

A pesar de que contiene de 12 a 14% de sólidos, la leche se comporta prácticamente como un fluido newtoniano, como el agua, ya que tiene una viscosidad de 2 centipoises. Cabe hacer mención de que algunos alimentos con más agua, entre ellos vegetales (por ejemplo, pepinos y melón) y las gelatinas, son sólidos o semisólidos, mientras que la leche es un líquido muy accesible a la cría. Tanto las micelas, como los glóbulos de grasa, son los principales responsables de la viscosidad de los productos lácteos, por lo que la leche descremada y el suero son fluidos con 1.2 a 1.5 centipoises, semejante aún más al agua, quien tiene un centipoise. El peso específico (Pe) de la leche depende de los diversos sólidos que contiene, de tal forma que existen ecuaciones que relacionan este parámetro con los sólidos no grasos y la grasa.

La reducción del punto de congelación (pc) de la leche por efecto de los solutos de bajo peso molecular (lactosa y las sales), se revisa en el capítulo 1; en general, el pc va de -0.52 a -0.57 °C, valor de referencia en los análisis crioscópicos para identificar adulteración de la leche con agua. Al comparar el pc de la muestra con el de referencia, se puede cuantificar la cantidad de agua añadida. Los mismos sólidos disueltos hacen que el punto de ebullición sea ligeramente superior al del agua pura a la misma presión; por ejemplo, la leche tiene un Pe de 100.17 °C, a 760 mm de Hg, la leche evaporada de 100.44 °C y la condensada azucarada de 103.22 °C. Es importante recordar que un mol de una sustancia disuelta en 1 000 gramos de agua reduce la temperatura de congelamiento en 1.86 °C y a su vez incrementa la de ebullición en 0.5 °C.

La acidez titulable normal se debe a la presencia de los grupos ionizables de las proteínas como los carboxilos de los ácidos aspártico y glutámico. El pH es de 6.5 a 6.7 y cualquier cambio en este valor indica una alteración del producto: por ejemplo, los pH menores se deben a una acidificación microbiana y los mayores a una posible infección de la vaca, como la mastitis.

Estado de dispersión de la leche

La leche es un sistema biológico muy complejo en el que se presentan tres estados físicos de dispersión de sus múltiples constituyentes: a) la lactosa, así como las sales, los cationes, los aniones y las vitaminas hidrosolubles, existen como una verdadera solución; b) las proteínas, las caseínas y las del suero, forman dispersiones coloidales, y c) las sustancias liposolubles se encuentran como emulsión. Aunque cada uno de estos sistemas posee una densidad diferente (1.05, 1.114 y 0.94 g/mL, respectivamente), están en equilibrio debido a mecanismos particulares de estabilidad; los distintos tratamientos a los que se somete la leche y sus derivados pueden alterar dichos sistemas y en consecuencia provocar la inestabilidad de los productos lácteos.

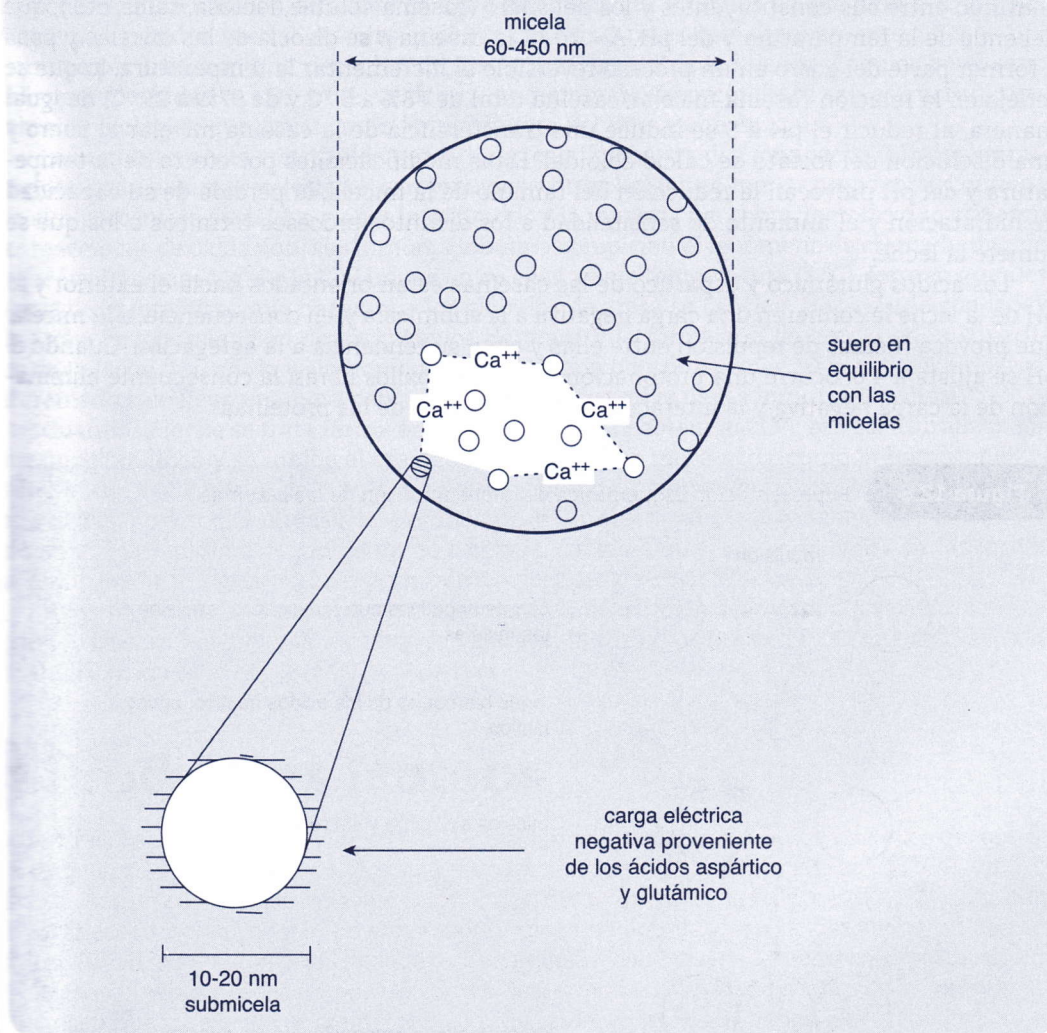
Fase micelar

Las caseínas interactúan entre sí formando una dispersión coloidal que consiste en partículas esféricas llamadas micelas con un diámetro que varía de 60 a 450 nm y un promedio de 130 nm. Su peso molecular es de muchos millones de daltones, con una densidad de 1.114 g/mL, están constituidas aproximadamente por un 92% de proteínas y un 8% de fosfato de calcio, y que existen 100 billones (10^{14}) por mililitro.⁹

A pesar de que existe mucha literatura científica sobre la posible estructura de las micelas, no hay consenso sobre el tema;¹⁵ sin embargo, un modelo propuesto considera que se encuentran a su vez constituidas por submicelas, también esféricas, de diámetro de 10 a 20 nm. La figura 12.5 muestra un esquema de este modelo, en el que se observa que esas

subunidades
tablecido, pe
grupos NH_2^-
que las zona
tes secuestra
la micela en
A su vez
y que se enc
53, 31, 11 y 5
contra la pre
hay más κ en
moléculas de

Figura 12.5 Estructura de la micela de caseínas y sus correspondientes subunidades.



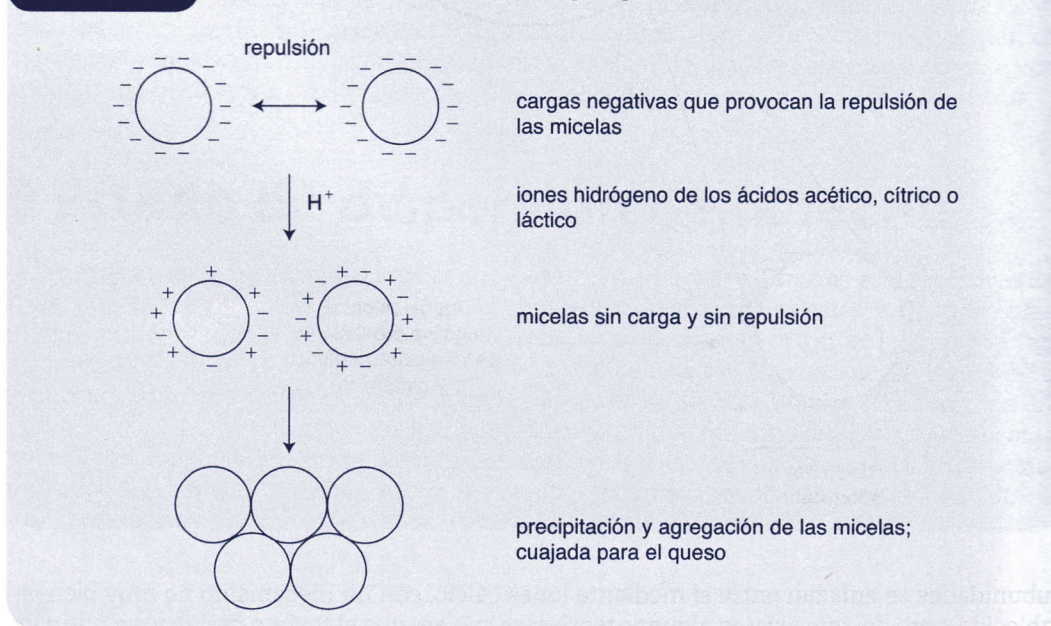
subunidades se enlazan entre sí mediante iones calcio, con un mecanismo no muy bien establecido, pero del que existen algunas teorías; se sugiere que el fosfato de calcio se une a los grupos NH_3^+ de la lisina, que el calcio interactúa directamente con los carboxilos ionizados y que las zonas fosforiladas de las caseínas favorecen el enlace iónico. Por esta razón, los agentes secuestradores del calcio o los procesos de diálisis, provocan la disociación reversible de la micela en las correspondientes submicelas.

A su vez, esas submicelas están constituidas por la interacción de las caseínas α , β , κ y γ que se encuentran en una proporción variable, pero que en promedio es de alrededor de 53, 31, 11 y 5%, respectivamente; hay que resaltar la función estabilizadora de la caseína κ contra la precipitación por calcio de las otras fracciones proteínicas. Se ha observado que hay más κ en las micelas pequeñas que en las grandes, y que las uniones hidrófobas entre moléculas de proteína son básicas para la estabilidad de las subunidades.

La micela actúa como una esponja, se encuentra muy hidratada con aproximadamente 3.8 g de agua por gramo de proteína, y su estructura porosa le permite un intercambio continuo entre sus constituyentes y los del suero (caseína soluble, lactosa, sales, etc.), que depende de la temperatura y del pH. A $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$ la caseína β se disocia de las micelas y pasa a formar parte del suero en un proceso reversible al incrementar la temperatura, lo que se refleja en la relación caseína micelar/caseína total de 78% a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de 97% a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; de igual manera, al reducir el pH a 5 se induce una transferencia de la caseína micelar al suero y una disolución del fosfato de calcio coloidal. Estas modificaciones por efecto de la temperatura y del pH provocan la reducción del tamaño de la micela, la pérdida de su capacidad de hidratación y el aumento de sensibilidad a los distintos procesos térmicos a los que se somete la leche.

Los ácidos glutámico y aspártico de las caseínas están orientados hacia el exterior y al pH de la leche le confieren una carga negativa a la submicela y, en consecuencia, a la micela, que provoca fuerzas de repulsión entre ellas y evita su tendencia a la agregación. Cuando el pH se ajusta a 4.6, ocurre una protonación de los carboxilos libres, la consecuente eliminación de la carga negativa y la interacción y precipitación de las proteínas.

Figura 12.6 Representación esquemática de la precipitación de las caseínas.



Además de las caseínas, las micelas contienen otras proteínas, principalmente algunas enzimas como la lipasa y la proteasa; la primera actúa con mayor facilidad sobre el glóbulo de grasa después de la homogeneización de la leche, debido a que este proceso induce la asociación no covalente entre micelas y glóbulos.

Por su parte, las proteínas del suero se localizan en forma de solución coloidal y están estabilizadas básicamente por su alto grado de hidratación; contrario a lo que ocurre con las caseínas, a éstas les afectan más las altas temperaturas y la presencia de sales deshidratantes. Las temperaturas elevadas ocasionan su desnaturalización, lo que a su vez favorece la interacción entre ellas, con la consiguiente formación de precipitados o coágulos.

Fase lipídica

La leche es una emulsión de gotas de grasa de diferentes tamaños, desde unos pocos micrómetros hasta unos cuantos milímetros. Los glóbulos de grasa se encuentran suspendidos en el suero (densidad menor que la del agua) y son estabilizados por las proteínas de la leche.

La membrana de los glóbulos de grasa está formada por las proteínas de la leche, las lipoproteínas, las globulinas, las enzimas y los lípidos. Un alto porcentaje de las proteínas de la leche participan en las reacciones de oxidación y reducción que provocan la agregación de los glóbulos de grasa y la formación de agregados proteínicos de gran tamaño, como los agregados de Stokes, la aglomeración de la leche fría, etc. El cremado sólo puede ocurrir si los glóbulos de grasa se agregan.

Cuando la leche se somete a un tratamiento térmico, las inmunoglobulinas y las proteínas de la leche, inducen la ruptura de los glóbulos de grasa y la agregación de las inmunoglobulinas. Hoy en día, la leche se homogeneiza y se evita la formación de agregados.

Además de las proteínas de la leche, se encuentran principalmente la lactoferrina y la sulfhidril oxidasa.

Producción

A partir de la leche se producen los derivados lácteos, como el queso, el yogur, la crema, etc. Los avances tecnológicos en la industria láctea han permitido la producción de leche entera, descremada y ultrapasteurizada. La leche se puede utilizar directamente como la cajeta; como leche condensada; como leche evaporada; como leche en polvo; como lactosa; como sólidos de leche.

Por contener un pH casi neutro, los derivados lácteos se obtienen directamente de la materia prima.

Leche pasteurizada

Uno de los métodos de conservación que destruye los microorganismos presentes en las distintas

● Fase lipídica

La leche es una emulsión de aceite en agua integrada por glóbulos de grasa de 4-10 μm , 25 veces más grandes que las micelas, y de los cuales se tiene aproximadamente $1.5\text{-}3 \times 10^{12}$ glóbulos por litro, con una densidad de 0.94 g/mL. La estabilidad de los glóbulos en el seno del suero (densidad = 1.05 g/mL) se debe a su membrana lipoproteínica con estructura típicamente biológica que actúa como emulsionante del tipo aceite en agua.

La membrana está constituida por 20% de fosfolípidos, tri, di y monoacilglicéridos, inmunoglobulinas, enzimas, colesterol, carotenoides y otros lípidos en menor proporción; contiene un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados y la mayoría del cobre, factores que aceleran las reacciones de oxidación; sus inmunoglobulinas propician el fenómeno de cremado, debido a que las fracciones IgM e IgA, al unirse entre ellas a baja temperatura (5 °C), forman grandes agregados proteínicos que hacen que los glóbulos de grasa se asocien. De acuerdo con la ley de Stoke, la aglomeración de los glóbulos de grasa y la formación de crema en la superficie de la leche fría, cruda y sin homogeneizar, debería ocurrir en unas 50 horas; sin embargo, el cremado sólo lleva una hora debido a la acción asociativa de las inmunoglobulinas.⁶

Cuando la leche se trata térmicamente, como en la pasteurización, se desnaturalizan las inmunoglobulinas y se inhibe el cremado. Los esfuerzos mecánicos, como la homogeneización, inducen la ruptura de la membrana del glóbulo, la reducción de su diámetro y la difusión de las inmunoglobulinas hacia el suero; esto también reduce la tendencia de la leche al cremado. Hoy en día este problema no es grave, debido a que la gran mayoría de las leches se homogeneizan y pasteurizan poco tiempo después de su recolección.

Además de estos constituyentes, a la membrana también se le asocian varias enzimas, principalmente la fosfatasa alcalina, la catalasa, la fosfodiesterasa, la xantina oxidasa y la sulfhidril oxidasa.

● Productos lácteos

A partir de la leche fresca se elaboran distintos derivados; algunos de ellos, como los quesos, se conocen desde hace muchos siglos y su preparación se practica desde entonces como un método de conservación, mientras que otros se han desarrollado en las últimas décadas gracias a los avances tecnológicos.^{1,10,28} En el mercado existe una amplia gama de productos lácteos: leche entera, descremada, deslactosada y descremada/deslactosada, en versiones pasteurizada y ultrapasteurizada; leche en polvo entera o descremada; condensada; evaporada; mantequilla; queso; suero de la leche; crema; leche fermentada, como yogur, búlgara, kéfir; dulce/natilla como la cajeta; caseínas (ácida, láctica, renina); caseinatos para uso comestible e industrial; lactosa; sólidos de mantequilla; ingredientes lácteos enzimáticamente modificados, y más.

Por contener un gran número de nutrimentos, y por ser un alimento tan completo, con un pH casi neutro y alta actividad del agua, la leche está sujeta a contaminaciones microbiológicas que la hacen un producto altamente perecedero. Los distintos derivados que de ella se obtienen representan una forma más estable, con una vida de anaquel mucho mayor que la materia prima de origen.

● Leche pasteurizada, ultrapasteurizada y esterilizada

Uno de los métodos más comunes de conservación de los alimentos es mediante calentamiento que destruye los microorganismos y las enzimas dañinas y que tiene efectos diferentes en las distintas fracciones de proteína de la leche; las del suero son las más sensibles.²⁵

● Homogeneización

La homogeneización se emplea en la industria para estabilizar los lípidos de la leche y evitar la separación de fases con formación de la correspondiente nata o crema. Primero se calienta, como en el proceso de pasteurización, para disminuir su viscosidad, licuar la grasa y facilitar el rompimiento de los glóbulos; en esas condiciones se pasa a través de una válvula con una abertura muy pequeña por donde las partículas alcanzan velocidades de 250 m/seg o más por efecto de las altas presiones ejercidas que van de 50 a 200 kg/cm². Los glóbulos originales, grandes en diámetro, se desintegran en un gran número de ellos de menor tamaño (<2 μm), lo que aumenta de 6 a 8 veces su área superficial. La homogeneización no sólo rompe los glóbulos de grasa, sino que además provoca una interacción lípido-proteína más estable.

Después de homogeneizada, la leche adquiere nuevas características y propiedades que hacen que se reduzca notablemente su tendencia natural al cremado y aumente la estabilidad de la fase lipídica; es decir, se desarrolla un estado de dispersión de la grasa que no tiene capacidad de formar la crema. Esto se atribuye a que la membrana original del glóbulo se rompe para dar lugar a una nueva, constituida por diferentes proteínas, caseínas y por el suero, que se unen a la superficie del glóbulo mediante enlaces hidrófobos, y a que las inmunoglobulinas pierden su capacidad de interactuar entre ellas, dado que ahora lo hacen con la caseína k. Al mismo tiempo, la densidad de los nuevos glóbulos aumenta por la influencia de las proteínas, con lo que se reduce el gradiente de densidades que originalmente existe entre las fases lipídica y proteínica de la leche cruda.

Por todo lo anterior, el sistema que se genera es tan estable que es muy difícil recuperar la grasa de la leche homogeneizada con los métodos tradicionales de centrifugación.

Dado que en este proceso se produce un gran número de pequeños glóbulos de grasa, la difracción de la luz es mayor y, por tanto, la leche adquiere un color más blanco; al mismo tiempo, este aumento del área superficial hace que los glóbulos se vuelvan más susceptibles a la fotooxidación, pero también se inhibe la oxidación iniciada por el cobre y los fosfolípidos, ya que éstos se solubilizan en el suero y pierden su efecto catalítico. Si la leche no está pasteurizada, la homogeneización puede provocar la acción de las lipasas activas sobre el glóbulo de grasa.

● Quesos

El queso es el producto que resulta de la precipitación de las caseínas (figura 12.6), que deja como residuo el llamado suero de la leche; para llevar a cabo este proceso se emplean básicamente dos métodos: por medio de la renina o cuajo, o bien, acidificación cercana al punto isoeléctrico de las caseínas (pH 4.6).

Los pasos fundamentales para su elaboración incluyen la coagulación de la leche, el cortado del coágulo, la eliminación del suero (desuerado), el salado, el prensado y la maduración (si se requiere). Hay quesos, de los llamados "frescos", que se consumen más en México, que no son madurados y son solamente salados o sazonados con especias.

En el mundo existen aproximadamente 1 000 variedades que comparten diversos pasos en su elaboración. Las diferencias de textura, aroma, sabor, etc., se deben sobre todo a factores como: a) tipo de leche: vaca, oveja, cabra, búfala, etc.; b) calidad de la leche: pasteurizada, cruda, pasteurizada "en frío", etc.; c) relación de concentraciones grasa-proteína; d) tipos de microorganismos y enzimas añadidos; e) velocidad e intensidad del desarrollo de la acidez; f) tipo y concentración de la enzima coagulante; g) grado y forma de deshidratación del coágulo; h) cantidad y forma de adición de la sal; i) forma y tamaño del queso;

j) condiciones de maduración, temperatura, humedad, etc.; k) tratamientos superficiales del queso, encerado; l) perforaciones en el queso para permitir la entrada de aire, y m) adición de enzimas o microorganismos para efectuar la maduración.

A continuación se relacionan los aspectos más relevantes de un procedimiento simple para fabricar quesos madurados.

Si se considera que se parte de una leche pasteurizada y homogeneizada, el primer paso es su acondicionamiento a 35-37 °C en la tina de fabricación para que el inóculo empleado crezca favorablemente. Los microorganismos utilizados varían según el tipo de queso, pero entre los más comunes destacan *Streptococcus lactis*, *S. cremoris*, *L. lactis* y *L. bulgaricus*, que se añaden en una concentración de 1% y se deja que actúen de 30 a 40 minutos, tiempo en el cual transforman la lactosa en ácido láctico, lo que aumenta un 0.01-0.02% la acidez de la leche y reduce el pH a 5.3-5.5.

En estas condiciones se añade la renina u otro cuajo que puede ser de origen microbiano, cuya actividad enzimática durante 30 minutos y provoca la coagulación de la leche mediante un fenómeno que se efectúa en dos pasos: a) hidrólisis de la caseína κ (enlace 105-106) en *para*-caseína κ y el macropéptido, que propicia la pérdida del sistema de estabilización de las caseínas, y b) formación del coágulo por la acción del calcio sobre las caseínas α y β que precipitan.²⁹

Cabe indicar que, en su estado natural, la leche puede estar contaminada con diversos microorganismos, por ejemplo, *Pseudomonas*, productores de proteasas termorresistentes capaces de modificar la acción enzimática del cuajo.

La medición de la firmeza óptima del coágulo para el siguiente paso del proceso es de mucha importancia y por lo general se realiza subjetivamente, de acuerdo con la experiencia del técnico; sin embargo, se han desarrollado algunos métodos objetivos basados en la determinación de sus propiedades reológicas.

El coágulo se corta longitudinal y transversalmente con liras metálicas para deshidratarlo y concentrar los sólidos. Los cubos formados son de tamaño variable, de acuerdo con el queso deseado; mientras más pequeños, mayor será el desuerado, lo que es deseable en quesos con bajo contenido de agua. La agitación lenta y el calentamiento aceleran la deshidratación, ya que además se favorece una generación extra de ácido láctico que ocasiona que las micelas se unan más estrechamente para integrar una estructura tridimensional continua de caseínas en la que queda atrapada la grasa y algo de suero. El resultado es un precipitado rodeado del suero que se recupera al abrir la válvula correspondiente de la tina. La caseína precipitada tiene una consistencia muy elástica, similar a la del hule, no tiene sabor ni aroma y está muy lejos de parecer un buen queso; a este sólido se le añade sal (de 1.5 a 1.8%), que contribuye al sabor y a detener la producción de ácido láctico. Después se coloca en moldes que se someten a presión para continuar con el desuerado, hasta llegar a la humedad final deseada.

Esta masa de caseínas contenida en los moldes puede o no ser inoculada con otros microorganismos para la maduración; se colocan en un cuarto con una humedad relativa de 80 a 90% a 10-15 °C, que propicia las condiciones ideales para que los microorganismos y las enzimas naturales y añadidas lleven a cabo una muy complicada red de reacciones químicas: las proteínas se degradan en aminoácidos, igual que los hidratos de carbono y los lípidos (en ácidos grasos de cadenas corta y larga), compuestos que a su vez entran en una secuencia de transformaciones interrelacionadas muy complejas, mediante las cuales se produce la textura y las decenas de compuestos responsables del aroma y el sabor.

El gusto mexicano está dirigido a los quesos suaves que recuerdan lo más posible a la materia prima, es decir a la leche, entre los que destaca el queso blanco que no utiliza cuajo o renina, sino que precipita la leche con la adición de ácido acético. Otros quesos un poco

más e
Entre
país);
cado c
cala a
(en Mé

● Su

A part
del cu
dulce,
acético
a su pH
tiene a
propie
El
tritiva
técnica
es cale
much
como

En
median
térmica
human
deben
Sus
tercam
ro de le
de prot
agua, c
bles, en
cármico
produc

mas elaborados, pero sin o con muy poca maduración, son el Sierra o Añejo y el Oaxaca. Entre los quesos madurados destaca el Chihuahua y el Manchego (Asadero en el norte del país); cabe aclarar que este último no tiene relación alguna con el Manchego Español, fabricado con leche de oveja y con hierbas aromatizantes. También se producen en pequeña escala algunas especialidades internacionales como *Camembert*, *Port Salut*, *Gruyère* y *Roquefort* (en México también conocido como Cabrales).

● Suero de la leche

A partir de 10 litros de leche se producen de 1 a 2 kg de queso y de 8 a 9 kg de suero de leche, del cual existen dos tipos que se diferencian por su forma de obtención: a) el llamado suero dulce, proveniente de los quesos fabricados con renina, y b) el suero ácido que utiliza ácido acético para la precipitación; éste es un subproducto de los quesos blanco y *cottage* y, debido a su pH, es muy corrosivo para los metales (cuadro 12.9). Los lactatos y los fosfatos que contiene actúan como amortiguador de pH y el equilibrio ácido-base influye en muchas de sus propiedades, en la estabilidad y en la precipitación térmica.

El suero tiene una proporción baja de proteínas, pero éstas poseen una calidad nutricional superior a la de las caseínas que conforman el queso. Se han desarrollado muchas técnicas encaminadas a su aprovechamiento; una de las más sencillas, de tipo casero, es calentarlos para precipitar las proteínas y después eliminar el agua por prensado; en muchas poblaciones de México se consume directamente después de salarlo, y se conoce como requesón.

CUADRO 12.9

Composición de los sueros del queso

	Dulce (%)	Ácido (%)
Sólidos totales	6.5	5.2
Lactosa	4.9	4.3
Proteína	0.8	0.6
Nitrógeno no proteínico (porcentaje del total)	22.0	27.0
Ácido láctico	0.15	0.75
Cenizas	0.56	0.46
pH	6.2	4.6

En la industria el suero se usa en forma deshidratada (una vez que se le elimina el agua mediante evaporación y se seca por aspersión), aun cuando el producto resultante se daña térmicamente y es poco soluble. Sus propiedades funcionales y usos en la alimentación humana dependen de los daños que pueda recibir durante su procesamiento, por lo que se deben tener controles estrictos de pH y de temperatura en el secado.³⁰

Sus sales y su lactosa se separan por ósmosis inversa, ultrafiltración y adsorción de intercambio iónico, con lo cual se concentran las proteínas; los llamados concentrados de suero de leche o WPC (siglas de *whey protein concentrates*) se comercializan con un 80% mínimo de proteínas, no están dañados térmicamente y se usan por su alta solubilidad, retención de agua, capacidades emulsificante, espesante y espumante, y por su formación de geles estables, en productos como yogur, quesos procesados y análogos, cremas, panadería, repostería, cármicos, formulaciones infantiles, aderezos, helados, sustitutos de leche reducidos en grasa, productos nutricionales, etcétera.