



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y SERVICIO EN
ZOOTECNIA

POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

CONCENTRACIÓN MINERAL Y DE METALES PESADOS EN
OVINOS ALIMENTADOS CON FORRAJES IRRIGADOS CON AGUAS
RESIDUALES

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

MARÍA ELENA MARTÍNEZ MARTÍNEZ

Bajo la supervisión de: MAXIMINO HUERTA BRAVO, Ph.D.



DIRECCION GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

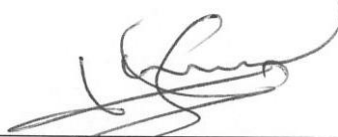
Mayo, 2018
Chapingo, Estado de México

**CONCENTRACIÓN MINERAL Y DE METALES PESADOS EN OVINOS
ALIMENTADOS CON FORRAJES IRRIGADOS CON AGUAS RESIDUALES**

Tesis realizada por **MARÍA ELENA MARTÍNEZ MARTÍNEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

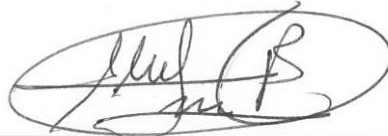
MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR:



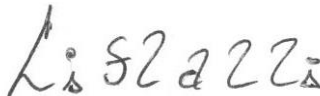
Ph. D. MAXIMINO HUERTA BRAVO

ASESOR:



Dr. ALEJANDRO LARA BUENO

ASESOR:



Dra. CITLALLI CELESTE GONZÁLEZ ARICEAGA

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
DEDICATORIAS	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1 Tipología y uso de las aguas residuales en el Valle del Mezquital	2
2.2 Contaminación del suelo	3
2.2.1 El agua residual como fuente de metales pesados al suelo.....	5
2.2.2 Salinidad y fertilidad del suelo	7
2.3 Las plantas forrajeras cultivadas con agua residual	10
2.3.1 El desempeño productivo de las plantas forrajeras	10
2.3.2 Función mineral en las plantas.....	11
2.3.3 Contenido mineral al irrigar con aguas negras las plantas forrajeras	12
2.3.4 Absorción de metales pesados por las plantas	14
2.4 Los minerales en la nutrición animal.....	17
2.4.1 Funciones de los minerales en el metabolismo.....	17
2.4.2 Toxicidad y deficiencia de los minerales	19
2.4.3 Requerimientos minerales de los ovinos	22
2.4.4 Diagnóstico del estado mineral de los ovinos.....	24
2.5 Descripción general de los metales pesados y otros minerales	24
2.5.1 Cadmio	24
2.5.2 Cobre.....	26
2.5.3 Hierro.....	26
2.5.4 Níquel	26
2.5.5 Plomo	27
2.5.6 Zinc.....	29

2.5.7 Molibdeno.....	30
2.6 Literatura citada.....	31
3. CONCENTRACIÓN MINERAL Y DE METALES PESADOS EN OVINOS ALIMENTADOS CON FORRAJES IRRIGADOS CON AGUAS RESIDUALES	37
3.1 Resumen.....	37
MINERAL CONCENTRATION AND HEAVY METALS IN SHEEP FED WITH IRRIGATED FORAGE WITH WASTEWATER.....	38
3.2 Summary.....	38
3.3 Introducción.....	39
3.4 Materiales y métodos.....	40
3.4.1 Colecta y procesamiento de muestras.....	40
Agua.....	40
Forraje.....	41
Suelo.....	41
Suero sanguíneo.....	41
Hígados y riñones.....	42
3.4.2 Análisis de laboratorio.....	42
3.4.3 Análisis estadístico.....	43
3.5 Resultados y conclusión.....	45
3.5.1 Concentración mineral en suelo.....	45
3.5.2 Concentración mineral en agua.....	49
3.5.3 Concentración mineral en forraje.....	53
3.5.4 Concentración mineral en suero sanguíneo.....	57
3.5.4 Concentración mineral en riñón.....	61
3.5.5 Concentración mineral en hígado.....	64
3.6 Conclusiones.....	69
3.7 Literatura citada.....	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Límites de concentración de metales contaminantes en el suelo	5
Cuadro 2. Límites máximos de concentración de compuestos químicos o características físicas en agua residual para riego agrícola en mg L ⁻¹	6
Cuadro 3. Rendimientos anuales (t/ha ⁻¹) obtenidos en Tula de Allende ciclo 2013-2014 y media en México.	11
Cuadro 4. Función metabólica de los minerales en las plantas	11
Cuadro 5. Signos de déficit de minerales en las plantas	13
Cuadro 6. Niveles de concentración de minerales reportados en forrajes	13
Cuadro 7. Efecto de los metales pesados en el aspecto de las plantas	15
Cuadro 8. Efecto de los metales pesados sobre la fisiología de las plantas.....	15
Cuadro 9. Concentración reportada de Cd, Ni y Pb en alfalfa irrigada con agua residual en el Valle del Mezquital.....	16
Cuadro 10. Niveles de concentración de metales pesados reportados en forrajes en mg kg ⁻¹ de materia seca.....	17
Cuadro 11. Funciones metabólicas de elementos esenciales en el cuerpo.....	18
Cuadro 12. Signos de deficiencias y excesos de minerales en animales	20
Cuadro 13. Requerimientos minerales y concentraciones máximas tolerables en ovinos	23
Cuadro 14. Estadísticos de prueba estimados y su significancia para la prueba de efectos fijos en el modelo estadístico (1) y los minerales en suelo indicados	45
Cuadro 15. Concentración mineral (mg/kg ⁻¹) en suelos irrigados con agua residual y limpia en el municipio de Tula de Allende, Hidalgo	46
Cuadro 16. Límites de confianza y significancia para σ_{UP}^2 en diversas variables en suelo	46
Cuadro 17. Estadísticos de prueba estimados y su significancia para la prueba de efectos fijos en el modelo estadístico (1) y los minerales indicados en agua para ovinos	49

Cuadro 18. Concentración mineral (mg L ⁻¹) en agua para ovinos del municipio de Tula de Allende, Hidalgo.....	50
Cuadro 19. Límites de confianza y significancia para σ_{UP}^2 en diversas variables en agua para ovinos	50
Cuadro 20. Concentración mineral (mg kg ⁻¹) en rastrojo de maíz regado con agua residual	54
Cuadro 21. Límites de confianza y significancia para el componente de varianza σ_{UP}^2 en diversos minerales determinados en rastrojo de maíz	55
Cuadro 22. Concentración mineral (mg kg ⁻¹) en alfalfa regada con agua residual	55
Cuadro 23. Límites de confianza y significancia para σ_{UP}^2 en diversas variables en alfalfa	56
Cuadro 24. Significancia en la prueba de igualdad de efectos fijos para el factor Tipo Animal.....	57
Cuadro 25. Concentración mineral (mg L ⁻¹) en suero sanguíneo de ovinos del municipio de Tula de Allende, Hidalgo.....	58
Cuadro 26. Límites de confianza y significancia para el componente de varianza σ_{UP}^2 en diversos minerales determinados en suero sanguíneo	59
Cuadro 27. Estadísticos descriptivos para la concentración mineral (mg kg ⁻¹) en muestras de riñón	62
Cuadro 28. Estadísticos descriptivos para la concentración mineral (mg kg ⁻¹) en muestras de hígado	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Concentración de los metales extraíbles y su relación con la antigüedad de riego en el Valle del Mezquital	7
Figura 2. Influencia del pH en la asimilación de nutrientes.	9
Figura 3. Evidencia de la salinización del suelo causada por uso de aguas residuales en el Valle del Mezquital.....	10
Figura 4. Concentración mineral (mg kg^{-1}) en suelos irrigados con agua residual y agua limpia.....	47
Figura 5. Concentración de Cu, Zn y Fe en fuentes de agua para el rebaño por Unidad de Producción.....	52
Figura 6. Concentración de Ca, Mg y K en fuentes de agua para el rebaño por Unidad de Producción.....	53
Figura 7. Concentración de Cd, Pb y Ni en fuentes de agua para el rebaño por Unidad de Producción.....	53
Figura 8. Concentración mineral promedio de Fe, Zn y Cu en forrajes irrigados con agua residual.....	57
Figura 9. Concentración promedio de P, K, Na, Mg y Ca en forrajes irrigados con agua residual	57
Figura 10. Concentración promedio de Ni, Pb y Cd en forraje irrigado con agua residual	58
Figura 11. Concentración mineral en suero sanguíneo (madres y crías) y Unidad de Producción.....	61
Figura 12. Gráficos box-plot para la concentración mineral en riñón	62
Figura 13. Gráficos box-plot para la concentración mineral en hígado	67

DEDICATORIAS

A los agricultores y ganaderos del Valle del Mezquital, Hidalgo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que me otorgó el apoyo económico para realizar el presente proyecto y a mi alma máter, la Universidad Autónoma Chapingo, porque es una institución que permitió el desarrollo profesional e integral de quienes tuvimos la fortuna de ser alumnos.

Al Dr. Maximino Huerta Bravo por aceptarme en su equipo de trabajo, por haber dirigido esta investigación, por sus enseñanzas y sobretodo su paciencia. A la Dra. Citlalli González Ariceaga que estuvo a cargo del análisis de laboratorio en la primera etapa del diagnóstico. Al Dr. Alejandro Lara Bueno por su disposición para aclarar dudas y proponer recomendaciones al trabajo. Al Dr. Carlos Cíntora González que diseñó el análisis estadístico de los resultados.

A mi comité asesor, gracias por la oportunidad que me brindaron para realizar estudios de Maestría y formar parte de la comunidad de Posgrado en Producción Animal donde adquirí muchos conocimientos que me permitieron desarrollarme en el ámbito personal y académico.

También quiero agradecer a Susana Morales Pablo, Jersaí Hernández Reyes, Miguel Martínez Martínez y a Michel Gutiérrez Silva quienes me ayudaron en el muestreo y sin duda fueron de gran apoyo, no sólo en la fase de campo sino a través de estos dos años, con su compañía en los momentos para estudiar, trabajar y convivir.

A la Ing. Idalia Martínez Martínez quien fue el contacto con el Ing. Wilfredo Hernández y el Ing. Galindo García que a su vez mostraron interés en que se llevara a cabo el proyecto de investigación y animaron a los productores a participar. Un agradecimiento al Sr. Mario Heracleo Haro, a la Sra. Sabina Pérez Pérez y en especial a José Alan Guerrero quienes contribuyeron en la colecta de muestras.

A los productores, Sra. María Luisa Guerrero Martínez, Sr. Martín Guzmán Serrano, Sr. Ernesto Cruz Santiago, Sra. María de Lourdes Bernabé Pérez y Sra. Martha Badillo Garrido que nos dieron su confianza, permitieron el ingreso a sus instalaciones y dieron las facilidades para llevar a cabo el trabajo.

Al Dr. Clemente Villanueva Verduzco y al Dr. Daniel Canseco González quienes hicieron las gestiones para que se analizaran las muestras en el LANISAF. Un sincero reconocimiento a la Ing. Brenda Robledo Olmedo por su valioso esfuerzo para concluir la determinación de metales pesados.

Al Dr. Luis Alberto Miranda por su apoyo en el montaje de la técnica de digestión en autoclave. De igual manera a Pedro Meda Alducín y José Adrián Magadán Olmedo por su asesoría, tiempo y confianza.

A mi mamá Ma. Concepción Martínez y a mi hermana Selene Martínez que han sido mi motor de motivación y a todas mis amistades que indirectamente colaboraron en este proyecto. Gracias a ustedes hoy culmino otra etapa en mi vida.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	María Elena Martínez Martínez
Fecha de Nacimiento	13 de agosto de 1992
Lugar de Nacimiento	San Martín de las Pirámides, Estado de México
CURP	MXME920813MMCRRL00
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia
Cédula profesional	9926909

Desarrollo académico

Bachillerato	Escuela Preparatoria Oficial No. 19
Licenciatura	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo
Maestría	Maestría en Ciencias en Innovación Ganadera, Universidad Autónoma Chapingo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El Valle del Mezquital es un área cercana a la Ciudad de México que ha sido irrigada desde hace más de 100 años con aguas residuales descargadas por múltiples industrias y desechos de fuentes urbanas. Es probablemente el área más grande en el mundo que usa agua residual para irrigar alrededor de 85 000 hectáreas (Peasey, Blumenthal, Duncan, & Ruíz-Palacios, 2000). El agua residual de la Ciudad de México y área metropolitana es transportada al Valle del Mezquital por tres canales principales: Tajo de Nochistongo, Gran Canal y Emisor Central de los Distritos de Riego 03 y 100.

El uso de aguas negras en la agricultura ha permitido incrementar la producción de alimentos (INEGI, 2012), pero implica riesgos de contaminación ambiental y de salud para animales y humanos al ser fuente importante de microorganismos patógenos y desechos tóxicos como los metales pesados que pueden incorporarse a la cadena trófica (Solís et al., 2005; Vázquez-Alarcón, Justin-Cajuste, Siebe-Grabach, Alcántar-González, & de la Isla de Bauer, 2001).

En el Capítulo 2 se presenta una revisión de literatura donde se abordan tópicos acerca de la implicación que tiene el uso de aguas residuales y su relación con los metales pesados en la cadena agua-suelo-planta-animal. También se hace una descripción sobre la importancia de los minerales nutrimentales en los componentes antes mencionados.

En el Capítulo 3 se exponen los resultados obtenidos en el diagnóstico mineral de ovinos alimentados con forrajes irrigados con aguas residuales, y se realizó un segundo diagnóstico en hígado y riñón para constatar los valores obtenidos en suero sanguíneo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Tipología y uso de las aguas residuales en el Valle del Mezquital

Aguas residuales son líquidos cargados con desechos generados a partir de diversas actividades humanas. Las aguas residuales se clasifican en municipales e industriales, las municipales son residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población, mientras que las aguas residuales industriales son las que proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua (Van der Hoek, 2004).

Otra forma de clasificar a las aguas residuales es con base en el contenido de contaminantes que ésta porta, clasificándose en aguas negras y aguas grises. Las aguas negras son las provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Las aguas grises provienen de tinajas, regaderas, lavamanos y lavadoras, que aportan sólidos suspendidos, fosfatos, grasas y coliformes fecales (Van der Hoek, 2004).

El uso de aguas residuales para el riego de cultivos es cada vez más común, especialmente en las zonas áridas y semiáridas. En México, esta práctica fue adoptada a raíz de la creciente demanda que exigía la producción de alimentos (Tejeda, 1991). Por su ubicación cercana a la Ciudad de México, el Valle del Mezquital utiliza las aguas residuales desde hace más de 100 años y son utilizadas para regar más de 85 000 ha de los Distritos de Riego 03-Tula y 100-Alfajayucan.

El Valle del Mezquital recibe 43 m³/seg de agua residual (57% urbano y 43% industrial) recabada principalmente en los Distritos de Riego 03 y 100. Del volumen total de aguas residuales, únicamente el 2% recibe tratamiento. El principal problema del uso de las aguas residuales para riego agrícola radica en las elevadas cantidades de elementos contaminantes que son depositados en suelos cultivados. La generación de aguas residuales genera un impacto

negativo sobre el medio ambiente cuando elementos no deseables afectan la flora y fauna de la región donde son utilizadas (Mendoza-Márquez, 1981).

Las aguas residuales facilitan la transmisión de enfermedades infecciosas relacionadas con nemátodos intestinales causadas por *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Ancylostoma duodenale* y *Necator americanus* y enfermedades causadas por bacterias tales como la diarrea, la disentería, la tifoidea y el cólera (Ayres & Duncan, 1997). Además, es un medio que causa la eutrofización de ríos y lagos, contaminan las aguas subterráneas y en los sistemas de producción agropecuarios, intoxican a plantas y animales a través de diferentes rutas en la cadena alimenticia y, que por lo tanto, repercuten en la salud del hombre (Cifuentes et al., 1993).

2.2 Contaminación del suelo

Los metales pesados se encuentran en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de actividades antropogénicas. Entre los metales pesados están: plomo, cadmio, cromo, mercurio, zinc, cobre que se distinguen por su persistencia y estabilidad en el suelo (De la Isla de Bauer, 2002). Las actividades geológicas naturales y antropogénicas, como las emanaciones volcánicas y la industria minera contribuyen a la generación de metales pesados.

En el suelo, los metales pesados pueden estar presentes como iones libres o disponibles, compuestos insolubles o parcialmente solubilizados como óxidos, carbonatos e hidróxidos. La contaminación de suelos con metales pesados ocurre al irrigarlos con aguas procedentes de desechos de minas, aguas residuales contaminadas de parques industriales y municipales y filtraciones de presas de jales mineros (Wang, 1991).

Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos o pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante mecanismos biológicos y químicos (Pagnaelli, Moscardini, Giuliano, & Toro, 2004). Los metales pesados adicionados a los suelos se redistribuyen y reparten lentamente entre los componentes de la fase sólida del suelo. Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son: pH, potencial redox,

composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio catiónico o aniónico, presencia de carbonatos, materia orgánica y textura, entre otros (Vázquez, 1999).

Los metales incorporados al suelo pueden seguir cuatro rutas: la primera, quedar retenidos en el suelo; segunda, específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo; tercera, asociados con la materia orgánica del suelo; y cuarta, precipitados como sólidos puros o mixtos. Por otra parte, pueden pasar a la atmósfera por volatilización y pueden ser movilizados a las aguas superficiales o subterráneas (Navarro, Alonso, & Moya, 2007).

El uso de fertilizantes es otro medio por el cual pueden incorporarse metales pesados al suelo, ya que pueden contener residuos de metales pesados como impurezas que pueden quedar disponibles para las plantas. La toxicidad de los metales depende de su concentración, además de su movilidad y reactividad con otros componentes (Abollino et al., 2002).

Por ejemplo, en los suelos contaminados con plomo es probable encontrar también cadmio y zinc, por su efecto antagonista se limita la translocación de plomo del suelo a la planta. El plomo presente en suelos contaminados puede llegar a inhibirse mediante la aplicación de fósforo y óxidos de magnesio, sin embargo, se puede afectar la biodisponibilidad del zinc.

La fitorremediación es una estrategia para mitigar la contaminación del suelo a través de plantas que tiende a acumular metales pesados, el objetivo es asimilar los metales presentes en el suelo; es una tecnología de bajo costo, posee un impacto regenerativo en lugares donde se aplica y su capacidad extractiva se mantiene debido al crecimiento vegetal (López-Martínez, Gallegos-Martínez, Pérez Flores, & Gutiérrez Rojas, 2005). El uso de plantas hiperacumuladoras y tolerantes a altos niveles de metales permite la restauración del suelo con menor impacto ambiental en contraste con otras técnicas convencionales.

La comunidad científica internacional y las autoridades a nivel mundial han reconocido la importancia del suelo como un recurso esencial y han planteado la

necesidad de establecer indicadores de la calidad del suelo para conservar o mejorar la productividad de la tierra procurando al mismo tiempo el ambiente, la salud animal y humana y la calidad de los alimentos.

La concentración máxima permitida en el suelo varía de acuerdo con el país, considerándose niveles de elementos que no suponen un riesgo para la población humana expuesta al escenario (Cuadro 1). Para interpretar el nivel base de metales pesados en los suelos se han establecido valores determinados analíticamente en suelos sin impacto antropogénico y en aquellos que sí han sido afectados.

Cuadro 1. Límites de concentración de metales contaminantes en el suelo

Metal mg kg ⁻¹	Unión Europea	Kabata-Pendias (2004)		NOM-021-RECNAT- 2000	
	Rango tolerable	Marginal	Peligroso	Normal	Peligroso
Cobre	50-140	N/D	N/D	N/D	N/D
Zinc	150-300	N/D	N/D	>1	N/D
Plomo	50-300	20	100-500	35	100-300
Cadmio	1-3	0.06-1.1	1.1-5	0.35	3-5
Níquel	30-75	4-15	>15	50	100

N/D=No disponible

2.2.1 El agua residual como fuente de metales pesados al suelo

El agua residual contiene gran cantidad de metales pesados, identificado como metal pesado cualquier catión que tenga un peso atómico superior a 23 sin incluir a los metales alcalinos y alcalinotérreos (Navarro, Alonso, & Moya, 2007). La concentración de metales pesados en efluentes de aguas residuales puede ser crítica, especialmente en las regiones industriales. Las aguas municipales sin tratar contienen Na, As, B, Cd, Cr, Al, Ba, Be, Co, Cu, Fe, Li, Mn, Zn, Pb y Hg (Salgot, Huertas, Weber, Dott, & Hollender, 2006; Qadir, Ghafoor, & Murtaza, 2000).

CONAGUA (1994) considera como principales parámetros para determinar la conveniencia del agua para su uso agrícola, la salinidad y la toxicidad por iones

específicos (Cuadro 2). Después de 100 años de irrigación con agua residual, los estudios realizados en el Valle del Mezquital registran una tendencia creciente en las concentraciones de metales en los suelos, por el efecto en el tiempo que han sido utilizadas (Figura 1; Vázquez-Alarcón, Justin-Cajuste, Siebe-Grabach, Alcántar-González, & de la Isla de Bauer, 2001).

Cuadro 2. Límites máximos de concentración de compuestos químicos o características físicas en agua residual para riego agrícola en mg L⁻¹

Acroelina	0.1
Aldrín	0.02
Aluminio	5
Antimonio	0.1
Arsénico	0.1
Bicarbonatos	100
Berilio	0.1-0.5
Boro	0.7-0.3
Cadmio	0.01
CSR (meq/L ⁻¹)	2.5
Cianuro	0.02
Clordano	0.003
Cloruros	147.5
Cobre	0.2
Conductividad eléctrica (µmhos/cm ⁻¹)	1000
Cromo hexavalente	1
DDE	0.04
Dieldín	0.02
Fierro	5
Fluoruros (como F)	1
Fósforo total	5
Heptacloro	0.02
Níquel	0.2
Nitratos	30
Nitrógeno total	30
Plomo	5
Potasio	250
pH	4.5-9
RAS (meq/L ⁻¹)	18
Salinidad efectiva (meq/L ⁻¹)	15
Salinidad potencial (meq/L ⁻¹)	15
Selenio	0.02
Sodio	250
Sólidos disueltos	500
Sólidos suspendidos	50
Sulfatos	130

Toxafeno	0.005
Zinc	2
Radioactividad	
Alfa total (Bq/L ⁻¹)	0.1
Beta total (Bq/L ⁻¹)	1

Fuente: CONAGUA (1994)

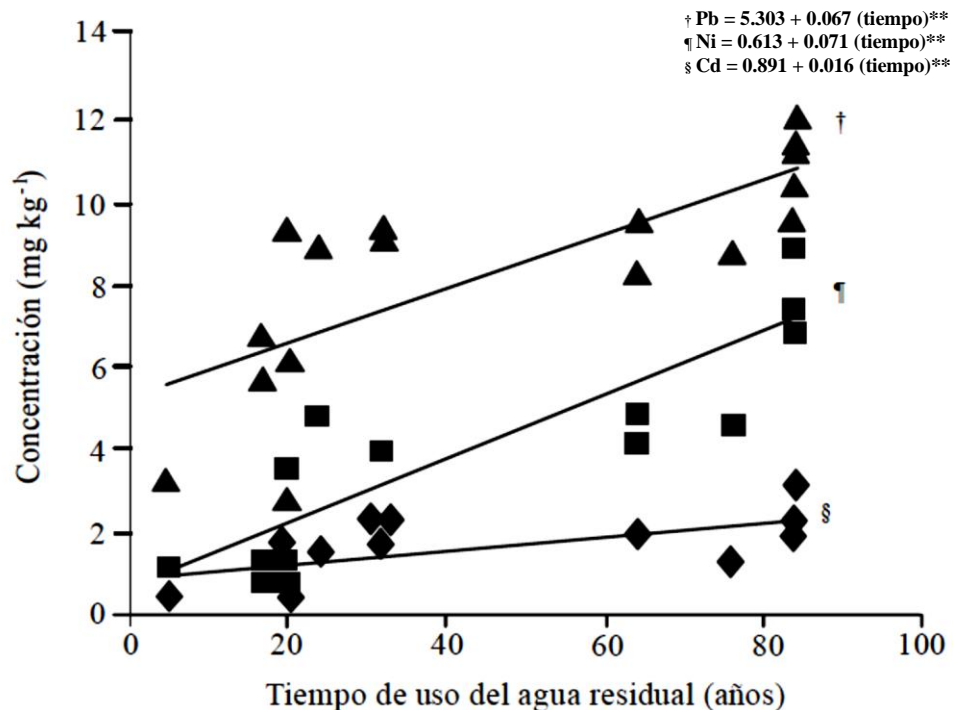


Figura 1. Concentración de los metales extraíbles y su relación con la antigüedad de riego en el Valle del Mezquital (Vázquez-Alarcón, Justin-Cajuste, Siebe-Grabach, Alcántar-González, & de la Isla de Bauer, 2001).

2.2.2 Salinidad y fertilidad del suelo

La acumulación de sales solubles en el suelo se debe a la mala calidad del agua para riego, drenaje deficiente o exceso en el uso de fertilizantes. Las sales solubles consisten principalmente en cationes de sodio (Na⁺), calcio (Ca⁺), potasio (K⁺) y magnesio (Mg⁺), y de los aniones cloro (Cl⁻), sulfato (SO⁴), carbonato (CO³⁻) y nitrato (NH⁴; Richards, 1990).

Villavicencio, López, Basurto, & Pérez (2011) estudiaron los efectos de la salinidad en el desarrollo vegetativo de diversos cultivos, encontrando que las respuestas adversas en los cultivos van desde menor tasa de crecimiento hasta la necrosis total del tejido vegetal. En el caso de la semilla, se reduce su velocidad de germinación.

Arbelo, Mora, Rodríguez Rodríguez, Guerra, & Armas (2006) mencionan que la alcalinidad o sodicidad se correlaciona positivamente con el pH y tiene un efecto sobre el crecimiento de las plantas y la absorción de minerales (Figura 2). El estrés salino provoca un desequilibrio nutricional debido a la interferencia de los iones salinos o bicarbonatos con la asimilación de los nutrientes esenciales que requiere la planta (Villavicencio, López, Basurto, & Pérez, 2011).

Sin embargo, las plantas hacen uso de mecanismos que les permiten continuar con sus funciones vitales en este tipo de ambientes, entre éstos se pueden considerar la dilución de las sales o la eliminación de estas últimas a través de glándulas o tricomas secretores, absorción selectiva de iones por las raíces, restricción del transporte hacia órganos vitales, entre otros (Quintana, Sanabria, Ojeda, & Valera, 2012).

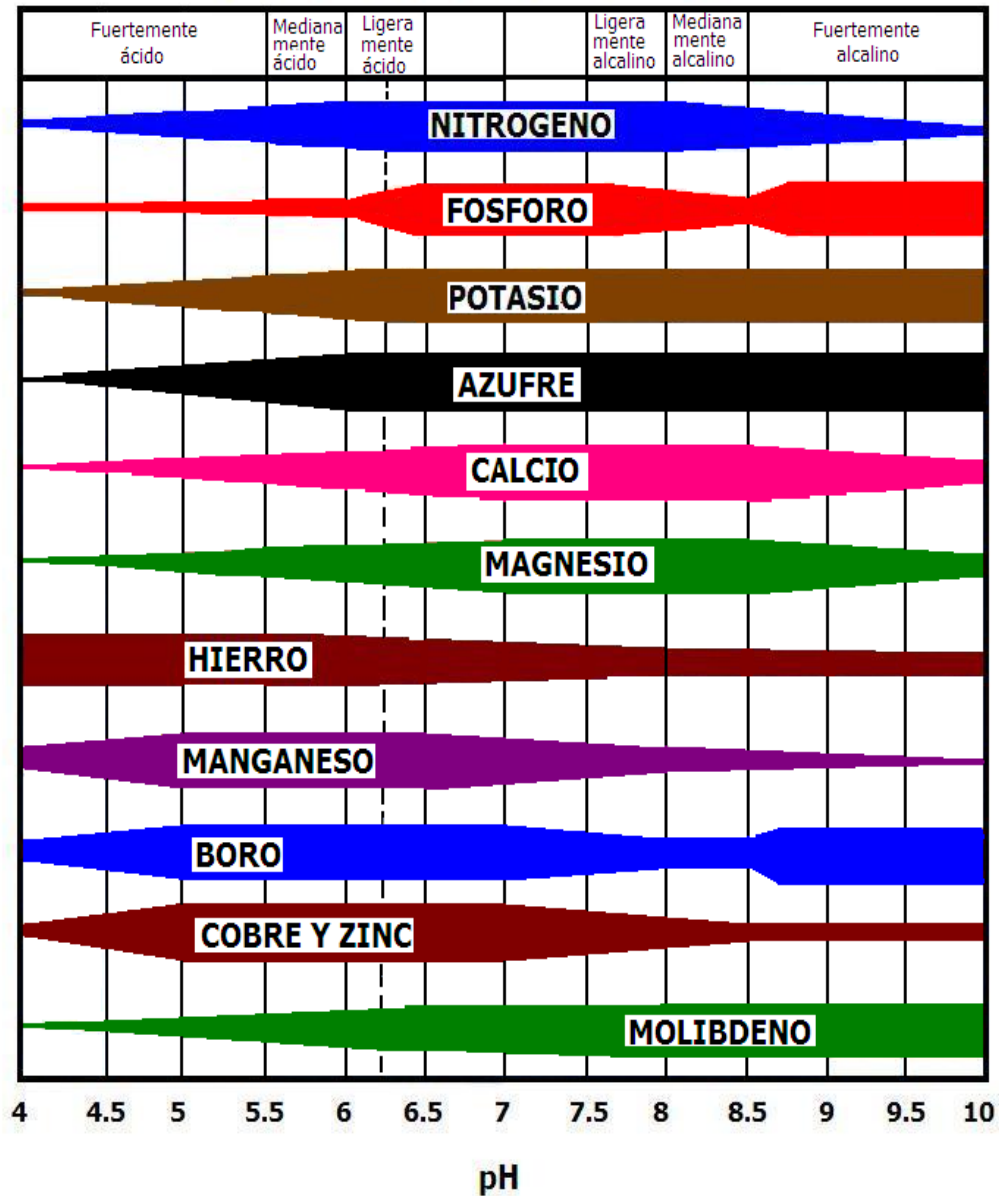


Figura 2. Influencia del pH en la asimilación de nutrientes (La disponibilidad de nutrimentos disminuye a medida del ancho de la banda; Whiteman, 1974).

En el Valle del Mezquital, además de problemas de salinidad en el suelo (Figura 3), el pH alcalino de los suelos ha favorecido la precipitación de los metales pesados como el Cd, Pb y Cr. Sin embargo, el riesgo de que dichos metales se solubilicen podrá disminuir en la medida en que se conserve la alcalinidad en los suelos (Mesa, 2003).



Figura 3. Evidencia de la salinización del suelo causada por uso de aguas residuales en el Valle del Mezquital (Núñez-García, 2015).

2.3 Las plantas forrajeras cultivadas con agua residual

El Valle del Mezquital es una zona semiárida localizada al suroeste del estado de Hidalgo, cuya cobertura vegetal natural corresponde a matorral xerófilo. A partir del siglo XX se implementaron sistemas de riego con agua residual proveniente de la Ciudad de México (De la Cruz, 1965). Con el aporte de agua la cobertura vegetal del valle se ha transformado, cambiando su vegetación de matorral xerófilo o de pastizal a una zona agrícola altamente productiva, entre los cultivos crecidos bajo riego están especies forrajeras.

2.3.1 El desempeño productivo de las plantas forrajeras

El uso de agua residual para riego ha repercutido en la productividad primaria. La materia orgánica que aporta el agua residual al suelo incide directamente sobre la disponibilidad de carbono y nitrógeno (Gregorich, Carter, Angers, Monreal, & Ellert, *s.f.*). En la producción de alfalfa, Atitalaquia y Mixquiahuala han tenido un incremento constante de 23.4 BH t ha⁻¹ hasta 79.4 BH t ha⁻¹ en el periodo de 1970 al 2007. En Alfajayucan existe un incremento en rendimiento de grano de maíz de 1950 a 2010 de 0.7 a 7.20 BH t ha⁻¹ (INEGI, 2012).

En el Valle del Mezquital, particularmente en Tula de Allende, los rendimientos de los cultivos forrajeros se encuentran por encima de los promedios nacionales (Cuadro 3), probablemente debido al aporte de materia orgánica del agua residual al suelo.

Cuadro 3. Rendimientos anuales (t/ha⁻¹) obtenidos en Tula de Allende ciclo 2013-2014 y media en México

Cultivos	Media nacional	Tula, Hidalgo	% por encima de la media
Maíz grano	9.36	11.92	27
Frijol	1.72	2.5	45
Avena	21.44	25	16
Cebada	18.17	20	10
Alfalfa	66.20	100	51

2.3.2 Función mineral en las plantas

Los elementos minerales pueden desempeñar funciones directas, según (Rojas & Rovalo, 1986): pueden ser partes constituyentes de las células, enzimas o coenzimas, antagonistas en el balance metabólico, amortiguadores de pH y factores osmóticos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Función metabólica de los minerales en las plantas

Nitrógeno	Más del 50% del N de la planta se haya en proteínas y ácidos nucleicos; es el elemento principal del protoplasma
Fósforo	Forma fosfatos de hexosas y triosas, ácidos nucleicos, coenzimas y transportadores de energía
Potasio	Es el catión más abundante de la vacuola y forma parte de enzimas activas en la fosforilación oxidativa y síntesis proteica
Calcio	Se encuentra en la pared celular otorgando rigidez y su contenido aumenta con la edad; es cofactor de enzimas en la hidrólisis del ATP y fosfolípidos
Magnesio	Forma el núcleo de las clorofilas. Intervienen en el metabolismo energético formando complejos con el ATP.
Azufre	Forma parte de aminoácidos como la cisteína o la metionina o se integra en coenzimas como la tiamina, la biotina y el CoA. Los

	aminoácidos azufrados de las fitoquelatinas forman complejos con metales pesados como mecanismo de defensa.
Hierro	Es soluble como ion ferroso Fe^{2+} . Forma parte del citocromo y participa en el proceso de respiración
Manganeso	Induce la síntesis de clorofila
Cobre	Como ion cuproso o cúprico forma parte de las enzimas implicadas en los procesos redox, como la plastocianina implicada en el transporte de electrones o la citocromo C oxidasa de la cadena respiratoria.
Molibdeno	Participa en reacciones redox formando parte de complejos enzimáticos clave como en nitrato reductasa, xantina oxidasa y nitrogenasa.
Zinc	Como catión divalente está implicado en al menos 80 sistemas enzimáticos redox. Forma parte de la CuZn-SOD. Está implicado en la síntesis de triptófano.
Cloro	Participa en la evolución del oxígeno en la fotosíntesis
Boro	Involucrado en numerosos procesos fisiológicos, pero aún se desconoce su papel primario. Puede formar enlaces éster con grupos cis-diol, de donde parece derivarse su función.
Sodio	Aunque las plantas halófitas lo tienen en concentraciones muy elevadas, sólo es esencial para plantas C4 y CAM. Existe un requerimiento para la fotosíntesis y otros procesos de cianobacterias
Sílice	Aumenta la resistencia a enfermedades
Aluminio	Importante en trazas; en exceso es tóxico
Cobalto	Funcional en coenzimas
Iodo	Componente de la iodotirosina

Fuente: Rojas y Rovalo (1986)

2.3.3 Contenido mineral al irrigar con aguas negras las plantas forrajeras

Las concentraciones minerales en el forraje dependen del suelo, la especie forrajera, nivel de madurez, rendimiento, manejo de los pastos y del clima. La

mayoría de las deficiencias están relacionadas con regiones específicas y a las características del suelo. Underwood & Suttle (2003) sugieren que los elementos K, Mg, Na, Cl, Cu, Co, Fe, Se, Zn y Mn disminuyen su concentración directamente proporcional con la madurez de la planta. En el Cuadro 5 se resumen los síntomas característicos de deficiencias vegetales.

Cuadro 5. Signos de déficit de minerales en las plantas

Nitrógeno	Plantas poco desarrolladas de escaso vigor. Hojas que presentan color amarillo en el ápice y se extiende por el medio a lo largo de la hoja
Fósforo	Crecimiento lento, enanismo. Las hojas presentan un color rojizo-púrpura
Azufre	Plantas ligeramente desmedradas. Hojas verde-pálidas
Calcio	Las hojas nuevas salen atrofiadas o deformes, pero con una coloración normal
Potasio	Las hojas presentan un secado en el ápice y en los bordes
Hierro	Las hojas jóvenes presentan clorosis general acentuada
Magnesio	Las hojas se vuelven amarillas, pero las nervaduras se conservan verdes
Manganeso	Puntos amarillentos o con agujeros entre las nervaduras

Fuente: Rojas & Rovalo (1986).

Las deficiencias minerales en plantas pueden reconocerse por su aspecto, siendo adecuado apoyar el diagnóstico mediante el análisis de laboratorio, para cuyo caso en el Cuadro 6 se muestran los intervalos de concentración reportados en forrajes y el nivel mínimo recomendable para rumiantes en pastoreo.

Cuadro 6. Niveles de concentración de minerales reportados en forrajes

Mineral	Unidades	Intervalo de concentración ¹	Nivel crítico ²
Calcio	%	0.31-0.50	0.30
Fósforo	%	0.22-0.27	0.25
Magnesio	%	0.15-0.35	0.20
Potasio	%	1.43-2.25	0.60
Sodio	%	0.05-0.1	0.06

Cobalto	ppm	0.12-0.16	-
Cobre	ppm	15-25	10
Hierro	ppm	29-41	30
Manganeso	ppm	63-88	40
Molibdeno	ppm	0.2-1.5	-
Selenio	ppm	0.04-0.06	-
Zinc	ppm	20-40	30

¹McDowell, Conrad, & Ellis (1984)

²Nivel crítico de forrajes basado en necesidades de rumiantes en pastoreo (McDowell & Arthington, 2005)

2.3.4 Absorción de metales pesados por las plantas

Las plantas han desarrollado mecanismos altamente específicos para adsorber, translocar y acumular nutrientes, sin embargo, algunos de estos metales no son esenciales para los vegetales (Lasat, 2000). La adsorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso de su entrada a la cadena alimenticia. Su acumulación depende del movimiento de los metales desde la solución del suelo a la raíz de la planta, el paso de los metales por las membranas de las células corticales de la raíz, el transporte de los metales desde las células corticales al xilema y la posible movilización de los metales desde las hojas hacia los tejidos de almacenamiento usados como alimento (semillas, tubérculos y frutos) por el floema (Lucho-Constantino, Prieto-García, Del Razo, Rodríguez Vázquez, & Poggi-Varaldo, 2005).

Otro mecanismo de ingreso de metales pesados a las plantas es mediante la absorción foliar. La disponibilidad a través de las hojas de algunos elementos traza provenientes de fuentes aéreas como los fertilizantes foliares pueden tener un impacto significativo en la contaminación de plantas (Kabata-Pendias, 2004).

Las especies vegetales tienen la capacidad de acumular metales en sus tejidos. Las plantas que tienen más capacidad de absorber y acumular metales respecto de otras especies se denominan hiperacumuladoras y se encuentran principalmente en suelos que son ricos en metales por condiciones geoquímicas naturales o contaminación antropogénica. Generalmente, estas plantas tienen poca biomasa debido a que utilizan más energía en los mecanismos necesarios

para adaptarse a las altas concentraciones de metales en sus tejidos (Kabata-Pendias, 2004).

Los efectos de los metales pesados sobre las plantas se presentan el Cuadro 7, de acuerdo con Kabata-Pendias (1984), quienes describen las alteraciones en el desarrollo de las plantas, mientras que en el Cuadro 8, Ferguson (1990) señala su efecto específico en procesos fisiológicos.

Cuadro 7. Efecto de los metales pesados en el aspecto de las plantas

Elemento	Efecto
Cadmio	Manchas necróticas rojizas en hojas maduras, coloración amarilla pardusca en las raíces y reducción del crecimiento
Mercurio	Coloración parda de los bordes de las hojas, clorosis, enroscado de las hojas, coloración parda en la punta de las raíces, cambio a color rojo en nervaduras y peciolo
Plomo	Color verde oscuro en las hojas, manchado del follaje, incremento en el número de retoños o brotes

Fuente: (Kabata-Pendias, 1984)

Cuadro 8. Efecto de los metales pesados sobre la fisiología de las plantas

Metal	Proceso
Cadmio, mercurio y plomo	Cambio en la permeabilidad de la membrana celular Inhibición de la síntesis proteica Reacciones con grupos tiol Afectan la fotosíntesis Afectan la transpiración
Cadmio y plomo	Inhibición de algunas enzimas Afectan la respiración
Cadmio	Sustitución de elementos esenciales (Cu y Zn)

Fuente: (Ferguson, 1990)

La capacidad de las plantas para acumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Los metales se transfieren del suelo a las plantas, dependiendo de la especiación química, pH del suelo, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, contenido de arcilla, carbonatos y potencial redox. Entre ellos se encuentran el cobalto, cadmio, cromo, plomo, cobre y zinc. En cuanto a los problemas en las plantas, los estudios realizados en el Valle del Mezquital, sobre todo en alfalfa, muestran que la absorción de metales pesados es tolerable a tóxico (Cuadro 9) de acuerdo con los límites de concentración máxima (Cuadro 10).

Cuadro 9. Concentración reportada de Cd, Ni y Pb en alfalfa irrigada con agua residual en el Valle del Mezquital

Cadmio, ppm	Níquel, ppm	Plomo, ppm	Referencia
0.3-1.05	6.0-10.9	4.4-11.3	(Mejía et al.,s.f.)
0.4-0.6	5.7-11.9	8.9-14.5	(Cajuste, Carrillo, Cota, & Laird, 1991)
0.05-2.0	N.R.	0.2-0.35	(Siebe, 1994)
0.02	N.R.	0.1-0.42	(Siebe, 1995)
1.0-8.0	2.2-13.0	8.0-19.0	(Cajuste & Rogelio, 1995)
0.7-2.3	3.8-7.2	1.2-5.7	(Vázquez-Alarcón, Justin-Cajuste, Siebe-Grabach, Alcántar-González, & de la Isla de Bauer, 2001)
N.R.	0.8-2.7	0.4-1.32	(Solís et al., 2005)
N.R. No reportado			

Cuadro 10. Niveles de concentración de metales pesados reportados en forrajes en mg kg⁻¹ de materia seca

Concentración en mg kg ⁻¹	Nivel de concentración		
	Deficiente	Tolerable	Tóxico
Pb ¹	-	0.5-10	30-300
Cd ¹	-	0.05-5.0	5-30
Ni ¹	-	1-10	10-100
Mo ²	-	0.2-0.8	-
Cu ¹	2-5	5-20	20-100
Zn ¹	10-20	50-100	100-400
Fe ³	<50	50-250	-

¹(Kabata-Pendias, 2004); ² (Mertz, 1986); ³ (Mortvedt, Giordano, & Lindsay, 1983)

El máximo permisible para los niveles de plomo para cereales es 0.20 mg kg⁻¹ en base húmeda (BH) según el Codex Committee on Contaminants in Foods (Organization World Health, 2011). Lucho-Constantino, Prieto-García, Del Razo, Rodríguez Vázquez, & Poggi-Varaldo (2005) encontraron hasta 0.83 BH mg kg⁻¹ de plomo en vainas de haba, 0.98 y 2.01 BH mg kg⁻¹ de plomo en hojas y grano de maíz respectivamente y 1 BH mg kg⁻¹ de Pb en hojas y tallos de alfalfa, cuyas concentraciones sobrepasan los límites recomendados.

2.4 Los minerales en la nutrición animal

2.4.1 Funciones de los minerales en el metabolismo

Los minerales esenciales son aquellos en que sus roles bioquímicos están bien definidos y deben de estar presentes en la dieta de los rumiantes para optimizar su salud y productividad. Son 17 los minerales requeridos por los vertebrados: azufre, calcio, cloro, cromo, cobalto, cobre, flúor, yodo, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, fósforo, potasio, selenio, sodio y zinc. Otros seis minerales pueden ser requeridos basados en experimentos que indican beneficios cuando se suplementa en la dieta: arsénico, boro, níquel, rubidio, sílice y vanadio. Sin embargo, las funciones bioquímicas específicas aún no han sido identificadas (Suttle, 2010).

En el Cuadro 11 se mencionan las funciones metabólicas de los minerales

Cuadro 11. Funciones metabólicas de elementos esenciales en el cuerpo

<i>Macrominerales</i>	
Calcio	Es requerido para la formación ósea y crecimiento, excitabilidad de los nervios y músculos, coagulación de la sangre, activación de enzimas, síntesis de leche, mantenimiento del ritmo cardiaco
Fósforo	Requerido en el metabolismo energético como componente de ADP y ATP, reacciones metabólicas, transporte de lípidos y su metabolismo. Forma parte de membranas celulares, ARN y ADN, enzimas como la carboxilasa y NAD. Necesario para la formación de esqueleto y dientes, coagulación y regulación de pH en la sangre
Magnesio	Componente de huesos y dientes, participa en la fosforilación oxidativa para formar ATP, metabolismo de carbohidratos y lípidos, síntesis de proteínas, función muscular y nerviosa, activador enzima-sustrato
Sodio, Potasio y Cloro	Regulación del balance ácido-base, el balance osmótico y controlan el metabolismo del agua en los tejidos. Intervienen en la contracción muscular y respiración. Requeridos por muchas enzimas. Participan en la transmisión de impulsos nerviosos
Azufre	Es componente de cistina, cisteína y metionina. Insulina y oxitocina contienen azufre. Todos los microorganismos del rumen requieren azufre. Participa en el metabolismo de lípidos y carbohidratos. Es necesario para la producción de pelo y lana
<i>Microminerales</i>	
Hierro	Mioglobina y hemoglobina tienen hierro en su estructura. La hemoglobina participa como transportador de oxígeno. Forma parte de citocromo, citocromo oxidasa, catalasa y

	peroxidasa, enzimas que son importantes en los procesos de respiración celular
Manganeso	Es activador de metaloenzimas. Necesario para el desarrollo de los huesos y protege la integridad de las membranas celulares. Participa en el funcionamiento normal del sistema inmunológico y reproductivo
Cobre	Es esencial en la formación del eritrocito. Participa en la osteogénesis, protección del sistema inmune, pigmentación y queratinización de pelo y plumas, forma parte de sistemas enzimáticos importantes. Tiene función antioxidante
Selenio	Es componente de glutatión peroxidasa. Protegen a los tejidos de las especies reactivas de oxígeno y tienen función en la espermatogénesis. El selenio es necesario para la conversión de T4 a T3
Zinc	Es necesario para el crecimiento y la salud. Más de 300 enzimas requieren zinc. Regula el apetito y participa en la absorción de lípidos. Requerido para la estructura y funcionalidad de los factores de transcripción. Funciona como antioxidante

Fuente: (Suttle, 2010; NRC, 2007)

2.4.2 Toxicidad y deficiencia de los minerales

La ingestión prolongada de raciones deficientes o con altos contenidos en ciertos minerales, determinan cambios en la concentración de tejidos por debajo o por encima de los límites permisibles. Los trastornos nutricionales provocan retrasos en el crecimiento, mala utilización de los alimentos, baja productividad, infertilidad y sistema inmune deprimido. Estos trastornos de la nutrición van desde la deficiencia mineral grave o la intoxicación a condiciones leves o de transición, difíciles de diagnosticar. En el Cuadro 12 se enuncian los signos característicos de exceso o deficiencia de algunos minerales en animales.

Cuadro 12. Signos de deficiencias y excesos de minerales en animales

Elemento	Deficiencia	Exceso
Calcio	Reducción del crecimiento, acortamiento de los huesos; osteoporosis y osteomalacia; hiperirritabilidad y tetania; hemorragias.	Hipercalcemia idiopática; síndrome de leche alcalina; hipercaluria; cálculos renales; reducción del consumo de alimento y de la ganancia de peso.
Fósforo	Disminución del crecimiento corporal y óseo; raquitismo; huesos frágiles y débiles; bajo comportamiento reproductivo; pica.	Anomalías óseas, reducción del consumo de alimento y de la ganancia de peso, cálculos urinarios.
Potasio	Susceptibilidad a infecciones y reducción del crecimiento; disminución del consumo de alimento, pérdida de la condición del cabello; incapacidad para coordinar los movimientos, rigidez, trastornos nerviosos.	Disminución del apetito y el crecimiento, tetania de los pastos, fiebre de leche, paro cardíaco.
Magnesio	Irritabilidad del SNC; susceptibilidad a arteriosclerosis; vasodilatación; tetania.	Depresión del SNC y cardiovascular; molestias en la locomoción; diarrea; somnolencia y muerte.
Sodio	Disminución del crecimiento; lamido de madera, suelo y sudor de otros animales.	Hipertensión; bajo consumo de agua y alimento; problemas digestivos; baja ganancia de peso; diarrea.

Cloro	Alcalosis; deficiencia de K; lesiones renales; hiperexcitabilidad.	Edema y discondroplasia de la tibia.
Azufre	Disminuye la síntesis de metionina, cisteína, tiamina y biotina; reducción de la producción de leche y de la eficiencia alimenticia; debilidad y lagrimeo.	Poliencefalomalacia; dolor abdominal; crispas musculares; diarrea; deshidratación severa; fuerte olor a azufre en el aliento; pulmones congestionados; enteritis severa.
Cobalto	Anorexia, anemia e incoordinación.	Anorexia, rigidez, incoordinación y tremor muscular. Fibrosis pancreática, necrosis hepática y lesiones musculares.
Cobre	Anemia; disminución del crecimiento y eficiencia reproductiva; opacidad del pelo; anomalías óseas.	Crisis hemolítica, muerte súbita.
Hierro	Anemia; fatiga; resistencia minada a infecciones.	Daño peroxidativo en hígado y membranas lipídicas.
Flúor	Esmalte menos denso.	Deformación dental y anorexia.
Iodo	Bocio; disminuye estatura física.	Hipotiroidismo.
Manganeso	Anormalidades del esqueleto, ataxia, reducción del crecimiento; celos retrasados o reprimidos.	Diarrea; pérdida de peso; opacidad del pelo.
Zinc	Lesiones en la piel; atrofia de los túbulos seminíferos; retraso en el crecimiento de testículos y órganos sexuales	Pérdida de apetito, retraso en el crecimiento, se reduce la ganancia de peso, menor producción de ácidos grasos volátiles.

Fuente: (Suttle, 2010)

2.4.3 Requerimientos minerales de los ovinos

Requerimiento nutricional es la cantidad de un nutrimento que debe ser suministrado en una dieta balanceada para satisfacer las necesidades de un animal saludable en un ambiente compatible con su bienestar. Las necesidades del animal están determinadas por su potencial genético. Varios factores afectan los requerimientos de los minerales, entre ellos las interrelaciones entre elementos minerales y con otros nutrientes, el consumo del suplemento mineral y la raza del animal (McDowell & Arthington, 2005). En el Cuadro 13, los requerimientos son referidos con información del NRC, 2007

Cuadro 13. Requerimientos minerales y concentraciones máximas tolerables en ovinos (NRC, 2007)

Mineral	Corderos en crecimiento y engorda (20-50 kg)	Ovejas								Concentración máxima tolerable ³
		Gestación				Lactancia				
		Primerizas		Maduras		Primerizas		Maduras		
		1	2	1	2	1	2	1	2	
<i>Macroelementos</i>										
Calcio (%)	0.41	0.35	0.46	0.32	0.42	0.24	0.31	0.27	0.31	1.5
Fósforo (%)	0.29	0.23	0.28	0.24	0.28	0.19	0.25	0.25	0.28	0.6
Sodio (%)	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07	-
Cloro (%)	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.07	0.08	0.08	0.10	-
Potasio (%)	0.44	0.44	0.44	0.50	0.48	0.48	0.48	0.52	0.52	2
Magnesio (%)	0.10	0.08	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.11	0.6
Azufre (%)	0.18	0.18	0.18	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.4
<i>Microelementos</i>										
Cobalto (mg/kg ⁻¹)	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	25
Cobre (mg/kg ⁻¹)	5.60	4.53	5.84	5.77	6.85	4.56	4.79	5.30	5.41	15
Yodo (mg/kg ⁻¹)	0.50	0.50	0.51	0.50	0.50	0.80	0.80	0.80	0.80	50
Hierro (mg/kg ⁻¹)	67.35	24.66	32.59	22.52	30.66	11.24	11.99	8.88	9.79	500
Manganeso (mg/kg ⁻¹)	20.72	16.49	20.71	20.36	24.16	11.79	11.72	13.83	13.30	2000
Selenio (mg/kg ⁻¹)	0.19	0.05	0.06	0.03	0.04	0.09	0.12	0.10	0.13	5
Zinc (mg/kg ⁻¹)	30.45	27.05	30.87	31.6	33.0	29.60	32.41	34.04	36.41	300

¹Una cría; ²Dos crías; ³NRC (2005), (NRC, 2007).

2.4.4 Diagnóstico del estado mineral de los ovinos

La evaluación del estatus mineral de los animales requiere del conocimiento del contenido mineral en agua, suelo, dietas seleccionadas y de fluidos o tejidos (sangre, hueso, hígado), así como del análisis de los signos clínicos que presenta el animal. El diagnóstico es confirmado cuando el problema es corregido y el animal regresa a su condición normal. Mejorar la condición de los animales puede ser logrado a través de la fertilización del suelo o a través de la suplementación mineral adecuada (NRC, 2007).

Las interacciones entre minerales pueden modificar su disponibilidad y pueden ser una importante causa de deficiencias o excesos minerales. Esos problemas pueden surgir de desbalances naturales o ser inducidos mediante las prácticas de manejo que promueven la ingestión de suelo, contaminación de fuentes de agua, o una inadecuada suplementación mineral. Las interacciones pueden ocurrir durante la absorción, transporte, función intracelular o en sitios de excreción y almacenamiento.

El estatus mineral de los animales puede cambiar durante la lactación o el crecimiento, y está en relación con la disponibilidad de suplementos minerales, ya sean de origen natural o proveídos a través de aditivos alimenticios (NRC, 2007).

2.5 Descripción general de los metales pesados y otros minerales

2.5.1 Cadmio

Los componentes de cadmio son usados como estabilizadores en productos de PVC, en pinturas y en baterías de cadmio. El cadmio ha sido usado como un agente anticorrosivo. También se encuentra presente en fertilizantes fosfatados. La producción, consumo y emisiones de cadmio incrementó dramáticamente en todo el mundo durante el siglo XX. Los productos que contienen cadmio son raramente reciclados, pero frecuentemente son desechados junto con la basura doméstica, contaminando así el ambiente, especialmente cuando los residuos son incinerados.

El límite máximo legal de cadmio en los alimentos en Europa es 1 mg kg^{-1} , para evitar que aumente su consumo en los humanos (Organization World Health, 2011). La exposición a cadmio puede causar daño renal. El daño tubular causado por cadmio es irreversible. El daño tubular inicial puede progresar y con ello, la tasa de filtración glomerular disminuye. El riesgo a desarrollar cálculos en el riñón está relacionado con el incremento en la excreción de calcio en orina debido al daño tubular (Jarup, Berglund, Elinder, Nordberg, & Vahter, 1998).

A largo plazo la exposición a cadmio provoca daño en esqueleto (osteomalacia y osteoporosis). Los primeros estudios reportados fueron de Japón, donde la exposición fue causada al irrigar cultivos de arroz con agua contaminada. Experimentos en animales sugieren que el cadmio puede ser un factor de riesgo para desarrollar enfermedades cardiovasculares (Jarup, Berglund, Elinder, Nordberg, & Vahter, 1998).

La IARC ha clasificado al cadmio como carcinógeno con base en la evidencia en humanos y experimentos con animales (International Agency for Research on Cancer, 1993). El cadmio ha sido asociado con cáncer de próstata y de riñón (Kolonel, 1976). Una vez absorbido puede modificar el metabolismo esencial de Zn, Cu, Fe y su distribución en los tejidos (Underwood & Suttle, 2003).

Concentraciones de $3 \text{ a } 7 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd en la dieta disminuye la retención de Cu en hígado (Mills & Dalgarno, 1972). El control sobre la retención de cadmio se produce gracias a la metalotioneína, ya que esta proteína se une al Cd y lo almacena en hígado y riñón (Galván-Bobadilla, García-Escamilla, Gutiérrez-García, Mendoza-Magaña, & Rosiles-Martínez, 2005).

Las concentraciones de Cd en forrajes pueden mantenerse dentro de los límites aceptables si se evitan las fuentes de superfosfato ricas en el mineral y probablemente añadiendo cal a los pastos, para reducir la captación (Oliver et al., 1996). La contaminación simultánea con zinc puede limitar la captación de cadmio procedentes de aguas residuales (Bramley, 1990).

2.5.2 Cobre

Debido a su absorción y metabolismo el Cu se ve afectado por molibdeno, azufre, calcio, zinc, hierro, manganeso, cobalto, plomo, cadmio y selenio. Los animales que se alimentan con vegetación en suelos con exceso de molibdeno, aluminio, titanio y sulfatos, presentan deficiencias de cobre, aunque tengan consumo frecuente del mineral en la dieta.

Tiffany et al., (2000) encontraron deficiencia de Cu originada por consumo de forraje con concentraciones altas de azufre, cadmio, níquel y molibdeno, cosechado en praderas abonadas con lodo de aguas residuales. Las vacas alimentadas con dietas altas en Mo (20 mg kg^{-1}) presentaron una disminución de cobre hepático (Pinto-Santini, Godoy, Chicco, & Chacón, 2007).

2.5.3 Hierro

El hierro es el elemento traza más abundante en el cuerpo. Aproximadamente 60% del hierro está presente como hemoglobina y el resto almacenado como ferritina y hemosiderina en el sistema retículo endotelial. La rápida proliferación de glóbulos rojos incrementa la demanda de hierro y puede ser riesgo de anemia, principalmente en cerdos, en contraste con el ganado mayor donde los problemas se presentan cuando hay un exceso de hierro en la dieta. La intoxicación crónica por Fe interfiere con el metabolismo de otros minerales como cobre y el fósforo (McDowell, Velázquez, & Valle, 1997).

Su absorción se realiza en el duodeno por la pared intestinal y se transporta a sangre mediante los epiteliositos intestinales. El ion ferroso que entra a la sangre es oxidado a ácido férrico, se une a transferrina y se transporta hacia los tejidos de almacenamiento (NRC, 1980). La disponibilidad del hierro es cambiante, se incrementa cuando hay una deficiencia en el alimento y viceversa.

2.5.4 Níquel

El níquel, un elemento que se produce de forma natural en la corteza terrestre, se encuentra en suelos, sedimentos, agua, aire, plantas y animales. Las grandes cantidades de níquel se liberan en el medio ambiente como consecuencia de fenómenos naturales tales como erupciones volcánicas o de actividades

industriales como la minería de níquel, producción de aleaciones de níquel, plantas de energía y las emisiones de incineradores.

La exposición humana al níquel se produce a través de la inhalación de partículas de polvo, la ingestión de alimentos y agua contaminados, y el contacto dérmico con materiales o suelos que contienen níquel. El níquel también puede ser ingerido o absorbido por la piel. Los órganos dañados primarios son los riñones y los pulmones. Otros órganos, tales como el hígado, bazo, corazón y testículos, también pueden verse afectados en menor medida. Aunque la reacción alérgica cutánea al níquel es el efecto adverso más común en los seres humanos, la exposición al níquel también se ha asociado con el cáncer de pulmón, especialmente en los trabajadores de las refinerías de níquel y plantas de procesamiento (Cameron, Buchner, & Tchounwou, 2011).

La carcinogenicidad por níquel implica múltiples mecanismos moleculares. Los mecanismos sugieren la siguiente cadena de eventos: los compuestos de níquel al entrar en la célula activan el receptor sensor de Ca, provocando movilización intracelular de Ca^{2+} y la inducción de vías para producir hipoxia. El níquel entra en el núcleo, directamente se une al ADN y reacciona con H_2O_2 para formar complejos reactivos de níquel-oxígeno. El estrés oxidativo genera graves daños al ADN e inhibe las vías de reparación del ADN.

El níquel también provoca daños a la heterocromatina, silenciando de este modo la expresión de genes. Como resultado del silenciamiento génico, la célula es más susceptible a la transformación neoplásica. Además, el níquel regula a la baja el gen supresor tumoral p53, activa el proto-oncogén c-Myc e induce el factor de transcripción AP-1, lo que resulta en la proliferación celular y el desarrollo del cáncer (Cameron, Buchner, & Tchounwou, 2011).

2.5.5 Plomo

En general, la contaminación por plomo en aire y alimentos se encuentra en proporciones iguales. Las emisiones de plomo al ambiente (50%) son derivadas de la gasolina y se han incrementado durante el último siglo. La exposición a

plomo inorgánico ocurre en minas, fundidoras y soldaduras de metal. El aire contaminado puede ser depositado en suelo y agua.

Arriba del 50% del plomo inhalado es absorbido en los pulmones. El plomo en sangre se une a los eritrocitos y su eliminación es lenta, principalmente por la orina. El plomo es acumulado en el esqueleto y es lentamente liberado de este compartimento. La vida media del plomo en sangre es alrededor de un mes y en el esqueleto de 20 a 30 años (Tong, von Schirnding, & Prapamontol, 2000).

En adultos, el plomo inorgánico no penetra en la barrera hematoencefálica, mientras que esta barrera está menos desarrollada en niños. El alto consumo gastrointestinal y la barrera hematoencefálica permeable hacen a los niños especialmente susceptibles a la exposición de plomo y provoca daño cerebral. Los componentes orgánicos penetran membranas celulares. Tetrametil plomo y tetraetil plomo penetran la piel fácilmente. En adultos, esos componentes pueden atravesar la barrera hematoencefálica y son vulnerables a desarrollar encefalopatía.

Los síntomas agudos por toxicidad de plomo son dolor de cabeza, irritabilidad, dolor abdominal y otros síntomas relacionados con el sistema nervioso. La encefalopatía es caracterizada por insomnio e inquietud. Los niños pueden presentar alteraciones en el comportamiento, aprendizaje y concentración. Las personas quienes han sido expuestas al plomo por largo tiempo sufren de deterioro de la memoria, prolongado tiempo de reacción y reducida habilidad de razonamiento.

Individuos con niveles de plomo promedio en sangre de 3 $\mu\text{mol/l}$ muestran síntomas en el nervio periférico con reducción de la velocidad de conducción nerviosa y reducción de la sensibilidad dérmica. Si la neuropatía es severa la lesión puede ser permanente. En casos menos serios, el signo de toxicidad es un disturbio en la síntesis de hemoglobina, y periodos prolongados de exposición puede provocar anemia.

La aguda exposición de plomo es conocida por el daño proximal tubular renal (Tong, von Schirnding, & Prapamontol, 2000). El tiempo prolongado de exposición puede ser riesgo de daño en riñón y la excreción urinaria de proteínas de bajo peso molecular se correlaciona positivamente con la duración de exposición a emanaciones de plomo de los automóviles (Mortada, Sobh, El-Defrawy, & Farahat, 2001).

Los niveles de plomo en niños por debajo de 10 $\mu\text{mg/dl}$ han sido considerados aceptables, pero datos recientes indican que hay efectos toxicológicos aún por debajo de estos niveles. En 1997 la IARC clasificó al plomo como posible carcinógeno basado en datos de animales y humanos. Pocos estudios han sido publicados, sin embargo, el cáncer de pulmón, cáncer de estómago y gliomas son los más relacionados a la exposición de plomo (Steenland & Boffetta, 2000).

El plomo compite con los minerales esenciales, modificando las concentraciones intracelulares de calcio, hierro, zinc y cobre. Los suelos con aguas residuales y fangosas son fuente importante de plomo ya que pueden tener hasta 500 mg kg^{-1} MS o más (Suttle, Brebner, & Hall, 1991); sin embargo, no es fácil que las plantas y forrajes absorban el metal ya que estos no exceden una concentración mayor de 5 mg kg^{-1} MS. El principal peligro para el ganado es el consumo de suelo y forraje regado con aguas residuales (Méndez- Batán, 2001).

2.5.6 Zinc

El zinc es un elemento traza esencial para humanos, plantas y animales. Se estima que las concentraciones de zinc en la corteza terrestre van de 5 a 200 ppm. El mayor uso del zinc incluye el recubrimiento para protección de acero en el proceso de galvanización, como compuesto de aleaciones, como protector en el recubrimiento de otros metales para prevenir la corrosión, para materiales de construcción, equipo automotriz, recubrimiento de carros de ferrocarril, etc.

El zinc es un constituyente de la insulina y varios sistemas enzimáticos, incluyendo la anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa y fosfatasa. Es requerido para la síntesis de proteínas y la formación del colágeno, interviene en una adecuada respuesta inmunológica. Estabiliza las estructuras del ARN, ADN

y ribosomas. Interviene en la producción, almacenamiento y secreción de hormonas (testosterona, insulina y corticosteroides adrenales).

2.5.7 Molibdeno

El molibdeno es un mineral traza esencial para la salud, pero no se tiene evidencia si su deficiencia pueda causar alguna enfermedad en humanos. El molibdeno es esencial para la actividad de la xantina-oxidasa y también para las acciones de las enzimas sulfito oxidasa y aldehído oxidasa. La xantina oxidasa cataliza la transferencia de hipoxantina y xantina a ácido úrico.

El molibdeno es fácilmente absorbido en el intestino delgado superior y es transportado junto a proteínas de la sangre a tejidos de almacenamiento. El metal es transportado al hígado por los eritrocitos. Las concentraciones normales en sangre de ovejas se encuentran en 0.01-0.1 ppm y varían de acuerdo con el contenido de molibdeno en suelo (Mertz, 1986). La excreción toma lugar en la bilis y orina. El molibdeno es secretado en la bilis y es entonces recirculado en el hígado por circulación enterohepática, los excesos aparecen en heces. Alrededor de la mitad del total consumido puede ser excretado en orina. No hay un sitio de almacenamiento para molibdeno, pero altas concentraciones son encontradas en hígado, huesos, adrenales, riñones, intestino delgado y piel (Kones, 1990).

La cantidad de molibdeno en plantas depende en gran medida del contenido en el suelo. El contenido de molibdeno es bajo en suelos ácidos y arenosos y alto en suelos alcalinos o neutros con alto contenido de materia orgánica. El molibdeno es un antagonista de cobre. En el ganado, cobre y molibdeno impiden la absorción de cantidades excesivas entre sí, pero sólo en presencia de sulfatos inorgánicos.

La absorción de molibdeno es inhibida por sulfatos. Algunas especies animales deficientes en molibdeno no crecen normalmente. En pollos alimentados con dietas deficientes en molibdeno, la actividad de la xantina oxidasa decrece en el intestino. En cabras y cerdos, la deficiencia de molibdeno produce anorexia, crecimiento y reproducción deprimidos, elevados niveles de cobre en el hígado y cerebro, y se incrementa la mortalidad.

El exceso de molibdeno tiene efecto cariostático en animales. El molibdeno incrementa la absorción de fluoruro y retención en músculo y cerebro. Un alto contenido de consumo diario de molibdeno compromete el balance de cobre, por lo tanto, la suplementación de molibdeno puede ser perjudicial (Kones, 1990).

2.6 Literatura citada

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentasti, E., Sarzanini, C., & Barberis, R. (2002). Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environmental Pollution*, 119(2), 177-193.
- Arbelo, C., Mora, J., Rodríguez Rodríguez, A., Guerra, J., & Armas, C. (2006). Salinidad y alcalinidad en suelos de las zonas áridas de tenerife (Islas Canarias). *Edafología*, 13(3), 171-179.
- ARC. (1980). The nutrients requirements of ruminant livestock. Commonwealth Agricultural Bureaux. (F. Royal, Ed.) pp. 184-185.
- Ayres, R., & Duncan, D. (1997). *Análisis de aguas residuales para su uso en la agricultura: manual de técnicas parasitológicas y bacteriológicas de laboratorio*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- Bramley, R. (1990). Cadmium in New Zealand agriculture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 33, 505-519.
- Cajuste, L., & Rogelio, C. (1995). Behavior of trace metals in soils of Hidalgo, México. *Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 30(1), 142-155.
- Cajuste, L., Carrillo, R., Cota, E., & Laird, R. (1991). The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. *Water, Air and Soil Pollution*, 57-58, 763-771.
- Cameron, K., Buchner, V., & Tchounwou, P. (2011). Exploring the molecular mechanisms of nickel-induced genotoxicity and carcinogenicity: a literature review. *Reviews on environmental health*, 26(2), 81-92.
- Castellanos, J. Z. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas agrícolas, plantas y ECP* (Segunda ed.). Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola.
- CONAGUA. (1994). *Manual técnico para el uso, aprovechamiento y manejo de las aguas residuales en el riego agrícola*. México: Gerencia de reutilización de aguas-CNA Documento interno.

- Cuellar Ordaz, J. A., García López, E., De la Cruz C., H. A., & Aguilar Niño, M. (2011). *Manual práctico para la cría ovina*.
- De la Isla de Bauer, M. (2002). *Deterioro/preservación ambiental y agricultura*. México.: Colegio de Posgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Programa de Hidrociencias.
- FAO. (2002). *NOM-021-RECNAT-2000: Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos*. México.
- Ferguson, J. (1990). *The heavy metals: chemistry environmental impact and health effects*. Great Britain, U.K.: Pergamon Press.
- Galván-Bobadilla, A., García-Escamilla, R., Gutiérrez-García, N., Mendoza-Magaña, M., & Rosiles-Martínez, R. (2005). Concentraciones de cadmio y zinc en tejido de cáncer prostático. *Revista Mexicana de Patología Clínica*, 52(2), 109-117.
- Gregorich, E., Carter, M., Angers, D., Monreal, C., & Ellert, B. (s.d.). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal Soil Science*, 367-384.
- INEGI. (2012). *Panorama agropecuario en Hidalgo: Censo agropecuario 2007*. México.
- International Agency for Research on Cancer. (1993). Beryllium, cadmium, mercury, and exposures in the glass manufacturing industry. In *Evaluation of carcinogenic risk to humans* (Vol. 58).
- Jarup, L., Berglund, M., Elinder, C., Nordberg, G., & Vahter, M. (1998). Health effects of cadmium exposure-a review of the literature and a risk estimate. *Scandinavian Journal Work Environment Health*, 24(1), 1-51.
- Kabata-Pendias, A. (1984). *Trace elements in soils and plants*. Florida, Estados Unidos: Press Boca Raton .
- Kabata-Pendias, A. (2004). Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue. *Geoderma*, 122, 143-149.
- Kolonel, L. (1976). Association of cadmium with renal cancer. *Cancer*, 37(4), 1782-7.
- Kones, M. (1990). Molybdenum in human nutrition. *Journal of the National Medical Association*, 82(1), 32-56.
- Lasat, M. M. (2000). *The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil*. American Association for the Advancement of Science.
- López-Martínez, S., Gallegos-Martínez, M. E., Pérez Flores, L. J., & Gutiérrez Rojas, M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 21(2),91-100.

- Lucho-Constantino, C., Prieto-García, F., Del Razo, L., Rodríguez Vázquez, R., & Poggi-Varaldo, H. (2005). Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 108, 57-71.
- McDowell, L., Conrad, J., & Ellis, G. (1984). Mineral deficiencies and imbalances and their diagnosis. *Symposium on Herbivore Nutrition in Subtropics and Tropics: Problems and prospects*. South Africa.
- McDowell, L., & Arthington, J. (2005). *Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales* (Cuarta ed.). Gainesville: Universidad de Florida.
- McDowell, R., Velázquez, J., & Valle, G. (1997). *Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales*. Gainesville, Florida, USA: Universidad de Florida.
- Mejía, B., Sánchez, B., Hernández, S., Flores, D., Villareal, L., & Guajardo, V. (n.d.). Metales pesados en maíz y alfalfa y su correlación con los extractables en suelos del DDR 063, Hidalgo. *I simposio Nacional Degradación del Suelo*.
- Mejía-Chávez, A., & Jiménez Cisneros, B. (1995). *Evaluación de las condiciones de mezclado, punto de adición de coagulante y floculante en la eficiencia de un tratamiento primario avanzado*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Méndez-Batán, J. (2001). Metales pesados en alimentación animal. *XVII Curso de especialización FEDNA*.
- Mendoza-Márquez, H., Aguirre Martínez, J., & Athie Lambarri, M. (1981). *Land treatment: a viable solution for management of wastewater in the metropolitan area of the Valley of Mexico*. In International Conference on the Status of Knowledge, Critical Research Needs, and Potential Research Facilities (pp. 163-93). Academic Press.
- Mertz, W. (1986). *Trace elements in human and animal nutrition* (Quinta ed., Vol. 2). New York: Academic Press.
- Mesa, D. (2003). Obtención de plantas resistentes a la salinidad para los suelos salinos cubanos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 37(3), 217-226.
- Mills, C., & Dalgarno, A. (1972). Copper and zinc status of ewes and lambs receiving increased dietary concentration of cadmium. *Nature*, 239, 171-173.
- Mortada, W., Sobh, M., El-Defrawy, M., & Farahat, S. (2001). Study of lead exposure from automobile exhaust as a risk for nephrotoxicity among traffic policemen. *American Journal of Nephrology*, 21(4), 274-9.
- Mortvedt, J., Giordano, P., & Lindsay, W. (1983). *Micronutrientes en agricultura* (Primera ed.). México: AGT Editor S.A.

- Muñoz, E. A. (21 de 01 de 2014). Presa Endhó, inacabable foco de infección. *La Jornada*, pp. 1-5.
- Navarro, A., Alonso, I., & Moya, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en las plantas. *Ecosistemas*, 16(2), 10-25.
- NRC. (2005). *Mineral tolerance of animals*. Washington D.C.: The National Academies Press.
- NRC. (2007). *Nutrients requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids, and New World Camelids*. Washington, D.C. : The National Academies Press.
- Oliver, D., Tiller, K., Conyers, M., Slattery, W., Alston, A., & Merry, R. (1996). Effectiveness of limiting to minimise uptake of cadmium by wheat and barley grain grown in the field. *Australian Journal of Agricultural Research*, 47(7), 1181-1193.
- Organization World Health. (2011). *Codex Alimentarius Commission*.
- Pagnaelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., & Toro, L. (2004). Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: pollution detection and affinity series. *Environmental Pollution*, 132,189-201.
- Peasey, A., Blumenthal, U., Duncan, M., & Ruíz-Palacios, G. (2000). *A review of policy and standars for wastewater reuse in agriculture: A Latin American perspective*. Water and Environmental Health at London and Loughborough.
- Pinto-Santini, L., Godoy, S., Chicco, C., & Chacón, T. (2007). Efecto de altos niveles de hierro y molibdeno sobre la nutrición del cobre en vacas mestizas. *Revista Científica FCV-LUZ*, 17(6), 588-596.
- Puls, R. (1988). *Mineral levels in animal health:diagnostic data*. Clearbrook, B.C.: Serpa International.
- Qadir, M., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2000). Cadmium concentration in vegetables grown on urban soils irrigated with untreated municipal sewage. *Environment, Development and Sustainability*, 2(1), 11-19.
- Quintana, C., Sanabria, M., Ojeda, M., & Valera, R. (2012). Efecto de la salinidad sobre la anatomía foliar y radical de la piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) 'Española roja'. *Pittieria*, 36, 87-108.
- Quiroz-Rocha, G. F., & Bouda, J. (2001). Fisiopatología de las deficiencias de cobre en rumiantes y su diagnóstico. *Veterinaria México*, 32(4), 289-296.
- Richards, A. L. (1900). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos* (Primera ed.). México: Instituto de Investigaciones Agrícolas.
- Rojas, M., & Rovalo, M. (1986). *Fisiología vegetal*. México: McGrawHill.

- Salgot, M., Huertas, E., Weber, S., Dott, W., & Hollender, J. (2006). Wastewater reuse and risk: definition of key objectives. *Desalination*, 187, 29-40.
- Siebe, C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 10(1), 15-21.
- Siebe, C. (1995). Heavy metal availability to plants in soils irrigated with wastewater from Mexico City. *Water Science and Technology*, 32(12), 29-34.
- Socha, M. T., Tomlinson, D., DeFrain, J. M., & Zinpro Corporation. (2003). Variability of water composition and potential impact on animal performance. *In Proceedings from the Intermountain Nutrition Conference, Salt Lake City, UT*, (pp. 85-96).
- Solís, C., Andrade, E., Mireles, A., Reyes-Solís, I., García-Calderón, N., Lagunas-Solar, M., . . . Flocchini, R. (2005). Distribution of heavy metals cultivated with wastewater irrigated soils during different periods of time. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 351-355.
- Steenland, K., & Boffetta, P. (2000). Lead and cancer in humans: where are we now? *American Journal of Industrial Medicine*, 38(3), 295-299.
- Suttle, F. (2010). *Mineral nutrition of livestock* (Cuarta ed.). Reino Unido: MPG Books Group.
- Suttle, N., Brebner, J., & Hall, J. (1991). Fecal excretion and retention of heavy metals in sheep ingesting topsoil from fields treated with metal rich sludge. *International Symposium on Trace Elements in Man and Animals*, (pp. 32-34). Dubrovnik IN, Zagreb.
- Tejeda, G. (1991). El riego con aguas residuales en México: efecto en la salud y propuesta de soluciones técnicas. *Revista de Ingeniería Ambiental*.
- Tiffany, M., McDowell, L., O'Connor, G., Martin, F., Wilkinson, N., Cardoso, E., . . . Rabiansky, P. (2000). Effects of pasture applied biosolids on performance and mineral status of grazing beef heifers. *Journal of Animal Science*, 78(5), 1331-7.
- Tong, S., von Schirnding, Y., & Prapamontol, T. (2000). Environmental lead exposure: a public health problem of global dimensions. *Bulletin of the World Health Organization*, 78(9), 1068-1077.
- Underwood, E., & Suttle, N. (2003). *Los minerales en la nutrición del ganado* (Tercera ed.). Zaragoza, España: Acribia S.A.
- Van der Hoek, W. (2004). *A framework for a Global Assessment of the extent of wastewater irrigation: the need for a common wastewater typology*. CAB International.

- Vázquez-Alarcón, A., Justin-Cajuste, L., Siebe-Grabach, C., Alcántar-González, G., & de la Isla de Bauer, M. (2001). Cadmio, Níquel y Plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 267-274.
- Villavicencio Martínez, N., López Alonzo, C., Basurto Sotelo, M., & Pérez Leal, R. (2011). Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia Chihuahua*, 5(3), 156-161.
- Wang, W. (1991). Literature review on higher plants for toxicity testing. *Water, Air and Soil Pollution*, 193-204.

3. CONCENTRACIÓN MINERAL Y DE METALES PESADOS EN OVINOS ALIMENTADOS CON FORRAJES IRRIGADOS CON AGUAS RESIDUALES

3.1 Resumen

El objetivo del presente estudio fue determinar la concentración de metales pesados y nutrimentales en el rebaño ovino alimentado con forraje irrigado con aguas residuales. Las muestras fueron colectadas en el municipio de Tula de Allende, Hidalgo. Las muestras de agua, suelo, forraje y suero sanguíneo fueron procesadas para su análisis en laboratorio. El análisis estadístico para la concentración mineral en suelo y agua incluyó el efecto de tipo de agua para riego. El modelo para suero consideró el efecto de tipo de animal. Se calcularon intervalos de confianza para probar si el componente de varianza entre Unidades de Producción fue significativo. El contenido mineral de calcio, magnesio, sodio y níquel en suelo fue mayor en aquellos donde se utilizó aguas residuales para riego ($p < 0.05$). El agua para consumo del rebaño superó los límites de concentración máxima para sodio, potasio y plomo. Los forrajes presentaron elevadas cantidades de cobre, sodio, potasio y fósforo y, en cuanto a la concentración de cadmio y plomo, éstos estuvieron en el límite tolerable, mientras que los valores de níquel se encontraron en niveles tóxicos. En suero sanguíneo, tanto hembras como crías presentaron deficiencia de cobre y zinc, y exceso de hierro, sodio, potasio y fósforo. Un segundo diagnóstico fue realizado en muestras de hígado y riñón para constatar las concentraciones obtenidas en suero sanguíneo. Los resultados arrojaron que, al igual que en suero, las concentraciones de cobre y zinc fueron bajas, mientras que las concentraciones de sodio y fósforo fueron altas. En las muestras de vísceras se detectó la presencia de cadmio, plomo, níquel y molibdeno, aunque se encontraron por debajo del nivel tóxico, excepto para níquel que superó el valor adecuado. Se concluye que existen desbalances de minerales en el animal, producto de las interacciones entre los metales pesados y nutrimentales y de las altas concentraciones en suelo, agua y forraje.

Palabras clave: Valle del mezquital, aguas residuales, metales pesados, minerales, ovinos.

MINERAL CONCENTRATION AND HEAVY METALS IN SHEEP FED WITH IRRIGATED FORAGE WITH WASTEWATER

3.2 Summary

The objective of the study was to determine the concentration of heavy and nutritive metals in sheep flocks fed with irrigated forage with wastewater. Sampling was carried out in Tula de Allende, Hidalgo. The samples of water, soil, forage and blood serum were prepared for laboratory analysis. Statistical analysis for metals and heavy metals in water and soil included the effect of water type for irrigation. The model for serum considered the effect of animal type. Confidence intervals were calculated to test if the component of variance between Production Units was significant. The mineral content of calcium, magnesium, sodium and nickel in the soil was higher in those where wastewater was used for irrigation ($p < 0.05$). The water for herd consumption exceeded the maximum concentration limits for sodium, potassium and lead. The forages present high amounts of copper, sodium, potassium and phosphorus; in terms of the concentration of cadmium and lead, these were in the tolerable concentration limit, while the values for nickel were in toxic levels. In blood serum, ewes and lambs presented copper and zinc deficiency, and excess of iron, sodium, potassium and phosphorus. A second diagnosis was made using liver and kidney samples to verify the concentration in serum. The results showed that, like serum, copper and zinc concentrations were low, while sodium and phosphorus concentrations were high. The presence of cadmium, lead, nickel and molybdenum samples was detected in kidney and liver, although below the toxic level; the exception was kidney where the nickel level exceeded the appropriate value. It is concluded that there are mineral imbalances in the animal; product of the interactions between heavy and nutritive metals and high concentrations in soil, water and forage.

Keywords: Mezquital Valley, sewage, heavy metals, minerals, sheep.

3.3 Introducción

El principal objetivo de la cría ovina es la producción de carne para consumo humano, esta actividad pecuaria es importante porque genera valor para las pequeñas unidades de producción y por la gran demanda de sus productos en la Ciudad de México y área conurbada, Guadalajara y Monterrey. En la actualidad, la ovinocultura nacional sigue sin satisfacer la demanda de la carne de esta especie, del total del consumo nacional 33% depende de la importación de Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda y Chile (Cuellar Ordaz, García López, De la Cruz C., & Aguilar Niño, 2011).

La gran mayoría de los rebaños en México tienen bajos índices de producción asociado a los altos costos de alimentación. Una estrategia que ha sido usada por los productores es hacer uso del agua residual para abaratar costos de riego para producción de forraje. El uso del agua residual eleva la productividad de los cultivos, reduce la necesidad de fertilizantes y promete ser una opción para incrementar la rentabilidad de las unidades de producción (Méndez et al., 2006).

El Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo, pasó de ser una zona poco productiva a una muy importante para la producción de ovinos generalmente criados en sistemas semi-extensivos. El 28% de los ovinos en el estado de Hidalgo son criados en municipios que hacen uso de aproximadamente 85 000 ha irrigadas con aguas residuales para la producción de maíz, alfalfa, avena, trigo y cebada que son utilizados en la alimentación del rebaño (INEGI, 2012). Sin embargo, el uso de aguas residuales en la agricultura es una fuente de metales pesados que pueden incorporarse a la cadena trófica. Como consecuencia de esta práctica se han estado acumulando metales a niveles tóxicos en suelos y plantas forrajeras (Solís et al., 2005; Vázquez-Alarcón et al., 2001).

Los metales pesados pueden ser absorbidos por el animal hasta niveles tóxicos e impiden la asimilación de otros minerales requeridos para las funciones biológicas. La utilización de aguas para riego con altas concentraciones de contaminantes ha traído múltiples problemas, entre ellos, los relacionados con la productividad y salud animal. En la región hay pocos estudios documentados

sobre nutrición mineral de ovinos y con frecuencia, los minerales no se consideran en la dieta. Por ello, el objetivo del presente estudio fue determinar la concentración de metales pesados y nutrimentales en el rebaño ovino alimentado con forraje irrigado con aguas residuales.

3.4 Materiales y métodos

En el mes de febrero del 2016 (época seca) se eligieron como puntos de muestreo unidades de producción ubicadas en las comunidades: Colonia Benito Juárez, Santa Ana Ahuehuepan, Santa María Macua, Xitejé de la Reforma, Xochitlán de las Flores y San Andrés, municipio de Tula de Allende, Hidalgo. Cada punto de muestreo se clasificó si usaban agua residual o limpia para el riego de sus cultivos forrajeros; y en cada punto de muestreo se colectaron 5 muestras de suelo, 2 a 3 de forraje, 3 de agua ofrecida a los animales y 20 de suero sanguíneo (10 ovejas y sus crías).

El clima es estepario con temperaturas mayores a los 18° C, la precipitación pluvial anual varía entre 400 y 450 mm, con lluvias en verano. La mayor precipitación suele presentarse de mayo a septiembre, coincidiendo con la época calurosa. Los suelos se identifican como Feozem, Calcárico y Háplico (INEGI, 2012).

3.4.1 Colecta y procesamiento de muestras

Las unidades de producción muestreadas fueron agrupadas según usaran para el riego de los forrajes agua residual o agua limpia.

Agua

El agua se colectó en botellas de plástico, previamente lavadas con una solución de ácido nítrico al 10% y enjuagadas con agua desionizada, directamente de las fuentes en donde era ofrecida al rebaño, el volumen colectado fue 500 ml, todas las muestras colectadas se mantuvieron en refrigeración hasta ser utilizadas según el método 3005A de la EPA (1992).

Forraje

En cada unidad de producción se tomaron dos muestras de cada forraje almacenado y disponible en el momento del muestreo, alfalfa y rastrojo de maíz fueron los forrajes más ampliamente usados en la alimentación del rebaño. Las muestras fueron procesadas de acuerdo con los procedimientos descritos por Fick et al., (1979). Éstas fueron secadas en estufas con aire forzado a 55°C durante 48 horas y se molieron en un molino Wiley con una criba de acero inoxidable de 1 mm. De cada muestra de forraje molido se pesaron 0.5 g y fueron digeridos en autoclave a aproximadamente 120°C durante 1 hora con 4 ml de ácido nítrico concentrado y 2 ml de peróxido de hidrógeno al 30%, utilizando frascos para esterilizar con capacidad de 250 ml. Las muestras fueron filtradas con papel Watman no. 542 y reconstituidas en matraces de 50 ml.

Suelo

En cada unidad de producción se obtuvieron cinco muestras de 500 g de suelo, a una profundidad de aproximadamente 20 cm con una pala recta de acero inoxidable, éstas fueron secadas en estufa con aire forzado a 65°C durante 48 horas, molidas en un mortero con pistilo, se pesaron 0.5 g de suelo se les adicionó 10 ml de ácido clorhídrico y digirió en autoclave durante 1 h a 120°C.

El pH se determinó en tubos de ensayo con 10 g de suelo más 10 ml agua destilada y agitación en un Vortex, la mezcla reposó por 10 minutos y se midió el pH con un potenciómetro.

Suero sanguíneo

Las muestras de sangre se obtuvieron de la vena yugular, para lo cual se utilizaron agujas y tubos de 10 ml sin anticoagulante. Fueron obtenidos aproximadamente 10 ml de sangre por animal, siguiendo la metodología descrita por Fick et al., (1979). Las muestras fueron centrifugadas a 3000 rpm durante 15 minutos para separar el suero, el cual se congeló a -20°C hasta su análisis.

Una solución libre de proteínas fue utilizada para el análisis de macrominerales. El proceso para la desproteínización se llevó a cabo pipeteando 1 ml de suero y añadiendo 9 ml de TCA al 10%, la mezcla se agitó en un Vortex, se dejó en

reposo 10 minutos y después se centrifugó por 10 minutos a 3000 rpm. El sobrenadante fue decantado y guardado para su posterior análisis. El sobrenadante representa una dilución de 1:10 de la muestra de suero.

Hígados y riñones

La colecta de hígados y riñones se realizó directamente en los puntos de sacrificio de ganado ovino en las comunidades de La Poza, Santa María Macua y Milchimaloya. Fueron obtenidos 32 muestras de riñones y 14 muestras de hígado. Se tomaron aproximadamente 300 g de tejido que fueron molidos en un molino para carne. Cada muestra fue sometida a una digestión ácida de acuerdo con la metodología de Fick et al., (1979). Se utilizaron crisoles a peso constante, a cada uno se le agregaron aproximadamente 20 g de tejido y se llevaron a la estufa a 100°C durante 16 h para determinar el porcentaje de materia seca. Después se realizó la pre-digestión con ácido nítrico al 50% donde se obtuvo un residuo seco de color oscuro. Los crisoles con la muestra pre-digerida fueron sometidos a incineración en una mufla a 500° C. Para solubilizar las cenizas de carne incinerada, se agregó 1 ml de agua desionizada para humedecer la muestra y se procedió a realizar una serie de digestiones con ácido clorhídrico al 50 y 10% de concentración sobre una plancha caliente hasta obtener un volumen de 5 ml. Las muestras fueron filtradas con papel Watman no. 541 y aforadas en matraces de 50 ml.

Para la conversión de base húmeda a base seca se tomaron como referencia valores reportados por Puls (1988); los valores para riñón se calcularon con base en el 18% (+) de materia seca analizada en laboratorio mientras que en hígado fue del 33% (+).

3.4.2 Análisis de laboratorio

Las concentraciones de Ca, Mg, Na, K, Cu, Zn y Fe se determinaron mediante las técnicas de espectrofotometría de absorción atómica, siguiendo los procedimientos descritos por Fick et al. (1979), para lo cual se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica modelo AAnalyst 700 de PerkinElmer. La concentración de P se determinó por la metodología de colorimetría (Fick et

al., 1979), mediante un espectrofotómetro UV/VIS modelo Lambda 2 de PelkinElmer.

Las concentraciones de Pb, Cd, Ni y Mo fueron analizadas mediante espectrofotometría de emisión por plasma de acoplamiento inductivo en el equipo HORIBA Scientific AS 500 de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000.

3.4.3 Análisis estadístico

Las variables de respuesta analizadas para los componentes del muestreo fueron las concentraciones de Cu, Zn, Fe, Ca, Mg, Na, K, P, Cd, Pb, Ni y Mo. Se realizaron análisis de varianzas prueba de efectos fijos y se estimaron intervalos de confianza para los efectos aleatorios (MIXED, SAS 9.1).

El modelo estadístico utilizado para el análisis de suelo y agua fue:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + UP_{j(i)} + E_{ijk} \dots \dots \dots (1)$$

donde Y_{ijk} representa la observación correspondiente a la concentración de cada uno de los elementos indicados anteriormente en la muestra k de la Unidad de Producción j bajo el tipo de riego i ; μ es la media general, R_i es el efecto fijo de tipo de riego, $UP_{j(i)}$ fue el efecto aleatorio de la j -ésima Unidad de Producción en el i -ésimo tipo de riego y E_{ijk} representa el error experimental. Se supone que $UP_i \sim N(0, \sigma_{UP}^2)$ y el componente de varianza de Unidades de Producción es σ_{UP}^2 .

Para probar si existe efecto del tipo de agua para riego sobre la concentración del elemento en cuestión se consideró el juego de hipótesis:

$$H_{01}: R_1 = R_2 \quad vs. \quad H_{a1}: R_1 \neq R_2$$

Por su parte, la prueba sobre la existencia de componentes de varianza atribuibles a Unidades de Producción consideró el juego de hipótesis:

$$H_{02}: \sigma_{UP}^2 = 0 \quad vs. \quad H_{a2}: \sigma_{UP}^2 > 0$$

Para probar si el componente de varianza de Unidad de Producción en tipo de riego fue nulo, es decir $\sigma_{UP}^2 = 0$, o no ($\sigma_{UP}^2 > 0$) se calculó un intervalo de

confianza para σ_{UP}^2 ; se concluyó que $\sigma_{UP}^2 > 0$ si el intervalo construido, digamos (CL, CU), no contuvo al valor 0 y viceversa.

Para el análisis de rastrojo de maíz y alfalfa el modelo estadístico fue:

$$Y_{ij} + \mu + UP_i + E_{ij} \dots \dots \dots (2)$$

y en este Y_{ij} representa la concentración mineral en rastrojo de maíz o alfalfa, μ es la media general, UP_i fue el efecto aleatorio de la i -ésima Unidad de Producción y E_{ij} corresponde al error experimental; igual que antes, se supone que $UP_i \sim N(0, \sigma_{UP}^2)$, donde σ_{UP}^2 representa el componente de varianza asociado a Unidades de Producción.

La prueba sobre existencia de componentes de varianza consideró el juego de hipótesis:

$$H_0: \sigma_{UP}^2 = 0 \quad vs. \quad H_a: \sigma_{UP}^2 > 0$$

Donde el estadístico de prueba considerado fue:

$$F_c = \frac{CM(UP)}{CM(Error)} \sim F_{g, l, e}^{r-1}$$

En el análisis estadístico de las muestras séricas se tomaron en cuenta los efectos de Unidad de Producción (UP) y tipo de animal (TA). El modelo estadístico utilizado en suero sanguíneo fue:

$$Y_{ijk} + \mu + UP_i + TA_j + E_{ijk} \dots \dots \dots (3)$$

donde Y_{ijk} fue la concentración mineral en suero sanguíneo, μ la media general, UP_i el efecto de la i -ésima Unidad de Producción, TA_j efecto del j -ésimo tipo de animal (Hembras adultas y crías) y E_{ijk} el error experimental.

Para probar los efectos por tipo de animal se probaron las siguientes hipótesis:

$$H_{01}: TA_1 = TA_2 \quad vs. \quad H_{a1}: TA_1 \neq TA_2$$

Para la prueba de efectos aleatorios o Unidad de Producción se probó si:

$$H_{02}: \sigma_{UP}^2 = 0 \quad vs. \quad H_{a2}: \sigma_{UP}^2 > 0$$

Finalmente, para hígados y riñones se reportaron los estadísticos descriptivos, es decir, el mínimo, el máximo, el promedio y desviación estándar de cada elemento y los resultados fueron presentados en gráficos box-plot.

3.5 Resultados y conclusión

3.5.1 Concentración mineral en suelo

En la prueba de efectos fijos se encontró que las concentraciones de Ca, Mg, Na, y Ni fueron superiores en suelos contaminados ($p < 0.05$; Cuadro 14). Estudios realizados en el Valle del Mezquital reportan algunas zonas con altos niveles de salinidad. De acuerdo con Ontiveros-Capurata, Diakite-Diakite, Álvarez-Sánchez, & Coras-Merino, (2013) las sales de cloruro y bicarbonato que se forman con los cationes de Na, Mg, Ca y K son los compuestos dominantes.

Cuadro 14. Estadísticos de prueba estimados y su significancia para la prueba de efectos fijos en el modelo estadístico (1) y los minerales en tipo de agua usada para riego

Mineral	Fc ¹	Pr>F ²
Cu	14.17	0.0639
Zn	7.63	0.1099
Fe	0.45	0.5700
Ca	1418.19	0.0007
Mg	86.23	0.0114
Na	83.94	0.0117
K	0.59	0.5242
P	12.50	0.0715
Cd	2.02	0.2907
Pb	0.11	0.7762
Mo	0.89	0.4443
Ni	28.47	0.0334
pH	4.63	0.1643

¹Valor de F calculada, ²Nivel de significancia observado.

Los fosfatos se encuentran en los fertilizantes y detergentes que, por escorrentía o descarga, llegan a las aguas negras y que luego son vertidas en suelos de uso agrícola. La mayor concentración de P se obtuvo en las Unidades de Producción 3 y 4, al igual que la concentración de Mg (Cuadro 15).

Aunque la disponibilidad de Cu y Zn es mayor en suelos con pH ácido, inverso a esto, en los suelos con pH > 7 se obtuvieron mayores concentraciones, esto

podría deberse a la concentración de estos minerales en el agua residual (Cuadro 15). Con respecto a la prueba de efectos aleatorios no se encontraron diferencias significativas entre Unidades de Producción (Cuadro 16).

Cuadro 15. Concentración mineral (mg/kg^{-1}) en suelos irrigados con agua residual y limpia en el municipio de Tula de Allende, Hidalgo

Mineral	Agua limpia		Agua residual	
	UP1	UP2	UP3	UP4
Cu	54.75	37.44	14.17	12.62
Zn	243.69	129.82	31.28	27.50
Fe	23711.30	20541.09	22140.39	24977.30
Ca	36102.41	37364.48	4270.31	3085.18
Mg	543.33	462.21	1701.76	1978.08
Na	657.26	559.16	122.36	152.86
K	3337.20	2739.17	3246.86	1192.26
P	3604.99	2449.63	716.35	1067.93
Cd	4.86	4.25	4.11	4.13
Pb	134.68	115.61	119.24	140.26
Mo	13.24	10.82	11.53	9.63
Ni	30.88	24.80	11.68	9.25
pH	7.44	7.78	6.63	4.99

Cuadro 16. Límites de confianza y significancia para σ_{UP}^2 en diversas variables en suelo

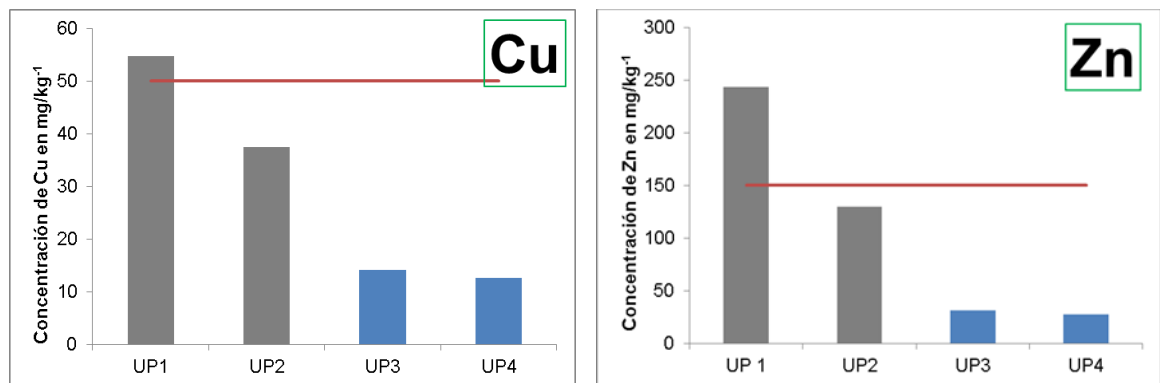
Mineral	Estimación σ_{UP}^2	CL	CU	Significancia
Cu	55.2231	-93.2996	203.75	NS
Zn	2650.31	-3723.67	9024.28	NS
Fe	1287372	-7859941	10434686	NS
Ca	-2.15E7	-3.699E7	-6012390	NS
Mg	9462.57	-31919	50844	NS
Na	1742.81	-3465.20	6950.82	NS
K	1125403	-1118317	3369124	NS
P	340884	-373944	1055712	NS
Cd	0.07587	-0.1061	0.2578	NS
Pb	148.19	-248.31	544.69	NS
Mo	1.7404	-2.9030	6.3839	NS
Ni	8.1969	-11.6124	28.0062	NS
pH	0.6807	-0.6895	2.0508	NS

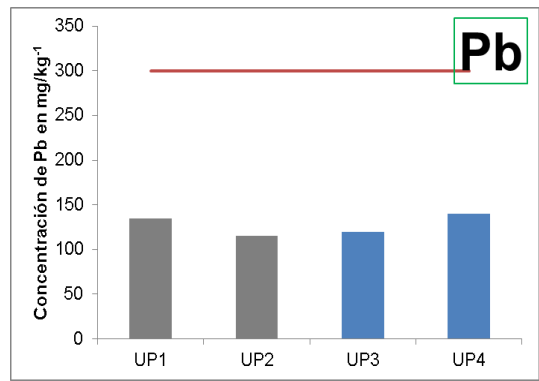
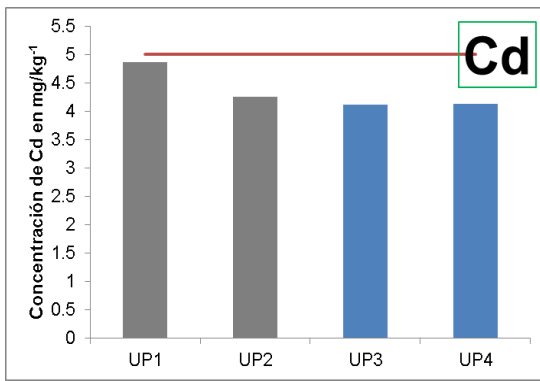
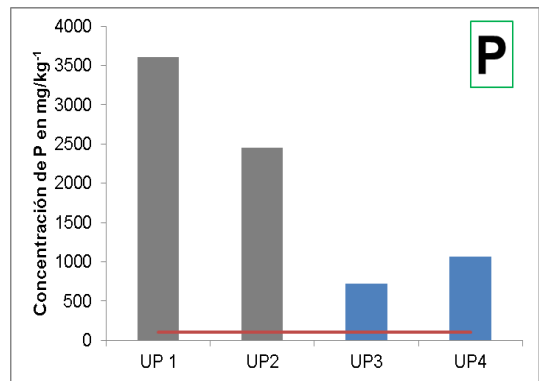
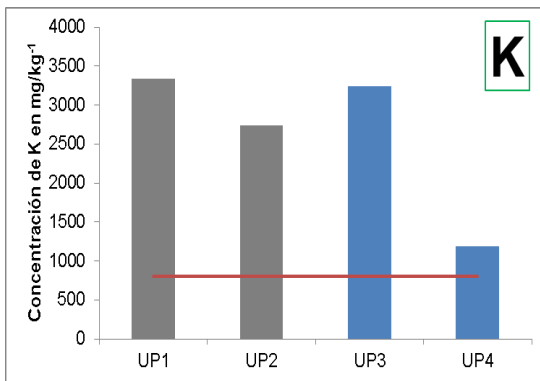
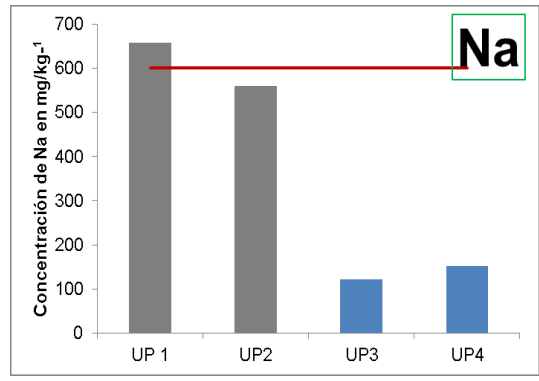
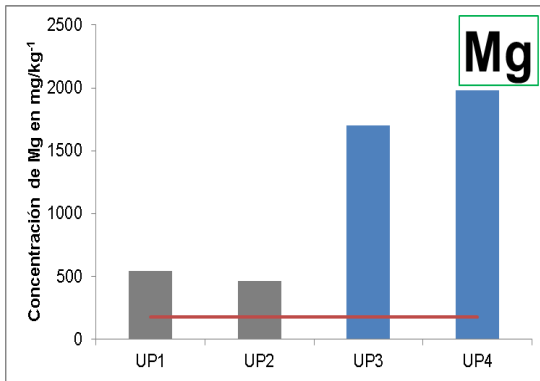
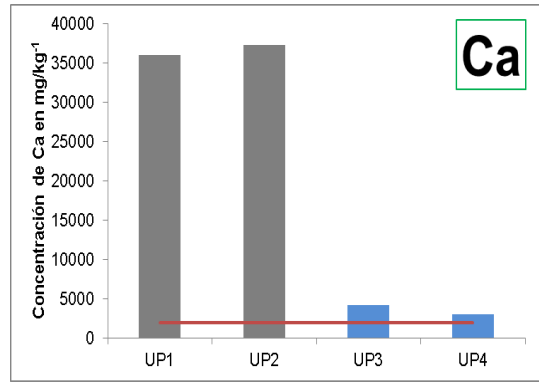
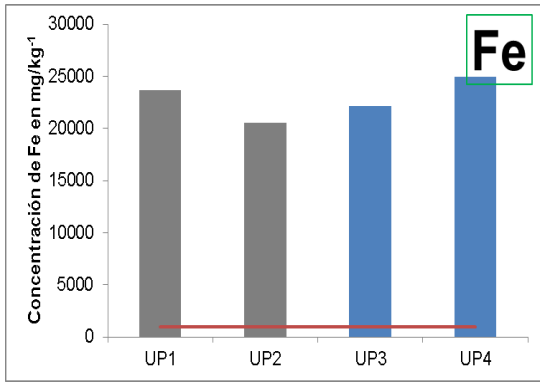
*=significativo con $\alpha=0.05$; NS=no significativo; CL=límite inferior; CU=límite superior

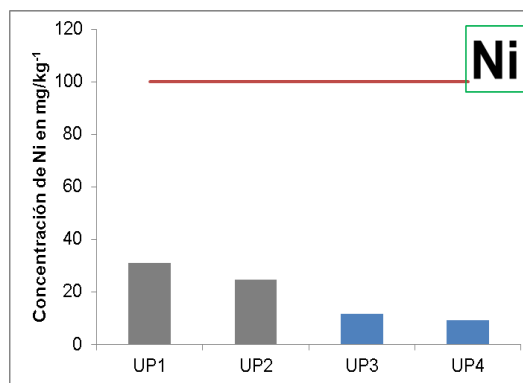
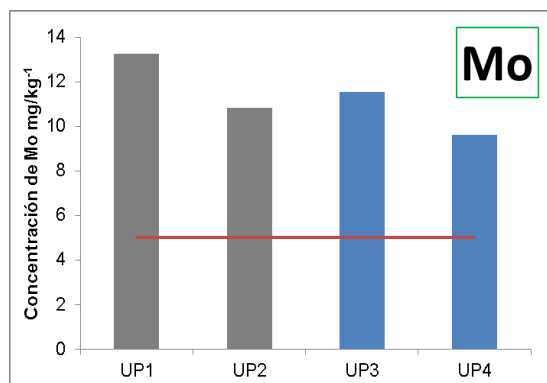
Las concentraciones de Pb y Cd total se encontraron en el rango de peligrosos de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (Figura 4). El aporte de contaminantes que viajan por el aire y se depositan en el suelo se agudiza aún más por las emisiones de la refinería Bicentenario y la refinería Miguel Hidalgo, y otras empresas cementeras. En 1995, la Organización de las Naciones Unidas consideró a la zona Tepeji-Tula-Apaxco como la región más contaminada del mundo, en materia de contaminación del aire (Muñoz, 2014). La concentración de Ni se encontró dentro de los valores normales para suelo y fue significativamente mayor en suelos regados con agua residual (Cuadro 15).

En la Figura 4 se muestran las concentraciones de Cu, Zn, Fe, Ca, Mg, Na, K, P, Cd, Pb, Ni y Mo (mg kg^{-1}) al comparar suelos irrigados con agua residual y limpia. Las barras en color gris indican riego con agua residual y las barras en color azul indican riego con agua limpia; la línea horizontal en color rojo indica la concentración máxima tolerable para Cu, Zn, Cd, Pb y Ni (NOM-021-RECNAT-2000), para Fe, Ca, Mg, Na, K, P y Mo indica niveles altos (Castellanos, 2000).

Figura 4. Concentración mineral (mg kg^{-1}) en suelos irrigados con agua residual y agua limpia







3.5.2 Concentración mineral en agua

El 81% de los canales principales y 52% de los canales laterales que transportan el agua residual al Valle del Mezquital no se encuentran revestidos, permitiendo la infiltración y recarga del agua residual directamente al acuífero (Lesser-Carrillo, Lesser-Illades, Arellano-Islas, & González-Posadas, 2011).

En este estudio se encontraron diferencias significativas para Ca, Mg, Na, K y Ni al evaluar el efecto del tipo de agua utilizada para riego ($p < 0.05$; Cuadro 17). Los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Lesser-Carrillo, Lesser-Illades, Arellano-Islas, & González-Posadas, (2011) quienes encontraron valores similares en los pozos 80, 82, 223 y 225 del Valle del Mezquital cercanos a los sitios de muestreo del presente estudio.

Cuadro 17. Estadísticos de prueba estimados y su significancia para la prueba de efectos fijos en el modelo estadístico (1) y los minerales indicados en agua para ovinos

Mineral	Fc ¹	Pr>F ²
Cu	0.19	0.6822
Zn	0.01	0.9417
Fe	1.35	0.3106
Ca	162.08	0.0002
Mg	19.82	0.0112
Na	16.85	0.0148
K	78.64	0.0009
Cd	1.03	0.3682
Pb	0.63	0.4719
Ni	21.04	0.0101
pH	0.22	0.6611

¹Valor de F calculada; ²Nivel de significancia

La varianza entre Unidades de Producción no fue significativa para ningún elemento analizado en agua ($p > 0.05$; Cuadro 19). Las concentraciones obtenidas se encuentran por debajo del nivel máximo recomendado en agua para animales, excepto para Na y K donde las concentraciones encontradas rebasaron el límite superior según el criterio de Socha, Tomlinson, & Zinpro Corporation (2003; Cuadro 18).

Cuadro 18. Concentración mineral (mg L^{-1}) en agua para ovinos del municipio de Tula de Allende, Hidalgo.

Mineral	Suelos regados con agua residual		Suelos regados con agua limpia				NM ¹
	UP 1	UP 2	UP 3	UP 4	UP 5	UP 6	
Cu	0.02	0.03	0.03	0.04	0.01	0.02	0.2
Zn	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	5
Fe	0.10	0.11	0.10	0.12	0.06	0.03	0.2
Ca	89.36	88.15	26.71	25.02	27.08	38.54	100
Mg	23.35	23.61	5.57	4.25	10.76	13.78	50
Na	109.28	159.97	58.65	51.16	75.55	67.13	50
K	23.15	24.62	5.41	7.53	8.23	10.10	20
Cd	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005	0.005	0.01
Pb	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012	0.011	0.05
Ni	0.011	0.010	0.008	0.008	0.008	0.009	0.25
pH	7.47	7.25	7.27	7.30	7.46	7.18	6-8.5

¹Niveles máximos aceptables en agua de bebida para ganado (Socha, Tomlinson, DeFrain, & Zinpro Corporation, 2003)

Cuadro 19. Límites de confianza y significancia para σ_{UP}^2 en diversas variables en agua para ovinos

Mineral	Estimación σ_{UP}^2	CL	CU	Significancia
Cu	0.000146	-0.00007	0.000360	NS
Zn	0.000116	-0.00006	0.000288	NS
Fe	0.000978	-0.00068	0.002638	NS
Ca	19.1786	-21.8417	60.1990	NS
Mg	14.0507	-6.6366	34.7380	NS
Na	305.45	-261.02	871.91	NS
K	2.5763	-3.4767	8.6292	NS
Cd	2.777E-8	ND	ND	NS
Pb	7.434E-8	ND	ND	NS
Ni	4.528E-8	ND	ND	NS
pH	-0.00369	-0.03152	0.02414	NS

CL=límite inferior; CU=límite superior

Para el caso de un cordero en engorda consumiendo 2 L de agua diarios con $159.97 \text{ mg kg}^{-1}$ de Na, que fue el valor más alto encontrado en este estudio, el aporte de Na cubre más del 50% de su requerimiento diario. El exceso de un elemento puede reducir el consumo de materia seca teniendo efectos negativos en el comportamiento productivo o afectar la concentración de otros minerales en agua (Socha, Tomlinson, DeFrain, & Zinpro Corporation, 2003).

La concentración de Cd y Ni estuvieron por debajo del límite recomendado para agua de bebida. La concentración de Pb fue superior al valor adecuado, y no se encontraron diferencias significativas entre Unidades de Producción ($p > 0.05$; Cuadro 19). El Pb en el agua potable puede ser una preocupación, debido a que el agua puede recoger Pb de conexiones de servicio, tuberías, soldadura y accesorios de latón ya que la soldadura que se utilizó en las tuberías antes de 1930 contenía Pb (Socha, Tomlinson, DeFrain, & Zinpro Corporation, 2003).

En la mayoría de las aguas terrestres y superficiales, los niveles de Pb son bajos porque forman carbonatos, sulfatos y fosfatos que tienen baja solubilidad en agua. Gran parte del Pb iónico restante se une a la materia orgánica y se puede eliminar con la purificación del agua (NRC, 2005).

En la Figura 5 se muestra la concentración de Cu, Zn y Fe en agua para ganado por Unidad de Producción (UP), en la UP 1 y 2 se hace uso de agua residual para riego, pero no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$). En la Figura 6 se muestra la concentración de Ca, Mg, Na y K por UP. Se encontró que la mayor concentración de estos cationes estuvo asociada al tipo de riego. En la Figura 7 se muestra la concentración de Cd, Pb y Ni, no hubo diferencias significativas entre Unidad de Producción para Cd y Pb ($p > 0.05$). La concentración de Ni fue significativa y se encontraron niveles altos en las UP 1 y 2 ($p > 0.05$).

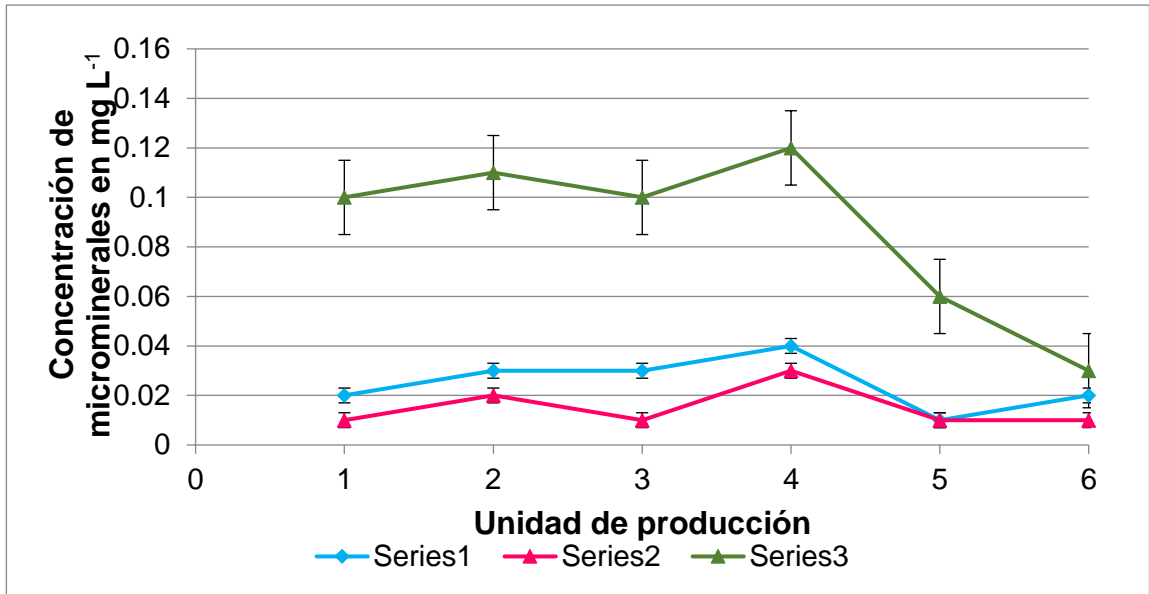


Figura 5. Concentración de Cu, Zn y Fe en fuentes de agua para el rebaño por Unidad de Producción

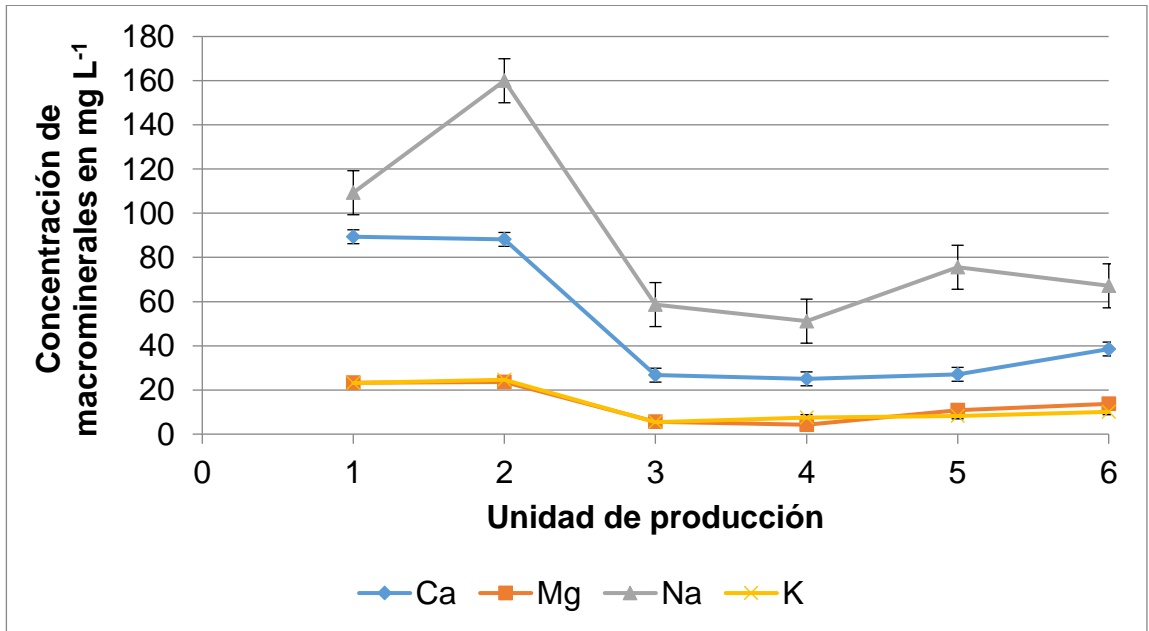


Figura 6. Concentración de Ca, Mg y K en fuentes de agua para el rebaño por Unidad de Producción

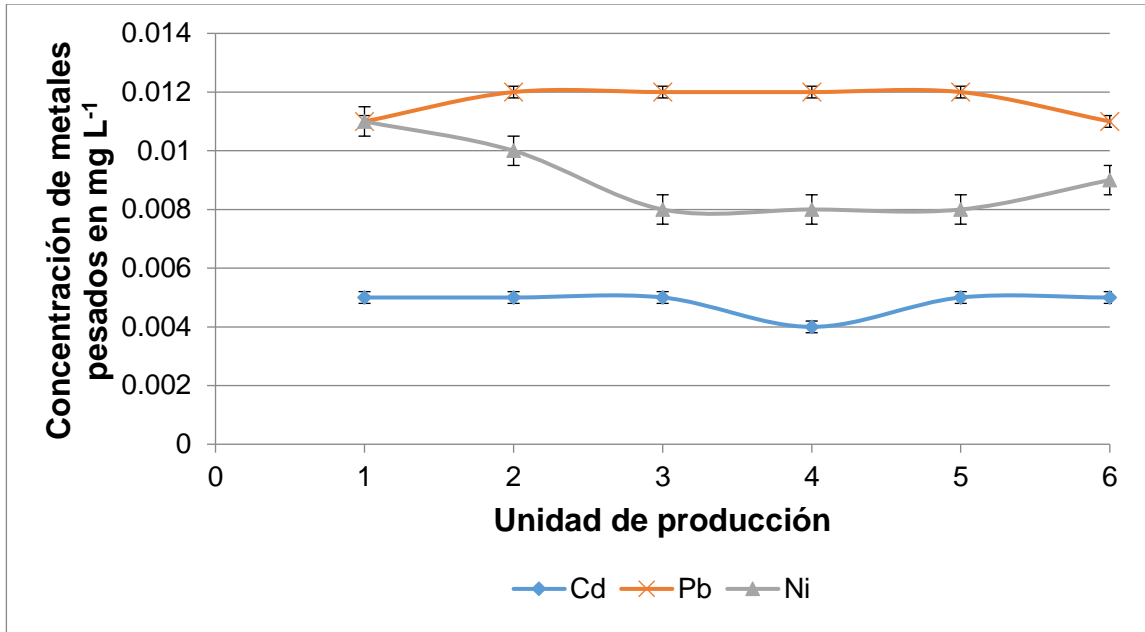


Figura 7. Concentración de Cd, Pb y Ni en fuentes de agua para el rebaño por Unidad de Producción

3.5.3 Concentración mineral en forraje

La fuente de forraje varió en cada Unidad de Producción, las fuentes principales de pasturas fueron rastrojo de maíz y alfalfa. Es frecuente que los agricultores de las Unidades de Producción que usan riego con aguas limpias abastezcan el déficit de forraje comprándolo en Tula, donde probablemente los cultivos sean irrigados con agua residual de la presa Endhó. La varianza de la concentración mineral en rastrojo de maíz entre Unidades de Producción no fue significativa ($p > 0.05$; Cuadro 21).

Las concentraciones de los todos elementos analizados en rastrojo de maíz fueron elevadas. La concentración de Cu excede el nivel para cubrir los requerimientos de corderos en engorda según el NRC (2007). Las concentraciones de Fe, Mg, Na y K cubren los niveles recomendados para ovinos en crecimiento. En la mitad de las muestras de rastrojo de maíz analizadas el Zn y P fueron suficientes para cubrir los requerimientos minerales de los corderos (Cuadro 20).

Cuadro 20. Concentración mineral (mg kg⁻¹) en rastrojo de maíz regado con agua residual

	UP 1	UP 4	UP 5	UP 6	NRC ¹
Cu	21.93	16.88	16.69	17.27	5.6
Zn	40.58	26.75	55.49	26.74	30.45
Fe	422.37	218.26	235.86	109.77	67.35
Ca	1345.98	1739.19	5893.36	669.97	4100
Mg	1486.23	2078.63	2579.50	1127.81	1000
Na	3272.27	668.23	1229.82	805.29	600
K	9401.07	8752.27	21252.38	7579.54	4400
P	3611.16	2516.55	5916.77	2106.36	2900
Cd	0.154	0.139	0.093	0.101	0.05-5*
Pb	4.907	7.024	7.675	5.268	0.5-10*
Ni	9.515	9.455	9.3800	8.883	1-10*

¹ Nivel mínimo para cubrir los requerimientos de corderos estabulados en crecimiento y engorda (NRC, 2007)

* Nivel de concentración tolerable en forraje (Kabata-Pendias, 2004)

+No se detectó la concentración de Mo en forraje

Cuadro 21. Límites de confianza y significancia para el componente de varianza σ_{UP}^2 en diversos minerales determinados en rastrojo de maíz

Mineral	Estimación σ_{UP}^2	CL	CU	Significancia
Cu	-17.5058	-51.9669	16.9554	NS
Zn	175.43	-126.06	476.92	NS
Fe	15432	-11596	42461	NS
Ca	4956793	-4016656	13930241	NS
Mg	353743	-309478	1016963	NS
Na	1280338	-1074115	3634791	NS
K	40039463	-2.515E7	1.0523E8	NS
P	2913806	-1757394	7585007	NS
Cd	0.000843	-0.00055	0.002232	NS
Pb	1.6564	-1.2262	4.5390	NS
Ni	0.06763	-0.06752	0.2028	NS

CL=límite inferior; CU=límite superior; NS=no significativo

En el Cuadro 22 se muestra que, a excepción del Zn, los elementos minerales encontrados en la alfalfa son suficientes para cubrir los requerimientos de corderos en crecimiento (NRC, 2007). No se encontraron diferencias significativas entre Unidad de Producción ($p \geq 0.05$; Cuadro 23). Los resultados indican que la alfalfa contiene elevada cantidad de Ca, K y P.

Cuadro 22. Concentración mineral (mg kg⁻¹) en alfalfa regada con agua residual

	UP 1	UP 2	UP 4	UP 6	NRC ¹
Cu	15.21	11.82	16.26	17.35	5.6
Zn	31.09	24.05	28.30	14.35	30.45
Fe	880.81	162.48	180.84	214.82	67.35
Ca	11376.82	7755.81	8114.85	8007.56	4100
Mg	3132.61	2662.67	3633.36	2668.22	1000
Na	3021.73	3180.10	2458.03	2877.15	600
K	34017.46	20241.57	29720.99	26855.39	4400
P	8366.46	5847.38	6980.70	6360.16	2900
Cd	0.139	0.070	0.147	0.151	0.05-5*
Pb	9.099	4.259	7.425	7.127	0.5-10*
Ni	11.370	9.109	11.407	13.182	1-10*

¹ Nivel mínimo para cubrir los requerimientos de corderos estabulados en crecimiento y engorda (NRC, 2007)

* Nivel de concentración tolerable en forraje (Kabata-Pendias, 2004)

+No se detectó la concentración de Mo en forraje

Cuadro 23. Límites de confianza y significancia para σ_{UP}^2 en diversas variables en alfalfa

Mineral	Estimación σ_{UP}^2	CL	CU	Significancia
Cu	4.1626	-5.2239	13.5491	NS
Zn	49.9102	-36.1393	135.96	NS
Fe	118993	-74898	312885	NS
Ca	2302590	-2488769	7093950	NS
Mg	73340	-319508	466189	NS
Na	-857224	-2187277	472829	NS
K	29732404	-2.404E7	83501848	NS
P	1048258	-858090	2954606	NS
Cd	0.001438	-0.00090	0.003771	NS
Pb	3.9320	-2.5303	10.3943	NS
Ni	2.7737	-1.6833	7.2306	NS

*=significativo con $\alpha=0.05$; NS=no significativo; CL=límite inferior; CU=límite superior

La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie y madurez vegetal. Los metales se transfieren del suelo a las plantas, dependiendo de la especiación química, pH del suelo, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, contenido de arcilla, carbonatos y potencial redox.

Las plantas hacen uso de mecanismos que les permiten continuar con sus funciones vitales en suelos contaminados, entre éstos se pueden considerar la

dilución de las sales o la eliminación de estas últimas a través de glándulas o tricomas secretores, absorción selectiva de iones por las raíces, restricción del transporte hacia órganos vitales, entre otros (Quintana, Sanabria, Ojeda, & Valera, 2012).

Los forrajes presentaron niveles de Zn por debajo del requerimiento para ovinos en crecimiento. En general, las concentraciones encontradas de Cu en las fuentes de forraje muestreadas fueron superiores respecto de las reportadas por Domínguez Vara, y otros, (2007) en la región de Toluca (15.64 vs 13.47 mg kg⁻¹) y superan el límite máximo para ovinos (Figura 8). Asimismo, las concentraciones de Na, K y P (NRC, 2007; Figura 9).

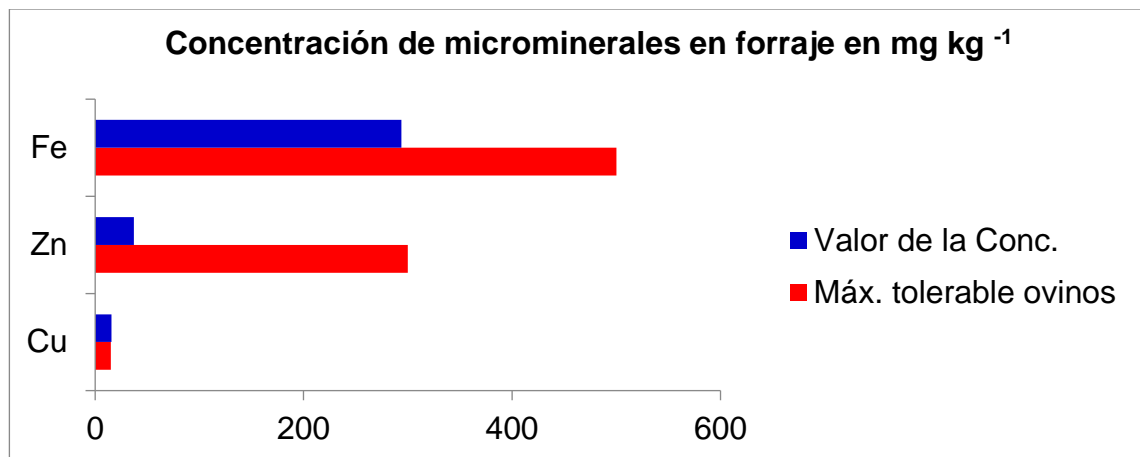


Figura 8. Concentración mineral promedio de Fe, Zn y Cu en forrajes irrigados con agua residual

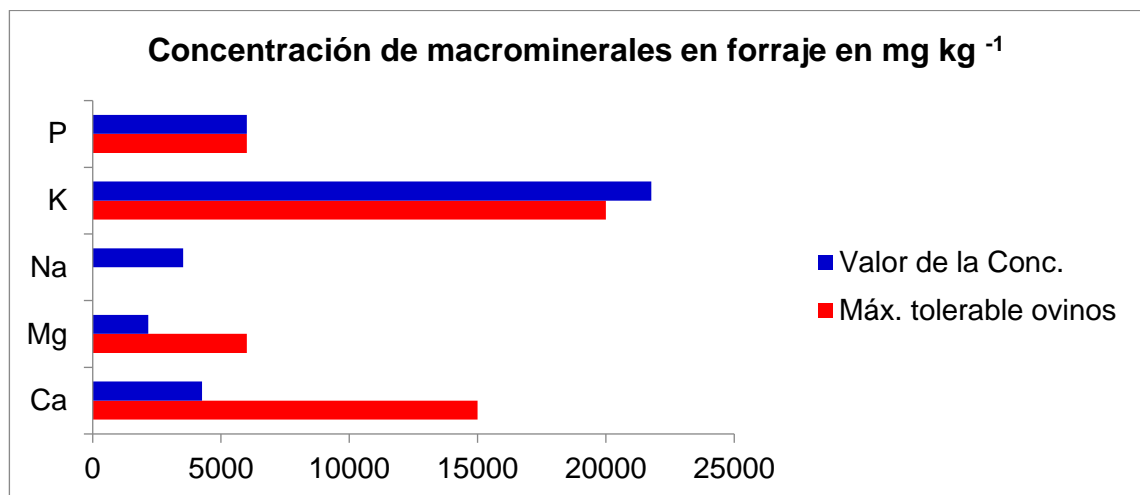


Figura 9. Concentración promedio de P, K, Na, Mg y Ca en forrajes irrigados con agua residual

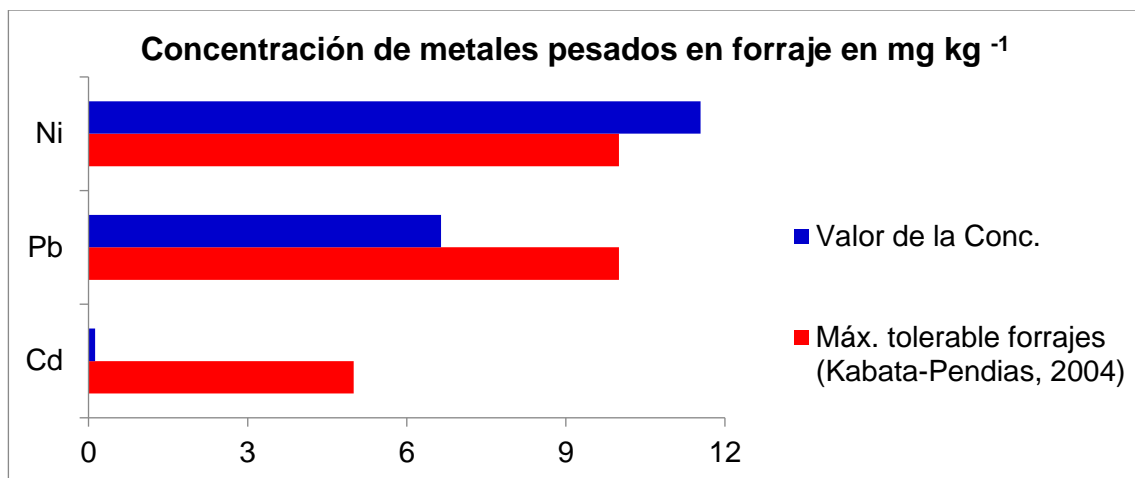


Figura 10. Concentración promedio de Ni, Pb y Cd en forraje irrigado con agua residual

3.5.4 Concentración mineral en suero sanguíneo

Las crías tuvieron mayor concentración de Zn, Ca, Mg y P ($p \leq 0.05$; Cuadro 24), mientras que las concentraciones de Cu, Fe, Na y K fueron similares en ambos grupos ($p \geq 0.05$; Cuadro 24). La mayor concentración de Zn se obtuvo en corderos, esto puede explicarse a la capacidad de los animales lactantes para absorber más Zn (ARC, 1980). La deficiencia de Zn puede manifestarse debido a que existe cierto antagonismo entre la absorción de Fe y Zn, este antagonismo es dependiente del compuesto de hierro utilizado, y también ocurre con dietas ricas en Cd.

Cuadro 24. Significancia en la prueba de igualdad de efectos fijos (modelo 3) para el factor Tipo de animal

Mineral	Fc	Pr>F = $\hat{\alpha}$
Cu	0.09	0.7695
Zn	16.22	0.0001
Fe	1.31	0.2568
Ca	41.08	<.0001
Mg	10.32	0.0019
Na	2.28	0.1350
K	0.01	0.9407
P	13.21	0.0005

En el cuadro anterior Fc representa el estadístico de prueba y Pr>F es el nivel de significancia estimado.

Las crías tuvieron mayores concentraciones de Ca (Cuadro 24). La mayor concentración de Ca en corderos se justifica porque la leche es un alimento rico en este mineral (829 mg kg⁻¹; Sanz Sampelayo, y otros, 2003). Las concentraciones de Ca y Mg se encontraron adecuadas en madres y crías de acuerdo con el nivel recomendado por Puls (1988). No así, para Na, K y P cuyas concentraciones fueron mayores a los niveles adecuados (Cuadro 25), esto podría explicarse porque las concentraciones en alfalfa regada con agua residual excedieron los requerimientos recomendados para ovinos en crecimiento (NRC, 2007).

La concentración sérica de Cu fue deficiente, aún y cuando se encontró que los forrajes superaron el límite máximo tolerable para ovinos (Cuadro 25). El Cu es el elemento que más antagonistas tiene con respecto a la absorción. El Mo y S son sus principales antagonistas. Las bacterias presentes en la cámara fermentativa tienen la capacidad de sintetizar tiomolibdatos a partir de Mo y S. Y tienen un efecto de interferencia cuando en el torrente sanguíneo se enlazan a Cu. Otros elementos que causan interferencia con la absorción adecuada de Cu son Zn, Fe, Ca y Cd (Quiroz-Rocha & Bouda, 2001).

Entre los síntomas asociados a la deficiencia de Cu están: anemia, pobre fertilidad, mala estructura de la lana y despigmentación de pelo, claudicación, ataxia, diarrea, predisposición a enfermedades infecciosas, afecciones cardiovasculares, crisis hemolítica, úlceras abomasales, poliencefalomalacia, mala condición corporal y fallas en el crecimiento, y como suma de los síntomas anteriores, la muerte súbita (Quiroz-Rocha & Bouda, 2001).

Cuadro 25. Concentración mineral (mg L⁻¹) en suero sanguíneo de ovinos del municipio de Tula de Allende, Hidalgo

	UP 1	UP 2	UP 3	UP 4	UP 5	UP 6	Valor adecuado ¹
Cu	0.60	0.64	0.83	0.66	0.58	0.54	0.8-1.5
Zn	0.42	0.45	0.49	0.51	0.34	0.41	0.8-1.4
Fe	2.67	2.06	1.88	1.80	1.64	2.20	1.3-2.5
Ca	78.06	94.10	95.44	100.63	122.34	112.34	80-110
Mg	19.55	18.24	21.30	20.57	21.94	20.28	20-35
Na	4112.34	4048.90	3615.13	3526.74	4367.86	4256.97	3105-3450
K	220.28	225.06	222.18	229.80	245.30	246.49	160-200

P	93.20	64.37	78.02	74.14	81.31	76.35	40-80
---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

¹Rangos de niveles adecuados en suero sanguíneo sugeridos por Puls (1988)

La homeostasis del fósforo está estrechamente regulada por el eje HPT/vitamina D/FGF-23 en los individuos con una función renal normal. El incremento en la secreción de la HPT y el FGF-23 ayuda a mantener las concentraciones de fósforo en el suero en el rango normal, aún y cuando existe una alta ingesta de fósforo.

El exceso de electrolitos puede alterar las funciones del cuerpo, el exceso de Na dietario puede inducir edema; el exceso de K puede inducir disturbios en el balance ácido-base, hiperkalemia y fallo cardiaco. Consumos altos de fósforo predisponen a los animales a desarrollar cálculos urinarios, pero su aparición es más probable en rumiantes que comen dietas altas en concentrados (Suttle, 2010).

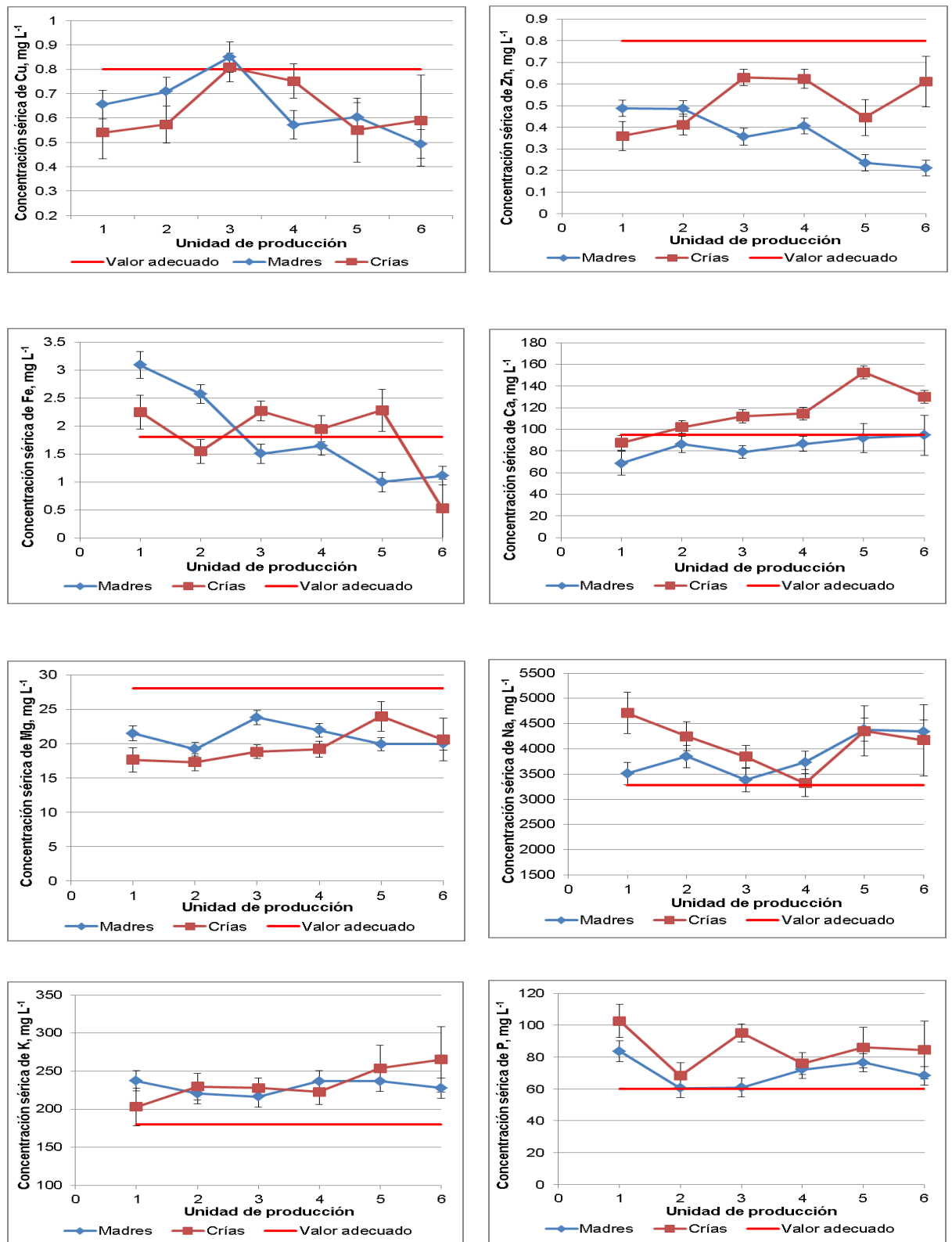
Entre las unidades de producción no se encontró diferencia significativa en la concentración mineral en suero ($p \geq 0.05$; Cuadro 26). En caso de existir, las diferencias en la concentración sérica pueden atribuirse a los mecanismos homeostáticos que regulan el contenido corporal dentro de un rango de ingestas, siendo los problemas más comunes los excesos de ingesta o los debidos a las patologías donde fallan los mecanismos reguladores (NRC, 1980).

Cuadro 26. Límites de confianza y significancia para el componente de varianza σ_{UP}^2 en diversos minerales determinados en suero sanguíneo

Mineral	Estimación σ_{UP}^2	CL	CU	Significancia
Cu	0.009143	-0.00546	0.02375	NS
Zn	0.006379	-0.00250	0.01526	NS
Fe	0.1939	-0.05823	0.4459	NS
Ca	79.3657	-45.4575	204.19	NS
Mg	0.6403	-0.9452	2.2259	NS
Na	96611	-67112	260333	NS
K	-89.2090	-122.18	-56.2413	NS
P	49.1952	-42.9594	141.35	NS

*=significativo con $\alpha=0.05$; NS=no significativo; CL=límite inferior; CU=límite superior

Figura 11. Concentración mineral en suero sanguíneo (madres y crías) y Unidad de Producción



3.5.4 Concentración mineral en riñón

Las muestras de riñones presentaron deficiencias de Cu y Zn. La desviación estándar es mayor para Zn y las causas no pueden ser determinadas con claridad, pues se desconoce el origen exacto de las muestras y si los animales fueron alimentados con pasturas regadas con agua residual o limpia. La deficiencia marginal de Zn puede ser importante en áreas contaminadas con metales pesados. Las concentraciones de Hg en hígado y riñón incrementaron de 2 a 3 veces cuando el Zn de la dieta fue restringido de 40 a 6 mg/kg⁻¹ (Suttle, 2010).

Las interacciones entre minerales usualmente tienen efectos negativos, pero también pueden ser benéficas, por ejemplo, pequeñas cantidades suplementadas de cobre pueden mejorar la utilización del hierro, pero suplementado a altas concentraciones puede incrementar los requerimientos de hierro (Suttle, 2010).

Las concentraciones de Fe, Mg, K en riñón fueron adecuadas mientras que para Na y P se encontraron elevadas. Las concentraciones de Na varían mucho de acuerdo con el tipo de suplementación mineral, si ésta se lleva a cabo, es frecuente entre los productores dar sal común a los ovinos. En este estudio, el suelo, agua y forraje presentaron exceso en la concentración de Na. Asimismo, el suero sanguíneo superó el valor adecuado para este elemento (Puls, 1988), esto podría estar relacionado con la alta concentración que se encontró en riñón.

El Ca se encontró por debajo del nivel adecuado en riñón. Los sitios de almacenamiento para Ca principalmente son los huesos y esto pudo estar asociado a los niveles bajos que se hallaron en este órgano. Los casos opuestos son encontrados en ovejas alimentadas con avena dorada que contiene altas concentraciones de vitamina D3 causando calcificación del riñón (Suttle, 2010).

Las concentraciones de Cd, Pb y Mo se mantuvieron dentro de los límites aceptables en riñón, excepto para Ni, cuyo valor es mayor al adecuado según Puls (1988). En el Cuadro 27 se muestran los estadísticos descriptivos para las

concentraciones minerales y el valor adecuado en riñón. En la Figura 12, las concentraciones minerales se presentan en gráficos box-plot.

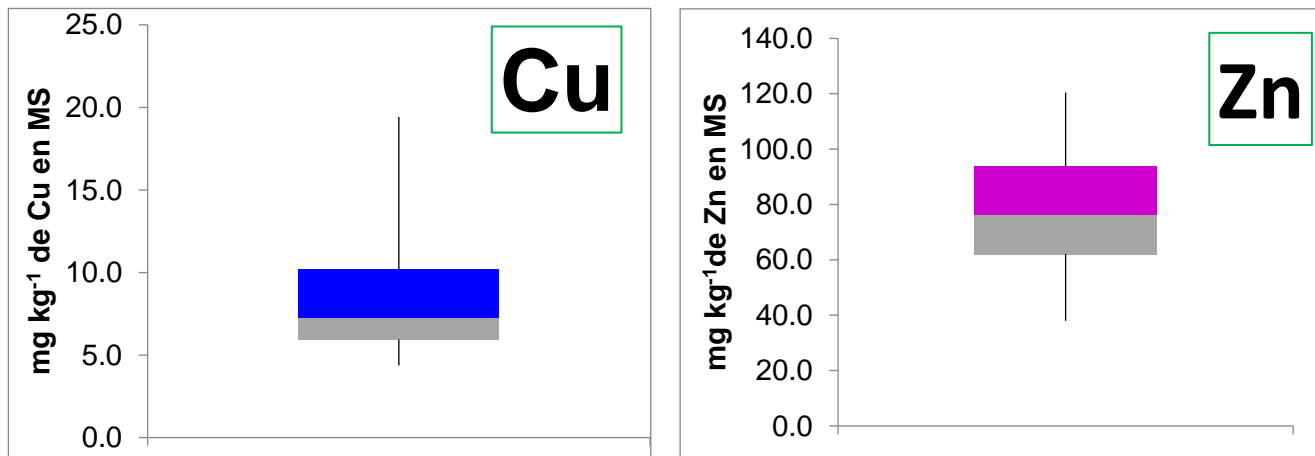
Cuadro 27. Estadísticos descriptivos para la concentración mineral (mg kg^{-1}) en muestras de riñón

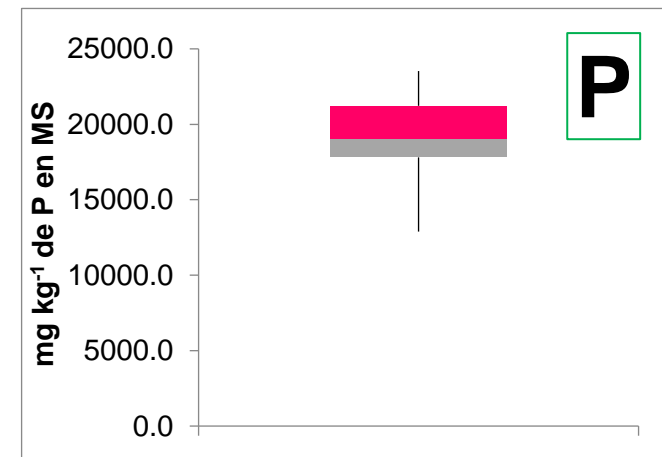
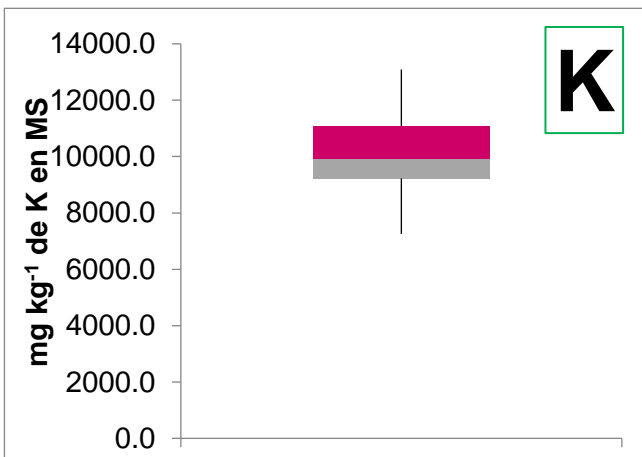
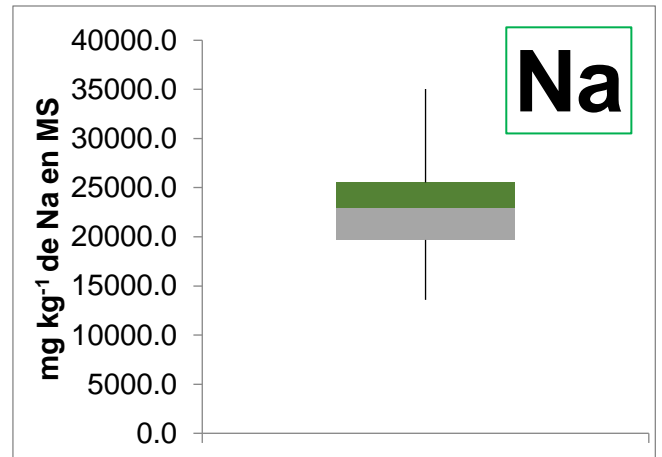
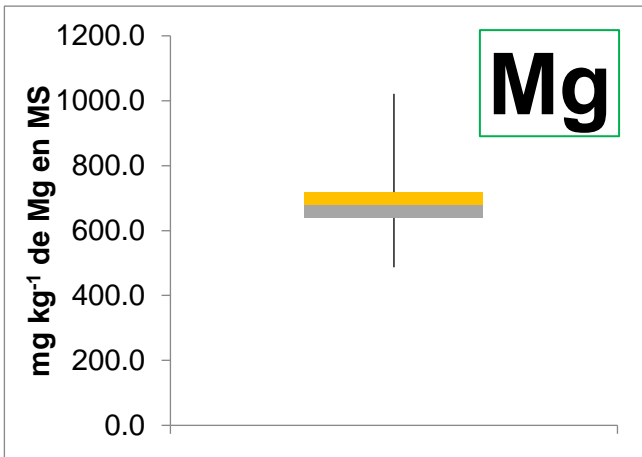
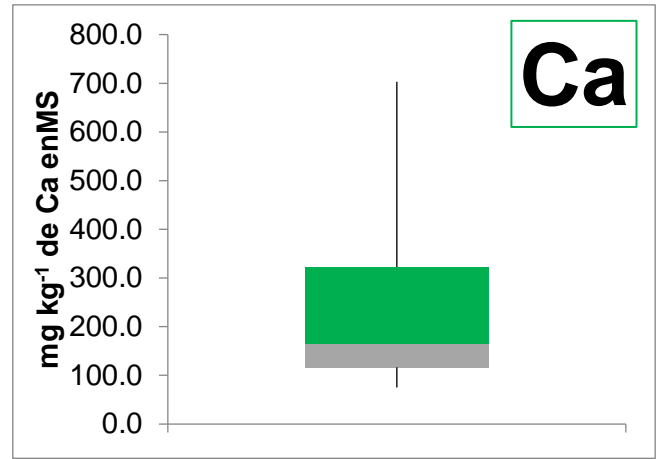
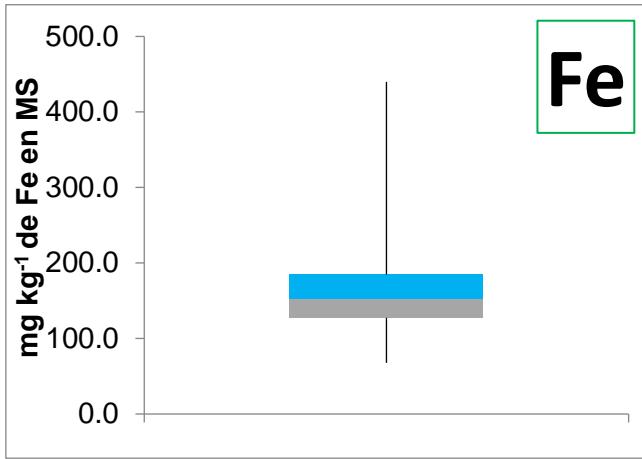
	Mínimo	Máximo	Promedio	Dev Std ¹	Coef Var ²	Valor adecuado ³
Cu	4.36	19.42	8.59	3.83	14.57	22-31
Zn	37.97	120.45	79.54	22.49	28.28	109-219
Fe	67.74	439.87	164.57	62.72	38.11	164-1093
Ca	75.18	703.05	227.24	158.31	69.67	328-765
Mg	486.97	1021.45	682.56	85.53	12.53	601-1257
Na	13582.36	35039.59	23018.72	4706.81	20.45	11749
K	7255.33	13092.22	10221.62	1331.21	13.02	15301
P	12889.83	23528.54	19351.04	2417.11	12.49	8197-17760
Cd	0.10	0.98	0.419	0.26	63.50	0.32-2.62
Pb	1.04	2.62	1.671	0.347	20.74	0.54-4.37
Mo	0.20	3.34	1.47	0.75	51.11	1.5-1.6
Ni	0.44	4.28	1.081	0.78	72.25	0.17-0.40

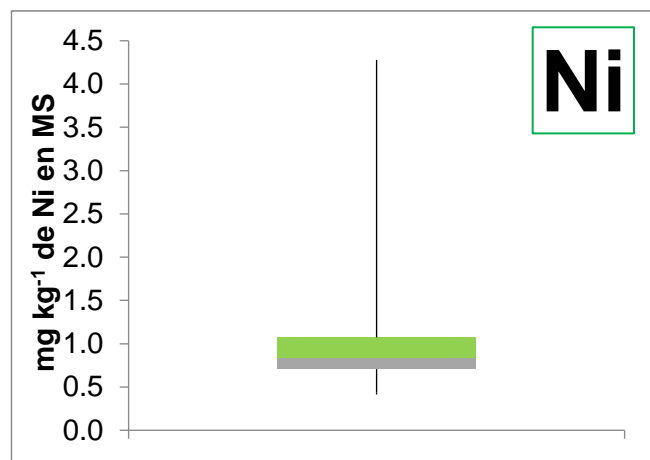
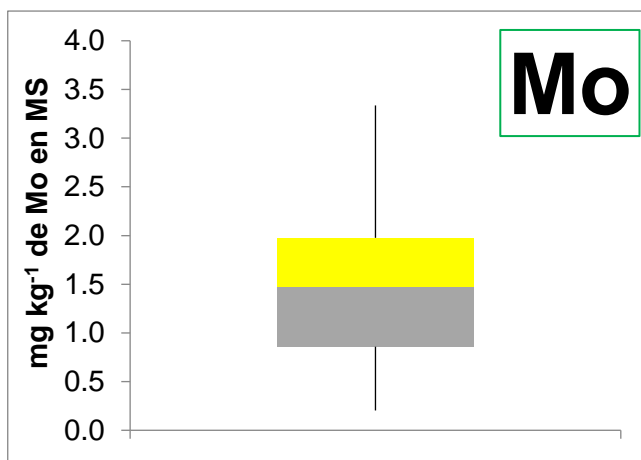
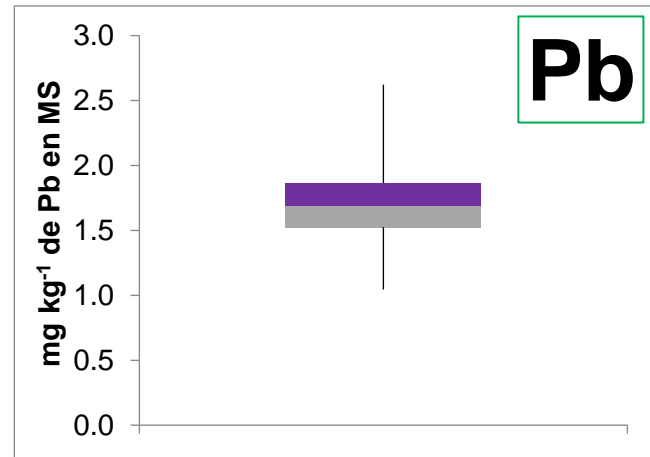
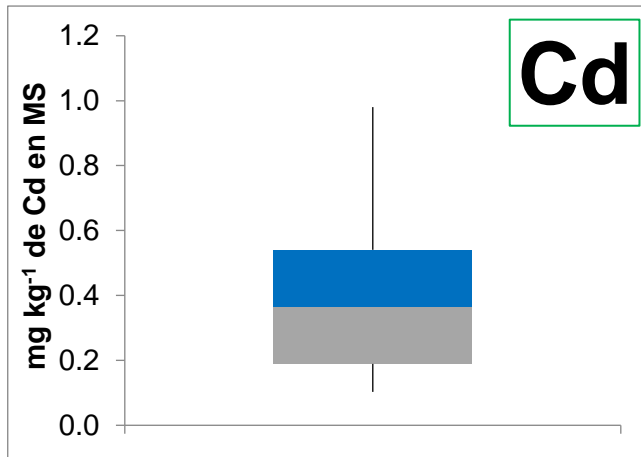
¹Dev Std: desviación estándar; ²Coef Var: coeficiente de variación; ³Puls (1988)

+Los resultados se presentan en materia seca

Figura 12. Gráficos box-plot para la concentración mineral en riñón







3.5.5 Concentración mineral en hígado

De los tejidos del cuerpo, hueso e hígado son los más comúnmente muestreados porque sirven como sitios de almacenamiento para varios minerales y las técnicas para obtenerlos pueden realizarse mediante una biopsia para el caso del hígado. Bajas concentraciones de Fe y Cu en el hígado indican carencia en la dieta o agotamiento de esos elementos (Suttle, 2010).

Los rumiantes en su mayoría tienen una alta capacidad de almacenaje de Cu en hígado, a excepción de los borregos, que tienen una alta predisposición de sufrir intoxicación con Cu. Esto se debe a que su capacidad de síntesis de metalotioneínas (proteínas que retienen al Cu y otros metales en el hepatocito) en hígado es baja (Quiroz-Rocha & Bouda, 2001).

Uno de los cuadros clínicos aunados a la deficiencia severa de cobre son las muertes repentinas, que se presentan generalmente después de un ejercicio o excitación leve, atribuido a la insuficiencia cardíaca aguda y debido a la degeneración lenta y progresiva del miocardio con fibrosis de reemplazo. La concentración de Cu en hígado es extremadamente baja en animales afectados (2.03 mg kg^{-1} de materia seca; Suttle, 2010).

Normalmente la evaluación del estado de Cu en el organismo se realiza mediante la determinación del Cu en el plasma o suero sanguíneo. Sin embargo, en muchas ocasiones este método es poco fiable, debido a que, en ocasiones, animales con deficiencia de Cu pueden tener cupremias dentro del rango, ya que los tejidos en donde normalmente se acumula siguen enviando sus reservas a la circulación. Asimismo, animales con intoxicación crónica por Cu pueden tener acumulación excesiva en el hígado y los niveles en suero pueden estar dentro del rango de referencia (Quiroz-Rocha & Bouda, 2001).

El cobre transportado al hígado se almacena en los hepatocitos donde es captado por las metalotioneinas o se incorpora a varias cuproenzimas. Las metalotioneinas cargadas de cobre son almacenadas en los lisosomas de los hepatocitos, evitando de esta manera la toxicidad propia del metal libre ionizado. Cuando es necesitado, el cobre es de nuevo incorporado a la ceruloplasmina y excretado al plasma.

Cuando las reservas de Cu en hígado se acercan al agotamiento o no se puede movilizar lo suficientemente rápido para cumplir con el déficit en el suministro, el cobre en plasma cae por debajo de lo normal. El cobre en sangre muestra una disminución más lenta porque todavía queda una porción de cobre contenido en los eritrocitos.

Descrito lo anterior, se especulaba que en este estudio, la deficiencia de Cu en suero fuera atribuida a concentraciones altas en hígado, no obstante, elementos antagonistas de Cu pueden ser el origen de la deficiencia generalizada que se encontró en suero plasmático.

Las concentraciones de Mg, Na y K se encontraron por debajo del valor recomendado por Puls (1988), Fe y Ca se encontraron adecuados, mientras que la concentración de P en hígado fue elevada. Schnewille, Klooster, & Beynen (1994) encontraron que consumos altos de fósforo en la dieta redujeron la absorción de Mg.

En las muestras de hígado se detectó la presencia de Cd, Pb, Mo y Ni, aunque estos se encontraron en valores inferiores al límite de toxicidad a excepción de Ni, cuya concentración superó el valor adecuado. De igual manera, la concentración de Ni en alfalfa se encuentra en concentraciones riesgosas.

El hígado es el principal sitio de almacenamiento de metales pesados, a pesar que en este estudio las concentraciones reportadas no superan el valor adecuado en animales, esto no significa que no representen riesgos de salud para el humano, ya que si el consumo de alimentos contaminados es constante, los efectos tóxicos de los metales pesados serán visibles a largo plazo, en contraste con los ovinos, cuya ciclo de vida es relativamente corto. En el Cuadro 28 se presentan los estadísticos descriptivos para muestras de hígado.

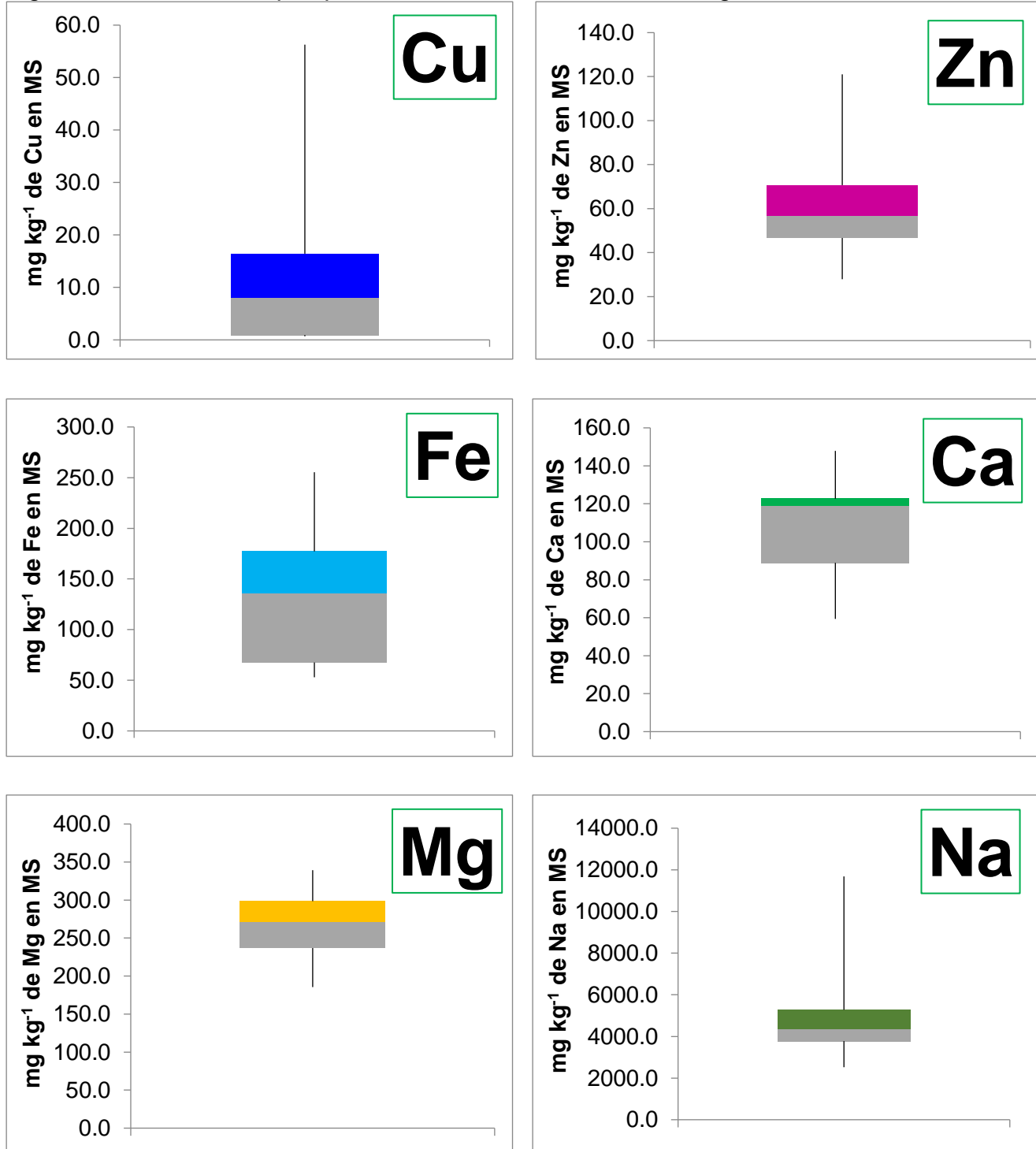
Cuadro 28. Estadísticos descriptivos para la concentración mineral en mg kg⁻¹ en muestras de hígado

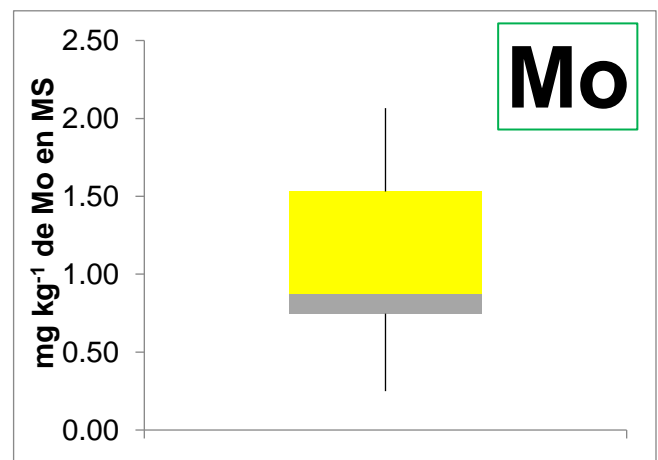
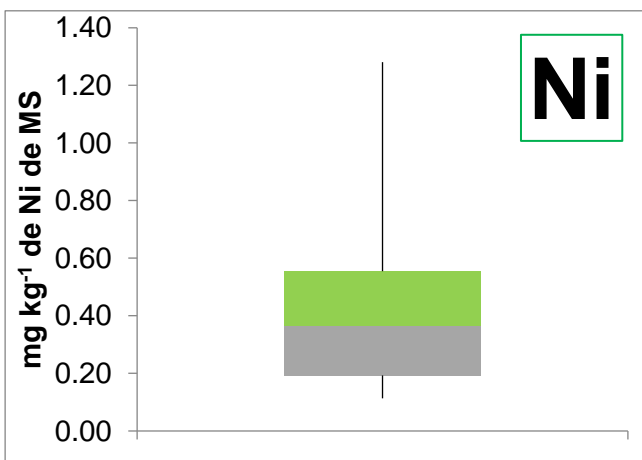
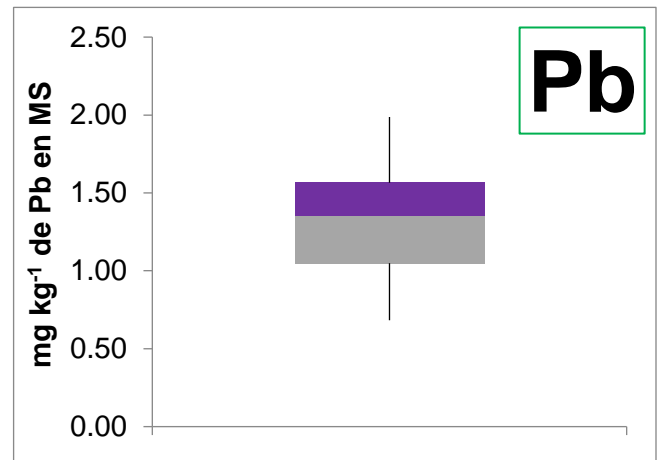
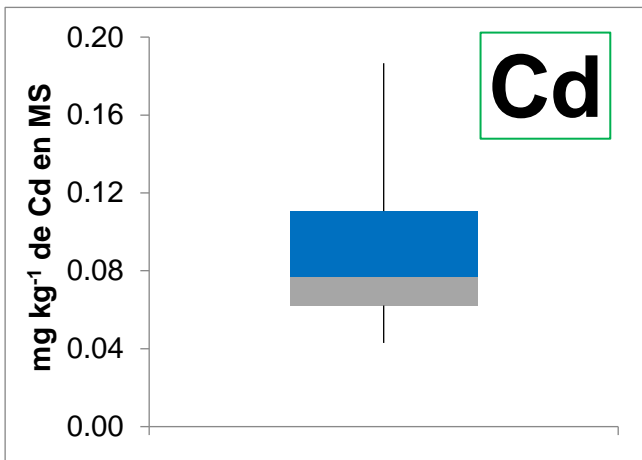
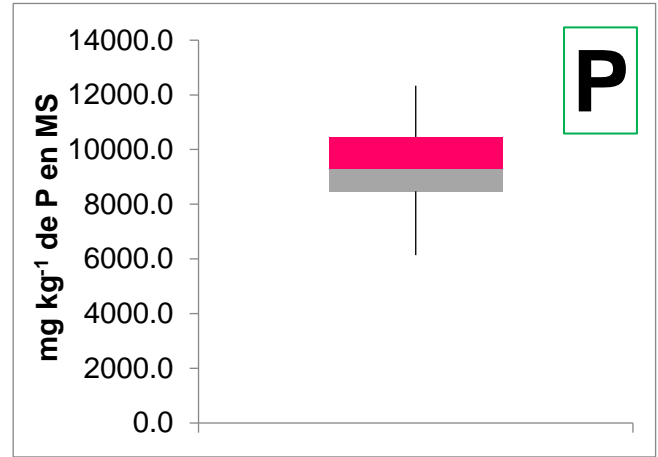
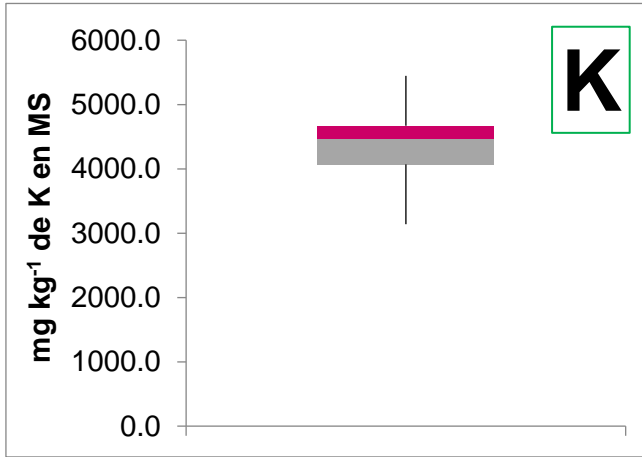
	Mínimo	Máximo	Promedio	Dev Std ¹	Coef. Var ²	Valor adecuado ³
Cu	0.69	19.85	7.00	7.53	107.64	74-297
Zn	27.91	121.04	60.51	23.66	39.09	89-223
Fe	52.94	255.36	132.02	67.71	51.29	89-890
Ca	59.38	147.88	109.97	24.86	22.60	112-237
Mg	185.50	339.27	265.11	46.67	17.61	350-594
Na	2521.19	11683.96	5195.26	2691.68	51.81	5935-11869
K	3139.35	5446.37	4388.96	591.88	13.49	6602-6899
P	6139.30	10565.95	8698.66	1448.06	16.65	5193-8309
Cd	0.040	0.190	0.091	0.045	49.20	0.05-4.15
Pb	0.68	1.99	1.324	0.409	30.91	0.08-2.37
Mo	0.25	2.07	1.087	0.595	54.73	1.5-6.0
Ni	0.11	1.28	0.446	0.333	74.69	0.05-0.07

¹Dev Std: desviación estándar; ²Coef. Var: coeficiente de variación; ³Puls (1988)

+Los resultados se presentan en materia seca

Figura 13. Gráficos box-plot para la concentración mineral en hígado





3.6 Conclusiones

La concentración de metales pesados y nutrimentales en el rebaño ovino depende de la calidad del agua usada para regar el forraje ofrecido. El riego de forrajes con agua residual se asocia con desbalances de minerales en el rebaño ovino; producto de las interacciones entre los metales pesados y nutrimentales y de las altas concentraciones en suelo, agua y forraje. El agua para consumo del rebaño supera los límites de concentración máxima para sodio, potasio y plomo. Los forrajes presentan elevadas cantidades de cobre, sodio, potasio y fósforo. La concentración de cadmio y plomo se mantiene en el límite de concentración tolerable, mientras que el valor de níquel se encuentra en niveles tóxicos. En suero sanguíneo, tanto hembras como crías tienen carencia de cobre y una severa deficiencia de zinc, y presentan exceso de hierro, sodio, potasio y fósforo. La presencia de cadmio, plomo, níquel y molibdeno en hígado y riñón se encuentra por debajo del nivel tóxico, excepto en riñón donde el nivel de níquel supera el valor adecuado. Al igual que en suero sanguíneo, las vísceras contienen cantidades marginales de cobre y zinc.

3.7 Literatura citada

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentasti, E., Sarzanini, C., & Barberis, R. (2002). Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environmental Pollution*, 119(2), 177-193.
- Arbelo, C., Mora, J., Rodríguez Rodríguez, A., Guerra, J., & Armas, C. (2006). Salinidad y alcalinidad en suelos de las zonas áridas de tenerife (Islas Canarias). *Edafología*, 13(3), 171-179.
- ARC. (1980). The nutrients requirements of ruminant livestock. Commonwealth Agricultural Bureaux. (F. Royal, Ed.) págs. 184-185.
- Ayres, R., & Duncan, D. (1997). *Análisis de aguas residuales para su uso en la agricultura: manual de técnicas parasitológicas y bacteriológicas de laboratorio*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- Bach, A., & Devant, M. (2004). Microminerales en la nutrición del rumiante: aspectos técnicos y consideraciones legales. *XX Curso de especialización FEDNA*, (págs. 327-343). Barcelona.

- Bramley, R. (1990). Cadmium in New Zealand agriculture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 33, 505-519.
- Cameron, K., Buchner, V., & Tchounwou, P. (2011). Exploring the molecular mechanisms of nickel-induced genotoxicity and carcinogenicity: a literature review. *Reviews on environmental health*, 26(2), 81-92.
- Castellanos, J. Z. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas agrícolas, plantas y ECP* (Segunda ed.). Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola.
- CONAGUA. (1994). *Manual técnico para el uso, aprovechamiento y manejo de las aguas residuales en el riego agrícola*. México: Gerencia de reutilización de aguas-CNA Documento interno.
- Cuellar-Ordaz, J. A., García López, E., De la Cruz C., H. A., & Aguilar Niño, M. (2011). *Manual práctico para la cría ovina*.
- De la Isla de Bauer, M. (2002). *Deterioro/preservación ambiental y agricultura*. México.: Colegio de Posgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Programa de Hidrociencias.
- FAO. (2002). *NOM-021-RECNAT-2000: Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos*. México.
- Ferguson, J. (1990). *The heavy metals: chemistry environmental impact and health effects*. Great Britain, U.K.: Pergamon Press.
- Galván-Bobadilla, A., García-Escamilla, R., Gutiérrez-García, N., Mendoza-Magaña, M., & Rosiles-Martínez, R. (2005). Concentraciones de cadmio y zinc en tejido de cáncer prostático. *Revista Mexicana de Patología Clínica*, 52(2), 109-117.
- González-Quintero, L. (1968). *Tipos de Vegetación del Valle del Mezquital, Hidalgo*. D.F., México: Departamento de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Gregorich, E., Carter, M., Angers, D., Monreal, C., & Ellert, B. (s.f.). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal Soil Science*, 367-384.
- INEGI. (2012). *Panorama agropecuario en Hidalgo: Censo agropecuario 2007*. México.
- International Agency for Research on Cancer. (1993). Beryllium, cadmium, mercury, and exposures in the glass manufacturing industry. En *Evaluation of carcinogenic risk to humans* (Vol. 58).

- Jarup, L., Berglund, M., Elinder, C., Nordberg, G., & Vahter, M. (1998). Health effects of cadmium exposure-a review of the literature and a risk estimate. *Scandinavian Journal Work Environment Health*, 24(1), 1-51.
- Kabata-Pendias, A. (1984). *Trace elements in soils and plants*. Florida, Estados Unidos: Press Boca Raton .
- Kabata-Pendias, A. (2004). Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue. *Geoderma*, 122, 143-149.
- Kolonel, L. (1976). Association of cadmium with renal cancer. *Cancer*, 37(4), 1782-7.
- Kones, M. (1990). Molybdenum in human nutrition. *Journal of the National Medical Association*, 82(1), 32-56.
- López-Martínez, S., Gallegos-Martínez, M. E., Pérez Flores, L. J., & Gutiérrez Rojas, M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 21(2),91-100.
- McDowell, L., & Arthington, J. (2005). *Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales* (Cuarta ed.). Gainesville: Universidad de Florida.
- McDowell, L., Conrad, J., & Ellis, G. (1984). Mineral deficiencies and imbalances and their diagnosis. *Symposium on Herbivore Nutrition in Subtropics and Tropics: Problems and prospects*. South Africa.
- McDowell, R., Velázquez, J., & Valle, G. (1997). *Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales*. Gainesville, Florida, USA: Universidad de Florida.
- Mejía, B., Sánchez, B., Hernández, S., Flores, D., Villareal, L., & Guajardo, V. (n.d.). Metales pesados en maíz y alfalfa y su correlación con los extractables en suelos del DDR 063, Hidalgo. *I Simposio Nacional Degradación del Suelo*.
- Mejía-Chávez, A., & Jiménez Cisneros, B. (1995). *Evaluación de las condiciones de mezclado, punto de adición de coagulante y floculante en la eficiencia de un tratamiento primario avanzado*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Méndez-Batán, J. (2001). Metales pesados en alimentación animal. *XVII Curso de especialización FEDNA*.
- Méndez, M. A., M. P. Ricardo C., J. Pérez P. G. Hernández C. & O. Campos. (2006). Uso de las aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas en la agricultura urbana. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 15:17-21
- Mertz, W. (1986). *Trace elements in human and animal nutrition* (Quinta ed., Vol. 2). New York: Academic Press.

- Mesa, D. (2003). Obtención de plantas resistentes a la salinidad para los suelos salinos cubanos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 37(3), 217-226.
- Mills, C., & Dalgarno, A. (1972). Copper and zinc status of ewes and lambs receiving increased dietary concentration of cadmium. *Nature*, 239, 171-173.
- Mortada, W., Sobh, M., El-Defrawy, M., & Farahat, S. (2001). Study of lead exposure from automobile exhaust as a risk for nephrotoxicity among traffic policemen. *American Journal of Nephrology*, 21(4), 274-9.
- Mortvedt, J., Giordano, P., & Lindsay, W. (1983). *Micronutrientes en agricultura* (Primera ed.). México: AGT Editor S.A.
- Muñoz, E. A. (21 de 01 de 2014). Presa Endhó, inacabable foco de infección. *La Jornada*, págs. 1-5.
- Navarro, A., Alonso, I., & Moya, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en las plantas. *Ecosistemas*, 16(2), 10-25.
- NRC. (2005). *Mineral tolerance of animals*. Washington D.C.: The National Academies Press.
- NRC. (2007). *Nutrients requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids, and New World Camelids*. Washington, D.C. : The National Academies Press.
- Oliver, D., Tiller, K., Conyers, M., Slattery, W., Alston, A., & Merry, R. (1996). Effectiveness of limiting to minimise uptake of cadmium by wheat and barley grain grown in the field. *Australian Journal of Agricultural Research*, 47(7), 1181-1193.
- Organization World Health. (2011). *Codex Alimentarius Commission*.
- Pagnaelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., & Toro, L. (2004). Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: pollution detection and affinity series. *Environmental Pollution*, 132,189-201.
- Peasey, A., Blumenthal, U., Duncan, M., & Ruíz-Palacios, G. (2000). *A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture: A Latin American perspective*. Water and Environmental Health at London and Loughborough.
- Pinto-Santini, L., Godoy, S., Chicco, C., & Chacón, T. (2007). Efecto de altos niveles de hierro y molibdeno sobre la nutrición del cobre en vacas mestizas. *Revista Científica FCV-LUZ*, 17(6), 588-596.
- Puls, R. (1988). *Mineral levels in animal health: diagnostic data*. Clearbrook, B.C.: Serpa International.

- Qadir, M., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2000). Cadmium concentration in vegetables grown on urban soils irrigated with untreated municipal sewage. *Environment, Development and Sustainability*, 2(1), 11-19.
- Quintana, C., Sanabria, M., Ojeda, M., & Valera, R. (2012). Efecto de la salinidad sobre la anatomía foliar y radical de la piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) 'Española roja'. *Pittieria*, 36, 87-108.
- Quiroz-Rocha, G. F., & Bouda, J. (2001). Fisiopatología de las deficiencias de cobre en rumiantes y su diagnóstico. *Veterinaria México*, 32(4), 289-296.
- Richards, A. L. (1990). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos* (Primera ed.). México: Instituto de Investigaciones Agrícolas.
- Rojas, M., & Rovalo, M. (1986). *Fisiología vegetal*. México: McGrawHill.
- Salgot, M., Huertas, E., Weber, S., Dott, W., & Hollender, J. (2006). Wastewater reuse and risk: definition of key objectives. *Desalination*, 187, 29-40.
- Sanz-Sampelayo, M. R., J. R. Fernández, G. de la Torre, E. Ramos, F. D. Carmona & J. Boza. (2003). Calidad de la leche de los pequeños rumiantes. *Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental*, 16(1).
- Siebe, C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 10(1), 15-21.
- Siebe, C. (1995). Heavy metal availability to plants in soils irrigated with wastewater from Mexico City. *Water Science and Technology*, 32(12), 29-34.
- Socha, M. T., Tomlinson, D., DeFrain, J. M., & Zinpro Corporation. (2003). Variability of water composition and potential impact on animal performance. *In Proceedings from the Intermountain Nutrition Conference, Salt Lake City, UT*, (págs. 85-96).
- Solís, C., Andrade, E., Mireles, A., Reyes-Solís, I., García-Calderón, N., Lagunas-Solar, M., . . . Flocchini, R. (2005). Distribution of heavy metals cultivated with wastewater irrigated soils during different periods of time. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 351-355.
- Suttle, F. (2010). *Mineral nutrition of livestock* (Cuarta ed.). Reino Unido: MPG Books Group.
- Suttle, N., Brebner, J., & Hall, J. (1991). Fecal excretion and retention of heavy metals in sheep ingesting topsoil from fields treated with metal rich sludge. *International Symposium on Trace Elements in Man and Animals*, (págs. 32-34). Dubrovnik IN, Zagreb.
- Tejeda, G. (1991). El riego con aguas residuales en México: efecto en la salud y propuesta de soluciones técnicas. *Revista de Ingeniería Ambiental*.

- Tiffany, M., McDowell, L., O'Connor, G., Martin, F., Wilkinson, N., Cardoso, E., . . . Rabiansky, P. (2000). Effects of pasture applied biosolids on performance and mineral status of grazing beef heifers. *Journal of Animal Science*, 78(5), 1331-7.
- Tong, S., von Schirnding, Y., & Prapamontol, T. (2000). Environmental lead exposure: a public health problem of global dimensions. *Bulletin of the World Health Organization*, 78(9), 1068-1077.
- Underwood, E., & Suttle, N. (2003). *Los minerales en la nutrición del ganado* (Tercera ed.). Zaragoza, España: Acribia S.A.
- Van der Hoek, W. (2004). *A framework for a global assessment of the extent of wastewater irrigation: the need for a common wastewater typology*. CAB International.
- Vázquez-Alarcón, A., Justin-Cajuste, L., Siebe-Grabach, C., Alcántar-González, G., & de la Isla de Bauer, M. (2001). Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 267-274.
- Villavicencio-Martínez, N., López Alonzo, C., Basurto Sotelo, M., & Pérez Leal, R. (2011). Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia Chihuahua*, 5(3), 156-161.
- Wang, W. (1991). Literature review on higher plants for toxicity testing. *Water, Air and Soil Pollution*, 193-204.