



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

**“DIAGNÓSTICO MINERAL EN ALIMENTOS Y SUERO
SANGUÍNEO DE VACAS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE
LECHE EN PEQUEÑA ESCALA EN LA ZONA SUR DEL
MUNICIPIO DE CELAYA, GUANAJUATO”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

PRESENTA:

FRANCISCO MARTÍNEZ FIGUEROA

ASESORES:

Dr. Ignacio A. Domínguez Vara

Dr. Ernesto Morales Almaraz

M. en C. Rodolfo Vieyra Alberto

Revisores:

M en C. Soledad Díaz Zarco

Dr. José Luis Bórquez Gastelum



Toluca México, Octubre de 2015

CONTENIDO

Resumen	v
1. Introducción	1
2. Revisión de literatura	3
2.1. Los sistemas de producción de leche a nivel nacional	3
2.2. Lechería especializada	3
2.3. Ganadería intensiva en pastoreo	3
2.4. Lechería de doble propósito	3
2.5. Lechería familiar o Sistema de producción de leche en pequeña escala (SPLPE)	4
3. Nutrición mineral en ganado lechero	4
3.1. Fuentes de minerales	4
3.2. Suelo	5
3.3. Agua	5
3.4. Forrajes y alimentos	5
3.5. Los minerales en la producción animal	6
3.6. Macrominerales	8
3.7. Microminerales	21
3. Justificación	27
4. Hipótesis	28
5. Objetivos	29
6. Material y método	30
7. Límite de espacio	33
8. Límite de tiempo	36
9. Resultados y discusión	37
10. Conclusiones	50
11. Literatura citada	52
12. Anexos	62

DIAGNÓSTICO MINERAL EN ALIMENTOS Y SUERO SANGUÍNEO DE VACAS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LECHE EN PEQUEÑA ESCALA EN LA ZONA SUR DEL MUNICIPIO DE CELAYA, GUANAJUATO

Francisco Martínez Figueroa, Ignacio A. Domínguez Vara, Ernesto Morales Almaraz y Rodolfo Vieyra Alberto

RESUMEN

En la producción animal, los minerales se identifican como el tercer factor nutricional más limitante; además, es común que los alimentos y forrajes tengan desequilibrios minerales que afectan la salud de la vaca y su producción de leche al no cubrir los requerimientos o causar excesos. El objetivo fue evaluar el estado mineral en los alimentos y suero sanguíneo de vacas lecheras estabuladas de cinco unidades de producción de lechería familiar localizadas en la zona sur del municipio de Celaya, Estado de Guanajuato, México. Se analizaron los minerales Ca, P, Na, K, Mg, Cu, Fe y Zn en alfalfa, ensilado de maíz, veza, pasto nativo, heno de avena, ebo, concentrado comercial y brócoli, así como en suero sanguíneo de bovinos lecheros de la raza Holstein en las fases de producción y período seco, durante el final de la época seca (abril-mayo de 2014), de cinco unidades de producción de pequeña escala, localizadas en el municipio de Celaya, Guanajuato, México. En cada unidad de producción se muestrearon, por punción en la vena yugular, 15 vacas, 10 en etapa de lactación y 5 secas gestantes. La determinación de minerales en alimentos y suero se realizó por espectrofotometría de absorción atómica de flama y el P por colorimetría. Se usó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 5x2 (unidades de producción x estado fisiológico) de tratamientos; las variables de respuesta fueron las concentraciones de minerales en forraje, alimentos y suero sanguíneo de los bovinos. El análisis estadístico se realizó utilizando el procedimiento GLM con apoyo del programa estadístico SAS (2002). La comparación entre medias en las variables con diferencia significativa ($P < 0.05$) se hizo por la prueba de Tukey. Respecto a los macro minerales en alimentos, el Ca fue adecuado, el P fue deficiente, excepto en el concentrado; el Mg fue adecuado en el concentrado, alfalfa y ensilado, pero deficiente en los forrajes

avena, pasto, ebo y brócoli; el Na fue adecuado en el concentrado, alfalfa y ensilado de maíz, pero deficiente en pasto, avena, ebo y brócoli; el K fue adecuado en la alfalfa, pero deficiente en el resto de los alimentos; la relación Ca:P sólo fue adecuada en la alfalfa. Respecto a los micro minerales, el Cu fue adecuado en el concentrado pero deficiente en el resto; el Fe mostró niveles muy altos y superiores al requerimiento de vacas lecheras en producción; el concentrado y brócoli cubren el requerimiento de Zn de las vacas, pero el resto de alimentos mostraron niveles bajos de Zn. Hubo diferencias ($P < 0.05$) en las concentraciones de Ca, P, Mg, Na, K y relación Ca:P en el suero sanguíneo de las vacas entre UP. Los niveles de Ca en el suero no fueron deficientes en ninguna UP, incluso hubo exceso de Ca en dos UP, lo cual puede afectar la relación Ca:P en el mismo suero. El P en suero no fue deficiente en ninguna UP, incluso hubo niveles altos de P en las vacas de todas las 5 UP, lo cual también puede afectar la relación Ca:P. El contenido de Mg en suero fue adecuado en las vacas de las cinco UP. El Na mostró deficiencias en tres UP ($P < 0.05$) en las cuales estuvo en el límite marginal, pero apenas arriba del nivel crítico. El K fue marginal en 2 UP, apenas arriba del nivel crítico. Hubo diferencias ($P < 0.05$) en las concentraciones de Cu, Fe y Zn en el suero sanguíneo de las vacas entre las UP estudiadas. Los niveles de Cu en el suero fueron deficientes en las 5 UP; el contenido de Fe en el suero de vacas en las localidades estudiadas fue alto, esto puede interferir con el Cu y empeorar su deficiencia. El contenido de Zn fue deficiente en 3 UP. No hubo diferencias ($P > 0.05$) en la concentración mineral entre etapas fisiológicas de las vacas. El Ca estuvo dentro del rango normal en ambos estados fisiológicos, el P estuvo en concentración alta, en ambas categorías de vacas y la relación Ca:P fue inferior a 2:1 en ambas etapas. En tanto que el Na y K estuvieron dentro del rango normal en ambos estados productivos. El Cu mostró deficiencia severa en ambas categorías de vacas; el Fe estuvo en niveles muy altos, y el Zn mostró valores normales en ambas etapas productivas. Hubo efecto ($P < 0.05$) de la interacción UP con estado fisiológico en la concentración sérica de los macro minerales Ca, Mg, Na y K. Se concluye que hay desequilibrios minerales en el forraje y suplementos alimenticios que pueden afectar el contenido mineral en el suero e influir en la salud, producción y reproducción de las vacas en ambos estados fisiológicos.

Palabras clave: bovinos lecheros, confinamiento, minerales, forrajes, concentrados, suero sanguíneo, Celaya, Guanajuato, México.

1. Introducción

Los primeros bovinos fueron introducidos a México por los españoles alrededor del año 1524, iniciando así la ganadería bovina en el país. A principios del siglo veinte, debido a la necesidad de repoblar los inventarios, se importaron razas lecheras, provocando un crecimiento en la producción láctea (Gasque y Blanco, 2004).

México tiene una extensión de 1,964,375 km² (INEGI, 2010), hasta el año 2008 se contabilizaban 32,307,071 cabezas de ganado bovino, de los cuales el 92.7% eran bovinos productores de carne, y el 7.3% vacas productoras de leche (SAGARPA, 2013).

En México, durante los últimos 10 años se ha incrementado la producción de leche en 2.46% en promedio al año; el país ocupa el séptimo lugar mundial en producción de leche y tercero en América Latina. Con un inventario nacional de 2.4 millones de cabezas de ganado lechero, en 2012, la producción de leche en el país alcanzó 10,880.9, en 2013 10,926.8 y el estimado para 2014 es de 11,108.4 millones de litros (SAGARPA, 2013).

Los principales Estados productores de leche en el país son: Jalisco (18.57%), Coahuila (11.89%), Durango (9.30%), Chihuahua (8.67%), Guanajuato (7.32%), Veracruz (6.74%), Estado de México (4.5%), Puebla (3.77%), Chiapas (3.75%), Hidalgo (3.72%); en los otros estados se produce el 21.77%. El Estado de Guanajuato tiene 823,000 cabezas de bovinos, de las cuales 169,306 son bovinos productores de leche; ocupa el sexto lugar nacional, en 2014 tuvo una producción de 772,558 litros de leche; los municipios con mayor producción fueron Doctor Mora, San Miguel de Allende, Celaya, San Luis de la Paz y León. En el municipio de Celaya, se produjeron en promedio 61,810.4 litros de leche en 2014, principalmente de vacas de la raza Holstein (SIAP-SAGARPA, 2014).

La alimentación es el rubro que más impacta en los costos de producción de leche, representa entre el 70 y 80% del total; el uso de concentrados eleva, de manera

significativa, el costo de producción, ya que por lo regular se adquieren fuera de la unidad de producción (Arriaga *et al.*, 1999).

A esta situación se le puede hacer frente mediante el empleo de forrajes de buena calidad ya que un buen forraje siempre disminuirá el uso de concentrado, lo que genera una producción más rentable económicamente (Albarrán, 1999).

En un sistema moderno de producción de leche, el principal objetivo es poder desarrollar el máximo potencial genético para la producción láctea.

El programa de alimentación dependerá del tipo de producción (confinamiento, semi confinamiento o pastoreo intensivo continuo o rotacional). Existen dos conceptos que son importantes en cualquier sistema de producción, la condición corporal y las etapas de alimentación; para obtener la máxima producción de leche, es necesario mantener un balance adecuado de nutrimentos en el ambiente ruminal, que maximice la digestión de los alimentos y permita un flujo constante de nutrimentos a la glándula mamaria (Muller, 1992). En los bovinos lecheros, después de cubrir los requerimientos de materia seca, energía y proteína, la nutrición mineral es la más importante porque su alimentación básica son forrajes, que por lo general no cubren sus necesidades de todos los elementos (McDowell *et al.*, 1997); los desequilibrios minerales pueden afectar el rendimiento productivo y reproductivo del ganado lechero (Minson, 1990).

En México, hay poca información sobre nutrición mineral; además, la práctica de suplementar minerales es escasa o nula; por lo tanto, es posible que se presenten desequilibrios nutricionales asociados con minerales. El objetivo es identificar el contenido de los elementos macro y micro minerales y su interrelación, en los alimentos y en el suero sanguíneo de vacas lecheras de cinco establos en sistemas de producción en pequeña escala de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato.

2. Revisión de literatura

2.1. Los sistemas de producción de leche a nivel nacional

2.2. *Lechería especializada*. Altamente tecnificada, con unidades de producción, en promedio, de 230 vientres por hatos y un rango de 100 a 3,000 vientres. Este tipo de producción se localiza en los altiplanos, el centro, norte y noreste del país; ubicados en climas templados, áridos y semiáridos. Los sistemas de producción son mecanizados, tanto en la producción de forrajes de calidad, como en el ordeño y el manejo de la leche; mantienen estabulados a los animales y los alimentan con forrajes de corte y con niveles altos de concentrados; en este tipo de explotaciones se incluyen las grandes cooperativas de productores de leche (Gasque y Blanco, 2004). Su participación en la producción de leche a nivel nacional es de 50.6% (SAGARPA, 2004).

2.3. *Ganadería intensiva en pastoreo*. El sistema no está muy distribuido en el país, las vacas permanecen en las praderas todo el tiempo, excepto cuando van al ordeño, que se efectúa dos veces al día; la alimentación se realiza con pastos como el kikuyo, ryegrass, alfalfa o praderas de gramíneas y leguminosas, suplementando con concentrados. La tecnificación de este sistema es muy parecida al especializado. Esta ganadería aporta el 21.3% de la producción nacional de leche (Gasque y Blanco, 2004; SAGARPA, 2004).

2.4. *Lechería de doble propósito*. Basada en explotaciones de ganado bovino para carne, en el cual la producción de leche es una actividad secundaria. Está caracterizada por la ordeña estacional del 10% de los vientres recién paridos con mayor producción de leche. Este tipo de ganadería se ubica en los trópicos húmedo y seco, y presenta una alta estacionalidad, con picos de producción en la época de lluvias. Este sistema representa el 18.3% de la producción láctea nacional (Gasque y Blanco, 2004; SAGARPA, 2004).

2.5. *Lechería familiar o Sistema de producción de leche en pequeña escala (SPLPE)*. Integrada por pequeñas explotaciones, caracterizadas porque los hatos son de alrededor de 3 a 30 vacas en promedio, las cuales generalmente son atendidas por los integrantes de la familia. Estos productores trabajan con sistemas tradicionales de producción y aprovechan esquilmos agrícolas (pajas y rastrojos de maíz, sorgo y trigo) para alimentar el ganado. Sus instalaciones son rústicas, ubicadas en los predios de sus viviendas; el manejo de los animales es deficiente principalmente en la higiene del ordeño, lo que resulta en la mala calidad de la leche que se vende a boteros intermediarios, queseros de la localidad, centros de acopio o directamente al consumidor. Los productores que trabajan bajo este sistema, poseen poca organización y están muy individualizados. Su aportación a la producción de leche es de 9.8% (Gasque y Blanco, 2004; SAGARPA, 2004).

3. Nutrición mineral en ganado lechero

Los minerales son elementos inorgánicos que se encuentran en la corteza terrestre (NRC, 2005), para que sean biodisponibles deben ser ingeridos, transportados al sitio de acción y convertidos en una forma fisiológicamente activa (Spears, 1994), donde juegan un papel metabólico en el organismo (McDowell *et al.*, 1984).

Los animales pueden absorberlos en forma iónica, quelada o como complejo soluble (Spears, 1994), estos deben estar presentes diariamente en las dietas en cantidades y proporciones adecuadas (Vargas y Fonseca, 1989), ya que los desbalances sean por deficiencia o exceso, provocan alteraciones en el organismo animal (Underwood y Suttle, 1999).

3.1. *Fuentes de minerales*. El ganado normalmente obtiene minerales de: a) el suelo, b) el agua, y c) de forrajes y alimentos, considerados la principal fuente.

3.2. *Suelo*. La fertilidad del suelo es la capacidad de abastecer nutrientes en cantidades adecuadas para satisfacer las necesidades de las plantas (Kemp *et al.*, 1999). La composición mineral del suelo varía de acuerdo a la naturaleza de la roca madre, a los cambios producidos durante la meteorización, a la acumulación de materia orgánica y a las prácticas de manejo (Rucks *et al.*, 2004). Su importancia radica en que es soporte para cualquier especie vegetal (Buckman y Brady, 1982), así, un contenido anormal de un mineral tiende a producir plantas con contenido también anormal de dicho mineral (Underwood y Suttle, 1999), estos nutrientes siguen un ciclo, ya que van del suelo a la planta y de la planta al animal, y retornan al suelo a través de secreciones y excreciones (Hampton *et al.*, 1999).

3.3. *Agua*. El NRC (2001), indica que dos de los cinco criterios considerados para determinar la calidad del agua son: 1) presencia de compuestos tóxicos y 2) presencia de excesos de minerales. La ingestión de agua no suele ser una fuente importante de minerales ya que tiene un bajo nivel de elementos esenciales (McDowell y Arthington, 2005), aunque existen excepciones como las aguas duras, las cuales suministran grandes cantidades de Ca, Mg, S, Cl y Na (Shirley, 1978; Underwood y Suttle, 1999), sin embargo, su composición varía según su origen (Dahlborn *et al.*, 1998); la concentración de sales menor a 1000 mg/L es aceptable para animales de granja (McDowell, 1992).

3.4. *Forrajes y alimentos*. Los forrajes son considerados de importancia especial, donde la calidad determina la productividad, ya que está dada en función de su consumo voluntario y de la digestibilidad (Bernal, 1994). Los elementos esenciales para las plantas son N, P, S, K, Ca, Mg, Cl, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo (Whitehead, 2000); los vegetales obtienen los nutrientes del suelo y aire (Whitehead, 2000); el contenido mineral varía de acuerdo al género, especie o línea genética, estado de maduración, tipo de suelo y clima (Valdés *et al.*, 1988; Underwood y Suttle, 1999; Suttle, 2010).

Las leguminosas han sido reconocidas como una fuente excelente de forraje y como mejoradoras de la fertilidad del suelo debido a su habilidad para fijar nitrógeno del aire y para incorporar a la capa arable grandes cantidades de MO, además de tener un mayor contenido de Ca, Mg y P (Bernal, 1994); K, S, Fe, Cu, Zn, Co y N (Huerta, 1997), en comparación con las gramíneas; sin embargo, en las áreas ganaderas de clima cálido las de mayor importancia económica son las gramíneas (Bernal, 1994).

El contenido de minerales generalmente es mayor en las hojas que en los tallos (Bernal, 1994). La estación del año afecta sobre todo la concentración de macrominerales (Greene, 2000); el contenido de P, Na, K, Cu, Zn y Se es mayor durante la época de lluvias, mientras que Ca, Mg y Mn disminuyen (Mc Dowell y Arthigton, 2005).

3.5. Los minerales en la producción animal. Los sistemas de producción de ganado bovino están cambiando continuamente por la necesidad de mantener una producción sustentable, así a medida que las limitaciones de aportes de energía, proteína, enfermedades parasitarias o infecciosas y defectos genéticos del animal, se van rectificando y las empresas ganaderas se hacen más intensivas, la influencia de los minerales aumenta (Bavera, 2006). La suplementación mineral eficiente permite mejorar la carga animal, la digestión, la inmunidad, la lactancia y el crecimiento, así como una óptima reproducción animal (Greene, 2000). La mayoría de los desequilibrios minerales en el ganado, particularmente las condiciones muy próximas a la deficiencia, no resultan en observaciones patológicas de signos clínicos específicos para un solo mineral (McDowell y Arthington, 2005), por lo que se requiere de exámenes clínicos, patológicos y bioquímicos de los animales, además de ensayos biológicos para conocer y corregir estas alteraciones que pueden llevar de 20 a 30 días para observar mejorías (Underwood y Suttle, 1999; Bavera, 2006).

Por otra parte, las premezclas, bloques y soluciones inyectables de minerales no han logrado corregir de manera satisfactoria las deficiencias, esto puede ser por desconocer el estado mineral que soporta la producción animal (McDowell y Arthington, 2005).

Los minerales esenciales para el animal son elementos inorgánicos que se requieren para crecer, mantenerse, producir y reproducirse (Church, 1989), su contenido en el organismo debe mantenerse dentro de límites muy estrechos para vivir y producir (Underwood y Suttle, 1999). Afortunadamente, no es necesario determinar con precisión los requerimientos y niveles tóxicos de muchos elementos, ya que la regulación homeostática tiende a normalizar los consumos marginalmente deficientes o excesivos, cambiando la eficiencia de su absorción y excreción (Suttle, 2010); sin embargo, por arriba del nivel máximo tolerable son perjudiciales a la salud del animal y pueden ocasionar afectaciones a la salud humana (NRC, 2005).

Los minerales en el animal activan enzimas, son cofactores esenciales de reacciones metabólicas, regulan la digestión, la respiración, el balance de agua, la contracción muscular, la transmisión nerviosa, el balance de pH, protegen contra enfermedades, son componentes estructurales de tejidos y órganos, y tienen un papel vital en la resistencia y adaptación (NRC, 2005).

Hasta 1981 se habían citado 22 elementos esenciales para las formas superiores de vida animal, divididos en macrominerales (Ca, P, K, Na, Cl, Mg y S) y microminerales o elementos traza (Fe, I, Zn, Cu, Mn, Co, Mo, Se, V, F, Si, Ni y As) (Underwood, 1981). Los elementos minerales existen en las células y tejidos del organismo animal en diversas combinaciones funcionales y químicas, y en concentraciones características dependientes del elemento y tejido (Underwood y Suttle, 1999). El suero sanguíneo es ampliamente utilizado para estudios de nutrición mineral, sin embargo, factores como el estrés, el ejercicio, la hemólisis, la temperatura y el tiempo de separación del suero, aumentan la concentración de P (Fick *et al.*, 1979; McDowell y Arthington, 2005); la concentración de Cu se incrementa con las infecciones y el estrés, y el contenido de Fe, Zn, Mg y K aumentan con la hemólisis (Fick *et al.*, 1979).

3.6. Macrominerales

3.6.1. *Calcio*. El Ca representa el 2% del peso corporal, por lo que se considera el mineral más abundante del organismo animal (NRC, 1996).

Entre el 98 y 99% se encuentra en los huesos y dientes y el restante se localiza en tejidos blandos y fluidos del cuerpo, donde existe como iones libres unidos a las proteínas plasmáticas, especialmente la albumina, o en forma de complejos de ácidos orgánicos e inorgánicos (McDowell y Arthington, 2005; NRC, 2005); la prioridad de todos los mamíferos es mantener concentraciones de Ca en plasma y fluidos extracelulares cerca de 10 mg dL⁻¹ (Hurwitz, 1996). La función principal del Ca es proporcionar un armazón fuerte para soportar y proteger a los órganos más delicados, para articular y permitir el movimiento y para hacer maleable y así permitir el crecimiento animal (Underwood y Suttle, 1999). El Ca ionizado representa entre el 50 y 60% del total de Ca que participa en los procesos de contracción muscular, transmisión de impulsos nerviosos y actúa como un cofactor para varias reacciones enzimáticas (Vitty y Kebreab, 2010), así también participa en la coagulación sanguínea normal, la acción rítmica del corazón y la permeabilidad de las membranas (Hurwitz, 1996; McDowell y Arthington, 2005).

El esqueleto óseo sirve como reserva de Ca (NRC, 1996), sin embargo, la movilización o resorción de los minerales no ocurre del mismo modo en las diferentes partes del esqueleto adulto, los huesos esponjosos, costillas, vertebras, esternón y partes distales de los huesos largos, donde el contenido de cenizas es menor, estos son los primeros afectados y las partes más compactas de los huesos largos y los huesos más pequeños de las extremidades son los últimos (Underwood y Suttle, 1999). La capacidad de movilización de Ca disminuye con la edad. En general, el hueso en base seca está compuesto de alrededor de 46% de elementos minerales, 36% de proteínas y 18% de grasas; los minerales que se encuentran en mayor cantidad en las cenizas de los huesos son el Ca (36%) y el P (17%) (McDowell, 1985; Underwood y Suttle, 1999).

Por otro lado, la composición química, la solubilidad, la biodisponibilidad y la granulometría son importantes para la selección de fuentes de Ca en la alimentación animal; cabe destacar que la solubilidad es un factor determinante, ya que está estrechamente relacionada con la biodisponibilidad y absorción intestinal (Fassani *et al.*, 2004).

El coeficiente de absorción medio del Ca es 68 % para todos los alimentos, incluyendo los forrajes (Underwood y Suttle 1999), la digestibilidad verdadera y absorción de Ca en fuentes inorgánicas puede ser 50% o más que en las fuentes orgánicas (Kiarie y Nyachoti, 2010), la cual se realiza principalmente en forma iónica a nivel del píloro e intestino delgado (duodeno y yeyuno) por mecanismos de transporte activo y difusión pasiva (Church *et al.*, 2006), controlada por la hormona paratiroidea (HPT) y la forma fisiológicamente activa de la vitamina D-1,25-dihidroxicolecalciferol (calcitrol, 1,25-(OH)₂D₃) (Underwood y Suttle, 1999), donde actúa lentamente abriendo los canales de Ca y facilitando su captación, con ayuda de la proteína transportadora de Ca (Calbindina) (Hurwitz, 1996).

El Ca se secreta en leche y se excreta en heces, orina y sudor (Georgievskii *et al.*, 1982; Church *et al.*, 2006), por vía fecal es baja la excreción en rumiantes y apenas se ve afectada por la ingestión o el balance orgánico de Ca, mientras que en la orina y el sudor se vuelve importante en la acidosis metabólica de vacas en producción láctea (Underwood y Suttle, 1999); la inactividad física aumenta su excreción (Church *et al.*, 2006).

La carencia de Ca favorece su absorción, también en rumiantes adultos durante la preñez y lactancia (Georgievskii *et al.*, 1982), conforme aumenta el Ca de la dieta, la proporción absorbida tiende a declinar (Church *et al.*, 2006); cantidades elevadas de Ca pueden causar la formación de sales insolubles, reduciendo la absorción de P (Vitti y Krebeab, 2010) con desequilibrios en la absorción de Mg, Fe, I, Zn y Mn (Underwood y Suttle, 1999; McDowell y Arthington, 2005).

El consumo inadecuado de Ca causa debilidad ósea, crecimiento lento y baja producción láctea (McDowell y Arthington, 2005); en deficiencias crónicas se manifiestan cambios químicos, físicos e histológicos, que reflejan una reducción en la mineralización de los huesos (Underwood y Suttle, 1999); raquitismo en animales jóvenes y osteomalacia e hiperparatiroidismo en adultos (Church *et al.*, 2006); asimismo, puede producir enfermedades metabólicas como la fiebre de leche (hipocalcemia) en vacas al inicio de la lactación (0.4-0.5 mg dL⁻¹ de Ca en plasma sanguíneo); también existe riesgo de sufrir paresia asociada a hipocalcemia en rumiantes recién destetados que se llevan a los corrales de engorda.

El exceso en el consumo de Ca, además de evitar la absorción de algunos minerales, puede causar calcificación en sitios con daño celular y por lo tanto en tejido vivo, tumores en la tiroides en respuesta a la hiperactividad y cálculos urinarios (Church *et al.*, 2006); dietas con altas concentraciones de Na y K tienden a inducir esta enfermedad, mientras que altos contenidos de Cl y S la previenen (McDowell y Arthington, 2009).

El nivel máximo tolerable de Ca es 2% para bovinos, sin embargo, niveles máximos no se consideran tóxicos gracias a los mecanismos homeostáticos para su excreción (Underwood y Suttle, 1999).

Los forrajes son una fuente importante de Ca para el ganado, sobre todo cuando contienen especies leguminosas (Underwood y Suttle 1999); sin embargo, su absorción por el animal depende del contenido de oxalatos, fitatos, fosfatos y sulfatos (Soares, 1995); como regla general se considera que las hojas contienen dos veces más Ca que el tallo y en este disminuye a medida que avanza la maduración (Underwood y Suttle, 1999).

3.6.2. *Fósforo*. El metabolismo del P está estrechamente relacionado con el del Ca, ya que la deficiencia o exceso de alguno en el organismo interfiere con la utilización y metabolismo del otro (Kebreaby Vitti, 2005).

El P constituye el 1% del cuerpo, este se localiza principalmente en el esqueleto (80%) y el restante está distribuido entre los tejidos blandos y se concentra especialmente en los glóbulos rojos y en los tejidos muscular y nervioso (McDowell, 1992); la concentración de P en el suero sanguíneo de bovinos es de 4 a 8 mg dL⁻¹, aunque los animales jóvenes presentan concentraciones superiores comparadas con los adultos (6 a 8 vs 4 a 6 mg dL⁻¹); la sangre completa contiene de seis a ocho veces más P que el suero sanguíneo, por su alta concentración en eritrocitos (NRC, 2001); su contenido es de 4 a 16 veces mayor en la saliva que en el plasma (Scott, 1988).

El P es un nutriente esencial utilizado para el desarrollo de los huesos, crecimiento, producción y reproducción óptima del ganado, participa en la regulación del pH de la sangre y otros fluidos, y en el metabolismo de proteínas (McDowell y Arthington, 2005; Garmendia, 2007).

También participa en reacciones de transferencia y utilización de energía, influye directamente sobre la ganancia de peso corporal (Call *et al.*, 1978) y producción láctea (Church y Pound, 1987); en el rumen es esencial para el crecimiento microbiano, especialmente los microorganismos que digieren la celulosa de las plantas ingeridas (Knowlton *et al.*, 2010); el P está presente en las células en especial en los ácidos nucleicos, nucleótidos, fosfolípidos y varios componentes fosforados que cumplen una función metabólica (Soares, 1995; Veum, 2010). La reserva de P en los animales, al igual que de Ca, se encuentra en el esqueleto óseo como hidroxapatita, fosfato tricalcico y fosfato de magnesio (Knowlton *et al.*, 2010). La absorción del P ocurre principalmente en el duodeno y yeyuno del intestino delgado de rumiantes, pero depende de la cantidad consumida, a mayor consumo disminuye su coeficiente de absorción, también se afecta cuando la relación Ca: P está desequilibrada por encima de 7:1 o por debajo de 1:1 (McDowell y Arthington, 2005); sin embargo, Pfeffer *et al.* (2005) mencionaron que la absorción de este mineral es independiente del exceso de Ca; también son más eficientes los terneros (94%), que los adultos (58%), para aprovechar el P disponible (ARC, 1980).

En alimentos con altas concentraciones de Fe, Al, Mn, K y Mg la absorción de P es baja (Underwood y Suttle, 1999). Los animales de granja desechan de 60 a 80% de P que consumen (Knowlton *et al.*, 2010), contaminando suelos y mantos acuíferos, por lo que al formular una dieta se debe considerar la fuente y la cantidad para evitar el desperdicio. Cabe mencionar que entre el 85 y 90% del P es reabsorbido durante la filtración glomerular en el riñón (Kumar, 1995).

La deficiencia mineral más común en el mundo es la de P (McDowell y Arthington, 2005); en los bovinos se caracteriza por la disminución del contenido del mineral en los huesos, fracturas espontáneas, aumento de volumen en las articulaciones, cojera y dificultad al caminar, con deficiencias severas se manifiesta el raquitismo y la osteomalacia (Vrzgula, 1990); se observa anorexia, crecimiento lento, baja conversión alimenticia, baja producción láctea, pérdida de peso, osteofagia, hemoglobinuria puerperal, alteraciones del metabolismo energético, fragilidad eritrocitaria (NRC, 2001; Forchetti *et al.*, 2006); los parámetros reproductivos se ven afectados teniendo anestros prolongados, repetición de celos, reabsorción embrionaria y bajas tasas de concepción (Garmendia, 2007); asimismo, el ovario es un órgano exigente en P y en consecuencia, hay retraso del inicio de la actividad ovárica, por periodos prolongados puede causar daño permanente a los órganos reproductivos (Butler, 2000).

El ganado obtiene el P principalmente del forraje que consume, más de 70% de estos forrajes no cubren los requerimientos mínimos de P para producción óptima (McDowell y Arthington, 2005), sobre todo en regiones tropicales y subtropicales, donde es muy limitante para el crecimiento óptimo de leguminosas (Raghothama, 1999); estas regiones se caracterizan por sus altas concentraciones de Fe y Al en suelo lo que impide la utilización del P por las plantas (Garmendia, 2007).

Por otra parte, en forrajes maduros y rastrojos, la concentración de P es baja, pero los granos de cereales, harinas y semillas de oleaginosas contienen niveles de moderados a altos de este mineral (NRC, 2001).

Los cambios climatológicos como periodos prolongados de sequía son responsables de modificaciones en los niveles de P en las pasturas (Zamalvide, 1995). El P en los vegetales forma parte de las estructuras biológicas, ayuda a que las raíces y las plántulas se desarrollen más rápidamente, mejora la eficiencia del uso del agua y acelera la maduración por lo que es vital en la formación de semillas; también juega un rol importante en la fotosíntesis, respiración y regula varias enzimas (Raghothama, 1999). El P es el mineral que está en menor cantidad en el suelo entre los elementos esenciales en la nutrición de la planta; además, la mayor parte del P del suelo está en compuestos orgánicos e inorgánicos no asimilables, las plantas solo pueden asimilar ortofosfato (PiH_2PO_4) (Schachtman *et al.*, 1998).

3.6.3. *Magnesio*. Alrededor del 70% del Mg total del cuerpo se encuentra localizado en los huesos (McDowell y Arthignton, 2005), el resto está distribuido entre los tejidos blandos; este mineral es uno de los cationes más abundantes a nivel intracelular, después del K (NRC, 2005). Los bovinos procuran mantener una concentración constante de Mg en el suero sanguíneo de 1.8 a 3.5 mg dL⁻¹ (Puls, 1994).

El Mg interviene con el Ca y P en la formación de huesos y dientes, en combinación con el Ca también interviene en la regulación de la permeabilidad y excitabilidad de las membranas celulares, participa en el intercambio hidroléctrico y forma complejos con proteínas y ácidos nucleicos (Minson, 1990).

El Mg actúa como cofactor de numerosas enzimas, especialmente aquellas que intervienen en la transferencia de energía (Blevins, 1994), es requerido para el buen funcionamiento de los músculos del corazón, también forma parte del líquido cefalorraquídeo e influye en la transmisión de impulsos nerviosos (NRC, 2005), es necesario para la fosforilación oxidativa de las mitocondrias, principalmente del músculo cardíaco; también participa en la formación de ribosomas (Suttle, 2010); existe una relación entre el Mg y el inicio de la pubertad, ya que este mineral activa gran parte de las enzimas que intervienen en el metabolismo normal de lípidos y carbohidratos, lo cual influye directamente sobre el balance energético del animal (McDowell y Arthington, 2005).

El Mg facilita la absorción del Ca de la dieta y promueve el funcionamiento de la hormona paratiroidea (Naylor, 1991); la absorción de Mg en animales pre rumiantes se da en el intestino delgado, y, en el caso de los rumiantes, tiene lugar principalmente en el rumen y el omaso (Kincaid, 1999). El Mg se asimila mejor en los animales jóvenes comparado con los adultos (0.70 vs 0.29-0.05), también influye el tipo de dieta consumida y el estado fisiológico (ARC, 1980); el exceso de Ca, P y K afectan la absorción de Mg (Underwood y Suttle, 1999). Bajo condiciones normales el Mg es eliminado en heces; debido a que del 95 al 97% del Mg es reabsorbido en el riñón, su eliminación vía orina es baja (NRC, 2001).

La deficiencia de Mg puede ocurrir cuando los becerros son alimentados con leche como única dieta durante periodos largos, donde se observa reducción del consumo de alimento, incremento en la excitabilidad, salivación excesiva, convulsiones; también puede ser observada en animales adultos cuando son alimentados con pasturas tiernas (tetania de los pastos), los animales presentan hiper irritabilidad, tetania, vasodilatación periférica, falta de apetito, incoordinación, espasmos musculares, salivación excesiva, descenso de la presión sanguínea y temperatura corporal, pudiendo seguir por un estado de coma y muerte (Underwood y Suttle, 1999; Kramer *et al.*, 2003).

La tetania de los pastos ($\leq 1 \text{ mg dL}^{-1}$ sérico) aumenta en los rumiantes más viejos por la disminución en la habilidad para movilizar el Mg del esqueleto (Minson, 1990; McDowell y Arthington, 2005); una deficiencia prolongada de Mg incrementa la toxicidad de otros metales como el Al (Nielsen *et al.*, 1988).

Por el contrario, es difícil la intoxicación por exceso de Mg en rumiantes, probablemente debido a la capacidad que tiene el riñón para excretar el exceso de este elemento como respuesta a los niveles séricos elevados (Church, 1992); bajo condiciones experimentales, la intoxicación puede presentar depresión del sistema nervioso central, timpanismo, heces acuosas, debilidad, molestias en la locomoción, disminución del consumo de alimento, somnolencia y muerte (Miller, 1979a; McDowell y Arthington, 2005). La deficiencia de Mg puede corregirse con la suplementación del mineral al ganado o aplicando fertilizaciones estratégicas a las praderas con Mg y evitando fertilizaciones excesivas de K y N (Minson, 1990).

En los forrajes es raro encontrar deficiencias de Mg, su concentración varía con la especie, clima, estación del año, intensidad de la luz, temperatura y niveles de K y N en el suelo; los tallos tienen una concentración más alta que las hojas (Minson, 1990), este mineral es un componente de la clorofila y juega un papel central en la fotosíntesis (Whitehead, 2000).

La disponibilidad de Mg del suelo para la planta es baja, depende de la concentración de Mg y Ca presente en el suelo, así como el pH del mismo. El Mg del suelo que no proviene de los fertilizantes, es producto de la intemperización de rocas que contienen minerales como la biotita, hornablenda, dolomita y clorita; en general, los suelos tienen menos Mg que Ca, debido a que es más soluble y por lo tanto más lixiviable (Minson, 1990).

3.6.4. *Potasio*. Es el tercer elemento de mayor abundancia en el cuerpo del animal, solamente superado por el Ca y el P (McDowell y Arthington, 2005), también es el principal catión de los fluidos intracelulares (Suttle, 2010). El K depositado en huesos decrece con la edad y aumento de peso, pero en músculo tiende a incrementarse, probablemente por el mayor depósito de grasa, por lo que se ha concluido que el músculo es el sitio principal de almacenamiento (Georgievskii, 1982).

La distribución de K es irregular, su concentración en suero sanguíneo es de 15 a 20 mg dL⁻¹ y se incrementa en bovinos en gestación avanzada (Puls, 1994). Entre las funciones del K están incluidas la regulación de la presión osmótica, mantenimiento de balance ácido-básico y del agua, metabolismo de carbohidratos, síntesis de proteínas y mantenimiento de los tejidos del corazón y riñones, conducción de los impulsos nerviosos, contracción muscular, transporte de oxígeno y dióxido de carbono, interviene en procesos metabólicos de la célula, ayuda a mantener un medio óptimo para la actividad normal de la microfloraruminal y es el principal elemento para los microorganismos celulolíticos (ARC, 1980).

También participa en diferentes reacciones enzimáticas que incluyen el ATPasa, hexoquinasa, anhidrasa carbónica, colinesterasa, galactosidasa, piruvato quinasa, fructoquinasa, fosfotranscetoalasa (ARC, 1980; Georgievskii, 1982; McDonald *et al.*, 1988; McDowell y Arthington, 2005).

La absorción de K en rumiantes jóvenes alimentados con leche se da en el intestino delgado, y en los adultos en rumen, retículo, omaso e intestinos; el porcentaje de absorción en el tubo intestinal es de 70 a 99% en forma de iones (Kolb, 1972). Dietas altas en K reducen la asimilación de Mg, pero incrementan la de Ca y Na (Puls, 1994), esto puede originar la formación de cálculos renales (Linsner, 1981), tetania y también puede contribuir al edema de la ubre (Greene, 2000), fiebre de leche (Suttle, 2010); el exceso crónico de K causa una hipertrofia de la corteza suprarrenal (Church *et al.*, 2006).

Cuando se cubren los requerimientos del K, la principal vía de excreción es la orina (95%), el proceso es regulado por la aldosterona, este mecanismo favorece la absorción de Na y la excreción de K (NRC, 2005); también se elimina por heces, leche y piel, por esta última vía puede ser hasta 18 veces mayor en climas tropicales comparado con climas templados (0.1-0.2 vs 1.1 a 1.8 g dL⁻¹) (ARC, 1980), también se incrementa su eliminación bajo condiciones de estrés y diarrea (Puls, 1994).

El K es requerido en grandes cantidades por el animal, aunque rara vez se presentan deficiencias de este elemento, los requerimientos de K aumentan bajo ciertas condiciones como el estrés, altas temperaturas y enfermedades acompañadas de fiebre o diarrea (Ammerman y Henry, 1987; Puls, 1994), así también aumenta el requerimiento en el ganado bovino en lactación (NRC, 2001).

Los factores que predisponen a las deficiencias de K son el consumo de forrajes maduros o de mala calidad, dietas altas en granos, cuando la proteína de origen animal es sustituida por nitrógeno no proteico (urea), en condiciones de estrés o fatiga fisiológica y alto consumo de sal con consumo marginal de K (McDowell y Arthington, 2005).

En el animal, las deficiencias no presentan signos específicos, pueden presentar crecimiento lento, pérdida de peso, reducción del consumo de agua y alimento, debilidad muscular, desordenes nerviosos, rigidez de miembros, pelo hirsuto, flexibilidad de la piel disminuida, diarrea, emaciación, pueden ser susceptibles a parásitos internos, acidosis intracelular, el nivel de K en plasma y leche es bajo, aumenta el hematocrito, disminución de la producción láctea y en deficiencia severa provoca la muerte del animal (Linsner, 1981; Underwood y Suttle, 1999; NRC, 2001; McDowell y Arthington, 2005); el K en la saliva se incrementa con la deficiencia de Na (Puls, 1994).

El exceso de K puede ocasionar urolitiasis, disminución del nivel de Mg en el organismo y aumento de la susceptibilidad a hipomagnesemia, disminución de los parámetros reproductivos y de la ganancia diaria de peso; la intoxicación por K no es un problema común (NRC, 2005).

El K es estable en tejidos vegetales, su función primaria parece estar ligada al metabolismo de la planta, es vital para la fotosíntesis, participa en la síntesis de almidón y proteína, ayuda a hacer un uso más eficiente del agua, es importante en la formación de frutos, mejora la calidad de los cultivos, mejora la tolerancia a las heladas, aumenta la resistencia a enfermedades, reduce el estrés producido por nematodos y es importante en la respiración e hidratación celular (NRC, 2005).

La concentración de K en los cereales es menor a 0.5%, en las gramíneas es de 0.2 a 4% y en las leguminosas de 0.2 a 5% (Underwood y Suttle, 1999); el contenido de K en los forrajes disminuye al aumentar la madurez, una concentración menor a 2% es insuficiente para resistir el invierno; forrajes jóvenes y frescos que crecen en suelos altamente fertilizados en épocas de frío pueden tener altas concentraciones de este mineral (Whitehead, 2000).

Pueden encontrarse concentraciones bajas de K en forrajes que crecen en invierno y en zonas muy lluviosas. La deficiencia en las plantas es rara, conforme la planta madura el K se encuentra presente principalmente en las áreas de nuevo crecimiento (NRC, 2005). Uno de los signos de deficiencia más comunes son el quemado o fogueo en los bordes de las hojas, las plantas crecen lentamente, el sistema radicular es pobre, los tallos débiles, los frutos y semillas son pequeños y arrugados, la resistencia a enfermedades es baja (NRC, 2005).

El K compite con el Mg, Ca y el Na por los sitios de absorción en la planta (Whitehead, 2000). Por otra parte, suelos arcillosos con alto contenido de MO son ricos en K, mientras que los arenosos son deficientes. En general, los suelos con más de 120 ppm de K en forma disponible permiten un crecimiento adecuado de las plantas forrajeras (Georgievskii, 1982). El K tiene poca movilidad en el suelo y depende del contenido de humedad; se han reconocido dos tipos de K que se encuentran disponibles rápidamente en el suelo para un cultivo en crecimiento: 1) potasio soluble o en solución que se encuentra en el agua del suelo, y 2) potasio de intercambio retenido en forma débil en la forma intercambiable por los coloides del suelo, la arcilla y la MO (NRC, 2005).

3.6.5. *Sodio*. El Na es el principal catión monovalente extracelular (Suttle, 2010), forma parte del jugo pancreático y la bilis (Miller, 1979a). Las funciones del Na incluyen la regulación de la presión osmótica, equilibrio ácido base, transmisión de impulsos nerviosos (McDowell y Arthington, 2005); participa en la absorción de azúcares y aminoácidos, es un componente de alta proporción en la sangre (Suttle, 2010); sin embargo, su concentración desciende solo en condiciones extremas (Seynaeve *et al.*, 1996); este mineral es considerado un macronutriente para los animales y un micronutriente para las plantas (Whitehead, 2000).

La absorción de Na ocurre en el tubo digestivo, prácticamente todo el Na de la dieta es disponible (NRC, 2001); cuando el consumo de Na es bajo, se activa la producción de aldosterona en la corteza adrenal, lo cual evita la pérdida de Na en orina y heces, por esto, la concentración de Na en la leche es constante en cualquier nivel dietético de Na, esta falta de habilidad de los animales de reducir el contenido de Na de la leche los hace más susceptibles a deficiencias de este elemento durante la lactancia (Minson, 1990).

La deficiencia de Na en la dieta determina un descenso en la presión osmótica que origina la deshidratación del organismo, además reduce la absorción de Mg e incrementa la incidencia de hipomagnesemia (Minson, 1990).

El primer síntoma de deficiencia es un estado de pica o de apetencia desmedida por la sal, que se manifiesta porque el animal lame ávidamente la lana, el suelo, y la orina o el sudor de otros animales (Underwood y Suttle, 1999). Una prolongada deficiencia de Na produce pérdida del apetito, mala apariencia, pérdida de peso, reducción del crecimiento, baja producción de leche, acompañado con cierta reducción en el contenido de grasa láctea (Underwood, 1983), terminando con incoordinación, temblor corporal, debilidad y pérdida del ritmo cardiaco, lo cual puede conducir a la muerte (McDowell y Arthington, 2005).

En contraparte, la mayoría de los animales pueden tolerar grandes cantidades de sal común en la dieta, cuando hay suficiente agua disponible (McDowell y Arthington, 2005); sin embargo, la ingestión excesiva de elementos osmóticamente activos como el Na puede inducir edemas (Underwood y Suttle, 1999), diarreas, colapso, anorexia, pérdida de peso (NRC, 2001), irritación del tubo gastrointestinal, vómito, heces con moco y convulsiones (Puls, 1994); también daña a los glomérulos renales dada la degeneración vascular y aumenta el volumen del líquido extracelular, generando hipertensión que trae como consecuencia una falla cardiaca congestiva (Church y Pond, 1987); una ingestión inadecuada de agua o el consumo exclusivo de suero de queso puede agravar la sintomatología del exceso de sal (NRC, 2001).

La esencialidad del Na en los forrajes no ha sido demostrada, ya que solo tiene beneficios en ciertas situaciones; se ha utilizado en praderas para incrementar la palatabilidad de los forrajes (Whitehead, 2000); en México entre el 75y 88% de forrajes no cubren las necesidades mínimas de Na para el ganado, la suficiencia en los rumiantes se debe a que el suministro directo de sal común es una práctica rutinaria en la mayoría de las empresas ganaderas (Huerta, 1997).

La variación en la concentración de Na en los forrajes se debe al tipo de forraje, siendo que las gramíneas contienen más Na que las leguminosas. Al incrementar el K en el suelo disminuye la absorción de Na por las plantas (Minson, 1990).

3.7. Microminerales

3.7.1. *Cobre*. Después del P, la deficiencia de Cu es la limitante más importante para los animales, sobre todo en condiciones de pastoreo en la mayoría de las regiones tropicales (McDowell y Arthington, 2005).

El Cu participa en muchos procesos biológicos del organismo, la mayoría relacionados con actividades enzimáticas, es parte integral del sistema citocromo, es parte estructural de las enzimas Cu-superóxidodismutasa (CuSOD), CuZn-superóxidodismutasa (CuZnSOD), ceruloplasmina (Cp), citocromo oxidasa, tirosinasa (poliferrin oxidasa), ácido ascórbico oxidasa, monoamina oxidasa plasmática, lisil oxidasa y auricasa dependiente de Cu (Herrera, 1991); favorece la formación de la hemoglobina, la maduración del heritrocito, la absorción del Fe, la oxidación y la unión con el Fe en el transporte de proteínas, también es esencial en el metabolismo del tejido conectivo (Minson, 1990) al ser necesario para la formación de elastina, colágeno del hueso y la producción de melanina; para la integridad del sistema nervioso central, para la respiración celular y la síntesis de prostaglandinas (Church *et al.*, 2006); el bajo consumo de Cu reduce la síntesis y actividad de la enzima tirosinasa, que es requerida para convertir la tirosina en melanina (NRC, 2001).

La concentración normal de Cu en suero sanguíneo de bovinos de carne es de 0.8 mcg L⁻¹, la cual aumenta del tercer al quinto mes de preñez y disminuye cuando la dieta tiene alta cantidad de proteína (Puls, 1994). La absorción de Cu en la mayoría de las especies es en duodeno y yeyuno, su retención depende de otros minerales como el Mo, S, Fe y Zn en la dieta que participan como antagonistas de este (Gooneratne *et al.*, 1994); la relación recomendada de Cu:Mo en la dieta es de 3:1 hasta 6:1; por su parte el Fe propicia la formación de complejos sulfito ferrosos en el rumen, reduciendo la absorción de Cu, con una disminución de su concentración en plasma e hígado (Brebmner *et al.*, 1987).

La biodisponibilidad es mayor en forraje seco que fresco, también es mayor en gramíneas maduras, asimismo depende de factores propios del animal como la raza, la edad y el estado fisiológico. En las plantas el Cu participa en el proceso de la fotosíntesis, estabilidad de la clorofila y en la asimilación del almidón y nitrógeno (Minson, 1990).

La deficiencia de Cu en rumiantes aparece principalmente bajo condiciones de pastoreo y los signos severos son raros cuando se suministran alimentos concentrados (McDowell y Arthington, 2005). La deficiencia de Cu acorta el periodo de vida de las células rojas sanguíneas (Church *et al.*, 2006), reduce la fertilidad en vacas y la calidad del semen en toros, hay retención placentaria, se incrementa la incidencia de úlceras en el abomaso y se reduce la respuesta inmune (Puls, 1994). El animal puede cursar con anemia, diarrea severa, crecimiento lento, decoloración del pelo, ataxia en el recién nacido, fallo cardíaco y huesos frágiles y débiles (Underwood y Suttle, 1999), dificultad al parto y terneros nacidos con raquitismo congénito y disminución de la producción (McDowell y Arthington, 2005). El ganado bovino es extremadamente tolerante al exceso de Cu (Minson, 1990).

3.7.2. *Hierro*. De 60 a 70% del Fe corporal se encuentra en la hemoglobina de las células rojas sanguíneas y en la mioglobina del músculo; el 20% se almacena en formas lábiles en hígado, bazo y otros tejidos donde se encuentra disponible para la formación de hemoglobina; del 10 al 20% restante se fija en los tejidos como un componente de la miocina y actomiocina muscular (Church, 2006; Suttle, 2010).

El Fe es un componente esencial de la hemoglobina, mioglobina, citocromo y de las enzimas catalasa y peroxidasa; en los animales las funciones del Fe son el transporte de oxígeno a las células y la respiración celular principalmente, transporte de electrones y metabolismo de energía, antioxidante, sensor de oxígeno, síntesis de ADN (NRC, 2001; Underwood y Suttle, 1999). El Fe se transporta en forma de hierro férrico, unido a la transferrina, almacenándose en hígado, bazo y médula ósea, principalmente en forma de ferritina o hemosiderina (Underwood y Suttle, 1999; NRC, 2005).

Por lo general los animales adultos necesitan poco Fe en la dieta, ya que tienen buenas reservas, a menos que haya pérdidas de sangre o estados patológicos, este mineral es absorbido principalmente en el duodeno (Suttle, 2010), se elimina en heces, orina, sudor y cuando los animales sufren alguna hemorragia (McDowell y Arthington, 2005).

Los bovinos asimilan más eficientemente el Fe de las pasturas respecto al de origen animal (Georgievskii, 1982). Dietas con alto contenido de Fe disminuyen la absorción de P, Cu, Zn, Se, Mn, Co y Pb, y viceversa, ya que compiten por el mismo sitio de absorción; un exceso de Fe puede ser tóxico (Puls, 1994; NRC, 2001; NRC, 2005); la intoxicación incluye congestión vascular, irritación del tubo gastrointestinal (Suttle, 2010), diarrea y acidosis metabólica (Minson, 1990; McDowell y Arthington, 2005).

Por otro lado, la deficiencia de Fe en rumiantes es poco común (Kincaid, 1999). Los signos de deficiencia de Fe incluyen anemia hipocrómica y microcítica (Miller, 1979). Para el caso de los forrajes, las concentraciones de Fe están influenciadas por la especie vegetal, el estado fenológico, tipo de suelo, el contenido total de Fe en el suelo y las condiciones ambientales (Minson, 1990); las leguminosas y las gramíneas contienen más Fe que los cereales (NRC, 2005). En los forrajes el Fe se encuentra en estado férrico (NRC, 2005), también participa en la fotosíntesis, fijación de nitrógeno, respiración, transporte de oxígeno y regulación de la biosíntesis de DNA (NRC, 2005).

3.7.3. *Zinc*. El Zn es un nutriente esencial para todas las especies animales, para una gran variedad de funciones metabólicas (Dana *et al.*, 2002; NRC, 2005); en el cuerpo parece estar relacionado a su asociación con las enzimas, ya sea como parte de la molécula o como activador (McDowell y Arthington, 2005). El Zn es componente de las estructuras del ADN, ARN y los ribosomas, forma parte del sistema inmune e interviene en el balance de electrolitos, es activador de varios sistemas enzimáticos, es importante para la utilización y producción de hormonas (Underwood y Suttle, 1999).

El Zn contribuye en el proceso de espermatogénesis, el crecimiento testicular y el desarrollo de los órganos sexuales en el macho (McDowell y Arthington, 2005); es importante en el mantenimiento e integridad de los epitelios de los órganos reproductivos, y es necesario en la implantación del embrión (Robinson *et al.*, 2006); síntesis de vitamina A, transporte del dióxido de carbono, estabilidad de las membranas de las células rojas; es esencial en el metabolismo de los ácidos grasos, en el metabolismo de los carbohidratos, en la síntesis de proteínas y de los ácidos nucleicos, y en la regulación del apetito, previene la paraqueratosis en la piel (Minson, 1990; Suttle, 2010).

El Zn se absorbe de acuerdo a las necesidades del animal, este proceso ocurre principalmente en el duodeno, el coeficiente de absorción en los bovinos es de 0.75 (Underwood y Suttle, 1999); concentraciones altas de Zn en la dieta puede ocasionar deficiencias de Fe y Cu e influir en los procesos de absorción y utilización del Ca (McDowell y Arthington, 2005). La concentración del Zn en el plasma fluctúa con la edad, el estrés y las infecciones (Kincaid, 1999). La lactancia representa una demanda mayor de Zn a pesar del bajo contenido en la leche (Underwood y Suttle, 1999); el consumo limitado de Zn afecta el crecimiento, retarda la velocidad de cicatrización de las heridas y reduce la habilidad para movilizar las reservas hepáticas de vitamina A (Suttle, 2010).

La carencia de Zn puede causar reducción del consumo de alimento, aumentar los problemas de la piel (seca y escamosa), causar inflamación de la nariz y boca, el endurecimiento de las articulaciones, pezuñas débiles, disminución de la respuesta inmune del timo, bazo, linfocitos y neutrófilos; aparecen celos silenciosos, puede haber aborto, malformación fetal, distocia, problemas en el proceso de espermatogénesis en el macho, baja de libido (Smith y Akinbamijo, 2000; McDowell y Arthington, 2005; NRC, 2005; Suttle, 2010); alteración en el metabolismo de los carbohidratos, las proteínas, los lípidos y los ácidos nucleicos, especialmente en la síntesis de prostaglandinas, lo que afecta directamente la función lútea (NRC, 2001).

Por otro lado, la intoxicación por Zn reduce la ganancia de peso y la eficiencia alimenticia, disminuye el consumo y eventualmente se observa “pica” (Underwood y Suttle, 1999), dolor abdominal, anemia, pobre mineralización del hueso, daño pancreático, artritis, enfermedad del músculo blanco, hemorragias internas, muerte de animales recién nacidos (NRC, 2001; 2005). El exceso de Zn depende principalmente de los contenidos relativos de Ca, Cu, Fe y Cd, con los cuales éste interactúa en los procesos de absorción y utilización (McDowell y Arthington, 2005).

El Zn en las plantas ayuda en la formación de auxinas, ribosomas y ARN, existe evidencia que ayuda a la permeabilidad de las membranas, resistencia a la sequía y enfermedades bacterianas y fúngicas (Kabata-Pendías y Pendías, 2001), participa en los procesos de oxidación celular, producción de clorofila y es requerido para la síntesis de triptófano (Georgievskii, 1982). Los niveles de Zn en las plantas están afectados por la especie, el clima, la madurez, las prácticas de fertilización y los niveles y la disponibilidad del Zn en el suelo; las gramíneas contienen menos Zn que las leguminosas (Minson, 1990). La deficiencia de Zn en las plantas puede ocurrir por bajo contenido de Zn en el suelo, suelos alcalinos, suelos con bajo contenido de MO, zonas cálidas lluviosas y respuesta de la especie o genotipo de las plantas (Kabata-Pendías y Pendías, 2001).

3.6.4. *Manganeso*. El Mn es el segundo mineral traza más abundante en los suelos después del Fe, y se encuentra en la mayoría de los suelos como óxido insoluble (NRC, 2001). El Mn en el organismo es necesario para la estructura normal de los huesos, la reproducción y la función normal del sistema nervioso; es cofactor de enzimas asociadas con el metabolismo de los carbohidratos y la síntesis de mucopolisacáridos (McDowell y Arthington, 2005); además tiene una posible función en el cuerpo lúteo (Suttle, 2010), es esencial para la fosforilación oxidativa, metabolismo de aminoácidos y colesterol, síntesis de ácidos grasos y desarrollo de microorganismos del rumen; la tolerancia por el animal depende de las concentraciones de Fe, Cu y Mo en la dieta (Minson, 1990).

La absorción de Mn se realiza en el intestino (Minson, 1990); dietas con alto contenido de Ca y Fe reducen su absorción (Underwood y Suttle, 1999; Suttle, 2010). En rumiantes, la deficiencia de Mn ocurre cuando los animales son alimentados con pasturas que se desarrollan en suelos alcalinos (Suttle, 2010); con deficiencia severa, las articulaciones aumentan de tamaño, hay rigidez, extremidades torcidas, tibias y húmeros más cortos, temblor nervioso de la lengua, temblores musculares, disminución de la producción láctea, ausencia de celo, disminución de la tasa de concepción, reabsorción o deformación fetal y abortos; también se presentan anomalías en el metabolismo de carbohidratos y lípidos, y dermatitis (McDowell y Arthington, 2005; NRC, 2005).

3.6.5. *Cobalto*. El Co es requerido por los microorganismos del rumen para la síntesis de vitamina B₁₂; esta vitamina contiene aproximadamente 4.5% de Co. Dos factores que contribuyen al alto requerimiento de rumiantes por la vitamina B₁₂ son: 1) baja eficiencia de los microorganismos del rumen en la producción de vitamina B₁₂ a partir del Co, y 2) baja eficiencia en la absorción de la vitamina B₁₂ en el tubo digestivo (McDowell y Arthington, 2005; NRC, 2005).

La excreción del Co es por orina; cuando aumenta la deficiencia de Co van disminuyendo las concentraciones de Co y vitamina B₁₂ en el líquido ruminal (Underwood y Suttle, 1999). La deficiencia moderada afecta a animales jóvenes, en carencia grave hay agotamiento e indiferencia (Suttle, 2010), gradualmente pierden el apetito y tienen crecimiento lento, degradación muscular, anemia severa y muerte (McDowell y Arthington, 2005).

El consumo indirecto de suelo sugiere que en ocasiones puede aliviar las deficiencias de Co. Todas las plantas forrajeras contienen Co; el Co en las gramíneas se reduce a medida que el pH del suelo aumenta (Minson, 1990; Underwood y Suttle, 1999; McDowell y Arthington, 2005).

3. Justificación

La leche de bovino es un producto de la secreción normal de la glándula mamaria de animales sanos, obtenida en uno o varios ordeños al día. Es un producto que aporta nutrientes básicos para la alimentación humana, básicamente niños, ancianos, personas enfermas y en general a toda la población.

La vaca lechera es una excelente transformadora de nutrientes del alimento en leche; por lo tanto, la vaca debe tener una eficiente transformación de nutrientes para la producción óptima de leche; siendo necesario una alimentación adecuada basada primordialmente en forrajes de calidad, concentrados y suplementación adecuada de minerales y vitaminas.

Los minerales son nutrientes esenciales e indispensables para asegurar la vida, la salud y la productividad de los bovinos lecheros. En la industria bovina lechera actual hay mucho interés por conocer y corregir los desbalances de minerales para que la vaca lechera exprese al máximo su potencial productivo, teniendo como prioridad, corregir también las necesidades proteicas y energéticas en su dieta.

En el municipio de Celaya, Gto., no existían antecedentes sobre estudios de diagnósticos de minerales en alimentos y suero sanguíneo del ganado bovino lechero; por tal motivo, a través del presente estudio fue importante conocer las concentraciones de los minerales Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Fe, Zn, Mn y Co en los alimentos suministrados y en el suero sanguíneo de bovinos lecheros de cinco lecherías familiares del municipio de Celaya, Guanajuato, para identificar deficiencias y/o excesos.

4. Hipótesis

Existen desbalances de minerales en los insumos alimenticios utilizados en las dietas de los bovinos lecheros, los cuales pueden causar desequilibrios minerales en el suero sanguíneo del ganado lechero de sistemas de producción a pequeña escala bajo condiciones de confinamiento; estos desequilibrios minerales varían entre las unidades de producción ubicadas de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato, México.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Evaluar el estado mineral en los alimentos y suero sanguíneo de vacas lecheras estabuladas de cinco unidades de producción de lechería familiar localizados en la zona sur del municipio de Celaya estado de Guanajuato, México.

5.2. Objetivos específicos

1. Medir la concentración de Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Fe, Zn, Mn y Co en los forrajes, concentrados y subproductos suministrados a los bovinos productores de leche en el municipio de Celaya, Gto.
2. Determinar la concentración de Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Fe, Zn, Mn y Co en el suero sanguíneo de los bovinos lecheros estabulados.
3. Identificar deficiencias o toxicidad de los minerales en forrajes y bovinos de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato, México.
4. Analizar la relación entre el contenido de minerales en alimentos y suero sanguíneo de bovinos lecheros de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato, México.

6. Materiales y Métodos

6.1. Materiales

Se seleccionaron aleatoriamente cinco unidades de producción, de aproximadamente 75 unidades productoras de leche de bovino en pequeña escala en la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato. En cada unidad de producción se muestrearon 15 vacas, 10 en etapa de lactación y 5 secas gestantes.

Se utilizaron materiales, reactivos y productos químicos para determinar la concentración de minerales en alimentos y muestras biológicas según la metodología indicada en el manual de Fick *et al.* (1979).

6.2. Métodos de muestreo y procesamiento de muestras

El muestreo de campo se realizó al final de la época seca (Abril-Mayo de 2014), en vacas de cada UP, en dos etapas fisiológicas (10 vacas en producción y 5 vacas en periodo seco gestantes).

Muestreo de suero sanguíneo. Mediante punción de la vena mamaria de cada vaca, con aguja y tubo vacutainer, se colectó una muestra de 14 mL de sangre, la cual se dejó reposar a temperatura ambiente, para después separar el suero sanguíneo del paquete globular, decantando el suero en tubos estériles, el cual se mantuvo en congelación hasta su análisis de laboratorio.

Forraje y alimentos concentrados. Se tomaron muestras de aproximadamente 500 g de los diferentes forrajes y alimentos consumidos por el ganado, utilizando la técnica de cuarteo. Las muestras se secaron en estufa a 60°C durante 48 h, se molieron, tamizaron con malla de 2 mm y se almacenaron para su posterior análisis.

6.2.1. Análisis de laboratorio

El contenido de P en forraje, alimentos y suero sanguíneo se determinó por colorimetría en un espectrofotómetro de luz ultravioleta visible (marca Génesis, 20); el resto de los minerales Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Fe, Zn, Mn y Co se determinó por espectrofotometría de absorción atómica (Perking Elmer, 3110) y, Na y K por flamometría (Corning 410). Los análisis se realizaron en los laboratorios de Bromatología de la FMVZ, de Edafología de la Facultad de Ciencias y de Edafología de la Facultad de Geografía de la UAEM.

Los sueros se descongelaron a temperatura ambiente (16-18°C), se tomó una alícuota de 2 mL y se agregaron 8 mL de ácido tricloro acético (ATC) al 10%. Los minerales se analizaron mediante el procedimiento descrito por Fick *et al.* (1979).

6.3. Análisis estadístico

Se usó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos 5x2 (5 unidades de producción x 2 estado fisiológicos).

Las variables de respuesta fueron las concentraciones de minerales en forraje, alimentos y suero sanguíneo de los bovinos.

El análisis estadístico se realizó utilizando el procedimiento GLM con apoyo del paquete estadístico SAS (2002). En el modelo se incluyen como efectos fijos las UP y el estado fisiológico de los animales.

El modelo estadístico para los análisis de minerales en forrajes, alimentos y suero sanguíneo fue: $Y_{ijk} = \mu + UP_i + EstFis_j + UP*EstFis_{(ij)} + E_{ijk}$, donde:

Y_{ijk} = concentración de minerales en forrajes, suplementos y suero sanguíneo

μ = media general

UP_i = efecto de la i-ésima unidad de producción

$EstFis_j$ = efecto del j-ésimo estado fisiológico

$UP*EstFis_{(ij)}$ = efecto de la interacción UP*Estado fisiológico

E_{ijk} = error aleatorio

La comparación entre medias en las variables con diferencia significativa se hizo por la prueba de Tukey (Steel *et al.*, 1997); para conocer la relación entre minerales de alimentos y animales, se realizaron análisis de correlación simple (SAS, 2002).

7. Límite de espacio

7.1. Descripción del área de estudio

Fisiografía. El municipio de Celaya se ubica dentro del estado de Guanajuato; asentado en un valle del bajío mexicano rodeado de cerros, haciéndola propicia para la agricultura, siendo uno de los municipios más productivos del estado y la región. Celaya cuenta con una extensión territorial de 560.97 km². La mayor parte del municipio se compone por la llanura de la región Bajío. Celaya es atravesada de norte a sur por la afluencia del río Laja, para desembocar al Río Lerma y posteriormente a la Laguna de Chapala (INEGI, 2010).

Clima. El valle de Celaya tiene un clima semi seco, semi cálido, con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5%. Las elevaciones topográficas que lo circundan se clasifican como clima templado, sub húmedo, con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5%. La precipitación media anual para la zona es de 628 milímetros, y una temperatura de 20.85 °C (García, 1987; INEGI, 2010).

Suelo. El suelo que predomina en el municipio de Celaya es el vertisol pélico, el cual cubre la planicie con capas de arcilla limosa que tiene como característica que es apto para la agricultura y la ganadería (INEGI, 2010).

Vegetación. En el valle predomina el mezquite, además de bosques de pino y encino. Las otras especies de vegetación silvestre que existen en el municipio son: naranjilla (*Solanum quitoense*), zacatón (*Sporobolus airoides*), pata de gallo lanudo (*Echinochloa erus-galli*), banderilla (*Salvia splendens*), popotillo (*Epedra pedunculata*), cola de zorra (*Alopecurus myosuroides Huds*), huitzache (*Acacia farnesiana*), gatuno (*Ononis spinosa*), pochote (*Ceiba aesculifolia Kunth*), garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), casahuate o palo bobo (*Ipomoea murucoides*), nopal (*Opuntia*) y palma (*Arecaceae*).

Para la alimentación del ganado se cultivan la alfalfa, avena, sorgo, maíz; también se usan los esquilmos agrícolas como brócoli, coliflor, y zanahoria, entre otros (INEGI, 2010).

Ganadería. En el municipio de Celaya la ganadería bovina de propósito cárnico predomina como primer lugar en producción, seguida de la ganadería de propósito lácteo como segundo lugar, y en tercer plano, a menor escala, la producción lechera caprina, casi a la par del ganado porcino y la producción avícola (INEGI, 2010).

7.2. Ubicación de las Unidades de Producción (UP)

Las unidades de producción o lecherías familiares, seleccionadas al azar, se encuentran en las zonas Sur y Sureste del municipio de Celaya, Guanajuato (Figura 1).

La principal fuente de agua para las lecherías son los pozos de uso agrícola, y un pozo de agua potable con suministro por tubería hacia las piletas de cemento en los establos.

La alimentación de los bovinos es en dos horarios 1) por la mañana (8:00-9:00 h) y 2) por la tarde (15:00-16:00 h); se basa principalmente alfalfa (*Medicago sativa*) en verde o henificada que también es el principal cultivo de la zona; se complementa con otros forrajes de la región, esquilmos agrícolas, concentrado comercial, y en ocasiones sales minerales.



Figura 1. Localización geográfica de las unidades de producción de leche en pequeña escala en el municipio de Celaya, Guanajuato. Localidad 1. San Isidro del Tajo 1, Localidad 2. San Isidro del Tajo 2, Localidad 3. San José el Nuevo, Localidad 4. Ejido Rincón de Tamayo, Localidad 5. Comunidad de Trojes.

8. Límite de tiempo

El proyecto de tesis se elaboró durante el período de marzo a junio de 2014. La selección de las unidades de producción fue durante el mes de abril de 2014.

El muestreo de campo y procesamiento de las muestras biológicas para su conservación se realizó al final de la época seca (Abril-Mayo de 2014) en 15 vacas de cada UP en dos etapas de producción diferentes.

El análisis de laboratorio para determinación de minerales en alimentos y suero sanguíneo se realizó durante los meses de septiembre de 2014 a abril de 2015.

Los análisis estadísticos, descripción y discusión de resultados fue durante mayo, y la redacción del documento final durante los meses de junio a agosto de 2015.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 Alimentos analizados

En el Cuadro 1 se presentan los alimentos muestreados para análisis de contenido mineral, suministrados a vacas lecheras del sur y suroeste del municipio de Celaya, Guanajuato. El principal forraje cultivado en la zona es la alfalfa, suministrada en su mayoría de forma fresca y en menor proporción henificada; este forraje lo usan los productores de la cinco UP estudiadas; el ensilado de maíz (planta completa), la veza o ebo, el pasto nativo y el heno de avena, solo se usan en la UP de San Isidro del Tajo1; el concentrado comercial se suministra en cuatro de las cinco UP; y el brócoli en las UP de San José el Nuevo y Comunidad de Trojes. Como se aprecia, el sistema alimenticio es bastante simplificado, se basa y depende principalmente del uso de la alfalfa cultivada en la misma zona.

Cuadro 1. Alimentos utilizados en la alimentación de vacas lecheras en producción en establos localizados en las zonas sur y suroeste del municipio de Celaya, Guanajuato.

UP	Localidad	Alimentos (nombre común)
1	San Isidro del Tajo 1:JT	Alfalfa, ensilado de maíz, ebo, pasto y heno de avena
2	San Isidro del Tajo 2:MM	Alfalfa y concentrado
3	San José el Nuevo:LM	Alfalfa, concentrado y brócoli
4	Ejido Rincón de Tamayo:FM	Alfalfa y concentrado
5	Comunidad de Trojes:TM	Alfalfa, concentrado y brócoli

Localidad 1. San Isidro del Tajo 1, Lechería Martin Mandujano (JT)

Localidad 2. San Isidro del Tajo 2, Lechería José Trejo (MM)

Localidad 3. San José el Nuevo, Lechería Guadalupe Montoya (LM)

Localidad 4. Ejido Rincón de Tamayo (Juan Martin), Lechería Francisco Maravillo (FM)

Localidad 5. Comunidad de Trojes, Lechería Tino Melesio (TM)

Cabe destacar que los propietarios de las UP 1, 2 y 5, refirieron suministrar algún tipo de sales minerales a sus vacas, sin embargo, al momento de visitar las UP para muestrear las vacas y los alimentos, no contaban con este insumo; en tanto que en las UP 3 y 4 indicaron que por lo general no daban sales minerales a sus vacas.

9.2. Contenido de minerales en alimentos

9.2.1. Macro minerales

En el Cuadro 2 se muestra el contenido de macro minerales encontrado en los alimentos analizados que son parte de la alimentación de las vacas lecheras.

El contenido de Ca en los alimentos está dentro de rango normal y cubre el requerimiento de las vacas lecheras en producción con 15 kg de leche por vaca por día (NRC, 2001). Morales *et al.* (2007) informaron que el forraje ryegrass en la zona del valle de Toluca tuvo niveles adecuados de Ca en la época seca pero en la de lluvias el contenido fue inferior a 0.45 % de la MS; también observaron que el maíz molido y el rastrojo de maíz fueron deficientes en Ca; en cambio, el concentrado, la pollinaza y el ensilado de maíz tuvieron concentraciones de Ca superiores al requerimiento de vacas en sistemas de producción de leche en pequeña escala en el valle de Toluca, México. Castro (2005) informó que los valores de Ca encontrados en el forraje ryegrass, tanto para las épocas primavera, verano, otoño e invierno como en las distintas edades de corte del forraje (de cero a 28 días de edad) no cubren el requerimiento de una vaca en producción (0.51%) (NRC, 2001). En México el Ca está considerado deficiente en los forrajes a nivel nacional (Huerta, 2003).

En el caso del P, solamente el suplemento tuvo una concentración que cubre el requerimiento de las vacas lecheras en producción, el resto de los alimentos analizados es deficiente en P, por lo que se esperaría que la relación Ca:P no fuera adecuada en la dieta y tampoco en el suero sanguíneo de las vacas. El forraje ryegrass, el ensilado de maíz y los

concentrados suministrados a vacas lecheras de producción de leche en pequeña escala en el valle de Toluca, México, si tuvieron suficiente P (>0.32% MS) para cubrir el requerimiento de vacas lecheras, tanto en la época seca como de lluvia (Morales *et al.*, 2007), a diferencia del presente estudio en donde todos los forrajes tuvieron contenidos de P menores a 0.33% MS. Castro (2006), en praderas del valle de Toluca, México, se observó deficiencia en el contenido de P del pasto ryegrass en la época de invierno y no se cubrió el requerimiento de una vaca lechera en producción (0.33%) (NRC, 2001).

La relación Ca:P sólo fue adecuada en la alfalfa, en el resto de los alimentos estuvo alejada de la recomendación Ca:P 2:1.

Respecto al Mg fue adecuado en el concentrado, alfalfa y ensilado, pero deficiente en los forrajes avena, pasto, ebo y brócoli.

Los análisis de Na indican que el concentrado, la alfalfa y el ensilado de maíz si cubren los requerimientos de las vacas lecheras (> 0.18 % MS), en contraste, la avena con pasto, ebo con pasto y el brócoli tuvieron concentraciones inferiores al requisito de las vacas. En el estudio realizado por Morales *et al.*, (2007) se observó que el maíz molido, el rastrojo y ensilado de maíz tanto en la época de lluvias como en la seca no cubrieron el requerimiento de Ca de vacas lecheras en producción, pero el contenido de Na en las dos épocas del año fue adecuado para vacas lecheras (<0.18 % MS).

Las concentraciones de Na reportadas por Castro (2006) en forraje ryegrass del altiplano mexicano cubren los requerimientos de vacas en producción (13 kg leche/día) (NRC 2001). Otros autores reportan concentraciones de Na de 0.11% para la misma región (Morales *et al.*, 2007; Domínguez-Vara y Huerta, 2008).

Para el caso del K, solamente la alfalfa tuvo una concentración superior a 0.90 % y cubre las necesidades de las vacas lecheras, pero el resto de los alimentos analizados (avena,

pasto, ebo y brócoli) no satisfacen los requerimientos de este mineral para vacas lecheras. Morales *et al.* (2007) informaron que la pollinaza, el ensilado de maíz y el forraje rye grass fueron adecuados en K en lluvias y secas, pero los insumos como el maíz molido, rastrojo de maíz y el mismo concentrado mostraron contenidos de K menores a 0.90 % de la MS. Castro (2006) observó deficiencia de K en el forraje ryegrass en la época de invierno por lo que no se cubrió el requerimiento de una vaca en producción (NRC, 2001). La mayoría de los forrajes para rumiantes en pastoreo son adecuados en K (Huerta, 1999).

Cuadro 2. Concentración de macro minerales en los alimentos que consumen las vacas lecheras de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato.

Mineral (%) ¹	Alimentos					
	Concentrado	Alfalfa	Ensilado de maíz	Avena y pasto	Ebo y pasto	Brócoli
Calcio	0.459	0.345	0.494	0.217	0.147	1.270
Fósforo	0.339	0.142	0.094	0.144	0.107	0.228
Ca:P	1.353	2.429	5.255	1.506	1.373	5.570
Magnesio	0.493	0.226	0.535	0.114	0.099	0.225
Sodio	0.525	0.892	0.288	0.085	0.123	0.075
Potasio	0.669	1.480	0.756	0.381	0.238	0.205

¹Requerimiento para una vaca lechera Holstein (400 kg PV) con producción de 16 kg de leche por día (NRC, 1988; 2001): %BS Ca 0.51, P 0.33, Mg 0.20, Na, 0.18, K 0.90, Ca:P 2:1.

9.2.2. Micro minerales

En el Cuadro 3 se muestra el contenido de micro minerales encontrado en los alimentos analizados que son parte de la alimentación de las vacas lecheras.

En el caso del Cu, solamente el alimento concentrado cubre el requerimiento de las vacas, es decir, las 10 ppm, pero el resto presenta valores de Cu muy bajos (<5.5 ppm). En contraste, la concentración de Fe en los alimentos consumidos por las vacas presenta valores muy por arriba del requerimiento (>50 ppm) de las vacas lecheras; esto puede ser de importancia ya que por un lado hay deficiencia de Cu en la mayoría de los alimentos que los productores suministran a las vacas, y por otro hay un exceso de Fe en los mismos alimentos proporcionados, aunado a que en la mayoría de los establos, las vacas no reciben complementos de minerales de forma regular o en forma esporádica. De los alimentos suministrados, sólo el concentrado y el brócoli cubren el valor requerido de Zn (40 ppm) pero el resto presenta valores deficientes, sobre todo el ensilado de maíz, el ebo y el pasto; lo anterior, puede ser importante no solo para la producción de leche sino también para la reproducción del ganado lechero. Morales *et al.* (2007) indicaron que el nivel de Cu en el forraje rye grass fue adecuado en el maíz molido, pero el rastrojo de maíz fue deficiente, y en el concentrado, pollinaza y ensilado de maíz fue adecuado o alto. Estos autores encontraron que el forraje ryegrass tuvo exceso de Fe (> 200 ppm MS); el problema fue mayor en el concentrado, pollinaza y ensilado de maíz (> 300 ppm MS). En relación con el Zn, reportaron que el forraje ryegrass tuvo valores abajo del requerimiento y nivel crítico (< 30 ppm), lo cual es grave para la nutrición y reproducción del ganado lechero (NRC, 2001); además, el maíz molido y el rastrojo de maíz también fueron deficientes en Zn; en contraste, el concentrado, la pollinaza y el ensilado tuvieron valores adecuados o altos.

Castro (2006) indicó que la concentración promedio de Cu del forraje ryegrass evaluado fue de 22.2 ppm, mientras que Morales *et al.* (2007) reportaron un valor medio de 13.52 ppm. Castro (2006) observó concentraciones altas de Fe en el forraje ryegrass atribuidas a que los suelos son ligeramente ácidos, favoreciendo la disponibilidad y absorción del mismo por la planta (McDowell *et al.*, 1978); además, los suelos de esta zona son ricos en Fe (> de 255 ppm) (Domínguez-Vara y Huerta, 2008).

Las concentraciones de Fe observadas cubren los requerimientos de vacas con producción de leche de 13 kg leche/día (NRC, 2001). Los forrajes deficientes en este mineral en México son bajos (Huerta, 1997). A pesar de las altas concentraciones de Fe reportadas, no se observaron deficiencias de Cu, probablemente porque las deficiencias de Cu en el ganado se han reportado con valores de 250 a 500 ppm de Fe, los cuales son valores superiores a los reportados en esta investigación (Domínguez-Vara y Huerta, 2008). Los contenidos de Fe encontrados en este trabajo son inferiores a los observados en otros trabajos en forrajes de clima templado (Domínguez-Vara y Huerta, 2008) con valores medios de 550 ppm. El promedio en el contenido de Fe observado en el forraje de este estudio es inferior al reportado en otros trabajos (230 vs 550 ppm) (Domínguez-Vara y Huerta, 2008) y superior a lo reportado en climas cálidos por otros autores (230 vs 131 ppm) (Huerta, 1997).

En el caso del Zn en forraje ryegrass, Castro (2006) encontró que en otoño disminuyó su concentración conforme avanzó el estado de madurez, y aunque al inició del invierno aumentó, la concentración de Zn no cubrió los requerimientos de una vaca en producción (NRC, 2006), y en la época de otoño el Zn estuvo por debajo del nivel crítico (NRC, 2001). Los altos niveles de Fe en el forraje pueden afectar la absorción del Zn (NRC, 2001).

Cuadro 3. Concentración de micro minerales en los alimentos que consumen las vacas lecheras de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato.

Mineral (ppm) ¹	Alimentos					
	Concentrado	Alfalfa	Ensilado de maíz	Avena y pasto	Ebo y pasto	Brócoli
Cobre	10.61	3.71	2.92	2.73	5.41	1.97
Hierro	420.8	198.1	92.2	175.1	99.2	84.7
Zinc	80.89	19.58	13.37	26.33	15.29	37.28

¹Requerimiento para una vaca lechera Holstein (400 kg PV) con producción de 16 kg de leche día (NRC, 1988; 2001): ppm, Cu 10, Fe 50, Zn 40.

9.3. Contenido de minerales en suero sanguíneo

9.3.1. Macro minerales

El contenido de macro minerales en el suero sanguíneo de las vacas lecheras de las 5 UP de las zonas sur y suroeste de Celaya, Guanajuato se muestra en el Cuadro 4. Hubo diferencias ($P < 0.05$) en las concentraciones de Ca, P, Mg, Na, K y relación Ca:P en el suero sanguíneo de las vacas entre las UP.

El contenido de Ca fue mayor ($P < 0.05$) en las UP 1 y 3, y menor en las UP 2, 4 y 5. Sin embargo, los niveles de Ca en el suero no fueron deficientes en ninguna UP, incluso se observan niveles altos de Ca en las UP 1 y 3 ($> 14 \text{ mg Ca dL}^{-1}$), lo cual puede afectar la relación Ca:P en el mismo suero.

Morales *et al.* (2007) también informaron que en suero de vacas lecheras del valle de Toluca el contenido de Ca fue alto (NRC, 2001). En la misma zona en un estudio se encontró exceso de Ca en suelo, pastos nativos y suero de ovinos del Valle de Toluca, México (Domínguez-Vara y Huerta, 2008).

Aunque el Ca de los forrajes fue bajo en tres localidades, las altas concentraciones en el suero pueden deberse al consumo de concentrado, premezclas minerales y pollinaza (Cuadros 6 y 7). El Ca en el suero fue mayor en las lluvias, aunque esto no coincide con el Ca del forraje, se puede atribuir al Ca ingerido en el concentrado, y a la resorción ósea durante la lactación.

El contenido de P fue mayor ($P < 0.05$) en la UP 1, intermedio en las UP 3 y 4 y menor en las UP 2 y 5. Sin embargo, los niveles de P en el suero no fueron deficientes en ninguna UP, incluso también se observan niveles altos de P (hiperfosfatemia sérica) en las 5 UP ($> 9 \text{ mg P dL}^{-1}$), lo cual también puede afectar la relación Ca:P en el mismo suero de las vacas.

El contenido de P en el suero baja con un exceso de calcio, sobre todo cuando la dieta es baja en P; en contraste, aumenta por el bajo consumo de Ca, exposición al frío, ayuno, deshidratación y estrés (Minson, 1990); la concentración en suero también es afectada por la edad y el estado fisiológico de la vaca, así como por la época del año (Huerta, 1999). En granjas lecheras del valle de Toluca, Morales *et al.* (2007) informaron que aunque el forraje tuvo 0.32 % de P, en el suero de las vacas fue alto (8.37 mg dL⁻¹), atribuyendo esto al consumo de pollinaza, insumo alimenticio que tuvo 1.28 % de Ca y 1.35 % de P. Por lo tanto, el bajo contenido de Ca y P en los forrajes fue complementado por este ingrediente. Segura *et al.* (2000) aumentaron el P sérico (de 4.53 a 6.84 mg dL⁻¹) al dar pollinaza a bovinos en pastoreo. Normalmente el P en suero es mayor en las lluvias ya que los rebrotes del forraje tienen más minerales (McDowell, 1985).

La relación Ca:P en el suero de las vacas no mostró diferencias ($P > 0.05$) entre las localidades analizadas; también se observa una relación Ca:P muy estrecha en todas las localidades, es decir en las 5 localidades es inferior a 2:1; en la localidad 4 es de 0.99:1. Al respecto, Morales *et al.* (2007) observaron inadecuada relación Ca:P en algunos establos productores de leche en pequeña escala del valle de Toluca; lo anterior, estuvo relacionado con una inapropiada relación Ca: P en el forraje consumido por las vacas, y por un exceso de Ca observado en el suero del ganado lechero.

El contenido de Mg en el suero sanguíneo de las vacas fue adecuado en las cinco UP evaluadas.

El contenido de Na fue mayor ($P < 0.05$) en las UP 1 y 3, y menor en las UP 2, 4 y 5 en las cuales estuvo en el límite marginal, pero apenas arriba del nivel crítico. Morales *et al.*, (2007) encontraron niveles normales de Na en vacas lecheras del valle de Toluca, asumiendo que el Na del forraje fue complementado con el Na de los otros alimentos consumidos por las vacas; los bovinos conservan bien este mineral cuando es deficiente en la dieta excretando menos en orina, heces y saliva (ARC, 1980).

El contenido de K fue mayor ($P < 0.05$) en la UP 1, intermedio en las UP 2 y 3, y menor en las UP 4 y 5 en las cuales estuvo en el límite marginal, pero apenas arriba del nivel crítico. Lo anterior, coincide con lo informado por Morales *et al.*, (2007) quienes encontraron que el K en el suero de vacas lecheras fue normal, asumiendo que el contenido de K en el forraje se reflejó en la concentración de este mineral en el suero; el K aportado en el concentrado es muy soluble y tiene alta absorción (Underwood y Suttle, 1999).

Cuadro 4. Contenido de macro minerales en suero sanguíneo de vacas lecheras de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato.

Mineral, (mg dL ⁻¹)	Unidades de producción						P <	⁷ Nivel crítico (mg dL ⁻¹)
	JT ¹	LM ²	FM ³	MM ⁴	TM ⁵	EEM ⁶		
Calcio	16.12 ^a	9.21 ^b	14.34 ^a	9.67 ^b	9.61 ^b	0.9436	0.0001	8.0
Fósforo	13.09 ^a	10.34 ^b	11.29 ^{ab}	10.41 ^{ab}	9.17 ^b	0.6765	0.0023	4.0
Ca:P	1.26	1.07	1.29	0.99	1.13	0.1444	0.5607	1.1:1
Magnesio	1.76 ^b	2.84 ^a	2.40 ^{ab}	2.82 ^a	2.55 ^a	0.1861	<0.0001	1.8
Sodio	438 ^a	306 ^b	443 ^a	309 ^b	333 ^b	21.025	0.0001	303
Potasio	24.42 ^a	19.77 ^{abc}	21.37 ^{ab}	15.59 ^c	16.88 ^{bc}	1.2820	0.0001	15.2

^{abc}Valores medios en la misma hilera con distinta literal, son diferentes ($P < 0.05$).

¹Localidad 1. San Isidro del Tajo 1, ²Localidad 2. San Isidro del Tajo 2, ³Localidad 3. San José el Nuevo, ⁴Localidad 4. Ejido Rincón de Tamayo, ⁵Localidad 5. Comunidad de Trojes.

⁶EEM = error estándar de la media

⁷Nivel crítico (mg dL⁻¹) (NRC, 2001).

9.3.2. Micro minerales

El contenido de micro minerales en el suero sanguíneo de las vacas lecheras de las 5 UP de las zonas sur y suroeste de Celaya, Guanajuato se muestra en el Cuadro 5. Hubo diferencias ($P < 0.05$) en las concentraciones de Cu, Fe y Zn en el suero sanguíneo de las vacas entre las UP estudiadas.

El contenido de Cu fue mayor ($P < 0.05$) en la UP 1, intermedio en las UP 3 y 4, y menor en las UP 2 y 5. Sin embargo, los niveles de Cu en el suero fueron deficientes en las 5 UP, incluso se observan niveles muy bajos en las UP 2 y 5 ($< 0.5 \text{ mg Cu } \mu\text{L}^{-1}$), lo cual puede afectar la producción de leche y reproducción de las vacas lecheras de la zona estudiada. Morales *et al.* (2007) detectaron carencias de Cu en el suero de vacas lecheras del valle de Toluca, donde las concentraciones en suero fueron menores al valor crítico, y estuvieron asociadas a valores bajos de Cu en los forrajes con menos de 10 ppm de Cu, lo que predispone a carencias en el animal; además, las dietas con 3 ppm de Mo causan deficiencia aun con 10 ppm de Cu (Huerta, 1997). El exceso de Fe, S, Mo y Zn (Underwood y Suttle, 1999; McDowell *et al.*, 2005) afectan el metabolismo del Cu y causan deficiencia del mismo. Por lo tanto, el suministro de pollinaza, alimento que normalmente tiene más de 10 ppm de Cu, en la dieta de vacas lecheras, pudiera no ser efectivo para corregir la deficiencia, si la excreta contiene además del Cu, altos niveles de Fe y Zn.

Hubo diferencias ($P < 0.05$) en el contenido de Fe en el suero sanguíneo de las vacas en las diferentes localidades estudiadas; todos los valores medios de las 5 localidades estuvieron por arriba del valor crítico, incluso con valores de más de $3 \mu\text{g mL}^{-1}$ de suero, lo cual puede interferir con el Cu y empeorar más su deficiencia en las vacas. Morales *et al.* (2007) no encontraron deficiencias de Fe en bovinos lecheros en producción, con un rango de concentración de 1.90 a $2.40 \mu\text{g mL}^{-1}$ de suero. La deficiencia de Fe es rara en animales en pastoreo, pero puede ocurrir en hemorragias graves y parasitosis masivas (McDowell, 1985).

El contenido de Zn fue mayor ($P < 0.05$) en las UP 1 y 3 en las cuales el valor medio no indica deficiencia en las vacas, pero mucho menor en las UP 2, 4 y 5, en las que los promedios de Zn en el suero fueron deficientes en las 3 UP, incluso se observan un nivel muy bajo en la UP 5 ($< 0.55 \mu\text{g Zn } \mu\text{L}^{-1}$), lo cual puede afectar la producción de leche y la reproducción de las vacas. Morales *et al.*, (2007) indicaron una severa deficiencia de Zn en el suero de vacas lecheras donde el 79 % de las muestras analizadas tuvo menos de $0.8 \mu\text{g}$

mL⁻¹; lo anterior coincidió con lo observado en el forraje, donde 92 % de las muestras analizadas tuvo menos de 30 ppm de Zn (Huerta, 1999). El total de Zn absorbido es afectado por su concentración en la dieta, con dietas bajas aumenta su absorción y viceversa (Miller, 1979b). El exceso de Ca en la dieta reduce la absorción de Zn (Gomide *et al.*, 1969). La absorción de Zn es influida por el contenido de Zn, P, Cd, Cu, Ca, Fe y Mo en la dieta (Minson, 1990; NRC, 2005; Miller, 1979b); y por factores del animal como la edad, el genotipo y el estado de salud (Underwood y Suttle, 1999).

Cuadro 5. Contenido de micro minerales en suero sanguíneo de vacas lecheras de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato.

Mineral (µg mL ⁻¹) ¹	Unidades de producción						P<	Nivel crítico (µg mL ⁻¹)
	JT ¹	LM ²	M ³	MM ⁴	TM ⁵	EEM ⁶		
Cobre	0.77 ^a	0.47 ^b	0.62 ^{ab}	0.61 ^{ab}	0.41 ^b	0.0712	0.0067	0.8
Hierro	3.67	3.54	5.20	3.08	3.63	0.5347	0.0558	1.3
Zinc	1.38 ^a	0.78 ^b	1.49 ^a	0.76 ^b	0.52 ^b	0.1162	0.0001	0.8

^{abc}Valores medios en la misma hilera con distinta literal, son diferentes (P<0.05).

¹Localidad 1. San Isidro del Tajo 1, ²Localidad 2. San Isidro del Tajo 2, ³Localidad 3. San José el Nuevo, ⁴Localidad 4. Ejido Rincón de Tamayo, ⁵Localidad 5. Comunidad de Trojes.

⁶EEM = error estándar de la media

⁷Nivel crítico (µg mL⁻¹) (NRC, 2001).

9.3.3. Contenido mineral en suero sanguíneo de vacas lecheras en producción y secas.

El efecto del estado fisiológico de las vacas en el contenido de minerales del suero sanguíneo se indica en el Cuadro 6. No hubo diferencias (P>0.05) en la concentración mineral entre etapas fisiológicas. El Ca estuvo dentro del rango normal en ambos estados fisiológicos, el P estuvo en concentración alta, en ambas categorías de vacas y la relación Ca:P fue inferior a 2:1, tanto en vacas en producción como en período seco. El Na y K estuvieron dentro del rango normal en ambos estados productivos. Respecto a los micro

minerales, el Cu tuvo deficiencia severa en ambas categorías de vacas; el Fe tuvo niveles muy altos, y el Zn mostró valores dentro del rango normal en ambos tipos de vacas.

Cuadro 6. Contenido de minerales en suero sanguíneo de vacas en producción y secas en 5 lecherías familiares de las zonas sur y suroeste de Celaya, Guanajuato.

Mineral	Estado fisiológico		EEM ¹	P<
	Producción	Secas		
Macro mineral (<i>mg dL⁻¹</i>)				
Ca	11.29	12.65	0.6032	0.0965
P	10.79	11.01	0.4540	0.7358
Ca:P	1.07	1.31	0.0939	0.0959
Mg	2.47	2.51	0.1256	0.9332
Na	362.0	373.0	13.259	0.5774
K	19.68	19.44	0.8018	0.8381
Macro mineral (<i>µg mL⁻¹</i>)				
Cu	0.57	0.58	0.4656	0.9039
Fe	3.70	4.10	0.3526	0.5760
Zn	0.95	1.01	0.0801	0.4712

No hubo diferencias en la concentración mineral entre estados fisiológicos (P>0.05).

¹EEM = error estándar de la media

9.3.4. Correlación entre minerales de los alimentos y del suero sanguíneo de vacas lecheras Holstein de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato.

No se observaron correlaciones importantes y significativas entre los minerales analizados en los alimentos y los medidos en el suero de las vacas (Cuadro 6). Lo anterior puede

deberse a que de los alimentos sólo se colectaron muestras puntuales al momento de colectar las muestras de sangre del ganado lechero, pero las concentraciones de minerales en tejidos y fluidos del animal, por lo general, son el reflejo de su consumo de varias semanas o incluso meses antes de realizar los análisis correspondientes (Mc Dowell, 2003; Underwood y Suttle, 1999).

Cuadro 6. Coeficientes de correlación (r) entre el contenido de minerales en los alimentos y la concentración en suero sanguíneo de vacas Holstein de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato.

Correlación	Ca	P	Mg	K	Na	Cu	Fe	Zn
r	0.06467	-0.370	-0.339	0.211	-0.466	-0.244	0.178	-0.486
P<	0.5841	0.0011	0.0031	0.0688	0.0001	0.0347	0.1691	0.0001

10. Conclusiones

1. En el análisis de macro minerales en alimentos se detectó que el Ca fue adecuado, el P fue deficiente en la mayoría, excepto en el concentrado, el Mg fue adecuado en el concentrado, alfalfa y ensilado pero deficiente en los forrajes avena, pasto, ebo y brócoli, el Na fue adecuado en el concentrado, alfalfa y ensilado de maíz, pero deficiente en pasto, avena, ebo y brócoli, el K fue adecuado en la alfalfa, pero deficiente en el resto de los alimentos; la relación Ca:P sólo fue adecuada en la alfalfa.
2. El Cu fue adecuado en el concentrado pero deficiente en el resto, el Fe tuvo niveles muy altos y superiores al requerimiento de vacas lecheras, el concentrado y el brócoli si cubren el requerimiento de Zn de las vacas, pero el resto de alimentos fue deficiente en Zn.
3. Hubo diferencias en las concentraciones de Ca, P, Mg, Na, K y relación Ca:P en el suero sanguíneo de las vacas entre UP.
4. Los niveles de Ca en el suero no fueron deficientes en ninguna UP, incluso hubo exceso de Ca en dos UP, el P en suero no fue deficiente en ninguna UP, incluso hubo niveles altos de P en todas las UP, el contenido de Mg fue adecuado, el Na mostró deficiencias marginales en tres UP, el K fue marginal en 2 UP.
5. Hubo diferencias en las concentraciones de Cu, Fe y Zn en el suero sanguíneo de las vacas entre UP. Los niveles de Cu en el suero fueron deficientes en las 5 UP, el contenido de Fe en el suero de las 5 localidades estudiadas fue alto y el de Zn fue deficiente en 3 UP.
6. No hubo diferencias en la concentración de macro y mico minerales en vacas con diferente etapa fisiológica.

7. Aunque hubo correlaciones significativas entre los minerales P, Mg, Na, Cu y Zn de los alimentos y los del suero sanguíneo de las vacas los valores de r fueron bajos (<0.50) es decir el modelo explica menos de 50% su variación.

Se concluye que hay desequilibrios minerales en el forraje y suplementos alimenticios que pueden afectar el contenido mineral en el suero e influir en la salud, producción y reproducción de las vacas lecheras de la raza Holstein de la zona sur del municipio de Celaya, Guanajuato.

11. Literatura citada

- Agudelo, D.A., y O. Bedoya. 2005. Composición nutricional de la leche de ganado vacuno. Revista Lasallista de Investigación, 2:1, 38-42. Corporación Universitaria Lasallista. Colombia.
- Albarrán-Portillo, B. 1999: evaluación del pastoreo en praderas cultivadas en sistemas de producción de leche en pequeña escala. Tesis de Licenciatura. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.
- Ammerman, C. B., Henry, P. R. 1987. Suplementación mineral para bovinos en pastoreo. Memorias del Seminario Internacional en Suplementación para Bovinos en Pastoreo. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.
- Ammerman, C. B., Baker, D. H., Lewis, A. J. 1995. Bioavailability of nutrients for animals. Academic Press. USA.
- ARC. 1980. Agricultural Research Council. The nutrient requirements of ruminant livestock. England: Commonwealth Bureau of Animal Production.
- Arriaga-Jordán, C., Espinoza-Ortega, A., Albarrán-Portillo, B. y Castelán-Ortega, O. (1999): Producción de leche en pastoreo de praderas cultivadas; una alternativa para el altiplano central. Ciencia Ergo Sum, 06(03): 290-300.
- Bavera, G. A. 2006. Elementos minerales esenciales. En: Suplementación mineral y con nitrógeno no proteico del bovino en pastoreo. 3ª ed. Argentina.
- Bernal E. J. 1994. Pastos y Forrajes Tropicales: Producción y Manejo. 3ª ed. Banco Ganadero. Colombia.
- Bernal, L., Coello, P., Acosta, J., Martínez-Barajas, E. 2007. Efecto de la deficiencia de fósforo en el metabolismo de carbono de plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris*). Agrociencia, 41:417-423.
- Bernal, L., Coello, P., Martínez-Barajas, E. 2005. Possible role played by R1 protein on starch accumulation in bean seedlings (*Phaseolus vulgaris*) under phosphate deficiency. J. Plant Physiol, 162:970-976.

- Blevins, D. G. 1994. Uptake, translocation and function of essential mineral elements in crop plants. *In*: Boote, K. J. (ed.) Physiology and Determination of Crop Yield. American Society of Agronomy, Madison.
- Blevins, D. G. 1994. Uptake, translocation and function of essential mineral elements in crop plants. *In*: Boote, K. J. (ed.) Physiology and Determination of Crop Yield. American Society of Agronomy, Madison.
- Brady, N. C., Weil, R. R. 1999. The nature and properties of soils: twelfth edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Bremner, I., Young, B. W., Phillip, M., Walker, M. J., Morrice, P. C. 1987. Iron induced copper deficiency in calves: dose response relationships and interactions with molybdenum and sulphur. *Animal Production*, 45:403-414.
- Buckman, R., Brady, T. 1982. The Nature and Properties of Soils. 8 ed. Macmillan Publishing Co., Inc. New York, USA.
- Butler, W. R. 2000. Nutritional interactions with reproductive performance in dairy cattle. *Anim. Reprod. Sci.*, 60:449-457.
- Call, J. W., Butcher, J. E., Blake, J. T., Smart, R. A., Shupe, J. L. 1978. Phosphorus influence on growth and reproduction of beef cattle. *J. Anim. Sci.*, 47:216-225.
- Castro, H. H. 2006. Digestibilidad *in vitro* y contenido mineral del forraje Rye grass (*Lolium perenne*) en diferentes épocas del año. Tesis de Licenciatura, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México. México. 53 p.
- Chapman, H. D. 1965. Cation-exchange capacity. *In*: Methods of soil analysis, part 2, Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc., Publisher. USA.
- Church, D. C. 1989. Alimentos y alimentación del ganado. Hemisferio Sur. Buenos Aires.
- Church, D. C. y Pond, W. G. 1987. Fundamentos de Nutrición y Alimentación de Animales. Limusa. México.
- Church, D. C. 1992. Fundamentos de Nutrición y Alimentación de Animales. Limusa. México.

- Church, D. C., Pond, W. G., Pond, K. R. 2006. Fundamentos de Nutrición y Alimentación de Animales. 2 ed. Limusa WILEY. México.
- Clarkson, D. T., Hanson, J. B. 1980. The mineral nutrition of higher plants. Annual Review of Plant Physiology 31:239-298.
- Dahlborn, K., Akerlind, M., Gustafson, G. 1998. Water intake by dairy cows selected for high or low milk-fat percentage when fed two forage to concentrate rations with hay or silage. Swedish Journal of Agriculture Research, 28:167-176.
- Dana, J. T., Socha, T. M., Swenson, K. C., Bruce, A. J. 2002. Efecto de minerales traza inorgánicos en el desempeño del ganado lechero y de engorda. *En: Memorias XXX Reunión de la Asociación Mexicana de Producción Animal*. 13 al 15 de octubre. Guadalajara, México.
- Domínguez-Vara I, Huerta BM. 2008. Concentración e interrelación mineral en suelo, forraje y suero de ovinos durante dos épocas en el valle de Toluca, México. *Agrociencia*. 42(2):173-183.
- Fassani, J. F., Bertechini, A. G., Kato, R. K., Geraldo, A. 2004. Composición y solubilidad *in vitro* de calcáreos calcíticos de Minas Gerais, *Cienc. Agrotec. Lavras*, 28:913-918.
- Fick, K. A., L. R. McDowell, P. H. Miles, N. S. Wilkinson, J. D. Funk, J. H. Conrad, y R. Valdivia. 1979. Métodos de análisis de minerales para tejidos de plantas y animales. Universidad de Florida. Gainesville, FL. USA.
- Forchetti, O., Maffrand, C., Vissio, C., Boaglio, C., Cufre, G. 2006. Hipofosfatemia y fragilidad osmótica eritrocítica en cabras. *Redvet*. VII.1:1-9.
- García, E. 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 4ª ed. México. D.F.
- Garmendia, J. 2007. Los minerales en la reproducción bovina. Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Central de Venezuela, Maracay. www.produccion-animal.com.ar.

- Gasque, G.R. y Blanco, O.M.A. 2004. Sistema de producción animal I, Bovinos, 2ª ed. México. División Sistema Universitaria Abierta y Educación a Distancia. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Georgievskii, V. I. 1982. The Physiological Role of Macroelements. *In*: Georgievskii, V. I., Annenkow, B. N., Samokhin, V. T. Mineral Nutrition of Animals. Butterworths. London.
- Gomide, L.W., Noller, C.H., Mott, G.O., Conrad, J.H., Hill, D.L. 1969. Mineral composition of six tropical grasses as influenced by plant age and nitrogen fertilization. *Agronomy*. (61):120-123.
- Gooneratne, S. R., Symonds, H. W., Bailey, J. V., Christensen, D. A. 1994. Effects of dietary copper, molybdenum and sulfur on biliary copper and zinc secretion in Simmental and Angus cattle. *Canadian Journal of Animal Science*, 74:315–325.
- Greene, L. W. 2000. Designing mineral supplementation of forage programs for beef cattle. *Journal Animal Science*, 77:1-9.
- Hampton, J. G., Kemp, P. D., White, J. G. H. 1999. Pasture establishment. *In*: White, J., Hodgson, J., (eds). *New Zealand pastures and crop science*. Edit, Oxford University Press.
- Healy, W. B., Rankin, P. C., Watts, H. M. 1998. Effect of soil contamination on the elements composition of herbage. *Journal of Animal Science*, 17:59-61.
- Herrera, C. 1991. *Bioquímica*. 2ª ed. McGraw Hill-Interamericana. México.
- Huerta, B. M. 1997. Nutrición mineral de rumiantes en pastoreo. *In*: Memoria del curso “Alternativas de Manejo de Bovinos para Carne en Pastoreo”. 21 y 23 de mayo, Chapingo, México.
- Huerta, B. M. 2003. Signos de deficiencia y respuestas a la suplementación mineral del ganado en pastoreo. *En*: Memoria del curso “Suplementación mineral de ganado en zonas áridas y semiáridas. Agosto de 2003. Monterrey, N. L. México.
- Hurwitz, S. 1996. Homeostatic control of plasma calcium concentration. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology* 31:41-100.
- INEGI. 1970. Carta edafológica escala 1:250 000. SPP, México.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2010a. Territorio Nacional (En línea). Disponible en www.inegi.org.mx.
- INEGI. 2002. Síntesis de información geográfica del Estado de San Luis Potosí. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI. 2007. Censo agropecuario [En línea]. Disponible en www.inegi.org.mx. (revisado el 18 de junio del 2011).
- Internacional de Actualización Técnica, Uruguayana Brasil, junio. 2005. Uruguay.
- INEGI. 2010. Territorio nacional [En línea]. Disponible en www.inegi.org.mx. (revisado el 15 de marzo del 2011).
- INAFED. 2005. San Luis Potosí [En línea]. Disponible en www.inafed.gob.mx. (revisado el 20 de julio del 2011).
- Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. 2001. Trace elements in soils and plants. 3^a ed. CRS Press. USA.
- Kebreab, E., Vitti, D. M. S. S. 2010. Bioavailability of Calcium and Phosphorus in Feedstuffs for Farm Animals. *In*: Vitti, D. M. S. S., Kebreab, E. Phosphorus and calcium utilization and requirements in farm animals. CABI. London, UK.
- Kebreab, E., y Vitti, D.M.S.S. 2005. Mineral metabolism. *In*: Dijkstra, J., Forbes, J. M., France, J. (eds). Quantitative Aspects of Ruminant Digestion and Metabolism. CAB International, Wallingford, UK.
- Kemp, P. D., Condrón, L. M., Mathew, C. 1999. Pastures and soil fertility. Oxford University Press.
- Kincaid, R. L. 1999. Assessment of trace mineral status of ruminants: A review. Department of Animal Sciences, Washington State University.
- Kiarie, E., Nyachoti, C. M. 2010. Bioavailability of Calcium and Phosphorus in Feedstuffs for Farm Animals. *In*: Vitti, D. M. S.S., Kebreab, E. Phosphorus and calcium utilization and requirements in farm animals. CABI. London, UK.
- Knowlton, K. F., Beede, D. K., Kebreab, E. 2010. Phosphorus and Calcium Requirements of Ruminants. *In*: Vitti, D. M. S. S., Kebreab, E. Phosphorus and calcium utilization and requirements in farm animals. CABI. London, UK.

- Kramer, J. H., Mak, I. T., Phillips, T. M., Weglicki, W. B. 2003. Dietary magnesium intake influences circulating pro-inflammatory neuropeptide levels and loss of myocardial tolerance to postischemic stress. *Exp. Biol. Med.*, 228:665-673.
- Kolb, E. 1972. Microfactores en la nutrición animal. Acribia, España.
- Kumar, R. 1995. Calcium transport in epithelial cells of the intestine and kidney. *Journal of Cellular Biochemistry*, 57:392-398.
- Linsner, J. R. 1981. Potassium in Ruminant. *In: Fourth Annual International Mineral Conference*. St. Petersburg Beach, Florida. USA.
- Miller, W. J. 1979a. Dairy Cattle Feeding and Nutrition. Academic Press, N.Y. USA.
- Miller, W. J. 1979b. Copper and zinc in ruminant nutrient. *In: O'Dell B, Miller EK, Miller WJ editors. National Feeds Ingredients Association*.
- McDowell, L.R., House, R.H., Fick, K.R. 1978. Iron, manganese and zinc in ruminant nutrition. *In: Conrad JH, McDowell LR editors. Latin American symposium on mineral nutrition research and grazing ruminants*. Florida, USA: Universidad de Florida. pp.108-116.
- McDowell, L. R. 1985. Nutrition of Grazing Ruminants in Warm Climates. Academic Press, New York. USA.
- McDowell, L. R. 1992. Minerals in Animal and Human Nutrition. Academic Press, San Diego, USA.
- McDowell, L. R. 2003. Minerals in Animal and Human Nutrition. 2^a ed. Elsevier Science B. V. Amsterdam, The Netherlands.
- McDowell, L. R., Arthington, J. D. 2005. Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales. Universidad de Florida, IFAS. Gainesville, USA.
- McDowell, L. R., Conrad, J. H., Ellis, G. L. 1984. Mineral deficiencies and imbalances and their diagnosis. Paper presented at Symposium on Herbivore Nutrition in Sub Tropics and Tropics: Problems and Prospects. Pretoria, South Africa.
- McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. 1988. Nutrición Animal. 2^a ed., Acribia. España.

- McDowell, LR, Velázquez P, Valle G. 1997. Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales. Universidad de Florida. Gainesville, Florida, USA.
- Mengel, K., Kirkby, E. A. 1987. Principles of Plant Nutrition. 4^a ed. International Potash Institute, Worblaufen-Bern.
- Minson, D. J. 1990. Forages in Ruminant Nutrition. Academic Press, San Diego, USA.
- Morales, A. E., Domínguez, V. I. A., González, R. M., Jaramillo, E. G., Castelán, O. O., Pescador, S. N., Huerta, B. M. 2007. Diagnóstico mineral en forraje y suero sanguíneo de bovinos lecheros en dos épocas en el valle central de México. *Técnica Pecuaria México*. 45: 329-344.
- Muller, L.D. 1992. Feeding Management Strategies. In: Large Dairy Herd Management., 326-336, edited by H.H. Van Horn and C. J. Wilcox. University of Florida, Gainesville, Florida.
- Naylor, J. M. 1991. The major minerals. In: Naylor, J. M., Ralston, S. L. (eds.) Large Animal Clinical Nutrition. Mosby-Year Book, St. Louis, Missouri.
- National Research Council. 1996. Nutrient Requirements of Beef Cattle. 7^a ed. National Academic Press, Washington, D. C. USA.
- National Research Council. 2005. Mineral Tolerance of Animals. 2^a ed. National Academic Press, Washington, D. C. USA.
- NRC. National Research Council. 1988. The nutrient requirements of dairy cattle. Washington, DC, USA: National Academic Press.
- Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 2001. 7^a ed. Subcommittee on Dairy Cattle Nutrition, Committee on Animal Nutrition, National Research Council. USA.
- Nielsen, F. H., Shuler, T. R., Zimmerman, T. J., Uthus, E. O. 1988. Dietary magnesium, manganese, and boron affect the response of rats to high dietary aluminum. *Magnesium*, 7:133-147.
- Parra, C., E. Martínez-Barajas, J. Acosta, P. Coello. 2004. Respuesta a la deficiencia de fosfato de genotipos de frijol contrastantes en su capacidad de crecer en suelos con bajo contenido de fósforo, *Agrociencia*. 38:131-139.

- Pfeffer, E., Beede, D. K., Valk, H. 2005. Phosphorus metabolism in ruminants and requirements of cattle. *In*: Pfeffer, E. and Hristov, A. (eds.). Nitrogen and Phosphorus Nutrition of Cattle. CAB International, Wallingford, UK.
- Plan Microregional de Proyectos de Desarrollo Rural para el Municipio de Celaya. 2001.
- Puls, R. 1994. Minerals levels in animal health. Diagnostic Data. Sherpa International. Clarbrook, Canada. 83-109.
- Raghothama, K. G. 1999. Phosphate acquisition. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 50:665-693.
- Robinson, J.J., Ashworth, C.J., Rooke, J.A., Mitchell, L.M., Mc Evoy, T.G. Hansen, S.L., Spears, J.W., Lloyd, K.E. and Whisnant, C.S. 2006. Nutrition and fertility in ruminant livestock. *Animal Feed Science and Technology*, 126:259-276.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., Hill, M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica, Uruguay.
- SAGARPA. 2004. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Situación actual de la producción de leche de bovino en México. 2004. Coordinación General de Ganadería. Disponible en <http://www.sagarpa.gob.mx/Dgg>.
- SAGARPA. 2013. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Situación actual de la producción de leche de bovino en México. 2012. Coordinación General de Ganadería. Disponible: <http://www.sagarpa.gob.mx/Bgg>.
- SAGARPA. 2015. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Situación actual de la producción de leche de bovino en México. Coordinación General de Ganadería. Disponible: <http://www.siap.gob.mx/ganaderia-resumen-municipal-pecuario/>.

- Schachtman, D. P., Reid, R. J., Ayling, S. M. 1998. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiol.*, 116:447-453.
- Scott, D. 1988. Control of phosphorus balance in ruminants. *In: Dobson, A., Dobson, M. J.* (eds.). *Aspects of Digestive Physiology in Ruminants*. Cornell University Press, Comstock Publishing Associates, Ithaca, New York, USA.
- Seynaeve, M., De Widle, R., Janssens, G., De Smet, B. 1996. The influence of dietary salt level on water consumption, farrowing and reproductive performance of lactating sows. *Journal Animal Science*, 74:1047-1055.
- Shirley, R. L. 1978. Water as a source of minerals. *In: Conrad, J. H., McDowell, L. R.* (eds.). *Latin American Symposium on Mineral Nutrition Research with Grazing Ruminants*. Animal Science Department, University of Florida, Gainesville, Florida, USA.
- SIAP. 2011a. Dirección de ganadería [En línea]. Disponible en www.siap.gob.mx. (revisado el 14 de abril del 2011).
- SIAP. 2011b. Dirección de Ganadería (En línea). Disponible en www.siap.gob.mx.
- SIAP.2012. Dirección de Ganadería (En línea). Disponible en www.siap.gob.mx.
- Smith, O.B., Akinbamijo, O.O. 2000. Micronutrients and reproduction in farm animals. *Animal Reproduction Science*, 60-61:549-560.
- Soares, J. H., Jr. 1995. Phosphorus bioavailability. *In: Ammerman, C. B., Baker, D. H., Lewis, A. J.* (eds). *Bioavailability of Nutrients for Animals: Amino Acids, Minerals, and Vitamins*. Academic Press, San Diego, USA.
- Spears, W. J. 1994. Minerals in forage. *In Fahey, C. G. jr.* (ed.). *Forage Quality, Evaluation and utilization*. National Conference on Forage Quality. Univ. of Nebraska. Lincoln, Nebraska, USA.
- Statistical Analysis System. 2002. Software (Versión 9.0). User's guide. N.C., USA.
- Steel, R. G. D., J. H. Torrie, and D. A. Dickey. 1997. Principles and procedures of statistics a biometrical approach. 3rd ed. McGraw-Hill. USA.
- Suttle, N. F. 2010. Mineral nutrition of livestock. 4^a ed. CABI. U.K.

- Underwood, E. J. 1981. The Mineral Nutrition of Livestock, Commonwealth Agricultural Bureau, London, England.
- Underwood, E. J., Suttle, N. F. 1999. The mineral nutrition of livestock. 3^a ed. CABI Publishing, London, England.
- Valdés, J. L., McDowell, L. R., Koger, M. 1988. Mineral status and supplementation of grazing beef cattle under tropical conditions in Guatemala. *In: Macro elements and Animal Performance. J. Prod. Agric.*, 1: 351-355.
- Vargas, E., y Fonseca, H. 1989. Contenido mineral y proteico de forrajes para rumiantes en pastoreo en Costa Rica. Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Veum, T. L. 2010. Phosphorus and Calcium Nutrition and Metabolism. *In: Vitti, D. M. S. S. and Kebreab, E. Phosphorus and calcium utilization and requirements in farm animals. CABI. London, UK.*
- Vitti, D. M. S.S., Kebreab, E. 2010. Phosphorus and calcium utilization and requirements in farm animals. CABI. London, UK.
- Vrzgula, L. 1990. Metabolic disorders and their prevention in farm animals. *In: Leopold Vrzgula (ed). Disorders in mineral metabolism. New York. Elsevier Sci. Publish Co. USA.*
- Whitehead, C. D. 2000. Nutrient elements in grassland. Soil-Plant-Animal Relationships. CABI Publishing International. University Press, Cambridge. U.K. pp.146-153.
- Zamalvide, J. P. 1995. El fósforo en los suelos bajo pasturas permanentes. Jornada.

12. Anexos

Cuadro 1. Localidades y alimentos suministrados a vacas lecheras de unidades de producción de la zona Sur del municipio de Celaya, Guanajuato.

Localidad 1. San Isidro del Tajo 1, Celaya Guanajuato, México Lechería Martin Mandujano (MM): agua potable, alfalfa verde, forraje de sorgo, alimento comercial y sales minerales.

Localidad 2. San Isidro del Tajo 2, Lechería José Trejo (JT): agua potable, alfalfa henificada, pasto forrajero, ensilado de maíz, alimento comercial y sales minerales.

Localidad 3. San José el Nuevo, Lechería Guadalupe Montoya (LM): agua potable, alfalfa verde, alimento comercial, sin sales minerales.

Cuadro 2. Localidades y alimentos suministrados a vacas lecheras de unidades de producción de la zona Sureste del municipio de Celaya, Guanajuato.

Localidad 4. Ejido Rincón de Tamayo, zona llamada Juan Martin, Lechería Francisco Maravillo (FM): agua de pozo agrícola, alfalfa verde, forraje de maíz, alimento comercial, sin sales minerales.

Localidad 5. Comunidad de Trojes, Lechería Tino Melesio (TM): agua de pozo agrícola, alfalfa verde, cocido de elote de maíz, cocido de brócoli, forraje de maíz, sales minerales.
