 ppm de Cu como sulfato de cobre aumentó la velocidad de degradación del tocoferol presente en ingredientes naturales (Dove y Ewan, 1990) o adicionado como acetato de dl- α -tocoferol (Dove y Ewan, 1991). Por contra, dentro del organismo el Cu actúa como cofactor de las enzimas superóxido dismutasa y ceruloplasmina, complejos que protegen los ácidos grasos poliinsaturados presentes en las membranas celulares de la acción de los radicales de oxígeno libre. Por tanto, la influencia del Cu sobre los procesos oxidativos es diferente según el Cu se encuentre en forma libre en el pienso o en forma de complejo orgánico dentro del organismo (Strain, 1994; Jondreville et al., 2002; Applegate et al., 2004).

El exceso de Cu crea problemas a varios niveles y los efectos son más evidentes en aves que en cerdos. Así, dosis farmacológicas (250 a 500 ppm) bien por vía pienso o vía pienso y agua en combinación, reducen el consumo y la productividad en pollos, pavos y ponedoras (NRC, 1980; Ward et al., 1994, 1995; Chiou et al., 1997, 1998; Ankari et al., 1998; Miles et al., 1998). Además, aumentan el número y gravedad de las lesiones de la cavidad bucal (Smith et al., 1998) y de la capa protectora interna de la molleja (Poupolis y Jensen, 1976) así como la incidencia de proventriculitis (Wideman et al., 1996; Bayyari et al., 1996). En pavos, Zubair et al. (1996) y Leeson et al. (1997) han observado que el exceso de Cu modifica el modelo de fermentación en ciego y aumenta la viscosidad de la digesta y la pegajosidad de las heces, lo que redundaría en peor calidad de la yacija y mayor peligro de contaminación microbiana en matadero. Además, niveles farmacológicos de Cu en base a sulfato de cobre reducen la retención aparente del P en pollitos (Banks et al., 2003).

El Cu puede modificar el perfil en ácidos grasos de la grasa subcutánea, aumentando el grado de insaturación del tocino dorsal (Amer y Elliot, 1973). Este efecto puede ser importante en la producción de carnes de calidad, tales como las del jamón de Parma o de los productos curados de Ibérico, donde un exceso de ácidos grasos insaturados perjudica la calidad del producto final. Sin embargo, Bossi et al. (2000) no encontraron efecto alguno de 175 ppm de Cu sobre el perfil lipídico o la calidad de la carne de cerdos destinados a la producción de jamón de Parma. Un problema adicional del exceso de Cu es su acúmulo en vísceras, hígado y riñón principalmente. Nys (2001) indica que aportes elevados aumentan la concentración en hígado hasta en 10 y 20 veces debido a su acúmulo en la metalotionina, una proteína capaz de fijar 12 moléculas de Cu por mol. Jondreville et al. (2002) estiman que dietas para porcino con 250 ppm de Cu suministradas durante 100 a 150 d dan lugar a niveles de Cu en el tejido hepático de 400 a 500 ppm. Por tanto, el exceso en la dieta da lugar a exceso del mineral en carne y vísceras, muy por encima de las necesidades de la población (cuadro 12). Cuando la capacidad del hígado para secuestrar el Cu se ve superada, el Cu se excreta al medio. La utilización de purines ricos en Cu provocan graves problemas medioambientales; el exceso perjudica tanto al crecimiento de las plantas como al desarrollo de las bacterias responsables de la degradación de los residuos orgánicos en las fosas de decantación.

Cuadro 12.- Entrada de Cu en la cadena humana a partir de productos de cerdo (adaptado de Jondreville et al., 2002)

Escenario	A	B
Cu en pienso, ppm		
Lechones	30	175
Cerdos crecimiento	15	175
Cerdos cebo	15	100
Suministro diario, mg ¹	1,5	3,6
Necesidades en adultos, mg/d	2-3	-

¹ A partir de productos de porcino.

Los correctores comerciales utilizados en la Península Ibérica contienen niveles altos de Cu en piensos de lechones donde está permitido (170 ppm en total en pienso para lechones hasta las 12 semanas de vida). Un problema con el que se encuentra el productor español es que la mayoría de los programas comerciales prevén cambios del pienso a los 18-20 kg y a los 60-70 kg de peso, y a menudo, el productor utiliza un solo pienso desde 20 kg hasta el sacrificio. Por tanto, en estos casos el cerdo joven no se puede beneficiar de los aportes extras de Cu hasta las 12 semanas permitidas por la legislación. A veces, el nivel de Cu total en la dieta está excesivamente próximo al nivel autorizado lo que se debe por un lado al alto aporte del corrector y por otro a que el contenido en Cu de las materias primas no siempre es analizado ni tenido en cuenta por el fabricante.

Cuadro 13.- Contenido en cobre de materias primas utilizadas en la fabricación de piensos en España (mg/kg)¹

	Media	Rango	CV %	Número de muestras	FEDNA 2003
Cereales					
Maíz	33	0-6	12	7	3
Trigo	7	4-8	26	5	6
Cebada	8	3-10	37	10	7
Arroz	1	0	28	2	3
Centeno	4	3-4	20	2	6
Sorgo	3	-	0	2	6
Avena	7	3-10	76	2	5
Leguminosas y oleaginosas					
Guisantes	9	4-15	47	7	8
Altramuz blanco	4	-	-	1	-
Altramuz azul	4	3-6	43	3	4
Haba de soja entera	15	12-17	19	3	17
Semilla de algodón	11	29-30	13	2	10
Semilla de girasol	13	12-14	7	4	21
Harinas de oleaginosas					
Harina de girasol, 32 %	26	7-36	35	23	33
Harina de soja, 44 %	18	7-39	41	16	19
Harina de palmiste, 15%	40	19-65	39	7	28
Harina de colza, 34%	6	-	-	1	7
Proteínas animales					
Harina de pescado, 70%	10	6-14	32	6	8
Suero dulce ²	16	0-44	109	9	3
Otros					
Gluten feed ³	7	4-11	36	6	8
Salvado de trigo	12	7-18	29	7	13
Mandioca	3	-	-	1	5
Melaza	10	-	-	1	19
Harina de alfalfa, 16%	12	5-18	30	26	15
Pulpa de remolacha	4	3-5	35	2	15
Fosfato monocalcico	14	8-19	40	3	8
Fosfato bicalcico	14	4-20	51	4	15
Carbonato calcico	6	4-9	32	6	12
Cloruro sódico	3	2-3	28	2	3

¹ Análisis realizados por Alkemi, S.A, INA, S.L., Labocor, S.A y Nutral, S.A.

² Se incluyen en el análisis tres muestras que contenían 30, 40 y 44 mg/kg de Cu

³ No se incluye en el análisis una muestra que contenía 71 mg/kg de Cu.

En el cuadro 10 se ofrecen datos sobre el contenido en Cu de diversos ingredientes claves de acuerdo con la información publicada por distintas instituciones. Llama la atención la variabilidad de los datos para el gluten feed con un rango entre 4 ppm (Ainprot, 1984) y 48 ppm (NRC, 1998) y para la harina de girasol que varía desde 25-26 ppm (Ainprot, 1984 y NRC, 1998) hasta 62 ppm (INRA-AFZ, 2002). Para la harina de soja los valores tabulados varían de 8 a 20 ppm y para la soja integral tostada entre 12 a 34 ppm (CVB, 2002 e INRA-AFZ, 2002). Es de interés analizar el contenido en Cu de las sales y fuentes utilizadas para suministrar manganeso y zinc. Li et al. (2004) analizaron doce muestras de manganeso de origen orgánico y encontraron un contenido entre 20 ppm y 11.300 ppm de Cu. Aunque no en condiciones europeas, Juarena y Danelon (2001) tabulan un contenido medio en Cu para el ZnO utilizado para rumiantes en Argentina del 4%. En cualquier caso las fuentes de ZnO utilizadas en España vienen a contener entre 0,02% y 0,07% de Cu. En el cuadro 13 se ofrecen datos de análisis realizados en España del contenido en Cu de ingredientes de uso común en fabricación de piensos. Cabe destacar que los valores no difieren sustancialmente de los tabulados en la matriz FEDNA (2003), excepto para el maíz (33 vs 3 ppm), el suero (16 vs 3 ppm) y la pulpa de remolacha (4 vs 15 ppm).

2.3.- Zinc

El primer síntoma clínico asociado con una deficiencia en zinc (Zn) fue el retardo del crecimiento y la aparición de anormalidades en la piel y el pelo en ratas, hace más de 70 años. En los años 1950's algunos trabajos ya indicaban que el Zn era esencial en cerdos y pollos. El Zn está relacionado con la replicación celular y el desarrollo de cartílagos y huesos, y una deficiencia origina retardo del crecimiento, dermatitis (paraqueratosis en porcino) y problemas de fertilidad en la hembra y en el macho (Dozier, 2004). Además, el Zn influye sobre la regulación del apetito, lo que puede estar relacionado con la expresión de genes; en caso de carencia de Zn, la rata rechaza de forma selectiva consumir hidratos de carbono en beneficio de proteínas y grasas (Kennedy et al., 1998). El papel del Zn puede ser importante en el lechón, donde un inicio rápido del consumo es de particular interés. Las necesidades del lechón son relativamente altas y, en torno a los 100 ppm, pero disminuyen rápidamente con la edad (cuadro 14).

Cuadro 14.- Necesidades de zinc en cerdos cebo (Revy et al., 2003 y NRC, 1998)¹

PV, kg	Revy et al. (2003) ²	NRC (1998)
6-15	80	80-100
15-25	65	60-80
25-50	50	60
50-100	50	50

¹ Zn total (mg/kg de dieta). Incluye el zn aportado por los ingredientes y por el sulfato.

² Necesidades estimadas en base al estatus del mineral en plasma (6 a 50 kg) o en hueso (50 a 100 kg).

El contenido en Zn de cereales y semillas de leguminosas es relativamente bajo y en torno a las 20 a 30 ppm. En los cereales, la distribución del Zn no es homogénea siendo las cubiertas más ricas que las partes internas. Por tanto, salvado y gluten feed son buenas fuentes de Zn (60 a 90 ppm). Las harinas de oleaginosas (50 a 80 ppm) y las proteínas de origen animal, caso de la harina de pescado, son buenas fuentes, pero no así azúcares y aceites (cuadro 15). Li et al. (2004) observaron que el contenido en Zn de 12 fuentes de manganeso orgánico utilizado en uno de sus ensayos variaba entre 82 y 53.200 ppm. Análisis laboratoriales realizados en España (Romero, comunicación personal) indican una alta variabilidad en el contenido en Zn del suero lácteo con algunas muestras cuyo contenido superaba las 100 ppm. Estos valores inesperadamente altos, son probablemente debidos a contaminaciones durante el procesado de la leche y la obtención industrial del suero. Tuberías y equipos galvanizados pueden enriquecer en Zn el aporte de agua y prevenir deficiencias. Una situación similar podría darse en cerdas en jaulas zincadas o lechones en instalaciones del mismo material. De hecho, en experimentos realizados con ganado porcino es frecuente encontrar valores de retención de Zn anormalmente elevados y superiores a lo estimado, lo que podría deberse a no haber considerado el aporte extra que obtienen los animales al lamer los equipos.

La deficiencia en Zn es más frecuente en dietas basadas en ingredientes de origen vegetal y ricas en Ca. La razón es la formación de complejos Zn-Ca-fitas en la sección proximal del aparato digestivo, tal y como ha sido demostrado en ratas por Davies y Olpin (1979). Por tanto, cabe esperar que el uso de fitasas exógenas y la reducción del nivel de Ca de la dieta beneficien el crecimiento de pollos y cerdos, especialmente si las dietas son deficientes en Zn (Roberson y Edwards, 1994; Adeola et al., 1995; Ashida et al., 1999).

Recientemente, se ha observado que el estatus de Zn influye en funciones orgánicas relacionadas con la inmunidad y el desarrollo de las células fagocitarias (Kidd et al., 1996). Así mismo, el Zn juega un papel importante en la expresión de genes y en los procesos de mitosis celular (Prasad, 2002). El Zn participa en procesos relacionados con la producción y regeneración de la queratina y tiene un efecto directo sobre la integridad del epitelio de recubrimiento de la glándula mamaria. Por tanto, una deficiencia, aún de menor grado, afecta a numerosos factores involucrados en los fenómenos de inmunidad, desde la integridad de la barrera de protección física (piel y epitelios) hasta la inmunidad celular adquirida o la inmunidad humoral.

En reproductoras pesadas el aporte de Zn a dietas ligeramente deficientes en este elemento aumenta el título de anticuerpos (anti-glóbulos rojos de carnero) de la descendencia (Stahl et al., 1989). Así mismo, la inclusión de 140 a 180 mg Zn/kg de pienso mejora la supervivencia de aves de puesta infectadas con *Escherichia coli* (Flinchum et al., 1989 citados por Kidd et al., 1996). Sin embargo, Pimentel et al. (1991) no han observado beneficio alguno de la concentración de Zn sobre la respuesta inmunológica en pollitos.

La utilización de altos niveles de Zn en dietas para lechones reduce la incidencia de procesos diarreicos debido a infecciones por *Escherichia coli*. Trabajos realizados a principios de los 1990's demostraron de forma clara que el Zn a dosis comprendidas entre 2.000 y 3.000 ppm en forma de óxido o de sulfato mejoraban los crecimientos en lechones recién destetados (Hahn y Baker, 1993). Estos resultados han sido confirmados posteriormente por numerosos autores (Hill et al., 2000, 2001) que, además, han encontrado que niveles altos del óxido mejoraban la consistencia de las heces y alteraban el color de las mismas. Sin embargo, no todos los estudios han encontrado una respuesta consistente en cuanto a crecimientos e índices de conversión al añadir Zn a la dieta (Schell y Kornegay, 1996; Augspurger et al., 2004). Nuestra experiencia indica que en condiciones prácticas y en ausencia de promotores de tipo antibiótico, la inclusión de óxido de zinc a niveles de 2.500 ppm o superiores reducen de forma consistente y clara la incidencia de diarreas, a la vez que mejoran la calidad de las heces y aumentan el rendimiento productivo de los lechones jóvenes (Mateos, 2004). En Estados Unidos se utilizan niveles farmacológicos de Zn de forma rutinaria como promotor del crecimiento mientras que en Europa se usa (en aquellos países donde está autorizado) como preventivo frente a infecciones digestivas. Por tanto, el óxido de Zn es un producto a utilizar, si la legislación lo permite, como preventivo y promotor de crecimiento, aunque su efecto positivo tiende a disminuir con la edad (Poulsen, 1995; Mavromichalis et al., 2000).

Diversos investigadores indican que los efectos beneficiosos del Zn no están relacionados con la biodisponibilidad de la fuente utilizada sino más bien lo contrario. De hecho, si el objetivo es su utilización como promotor de crecimiento, el óxido es más recomendable que el sulfato (Kansas State University, 2003). En aves, niveles farmacológicos de Zn no mejoran la productividad. La inclusión de 2.000 ppm en el pienso causa lesiones en la molleja y en el páncreas, aunque no afecta a la mortalidad (Nys, 2001). En gallinas ponedoras, niveles altos de Zn (2.500 ppm) como ZnO, han sido utilizados en programas de muda forzada (Berry y Brake, 1987).

El contenido en Zn de las materias primas de uso más común en dietas para monogástricos se detalla en el cuadro 15. Las mayores diferencias entre las fuentes consultadas se observa para la harina de pescado con un valor de 83 ppm según el CVB (2002) y de 132 ppm de acuerdo con el NRC (1998). Para el maíz los valores varían desde 10 ppm (Ainprot, 1984) hasta 21 ppm (CVB, 2002). En el cuadro 16 se ofrecen datos sobre contenido en Zn de diversas materias primas analizadas en laboratorios españoles. Estos valores servirán de base para completar la próxima edición de las tablas FEDNA. Los correctores de porcino comercializados en la Península Ibérica contienen aproximadamente un 20% más de Zn en el año 2004 que en el año 1986 (cuadro 7) lo que parece razonable. En base al contenido en Zn de los ingredientes y las necesidades de los animales es probable que los niveles de uso actuales (90 a 125 ppm) sean adecuados.

Cuadro 15.- Contenido en zinc de ingredientes utilizados en fabricación de piensos (mg/kg)

	NRC 1998	INRA-AFZ 2002	CVB 2002	Ainprot 1984	FEDNA 2003
Cereales					
Maíz	18	19	21	10	16
Trigo blando	28	27	22	23	23
Cebada, 2C	25	30	23	15	27
Leguminosas y semillas oleaginosas					
Guisantes	23	32	31	-	30
Altramuces	32 ¹	31 ²	37 ²	34 ²	30 ²
Soja integral tostada	39	40	38	38	45
Harinas de oleaginosas					
Harina de girasol, 32 %	66	69	100	120	75
Harina de soja, 44 %	50	47	50	58	51
Harina de palmiste, 15%	-	32	41	60	40
Harina de colza, 34%	69	65	62	70	65
Productos de origen animal					
Harina de pescado, 66%	132	85	83	105	83
Suero dulce, 70/12	10	20	18	-	25
Otras materias primas					
Gluten feed	70	53	68	59	60
Salvado de trigo	92	74	85	110	80
Mandioca, 65% almidón	10	15	8	-	11
Melaza de caña	5	13	9	12	10
Harina de alfalfa, 16%	24	19	22	30	21

¹ Altramuz blanco (Lupinus albus).

² Altramuz azul (Lupinus angustifolius).

Cuadro 16.- Contenido en zinc de materias primas utilizadas en la fabricación de piensos en España (mg/kg)¹

	Media	Rango	CV %	Número de muestras	Propuesta FEDNA
Cereales					
Maíz	15	12-18	21	3	16
Trigo	18	15-23	24	3	23
Cebada	19	16-24	25	3	27
Arroz	12	10-13	18	2	13
Centeno	19	18-19	4	2	20
Sorgo	18	17-18	4	2	19
Avena	22	15-29	45	2	24
Leguminosas y oleaginosas					
Guisantes	40	29-53	21	8	35
Altramuz blanco	32	-	-	1	30
Altramuz azul	26	19-39	42	3	30
Haba de soja entera	75	-	-	1	45
Semilla de algodón	30	29-30	4	2	30
Semilla de girasol	40	36-43	7	4	45
Harinas de oleaginosas					
Harina de girasol, 32 %	115	80-148	21	7	108
Harina de soja, 44 %	58	48-78	17	9	51
Harina de palmiste, 15%	51	41-73	24	6	40
Harina de colza, 34%	76	-	-	1	65
Proteínas animales					
Harina de pescado, 70%	102	68-183	47	5	85
Suero dulce ²	38	0-116	120	7	25
Otros					
Gluten feed	61	50-79	18	5	60
Salvado de trigo	91	71-126	21	7	80
Mandioca	13	-	-	1	12
Melaza caña	20	-	-	1	15
Harina de alfalfa, 16%	23	18-38	28	9	21
Pulpa de aceituna	19	-	-	1	20
Pulpa de remolacha	17	16-17	4	2	19
Fosfato monocalcico	240	170-357	42	3	200
Fosfato bicalcico	108	86-134	23	3	68
Carbonato calcico	7	3-12	48	6	10
Cloruro sódico	3	2-3	28	2	2

¹ Análisis realizados por Alkemi, S.A., Labacor, S.A. y Nutral, S.A. ² Se incluyen en el análisis dos muestras que contenían 79 y 116 mg/kg de Zn

2.4.- Manganeso

La importancia del manganeso (Mn) en dietas para monogástricos ha sido un área activa de investigación en los últimos veinte años. Este elemento traza es necesario para la actividad enzimática, el metabolismo de lípidos e hidratos de carbono, el crecimiento de los huesos y el funcionamiento adecuado de los procesos reproductivos tanto en hembras como en machos. Una deficiencia produce como síntomas más típicos condodistrofia en pollitos recién nacidos y perosis en aves en crecimiento. En ponedoras, la deficiencia produce cáscaras de escaso grosor con anomalías en la capa mamilar (Leach y Gross, 1983). Mabe et al. (2003) indican que la suplementación con Mn parece mejorar la elasticidad y la calidad de la cáscara aunque no existe consenso en la literatura a este particular. El Mn está ampliamente distribuido en los tejidos orgánicos pero a concentraciones muy reducidas. El contenido en granos y semillas es muy variable dependiendo en gran medida del pH del suelo donde se cultivan (menor contenido en la semilla según aumenta el pH del suelo). En general, trigo y avena (30 a 45 ppm) son más ricos que el maíz (5 a 8 ppm). El Mn se concentra en las capas externas del grano y, por tanto, gluten feed (20 a 25 ppm) y sobre todo, salvado de trigo (100 a 130 ppm) son buenas fuentes. La diferencia más notable observada en cuanto a contenido en este mineral en las diversas materias primas ocurre con el altramuza; las semillas del altramuza blanco (*Lupinus albus*) contienen entre 750 y 1.500 ppm de Mn que es entre 15 y 30 veces más que la concentración en la variedad azul (*Lupinus angustifolius*) aún creciendo en el mismo tipo de suelo.

Las necesidades en Mn son elevadas en aves en crecimiento pero muy limitadas en porcino. En porcino en cebo es difícil provocar síntomas de deficiencia aún cuando no se añade Mn al pienso. Ensayos realizados desde el destete al sacrificio utilizando dietas semisintéticas que contenían menos de 2 ppm de Mn no crearon síntomas de deficiencia alguno (Liebholz et al., 1962). Sin embargo, las necesidades en Mn para reproducción podrían ser sustancialmente superiores a las de crecimiento-cebo. El Mn juega un papel importante en los procesos inmunológicos y existe una interacción entre su contenido en la dieta y la actividad de neutrófilos y macrófagos. Una deficiencia en Mn empeora la respuesta inmune y perjudica el funcionamiento del sistema nervioso central (Underwood y Suttle, 2001). Atherton (1993) ha observado que la suplementación extra con Mn de dietas para cerdos en cebo mejora la calidad de la canal. Así mismo, Apple et al. (2004) observan que al suplementar las dietas de cerdos en cebo con 320 a 350 ppm de un complejo aminoácido-Mn mejoraban la eficiencia alimenticia y el color y la terneza de la carne. D'Souza et al. (1998) han observado que la suplementación con Mg mejora el color y la capacidad de retención de agua de la carne de porcino. Apple et al. (2004) indican que la mejora observada podría deberse a que el Mn actúa de forma similar al Mg sobre la calidad de la carne. Sin embargo, en este mismo ensayo la utilización de 700 ppm de Mn no aportó mejora alguna. Además, Kats et al. (1994) compararon dietas para cerdos en cebo que contenían 24 o 88 ppm de Mn en forma inorgánica o como quelato orgánico sin observar efecto beneficioso alguno ni sobre los rendimientos productivos ni sobre la calidad de la canal. Por tanto, se precisa más

investigación antes de recomendar suplementar con cantidades extras de Mn las dietas de porcino en cebo.

La concentración en Mn de la mayoría de los correctores para porcino de la Península Ibérica no ha cambiado mucho en los últimos 20 años y en cualquier caso es superior a lo recomendado por la mayoría de las instituciones. No es de esperar que niveles altos de Mn en el corrector (hasta 100 ppm añadidos en algunos casos) mejoren la productividad en lechones y, menos aún, en cerdos en cebo. El contenido en Mn de las materias primas más comunes utilizadas en alimentación de monogástricos se ofrece en el cuadro 17. La mayor diferencia entre fuentes se observa para los altramuces, lo que en gran medida se debe a que las muestras analizadas correspondían a variedades distintas. Para la harina de palmiste el rango va desde 131 ppm (INRA-AFZ, 2002) hasta 281 ppm (CVB, 2002). Para el trigo los valores varían desde 26 ppm (CVB, 2002) hasta 43 ppm (Ainprot, 1984) y para la harina de pescado el rango fluctúa entre 8 ppm (NRC, 1998) y 23 ppm (Ainprot, 1984). En el cuadro 18 se detallan valores sobre contenido en Mn de diversas materias primas analizadas en laboratorios españoles. Estos datos servirán de base para completar los datos de contenido en minerales de los ingredientes de la nueva edición de las tablas FEDNA.

2.5.- Selenio

El selenio (Se) es un constituyente de las selenoproteínas y juega un papel estructural y enzimático importante en nutrición animal. La historia del Se como nutriente en dietas para el ganado ha sufrido grandes vaivenes; desde la prohibición de uso por su posible toxicidad hasta el reconocimiento de la necesidad de incluirlo en dietas prácticas. En un principio, el Se estaba considerado como un tóxico con propiedades carcinogénicas y su utilización en piensos estaba muy controlada. Paradójicamente hoy día se cree que es un potente anticancerígeno. En los años 1950's los nutricionistas llegaron a la conclusión de que dietas formuladas en base a maíz y harina de soja procedentes de ciertas regiones del globo, caracterizadas por la acidez de los suelos y los bajos contenidos en Se, necesitaban de un aporte exógeno para optimizar la productividad. En 1987, la FDA (Food and Drug Administration) autorizó un aumento de 0,1 a 0,3 ppm en los niveles de utilización. Pero en el año 1993 hubo un problema de mortalidad de aves acuáticas en el embalse de Keterson, en el estado de California, que fue atribuido por las autoridades a una contaminación del agua por Se. Consecuentemente, la FDA dió marcha atrás en su decisión y redujo el nivel máximo de uso al original 0,1 ppm. En 1994, el nivel permisible volvió a subir a 0,3 ppm. En la UE-25 el nivel máximo autorizado es 0,5 ppm para todas las especies (cuadro 19). En el cerdo, el Se es tóxico a dosis de 20 ppm (toxicidad aguda) o de 5 a 10 ppm (toxicidad crónica) (Kim y Mahan 2001 a,b,c). El pato es particularmente sensible al Se y dosis de 4 ppm ya son teratogénicas (Hoffman et al., 1996). Davis et al., (1996) observaron que la extra suplementación con Cu reducía la toxicidad por Se mientras que Kahn et al. (1996) indican que la monensina refuerza su toxicidad en pollos de carne.

Cuadro 17.- Contenido en manganeso de ingredientes utilizados en fabricación de piensos (mg/kg)

	NRC 1998	INRA-AFZ 2002	CVB 2002	Ainprot 1984	FEDNA 2003
Cereales					
Maíz	7	8	5	5	6
Trigo blando	37	34	26	43	30
Cebada, 2C	18	16	16	8	15
Leguminosas y semillas oleaginosas					
Guisantes	23	9	16	-	11
Altramuces	1.390 ¹	38 ^{2,3}	34 ²	70 ²	35 ²
Soja integral tostada	30	28	34	30	28
Harinas de oleaginosas					
Harina de girasol, 32 %	41	48	56	40	45
Harina de soja, 44 %	29	38	50	36	35
Harina de palmiste, 15%	-	131	281	221	210
Harina de colza, 34%	49	52	47	40	49
Productos de origen animal					
Harina de pescado, 66%	8	13	18	23	8
Suero dulce, 70/12	3	3	0	5	1
Otras materias primas					
Gluten feed	24	18	21	12	24
Salvado de trigo	100	112	115	100	110
Mandioca, 65% almidón	28	26	26	-	26
Melaza de caña	15	59	18	6	25
Harina de alfalfa, 16%	32	49	38	30	40

¹ Altramuz blanco (Lupinus albus)

² Altramuz azul (Lupinus angustifolius)

³ 1.707 ppm para Lupinus albus

Cuadro 18.- Contenido en manganeso de materias primas utilizadas en la fabricación de piensos en España (mg/kg)¹

	Media	Rango	CV %	Número de muestras	Propuesta FEDNA
Cereales					
Maíz	5	4-6	25	3	6
Trigo	29	26-34	15	3	30
Cebada	16	15-18	11	3	15
Arroz	10	0	2	2	10
Centeno	25	23-26	9	2	27
Sorgo	11	0	0	2	10
Avena	48	38-57	28	2	45
Leguminosas y oleaginosas					
Guisantes	11	7-16	26	8	11
Altramuz blanco	24	-	-	1	-
Altramuz azul	967	1.026-925	5	3	35
Haba de soja entera	25	-	-	1	28
Semilla de algodón	17	15-18	13	2	15
Semilla de girasol	16	12-21	23	4	20
Harinas de oleaginosas					
Harina de girasol, 32 %	115	25-47	6	7	45
Harina de soja, 44 %	30	17-39	25	8	35
Harina de palmiste, 15%	167	62-308	55	6	210
Harina de colza, 34%	56	-	-	1	49
Proteínas animales					
Harina de pescado, 70%	11	2-17	50	5	8
Suero dulce	3	0-7	84	7	1
Otros					
Gluten feed	31	20-52	53	5	24
Salvado de trigo	118	92-163	18	7	110
Mandioca,	33	-	-	1	26
Melaza	11	-	-	1	25
Harina de alfalfa, 16%	35	17-54	35	9	40
Pulpa de remolacha	26	23-29	16	2	27
Fosfato monocálcico ²	21	13-29	38	3	20
Fosfato bicálcico ²	32	8-79	127	3	75
Carbonato cálcico ²	66	2-134	94	5	70
Cloruro sódico ²	2	1-2	47	2	2

¹ Análisis realizados por Labocor, S.A y Nutral, S.A.

² Variabilidad alta debido al origen de las muestras (2 fuentes para el fosfato monocálcico, 2 fuentes para el fosfato bicálcico y 3 fuentes para el carbonato cálcico)

Cuadro 19.- Niveles máximos de minerales traza (mg/kg) permitidos en dietas para porcino en la Unión Europea-25 (DOCE, 2003, 2004)

Elemento traza	Antes Feb/2004	Después Feb/2004
Fe	1250	750
Cu	35 ¹	25 ²
Zn	250	150
Mn	250	150
Co	10	2
Se	0,5	0,5
I	10	10
Mo	2.5	2.5

^{1,2}En dietas para lechones el nivel máximo permitido ha pasado de 175 ppm hasta las 16 semanas de edad a 170 ppm hasta las 12 semanas de edad. Los valores en cebo antes de Febrero de 2004 dependían de la edad del cerdo y de la región Europea considerada

Aunque la deficiencia en Se ha sido reconocida desde 1954, resultados obtenidos en diversos programas de investigación muestran que deficiencias subclínicas, que no producen síntomas de carencia, pueden afectar a la salud del animal. La influencia del Se sobre los fenómenos de inmunomodulación y el mantenimiento de la inmunidad a nivel celular y humoral pueden ocurrir a través de tres mecanismos: 1) efectos antiinflamatorios; 2) alteración del estatus redox de las células debido a su acción antioxidante; y 3) producción de compuestos anticancerígenos y citostáticos (McKenzie et al., 2002). Niveles supranutricionales de Se con respecto a las necesidades estrictamente dietéticas, mejoran la respuesta inmune y protegen al huésped contra ciertas infecciones virales (Levander et al., 1995; Rayman, 2002; McKenzie et al., 2002). Larsen et al. (1997) observan que la mortalidad causada por *Escherichia coli* se reduce de 86 a 21% en pollitos al incluir 0,3 mg de Se/kg de pienso en la dieta base maíz-soja (0,14 mg Se/kg dieta).

Los efectos beneficiosos de la inclusión de Se sobre la salud animal fueron observadas por primera vez en ratas que consumían una dieta deficiente en vitamina E, indicando la existencia de una fuerte relación metabólica entre ambos micronutrientes. El Se es un componente clave de los mecanismos de defensa del organismo contra la oxidación y trabaja en íntima conexión con otros antioxidantes, en particular con la vitamina E. Se y vitamina E son complementarios y cada uno de ellos tiende a reducir las necesidades del otro en la prevención de enfermedades, tales como la necrosis del hígado y la diátesis exudativa, pero este ahorro mutuo no se observa con otras enfermedades (Levander et al., 1995; Surai, 2003).

Situaciones asociadas con estrés oxidativo o estados inflamatorios, tal y como ocurre en animales jóvenes en el momento del destete, pueden modificar el estatus en Se y en vitamina E y afectar el crecimiento. Muchos de los beneficios observados al incluir Se y vitamina E en la dieta podrían explicarse de forma razonada en base a sus propiedades antioxidantes.

Algunos datos parecen indicar que ciertas formas de Se, tal como la Se-metionina, están mejor adaptadas para ayudar en la reparación de los tejidos que el Se en forma de selenito (Surai, 2003). La Se-metionina se incorpora con preferencia sobre la metionina en la proteína de los músculos; por tanto, su utilización enriquece en Se la carne y reduce el riesgo de carencia de la población. Un punto importante a destacar es que en el conejo la influencia del Se sobre los procesos de oxidación no está tan clara como en otras especies, lo que probablemente se deba a que el Se no sea cofactor de la enzima glutatión peroxidasa (GSH-Px). Por tanto en esta especie, las necesidades en Se van a ser inferiores al del resto de especies domésticas.

Hasta muy recientemente se consideraba que la principal y casi única función del Se en el organismo animal era formar parte de la GSH-Px, enzima que ayuda a mantener la integridad de las membranas celulares evitando o reduciendo el efecto de los peróxidos formados durante el metabolismo celular. Sin embargo, a día de hoy, se han caracterizado más de catorce selenoproteínas, algunas de ellas con actividad enzimática redox y otras con funciones estructurales y de transporte (Gladyser, 2001; McKenzie et al., 2002). De hecho, el Se es el único elemento traza que está especificado en el código genético como Se-cisteína y es considerado hoy día como el aminoácido número 21 (Rayman, 2002). Las nuevas funciones reconocidas del Se incluyen la producción y regulación del nivel de activación de las hormonas del tiroides a partir de la tiroxina y la estabilización de las proteínas relacionadas con la maduración del esperma y el mantenimiento de la fertilidad en machos (Rayman, 2002). El papel del Se en el desarrollo de la espermatogénesis y la calidad del semen puede que sea más importante que el de la propia vitamina E (Marin-Guzman et al., 1997, 2000; Kolodziej y Jacyno, 2004). Sin embargo, una práctica común de la industria es aumentar las dosis de vitamina E de los piensos de verracos sin modificar los niveles de Se.

El contenido en Se total de un producto dado no sirve como indicador de su valor en nutrición animal. Se ha considerado que la biodisponibilidad del Se en las fuentes de origen animal era baja y en el rango comprendido entre el 10 y el 25%, mientras que la de las fuentes de origen vegetal era superior y en torno al 80% (selenito sódico como patrón). Sin embargo, Henry y Ammerman (1995) indican que el Se de los ingredientes de origen animal tiene una disponibilidad entre el 60 a 90% y el de origen vegetal del 25% o menos en comparación con el selenito de sodio. En cualquier caso, la biodisponibilidad depende del criterio utilizado en su valoración. Las mayores discrepancias se observan cuando se comparan fuentes inorgánicas con fuentes que contienen Se-metionina. Por ejemplo, la mayor parte del Se de los granos de cereales y de la harina de soja se encuentran en forma de Se-metionina mientras que en la paja

de trigo el Se se encuentra como selenato que es probablemente menos activo (Whanger, 2003). Las estimaciones de biodisponibilidad basadas en criterios de retención corporal favorecen a la forma orgánica, ya que la Se-metionina se incorpora y almacena de forma directa en las proteínas corporales.

El contenido medio en Se de los correctores para porcino utilizados en la Península Ibérica es de 0,20 ppm en lechones; 0,19 ppm en crecimiento-cebo y 0,22 ppm en cerdas (cuadros 4, 5 y 6). Estos niveles son ligeramente superiores a los utilizados en 1986; 0,18; 0,16 y 0,19 ppm, respectivamente (cuadro 7). Sin embargo, en este mismo período los niveles de vitamina E han aumentado desde 15 a 44 ppm en lechones, desde 10 a 17 ppm en cerdos en crecimiento-cebo y desde 12 a 32 ppm en cerdas reproductoras. Estos datos indican que, en general, los nutricionistas no han tenido en cuenta que Se y vitamina E actúan en gran medida de forma conjunta y que la suplementación con uno de ellos reduce la necesidad de suplementar con el otro. Tiene sentido desde el punto de vista económico aumentar no sólo el nivel de vitamina E sino también, y en algunos casos de forma preferente, el nivel de Se. En cualquier caso el uso de Se está limitado en la UE-15 a 0,5 ppm, y un exceso provoca toxicidad y supresión de inmunidad por lo que debe evitarse.

2.6.- Iodo

El iodo (I) es necesario para la síntesis de las hormonas tiroideas y su deficiencia provoca daños cerebrales irreversibles. El efecto más obvio de la deficiencia es el bocio, que resulta del engrosamiento del tiroides para compensar la escasez de hormonas tiroideas. Dado el interés de la población urbana, los huevos enriquecidos en este elemento se ofrecen y comercializan en numerosos países desarrollados. Dentro del tiroides, el iodo es rápidamente oxidado y combina con la tirosina para producir I orgánico. La tirosina iodada forma las hormonas del tiroides: triiodotironina (T_3) y tiroxina (T_4) (Lewis, 2004). Una deficiencia en I es difícil de observar en aves, pero puede ocasionar una reducción del crecimiento y de la puesta, menor tamaño del huevo y aumento de la mortalidad embrionaria. En el cerdo la deficiencia produce fallos reproductivos y lechones que nacen débiles y de dimensiones inusualmente alargadas.

El contenido en I de los ingredientes utilizados en piensos es muy variable; las plantas cercanas al litoral son buenas fuentes pero las que crecen en suelos graníticos, lavados, del interior de los continentes, son deficientes. Cereales y semillas de oleaginosas son pobres en I mientras que la harina de pescado es una fuente excelente. Por otra parte, cuando se utiliza sal iodada (3 g KI/kg NaCl) o sal marina, la suplementación exógena no es tan precisa. Las materias primas normalmente utilizadas en los piensos contribuyen con 0,10-0,15 ppm de I al pienso (Lewis, 2004) mientras que las recomendaciones para ponedoras y porcino están alrededor de 0,3-0,4 ppm.

Problemas de deficiencia pueden ocurrir en animales que consumen dietas aparentemente adecuadas en iodo. El grado de estabilidad de las fuentes de I no es perfecto, especialmente cuando el corrector se almacena bajo condiciones de alta humedad y temperatura elevada. La forma iodato o el tiosulfato de sodio estabilizan el mineral reduciendo su vaporización. Así mismo, ciertos problemas relacionados con la deficiencia en I pueden deberse a la utilización de ingredientes ricos en goitrógenos. Por ejemplo, la contaminación con semillas de mostaza, muy ricas en glucosinolatos, es bastante frecuente en las harinas de colza importadas de países en vías de desarrollo, tales como India. También la harina seca de ciertas hierbas y tréboles puede añadir cantidades indeseables de estos compuestos cianogénicos. En estos casos es conveniente controlar el contenido en glucosinolatos de las materias primas e incluir I extra en el corrector. Finalmente, una deficiencia en Se puede producir bocio, un problema que no se resolverá aunque se añada iodo a la dieta (Underwood y Suttle, 2001). El contenido en I de los correctores para porcino utilizados en la Península Ibérica se ha reducido con respecto a hace dos décadas pero todavía es superior al recomendado por la mayoría de las instituciones y organismos de investigación. Por tanto, el I de los correctores, especialmente los de crecimiento-cebo, podría reducirse de forma considerable sin poner en peligro la productividad (cuadro 5).

2.7.- Cromo

Desde hace 45 años el cromo (Cr) ha sido considerado como un nutriente esencial en dietas para monogástricos pero se pensaba que los ingredientes naturales aportaban más de lo que el animal necesitaba. Por tanto, no había necesidad de aportes exógenos. El Cr forma parte del factor de tolerancia a la glucosa responsable de la sensibilidad de los tejidos a la insulina. Por tanto facilita la absorción y la utilización de la glucosa a nivel celular. La forma biológicamente activa es la trivalente (Cr^{3+}) y es precisa para el metabolismo óptimo de lípidos e hidratos de carbono. Afortunadamente, una deficiencia en Cr es difícil de producir incluso en condiciones experimentales. De hecho en monogástricos nunca han sido descritos síntomas de deficiencia. Sin embargo, algunos trabajos indican que en el hombre la suplementación adicional con Cr puede ser beneficiosa, especialmente en personas sometidas a estrés de carácter físico o metabólico. Se ha demostrado que en estos casos las pérdidas urinarias de Cr aumentan (NRC, 1997). El Cr ha alcanzado gran popularidad como suplemento alimenticio en la población urbana donde se utiliza de forma frecuente como ayuda para perder peso y en atletas para mejorar el desarrollo del sistema muscular. De hecho, los suplementos minerales basados en Cr son, tras los que incluyen Ca, los más vendidos en Estados Unidos dentro de esta categoría (Nielsen, 1996). Diversos autores han mostrado que la suplementación de la dieta con 100 a 200 ppb de Cr orgánico mejora la digestibilidad de los nutrientes (Kornegay et al., 1997) y aumenta el porcentaje de músculo a la vez que reduce el porcentaje de grasa en cerdos en cebo (Page et al., 1993; Boleman et al., 1995; Southern 2001; Matthews et al., 2003). Uno de los efectos más consistentes de la suplementación con Cr, bien como picolinato o como acetato, es la mejora en la capacidad de retención de agua (Matthews

et al., 2003; Shelton et al., 2003). Además, otros investigadores han mostrado que 200 ppb de Cr orgánico aumentan la fertilidad y el número de lechones nacidos vivos (Lindeman et al., 1995; Lindeman et al., 2004) y mejoran el estatus inmunitario de animales sometidos a estrés (Kegley y Spears, 1995). Sin embargo, estos efectos no siempre son cuantificables ni en humanos (Vincent, 2003, 2004) ni en porcino (Van Heugten y Spears, 1997; Savoini et al., 1997; Van de Ligt et al., 2002 a,b,c). Debido a la inconsistencia en la respuesta, el NRC (1998) no hace ninguna recomendación en cuanto a necesidades mínimas para porcino. No obstante, el estudio realizado por el NRC (1997) concluye que la inclusión de Cr en forma de cloruro o picolinato de cromo mejoraba la cantidad de magro de la canal en 9 de 24 ensayos y reducía el porcentaje de grasa en 11 de 26 ensayos publicados. En base a este estudio, el comité concluye que aunque la respuesta al Cr exógeno es inconsistente, niveles extras podrían mejorar en algunas circunstancias el metabolismo del animal, dando lugar a mejoras en el crecimiento, la calidad de la canal y los parámetros reproductivos. Por tanto, hoy por hoy, no se puede recomendar su utilización en todas las circunstancias y es preciso valorar en cada situación la conveniencia o no de su uso. Los efectos beneficiosos de 200 ppb de Cr sobre el crecimiento y la calidad de la canal son menos evidentes en aves que en porcino, con resultados positivos en sólo dos de siete ensayos (NRC, 1997) por lo que su uso es infrecuente. En conejos, la información es aún más escasa por lo que el efecto de su inclusión es incierto. No obstante, un exceso de Cr puede aliviar parte de los efectos tóxicos del vanadio en pollos en crecimiento y gallinas ponedoras (NRC, 1997). En cualquier caso, la decisión de suplementar o no con Cr dependerá del costo de inclusión y obviamente debe tener en cuenta la confianza que nos da el suministrador y la calidad y características de la fuente de Cr a utilizar.

2.8.- Cobalto

La única función conocida hasta el momento del cobalto (Co) es su participación como cofactor en el metabolismo de la vitamina B₁₂. De hecho no existe ninguna publicación que haya descrito síntomas de deficiencia en Co en las diversas especies domésticas en presencia de esta vitamina. Desgraciadamente, los tejidos orgánicos de aves y mamíferos son incapaces de incorporar el Co (grupo prostético) a la vitamina ya que carecen de la enzima necesaria, capacidad que está limitada a microorganismos tales como ciertas bacterias y algas. Por tanto, rumiantes, conejos y animales con acceso a sus propias heces podrían beneficiarse de esta posibilidad. Sin embargo, la eficiencia de la síntesis de vitamina B₁₂ en el intestino distal de los monogástricos es limitada, por lo que se recomienda suministrar el Co en su forma activa. Su inclusión en el corrector está solo, y parcialmente justificada, en animales con acceso a sus propias heces, tal y como ocurre en producciones extensivas (cerdo Ibérico en montanera y aves en libertad con acceso al suelo). En consecuencia, los niveles de Co utilizados en la actualidad por los fabricantes de pienso de la Península Ibérica no están justificados (cuadros 4 a 6). De hecho, diversos grupos productores de porcino y pollos no han incorporado Co en el corrector en los últimos 20 años y no por ello han observado síntomas de deficiencia alguna.

3.- BIODISPONIBILIDAD DE LOS MINERALES TRAZA

La determinación de la concentración de minerales traza en ingredientes, piensos y tejidos animales se realiza con una reproducibilidad aceptable mediante nuevas técnicas laboratoriales disponibles (cuadro 20), pero desafortunadamente estos análisis no proporcionan información alguna sobre su posible utilización por el animal (Ammerman et al., 1995). Diversos investigadores han mostrado que la disponibilidad de las fuentes minerales varía en función de factores tales como la especie, el tipo animal, el estado fisiológico, la alimentación previa, el criterio de respuesta elegido para la valoración, las interacciones entre minerales y, entre minerales y otros nutrientes, y la forma química y la solubilidad de la fuente testada. Sólomente los nutrientes que son absorbidos pueden participar en procesos biológicos dentro del animal por lo que sólo ellos son utilizables. Los microminerales, bien libres bien unidos a ligandos de bajo peso molecular, pueden ser absorbidos y estar presentes en los fluidos y tejidos orgánicos pero, aún así, podrían no ser utilizados. El término “biodisponibilidad” describe las propiedades y características de absorción y utilización de un nutriente dado.

Cuadro 20.- Variaciones analíticas permitidas (VA) para la detección de microelementos (AAFCO, 1999)

Mineral	Método ¹	VA, %	Rango
Fe	968.08	25	0,01-5%
Cu	968.08	25	0,03-1%
Zn	968.08	20	0,002-6%
Mn	968.08	30	0,01-17%
Se	969.06	25	ppm
I ²	934.02	40	ppm
Co	968.08	25	0,01-0,16%

¹ AOAC (1996). ² 935.14 y 925.56

Tradicionalmente, la suplementación mineral se realizaba mediante la inclusión en el corrector de sales inorgánicas tales como cloruros, sulfatos, carbonatos y óxidos. En general, cloruros y sulfatos son más disponibles que los carbonatos y éstos más que los óxidos (McDowell, 2003). Por ejemplo, los cerdos son menos tolerantes a niveles farmacológicos de Zn en base a sulfato que en base a óxido de Zn, lo que indica que la disponibilidad del Zn es menor para el segundo (Hahn y Baker, 1993). Sin embargo, la biodisponibilidad de diversas fuentes de ZnO con respecto al ZnSO₄ varía entre el 41 y el 97% (cuadro 21). Bien pudiera ocurrir que el ZnO utilizado en un momento dado tuviera mayor disponibilidad que el sulfato. Para el Cu, numerosos informes indican que el sulfato cúprico es la fuente más disponible tanto en especies domésticas como en animales de laboratorio. El Cu en forma de óxido se absorbe peor que en forma de sulfato con el carbonato en posición intermedia. El cloruro

cúprico es probablemente más biodisponible que el sulfato (Miles y Henry, 1999) y el acetato más que el carbonato (Zanetti et al., 1991).

**Cuadro 21.- Biodisponibilidad de distintas fuentes de zinc en pollos
(Edwards y Baker, 1999)**

Fuente	Zn suplementado mg/kg ¹	Ganancia de peso g	BR ² %
Control	0	104	-
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	10,12	228	100 ^x
ZnO (fuente 1)	7,46	180	89 ^{xy}
ZnO (fuente 2)	7,75	187	97 ^x
ZnO (fuente 3)	8,23	139	41 ^z
ZnSO ₄ ·H ₂ O (fuente 1)	7,29	176	89 ^{xy}
ZnSO ₄ ·H ₂ O (fuente 2)	7,25	173	86 ^{xy}
ZnSO ₄ ·H ₂ O (fuente 3)	7,04	171	87 ^{xy}
Zn metálico en polvo	7,88	161	67 ^y
EEM		6	8

¹ La dieta basal contenía 13,5 ppm de Zn

² Biodisponibilidad relativa del Zn con respecto al ZnSO₄·7H₂O

Letras diferentes en la misma columna indica diferencias significativas (P<0,05)

La disponibilidad del Fe sigue un modelo similar a lo comentado para el Zn y el Cu; el Fe del óxido férrico es pobremente utilizado y existen grandes diferencias en cuanto a biodisponibilidad entre las fuentes de carbonato disponible. Así mismo, Baker y Halpin (1987) encuentran que la disponibilidad biológica del Mn es superior para el MnSO₄ que para el MnO y similar a la del MnCl. El MnCO₃ es una fuente cuya biodisponibilidad es intermedia entre sulfato y óxido. En cualquier caso, y a pesar de su menor disponibilidad, es frecuente utilizar en correctores comerciales carbonatos u otras sales en vez de sulfatos. La razón es que los sulfatos son muy reactivos y tienden a apelmazar el corrector con el consiguiente deprecio comercial. Así mismo, el óxido de Zn es más utilizado que el sulfato de Zn cuando el objetivo es reducir la incidencia de diarreas y mejorar la productividad en lechones. Finalmente, en España era frecuente incluir niveles altos de óxido de hierro (hasta un 0,5%) en piensos de gamas camperas o que no incluían maíz en su formulación. La razón es que esta sal proporciona un tono amarillo-dorado al pienso muy apreciado por el ganadero. En cualquier caso, la nueva legislación europea (DOCE, 2003) ha reducido a un mínimo esta práctica comercial.

En el cuadro 22 se ofrecen datos estimativos sobre la biodisponibilidad de las fuentes inorgánicas más comunes de los diversos elementos traza (NRC, 1998).

Cuadro 22.- Biodisponibilidad de diferentes fuentes inorgánicas de elementos traza en porcino (NRC, 1998)

Mineral	Fuente	Fórmula	Contenido, %	BR, % ¹
Cobre	Acetato de cobre	$\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$	100	-
	Carbonato de cobre	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	50 a 55	60 a 100
	Cloruro de cobre ²	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	58	100
	Óxido cúprico	CuO	75	0 a 10
	Sulfato de cobre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25,2	100
Iodo	EEDI ³	$\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{HI}$	79,5	100
	Iodato de calcio	$\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$	64,0	100
	Ioduro de potasio	KI	68,8	100
Hierro	Cloruro de hierro	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20,7	40 a 100
	Óxido férrico	Fe_2O_3	69,9	0
	Carbonato de hierro	FeCO_3	38	15 a 80
	Fumarato de hierro	$\text{FeC}_4\text{H}_2\text{O}_4$	32,5	95
	Óxido ferroso	FeO	77,8	Descon. ⁴
	Sulfato de hierro (1H ₂ O)	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	30	100
	Sulfato de hierro (7H ₂ O)	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	20	100
Manganeso	Dióxido de manganeso	MnO_2	63,1	35 a 95
	Carbonato de manganeso	MnCO_3	46,4	30 a 100
	Cloruro de manganeso	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	27,5	100
	Óxido de manganeso	MnO	60	70
	Sulfato de manganeso	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	29,5	100
Selenio	Selenato sódico	$\text{Na}_2 \text{SeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	21,4	100
	Selenito sódico	Na_2SeO_3	45	100
Zinc	Carbonato de zinc	ZnCO_3	56	100
	Óxido de zinc	ZnO	72	50 a 80
	Sulfato de zinc (1H ₂ O)	$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	35,5	100
	Sulfato de zinc (7H ₂ O)	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	22,3	100

¹ Biodisponibilidad relativa (valores expresados en relación a la biodisponibilidad de la fuente más común para ese mineral).

² Tribásico.

³ Etilenodiamina dihidroiodada.

⁴ Desconocido pero probablemente por debajo del 20%.

En la última década, diversos ensayos han mostrado que el uso de microminerales altamente biodisponibles mejoran la salud y la productividad animal. Estos trabajos indican que las formas orgánicas pueden reemplazar a las inorgánicas a menores niveles de uso, manteniendo e incluso mejorando la productividad (Fremaut, 2003). Miles y Henry (1999)

han listado los siguientes beneficios percibidos de las formas orgánicas tal y como aparece en revistas de divulgación:

- Los quelatos se absorben mediante mecanismos diferentes a los minerales inorgánicos.
- La estructura tipo anillo de las fuentes orgánicas protege al mineral de reacciones indeseadas dentro del tracto gastrointestinal.
- Los quelatos atraviesan fácilmente la barrera intestinal pasando intactos al torrente sanguíneo.
- El uso de fuentes orgánicas facilita la absorción pasiva ya que las interacciones entre minerales y entre minerales y nutrientes son mínimas.
- El mineral orgánico se presenta en los tejidos “objetivos” de forma similar a como este lo necesita.
- Cada mineral de un quelato facilita la absorción del resto de minerales dentro del quelato.
- Los quelatos están cargados negativamente y por ello los minerales del complejo se absorben y metabolizan más eficientemente que los minerales de las formas inorgánicas.
- El proceso de quelación aumenta la solubilidad y facilita el movimiento del mineral a través de las membranas celulares.
- La quelación aumenta la solubilidad en agua y en lípidos del mineral lo que facilita la absorción pasiva.
- A bajos pH los quelatos son más estables que las fuentes inorgánicas.
- Los minerales contenidos en ciertos quelatos se transportan y absorben mediante el mismo mecanismo que los aminoácidos, lo que facilita su absorción.

Tal y como indican estos autores, faltan ensayos para validar experimentalmente y dirimir cuáles de estos mecanismos y beneficios percibidos son reales. En la práctica, el interés por el uso de estas fuentes minerales está aumentando, en gran medida, como consecuencia de que los técnicos perciben que son más biodisponibles que las fuentes inorgánicas (Wedekind et al., 1992). Hahn y Baker (1993) han encontrado que la concentración de Zn en plasma de cerdos suplementados con ZnSO₄, Zn-lisinato o Zn-metionato era sustancialmente superior a la que se encontraba en cerdos que recibían ZnO. Estos resultados, que tampoco muestran ventaja adicional por sustituir fuentes inorgánicas por orgánicas sobre la productividad, han sido corroborados por Wedekind et al. (1994a), Cheng et al. (1998) y Revy et al. (2002 y 2004). Sin embargo, la situación parece ser distinta en aves donde diversos investigadores (Wedekind et al., 1992; Cao et al., 2002) sí han encontrado mayor biodisponibilidad del Zn para las fuentes orgánicas. En corderos, Spears (1989) observó que la retención de Zn era superior con metionato de Zn que con óxido de Zn lo que era debido en gran medida a una menor excreción urinaria de Zn con el quelato. La razón de

estas diferencias en el metabolismo del Zn entre especies es desconocida pero probablemente esté relacionada con el distinto contenido en fitatos y Ca de las dietas, así como a diferencias en el pH y en las condiciones del tracto intestinal entre especies que puede afectar a la solubilidad de las fuentes minerales y a su tiempo de permanencia en el tubo digestivo (Revy et al., 2004).

En el caso del Cu, la biodisponibilidad de las fuentes disponibles ha sido evaluada utilizando el sulfato cúprico como estándar. Baker y Ammerman (1995) indican que la biodisponibilidad estimada del Cu de diversas fuentes de uso común varía entre el 88% y el 147% en comparación con el sulfato cúprico. En general, el Cu de quelatos tipo Cu-aminoácido y Cu-proteinato se absorbe con mayor eficacia que el sulfato (Hahn y Baker, 1993). Coffey et al. (1994) y Zhou et al. (1994a) han observado que el efecto positivo del Cu sobre el crecimiento del lechón fue superior con un complejo Cu-lisina que con CuSO_4 . Así mismo, Eckhart et al. (1999) han observado que el proteinato de cobre activaba en mayor medida la ceruloplasmina que cantidades equivalentes de sulfato de cobre.

La utilización del Fe suministrado como citrato, fumarato o gluconato es esencialmente similar a la que se obtiene con el sulfato ferroso heptahidratado, que es la fuente normalmente utilizada como patrón. Sin embargo, en porcino, el proteinato y el metionato de hierro son mejor utilizados que el sulfato (Ammerman et al., 1995). Close (1999) informa de un ensayo comercial en el que se suministró a las cerdas una fuente de hierro adicional en forma de proteinato desde una semana previa al parto hasta el final de la lactación a los 26 días. El proteinato mejoró el consumo de pienso de las cerdas y el peso de los lechones al destete. De acuerdo con el autor, los datos sugieren que el Fe orgánico atraviesa en cierta medida la barrera placentaria y es transferido a los fetos con mayor eficacia que el Fe de las fuentes inorgánicas. Smith et al. (1995) estudiaron la biodisponibilidad relativa de diversas fuentes de Mn en broilers de 21 días y encontraron que en relación con el MnSO_4 (100%) la disponibilidad del proteinato de Mn era del 120% y la del MnO , 91%. Diferencias similares fueron encontradas a los 49 días de edad (125% y 83% para el proteinato y el óxido, respectivamente).

En relación con el Se, se sabe que fuentes orgánicas tales como la Se-cistina, la Se-metionina y la Se-levadura propiamente producida son similares al selenito sódico, en cuanto a su capacidad para potenciar la actividad de la GSH-Px. Sin embargo, cuando el criterio de respuesta elegido es el de retención corporal, los valores de biodisponibilidad son superiores para las fuentes orgánicas (Mahan y Parret, 1996). Mahan (2004) observó que el suministro de Se orgánico, a partir de levaduras enriquecidas, a cerdas reproductoras mejoraba el estatus del Se tanto de la reproductora como de su descendencia en comparación con cerdas controles que recibían selenito sódico. Este autor encontró que el Se orgánico pasaba mejor a calostro y leche que la forma inorgánica, pero que ambas fuentes fueron similares en cuanto a mejora de la actividad de la GSH-Px. Asimismo, Surai (2003) indica que la transferencia del Se orgánico

de pienso a huevo o a tejidos embrionarios, o de pienso a feto, calostro o leche es más eficiente que la transferencia de Se en forma de selenito. Las diferencias se deben probablemente a las distintas vías metabólicas que siguen uno y otro; el Se orgánico es parte integral del aminoácido lo que no ocurre con las formas inorgánicas (Ammerman et al., 1995). Por otro lado, Kim y Mahan (2001b) han encontrado que ambas fuentes de Se, orgánica en base a levaduras enriquecidas o inorgánica a partir del selenito sódico, son tóxicas para el cerdo cuando se suministran a niveles de 7 a 10 ppm durante períodos prolongados de tiempo. Sin embargo, estos autores observaron que la fuente orgánica afectaba de forma más negativa que la fuente inorgánica a los parámetros relacionados con la reproducción mientras que lo contrario ocurría para los parámetros relacionados con la lactación. Estos datos sugieren la existencia de diferencias metabólicas en el uso del Se de estas dos fuentes de Se en el cerdo.

A pesar de los resultados expuestos, numerosos autores no han observado beneficio alguno en cuanto a biodisponibilidad o mejoras productivas al sustituir la fuente inorgánica de Fe (Lewis et al., 1995), Zn (Wedekind et al., 1994a; Schell y Kornegay, 1996; Revy et al., 2002), Cu (Baker y Ammerman, 1995; Chowdhury et al., 2004) o Mn (Baker y Halpin, 1987; Scheideler, 1991) por diferentes fuentes orgánicas. Schell y Kornegay (1996) encontraron que en porcino la disponibilidad del Zn era superior para el $ZnSO_4$ que para el ZnO y que los complejos de lisinato de Zn y de metionato de Zn daban valores intermedios. Revy et al. (2002) observaron en lechones recién destetados que la biodisponibilidad del Zn era similar entre el sulfato de Zn y un complejo de metionato-Zn. El Zn retenido, medido mediante la técnica de los balances, fue del 27% del ingerido independientemente de la fuente testada.

Las razones para las inconsistencias encontradas en cuanto al beneficio extra al utilizar fuentes orgánicas, no son conocidas pero pudiera ocurrir que los procesos técnicos seguidos para la obtención de las fuentes orgánicas sean diferentes. Así, podría darse el caso de que dos productos de nombre similar (p.e., quelato genérico) contengan diferentes cantidades biodisponibles del mineral. Se precisa pues, disponer de un método simple, fácil de estandarizar, para verificar y, en su caso, comparar el tipo y calidad de las diversas fuentes orgánicas comercializadas. Más aún, no existe método alguno que permita por un lado conocer el grado de quelación y la calidad del complejo elemento mineral y ligando orgánico y, por otra, relacionar estos datos con la biodisponibilidad *in vivo*. Recientemente, Li et al. (2004) han propuesto un método basado en análisis polarográfico para predecir la biodisponibilidad relativa de diversas fuentes orgánicas de Mn en base a características químicas. El método parece ser más sensible que los métodos basados en la solubilidad pero es necesario ahondar más en el mismo, previo a su implantación comercial. Hoy día resulta difícil evaluar correctamente los diversos productos disponibles en el mercado, tanto orgánicos como inorgánicos.

Un resumen de la disponibilidad de diversas fuentes de Cu se muestra en el cuadro 23 (Jondreville et al., 2002). Datos similares para el Zn se detallan en el cuadro 24 (Revy et al., 2003).

Cuadro 23.- Biodisponibilidad de diversas fuentes de cobre en ganado porcino (adaptado de Jondreville et al., 2002)

Fuente	Crecimiento	Índice Conversión	Concentración en hígado	Número de estudios
CuS	=	=	<	1
CuO	=	=	<	6
CuCO ₃	=	>	=	2
Cu ₂ (OH) ₃ Cl	=	=	=	6
Quelato Cu-aminoácidos	=	=	=	2
Complejo Cu-lisina	=>	=	=	11
Complejo Cu-metionina	=	=	=	2

Cuadro 24.- Biodisponibilidad de diversas fuentes de zinc en ganado porcino (adaptado de Revy et al., 2003)¹

	Valor relativo ¹	Número de estudios
Sulfato de Zn	100	Control
Óxido de Zn	55-87	6
Quelato Zn-aminoácidos	100	1
Complejo Zn-Met	77-120	5
Complejo Zn-Lys	79-110	6

¹ Valores relativos de Zn en suero/plasma.

4.- INTERACCIONES DE MINERALES TRAZA ENTRE SÍ Y CON OTROS NUTRIENTES

Hill y Matrone (1970) fueron los primeros en proponer que elementos, con características físicas y químicas similares, podrían actuar de forma antagonística entre sí en los sistemas biológicos y que la configuración electrónica de cada elemento en cuestión puede ser utilizada para predecir posibles interacciones. En base a esta teoría, es de esperar que metales relacionados entre sí compitan por los puntos de anclaje a las proteínas de transporte o por los enzimas que requieran metales como coenzimas. En esta sección describiremos muy sucintamente aquellas interacciones que pueden tener un impacto significativo en nutrición práctica de monogástricos.

4.1.- Influencia del ácido fítico y de la concentración de calcio de la dieta

El P se encuentra predominantemente en las semillas maduras donde queda almacenado en forma de mioinositol, un complejo tipo fitato. Estos complejos tienen una fuerte carga negativa y disponen de capacidad para quelar cationes divalentes y trivalentes, de forma que no son disponibles para monogástricos. Así, los fitatos no sólo reducen la disponibilidad del P sino también la de otros cationes tales como el Ca, Co, Cu, Fe, Mg y Zn (Revy et al., 2004), aunque parecen tener mayor afinidad por Zn y Cu que por el resto. Investigaciones realizadas en diversas especies han confirmado que el ácido fítico reduce la absorción de Zn y que el efecto inhibitorio aumenta con el nivel de Ca de la dieta, lo que probablemente se debe a la formación de complejos insolubles tipo Zn-Ca-fitato en el lumen de la porción proximal del tracto gastrointestinal (Lowe et al., 2002). La solubilidad del complejo y, consecuentemente la biodisponibilidad del mineral, va a depender en gran medida del pH, de la relación molar entre Ca, fitato y Zn y de la presencia de otros minerales (Revy et al., 2003). De aquí, que quepa esperar que la suplementación con fitasas mejore la utilización del Zn y del Cu tanto en aves como en porcino. De hecho, Adeola et al. (1995) han observado que la retención aparente del Zn en cerdos era aproximadamente del 29%, independientemente del nivel de Zn ingerido. Sin embargo, cuando se añadían fitasas la retención aumentaba hasta un 43 y un 48% en las dietas que incluían 0 y 100 mg de Zn extra/kg de dieta, respectivamente. Revy et al. (2003) estiman que 1.000 unidades de fitasa exógena añadida por kg de pienso, equivalen a incluir 24 ppm de Zn como sulfato de zinc en dietas para lechones de 15 kg de peso. Datos similares o incluso más positivos para las fitasas han sido presentados por Revy et al. (2004). Estos autores encuentran que al añadir 1.200 unidades de fitasa por kg de pienso, la biodisponibilidad del Zn aumentaba entre el 111 y el 269% en función del criterio elegido para su evaluación.

Wedekind et al. (1992) compararon la biodisponibilidad del metionato y del sulfato de zinc en pollos utilizando bien una dieta sintética, una dieta semisintética o una dieta basada en maíz-soja. El Zn del metionato se absorbió mejor que el del sulfato y las diferencias fueron más notables cuando se utilizaron dietas comerciales. Los autores estimaron que la biodisponibilidad del Zn del metionato en relación con la del sulfato era del 117% en la dieta sintética pero del 206% en la dieta comercial basada en vegetales. Los resultados indican que fitatos y fibra de la dieta reducen la absorción del Zn, especialmente cuando se utilizan fuentes inorgánicas. De forma similar, Wedekind et al. (1994b) han encontrado que la biodisponibilidad del metionato era del 166% en relación con la del sulfato de Zn cuando la dieta contenía 0,60% de Ca y de un 292% cuando el contenido en Ca era del 0,74%. Por otra parte, Augspurger et al. (2004) han demostrado que niveles farmacológicos de Zn pueden quelar el complejo fitato, reduciendo la capacidad de las fitasas exógenas para liberar P en un 30%. Por tanto, el efecto del Zn sobre la eficacia de las fitasas puede tener enorme significancia práctica en lechones recién destetados, donde el uso de altos niveles de Zn es una práctica común. Sin embargo, en este mismo informe, se demostró que niveles farmacológicos de Cu (200 mg/kg de dieta) no tuvieron efecto alguno sobre la actividad de estas enzimas.

4.2.- Interacción entre minerales

Las interacciones entre minerales son frecuentes a lo largo de toda la cadena alimentaria pero las más importantes tienen lugar en el tracto gastrointestinal. Los mecanismos son diversos e incluyen competencia para unirse a los ligandos para la absorción, coadaptación y modificación de diversas variables fisiológicas (Fairweather-Tait, 1995). El antagonismo mutuo entre Zn y Cu es un buen ejemplo de interacciones biológicas de tipo competitivo entre metales con propiedades similares. Niveles altos de Zn inhiben la absorción intestinal, la acumulación en hígado y la transferencia del Cu a través de la placenta. Asimismo, el exceso de Zn induce síntomas clínicos de deficiencia en Cu (Bremmer y Beattie, 1995). La interacción reversa, es decir, del exceso de Cu sobre el metabolismo del Zn, es menos clara y no hay evidencias consistentes de que el exceso de Cu reduzca la absorción del Zn. Bremmer y Beattie (1995) recomiendan cantidades supra nutricionales de Zn para reducir la acumulación de Cu que tiene lugar en personas que ingieren altas cantidades de Cu o afectadas por problemas genéticos relacionados con el metabolismo del Cu. Estos autores advierten que debe evitarse el exceso de Zn cuando el estatus del Cu es subóptimo. En casos de intoxicación por Cu en ganado ovino, la inclusión de Zn puede aliviar el problema. Por otro lado, en lechones altos niveles de Zn pueden poner en peligro el estatus del Fe (y del Cu).

Niveles altos de Cu y Fe deprimen la absorción del Zn y el exceso de cualquiera de ellos tiende a aumentar las necesidades de los otros dos (Yu et al., 1994; Fairweather-Tait, 1995). La presencia de Cu y Fe en el contenido gastrointestinal afecta a la absorción de Zn pero no está claro si el problema se debe a interferencias a nivel celular (competencia por transportadores comunes presentes en la membrana celular o por proteínas citosólicas relacionadas con el transporte intracelular del Zn) o a que Cu y Fe interaccionan con el Zn formando complejos no absorbibles dentro del lumen intestinal (Swinkels et al., 1994). En lechones, un exceso de Cu en la dieta reduce las reservas de Fe en hígado lo que puede aumentar la incidencia de anemias. Por tanto, cuando se utilizan niveles altos de Cu puede ser recomendable añadir Fe extra a la dieta (hasta 250 g/kg pienso) (Bradley et al., 1983). En casos de interacción, también puede ser recomendable el uso de minerales en forma orgánica. Así, Du et al. (1996) alimentan ratas con dietas sintéticas que contenían 1.000 ppm de Zn y observan que el suministro de Cu en forma orgánica (lisinato o proteinato) daba lugar a niveles de Cu, Fe y Zn en hígado superiores a los que se obtenían cuando se usaba sulfato como fuente de Cu. Estos resultados parecen indicar que el Cu orgánico se absorbe mediante mecanismos diferentes al Cu inorgánico y que el primero no interfiere con la absorción del Zn o del Fe. Por otro lado, aunque menos importante que los que existen entre ellos, debe prestarse atención a las interacciones entre minerales y vitaminas. Así, una deficiencia en riboflavina deprime la absorción del Fe y aumenta las pérdidas de Fe endógeno en el tracto gastrointestinal lo que puede aumentar aún más las necesidades del lechón joven en este elemento (Powers, 1995).

Una interacción interesante, de particular importancia en rumiantes, es la del Cu, Mo y azufre (S). Un exceso de Mo reduce la retención del Cu, así como la síntesis de ceruloplasmina y, como consecuencia, aumenta la excreción urinaria de Cu. El exceso de S exagera y potencia esta interacción primaria lo que probablemente se deba a la formación de complejos insolubles Cu-Mo-S en el tracto gastrointestinal, con la consiguiente reducción de la absorción. Por tanto, cuando utilizemos niveles farmacológicos de Cu en cerdos o en ganado ovino que padece praderas contaminadas con Cu, podría ser conveniente incluir cantidades adicionales de Mo y S en la mezcla mineral. Asimismo, en presencia de altos contenidos de Mo, el quelato orgánico de Cu podría ser utilizado mejor por los animales que las formas inorgánicas tradicionales, ya que se evita la formación de complejos con el Mo y el S en el tracto digestivo.

5.- MINERALES TRAZA Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

La acumulación de nutrientes proveniente de residuos orgánicos animales en aguas superficiales, corrientes fluviales y acuíferos está generando problemas e interfiriendo con el desarrollo de los sistemas de producción intensivos. En las condiciones actuales, más del 95 al 99% de todos los elementos traza ingeridos aparecen en las heces (Nys, 2001). La mayor parte de la problemática se ha relacionado con la excreción de N y P, pero muchas áreas geográficas europeas son actualmente sensibles a la contaminación con Cu y Zn lo que se debe al uso de dosis farmacológicas para controlar problemas digestivos en lechones. En contraposición a lo que ocurre con el N y el P, Cu y Zn permanecen firmemente unidos al terreno y no migran con las aguas de lluvia, excepto en caso de erosión (Ferket et al., 2002). Por tanto, a menos que sean absorbidos y utilizados para el crecimiento de las plantas, se acumularán en el suelo causando toxicidad y reducción del rendimiento de las cosechas. Williams et al. (1999) ha listado cinco estrategias básicas para reducir la problemática ganadera relacionada con la contaminación ambiental: 1) utilizar los purines como fertilizantes; 2) reciclar los purines a través de la alimentación de rumiantes; 3) redistribuir los purines producidos transportando el exceso desde las áreas de producción hasta las áreas deficientes; 4) reducir la concentración mineral de los piensos; y 5) mejorar la eficiencia de utilización por el animal. Claramente, las mejores estrategias son utilizar el purín como fertilizante y reducir el nivel de los elementos traza en los piensos.

Un exceso de Zn en el suelo es tóxico para las plantas y, si la concentración es superior a 200-300 ppm, reduce la actividad de la microflora presente en el suelo. El purín producido por cerdos en cebo alimentados con dietas suplementadas con 100 a 250 ppm de Zn contiene entre 850 y 1300 mg Zn/kg MS (Levasseur y Texier, 2001; Revy et al., 2003). Paboeuf et al. (2001) han observado que al reducir el Zn en los piensos de 150 a 90 ppm, el contenido en las heces se reducía en un 40%. Asimismo, Revy et al. (2003) indican que al reducir el nivel de Zn en el pienso de lechones de 3.000 a 150 ppm y del pienso de cerdos de 100 a 60 ppm, se reducía la concentración del mineral en las heces en un 400 % (desde 1.860 a 450 mg/kg MS) (cuadro 25). De forma similar, Jondreville et al. (2002) han observado que la reducción del

nivel de Cu del pienso de 175 a 6 ppm en lechones y de 100 a 4 ppm en cebo reducía hasta treinta veces el contenido en Cu de las heces (de 911 a 31 mg/kg MS) (cuadro 26). En pollos, Dozier et al. (2003) han encontrado valores similares; una reducción en el contenido de Zn de los piensos de 120 a 40 mg/kg redujo la excreción en un 50% y una reducción del Cu añadido de 12 a 4 mg/kg lo hizo en un 35%. Estos trabajos muestran de forma clara la necesidad de controlar y en su caso reducir, el nivel de elementos traza en pienso, niveles que por otra parte son en muchos casos innecesarios. Es muy posible que la EU-25 continúe reduciendo el contenido máximo en elementos traza de los piensos (DOCE, 2003), una decisión que puede favorecer a medio plazo el uso de enzimas tipo fitasas y de fuentes minerales de mayor disponibilidad.

Cuadro 25.- Estimación de la contaminación del suelo debido al zinc contenido en los purines de cerdo (adaptado de Revy et al., 2003)

	Escenario		
	A	B	C
Zn en alimento, ppm			
Lechones	100	2000	3000
Cerdos de engorde	60	100	150
Zn excretado			
g Zn/cerdo	14	36	60
mg Zn/kg MS purín	450	1120	1860
Tiempo necesario para alcanzar 300 mg Zn/kg MS de suelo ¹			
Min, años	270	110	55
Max, años	1100	390	190

¹ Variable según el proceso y forma de aporte de purín utilizado el modelo.

Cuadro 26.- Estimación de la contaminación del suelo debido al cobre contenido en los purines de cerdo (adaptado de Jondreville et al., 2002)

	Escenario		
	A	B	C
Cu en alimento, ppm			
Lechones	6	175	175
Cerdos de engorde	4	35	100
Cu excretado			
g Cu/cerdo	1	14	29
mg Cu/kg MS purín	31	443	911
Tiempo necesario para alcanzar 100 mg Cu/kg MS de suelo ¹			
Min, años	647	83	16
Max, años	16.024	289	56

¹ Variable según el proceso y forma de aporte de purín utilizado el modelo.

6.- CONCLUSIONES

La información disponible sobre las necesidades de los animales y la biodisponibilidad de las fuentes comerciales utilizadas es escasa e incompleta. Dada la importancia de preservar el medio ambiente es necesario realizar ensayos en esta área crítica con animales más productivos. Con la información disponible no es posible ni conveniente recomendar a la industria niveles de uso fijos y absolutos sino más bien un rango de utilización en base a los estudios científicos disponibles y a la experiencia práctica de cada nutricionista. Así, los valores inferiores dentro del rango recomendado estarían mejor adaptados a productores para los que el coste es importante y donde el nutricionista tiene un buen control e información de lo que ocurre en la cadena de producción, con acceso rápido a granjas, mataderos y lineal del supermercado. En casos como este, representado por empresas con integración vertical de la cadena, un buen seguro a coste elevado no es probablemente la mejor solución. Por otra parte, los valores superiores dentro del rango son más aceptables cuando queremos, o necesitamos, un buen seguro. Sería el caso de empresas de genética o granjas con alto potencial de producción, integraciones horizontales con venta a mercados de calidad pero sin interrelación entre las partes, y venta libre de piensos. En estas circunstancias, un buen seguro, como el que da la extra suplementación mineral, con respecto a las recomendaciones de los centros institucionales, puede ser conveniente. El uso de fitasas y de fuentes orgánicas ha aumentado de forma espectacular en los últimos años y es posible que ayuden a mejorar la productividad y a reducir el problema de polución ambiental. Sin embargo, se necesitan más datos para evaluar correctamente su valor en monogástricos y mientras estos datos llegan, conviene ser cuidadoso al comparar y decidir qué fuente utilizar dentro de las disponibles en el mercado.

7.- REFERENCIAS

- AAFCO (1997) Official Publication. Assoc. Amer. Feed Control Officials. Inc. St. Louis. Missouri, EEUU.
- AAFCO (1999) Official Publication. Assoc. Amer. Feed Control Officials. Inc. St. Louis. Missouri, EEUU. pp 165-167.
- ADEOLA, O., LAWRENCE, B.V., SUTTON, A.L. y CLINE, T.R. (1995) *J. Anim. Sci.* 73: 3384-3391.
- AINPROT (1984) Tablas de composición de primeras materias primas para nutrición animal. AINPROT y MAPA, Madrid.
- AMER, M.A. y ELLIOT, J.I. (1973) *Can. J. Anim. Sci.* 53: 139-145.
- AMMERMAN, C.B., HENRY, P.R. y MILES, R.D. (1993) *Feedstuffs*, May 3; 14, 21.
- AMMERMAN, C.B., BAKER, D.H. y LEWIS, A.J. (1995) En: *Bioavailability of Nutrients for Animals. Amino Acids, Minerals, and Vitamins*. Academic Press, New York, EEUU.
- ANKARI, A.A., NAJIB, H. y AL HOZAB, A. (1998) *Br. Poultry Sci.* 39: 393-397.

- AOAC (1996) Official Methods of Analysis (16^a Ed.). AOAC. Gaithersburg, Maryland, EEUU.
- APPLE, J.K., ROBERTS, W.J., MAXWELL, C.V., BOGER, C.B., FAKLER, T.M., FRIESEN, K.G. y JOHNSON, Z.B. (2004) *J. Anim. Sci.* 82: 3267-3276.
- APPLEGATE, T.J., BANKS, K.M. y PANG, Y. (2004) *Proc. California Animal Nutr. Conf. Fresno*, California, EEUU. pp: 246-252.
- ARC (1981) *The Nutrient Requirements of Pigs*. CAB. Farnham Royal. Reino Unido.
- ARMSTRONG, T.A., WILLIAMS, C.M., SPEARS, J.W. y SCHIFFMAN, S.S. (2000) *J. Anim. Sci.* 78: 859-864.
- ASHIDA, K.Y., TAMURA, A., MATSUI, T., YANO, H. y NAKAJIMA, T. (1999) *J. Anim. Sci.* 70: 306-311.
- ASHMEAD, D. (1979) *J. Anim. Sci.* 49: 235 (Abstr.).
- ATHERTON, D. (1993) *A nutritional approach to maximizing carcass leanness. En: The roles of amino acid chelates in animal nutrition*. Ashmead, H.J.D. (Eds.). Thomas and Joseph Limited. Norwich, Reino Unido.
- AUGSPURGER, N.R., SPENCER, J.D., WEBEL, D.M. y BAKER, D.H. (2004) *J. Anim. Sci.* 82: 1732-1739.
- BAKALLY, R.I., PESTI, G.M., RAGLAND, W.L. y KONJUFKA, V. (1995) *Poultry Sci.* 74: 360-365.
- BAKER, D.H. y HALPIN, K.M. (1987) *Poultry Sci.* 66: 1561-1563.
- BAKER, D.H. y AMMERMAN, C.B. (1995) Copper availability. En: *Bioavailability of Nutrients for Animals. Amino Acids, Minerals, and Vitamins*. Ammerman, C.B., D.H. Baker y A.J. Lewis (Eds.). Academic Press. New York, EEUU. pp 127-156.
- BANKS, K.M., THOMPSON, K.L., RUSH, J.K. y APPLEGATE, T.J. (2003) *Poultry Sci.* 92: 36 (Abstr.).
- BARBER, R.S., BRAUDE, R. y MITCHELL, K.E. (1955) *Br. J. Nutr.* 9: 378-381.
- BARBER, R.S., BRAUDE, R., MITCHELL, K.E., ROOK, J.A.F. y ROWELL, J.G. (1957) *Br. J. Nutr.* 11: 70-79.
- BAYYARI, G. R., HUFF, W. E., BEASLEY, J. N., BALOG, J. M. y RATH, N. C. (1996) *Poultry Sci.* 75: 1961-1969.
- BERRY, W.D. y BRAKE, J. (1987) *Poultry Sci.* 66: 218-226.
- BOLEMAN, S.L., BOLEMAN, S.J., BIDNER, T.D., SOUTHERN, L.L., WARD, T.L., PONTIF, J.E. y PIKE, M.M. (1995) *J. Anim. Sci.* 73: 2033-2042.
- BOSSI, P., CACCIAVILLANI, J.A., CASINI, L., FIEGO, D.P., MARCHETTI, M. y MATTUZZI, S. (2000) *Meat Sci.* 54: 119-126.
- BRADLEY B.D, GRABER, G., CONDON, R.J. y FROBISH, L.T. (1983) *J. Anim. Sci.* 56: 625-630.
- BRAUDE, R. (1980) Twenty five years of widespread use of copper as an additive to diets of growing pigs. En: *Copper in animal wastes and sewage sludge*. L'Hermite, P. y J. Dehandtschutter (Eds.). Proc. EEC Workshop, INRA Publisher. Bordeaux, Francia. pp 3-15.

- BREMNER, I. y BEATTIE, J.H. (1995) *Proc. Nutr. Soc.* 54: 489-499.
- BSAS (2003) *Nutrient Requirement Standards for Pigs*. British Society of Animal Science. Penicuik, Reino Unido.
- CAO, J., DAVIS, P.R., COUSINS, R.J., MILES, R.D., LITTELL, R.C. y AMMERMAN, C.B. (2002) *Anim. Feed Sci. Technol.* 101: 161-170.
- CARLSON, M. (2004) Piglet diets- can we do without zinc oxide and copper sulfate?. En: *Alltech Mineral Symposium*, Dublin. Nottingham University Press (en prensa).
- CHENG, J., KORNEGAY, E.T. y SCHELL, T. (1998) *J. Anim. Sci.* 76: 1064-1074
- CHIOU, P.W., CHEN, K.L. y YU, B. (1997) *Anim. Feed Sci. Technol.* 67: 49-60
- CHIOU, P.W., CHEN, K.L. y YU, B. (1998) *Anim. Feed Sci. Technol.* 73: 161-171
- CHOUWDHURY., S.D., PAIK, I.K., NAMKUNG, H. y LIM, H.S. (2004) *Anim. Feed Sci. Technol.* 115: 281-293.
- CLOSE, W.H. (1999) Organic minerals for pigs: an update. En: *Nutritional Biotechnology in the Feed Industry*. Lyons. T.P. y K.A. Jacques (Eds.). Alltech 15th Annual Symposium. Nottingham University Press. Nottingham, Reino Unido. pp 51-60.
- COFFEY, R.D., CROMWELL, G.L. y MONEGUE, H.J. (1994) *J. Anim. Sci.* 72: 2880-2886.
- CROMWELL, G.L., LINDEMANN, M.D., MONEGUE, H.J., HALL, D.D. y ORR, D.E. (1998) *J. Anim. Sci.* 76: 118-123.
- CVB (2002) Veevoedertabel. Chemische samenstelling, verteerbaarheid en voederwaarde van voedermiddelen. Centraal Veevoederbureau. Lelystad, Países Bajos.
- D'SOUZA, D.N., WARNER, R.D., LEURY, B.J. y DUNSHEA, F.R. (1998) *J. Anim. Sci.* 76: 104-109.
- DAVIES, N.T. y OLPIN, S.E. (1979) *Br. J. Nutr.* 41: 590-603.
- DAVIS, R.H., FEAR, J. y WINTON, A.C. (1996) *Br. Poultry Sci.* 37: 87-94.
- DAVIS, M.E., MAXWELL, C.V., BROWN, D.C., DE RODAS, B.Z., JOHNSON, Z.B., KEGLEY, E.B., HELLWIG, D.H. y DVORAK, R.A. (2002) *J. Anim. Sci.* 80: 2887-2894.
- DOCE (2003) Reglamento (CE) N° 1334/2003 de la comisión por la que se modifican las condiciones para la autorización de una serie de aditivos en la alimentación animal pertenecientes al grupo de los oligoelementos. BOE, Madrid.
- DOCE (2004) Reglamento 2004/C 50/01 de la comisión. Listado de los aditivos autorizados en los piensos. Publicada conforme a lo dispuesto en la letra b) del artículo 9 de la Directiva 70/524/CEE del Consejo sobre aditivos en la alimentación animal. BOE, Madrid.
- DOVE, C.R. (1995) *J. Anim. Sci.* 73: 166-171.
- DOVE, C.R. y EWAN, R.C. (1990) *J. Anim. Sci.* 68: 2407-2413.
- DOVE, C.R. y EWAN, R.C. (1991) *J. Anim. Sci.* 69: 1994-(2000)
- DOZIER, W.A. (2004) *Proc. Arkansas Nutri. Conf. Feed Manuf.* Rogers, Arkansas, EEUU. pp 1-11.
- DOZIER, W.A., DAVIS, A.J., FREEMAN, M.E. y WARD, T.L. (2003) *Br. Poultry Sci.* 44: 726-731.

- DU, Z., HEMKEN, R.W., JACKSON, J.A. y TRAMMELL, D.S. (1996) *J. Anim. Sci.* 74: 1657-1663.
- ECKHART, G.E., GREENE, L.W., CARSTENS, G.E. y RAMSEY, W.S. (1999) *J. Anim. Sci.* 77: 244-249.
- EDWARDS, H.M. y BAKER, D.H. (1999) *J. Anim. Sci.* 77:2730-2735.
- EWING, H.P., PESTI, G.M., BAKALLI, R.I. y MENTEN, J.F. (1998) *Poultry Sci.* 77: 445-448.
- FAIRWEATHER-TAIT, S.J. (1995) *Proc. Nutr. Soc.* 54: 465-473.
- FEDNA (2003) *Tablas de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos (2ª Ed.)*. De Blas C., G.G. Mateos y P.G. Rebollar (Eds.). Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. Madrid.
- FERKET, P.R., VAN HEUGTEN, E., VAN KEMPEN, T.A. y ANGEL, R. (2002) *J. Anim. Sci.* 80 (E. Suppl.2): E168-182.
- FOX, T.E., EAGLES, J. y FAIRWEATHER-TAIT, S.J. (1997) Bioavailability of an iron glycine chelate for use as a food fortificant compared with ferrous sulphate. En: *Trace Elements in Man and Animals -9- Proceedings of the 9th International Symposium*. Fisher, P.W., M.R. L'Abbé, K.A. Cockell y R.S. Gibson (Eds.). NRC Research Press. Ottawa, Canada. pp. 460-462.
- FREMAUT, D. (2003) Trace mineral proteinates in modern pig production: reducing mineral excretion without sacrificing performance. En: *Nutritional Biotechnology in the Feed and Food Industries*. Lyons. T.P. y K.A. Jacques (Eds.). Alltech 19th Annual Symposium. Nottingham University Press. Nottingham, Reino Unido. pp 171-178.
- GLADYSER, V.N. (2001) Identity, evolution and function of selenoproteins and selenoprotein genes. En *Selenium: Its Molecular Biology and Role in Human Health*. Hatfield, D.L. (Ed.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Países Bajos. pp. 99-104.
- GUENTHNER, E., CARLSON, C.W. y EMERICH, R.J. (1978) *Poultry Sci.* 57: 1313-1324.
- HAHN, J.D. y BAKER, D.H. (1993) *J. Anim. Sci.* 71: 3020-3024.
- HENRY, P.R. y AMMERMAN, C.B. (1995) Selenium availability. En: *Bioavailability of Nutrients for Animals*. Ammerman, C.B., D.H. Baker y A.J. Lewis (Eds.). Academic Press, New York, EEUU. pp 303-348.
- HILL, C.H. y MATRONE, G. (1970) *Federation Proc.* 29:1474-1481.
- HILL, M.G., CROMWELL, G.L., CRENSHAW, T.D., DOVE, C.R., EWAN, R.C., KNABE, D.A., LEWIS, A.J., LIBAL, G.W., MAHAN, D.C., SHURSON, G.C., SOUTHERN, L.L. y VEUM, T.L. (2000) *J. Anim. Sci.* 78: 1010-1016.
- HILL, M.G., MAHAN, D.C., CARTER, S.D., CROMWELL, G.L., EWAN, R.C., HARROLD, R.L., LEWIS, A.J., MILLER, P.S., SHURSON, G.C. y VEUM, T.L. (2001) *J. Anim. Sci.* 79: 934-941.

- HOFFMAN, D.J., HEINZ, G.H., LeCAPTAIN, L.J., EISEMAN, J.D. y PENDLETON, G.W. (1996) *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 31: 120-127.
- HYPOR (1999) *Guía de necesidades de nutrientes de ganado porcino*. Boxmeer, Países Bajos.
- INRA-AFZ. (2002) *Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage: Porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux and poissons*. Sauvant, D., J.M. Perez y G. Tran (Eds.). INRA, Paris, Francia.
- INRA (1989) *L'alimentation des animaux monogastriques: Porc, lapin, volailles (2ª Ed.)*. INRA, Paris, Francia.
- JOHNSON, E., NICHOLSON J. L. y DOERR, J.A. (1985) *Br. Poultry Sci.* 26: 171-177
- JONDREVILLE, C., REVY, P.S., JAFFREZIC, A. y DOURMAD, J.Y. (2002) *INRA Prod. Anim.* 15: 247-265.
- JUARENA, G. y DANELON, J. (2001) *Tablas de composición de alimentos para rumiantes de la región Pampeana Argentina*. Hemisferio Sur, S.A. Buenos Aires, Argentina.
- KAHN, M.Z., SZAREK, J., MARCHALUK, E, MACIG, A. y BARTLEWSKI, P.M. (1996) *Biol. Trace Elements Res.* 49: 129-138.
- KANSAS STATE UNIVERSITY (1995) *Swine Nutrition Guide*. Cooperative Extension Service. Manhattan, Kansas, EEUU.
- KANSAS STATE UNIVERSITY (1997) *Swine Nutrition Guide*. Cooperative Extension Service. Manhattan, Kansas, EEUU.
- KANSAS STATE UNIVERSITY (2003) *Starter pig and breeding herd recommendations*. Cooperative Extension Service. Manhattan, Kansas, EEUU.
- KATS, L.J., NELSEN, J.L., GOODBAND, R.D., TOKACH, M.D., FRIESEN, K.G., OWEN, K.Q. y RICHERT, B.T. (1994) *J. Anim. Sci.* 72: 217 (Abstr.).
- KEGLEY, E.B. y SPEARS, J.W. (1995) *J. Anim. Sci.* 73: 2721-2726.
- KENNEDY, K.J., RAINS, T.M. y SHAY, N.F. (1998) *J. Nutr.* 128: 43-49.
- KIDD, M.T., FERKET, P.R. y QURESHI, M.A. (1996) *World's Poultry Sci. J.* 52: 309-324.
- KIM, Y.Y. y MAHAN, D.C. (2001a) *J. Anim. Sci.* 79: 949-955.
- KIM, Y.Y. y MAHAN, D.C. (2001b) *J. Anim. Sci.* 79: 956-966.
- KIM, Y.Y. y MAHAN, D.C. (2001c) *J. Anim. Sci.* 79: 942-948.
- KLASING, K. (1984) *Am. J. Physiol.* 247: R901-R904.
- KNIGHT, C.D., KLASING, K.C. y FORSYTH, D.M. (1983) *J. Anim. Sci.* 57: 387-395.
- KOŁODZIEJ, A. y JACYNO, E. (2004) *Elect. J. Polish Agric. Univ.* 7: 102-107.
- KORNEGAY, E.T., HEUGTEN, P.H., LINDEMANN, M.D. y BLODGETT, D.J. (1989) *J. Anim. Sci.* 67: 1471-1477.
- KORNEGAY, E.T., WANG, Z., WOOD, C.M. y LINDEMANN, M.D. (1997) *J. Anim. Sci.* 75: 1319-1323.

- KUVIBIDLA, S. y SURENDRA, B. (2002) Role of iron in immunity and infection. En: *Nutrition and Immune Function*. Calder, P.C., C.J. Field y H.S. Gill (Eds.). CABI Publishing. Wallingford. Reino Unido. pp. 209-228.
- LARSEN, C.T., PIERSEN, F.W. y GROSS, W.B. (1997) *Biol. Trace Elements Res.* 58: 169-176.
- LEACH, R.M. y GROSS, J.R. 1983. *Poultry Sci.* 62: 499-504.
- LEESON, S., ZUBAIR, A.K., SQUIRES, E.J. y FORSBERG, C. (1997) *Poultry Sci.* 76: 59-66.
- LEVANDER, O.A., AGER, A.L. y BECK, M.A. (1995) *Proc. Nutr. Soc.* 54: 475-487.
- LEVASSEUR, P. y TEXIER, C. (2001) *J. Rech. Porcine en France* 33: 57-62.
- LEWIS, A.J., MILLER, P.S. y WOLVERTON, C. K. (1995) *J. Anim. Sci.* 73: 172 (Abstr.).
- LEWIS, P.D. (2004) *Br. J. Nutr.* 91:29-39.
- LI, S., LUO, X., LIU, B., CRENSHAW, T.D., KUANG, X., SHAO, G. y YU, S. (2004) *J. Anim. Sci.* 82: 2352-2363.
- LIEBHOLZ, J.M., SPEER, V.C. y HAYS, V.W. (1962) *J. Anim. Sci.* 21: 772-776.
- LINDEMANN, M.D., CARTER, S.D. CHIBA, L.I, DOVE, C.R., LEMIEUX, F.M. y SOUTHERN, L.L. (2004) *J. Anim. Sci.* 82: 2972-2977.
- LINDEMANN, M.D., WOOD, C.M., HARPER, A.F., KORNEGAY, E.T. y ANDERSON, R.A. (1995) *J. Anim. Sci.* 73: 457-465.
- LOWE, N.M., FRASER, W.D. y JACKSON, M.J. (2002) *Proc. Nutr. Soc.* 61: 181-185.
- MABE, I., RAPP, C., BAIN, M.M. y NYS, Y. (2003) *Poultry Sci.* 82: 1903-1913.
- MAHAN, D.C. (2004) The role of selenium and Sel-Plex[®] in sow reproduction. En: *Nutritional Biotechnology in the Feed and Food Industries*. Lyons. T.P. y K.A. Jacques (Eds.). Alltech 20th Annual Symposium. Nottingham University Press. Nottingham, Reino Unido. pp 131-139.
- MAHAN, D.C. y PARRETT, N.A. (1996) *J. Anim. Sci.* 74: 2967-2974.
- MAHAN, D.C. y SHIELDS, R.G. (1998) *J. Anim. Sci.* 76: 506-512.
- MARIN-GUZMAN, J., MAHAN, D.C., CHUNG, Y.K., PATE, J.L. y POPE, W.F. (1997) *J. Anim. Sci.* 75: 2994-3003.
- MARIN-GUZMAN, J., MAHAN, D.C. y PATE, J.L. (2000) *J. Anim. Sci.* 78: 1537-1543.
- MATEOS, G.G. (2004) *Suis* 10: 3-4.
- MATEOS, G.G. 1987. Alimentación de porcino. En: *Nutrición y Alimentación del ganado*. De Blas, C., G.G. Mateos y A. Argamenteria, (Eds.). Mundi-Prensa, Madrid. pp 337-356.
- MATEOS, G.G. y DE BLAS, C. (1998) Minerals, vitamins and additives. En: *The Nutrition of the Rabbit*. C De Blas y J. Wiseman (Eds.). CABI Publishing. Wallingford, Reino Unido.
- MATEOS, G.G., LAZARO, R, ASTILLERO, J.R. y PEREZ, M. (2004) Trace minerals: what the text book don't tell you. En: *Minerals Alltech Symposium*, Dublin. Nottingham University Press, Reino Unido (en prensa).

- MATTHEWS, J.O., HIGBIE, A.D., SOUTHERN, L.L., COOMBS, D.F., BIDNER, T.D. y ODGAARD, R.L. (2003) *J. Anim. Sci.* 81: 191-196.
- MAVROMICHALIS, I., PETER, C.M., PARR, T.M., GANESSUNKER, D. y BAKER, D.H. (2000) *J. Anim. Sci.* 78: 2896-2902.
- McDOWELL, L. R. (2003) *Minerals in Animal and Human Nutrition*. (2ª Ed.). Elsevier. Países Bajos.
- McKENZIE, R.C., ARTHUR, J.R., MILLER, S.M., RAFFERTY, T.S. y BECKETT, G.J. (2002) Selenium and the immune system. En: *Nutrition and immune function*. Calder, P.C., C.J. Field y H.S. Gill (Eds.). CABI Publishing. Wallingford, Reino Unido. pp. 239-250.
- MILES, R.D. y HENRY, P.R. (1999) *Proc. California Anim. Nutr. Conf.* Fresno, California, EEUU. pp. 1-24.
- MILES, R.D., O'KEEFE, S.F., HENRY, P.R., AMMEREMAN, C.B. y LUO, X.G. (1998) *Poultry Sci.* 77: 416-425.
- MOHANA, C y NYS, I. (1998) *Br. Poultry Sci.* 39: 536-543.
- NEBRASKA y SOUTH DAKOTA STATE UNIVERSITY (2000) *Swine Nutrition Guide*. Nebraska Cooperative Extension. EC 95-273-C, Lincoln, Nebraska, EEUU.
- NIELSEN, F. (1996) *Nutr. Today* 31: 226-233.
- NILIPOUR, A.H., DIAZ, C., ROSALES, C y SAVAGE, T.F. (1999) *Poultry Sci.* 78: 26 (Abstr.).
- NRC (1980) *Mineral tolerance of domestic animals*. Nat. Acad. Press. Washington, DC, EEUU.
- NRC (1994) *Nutrient Requirements of Poultry*. 9th rev. ed. Nat. Acad. Sci., Washington DC, EEUU.
- NRC (1997) *The role of chromium in animal nutrition*. Nat. Acad. Sci., Washington DC, EEUU.
- NRC (1998) *Nutrient Requirements of Swine*. 10th rev. ed. Nat. Acad. Sci., Washington DC, EEUU.
- NYS, Y. (2001) *INRA Prod. Anim.* 14: 171-180.
- OAYAGI, S y BAKER, D.H. (1995) *Poultry Sci.* 74: 208-211.
- OSBORNE, J.C. y DAVIS, J.W. (1968) *J. Amer. Vet. Medical Soc. Assoc.* 152: 1630-1632.
- PABOEUF, F., CALVAR, C., LANDRAIN, B. y ROY, H. (2001) *J. Rech. Porcine en France* 33: 49-56.
- PAGE, T.G., SOUTHERN, L.L., WARD, T.L. y THOMPSON, D.L. (1993) *J. Anim. Sci.* 71: 656-662.
- PESTI, G.M. y BAKALLI, R.I. (1996) *Poultry Sci.* 75: 1086-1091.
- PETERS, J.C. y MAHAN, D.C. (2004) *J. Anim. Sci.* 82: 52 (Abstr.).
- PIMENTEL, J.L., COOK, M.E. y GREGER, J.L. (1991) *Poultry Sci.* 70: 947-954.
- POULSEN, H.D. (1995) *Acta Agric. Scand. Sect. A. Anim. Sci.* 45: 159-167.
- POUPOULIS, C. y JENSEN, L.S. (1976) *Poultry Sci.* 54: 113-121.
- POWERS, H.J. (1995) *Proc. Nutr. Soc.* 57: 509-517.

- PRASAD, A.S. (2002) Zinc, infection and immune function. En: *Nutrition and immune function*. Calder, P.C., C.J. Field y H.S. Gill (Eds.). CABI Publishing. Wallingford, Reino Unido. pp: 193-207.
- RAYMAN, M.P. (2002) *Proc. Nutr. Soc.* 61: 203-215.
- REY, P.S., JONDREVILLE, C., DOURMAD, J.Y., GUINOTTE, F. y NYS, Y. (2002) *Anim. Res.* 51: 315-326.
- REY, P.S., JONDREVILLE, C., DOURMAD, J.Y. y NYS, Y. (2003) *INRA Prod. Anim.* 16: 3-18.
- REY, P.S., JONDREVILLE, C., DOURMAD, J.Y. y NYS, Y. (2004) *Anim. Feed Sci. Technol.* 116: 93-112.
- ROBERSON, K.D. y EDWARDS, H.M. (1994) *Poultry Sci.* 73: 1312-1326.
- ROSTAGNO, H.S. (2000) *Tabelas brasileiras para aves e suínos*. Universidad Federal de Viçosa. Viçosa, Brazil.
- RINCKER, M.J., HILL, G.M., LINK, J.E. y ROWNTREE, J.E. (2004) *J. Anim. Sci.* 82: 3189-3197.
- SAVOINI, G., CHELI, F., BONTEMPO, V., BALDI, A., FANTUZ, F., POLITIS, I. y DELL'ORTO, V. (1998) *Ann. Zootech.* 47: 273-278.
- SCHEIDELER, S.E. (1991) *Biol. Trace Elem. Res.* 29:217-223.
- SCHELL, T.C. y KORNEGAY, E.T. (1996) *J. Anim. Sci.* 74: 1584-1593.
- SHELTON, J.L., PAYNE, R.L., JOHNSON, S.L., BIDNER, T.D., SOUTHERN, L.L., ODGAARD, R.L. y PAGE, T.L. (2003) *J. Anim. Sci.* 81: 2515-2524.
- SHIVAPRASAD, H. (2004) *Avian Pathology* 33: 226-232.
- SMITH, J.W, TOKACH, M.D., GOODBAND, R.D., NELSSSEN, J.L. y RICHERT, B.T. (1997) *J. Anim. Sci.* 75: 1861-1866.
- SMITH, M.O., SHERMAN, I.L., MILLER, L.C. y ROBBINS, K.R. (1995) *Poultry Sci.* 74: 702-707.
- SMITH, T.N., BAKALLI, R.I., PESTI, G.M., y GARCIA, M. (1998) *Poultry Sci.* 77: 118 (Abstr.)
- SOUTHERN, L.L. (2001) *Adv. Pork Prod.* 12: 153-158.
- SPEARS, J.W. 1989. *J. Anim. Sci.* 67:835-843.
- STAHL, J.L., COOK, M.L., SUNDE, M.L. y GREGER, J.L. 1989. *Appl. Agricult. Res.* 4: 86-89.
- STEVENSON, M.H. y JACKSON, N. (1981) *Br. J. Nutr.* 46: 71-76.
- STEWART, R.G., WYATT, R.D. y ASHMORE, M.D. (1977) *Poultry Sci.* 56: 1630-1635.
- STRAIN, J.J. (1994) *Proc. Nutr. Soc.* 53: 583-598.
- SURAI, P.F. (2003) Selenium - Vitamin E interactions: does 1 + 1 equal more than 2?. En: *Nutritional Biotechnology in the Feed and Food Industries*. Lyons. T.P. y K.A. Jacques (Eds.). Alltech 19th Annual Symposium. Nottingham University Press. Nottingham, Reino Unido. pp 51-58.
- SWINKELS, J.W., KORNEGAY, E.T. y VERSTEGEN, M.W.A. (1994) *Nutr. Res. Rev.* 7: 129-149.

- UNDERWOOD E.J. y SUTTLE, N.F. (2001) *The Mineral Nutrition of Livestock*. (3ª Ed.). CABI Publishing. Wallingford, Reino Unido.
- VAN DE LIGHT, C.P.A., LINDEMANN, M.D. y CROMWELL, G.L. (2002a) *J. Anim. Sci.* 80: 2412-2419.
- VAN DE LIGHT, C.P.A., LINDEMANN, M.D. y CROMWELL, G.L. (2002b) *J. Anim. Sci.* 80: 483-493.
- VAN DE LIGHT, C.P.A., LINDEMANN, M.D., HARMON, R.J., MONEGUE, H.J. y CROMWELL, G.L. (2002c) *J. Anim. Sci.* 80: 449-455.
- VAN HEUGTEN, E. y SPEARS, J.W. (1997) *J. Anim. Sci.* 75: 409-416.
- VIEIRA, I.A. y SHIGUERU, V. (2003) *R. Bras. Zootec.* 32: 1657-1662.
- VINCENT, J.B. (2003) *Sports Medicine* 33: 213-230.
- VINCENT, J.B. (2004) *Proc. Nutr. Soc.* 63: 41-47.
- WARD, T.L., WATKINS, K.L. y SOUTHERN, L.L. (1994) *Poultry Sci.* 73: 1306-1311.
- WARD, T.L., WATKINS, K.L. y SOUTHERN, L.L. (1995) *Poultry Sci.* 74: 502-509.
- WEDEKIND, K.J., LEWIS, A.J., GIESEMANN, M.A. y MILLER, P.S. (1994a) *J. Anim. Sci.* 72: 2681-2689.
- WEDEKIND, K.J., COLLINGS, G., HANCOCK, J. y TITGEMEYER, E. (1994b) *Poultry Sci.* 73: 114 (Abstr.).
- WEDEKIND, K.J., HORTIN, D.E. y BAKER, D.H. (1992) *J. Anim. Sci.* 70: 178-187.
- WHANGER, P.D. (2003) Metabolic pathways of selenium in plants and animals and their nutritional significance. En: *Nutritional Biotechnology in the Feed and Food Industries*. Lyons. T.P. y K.A. Jacques (Eds.). Alltech 19th Annual Symposium. Nottingham University Press. Nottingham, Reino Unido. pp 51-58.
- WIDEMAN, R.F., KIRBY, Y., BARTON, T.L., CLARK, D., BAYYARI, G.R., HUFF, W.E. y MOORE, P.A. (1996) *J. Appl. Poultry Res.* 5: 219-230.
- WILLIAMS, C.M., BARKER, J.C. y SIMS, J.T. (1999) *Environ. Contam. Toxicol.* 162:105-157.
- XIA, M.S., HU, C.H. y XU, Z.R. (2004) *Poultry Sci.* 83:1868-1875.
- YU, S., WEST, C.E. y BEYNEN, A.C. (1994) *Br. J. Nutr.* 71:887-895.
- ZANETTI, M.A., HENRY, P.R., AMMERMAN, C.B. y MILES, R.D. (1991) *Br. Poultry Sci.* 32: 583-588.
- ZHOU, W., KORNEGAY, E.T., VAN LAAR, H., SWINKELS, J.W., WONG, E.A. y LINDEMANN, M.D. (1994a) *J. Anim. Sci.* 72: 2385-2394.
- ZHOU, W., KORNEGAY, E.T., LINDEMANN, M.D., SWINKELS, J.W., WELTEN, M.K. y WONG, E.A. (1994b) *J. Anim. Sci.* 72: 2395-2403.
- ZUBAIR, A.K., FORSBERG, C. y LEESON, S. (1996) *Poultry Sci.* 75: 891-899.