



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN
Y SERVICIO EN ZOOTECNIA

POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

**COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y REPRODUCTIVO DE
VACAS HOLSTEIN QUE CONSUMEN AGUA DE POZO
PROFUNDO Y DE ÓSMOSIS INVERSA**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

CARLOS DELFINO HERRERA MONSALVO

Bajo la supervisión de: **JOSÉ GUADALUPE GARCÍA MÚNIZ,**
Ph.D.



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

Febrero de 2012

Chapingo, Estado de México

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y REPRODUCTIVO DE VACAS
HOLSTEIN QUE CONSUMEN AGUA DE POZO PROFUNDO Y DE ÓSMOSIS
INVERSA

Tesis realizada por **CARLOS DELFINO HERRERA MONSALVO** 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. JOSÉ GUADALUPE GARCÍA MUÑIZ

ASESOR:



Dr. ALEJANDRO LARA BUENO

ASESOR:



M.C. CONSTANTINO ROMERO MÁRQUEZ

CONTENIDO

CONTENIDO	iii
LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Estructura química del agua y formación de puentes de hidrógeno	3
2.2 Propiedades fisicoquímicas del agua y su importancia en procesos fisiológicos	4
2.3 Factores que afectan las propiedades fisicoquímicas del agua	6
2.4 Funciones del agua en el metabolismo del animal	6
2.5 Distribución del agua en el cuerpo de los animales	7
2.6 Equilibrio hídrico en bovinos lecheros	8
2.7 Consumo y requerimientos de agua de bovinos lecheros	9
2.7.1 Comportamiento del consumo de agua en bovinos lecheros	11
2.7.2 Factores que afectan el consumo de agua en bovinos lecheros	11
2.8 Calidad del agua de bebida para bovinos lecheros	13
2.8.1 Salinidad o sólidos totales disueltos	13
2.8.2 Dureza	15
2.8.3 Sulfatos	15
2.8.4 Nitratos	16
2.9 El agua como fuente de contaminantes y elementos tóxicos	17
2.10 Situación actual del agua en México	20
2.10.1.1 Situación actual del agua en la Comarca Lagunera	21

2.10.1.2	Calidad del agua subterránea en la Comarca Lagunera	21
2.10.1.3	Factores que afectan la calidad del agua subterránea en la Comarca Lagunera	23
2.10.1.4	Tecnologías empleadas para la purificación de agua	24
2.10.1.5	Generalidades de la ósmosis inversa.....	26
2.10.1.6	Descripción del proceso ósmosis inversa	26
2.10.1.7	Usos de la ósmosis inversa.....	27
2.11	Literatura citada.....	28
3.	COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y REPRODUCTIVO DE VACAS HOLSTEIN QUE CONSUMEN AGUA DE DISTINTA CALIDAD	33
3.1	Resumen.....	33
3.2	Abstract.....	34
3.3	Introducción.....	35
3.4	Materiales y métodos	36
3.4.1	Localización del sitio experimental	36
3.4.2	Descripción de los animales y duración de la fase experimental ..	36
3.4.3	Alimentación y manejo de los animales	37
3.4.4	Análisis y manejo de muestras.....	39
3.4.5	Variables de respuesta.....	41
3.4.6	Análisis estadístico.....	42
3.5	Resultados y discusión.....	45
3.6	Conclusiones.....	54
3.7	Literatura citada.....	54

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Límites permisibles para el contenido de sólidos totales disueltos (STD) en el agua y posibles efectos en el ganado.....	14
Cuadro 2. Límites permisibles de la concentración (mg L^{-1}) de nitrato (NO_3^-) en el agua de bebida para ganado lechero.....	17
Cuadro 3. Límite permisible (LP) de la concentración (mg L^{-1}) de algunos nutrientes potencialmente tóxicos y contaminantes presentes en agua de bebida para ganado.	17
Cuadro 4. Límites máximos permitidos de algunos elementos que determinan la calidad de agua potable para humanos y ganado.....	19
Cuadro 5. Comparación de las diversas tecnologías disponibles para la remoción del arsénico del agua para consumo humano y del ganado.	25
Cuadro 6. Composición de la dieta experimental.....	37
Cuadro 7. Resultados del análisis de agua tratada con el sistema de ósmosis inversa y del agua de pozo profundo.	40
Cuadro 8. Medias de cuadrados mínimos y error estándar de la diferencia (EED) de las variables productivas ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$) para el efecto de fuente de agua de bebida para ganado lechero en estabulación en el norte de México.....	47
Cuadro 9. Medias de cuadrados mínimos y error estándar de la diferencia (EED) de las variables de calidad de leche para el efecto de fuente de agua de bebida para ganado lechero en estabulación en el norte de México.	51
Cuadro 10. Coeficientes de regresión logística múltiple $\pm$ error estándar, riesgos relativos (RR) e intervalos de confianza (IC) al 95% para los efectos	

de fuente de agua, número de parto y semana del experimento para la variable que indica la presencia de leche baja en grasa.....	52
Cuadro 11. Medias de cuadrados mínimos y error estándar de la diferencia (EED) de peso vivo, peso metabólico y condición corporal para el efecto de fuente de agua de bebida para ganado lechero en estabulación en el norte de México.....	53
Cuadro 12. Medianas e intervalo de confianza al 95%, entre corchetes, para las variables días a primer celo posparto, días al primer servicio y días abiertos de vacas Holstein-Friesian consumiendo agua de pozo profundo u obtenida mediante un proceso de ósmosis inversa.	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la molécula de agua.....	3
Figura 2. Formación de enlaces de hidrógeno entre dos moléculas de agua.	4
Figura 3. Fenómeno de ósmosis inversa.	27
Figura 4. Interacción de tratamiento por semana del experimento para la variable consumo de alimento.	48
Figura 5. Interacción de tratamiento por semana del experimento para la variable eficiencia en producción de leche.....	49
Figura 6. Interacción de tratamiento por semana del experimento para la variable peso vivo.	53

DEDICATORIA

Una vez más a mi mamá *Juana Monsalvo* y mi papá *Delfino Herrera* por haberme dado la vida, por el apoyo que me han ofrecido cuando más lo he necesitado, por su amor, cariño, comprensión y paciencia les estaré eternamente agradecido.

A mis abuelos por ser un ejemplo de vida para seguir superándome.

A mi hermano *Alfredo* y su esposa *Sonia* por llenar de paz, amor, alegría y felicidad a mi familia con mis sobrinos *Frida Sofía* y *José María*.

A *Yunuen Rojas González* por darme la oportunidad de conocerte, por compartir parte de tu vida conmigo, por ser una gran compañía y una gran persona con la que he vivido momentos muy agradables e inolvidables; espero seguir cultivando nuestra amistad para que siga creciendo, recuerda que eres muy importante para mí.

A mis amigos *Itzel* y *Renato* por su amistad, apoyo y confianza que me brindaron en todos los momentos que compartimos juntos.

A mi gran amigo MVZ Isidro Paredes por ser una gran persona de quien aprendí mucho siendo compañeros de trabajo, gracias por tu amistad y compartir tus conocimientos, que en mi desempeño profesional han sido de gran utilidad.

A todos los compañeros del Posgrado en Producción Animal por su amistad y compartir momentos agradables, siempre los recordaré.

Sinceramente, Carlos Delfino Herrera Monsalvo

AGRADECIMIENTOS

A *Dios* por darme la oportunidad de concluir un proyecto más en mi vida profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico que me brindó para realizar mis estudios de posgrado.

A todos los profesores del Posgrado en Producción Animal por los conocimientos, consejos y recomendaciones que me ofrecieron para poder formarme como Maestro en Ciencias.

Al Ph.D. José Guadalupe García Muñiz por su amistad y acertada participación en la dirección de la presente investigación.

Al los miembros del jurado Dr. Alejandro Lara Bueno y MC. Constantino Romero Márquez por su participación y acertadas sugerencias que contribuyeron de manera desinteresada con la elaboración coherente y precisa de la presente investigación.

Al Ing. José Jaimes y el Ing. Ángel Hernández por su amistad, colaboración y facilidades que me brindaron para realizar el desarrollo de la fase de campo de la presente investigación.

A mis amigos Juan de Dios, Adelfo Vite, Freddy, Elías, Pedro Meda y Enedino, por el apoyo que me ofrecieron para el desarrollo de la fase de campo de la presente investigación.

A todos los trabajadores de la Unidad de Producción “18 de Julio” por compartirme su amistad y apoyo durante mi estancia en Bermejillo.

Sinceramente, Carlos Delfino Herrera Monsalvo

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre	Carlos Delfino Herrera Monsalvo
Fecha de nacimiento	04 de noviembre de 1983
Lugar de nacimiento	Texcoco, Estado de México
CURP	HEMC831104HMCRNR06
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia
Cédula profesional	5357986

Desarrollo académico

Bachillerato	Preparatoria Agrícola Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia Departamento de Zootecnia Universidad Autónoma Chapingo
Maestría	Maestro en Ciencias en Innovación Ganadera Posgrado en Producción Animal Departamento de Zootecnia Universidad Autónoma Chapingo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El agua es el nutriente más importante en vacas lecheras ya que es requerida para todos los procesos vitales como digestión, metabolismo y transporte de nutrientes y otros compuestos; eliminación de materiales de desecho y exceso de calor del cuerpo; mantenimiento del balance iónico; y la provisión de un ambiente fluido para el desarrollo del feto. Por tanto, una pérdida del 20% del agua corporal sería fatal para el ganado lechero (Houpt, 1984; Murphy, 1992).

Las vacas lecheras en lactancia requieren asignaciones mayores de agua, en relación con su peso corporal, que la mayoría de las otras especies de ganado; esto debido fundamentalmente a que la leche recién secretada de la glándula mamaria contiene alrededor de 87% de agua. En el ganado lechero los factores que influyen en el consumo diario de agua y sus requerimientos en ganado lechero incluyen el estado fisiológico, el nivel de producción de leche, el consumo de materia seca, el tamaño corporal, ritmo y grado de actividad, la composición de la ración y factores climáticos. Otros factores que afectan de manera particular el consumo de agua son la salinidad del agua de bebida, el contenido de sodio en la ración, la temperatura del agua, las interacciones sociales entre las vacas y otros factores de calidad como el pH y la concentración de sustancias tóxicas presentes en el agua de bebida (Bede, 1993).

El agua es un compuesto muy reactivo que le permite ser un excelente solvente, de esta manera, la composición de las aguas subterráneas se afecta mediante el intercambio de elementos con su entorno, lo que genera un medio propicio para el consumo excesivo de minerales pesados, minerales tóxicos y otros compuestos, en vacas que consumen agua de esta fuente (NRC, 2005). El agua de bebida que contiene niveles mayores a 1000 mg L^{-1} de sólidos

totales disueltos (STD) pueden ser perjudiciales conforme incrementa su concentración en el agua de bebida (NRC, 2001).

La calidad del agua subterránea en la Comarca Lagunera presenta niveles de salinidad variables, con concentraciones de STD en algunas áreas por encima de los 2000 mg L⁻¹ (CONAGUA, 2000). De tal forma que, es necesario conocer la composición del agua y su relación con la capacidad para producir leche de buena calidad por animales saludables.

Las alternativas de solución son limitadas, debido a que en un mismo rancho puede existir agua de calidad nutricional diferente. No obstante, la tecnología de ósmosis inversa puede ser una alternativa de solución para estos problemas, ya que es una de las que mejor garantiza el tratamiento de aguas subterráneas (Naum *et al.*, 2009). Esta tecnología ha sido utilizada para tratar aguas subterráneas para su posterior suministro a ganado lechero; aunque los resultados disponibles sobre el efecto de suministrar agua tratada con esta tecnología, en la producción de vacas lecheras, son limitados y hasta cierto punto contradictorios (Challis *et al.*, 1987; Revelli *et al.*, 2005; Sbodio *et al.*, 2007; Valtorta *et al.*, 2008; Arjomandfar *et al.*, 2010).

En México, el uso de la tecnología de ósmosis inversa ha tenido una aceptación creciente en establos lecheros de la Comarca Lagunera en el tratamiento de aguas subterráneas para su posterior suministro como agua de bebida a vacas lecheras, sin embargo, son escasos los resultados de investigación sobre este tema, por tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del consumo de agua de pozo profundo y de agua obtenida después de pasar por un proceso de ósmosis inversa, en el consumo de alimento, la producción y calidad de leche, cambios de peso vivo, condición corporal y comportamiento reproductivo de vacas Holstein-Friesian.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Estructura química del agua y formación de puentes de hidrógeno

El agua es un compuesto simple formado por dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno, que se acomodan en una geometría no lineal donde el enlace H-O-H forma un ángulo de 104.5° (Figura 1), que le confiere asimetría electrónica que ninguna otra molécula en la naturaleza reúne, lo cual explica muchas de las propiedades del agua (Nelson y Cox, 2008).

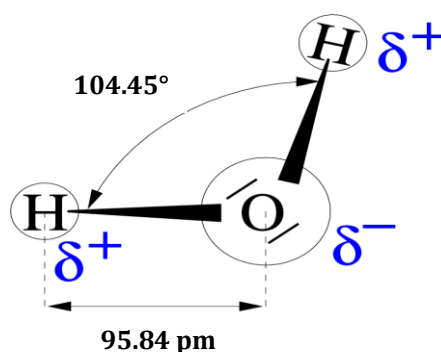


Figura 1. Estructura de la molécula de agua.

La molécula de agua es un dipolo eléctrico que posee en cada átomo de hidrógeno una carga parcial positiva (δ^+) y en el de oxígeno una carga parcial negativa (δ^-). Esto le permite establecer una atracción electrostática entre dos moléculas de agua, para formar un enlace o puente de hidrógeno (Figura 2), que son enlaces relativamente débiles comparados con los enlaces covalentes, lo cual permite que el agua sea líquida. De esta manera, la ordenación casi tetraédrica permite la unión de cuatro moléculas de agua vecinas. Esta propiedad es la responsable de la elevada cohesión interna del agua en estado líquido (Nelson y Cox, 2008).

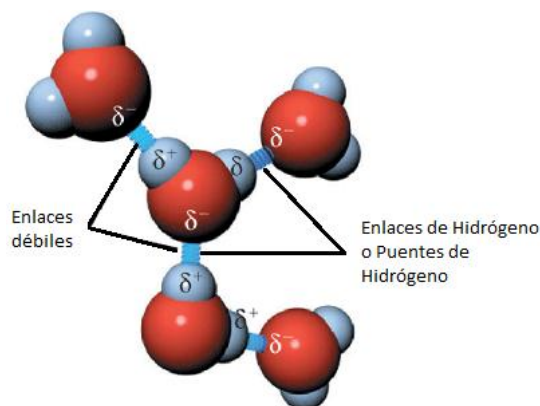


Figura 2. Formación de enlaces de hidrógeno entre dos moléculas de agua.

2.2 Propiedades fisicoquímicas del agua y su importancia en procesos fisiológicos

El agua es el nutriente más importante durante los periodos de estrés por calor, ya que sus propiedades físicas, como conductividad térmica y calor de vaporización latente, son importantes para transferir el calor del cuerpo hacia el ambiente. Durante los periodos de estrés por frío, la alta capacidad calórica del agua corporal sirve como aislante conservando el calor corporal (NRC, 2001).

El calor específico del agua ayuda a mantener la temperatura corporal, mediante el bombeo constante de sangre del corazón hasta los tejidos periféricos, debido a que el componente más abundante de la sangre es el agua. El calor de vaporización del agua es alto, por tanto, se minimizan las pérdidas de agua que pudieran ocurrir en los seres vivos debido a la evaporación, de manera que los protege contra la deshidratación. Por otro lado, la evaporación a través de los pulmones y la piel provee un eficiente sistema de enfriamiento que ayuda a mantener la temperatura corporal generando una sensación de frescura (Haupt, 1984; McDonald *et al.*, 2006).

El cuerpo de los animales contiene de 60 a 70 por ciento de agua en forma de soluciones acuosas, que son importantes para la mayoría de los fenómenos fisiológicos; las funciones de las soluciones acuosas incluyen: filtración glomerular en el riñón, producción de un gradiente de concentración de soluto

en la médula renal, conservación del tamaño celular, excitabilidad de las membranas celulares y, en especial, la generación del impulso nervioso, entre otras (Haupt, 1984).

La constante dieléctrica es la propiedad de los disolventes de separar iones de cargas opuestas. El agua tiene uno de los valores de constante dieléctrica más elevado, lo que le permite disociar con facilidad biomoléculas presentes en los organismos vivos; el agua simple puede disolver sustancias iónicas, polares y también las que no tienen carga, por tanto, se le conoce como el disolvente universal. Los compuestos no polares son insolubles en agua ya que carecen de iones o grupos funcionales polares, a estos compuestos se les denomina hidrófobos. Existen otros compuestos de importancia bioquímica, que son iónicos y no polares, estos compuestos son denominados anfipáticos o anfifílicos. Las sales metálicas de los ácidos carboxílicos de cadena larga son ejemplos de este tipo de compuestos (Voet y Voet, 1995; Nelson y Cox, 2008).

La difusión simple es el movimiento aleatorio de moléculas, iones y partículas coloidales en suspensión de un área con una concentración mayor a un área de menor concentración, a través de las membranas de las células. Las moléculas muy pequeñas se difunden por canales de proteínas, mientras que moléculas más grandes son transportadas por difusión facilitada mediante una proteína transportadora. La difusión se presenta en la sangre que circula por el cuerpo a causa de la presión hidrostática creada por el corazón y su distribución hacia los líquidos intersticial e intracelular (Haupt, 1984).

La ósmosis es el fenómeno donde existe una difusión de agua de una solución de menor concentración de soluto hacia una solución de mayor concentración de soluto a través de una membrana semipermeable. La cantidad de agua que se difunde hacia dentro de las células normalmente se compensa con una cantidad igual difundida hacia afuera. La presión osmótica se refiere a la presión necesaria para evitar la difusión del agua hacia la solución que tiene la mayor concentración de soluto, los cuales determinan esta propiedad del agua (Haupt, 1984).

2.3 Factores que afectan las propiedades fisicoquímicas del agua

La estructura del agua en estado líquido puede cambiar con la presencia de solutos disueltos en ella; por ejemplo, cuando el cloruro de sodio (NaCl) es disuelto en agua, los iones de Na^+ y Cl^- son atraídos por las moléculas de agua en sus dipolos y alteran la geometría de la molécula de agua. Cuando la concentración de sales disueltas se aproxima a la concentración de los fluidos biológicos, tiende a alterar la estructura del agua, manifestándose en las propiedades coligativas de las soluciones. Los solutos producen efectos en los solventes como la depresión del punto de congelación, elevación del punto de ebullición y depresión de la presión de vapor (Nelson y Cox, 2008).

2.4 Funciones del agua en el metabolismo del animal

El agua es un compuesto altamente reactivo que interviene en las reacciones químicas de las células vivas; proporciona un medio acuoso para el desarrollo de la mayor parte de las reacciones químicas, donde existen la mayor parte de los compuestos bioquímicos, como las enzimas que participan en procesos hidrolíticos. Sin embargo, el agua es tan familiar, que generalmente se considera como un fluido simple, pero sus propiedades físicas y químicas son trascendentales y tienen profundos significados biológicos (McDonald *et al.*, 2006; Nelson y Cox, 2008).

El agua es el nutriente más importante para el ganado lechero, ya que es requerida durante todos los procesos biológicos de la vida, como son el transporte de nutrientes y otros compuestos hacia dentro y fuera de las células; digestión y metabolismo de nutrientes; eliminación de materiales de desecho (orina, heces y respiración) y exceso de calor (transpiración) del cuerpo; mantener un fluido y balance iónico apropiado en el cuerpo; proveer de un medio líquido para el desarrollo del feto y para la producción de leche (Houpt, 1984; Murphy, 1992).

El agua y sus productos de ionización, como los iones hidronio e hidróxido, son determinantes para la formación de estructuras moleculares que conforman a

los seres vivos, como proteínas, ácidos nucleicos, lípidos y carbohidratos complejos, así como membranas, ribosomas y otros componentes. La interacción entre estos compuestos se debe a las propiedades del agua como solvente (Voet y Voet, 1995). Por tanto, resulta esencial para la vida mantener el nivel de agua en el organismo, ya que la muerte de los animales se produce si éstos pierden el 20% de agua corporal (Houpt, 1984; McDonald *et al.*, 2006).

2.5 Distribución del agua en el cuerpo de los animales

La cantidad de agua que requieren los animales varía entre especies, edades, sexos, estados nutricionales y otras condiciones. El contenido de agua es mayor en el recién nacido y disminuye de manera lenta y constante con la edad. El tejido graso tiene un bajo contenido de agua (10% o menos); por consiguiente, el contenido de agua total de un animal gordo será menor que el de un animal magro. En el ganado magro, aproximadamente el 70% del peso corporal es agua, mientras que en animales gordos contienen solamente alrededor de 40% de agua en su cuerpo (Houpt, 1984).

El agua se localiza en los espacios intracelulares y extracelulares donde provee de un solvente necesario para el transporte de nutrientes, productos de desecho e intermediarios metabólicos entre los compartimientos corporales (NRC, 2005). El agua intracelular está en los compartimientos más grandes y representa dos terceras partes del agua en el cuerpo. El fluido extracelular se encuentra dividido por las paredes del sistema vascular en líquido intersticial y plasma; comprende el agua alrededor de las células y tejido conectivo, agua en plasma y el agua transcelular o agua en tracto gastrointestinal. El agua intestinal representa del 15 al 35 por ciento del peso corporal del animal (Woodford *et al.*, 1984; Odwongo *et al.*, 1985).

En el animal magro, aproximadamente una cantidad de agua que equivale al 50% del peso corporal se encuentra dentro de las células, 15% en los espacios intersticiales y 5% en el plasma sanguíneo. El agua en el tracto gastrointestinal, aunque estrictamente se localiza fuera de los tejidos corporales, se considera

como agua extracelular. El líquido cefalorraquídeo, el humor vítreo del ojo, los líquidos sinoviales, la orina y la bilis, son también subdivisiones del líquido extracelular que pueden tener características especiales. Estos líquidos, están un tanto separados de los componentes principales del líquido extracelular y se denominan líquidos transcelulares (Haupt, 1984).

El total de agua contenida en el cuerpo del ganado lechero varía de 56 a 81% de su peso corporal (Murphy, 1992). El estado fisiológico y la composición corporal afectan el contenido de agua en el cuerpo de la vaca. Las vacas en lactancia temprana tienen alrededor del 60% de agua en su masa corporal; las vacas en lactancia avanzada un 62% y las vacas secas con gestación avanzada tienen un contenido intermedio de agua corporal de 65% (Andrew *et al.*, 1995). Los animales jóvenes y magros tienen un contenido mayor de agua corporal que animales viejos (Murphy, 1992). Alrededor del 15% del peso corporal de una vaca en lactancia temprana es agua gastrointestinal, mientras que vacas en lactancia avanzada y en gestación tienen entre 10 y 11 por ciento (Woodford *et al.*, 1984).

2.6 Equilibrio hídrico en bovinos lecheros

El agua contenida en el cuerpo del ganado lechero se obtiene por ingestión directa de agua de bebida y mediante el consumo de alimentos, o como producto terminal del metabolismo celular por la degradación de carbohidratos y lípidos, siendo el agua metabólica una fuente insignificante de agua para el ganado. El agua corporal se pierde a través de la orina, la piel, gases de la respiración y en las heces (NRC, 2005). Las vacas lecheras en lactancia pierden grandes cantidades de agua en la leche que producen, debido a que la leche contiene alrededor del 87% de agua. La ingesta de agua y la excreción urinaria son controladas por el animal para regular el volumen de agua corporal (Haupt, 1984).

La pérdida de agua a través de la leche de vacas que producen 33 kg día⁻¹ es alrededor del 34% (Holter y Urban, 1992), 29% (Dado y Allen, 1994) y 26%

(Dahlborn *et al.*, 1998) del total del agua consumida (con alimento y agua a libre acceso). La pérdida de agua en heces es similar a la de la leche (30 a 35% del total del agua consumida), mientras que las pérdidas urinarias son alrededor de la mitad de las pérdidas fecales (15 a 21%) en vacas en lactancia (Holter y Urban, 1992; Dahlborn *et al.*, 1998). Los factores que influyen en la pérdida de agua en las heces son el consumo de materia seca (CMS), el contenido de materia seca en el alimento que se suministra y la digestibilidad de la dieta (Murphy, 1992).

Dahlborn *et al.* (1998) reportaron que el porcentaje de materia seca en heces no cambia al modificar el contenido de materia seca en la dieta, pero la pérdida de agua vía heces se incrementó al incorporar una mayor cantidad de forraje en la dieta. La excreción de agua en orina varía de 4.5 a 35.4 L día⁻¹ en vacas que producen en promedio 34.6 kg de leche día⁻¹ y de 5.6 a 27.9 L día⁻¹ en vacas secas (Holter y Urban, 1992). La excreción de agua en orina está relacionada positivamente con la disponibilidad de agua, la cantidad de agua absorbida en el tracto intestinal (consumo total menos pérdida en heces) y excreción de nitrógeno y potasio en orina, y se relaciona negativamente con el contenido de materia seca de la dieta (Murphy, 1992). El incremento de forraje en la dieta incrementa las pérdidas de agua en orina (Dahlborn *et al.*, 1998). Las pérdidas combinadas en el sudor, la salivación y evaporación representan alrededor del 18% de las pérdidas de agua totales (Holter y Urban, 1992).

2.7 Consumo y requerimientos de agua de bovinos lecheros

La sed es un deseo consciente de beber agua que se regula en el hipotálamo anterior, el cual controla la liberación de la hormona antidiurética o vasopresina. La sed se provoca en principio por el incremento en la osmolaridad de la sangre entre 1 y 2% pero se puede desencadenar por una disminución del volumen sanguíneo del 10% (NRC, 2005).

Las vacas lecheras requieren de grandes cantidades de agua por día para mantener sus funciones vitales y la producción láctea, por tanto, necesitan

consumir de 3 a 4 litros de agua por kilogramo de materia seca que consumen (Murphy, 1992; Cardot *et al.*, 2008; Kramer *et al.*, 2009). El NRC (2001) establece que la suma del consumo voluntario de agua y el consumo de agua a través de los alimentos da como resultado el consumo total de agua, por lo tanto, la leche al contener 87% de agua, el consumo voluntario de agua de bebida en vacas lecheras se espera que sea de 0.87 kg de agua por cada kilogramo de leche que producen; este consumo representa en promedio el 83% del total del agua consumida.

El consumo de agua y alimento se miden de forma rutinaria y automática en muchas estaciones de prueba y ranchos lecheros destinados para la investigación, ya que están recobrando una importancia en el manejo nutricional de bovinos lecheros (Coffey *et al.*, 2002; Kramer *et al.*, 2009; Hüttmann *et al.*, 2009), dados sus efectos en la salud (González *et al.*, 2008; Lukas *et al.*, 2008), así como en reproducción, debido a su relación con el balance de energía de las vacas y la correspondiente relación con la presencia de enfermedades en los primeros días posparto de la lactancia (Veerkamp y Thompson, 1999; Coffey *et al.*, 2002; Hüttmann *et al.*, 2009).

El contenido de agua de los alimentos es muy variable, pudiendo oscilar entre 60 g kg⁻¹ en los concentrados y más de 900 g kg⁻¹ en algunas raíces. Debido a estas grandes variaciones en el contenido de agua, la composición de los alimentos suele expresarse sobre la base de materia seca, para realizar comparaciones válidas de los contenidos en nutrientes (McDonald *et al.*, 2006).

El contenido de agua de las plantas en crecimiento tiene relación con la fase de desarrollo, siendo mayor en plantas jóvenes que en las maduras. En las zonas de clima templado no suele ser problema la obtención de agua de bebida, de modo que los animales la encuentran a libre disposición. No existen pruebas que, en condiciones normales, el exceso en la ingestión de agua resulte perjudicial y normalmente los animales consumen la cantidad que desean (McDonald *et al.*, 2006).

2.7.1 Comportamiento del consumo de agua en bovinos lecheros

La vaca lechera consume agua varias veces al día, comportamiento que generalmente se asocia con el consumo de alimento y la ordeña; Nocek y Braun (1985) reportaron que la relación entre frecuencia de alimentación y consumo voluntario de agua no fue significativa; sin embargo, las vacas que se alimentaron once veces por día consumieron ligeramente menos materia seca y agua que vacas alimentadas ocho veces por día. Las horas pico de consumo de agua se asociaron con las horas pico de consumo de materia seca. Dado y Allen (1994) reportaron que vacas en estabulación bebieron agua en promedio 14 veces por día de manera grupal y esto estuvo correlacionado positivamente con el consumo de materia seca y los episodios de consumo de alimento por día.

Cardot *et al.* (2008) observaron que los picos en el consumo de agua en vacas lecheras en producción corresponden con los tiempos de ordeña y alimentación, además, más de una cuarta parte del consumo libre de agua se presentó durante las dos horas después de la salida de la sala de ordeña. Alrededor del 75% de las vacas visitaron el bebedero en al menos una ocasión durante las dos horas después de finalizada la ordeña.

2.7.2 Factores que afectan el consumo de agua en bovinos lecheros

Las vacas en lactancia requieren de grandes cantidades de agua para mantener la producción de leche. Este consumo se ve afectado por el consumo de materia seca, la producción diaria de leche, la tamaño corporal, estado de salud de la vaca, el contenido de materia seca en la dieta, los factores ambientales como la temperatura y el consumo de sodio (NRC, 2001).

Las dietas que contienen entre 50 y 70% de materia seca no afectan el consumo voluntario de agua; sin embargo, cuando el contenido de materia seca disminuye de 50 a 30%, el consumo voluntario de agua disminuye en un promedio de 33 kg por día. Además, el ganado lechero en pastoreo consume

sólo el 38% de su consumo total de agua, mediante el agua de bebida, debido al alto contenido de humedad en los forrajes que consumen (NRC, 2001).

Las dietas altas en sal, bicarbonato de sodio y proteína parecen estimular el consumo de agua (Holter y Urban, 1992; Murphy, 1992). El consumo solamente de sodio, incrementa el consumo de agua en 0.05 kg por día por cada gramo de sodio que consume el ganado lechero (Murphy *et al.*, 1983).

McDowel (1967) reportó que un incremento en la temperatura ambiental de 18 a 30°C aumentó el consumo de agua en 29%, disminuyó la pérdida de agua en heces en un 33%, pero aumentó la pérdida de agua en orina, sudoración y respiración en 15, 59 y 50%, respectivamente. Además, el efecto de la exposición directa de bovinos lecheros a los rayos del sol muestra incrementos en el consumo de agua. Durante los meses de verano, las vacas que no se les provee de sombra consumen 18% más agua por día, que las vacas que se les provee sombra (Muller *et al.*, 1994).

Los animales que se encuentran en condiciones climáticas que exceden su zona termoneutral, comparados con animales en climas fríos o frescos, consumen más agua por día para reemplazar las pérdidas por sudoración o evaporación de los pulmones y ayudar a la regulación térmica de la temperatura corporal. Las pérdidas por sudoración y evaporación son mayores en condiciones de climas cálidos y áridos que en climas con condiciones cálidas y húmedas, por tanto, los requerimientos en climas áridos serán mayores. Los animales que experimentan problemas de salud derivados de diarrea o micción excesiva pueden perder cantidades significativas de agua corporal en forma rápida, ocasionando una posible deshidratación que amenaza la vida del animal si no se reemplaza el agua y los electrolitos (NRC, 2005).

La temperatura del agua tiene poco efecto en consumo de agua y comportamiento productivo de la vaca. Sin embargo, las vacas prefieren beber agua con temperatura moderada entre los 17 y 28°C que consumir agua fría o caliente (NRC, 2001).

2.8 Calidad del agua de bebida para bovinos lecheros

La calidad y disponibilidad de agua son importantes en la salud y productividad de las vacas lecheras. Limitar la disponibilidad de agua puede reducir la producción de manera rápida y severa. Algunos contaminantes presentes en agua como nitratos, cloruro de sodio y sulfatos, afectan el comportamiento productivo y salud de la vaca lechera. La mayoría de ellos, sin embargo, tiene un efecto desconocido cuando están presentes en bajas concentraciones en el agua de bebida que se consume durante un periodo largo; sin embargo, la calidad del agua debe ser un aspecto a considerar en el manejo nutricional de bovinos lecheros (NRC, 2001).

Los cinco criterios más relevantes para determinar la calidad del agua para consumo humano y animal son: 1) propiedades organolépticas (olor y sabor), 2) propiedades fisicoquímicas (pH, sólidos totales disueltos, total de oxígeno disuelto y la dureza), 3) presencia de compuestos tóxicos (metales pesados, minerales tóxicos, organofosfatos e hidrocarburos), 4) presencia de minerales o compuestos en exceso (nitratos, sodio, hierro y sulfatos) y 5) la presencia de bacterias. Sin embargo, la información de investigaciones sobre contaminantes en agua y sus efectos en el desempeño productivo del ganado lechero no es contundente y es escasa (NRC, 2001).

2.8.1 Salinidad o sólidos totales disueltos

La salinidad o sólidos totales disueltos (STD) es una medida de constituyentes disueltos en el agua, que es la suma de la materia inorgánica disuelta en el agua. El cloruro de sodio es la primera consideración en esta característica, pero otros componentes asociados con la salinidad son el bicarbonato, sulfato, calcio, magnesio y sílice (NRC, 1974). Un grupo secundario de constituyentes, presentes en concentraciones más bajas, son el hierro, nitrato, estroncio, potasio, carbonato, fósforo, boro y flúor. Los límites permisibles para STD se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Límites permisibles para el contenido de sólidos totales disueltos (STD) en el agua y posibles efectos en el ganado.

STD (mg L ⁻¹)	Posible efecto
> 1000	Saludable y no debe provocar problemas de salud.
1000-2999	Generalmente saludable pero puede ocasionar diarrea ligera temporal en animales no acostumbrados a estas aguas.
3000-4999	Puede ser rechazada cuando se les ofrece por primera vez al ganado y provocar diarrea temporal. El desempeño del animal tal vez sea menor que el óptimo porque el consumo de agua no es el máximo.
5000-6999	Son perjudiciales para la gestación y lactancia de los animales, aunque pueden ser ofrecidas con un cuidado responsable a animales que no se destinan para un máximo comportamiento productivo.
7000	No se debe suministrar al ganado, ya que causa problemas de salud y baja producción.

Fuente: NRC (2001).

Efecto de los sólidos totales disueltos en el comportamiento productivo de bovinos lecheros

Jaster *et al.* (1978) realizaron un experimento con doce vacas Holstein que promediaban 37.3 kg de leche por día, mismas que fueron asignadas al azar a uno de dos grupos que consistieron en agua de la llave (196 ppm de sales disueltas) y agua salada (agua de la llave mas 2500 ppm de cloruro de sodio). Las vacas fueron alimentadas a libre acceso con una dieta con 60% de heno de alfalfa y 40% de concentrado que contenía 1% de sal común y 2% de fosfato dicálcico a libre acceso. Encontraron que el consumo diario de agua salada fue 9.3 litros vaca⁻¹ mayor que las vacas que consumieron agua de la llave. La producción de leche fue menor en 1.9 kg vaca⁻¹ por día, así como una disminución en la persistencia en la producción, la cual se asoció con el consumo de agua salada.

Challis *et al.* (1987) realizaron un experimento en condiciones de calor con clima desértico, en el cual, redujeron los STD del agua de 4400 a 440 mg L⁻¹, y reportaron un incremento de 20% en producción de leche, consumo de agua y alimento en agua baja en sales (440 ppm). Resultados similares fueron

observados por Solomon *et al.* (1995), quienes realizaron un estudio con vacas Holstein con producción de leche mayor a 30 kg vaca⁻¹ día⁻¹, y reportaron que las vacas que consumieron agua baja en sales bebieron 11 kg más de agua por día y produjeron 2.2 kg más de leche por día, que las vacas que consumieron agua salada. Los porcentajes de proteína (2.9 vs 2.8) y lactosa (4.5 vs 4.4) fueron más altos para las vacas que consumieron agua baja en sales. Sin embargo, Bahman *et al.* (1993) ofrecieron agua natural que contenía 3576 mg L⁻¹ de STD y agua con 449 mg L⁻¹ de STD, no observaron diferencias en producción de leche.

Sánchez *et al.* (1994) reportaron que el consumo alto de cloruro y sulfatos es perjudicial en la producción de leche durante los meses de verano. El agua salina generalmente contiene altas concentraciones de cloruros y sulfatos, de manera que aporta al consumo alto de estos elementos. Del mismo modo, las aguas salinas son altas en sodio, pero su consumo elevado no reduce la producción de leche.

2.8.2 Dureza

La dureza del agua generalmente se expresa como la suma de calcio y magnesio reportados en cantidades equivalentes de carbonato de calcio. Otros cationes presentes en el agua (como zinc, hierro, estroncio, aluminio y manganeso) pueden contribuir a la dureza del agua, pero usualmente lo hacen en concentraciones muy bajas, comparadas con las de calcio y magnesio. Las categorías de dureza del agua se dividen en ligera (0-60 mg L⁻¹), moderadamente dura (61-120 mg L⁻¹), dura (121-180 mg L⁻¹) y muy dura (>180 mg L⁻¹)(NRC, 2001).

2.8.3 Sulfatos

Los límites permisibles para el contenido de sulfatos en el agua no están bien definidos, pero las recomendaciones generales son menos de 500 mg L⁻¹ para becerros y menos de 1000 mg L⁻¹ para bovinos adultos. Cuando el sulfato

excede los 500 mg L⁻¹, se debe identificar la sal específica de azufre, ya que la forma del sulfato es un factor determinante de toxicidad (NRC, 2001).

El sulfuro de hidrógeno es la forma más tóxica en el agua de bebida y en concentraciones de 0.1 mg L⁻¹ puede reducir el consumo de agua. Las formas más comunes del sulfato en agua son las sales de calcio, hierro, magnesio y sodio. Todas son laxantes, pero el sulfato de sodio es el más potente. El ganado que consume agua que es alta en sulfatos (2000-2500 mg L⁻¹) presenta diarrea al inicio, pero parecen ser resistentes al efecto laxante, además el sulfato de hierro es la forma de sulfato con mayor potencial para reducir el consumo de agua (NRC, 2001).

Algunas investigaciones (Weeth y Hunter, 1971; Weeth y Caaps, 1972; Digesti y Weeth, 1976) demuestran que el ganado bovino puede tolerar niveles de sulfato en el agua de bebida por arriba de los 2500 mg L⁻¹ por periodos cortos de tiempo (menos de 90 días) sin presentar problemas metabólicos aparentes. El agua y el alimento con alto contenido de sulfatos han sido asociados con poliencefalomalacia en becerros (Hibbs y Thilsted, 1983; Gould, 1998).

2.8.4 Nitratos

El nitrato puede ser utilizado en el rumen como una fuente de nitrógeno para la síntesis de proteína microbiana, pero también puede ocurrir una reducción a nitrito. Cuando se absorbe hacia el organismo, el nitrito reduce la capacidad de transporte de oxígeno de la hemoglobina y en casos severos puede resultar en asfixia. Los síntomas de intoxicación nitratos o nitritos son asfixia y dificultad para respirar, pulso rápido, espuma en la boca, convulsiones, coloración azul alrededor del ojo y en el morro, y sangrado de color marrón-chocolate por nariz y boca. Niveles moderados de intoxicación por consumo de nitratos en el agua de bebida han sido asociados con crecimiento pobre de becerras, infertilidad y abortos en vacas, deficiencias de vitamina A e insalubridad general del hato, pero las investigaciones no siempre han confirmado estas afirmaciones (Stuart y Oehme, 1982).

Los límites permisibles de la concentración de nitrato en agua de bebida se presentan en el Cuadro 2. En la evaluación de los posibles problemas con nitratos, los alimentos también deben de ser analizados en este aspecto, dado que los nitratos en alimentos y agua son aditivos (NRC, 2001).

Cuadro 2. Límites permisibles de la concentración (mg L^{-1}) de nitrato (NO_3^-) en el agua de bebida para ganado.

NO_3^- (mg L^{-1})	Consideraciones importantes
0-44	Saludable para el consumo de rumiantes
45-132	Saludable en dietas balanceadas con contenido bajo en nitratos
133-220	Puede ser perjudicial si el agua es consumida por periodos largos
221-660	El ganado está en riesgo y es posible que muera
661	Perjudicial y no se debe de consumir (posible muerte)

Fuente: NRC (2001).

2.9 El agua como fuente de contaminantes y elementos tóxicos

El agua es un nutriente esencial para los animales y un excelente solvente para los minerales y otros compuestos, en consecuencia, puede ser un medio para el consumo en exceso de minerales y sustancias tóxicas que pueden causar riesgos en la salud del ganado. Por tanto, los contaminantes presentes en agua no deben exceder los límites permisibles presentados en el Cuadro 3. Sin embargo, muchos factores dietarios, fisiológicos y ambientales afectan estos límites y hacen imposible determinar con precisión la concentración de contaminantes y elementos tóxicos a la cual ocurrirán problemas metabólicos y de salud (NRC, 2005).

Cuadro 3. Límite permisible (LP) de la concentración (mg L^{-1}) de algunos nutrientes potencialmente tóxicos y contaminantes presentes en agua de bebida para el ganado.

Componente	LP (mg L^{-1})	Componente	LP (mg L^{-1})	Componente	LP (mg L^{-1})
Aluminio	0.5	Cobalto	1.0	Mercurio	0.01
Arsénico	0.05	Cobre	1.0	Níquel	0.25
Boro	5.0	Flúor	2.0	Selenio	0.05
Cadmio	0.005	Plomo	0.015	Vanadio	0.1
Cromo	0.1	Manganeso	0.05	Zinc	0.5

Fuente: NRC (2005)

Además de su estructura básica compuesta por hidrógeno y oxígeno, el agua contiene muchos elementos y compuestos diferentes. Los altos puntos de ebullición y calor de vaporización, una alta tensión superficial, una densidad que se maximiza a 4°C sin ser el punto de congelación, y una propiedad física de expansión bajo congelación, son características que hacen del agua un excelente reactivo y solvente de las sales y moléculas polares a través de las cuales pasa el agua. La composición elemental o mineral de aguas subterráneas se afecta con la composición de las rocas a través de las cuales pasa el agua o en las cuales es almacenada, el tiempo de permanencia en el acuífero, la solubilidad de los elementos minerales de las rocas, los tipos de suelo a través de los cuales atraviesa el agua para entrar al acuífero, la composición mineral original del agua de lluvia o del agua que entra al acuífero, y el pH de agua (NRC, 2005).

La forma en la que un mineral o elemento se encuentra en el agua se le conoce como especiación. Un elemento puede existir en el agua como un simple ión hidratado, como una molécula, como un complejo con otro ion o molécula y como muchos otros complejos adicionales (Stumm y Morgan, 1996). En agua fresca, los complejos con carbonato e hidróxilo son la forma predominante de muchos minerales. Aún cuando la mayoría de los minerales aparecen en estado disuelto en agua, éstos con frecuencia pueden existir como partículas suspendidas muy pequeñas o coloidales. Muchas partículas coloidales como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, son lo suficientemente pequeñas para atravesar los filtros y no ser reconocidas como partículas en suspensión, sino como una sustancia disuelta. La mayoría de los análisis solo proveen información relacionada con la cantidad total de un mineral en el agua y no proveen ninguna indicación en cuanto a la especiación (NRC, 2005).

La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de América (EPA, por sus siglas en inglés) enlista los estándares de calidad de agua potable para humanos que se presentan en el Cuadro 4, los cuales se dividen en normas aplicables y normas secundarias. Las normas aplicables son los niveles que no

se deben de exceder en el agua y se deben tomar acciones correctivas para lograr niveles más bajos. Las normas secundarias son lineamientos y niveles en los cuales los efectos cosméticos (daño en dientes o decoloración de la piel) y estéticos (sabor, color y olor) son aparentes. Los estándares de calidad de agua para consumo humano en general ofrecen una evaluación muy conservadora, en comparación con los estándares para ganado. Por tanto, el uso de las normas de calidad de agua para humanos debe ofrecer una guía segura para bovinos lecheros (NRC, 2005).

Cuadro 4. Límites máximos permitidos de algunos elementos que determinan la calidad de agua potable para humanos y ganado.

Químico (mg L ⁻¹)	EPA ^z	CCME (1991) ^y
	NMC-Humanos	Ganado
Normas aplicables		
Arsénico	0.01	0.5
Bario	2.0	
Cadmio	0.005	0.02
Cromo	0.1	1.0
Cobalto		1.0
Cobre	1.3	1.0 – Bovinos 0.5 – Ovinos
Plomo	0.015	0.1
Mercurio	0.002	0.003
Nitrato-Nitrógeno	10.0	100
Nitrito-Nitrógeno	1.0	10
Selenio	0.05	0.05
Químico (mg L ⁻¹)	EPA ^z	CCME (1987) ^y
	NMC-Humanos	Ganado
Normas secundarias		
Aluminio	0.2	5.0
Cloro	250	
Cobre	1	
Flúor	2	2.0
Hierro	0.3	
Manganeso	0.05	
Plata	0.1	
Azufre	250	1,000
STD ^x	500	3,000
Vanadio	0.01	0.01
Zinc	5	25.0
pH	6.5-8.5	

^z Niveles máximos de contaminates de la Agencia de Protección al Ambiente (EPA, 2009).

^y Canadian Council of Ministers of the Environment (1991).

^x Sólidos totales disueltos.

Los minerales que se encuentran en forma natural en el agua que son potencialmente tóxicos son muy pocos. Los niveles de contaminación ambiental de arsénico, bario, hierro, manganeso, cloruro de sodio, azufre y nitrato pueden ser altos debido al ambiente geológico a través del cual pasa el agua o en el cual es almacenada. Estos niveles pudieran ser tóxicos o contribuir a la toxicidad del mineral. En la mayoría de las situaciones, los minerales que se encuentran de manera natural en agua no provocan una intoxicación grave, pero conducen a condiciones crónicas de pobre comportamiento animal o incrementan problemas de salud (NRC, 2005).

2.10 Situación actual del agua en México

México cuenta con una gran variedad de climas debido a su ubicación geográfica y relieve que inciden directamente en la disponibilidad de agua. Anualmente el territorio mexicano capta 1,489 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación, donde el 68% ocurre entre los meses de junio a septiembre. De esta agua, se estima que el 73.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.1% escurre por los ríos o arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos, de donde se extrae el 53.6% del agua subterránea para todos los usos, lo que ha ocasionado un aumento sustancial de su sobreexplotación a partir de la década de los setenta (CONAGUA, 2011).

El 63% del agua utilizada en el país se destina para uso agrícola (principalmente riego), la cual proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos). El 33.8% del agua concesionada para el uso agrícola, acuacultura, pecuario, múltiple y otros, es de origen subterráneo, y se ha incrementado en un 23.2% en el periodo del 2001 al 2009. Para el abastecimiento público urbano y doméstico, el tipo de fuente predominante es la subterránea con el 62.2% del volumen, el cual creció en un 30.3%. Las actividades industriales representan el 4.1% del uso total, el cual pasó de ser originalmente superficial, a ser

predominantemente subterránea, con un crecimiento del 40.5% durante el periodo de 2001 a 2009 (CONAGUA, 2011).

2.10.1.1 Situación actual del agua en la Comarca Lagunera

La región de la Comarca Lagunera se localiza en los estados de Coahuila y Durango, se caracteriza por ser una de las cuencas lecheras más importantes a nivel nacional; la producción de leche se desarrolla bajo condiciones intensivas en sistemas de producción especializados. Predomina el ganado vacuno de raza Holstein alojados en hatos con alto nivel tecnológico. El sistema de lechería especializado contribuye aproximadamente con el 95% de la producción de la Comarca, el 20% de la producción nacional y cuenta con el 93% del hato total de la región (SIAP, 2011). Por tanto, este sistema de producción demanda grandes cantidades de agua, tanto para la producción de forrajes utilizados en la alimentación del ganado, como para el consumo de agua del mismo ganado y la limpieza de las instalaciones; además, la agricultura de la región depende en más del 90% de la irrigación con agua de pozos profundos y de presas (CONAGUA, 2011).

La demanda de agua es abastecida por agua renovable y no renovable. El agua renovable está dada por los escurrimientos de aguas superficiales de los ríos Nazas y Aguanaval, la cual se repone continuamente por el ciclo hidrológico y puede extraerse dentro de límites razonables de tiempo. El agua no renovable se refiere a la extraída de los acuíferos por medio de la explotación de poco más de 3 mil pozos que mantienen la extracción de más de 1,000 hm³ (CONAGUA, 2001). Sin embargo, desde hace muchos años los acuíferos han sido sobreexplotados por más de 480 hm³ (CONAGUA, 2011).

2.10.1.2 Calidad del agua subterránea en la Comarca Lagunera

Las aguas salobres se presentan específicamente en aquellos acuíferos localizados en provincias geológicas caracterizadas por formaciones sedimentarias antiguas y someras, de origen marino y evaporítico, en las que la interacción del agua subterránea con el material geológico a través del cual

circula y produce su enriquecimiento en sales. De esta manera, en acuíferos de varios cientos de metros de espesor, especialmente en medios fracturados, la porosidad y la permeabilidad disminuyen con la profundidad debido a la carga litoestática, de manera que la recarga de los acuíferos profundos es tan lenta que el agua subterránea se considera como fósil (CONAGUA, 2011).

Uno de los parámetros que permite evaluar la salinización de aguas subterráneas son los sólidos totales disueltos (STD). De acuerdo con su concentración las aguas subterráneas se clasifican en dulces ($<1,000 \text{ mg L}^{-1}$), ligeramente salobres ($1,000$ a $2,000 \text{ mg L}^{-1}$), salobres ($2,000$ a $10,000 \text{ mg L}^{-1}$) y salinas ($>10,000 \text{ mg L}^{-1}$). El límite entre el agua dulce y la ligeramente salobre coincide con la concentración máxima señalada por la modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1996, que establece los límites máximos permisibles que debe cumplir el agua para consumo humano (CONAGUA, 2011).

Las aguas subterráneas en la cuenca de la Comarca Lagunera contienen en gran cantidad sulfato de calcio (CaSO_4) o sulfato de sodio (NaSO_4). La salinidad es variable, con concentraciones de STD en algunas áreas por encima de los 2000 mg L^{-1} , lo que refleja los efectos de evapotranspiración y de la disolución de evaporitas. Se han encontrado valores más bajos de STD ($<1000 \text{ mg L}^{-1}$) en un área bien definida subyaciendo la Ciudad de Torreón, Coahuila (Del Razo *et al.*, 1993; CONAGUA, 2000).

La Comarca Lagunera es la región más estudiada y la primera en donde se reconocieron problemas por la presencia de arsénico en el agua subterránea. Los problemas de salud relacionados con el arsénico fueron por primera vez descritos en la región a principios de la década de 1960, consistiendo en melanosis, queratosis y cáncer de piel. Se ha encontrado que el agua subterránea en gran número de pozos profundos tiene concentraciones de arsénico por encima del límite permisible para uso doméstico ($25 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$) en un rango de 8 a $624 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$. Se han encontrado concentraciones altas de arsénico en las áreas de San Pedro de las Colonias, Tlahualilo y Francisco I. Madero,

donde el arseniato (As V) es la especie disuelta dominante (Del Razo *et al.*, 1990; Del Razo *et al.*, 1993). Rosas *et al.* (1999) hallaron concentraciones de arsénico en el agua subterránea de la Comarca Lagunera en el rango de 7 a 740 $\mu\text{g L}^{-1}$, siendo el 50% superior a 50 $\mu\text{g L}^{-1}$.

2.10.1.3 Factores que afectan la calidad del agua subterránea en la Comarca Lagunera

Los problemas de contaminación del agua en México pueden ser de origen antropogénico y natural. La contaminación antropogénica puede ser bacteriológica, inorgánica y orgánica. La contaminación natural está relacionada principalmente con áreas donde se encuentran elementos o compuestos naturales que son tóxicos como el plomo o arsénico (Marín, 2002).

Los grandes volúmenes de desecho de animales, provenientes de actividades pecuarias, pueden ocasionar la contaminación del suelo y agua. La mayoría de los efectos son causados por emisiones de nitrógeno (N), fosforo (P) y varios metales pesados que provienen del estiercol en los establos, ya sea durante el almacenamiento, después de la aplicación en suelos o simplemente cuando éste es eliminado. En México la cuenca lechera de la Comarca Lagunera genera una gran cantidad de desechos orgánicos e inorgánicos generados por la actividad ganadera, además de aplicar altas tasas de fertilización nitrogenada y altas láminas de riego en los cultivos forrajeros, estos son factores que podrían contribuir a la contaminación de las aguas subterráneas de la región (Martínez *et al.*, 2005).

En la agricultura moderna es absolutamente necesario el uso de agroquímicos para mantener altos rendimientos en los cultivos, pero algunas desventajas que presentan los fertilizantes es que alteran las propiedades químicas y biológicas del suelo; asimismo, los fertilizantes nitrogenados propician una variada lixiviación de nitratos que contaminan los acuíferos (Medina y Cano, 2001). La contaminación del agua subterránea por nitratos (NO_3^-) es un problema extendido en muchos lugares del mundo e impone una seria amenaza al

abastecimiento de agua potable (Pauwels *et al.*, 2001; Muñoz *et al.*, 2004). Este problema obedece al impacto que tiene el excesivo uso de fuentes nitrogenadas en el sector agropecuario ya que no está regulada la aplicación y uso de fertilizantes minerales, ni la fertilización proporcionada con estiércol y biosólidos (Ongley, 1997; Figueroa *et al.*, 2003).

Debido al aumento en la sobreexplotación de los acuíferos, motivada históricamente por las necesidades de la industria agropecuaria de la región de la Comarca Lagunera, la calidad del agua es cada vez menor. Además del incremento en la concentración de arsénico, ya existen problemas severos de alta salinidad (Álvarez y Uribe, 2006).

2.10.1.4 Tecnologías empleadas para la purificación de agua

La calidad del agua es un factor importante a tomarse en cuenta para lograr una correcta elección de la tecnología de remediación, además de la localización y tamaño del sistema. Para iniciar un procedimiento de selección del equipo de purificación es indispensable realizar análisis del agua para conocer su calidad y con base en los resultados obtenidos, se puede seleccionar el equipo adecuado para su purificación. Algunos métodos de remediación son poco efectivos para tratamiento de aguas que contienen nivel alto de sólidos totales disueltos ($STD > 500 \text{ mg L}^{-1}$). En el Cuadro 5 se describen las opciones más importantes de tratamiento y sus principales ventajas y limitaciones. Entre los principales métodos de tratamiento para la solución al problema del arsénico disuelto en el agua se encuentran la ósmosis inversa, electrodiálisis, intercambio iónico y adsorción en diversos sustratos (Álvarez y Uribe, 2006).

Cuadro 5. Comparación de las diversas tecnologías disponibles para la remoción del arsénico del agua para consumo humano y del ganado.

Proceso	Ventajas	Desventajas
Procesos de membrana		
Ultrafiltración	Estudiado ampliamente. Buena eficiencia de remoción.	Alto costo de operación.
Nanofiltración	Buena alternativa para el tratamiento de agua con grandes cantidades de STD.	Inversión fija y costos de operación altos
Ósmosis inversa	Remueve eficientemente el arsénico. El agua no requiere pre-tratamientos.	Volúmenes grandes de agua de rechazo.
Tratamiento electroquímicos		
Electrodialisis	Remueve otros contaminantes además del arsénico.	Altos gastos operativos por consumo de energía eléctrica. No es eficiente para tratar agua con altos STD.
Electrocoagulación	Efectivo para el tratamiento de efluentes con altos STD. Aplicable para el tratamiento de agua en un amplio rango de pH.	Altos gastos operativos por consumo de energía eléctrica.
Adsorción		
Alúmina activada	Fácil operación. Remueve eficientemente el As (V) y aceptable desempeño en la eliminación de As (III).	No aplicable en la presencia de iones competitivos (i.e., F-, SiO ₃ ²⁻ y PO ₄ ³⁻). Muy dependiente del pH. Regeneración complicada del adsorbente.
Carbón activado granular	Mejora su eficiencia al tratarse con óxidos metálicos.	Poco eficiente
Hidróxido férrico granular	Alta eficiencia de remoción. Fácil operación.	Adsorbente de importación. No se regenera.
Otros métodos		
Intercambio iónico	No requiere control estricto de pH. Las resinas son regeneradas fácilmente.	No es aplicable en el tratamiento de agua con altos STD o sulfatos.
Adsorción-coprecipitación	Método versátil y puede simplificarse para aplicar en el sitio de uso. Remueve eficientemente el arsénico pentavalente. Efectivo en un amplio rango de pH.	Alto gasto operativo derivado del consumo de reactivos y la disposición de sólidos residuales.

Fuente: Álvarez y Uribe (2006).

2.10.1.5 Generalidades de la ósmosis inversa

La ósmosis inversa es una tecnología actual para el tratamiento de aguas y efluentes, la cual ha tenido un amplio desarrollo en el campo de la desalación de aguas salobres, sobre todo en el campo industrial, reemplazando o complementando a otros métodos (Naum *et al.*, 2009). La ósmosis inversa es un método utilizado a partir de la segunda Guerra Mundial para desalinizar el agua de mar. Desde entonces la industria ha perfeccionado el sistema, para bajar su precio, al grado de que ahora se producen como equipos caseros de purificación del agua (Bartels *et al.*, 2005). La ósmosis Inversa consiste en separar un componente de otro en una solución, mediante las fuerzas ejercidas sobre una membrana semi-permeable. Su nombre proviene de "ósmosis", el fenómeno natural por el cual se proveen de agua las células vegetales y animales para mantener la vida (Naum *et al.*, 2009).

2.10.1.6 Descripción del proceso ósmosis inversa

La tecnología de la ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, por el cual dos soluciones de distinta concentración salina, puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones. Para ello se produce un movimiento desde la solución más diluida hacia la más concentrada, que se detiene cuando se alcanza un equilibrio entre ambas concentraciones. La fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones como se muestra en la Figura 3 (Medina, 2000).

La ósmosis inversa es el proceso de filtrado en el cual se fuerza a que el agua con mayor concentración de sólidos totales disueltos pase hacia el otro lado que solo tiene agua pura a través de la membrana semipermeable, lo que permite la separación de prácticamente todos los sólidos en suspensión o en solución (García, 2002).

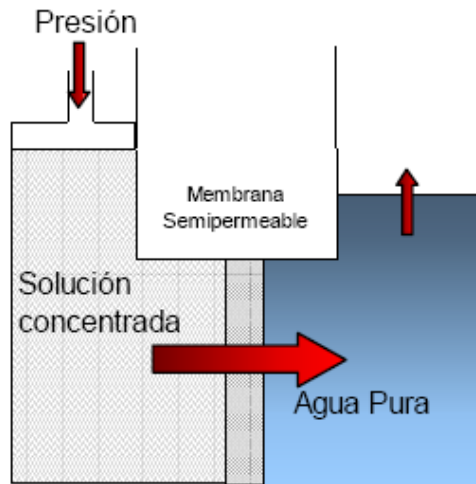


Figura 3. Fenómeno de ósmosis inversa.

La ósmosis inversa debe vencer la diferencia de presión osmótica entre las soluciones de alimentación y producto. Esta presión depende del flujo de agua a través de la membrana y cambia de cero hasta un límite dado por las características de la membrana. Por tanto, este sistema debe contar con una bomba necesaria para aplicar la presión y la membrana debe ser capaz de realizar la separación de sales, para lo cual, la membrana debe ser capaz de resistir las presiones a que se va a someter la solución, ser suficientemente permeable al agua para que el flujo que proporcione sea elevado y rechazar un porcentaje de sales elevados para que el producto (permeado) sea de buena calidad (Medina, 2000).

2.10.1.7 Usos de la ósmosis inversa

El método de ósmosis inversa es un sistema con gran versatilidad para eliminar las sales totales disueltas (80 a 98 %) y es mundialmente reconocido para el tratamiento de agua, por tanto, su uso se ha extendido a varios países, siendo utilizada en la industria como un pre tratamiento para intercambio iónico. La ósmosis inversa se utiliza en una gran variedad de procesos, tales como: manufactura de semiconductores y componentes microelectrónicos, producción de agua purificada para consumo humano; farmacéuticos, medicamentos y otros productos medicinales e industriales (Cherremisinoff, 2002).

2.11 Literatura citada

- Álvarez S., M., y A. Uribe S. 2006. Presencia de arsénico en la Comarca Lagunera y su solución desde el punto de vista técnico. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. México. 6 p.
- Andrew, S. M., R. A. Erdman, and D. R. Waldo. 1995. Prediction of body composition of dairy cows at three physiological stages from deuterium oxide and urea dilution. *Journal of Dairy Science* 78: 1083-1095.
- Arjomandfar, M., M. J. Zamiri, E. Rowghani, M. Khorvash, and Gh. Ghorbani. 2010. Effects of water desalination on milk production and several blood constituents of Holstein cows in a hot arid climate. *Iranian Journal of Veterinary Research* 11 (3): 233-238.
- Bahman, A. M., J. A. Rooke, and J. H. Topps. 1993. The performance of dairy cows offered drinking water of low or high salinity in a hot arid climate. *Animal Production* 57: 23-28.
- Bartels, C. R., M. Wilf, K. Andes and J. long. 2005. Design considerations for wastewater treatment by reverse osmosis. *Water Science and Technology* 51: 473-482.
- Bede, D. K. 1993. Water nutrition and quality for dairy cattle. *In: Western Large Herd Management Conference*. Las Vegas Nevada, EUA. pp: 193-205.
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 1991. Interim canadian environmental quality for contaminated sites. Report CCME EPC-CS34. The National Contaminated Sites Remediation Program. Winnipeg, Manitoba. 20 p.
- Cardot, V., Y. Le Roux, and S. Jurjanz. 2008. Drinking behavior of lactating dairy cows and prediction of their water intake. *Journal of Dairy Science* 91: 2257-2264.
- Challis, D. J., J. S. Zeinstra, and M. J. Anderson. 1987. Some effects of water quality on the performance of high yielding dairy cows in an arid climate. *Veterinary Record* 120: 12-15.
- Cheremisinoff, N. P. 2002. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Butterwoth-Heinemann, Washington, D. C. 636 p.
- Coffey, M. P., G. Simm, and S. Brotherstone. 2002. Energy balance profiles for the first three lactations of dairy cows estimated using random regression. *Journal of Dairy Science* 85: 2669-2678.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2000. Estudio de la contaminación difusa del acuífero de la Comarca Lagunera, Coahuila. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 85 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2001. Programa hidráulico de gran visión 2001-2025 de la región VII cuencas centrales del norte (Torreón,

- Coahuila). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 293 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2011. Estadísticas del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 185 p.
- Dado, R. G., and M. S. Allen. 1994. Variation in and relationships among feeding, chewing, and drinking variables for lactating cows. *Journal of Dairy Science* 77: 132-144.
- Dahlborn, K., M. Akerlind, and G. Gustafson. 1998. Water intake by dairy cows selected for high or low milk-fat percentage when fed two forage to concentrate ratios with hay or silage. *Swedish Journal of Agricultural Research* 28: 167-176.
- Del Razo, L. M., M. A. Arellano, M. E. Cebrian. 1990. The oxidation states of arsenic in well water from a chronic arsenicism area of northern Mexico. *Environmental Pollution* 64: 143-153.
- Del Razo, L. M., J. C. Corona, G. García-Vargas, A. Albores, M. E. Cebrian. 1993. Fluoride levels in well water from a chronic arsenicism area of northern Mexico. *Environmental Pollution* 80: 91-94.
- Digesti, R. D., and H. J. Weeth. 1976. A defensible maximum for inorganic sulfate in drinking water of cattle. *Journal of Animal Science* 42: 1498-1502.
- EPA (U. S. Environmental Protection Agency). 2009. Drinking water contaminate list. Disponible en: <http://water.epa.gov/drink/contaminants/index.cfm#List>. Consultado el 10 de septiembre de 2011.
- Figuerola V., U., M. Flores O., y M. Palomo R. 2003. Uso de biosólidos en suelos agrícolas. Folleto No. 3. INIFAP-Campo Experimental Valle de Juárez. 17 p.
- García A., G. 2002. Fundamentos de la Ósmosis Inversa. Departamento Técnico RG Systems. Zaragoza, España. 54 p.
- González, L. A., B. J. Tolkamp, M. P. Coffey, A. Ferret, and I. Kyriazakis. 2008. Changes in feeding behaviour as possible indicators for the automatic monitoring of health disorders in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 91: 1017-1028.
- Gould, D. H. 1998. Polioencephalomalacia. *Journal of Animal Science* 76: 309-314.
- Hibbs, C. M., and J. P. Thilsted. 1983. Toxicosis in cattle from contaminated well water. *Veterinary and Human Toxicology* 25: 253-254.
- Holter, J. B., and W. E. Urban. 1992. Water partitioning and intake in dry and lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science* 75: 1472-1479.

- Houpt T., R. 1984. Agua y electrolitos. *In: Fisiología de los Animales Domésticos de Dukes*. Swenson M. J., y W. O. Reece (comps.). 1999. 5a. ed. Editorial Limusa. pp: 9-20.
- Hüttmann, H., E. Stamer, W. Junge, G. Thaller, and E. Kalm. 2009. Analysis of feed intake and energy balance of high yielding first lactating Holsteins with fixed and random regression models. *Animal* 3: 181-188.
- Jaster, E. H., J. D. Schh, and T. N. Wegner. 1978. Physiological effects of saline drinking water on high production dairy cows. *Journal of Dairy Science* 61: 66-71.
- Kramer, E., E. Stamer, J. Spilke, G. Thaller, and J. Krieter. 2009. Analysis of water intake and dry matter intake using different lactation curve models. *Journal of Dairy Science* 92 :4072-4081.
- Lukas, J. M., J. K. Reneau, and J. G. Linn. 2008. Water intake and dry matter intake changes as a feeding management tool and indicator of health and estrus status in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 91: 3385-3394.
- Marín, L. E. 2002. Perspectives on mexican ground water resources. *Ground Water* 40 (6): 570-571.
- Martínez J., G., M. Rivera G., y P. Andrade S. 2005. Balance de nutrimentos como una herramienta para establecer áreas potenciales de contaminación no puntual. *AGROFAZ* 5 (3): 85-94.
- McDonald P., R. Edwards A., J. F. Greenhalgh D., y C. Morgan A. 2006. *Nutrición Animal*. 6a. ed. Editorial Acribia. España. 581 p.
- McDowell, R. E. 1967. Water exchange of cattle under heat stress. *Biometeorology* 2: 414.
- Medina S., J. J. 2000. *Deasalación de Agua Salobres y de Mar: Ósmosis Inversa*. Mundi-prensa. Madrid, España. 397 p.
- Medina M., C. y P. Cano. 2001. Contaminación por nitratos en agua, suelo y cultivos de la Comarca Lagunera. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 2 (1): 9-14.
- Muller, C. J. C., J. A. Botha, and W. A. Smith. 1994. Effect of shade on various parameters of Friesian cows in a mediterranean climate in South Africa. Feed and water intake, milk production and milk composition. *Journal of Animal Science* 24: 49-55.
- Muñoz H., M. A. Armenta, A. Vera, y N. Cenicerros. 2004. Nitrato en el agua subterránea del Valle de Huamantla Tlaxcala, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 20 (3): 91-97.
- Murphy, M. R. 1992. Water metabolism of dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 75:326-333.
- Murphy, M. R., C. L. Davis, and G. C. McCoy. 1983. Factors affecting water consumption by Holstein cows in early lactation. *Journal of Dairy Science* 66: 35-38.

- Naum, F., O. C. Vilela, G. A. Lima, and J. M. Gordon. 2009. Reverse osmosis desalination: Modeling and experiment. *Applied Physiology Letter* 10: 1063-1067.
- Nelson, D. L., and M. M. Cox. 2008. *Lehninger Principles of Biochemistry*. 5th. ed. W.H. Freeman and Company. New York. 1294 p.
- Nocek, J. E., and D. G. Braun. 1985. Effect of feeding frequency on diurnal dry matter and water consumption, liquid dilution rate, and milk yield in first lactation. *Journal of Dairy Science* 68: 2238-2247.
- NRC (National Research Council). 1974. *Nutrients and Toxic Substances in Water for Livestock and Poultry*. The National Academy Press. Washington, D. C. 98 p.
- NRC (National Research Council) . 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. Seventh Revised Edition. The National Academy Press. Washington, D. C. 406 p.
- NRC (National Research Council). 2005. *Mineral Tolerance of Animals: Second Revised Edition*. The National Academy Press. Washington, D. C., USA. 510 p.
- Odwongo, W. O., H. R. Conrad, A. E. Staubus, and J. H. Harrison. 1985. Measurement of water kinetics with deuterium oxide in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 68: 1155-1164.
- Ongley E., D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Riego y Drenaje No. 55. Roma. pp: 41-58.
- Pauwels, H., P. Lachassagne, P. Bordenave, C. Foucher, and A. Martelat. 2001. Temporal variability of nitrate concentration in a schist aquifer and transfer to surface water. *Applied Geochemical* 16: 583-596.
- Revelli G., R, O. A. Sbodio, M. R. Gallardo, S. E. Valtorta, y E. J. Tercero. 2005 Rendimiento de vacas lecheras de baja producción en condiciones pastoriles con la oferta de agua de bebida salada o desalinizada. *Revista FAVE Sección de Ciencias Veterinarias* 4:77-88.
- Rosas, I., R. Belmont, A. Armienta, and A. Baez. 1999. Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution* 112: 133-149.
- Sánchez, W. K., M. A. McGuire, and D. K. Beede. 1994. Macromineral nutrition by heat stress interactions in dairy cattle: Review and original research. *Journal of Dairy Science* 77: 2051-2079.
- Sbodio O., A., G. R. Revelli, E. J. Tercero, M. R. Gallardo, y S. E. Valtorta. 2007. Influencia del contenido salino del agua de bebida animal sobre los componentes principales de las fase soluble en leche de vacas individuales. *Revista FAVE Sección de Ciencias Veterinarias* 4:61-68.

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2011. Resumen nacional pecuario. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx>. Consultado el 15 de julio de 2011.
- Solomon, R., J. Miron, and D. Ben-Ghedalia. 1995. Performance of high producing cows offered drinking water of high and low salinity in the Arava desert. *Journal of Dairy Science* 78: 620-624.
- Stuart, L. D., and F. W. Oehme. 1982. Environmental factors in bovine and porcine abortion. *Veterinary and Human Toxicology* 24: 435-441.
- Stumm, W., and J. J. Morgan. 1996. Chemical equilibria and rates in natural waters. *In: Aquatic Chemistry*. John Wiley and Sons. New York. pp: 1-10 and 256-305.
- Valtorta, S. E., M. R. Gallardo, O. A. Sbodio, G. R. Revelli, C. Arakaki, P. E. Leva, M. Gaggiotti, and E. J. Tercero. 2008. Water salinity effects on performance and rumen parameters of lactating grazing Holstein cows. *International Journal of Biometeorology* 52: 239-247.
- Veerkamp, R. F., and R. Thompson. 1999. A covariance function for feed intake, live weight, and milk yield estimated using a random regression model. *Journal of Dairy Science* 82: 1565-1573.
- Voet, D., and J. G. Voet. 1995. *Biochemistry*. 2a. ed. John Wiley. New York. 1360 p.
- Weeth, H. J., and J. E. Hunter. 1971. Drinking of sulfate-water by cattle. *Journal of Animal Science* 32: 277-281.
- Weeth, H. J., and D. L. Capps. 1972. Tolerance of growing cattle for sulfate-water. *Journal of Animal Science* 34: 256-260.
- Woodford, S. T., M. R. Murphy, and C. L. Davis. 1984. Water dynamics of dairy cattle as affected by initiation of lactation and feed intake. *Journal of Dairy Science* 67: 2336-2343.

3. COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y REPRODUCTIVO DE VACAS HOLSTEIN QUE CONSUMEN AGUA DE DISTINTA CALIDAD

3.1 Resumen

El objetivo del estudio fue evaluar el efecto del consumo de agua de pozo profundo (1810 ppm sólidos totales disueltos, STD) y de ósmosis inversa (553 ppm STD) en consumo de alimento, producción y calidad de leche, peso vivo y comportamiento reproductivo de vacas Holstein-Friesian en clima árido. Se utilizaron durante 15 semanas posparto 29 vacas multíparas con peso vivo de 713 ± 60 kg, con 10 días en leche, condición corporal inicial de 3.0 (escala de 1 a 5 puntos) y saludables. Las vacas fueron alimentadas individualmente con una ración completamente mezclada de 50% forraje y 50% concentrado, ofrecida cuatro veces por día. Los resultados indican que el consumo de agua de ósmosis inversa mejoró la eficiencia en producción de leche en 7% ($p=0.0220$), debido a una reducción de 9% en consumo de alimento ($p=0.0337$). La producción y composición de la leche, y el comportamiento reproductivo de las vacas no fue afectado por la fuente de agua. El conteo de células somáticas fue 53% superior ($p=0.0225$) para las vacas que bebieron agua de pozo profundo y presentaron un riesgo 3.3 veces mayor de producir leche con concentraciones de grasa inferiores a las de proteína. El peso vivo fue superior en 5% ($p=0.0283$) en vacas que bebieron agua de pozo profundo. Las vacas que consumen agua filtrada en un sistema de ósmosis inversa presentan una mayor eficiencia en producción de leche con menor riesgo de presentar baja concentración de grasa en leche.

Palabras clave: Producción y calidad de leche, calidad de agua, consumo de alimento.

PRODUCTIVE AND REPRODUCTIVE PERFORMANCE OF HOLSTEIN COWS CONSUMING WATER OF DIFFERENT QUALITY

3.2 Abstract

The objective of the study was to evaluate the effect of drinking-water quality on feed intake, yield and quality of milk, cow live weight, body condition score (BCS) and reproductive performance of Holstein-Friesian cows in arid climate. During 15 weeks postpartum, 29 multiparous healthy cows with 713 ± 60 (mean $\pm$ sd) kg liveweight, 10 days in milk, initial BCS of 3.0 (scale 1 to 5) were utilized. Treatments consisted of two sources of drinking water: deep-well water containing 1810 ppm of dissolved total solids (DTS) or water with 553 ppm of DTS obtained by a reverse osmosis plant. Cows were individually fed, four times a day, a total mixed ration with 50:50 forage to concentrate ratio. Cows drinking the reverse osmosis water were 7% more efficient ($p= 0.0220$) in transforming feed to milk, and ate 9% less feed ($p= 0.0337$) than cows drinking the deep-well water. Milk yield and composition as well as cow postpartum reproductive performance were not affected by the source of drinking water. Cows drinking deep well-water had both, a 53% higher ($p= 0.0225$) somatic cell count and a 3.3 higher relative risk of having lower fat to protein ratio. Cow live weight was 5% higher ($p= 0.0283$) for cows drinking deep well-water. It is conclude that cows drinking reverse osmosis filtered water achieve higher efficiency of transforming feed into milk and had lower risk of producing milk with a low fat to protein ratio.

Key words: Yield and quality of milk, water quality, feed intake.

3.3 Introducción

En México, la producción de leche de bovinos en el año 2010 fue de 10.7 millones de toneladas, siendo la región de la Comarca Lagunera la cuenca lechera más importante, que aportó el 20% de la producción nacional, ya que cuenta con sistemas de producción especializados, donde predominan vacas de raza Holstein (SIAP, 2011). Este tipo de animales beben de 3 a 4 litros de agua por kilogramo de materia seca consumida (Murphy, 1992; Cardot *et al.*, 2008; Kramer *et al.*, 2009). Estas cantidades de agua son indispensables para mantener todas las funciones vitales del cuerpo, siendo el nutriente más importante que la vaca obtiene por ingestión directa, consumo de alimento y en menor proporción por el metabolismo corporal (Bede, 1993).

La principal fuente de agua de bebida para vacas lecheras de la Comarca Lagunera proviene de pozos profundos, la cual, en algunas áreas, contiene niveles que superan los 2000 mg L⁻¹ de sólidos totales disueltos (STD) (CONAGUA, 2000). Esta elevada salinidad genera un medio propicio para el consumo excesivo de minerales pesados, minerales tóxicos y otras otras sustancias disueltas en el agua de bebida que pueden afectar la salud y el comportamiento productivo y reproductivo de las vacas productoras de leche, debido a que el agua es un excelente solvente (NRC, 2005).

El efecto del consumo de agua con niveles de STD por encima de 1000 mg L⁻¹, en el comportamiento productivo de vacas Holstein no es muy claro y los resultados han sido variables. Esta variabilidad puede deberse a la composición específica de STD de las fuentes de agua, tanto en sistemas de producción en condiciones de pastoreo (Revelli *et al.*, 2005; Sbodio *et al.*, 2007; Valtorta *et al.*, 2008) como en condiciones de confinamiento (Jaster *et al.*, 1978; Challis *et al.*, 1987; Bahman *et al.*, 1993; Solomon *et al.*, 1995; Arjomandfar *et al.*, 2010).

En México son escasos los resultados de investigación sobre este tema, por lo que el objetivo del estudio fue evaluar el efecto del consumo de agua de pozo profundo o de agua obtenida por un proceso de filtración de ósmosis inversa, en

el consumo de alimento, producción y calidad de leche, cambios de peso vivo y comportamiento reproductivo de vacas Holstein-Friesian en condiciones de confinamiento en el norte de México.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Localización del sitio experimental

El estudio se llevó a cabo en el establo lechero “18 de Julio” de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado en el municipio de Tlahualilo, Durango. El sitio se ubica entre las coordenadas 25° 54' 07" latitud norte y 103° 35' 09" longitud oeste a una altura de 1,137 msnm, con clima desértico con lluvias en verano (García, 1988), con precipitación media anual de 239 mm, distribuidas principalmente en los meses de julio a septiembre. La temperatura media anual es 21.1 °C, donde junio es el mes más caliente y enero el más frío.

3.4.2 Descripción de los animales y duración de la fase experimental

Las vacas que se utilizaron en este estudio fueron 29 de raza Holstein-Friesian de dos o más partos, con peso promedio de 750 ± 76 kg, con aproximadamente 10 días en leche, condición corporal inicial de 3 en la escala de 1 a 5 puntos y saludables (i.e. cuatro cuartos funcionales, sin problemas digestivos o de locomoción). Se utilizó un corral experimental, donde se le acondicionó a cada vaca, en el área del comedero, un lugar para garantizar el consumo individual de la ración diaria; posteriormente el corral fue dividido en dos secciones para alojar las vacas de los dos tratamientos a comparar.

Una vez acondicionado el corral experimental, las vacas disponibles para el experimento se asignaron a uno de dos tratamientos que consistieron en dos tipos de agua de bebida: T1, agua obtenida de una planta purificadora con sistema de ósmosis inversa ($STD= 553 \text{ mg L}^{-1}$) y T2, agua de bebida obtenida directamente del pozo profundo del rancho ($STD= 1810 \text{ mg L}^{-1}$). El periodo experimental duró 15 semanas, del 28 de septiembre de 2010 al 10 de enero de 2011.

3.4.3 Alimentación y manejo de los animales

La ración se suministró de manera completamente mezclada, preparada en un carro mezclador de gusano vertical Jay Lor modelo 425 de 12 m³ de capacidad. La ración fue formulada de acuerdo con los requerimientos nutricionales establecidos en el NRC (2001) como se muestra en el Cuadro 6. A cada grupo de vacas se les ofreció por separado sal común y bicarbonato de sodio en saladeros a libre acceso.

Cuadro 6. Composición de la dieta experimental

Ingrediente	Dieta Porcentaje (base seca)
Alfalfa verde	16.7
Heno de alfalfa	6.3
Maíz ensilado	22.8
Maíz rolado	28.7
Melaza de caña	1.7
Pasta de soya	6.4
Semilla de algodón	9.4
Salvado de trigo	6.3
Megalac	0.9
Premezcla de minerales	0.1
Premezcla de vitaminas	0.1
Carbonato de calcio	0.5
Aporte nutritivo de la dieta	
Proteína cruda (%)	16.6
Proteína cruda no degradable en rumen (%)	32.4
Fibra detergente neutro (%)	30.3
Fibra detergente ácido (%)	18.9
Energía neta para lactancia ^z	1.7
Calcio (%)	0.7
Fósforo (%)	0.4

^z Mcal kg⁻¹ de materia seca

El alimento se suministró individualmente a cada vaca utilizando comederos individuales numerados, en los horarios siguientes: 7:00 a 9:30, 12:30 a 14:30, 17:30 a 18:30 y 22:30 a 24:00. En cada horario de comida se suministraron 10 kg de la dieta, y dependiendo del consumo individual de cada vaca se modificó la asignación. Una vez que la vaca presentó signos de saciedad fue liberada de la trampa respectiva y se procedió a pesar el alimento no consumido. La dieta ofrecida y el alimento no consumido fueron pesados para cada vaca con una

báscula Tor Rey CRS-HD colgante de capacidad máxima de 500 kg y unidad mínima de 0.1 kg.

Producción y calidad de leche

Las vacas se ordeñaron tres veces por día, en una sala de ordeño doble nueve en paralelo con equipo Alfa Laval, en los horarios de 2:00, 10:00 y 17:00 horas. La rutina de ordeño consistió en aplicación de presello a cada uno de los cuartos, despunte y secado del cuarto con toallas individuales de papel de estraza; colocación de unidades de ordeño; escurrido, corte de vacío, retiro de unidades de ordeño y aplicación de solución selladora. La producción de leche por vaca por día se obtuvo con mediciones individuales de leche rerepresentativas de la semana del experimento. Los registros de producción de leche de cada vaca se obtuvieron utilizando lactómetros tipo Waikato MK V (Waikato NZ). En cada ocasión en que se midió la producción individual de leche de las vacas del experimento se tomó una muestra representativa en viales de plástico de 120 mL, se le adicionó a cada muestra una pastilla de bromopol (BROMOPOL, BSM2, D&F Control, San Ramón, CA) como conservador y se refrigeraron hasta su envío al laboratorio.

Peso vivo y condición corporal

El peso vivo y la condición corporal se midieron al momento del parto y se programó su medición cada 14 días, según la fecha de parto para cada vaca. El peso vivo se registró con una báscula Revuelta RGI de capacidad máxima de 2000 kg y unidad mínima de 0.25 kg. La condición corporal (CC) se registró previo al pesaje de la vaca utilizando la escala de 1-5 (Roche *et al.*, 2009).

Manejo reproductivo

Todas las vacas del experimento parieron en un corral con piso de tierra destinado ex profeso como corral de parto. Inmediatamente después del parto las vacas se pasaron al corral de vacas frescas y se les monitoreó la temperatura rectal y se sometieron a revisión diaria para confirmar la expulsión

o retención de membranas fetales, así como cualquier otro desorden metabólico, digestivo, de locomoción o problemas de glándula mamaria.

Las vacas que no presentaron ninguno de los problemas descritos se incorporaron a su respectivo grupo experimental. Durante el periodo de espera voluntario de 60 días, todas las vacas en el establo se programan para recibir una dosis de prostaglandina ($\text{PGF}_{2\alpha}$) cada 14 días después del parto, a menos que presentaran un celo natural antes del día 14 posparto; si después de cualquier aplicación de $\text{PGF}_{2\alpha}$ la vaca presentó celo, la aplicación de la hormona fue suspendida. Si después de terminados los 60 días del periodo de espera voluntaria la vaca no cicló, se aplicó un tratamiento con base en implantes de progesterona en la oreja (Crestar M®). Posteriormente, la vaca se inseminó si presentó celo limpio. En caso de presentar un celo sucio, la vaca recibió tratamiento con antibiótico. De esta manera, para evaluar el comportamiento reproductivo de las vacas se registró la fecha de primer celo posparto, fecha de primer servicio posparto y fecha de servicio efectivo posparto.

3.4.4 Análisis y manejo de muestras

Muestras de agua

El agua de ambas fuentes se colectó en frascos de Nalgene de 2.0 L, previamente lavados por duplicado con agua regia (mezcla de ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico concentrado en proporción uno en tres) y secados en autoclave de acuerdo con los procedimientos descritos en el Manual de Laboratorio de la Universidad Estatal de Nuevo México (Galyean y May, 1996). La determinación fue por triplicado en laboratorios especializados y certificados por los organismos correspondientes bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1996, que establece los límites máximos permisibles que debe cumplir el agua para consumo humano.

Las muestras de agua se tomaron directamente de los bebederos en tres tiempos diferentes durante el día; la primera toma fue durante la mañana (33%

de la muestra), la segunda toma (33% de la muestra) a medio día y la última toma (el 33% restante) en la tarde. Los resultados del análisis de agua de ósmosis inversa y pozo profundo se presentan en el Cuadro 7 y son el promedio de tres lecturas de cada muestra.

Cuadro 7. Resultados del análisis de agua tratada con el sistema de ósmosis inversa y del agua de pozo profundo.

Muestra	Agua Tratada	Agua de Pozo	Unidades	Norma ^z	Métodos
Sólidos Totales	553.0	1810.0	ppm	1000	NMX-AA 034
Ca c/ CaCO ₃	64.7	394.0	ppm	500	NMX-AA 072
Mg c/ CaCO ₃	50.5	54.5	ppm		
HCO ₃	260.1	351.9	ppm	400	NMX-AA 036
Cl ⁻	242.6	136.5	ppm	250	NMX-AA 073
SO ₄	132.0	717.4	ppm	400	NMX-AA 074
NO ₃	11.1	26.5	ppm	10	NMX-AA 079
pH	7.4	8.3	de pH	6.5 a 8.5	NMX-AA 008
As	0.01	0.04	ppm	0.025	NMX-AA 046

^zNorma Oficial Mexicana-127 SSA1-1996

Muestras de alimento

Para determinar el porcentaje de materia seca (MS) de la ración se tomaron diariamente muestras del alimento ofrecido y no consumido en cada uno de los horarios de alimentación. Las muestras respectivas (500 g por muestra) se colectaron en bolsa ziplock y representaron muestras compuestas de los cuatro suministros diarios. Las muestras de alimento obtenidas en el corral se colocaron en una hielera de plástico con refrigerante y fueron trasladadas a un congelador General Electric 4500 horizontal de 3 m³ de capacidad. La temperatura de almacenamiento de las muestras de alimento se mantuvo en -4 °C hasta su análisis en laboratorio. Las muestras de alimento se descongelaron en periodos quincenales para posteriormente secarlas en una estufa de aire forzado Kafo serie 1600 a una temperatura de 55-60°C por 72 horas para determinar el porcentaje de materia seca de la muestra. El consumo diario de materia seca de cada vaca se calculó al multiplicar el porcentaje de materia seca de la muestra por el consumo de alimento del día. Los procedimientos utilizados se describen en el manual de laboratorio de la Universidad Estatal de Nuevo México (Galyean y May, 1996).

Muestras de leche

Las muestras de leche que fueron tomadas en cada ocasión en que se midió la producción individual de leche, fueron enviadas al laboratorio de calidad de leche de LALA. Para cada muestra de leche se determinaron los porcentajes de grasa, proteína, lactosa y sólidos totales; así como el contenido de nitrógeno ureico en leche (mg dL^{-1}). Las determinaciones de estos componentes se llevaron a cabo en un equipo MilkoScanTM FT 120 (Multispec, Foss Food Technology Corp., Eden Prairie, MN). El conteo de células somáticas en las muestras de leche se determinó con un equipo Fossomatic 90 (Multispec, Foss Food Technology Corp., Eden Prairie, MN).

3.4.5 Variables de respuesta

El consumo diario de alimento ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$) fue obtenido restando el alimento no consumido al alimento ofrecido en cada ocasión. El consumo de materia seca ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$) se obtuvo multiplicando el consumo diario de alimento por el porcentaje de materia seca de la ración diaria correspondiente.

La producción de leche ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$) se determinó sumando las producciones de los tres ordeños. La calidad de la leche se determinó con los porcentajes de sus componentes como grasa, proteína, lactosa y sólidos totales, así como el nitrógeno ureico en leche (mg dL^{-1}) y la cuenta de células somáticas ($\text{células mL}^{-1} \times 1000$). La producción ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$) de grasa, proteína, lactosa y sólidos totales se obtuvo al multiplicar el porcentaje del respectivo componente en leche por el promedio de producción de leche semanal ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$).

La relación grasa (%): proteína (%) se obtuvo a partir de los porcentajes de grasa y proteína, la cual se obtuvo mediante el cociente de la división del contenido de grasa (%) entre el contenido de proteína (%). Cuando este cociente fue menor a 1 se generó una variable que indicó que la vaca mostraba una situación de leche pobre en grasa; a esta variable se le denominó

‘inversión’. Cuando este cociente fue mayor o igual que 1, la variable respectiva indicó que la vaca produjo leche con un porcentaje normal de grasa.

La producción de leche corregida por energía (LCE) se derivó de la ecuación de Tyrrell y Reid (1965), a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{LCE (kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}) = 12.55 \times (\text{kg de grasa vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}) + 7.39 \times (\text{kg de proteína vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}) + 0.2592 (\text{kg de leche vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}).$$

La eficiencia de producción de leche se calculó como el cociente de la producción de leche corregida por energía y el consumo de materia seca. El peso metabólico se obtuvo elevando el peso vivo a la potencia 0.75.

Los días al primer celo posparto, días a primer servicio y los días abiertos fueron calculados restando la fecha de parto de cada vaca a la fecha de registro de cada evento para cada vaca. Todas las vacas que se incluyeron en el experimento presentaron todos los eventos reproductivos de interés, por lo que no hubo información censurada.

3.4.6 Análisis estadístico

Las variables que se registraron en más de una ocasión en el transcurso del experimento, se sometieron a análisis de varianza para medidas repetidas utilizando el procedimiento MIXED de SAS (SAS, 2004). Se ajustaron a los modelos las covariables días en leche y la producción inicial de la variable respectiva, como se muestra a continuación:

$$Y_{ijkl} = \mu + T_i + S_j + T*S_{ij} + V_k(T)_i + \hat{b}_1(PI - \hat{\mu}_{PI}) + \hat{b}_{11}(PI - \hat{\mu}_{PI})^2 + \hat{b}_2(DEL - \hat{\mu}_{DEL}) + \hat{b}_{22}(DEL - \hat{\mu}_{DEL})^2 + e_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl} : es la l -ésima observación para cada una de las variables de respuesta (consumo diario de alimento, eficiencia, peso vivo, peso metabólico, condición corporal producción diaria de leche, leche corregida por energía,

grasa, proteína, sólidos no grasos, sólidos totales) medidas en la k -ésima vaca anidada en el i -ésimo tratamiento, registrada durante la j -ésima semana del experimento,

μ : es la media general,

T_i : es el efecto fijo del i -ésimo tratamiento (i = agua de pozo profundo, agua de ósmosis inversa),

S_j : es el efecto fijo de la j -ésima semana del experimento ($j = 1, \dots, 15$),

$T*S_{ij}$: es el efecto fijo de la interacción de tratamiento por semana del experimento,

$V(T)_{ik}$: es el efecto aleatorio de la k -ésima vaca, anidada en el i -ésimo tratamiento distribuido NI $[0, \sigma_{V(T)}^2]$,

PI: Es el registro inicial de la variable de respuesta siendo analizada (consumo diario de alimento, peso vivo, peso metabólico, condición corporal producción diaria de leche, leche corregida por energía, grasa, proteína, sólidos no grasos, sólidos totales) ajustada en el modelo como covariable,

$\hat{b}_1, \hat{b}_{11}$: Coeficientes de regresión asociados con el efecto lineal y cuadrático de la covariable 'registro inicial de la variable de respuesta siendo analizada',

$\hat{\mu}_{PI}$: Media estimada de la covariable 'registro inicial de la variable de respuesta siendo analizada',

DEL: Días en leche de la vaca en el día de muestreo, como covariable,

$\hat{b}_2, \hat{b}_{22}$: Coeficientes de regresión asociados con el efecto lineal y cuadrático de la covariable días en leche de la vaca en el día de muestreo,

$\hat{\mu}_{DEL}$: Media estimada de los días en leche de la vaca en el día de muestreo, y

e_{ijk} : Efecto residual distribuido NI $(0, \sigma_e^2)$.

Los modelos se ajustaron considerando las estructuras de covarianza de simetría compuesta, autorregresiva, autorregresiva de primer orden, autorregresiva heterogénea y la covarianza no-estructurada y se seleccionó la mejor con base al criterio de Akaike's AIC (SAS, 2004) y el criterio Bayesiano Schwarz. Las medias de cuadrados mínimos fueron comparadas con la prueba de Tukey con la opción PDIFF de SAS (SAS, 2004). Las interacciones de primer orden y covariables no significativas fueron removidas del modelo.

Los resultados se presentan como medias de cuadrados mínimos y el error estándar de la diferencia para la comparación de las medias de tratamientos. Para la interacción significativa de tratamiento por tiempo los resultados se presentan como medias de cuadrados mínimos $\pm$ su error estándar en figuras para facilitar su interpretación.

La variable denominada 'inversión', que indicó la presencia o ausencia de leche baja en grasa se analizó ajustando un modelo de regresión logística múltiple utilizando el procedimiento LOGISTIC de SAS (SAS, 2004).

Para esta variable de respuesta se supuso una distribución binomial, donde la probabilidad (P_i) de que la variable respuesta de 'inversión' asuma el valor de 1 (ocurrencia de evento) se modeló con la siguiente expresión:

$$P_i = \text{Prob}(y_i = y_1 | x_1, \dots, x_k) = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i)]}$$

Donde $P_i = \text{Prob}(y_i = y_1 | x_1, \dots, x_k)$ es la probabilidad de la variable 'inversión', y_1 es el primer valor ordenado de la variable de respuesta; β_0 es un intercepto, y los β_i 's son los coeficientes de regresión asociados con las variables independientes de tratamiento y semana del experimento (x_i). Adicionalmente, para cada variable independiente incluida en el modelo final de regresión logística múltiple, se calcularon los riesgos relativos o proporción de momios.

En el presente experimento los riesgos relativos son mediciones estadísticas que indican qué tanto es más probable que las vacas expuestas a un factor de

riesgo (consumo de agua de pozo profundo alta en STD) presenten un contenido de grasa inferior al de proteína en leche. Un riesgo relativo de 1 indica que no hay asociación entre el factor de riesgo y la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente que se modeló (Hosmer y Lemeshow, 1989). Los resultados de este análisis se presentan como coeficientes de regresión logística múltiple $\pm$ su error estándar, riesgos relativos y su intervalo de confianza al 95%.

Las variables que representaron intervalos de tiempo posparto se analizaron utilizando el procedimiento LIFETEST de SAS (SAS, 2004). Para cada variable se obtuvieron las curvas de sobrevivencia para cada uno de los tratamientos. Los resultados se presentan como la mediana de la variable analizada y su intervalo de confianza al 95% acompañado de los niveles de significancia de las pruebas de Wilcoxon y Log Rank generadas por el procedimiento LIFETEST.

3.5 Resultados y discusión

Los datos presentados en el Cuadro 8, indican que las vacas que consumieron agua proveniente del sistema de ósmosis inversa consumieron 9% menos alimento en base tal como se ofrece ($p= 0.0311$) y como materia seca ($p= 0.0337$) que las vacas que consumieron agua de pozo profundo. Estos resultados difieren de los reportados por Solomon *et al.* (1995), quienes obtuvieron consumos similares ($p>0.05$) para fuentes de agua alta y baja en sales (22.6 vs. 23.0 kg de MS vaca⁻¹ d⁻¹).

En el presente experimento la fuente de agua de bebida no afectó la producción de leche, la producción de leche corregida por energía y la producción de componentes en leche como grasa, proteína, lactosa y sólidos totales. Sin embargo, la eficiencia de producción de leche fue 7% superior ($p= 0.0220$) para las vacas que bebieron agua tratada con el sistema de ósmosis inversa (Cuadro 8). Los resultados concuerdan con lo reportado por Bahman *et al.* (1993), ya que al ofrecer agua de pozo con 3576 ppm de STD y agua con 449 ppm de STD a vacas lecheras, no se observaron diferencias en producción de leche. De

la misma manera, Arjomandfar *et al.* (2010) no encontraron diferencias ($p>0.05$) en producción de leche (570 ppm de STD= 32.8 kg vs. 1400 ppm de STD= 30.8 kg).

En contraste, Solomon *et al.* (1995) reportaron mayor ($p<0.05$) producción de leche y producción de leche corregida al 3.5% de grasa en vacas que consumieron agua baja en sales (35.2 vs. 33.1 y 31.6 vs. 29.8). Arjomandfar *et al.* (2010) observaron una tendencia en producción diaria de leche de dos litros a favor de vacas que consumieron agua baja en sales. Esta misma tendencia se observó en la presente investigación (2.2 kg más de leche vaca⁻¹ día⁻¹) a favor de las vacas que bebieron agua obtenida a través del proceso de ósmosis inversa. Sin embargo, en ninguno de los estudios citados reportaron la eficiencia de producción de leche, en donde pudieran haber encontrado resultados similares a los observados en la presente investigación.

Revelli *et al.* (2002) realizaron un análisis del impacto de la calidad del agua en varias unidades de producción en Argentina manejadas en condiciones de pastoreo, en el cual encontraron una ligera correlación negativa no significativa entre la producción de leche y los índices de salinidad, sulfato y dureza total, concluyendo que la producción de leche no se ve afectada por niveles elevados de estos componentes. De la misma forma, Revelli *et al.* (2005) reportaron que la alta salinidad del agua de bebida (STD>10000 mg L⁻¹) consumida por vacas Holstein de baja producción en pastoreo no afecta ($p>0.05$) su producción de leche (18.7 vs. 18.6 kg vaca⁻¹ día⁻¹) cuando se comparan con vacas en las mismas condiciones que consumen agua baja en sales (1000 mg L⁻¹ de STD) obtenida con sistema de ósmosis inversa. Asimismo, Valtorta *et al.* (2008) encontraron resultados similares bajo las mismas condiciones experimentales.

Los resultados de producción de componentes de la leche (Cuadro 8) difieren a los observados por Solomon *et al.* (1995), ya que ellos reportaron mayor producción de grasa ($p<0.05$) para las vacas que consumieron agua baja en sales (1.02 vs. 0.96 kg vaca⁻¹ día⁻¹) y una mayor producción de proteína ($p<0.05$) para el mismo grupo de vacas (1.01 vs. 0.93 kg vaca⁻¹ día⁻¹).

Cuadro 8. Medias de cuadrados mínimos y error estándar de la diferencia (EED) de las variables productivas ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$) para el efecto de fuente de agua de bebida para ganado lechero en estabulación en el norte de México.

Variable	Fuente de agua		EED	P>F
	Pozo Profundo	Ósmosis Inversa		
Consumo de alimento ^x	50.0	45.7	1.9	0.0311
Consumo de materia seca	26.8	24.5	1.0	0.0337
Producción de leche	38.6	40.8	2.2	0.3197
Producción de LCE ^y	34.7	35.5	2.1	0.7298
Eficiencia lechera ^z	1.3	1.4	0.1	0.0220
Producción de grasa	1.3	1.3	0.0	0.3603
Producción de proteína	1.2	1.2	0.1	0.9538
Producción de lactosa	1.8	2.0	0.1	0.2054
Producción de sólidos totales	4.6	4.8	0.3	0.6372

^x Base tal como se ofrece

^y LCE = leche corregida por energía ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$)

^z Eficiencia lechera = LCE/ consumo de materia seca

La Figura 4 muestra que existieron diferencias en consumo de alimento en la segunda semana del experimento y posteriormente de la semana 6 hasta la semana 10 del experimento, donde se muestra un menor consumo para las vacas que bebieron agua tratada con el sistema de ósmosis inversa.

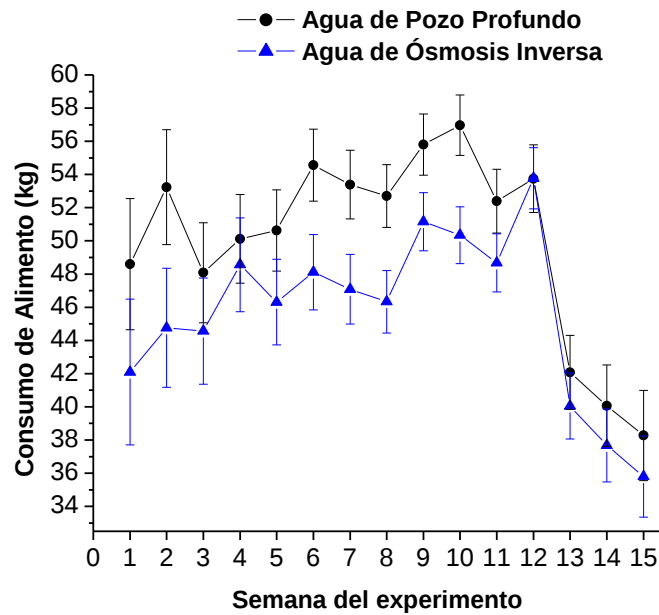


Figura 4. Interacción de tratamiento por semana del experimento para la variable consumo de alimento (en base tal como se ofrece).

La Figura 5 muestra que existió una mayor eficiencia en producción de leche para las vacas que consumieron agua obtenida por el proceso de ósmosis inversa, principalmente durante la semana seis a la semana nueve del experimento. Esta mayor eficiencia está relacionada con el menor consumo de alimento que se presenta en la Figura 4. Para las semanas posteriores no fue diferente la eficiencia en producción de leche para ambas fuentes de agua de bebida.

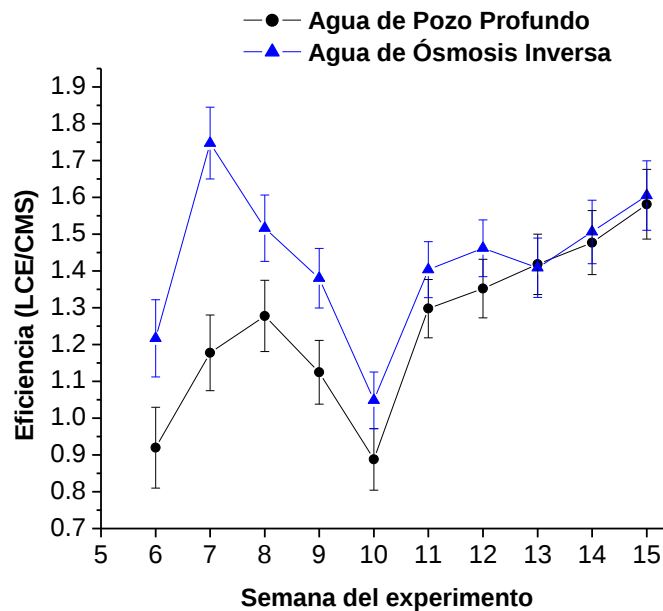


Figura 5. Interacción de tratamiento por semana del experimento para la variable eficiencia en producción de leche.

El comportamiento productivo de vacas Holstein que consumen agua alta en sales ha sido variable, y es posible que esta variación se deba al contenido y tipo de sólidos disueltos totales (STD) en el agua de bebida. Por ejemplo, Jaster *et al.* (1978) reportaron que en vacas Holstein que bebieron agua con más de 2500 ppm de cloruro de sodio, produjeron $1.9 \text{ kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y tuvieron una disminución de la persistencia en la producción de leche que las vacas que bebieron agua baja en sales.

La composición mineral del agua de bebida puede ocasionar desbalances minerales en ganado lechero, así como intoxicación por algunos elementos, ya que los consumos altos de cloruros y sulfatos son perjudiciales en la producción de leche. El agua salina generalmente contiene concentraciones altas de cloruros y sulfatos, de tal manera que aporta al consumo alto de estos elementos. Del mismo modo, las aguas salinas son altas en sodio; sin embargo, el consumo elevado de este mineral no reduce la producción de leche (Sánchez *et al.*, 1994).

Los componentes de la leche como el porcentaje de grasa, proteína, lactosa y sólidos totales no fueron afectados por la fuente de agua ($p>0.05$), así como el contenido de nitrógeno ureico en leche. La cuenta de células somáticas fue superior en 53% ($p= 0.0225$) para vacas que bebieron agua de pozo profundo (Cuadro 9). Estos resultados concuerdan con los reportados por Bahman *et al.* (1993) y Arjomandfar *et al.* (2010), ya que no encontraron diferencias en los componentes de la leche. Por su parte, Solomon *et al.* (1995) sólo reportaron un mayor porcentaje de proteína en leche de vacas que consumieron agua baja en sales (2.89 vs 2.84).

Los resultados del efecto de la salinidad del agua de bebida en los componentes de la leche han sido inconsistentes y variables en vacas Holstein en pastoreo. Por ejemplo, Revelli *et al.* (2005) reportaron que existió un porcentaje de grasa superior en 8.5% ($p<0.05$) en la leche de vacas que consumieron agua baja en STD que en la leche de las que consumieron agua alta en STD (3.3 vs. 3.0), lo cual determinó un incremento significativo ($p<0.05$) de 2.6% en la concentración de sólidos totales (12.1% vs. 11.8%) de la leche de las vacas que bebieron agua de mejor calidad. Estas diferencias pueden estar correlacionadas con el tipo de STD, ya que Revelli *et al.* (2002) establecieron una correlación negativa significativa ($r= -0.98$; $p< 0.05$) entre el contenido de sulfatos en agua de bebida y el porcentaje de grasa en leche, una correlación negativa significativa ($r= -0.98$; $p< 0.05$) entre la dureza total del agua de bebida y el porcentaje de proteína verdadera en leche y una correlación negativa significativa ($r= -0.96$; $p< 0.05$) entre la dureza total y el porcentaje de sólidos totales.

Cuadro 9. Medias de cuadrados mínimos y error estándar de la diferencia (EED) de las variables de calidad de leche para el efecto de fuente de agua de bebida para ganado lechero en estabulación en el norte de México.

Variable	Fuente de agua		EED	P>F
	Pozo profundo	Ósmosis inversa		
Grasa (%)	3.2	3.1	0.2	0.6072
Proteína (%)	3.0	2.9	0.1	0.2834
Lactosa (%)	4.8	4.9	0.0	0.6727
Sólidos totales (%)	11.8	11.6	0.2	0.2757
Grasa: proteína	1.1	1.1	0.1	0.7352
Cuenta de células somáticas ^z	288.1	136.3	62.0	0.0225
Nitrógeno ureico en leche (mg dL ⁻¹)	10.9	11.6	0.6	0.2541

^z células mL⁻¹ x 1000

Valtorta *et al.* (2008) no reportaron diferencias significativas para los porcentajes de grasa ($p= 0.194$), proteína ($p= 0.645$) y lactosa ($p= 0.984$), así como el contenido de nitrógeno ureico en leche ($p= 0.764$) en vacas Holstein en pastoreo, que consumieron agua con alto contenido de STD y agua con bajo contenido de STD.

El Cuadro 10 muestra que comparadas con las vacas que bebieron agua obtenida por ósmosis inversa, el riesgo de presentar una baja concentración de grasa en leche (inversión) en un determinado día del experimento, fue 3.3 veces más alto para las vacas que bebieron agua de pozo profundo. Asimismo, el riesgo de inversión fue 3.2 veces más alto para vacas de segundo parto cuando se compararon con vacas de tres o más partos. En relación con el efecto de la semana del experimento, el riesgo más alto de obtener leche pobre en grasa se presentó en la semana 9 del experimento.

Cuadro 10. Coeficientes de regresión logística múltiple $\pm$ error estándar, riesgos relativos (RR) e intervalos de confianza (IC) al 95% para los efectos de fuente de agua, número de parto y semana del experimento para la variable que indica la presencia de leche baja en grasa.

Variable	Coeficiente de Regresión	Riesgo Relativo	IC al 95% para el RR	Chi ²	$p > \text{Chi}^2$
Fuente de agua					
Pozo profundo	1.2 $\pm$ 0.3	3.3	[1.8, 6.1]	1.8	<0.0001
Ósmosis inversa	Referencia	0.0			
Número de parto					
2	1.2 $\pm$ 0.4	3.2	[1.6, 6.5]	9.8	0.0017
3	-0.1 $\pm$ 0.3	1.0	[0.5, 1.8]	0.0	0.8834
4 o más	Referencia	0.0			
Semana del experimento					
5	Referencia	0.0			
6	2.8 $\pm$ 1.1	17.0	[1.8, 156.9]	6.2	0.0126
7	2.1 $\pm$ 1.2	8.1	[0.9, 76.8]	3.3	0.0692
8	2.3 $\pm$ 1.1	10.1	[1.1, 91.6]	4.2	0.0407
9	4.0 $\pm$ 1.1	52.8	[5.8, 479.1]	12.4	0.0004
10	3.4 $\pm$ 1.1	29.4	[3.3, 260.5]	9.2	0.0024
11	2.1 $\pm$ 1.1	7.8	[0.8, 71.5]	3.3	0.0702
12	1.0 $\pm$ 1.2	2.7	[0.3, 28.4]	0.7	0.4213
13	2.1 $\pm$ 1.1	7.8	[0.8, 71.5]	3.3	0.0702
14	2.4 $\pm$ 1.1	11.3	[1.3, 101.8]	4.7	0.0304
15	3.5 $\pm$ 1.1	34.2	[3.9, 304.5]	10.0	0.0015

Las vacas que bebieron agua de pozo profundo presentaron un peso vivo y metabólico 5% ($p= 0.0283$) y 4% ($p= 0.0272$) superior que las vacas que bebieron agua obtenida por el proceso de ósmosis inversa (Cuadro 11). Resultados similares fueron reportados por Bahman *et al.* (1993) quienes observaron que las vacas que consumen agua de pozo (3574 mg L⁻¹ de STD) ganaron significativamente más peso que las vacas que consumieron agua desalinizada (449 mg L⁻¹). Sin embargo Valtorta *et al.* (2008) evaluaron el efecto de la salinidad del agua de bebida en vacas Holstein multíparas en pastoreo, a las cuales se les ofreció agua de bebida con diferentes niveles de sólidos disueltos totales y no reportaron diferencias en el peso vivo de las vacas.

Cuadro 11. Medias de cuadrados mínimos y error estándar de la diferencia (EED) de peso vivo, peso metabólico y condición corporal para el efecto de fuente de agua de bebida para ganado lechero en estabulación en el norte de México.

Variable	Fuente de agua		EED	P>F
	Pozo Profundo	Ósmosis Inversa		
Peso vivo (kg)	731.7	696.9	14.9	0.0283
Peso metabólico (kg)	140.6	135.5	2.1	0.0272
Condición corporal (Unidades)	3.1	3.0	0.1	0.3932

La Figura 6 muestra que sólo existió una diferencia significativa en la interacción de tratamiento con semana del experimento para la variable de peso vivo de la semana 8 a la semana 14 del experimento, sin embargo, la ganancia de peso tuvo una tendencia similar para ambas fuentes de agua de bebida.

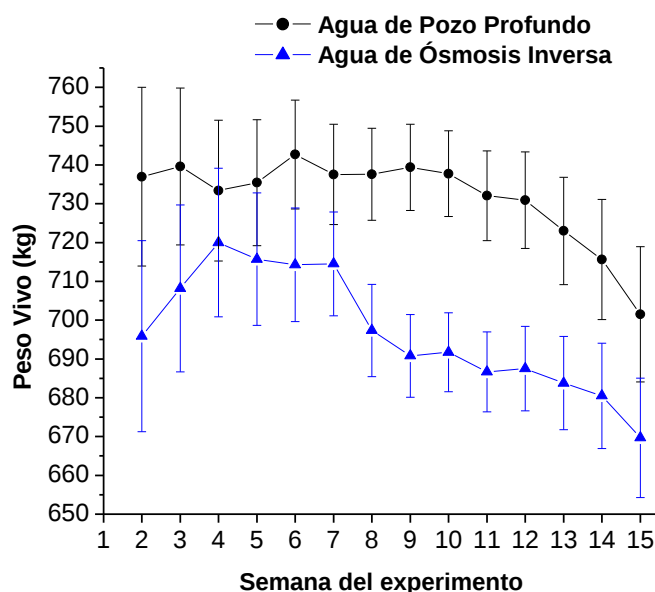


Figura 6. Interacción tratamiento por semana del experimento para la variable de peso vivo.

La fuente de agua de bebida no afectó las variables reproductivas días al primer celo posparto, días al primer servicio y días abiertos de las vacas en el experimento (Cuadro 12). El efecto de la salinidad del agua en el comportamiento reproductivo no es muy claro, ya que se han encontrado pocos

estudios al respecto, en donde el intervalo parto concepción (días abiertos) muestra una correlación positiva con la salinidad ($r= 0.81$), los sulfatos ($r= 0.51$) y la dureza total de agua ($r= 0.13$), para vacas Holstein en pastoreo, lo cual muestra un efecto adverso de estos componentes en la respuesta reproductiva (Revelli *et al.*, 2002).

Cuadro 12. Medianas e intervalo de confianza al 95%, entre corchetes, para las variables días a primer celo posparto, días al primer servicio y días abiertos de vacas Holstein-Friesian consumiendo agua de pozo profundo u obtenida mediante un proceso de ósmosis inversa.

Variable	Fuente de agua		Pr >Chi-cuadrada	
	Pozo profundo	Ósmosis inversa	Log rank	Wilcoxon
Días a primer celo	31.5 [19,33]	31.0 [14,35]	0.88	0.57
Días al primer servicio	66.0 [58,87]	77.0 [69,82]	0.22	0.15
Días abiertos	95.5 [58,134]	100.0 [71,167]	0.70	0.41

3.6 Conclusiones

El agua que es tratada mediante un sistema de ósmosis inversa para su posterior suministro a vacas lecheras en lactancia, mejora la eficiencia en producción de leche, debido a una reducción en el consumo de alimento sin afectar la producción de leche ni el comportamiento reproductivo de las vacas. El conteo de células somáticas se incrementa en vacas que consumen agua de pozo profundo, sin afectar la concentración de los componentes de la leche. Sin embargo, las vacas que consumen agua de pozo profundo tienen un riesgo mayor de producir leche con una relación grasa: proteína más baja que las que beben agua obtenida por el proceso de ósmosis inversa, y ese riesgo es mayor para vacas de segundo parto que para vacas de más partos.

3.7 Literatura citada

- Arjomandfar, M., M. J. Zamiri, E. Rowghani, M. Khorvash, and Gh. Ghorbani. 2010. Effects of water desalination on milk production and several blood constituents of Holstein cows in a hot arid climate. *Iranian Journal of Veterinary Research* 11 (3): 233-238.
- Bahman, A. M., J. A. Rooke, and J. H. Topps. 1993. The performance of dairy cows offered drinking water of low or high salinity in a hot arid climate. *Animal Production Science* 57: 23-28.

- Bede, D. K. 1993. Water nutrition and quality for dairy cattle. *In*: Western Large Herd Management Conference. Las Vegas Nevada, EUA. pp: 193-205.
- Cardot, V., Y. Le Roux, and S. Jurjanz. 2008. Drinking behavior of lactating dairy cows and prediction of their water intake. *Journal of Dairy Science* 91: 2257-2264.
- Challis, D. J., J. S. Zeinstra, and M. J. Anderson. 1987. Some effects of water quality on the performance of high yielding dairy cows in an arid climate. *Veterinary Record* 120: 12-15.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2000. Estudio de la contaminación difusa del acuífero de la Comarca Lagunera, Coahuila. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 85 p.
- Galyean, M. L., and T. May. 1996. *Laboratory Procedures in Animal Nutrition Research*. 15th ed. New México State University. Las Cruces. 193 p.
- García, E. 1988. Modificaciones del Sistema de Clasificación Climática de Köpen. 4a. ed., México, D.F. 217 p.
- Hosmer, D. W., and S. Lemeshow. 1989. *Applied Logistic Regression*. Jhon Wiley and Sons. New York, USA. 307 p.
- Jaster, E. H., J. D. Schh, and T. N. Wegner. 1978. Physiological effects of saline drinking water on high production dairy cows. *Journal of Dairy Science* 61: 66-71.
- Kramer, E., E. Stamer, J. Spilke, G. Thaller, and J. Krieter. 2009. Analysis of water intake and dry matter intake using different lactation curve models. *Journal of Dairy Science* 92 :4072-4081.
- Murphy, M. R. 1992. Water metabolism of dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 75: 326-333.
- NOM-127-SSA1-1996. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Publicado el 20 de junio de 2000 en el Diario Oficial de la Federación. 21 p.
- NRC (National Research Council). 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. Seventh Revised Edition. The National Academy Press. Washington, D. C., USA. 406 p.
- NRC (National Research Council). 2005. *Mineral Tolerance of Animals*. Second Revised Edition. The National Academy Press. Washington, D. C., USA. 510 p.
- Revelli G., R., O. A. Sbodio, E. J. Tercero, y M. Uberti. 2002. Impacto de la calidad de agua para bebida animal en relación a parámetros reproductivos, composicionales y reproductivos. *Revista FAVE Sección de Ciencias Veterinarias* 1(1):55-68.

- Revelli G., R. O. A. Sbodio, M. R. Gallardo, S. E. Valtorta, y E. J. Tercero. 2005. Rendimiento de vacas lecheras de baja producción en condiciones pastoriles con la oferta de agua de bebida salada o desalinizada. *Revista FAVE Sección de Ciencias Veterinarias* 4:77-88.
- Roche, J. R., N. C. Friggens , J. K. Kay , M. W. Fisher , K. J. Stafford , and D. P. Berry. 2009. *Invited review*: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *Journal of Dairy Science* 92: 5769-5801.
- Sánchez, W. K., M. A. McGuire, and D. K. Beede. 1994. Macromineral nutrition by heat stress interactions in dairy cattle: Review and original research. *Journal of Dairy Science* 77: 2051-2079.
- SAS Institute. 2004. *SAS User's Guide: Statistics*. Ver. 9.2. SAS Institute. Cary, N.C. USA. 5180 p.
- Sbodio O., A., G. R. Revelli, E. J. Tercero, M. R. Gallardo, y S. E. Valtorta. 2007. Influencia del contenido salino del agua de bebida animal sobre los componentes principales de las fase soluble en leche de vacas individuales. *Revista FAVE Sección de Ciencias Veterinarias* 4:61-68.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) . 2011. Resumen nacional pecuario. <http://www.siap.gob.mx>. Consultado el 15 de julio de 2011.
- Solomon, R., J. Miron, and D. Ben-Ghedalia. 1995. Performance of high producing cows offered drinking water of high and low salinity in the Arava desert. *Journal of Dairy Science* 78: 620-624.
- Tyrrell, H. F., and J. T. Reid. 1965. Prediction of the energy value of cow's milk. *Journal of Dairy Science* 48:1215-1223.
- Valtorta, S. E., M. R. Gallardo, O. A. Sbodio, G. R. Revelli, C. Arakaki, P. E. Leva, M. Gaggiotti, and E. J. Tercero. 2008. Water salinity effects on performance and rumen parameters of lactating grazing Holstein cows. *International Journal of Biometeorology* 52: 239-247.