

Génesis, depositación, clasificación y distribución de evaporitas en la región mixteca oaxaqueña

Resumen

En las últimas tres décadas se han incrementado en forma significativa los estudios de rocas evaporíticas lo que ha hecho posible un mejor entendimiento de los procesos que actúan en la formación de estos sedimentos así como de los procesos diagenéticos posteriores a la sedimentación.

Las evaporitas se forman en climas relativamente áridos donde la evaporación excede el rango de la precipitación, las temperaturas, la fuerza del viento sobre cuencas someras o marismas que producen las condiciones de aridez suficientes para la formación de depósitos evaporíticos. En la región de la Mixteca

Oaxaqueña, existen depósitos de evaporitas en donde las capas tienen extensiones laterales continuas, de grandes dimensiones y están formadas por láminas de espesores más o menos uniformes, como se ilustra en el plano geológico generalizado de la provincia de Tlaxiaco. Para poder depositar sedimentos con estas características se necesitan condiciones físicas y químicas constantes y por supuesto en un área de grandes dimensiones, tal como el que presenta la Región Mixteca Oaxaqueña. Uno de los problemas principales que existen en estos depósitos es el de esclarecer cual fue en realidad la mineralogía original al momento de la precipitación, ya que es sumamente fácil pasar de un mineral a otro por hidratación o deshidratación, este

problema es importante no sólo por el hecho de entender el origen y la historia de la roca, sino también para poder apreciar varios aspectos geológicos asociados a estos depósitos evaporíticos.

Un sitio dentro de la Región Mixteca Oaxaqueña que cuenta con yacimientos evaporíticos se localiza dentro de la depresión geológica conocida como Cuenca o Provincia de Tlaxiaco, está emplazada en la provincia fisiográfica denominada “Mixteca Oaxaqueña”. Su marco tectónico está constituido por una serie de rocas complejas y de edades que varían desde el Precámbrico hasta el Pleistoceno. A partir del levantamiento continental a principios del Terciario sólo hubo depósitos de este tipo, formándose grandes espesores de rocas clásticas (capas rojas) producto de la erosión de las rocas preexistentes, derrames volcánicos y de tobas, conglomerados y depósitos evaporíticos (yeso, anhidrita, halita, travertino y posibles yesos redepositados).

Introducción

Las evaporitas se forman en climas relativamente áridos donde la evaporación excede el rango de la precipitación, las temperaturas, la fuerza del viento sobre cuencas someras o marismas que producen las condiciones de aridez suficientes para la formación de depósitos evaporíticos. Estos precipitados químicos no sólo están restringidos a los ambientes costeros, de hecho, pueden formarse en diferentes tipos de medios ambientes, tales como Salitrales Marginales, Salinas Marinas, Lagunas, Dispersión de Brisa Marina, Acumulación Hidrotermal y Depositación por nivel Freático. Lo que ha hecho posible un mejor entendimiento de los procesos que actúan en la formación de estos sedimentos, así como de los procesos diagenéticos posteriores a la sedimentación. Rocas evaporíticas se han reportado en todos los continentes y aproximadamente el 25% de las áreas continentales están subyacidas por este tipo de rocas.

Los depósitos de evaporitas de mayor extensión y grosor son de origen marino. Se ha calculado que a partir de una columna de agua de 427 metros de altura se precipitan 6.7 metros de Halita y 0.3 metros de Yeso, esto significa también que la proporción volumétrica entre el Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la Halita (NaCl) es de aproximadamente 1:25. Esta relación mantiene una gran discrepancia con las rocas evaporíticas antiguas donde el rango es 1:1 y en ocasiones mayor. Una

explicación satisfactoria a este hecho es que en algunos lugares costeros con restricciones físicas en el intercambio libre de agua de mar, ésta queda embalsada y el agua evaporada sólo es reemplazada eventualmente. Si la cuenca de evaporación concentra el agua hasta un punto próximo a la saturación de cloruro de sodio y posteriormente éstos son diluidos entonces un proceso repetitivo de esta naturaleza conduce a que la proporción 1:25 de Yeso respecto a la Halita sea superada. Los lugares donde este tipo de situación puede ocurrir realmente son pocos ya que requieren de condiciones favorables en el ambiente fisiográfico y climático, Kinsman, (1969). Así como la anhidrita (CaSO_4), se han identificado más de 80 especies minerales. Estos minerales son formados a partir de la precipitación química inorgánica de soluciones acuosas, en donde la concentración de iones llega a ser tan grande, que esta misma concentración provoca reacciones químicas y en donde comienzan agruparse las moléculas de cloruros, sulfatos y carbonatos para formar los minerales evaporíticos.

La anhidrita se presenta comúnmente en depósitos uniformemente estratificados, formando diferentes texturas y estructuras sedimentarias. El yeso ocurre en masas no uniformes o en capas estratificadas con cierta deformación debido al aumento de volumen que sufre la roca durante la hidratación; presentando diferentes texturas fibrosas o entrelazamiento de cristales y sedimentos. La halita, llamada también sal gema o sal de roca, se presenta frecuentemente asociada a otras evaporitas y puede ocurrir en forma de domos, en donde la halita se encuentra en la porción central del domo (núcleo) y está circundada por sedimentos, estando la parte superior del domo o capote formada por caliza, yeso y anhidrita indistintamente. Estos domos salinos son en realidad intrusiones sedimentarias las cuales se forman por la diferencia de densidades existentes. Las evaporitas, en este caso la halita, es menos densa que los sedimentos que la sobreyacen, por lo que al tener una cierta presión litostática, tiende a fluir hacia zonas de menor presión, por lo general hacia arriba, lo que provoca que la sal intrusiones a los sedimentos suprayacentes en zonas de debilidad de éstos.

Condiciones físico-químicas de precipitación

La evaporación de la solución (agua de mar) produce el siguiente orden de precipitación de minerales:

calcita, (calcita+yeso), yeso, (yeso+halita), halita, (halita+sales de potasio). Esta secuencia de cristalización fue propuesta por el químico Italiano Usiglio (1849). Los parámetros físico-químicos más importantes en la formación de evaporitas son la temperatura y la composición de la solución salina parental. Existen otros parámetros tales como el pH y el Eh, pero estos sólo tienen importancia en elementos trazas. Los cambios en la temperatura y en la composición de la solución salina son eventos post-depositacionales donde la diagénesis toma mayor importancia en la naturaleza de los precipitados químicos, por ejemplo la dolomitización de las calizas es un proceso característico en la diagénesis donde el magnesio reemplaza metasomáticamente al calcio. Los fluidos ricos en magnesio son producidos por la concentración del agua marina. La dolomita tiene también un origen autigénico en el cual el magnesio suple al calcio durante las primeras fases de la evaporación de agua de mar: $2\text{CaCO}_3 + \text{Mg}^{++} \rightarrow \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{Ca}$. El magnesio (Mg^{++}) es extraído desde la solución salina y el calcio (Ca^{++}) es añadido en su lugar. Siguiendo con el orden de precipitación el calcio libre en la fase de dolomitización entra en combinación con el radical sulfato para precipitar en forma de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Después de la precipitación de sulfatos el proceso de dolomitización se continúa y el exceso de calcio reacciona con elementos clorados durante una evaporación extrema.

Varios autores hablan también de un segundo ciclo de cristalización el cual ocurre durante el aporte de soluciones adicionales que producen recristalizaciones. La relación yeso-anhidrita es frecuente en la precipitación de los sulfatos ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) y está en función de la temperatura y la concentración de sólidos disuelto y en casos de evaporación natural el yeso es la fase estable del CaSO_4 y solamente bajo condiciones de salinidades extremas y altas temperaturas la anhidrita puede ser estable y algunos depósitos antiguos de anhidrita son productos diagenéticos del yeso. Después de la depositación del CaSO_4 el resto de precipitados depende del sistema agua y sodio, potasio, magnesio, cloro sulfato, como componentes independientes. Bajo condiciones naturales de evaporación solamente son importantes aquellas fases que cristalizan mediante soluciones saturadas de halita, estas relaciones de estabilidad se muestran en los diagramas de concentración-temperatura que muestra la figura de: Relaciones de Estabilidad de Mi-

nerales Evaporíticos Bajo Condiciones de Saturación de Cloruro de Sodio, que Holser. (1969), Phleger y Erwing, (1962) y Kinsman, (1969), llevaron a casi medio siglo de análisis experimentales.

Clasificación de evaporitas

Las evaporitas son rocas autógenas cuyo nombre se deriva precisamente de su origen, debido a la concentración iónica en las soluciones acuosas que se llevan a cabo debido a que al evaporarse el agua la relación soluto y solvente se incrementa. De todos los minerales evaporíticos identificados aproximadamente un 25% se presentan en cantidades significativas. Las rocas evaporíticas son clasificadas basándose en su composición mineralógica y por lo tanto química. En esta forma las rocas evaporíticas pueden estar divididas en cuatro grandes grupos principales que son: carbonatos, sulfatos, cloruros y bromuros.

Evaporitas continentales

Las variaciones morfológicas y composiciones de los ambientes continentales, tendría una gran influencia en los depósitos, teniendo como resultado, una gran variación de estos. Además de la gran variedad de minerales posibles, también si se tiene la influencia fluvial y pluvial que trae como consecuencia rápidas variaciones en los niveles freáticos y por consiguiente en las condiciones físico-químicas. Son pocas las cuencas no marinas que permanecen inundadas la mayor parte de su existencia y de echo estas fluctuaciones y variaciones son una de las mejores claves para la identificación de ambientes continentales. Las evaporitas continentales están asociadas usualmente a lechos rojos, caliches, depósitos fluviales y carbonatos lacustres con flora y fauna de características restringido, existen sabkhas continentales sumamente parecidos a los sabkhas marinos (Kinsman, 1969), generalmente se presentan en llanuras supralitorales y litorales; lo que es crítico para su interpretación es la totalidad del paquete sedimentológico.

Las evaporitas continentales precipitan también a partir de soluciones acuosas con gran concentración de sales disueltas, la principal diferencia con las evaporitas marinas radica en que las soluciones acuosas de las que provienen las evaporitas continentales comienzan siendo aguas sumamente ácidas (aguas freáticas o pluviales) que al infiltrarse van adquiriendo los elementos necesarios por la disolución de rocas preexistentes. Esta disolución se lleva a

cabo por las condiciones de acidez del agua, el agua ácida poco a poco cambia sus condiciones de pH al incluir en ella elementos básicos en disolución y por consiguiente aumenta la concentración de sales. Las rocas que proveen los elementos básicos pueden ser de cualquier tipo y aún se puede dar el caso de que la contribución sea debida a antiguos depósitos evaporíticos, cuando esta agua con altas concentraciones salinas llega a posiciones cercanas a la superficie o bien afloran en forma de manantiales, se les encuentran expuestas a las condiciones de temperatura existentes en el área y pueden seguir el origen de depósito encontrado. Para Usiglio, en las aguas marinas, los carbonatos son los primeros en precipitar y esto es debido principalmente a la pérdida de presión más que a la evaporación.

Evaporitas de supramareas y de aguas someras

Estos depósitos se encuentran situados en zonas áridas y semiáridas y están asociados a sedimentos clásticos y carbonatos marinos, con cantidades variables de aportes no marinos en las aguas subterráneas. Por estas razones estos sedimentos pueden ser considerados como depósitos marinos marginales. El espesor y extensión lateral de los depósitos de supramarea dependen en forma directa del clima, las fluctuaciones en las mareas, la pendiente de la plataforma marina y en forma preponderante de la influencia marina y continental. Siendo este ambiente sedimentario mucho muy amplio y variable.

En las facies de supramareas la mayor parte de los depósitos evaporíticos actuales, se encuentran intercalados, desplazando o bien reemplazando a sedimentos carbonatados o clásticos de origen eólico o marino. También es frecuente encontrar minerales evaporíticos, rellenando bioturbaciones, grietas de desecación o cualquier otra cavidad. Sherman, (1978) tipificó una secuencia vertical idealizada que representa un ciclo deposicional de ambiente de sabkha, esta secuencia incluye sedimentos de inframarea, intermarea y supramarea; con estructuras estromatolíticas, enterolíticas y nodulares. La mayor parte de los minerales evaporíticos encontrados en este medio, son producto de la precipitación directa a partir de agua marina subterránea, la cual invade las zonas continentales por falta de gradiente hidráulico en las aguas freáticas, o bien las aguas marinas son introducidas al continente durante tormentas o mareas altas en zonas de muy baja pen-

diente. El caso más común ocurre a partir de aguas marinas subterráneas. Esta agua sube a la superficie o muy cerca de ella por capilaridad en los sedimentos clásticos o calcáreos. Al llegar cerca de la superficie el agua comienza a ser evaporada y la concentración de sales aumenta considerablemente produciendo el fenómeno observado por Usiglio. Aunado a los sedimentos evaporíticos resultantes de las aguas marinas subterráneas, comúnmente se encuentran fragmentos de yeso, anhidrita y en ocasiones halita; los cuales fueron depositados como evaporitas subacuosas de aguas someras y que han sido transportadas a la zona de supramarea por el viento o durante períodos de tormenta. Los depósitos normales del sabkha están compuestos por lodos calcáreos o clastos, sulfatos nodulares, superficies de desecación, arena eólica o con estratificación cruzada; comúnmente controlados por carpetas de algas. Los sulfatos más comunes son yeso o anhidrita con cantidades muy pequeñas de celestita y barita. Los carbonatos son usualmente de origen marino y por lo general se encuentran dolomitizados. En sabkhas con matrices o relaciones calcáreas, el proceso mediante el magnesio es introducido a los carbonatos durante la dolomitización, provee los iones Ca^{+2} necesarios para las grandes acumulaciones de sulfatos. Esto resulta fisi-químicamente necesario ya que los iones SO_4^{-2} son más abundantes que los iones Ca^{+2} en el agua marina. El mineral principal puede ser yeso o anhidrita dependiendo de la temperatura y la presencia de ciertas impurezas orgánicas. El yeso se puede desarrollar en forma lenticular o como cristales tabulares dentro de las carpetas de algas o en las zonas freáticas de la porción más alejada de la línea de costa. Por otro lado el yeso y la anhidrita pueden desarrollarse como cristales pequeños formando masas que al crear van desplazando el sedimento del sustrato y pueden llegar a juntarse para formar capas continuas y capas enterolíticas.

Las carpetas de algas estromatolíticas (principalmente algas azules o verdes) forman las acumulaciones carbonatadas más antiguas que se conocen en el registro geológico. Las diferentes especies de algas existen en varias condiciones de salinidad, tomando un rango hasta salinidades de 80 partes por millón (cercana al agua marina). Existe una relación antipatética contra las algas azul-verdes y algunos gasterópodos herbívoros; en tal forma de que a pesar que las algas crecen en casi cualquier sitio, su preservación está restringida a las

áreas de variaciones extremas en la salinidad (de agua dulce a salobre o hipersalina) o en aguas de alta alcalinidad. Esto se debe a que en estas condiciones no pueden subsistir los gasterópodos lo que protege a las algas de la predación de estos organismos dando lugar a que tanto las carpetas de algas como los estromatolitos puedan desarrollarse a su máximo; como los encontrados al norte de Zapotitlán Lagunas y Parián, Oaxaca y Chiautla de Tapia, Puebla.

Dentro de las aguas hipersalinas las algas se encuentran a salvo, pero si la salinidad es incrementada a precipitar yeso. El incremento en la salinidad se puede efectuar por evaporación o bien por introducción de iones en la solución acuosa. El yeso comienza a precipitar entre las carpetas de algas que forman parte del sustrato, pero su formación es tan rápida que llegan a crecer hasta las carpetas más superficiales, incorporándolas dentro de los cristales de yeso. En otras ocasiones el yeso se forma únicamente como una costra sobre las algas; dependiendo de las condiciones de evaporación, movimiento de las aguas marinas y condiciones atmosféricas. Esta asociación entre algas y yeso precipitado se mantendrá mientras las algas puedan seguir obteniendo el agua y condiciones fóticas necesarias para su subsistencia, a pesar de la obstrucción que el yeso representa; pero cuando la salinidad es exageradamente alta, las algas cesan su crecimiento. En estas salinidades altas, las costras de yeso aumentan su espesor y desarrollan terminaciones normales de los cristales, las cuales son diferentes a las formas en crecimiento. Al parecer las variaciones morfológicas existen debido a un cambio considerable en la cantidad y calidad de materia orgánica presente.

En lagunas y reentrantes marinos con cuerpos de agua que presentan concentraciones salinas altas, en el rango de precipitación del yeso, se forman bancos masivos de cristales de yeso. Los rangos morfológicos de estos yesos están controlados exclusivamente por las condiciones cristalográficas del yeso, pero las formas exactas e impredecibles se puede observar que los cristales presentan maclas del tipo de punta de flecha; pero al mismo tiempo se ha visto que se presenta el maclado, la mayor parte de los cristales se rompen durante el crecimiento dando formas semejantes. El yeso que se está precipitando en la columna de agua necesita de oxigenación continua; por lo que por debajo de la zona fótica el agua pierde rápidamente la mayor parte del oxígeno libre que se encuentra en ella

y en estos casos el oxígeno es obtenido a través de bacterias, sulforeductoras. Debido a estas condiciones físico-químicas es casi seguro que los bancos grandes de yeso sean formados en la zona fótica. Aunado a las condiciones químicas se puede observar que estos depósitos presentan filamentos de algas. En algunos casos existen evidencias de estratificación, rizadura de corriente y rizadura de oleaje, por lo que todo parece indicar un origen de aguas someras, tal es el caso como los afloramientos de Zapotitlán Lagunas, el Cerro la Campana en San Juan Reyes y El Parián en la Región Mixteca Oaxaqueña.

Evaporitas de aguas profundas

Existen depósitos de evaporitas en donde las capas tienen extensiones laterales continuas, de grandes dimensiones y están formadas por láminas de espesores más o menos uniformes. Para poder depositar sedimentos con estas características se necesitan condiciones físicas y químicas constantes y por supuesto en un área de grandes dimensiones. Este tipo de depósitos es explicado como producto de precipitación química en medios marinos sobre aguas profundas, precipitándose así yeso, anhidrita y halita en capas laminares, que también pueden estar sujetas a la acción de las corrientes de turbidez. Las características de los depósitos de aguas profundas son la continuidad lateral por grandes distancias de cada una de las capas, así como la posible presencia de turbiditas; debido a la desecación de cuencas y de precipitación por diferencia de densidades.

En la desecación de cuencas estos son de dimensiones considerables en donde se alcanzan profundidades que exceden el límite de la zona fótica. Si en alguna forma este cuerpo de agua es aislado de la restante masa oceánica, entonces el cuerpo de agua aislado perderá paulatinamente volumen debido a la evaporación trayendo como consecuencia un incremento en la salinidad y el funcionamiento sería como un sistema de aguas someras siguiendo el orden de precipitación de Usiglio y aquí durante la etapa de restricción de la cuenca y formación de evaporitas es sumamente fácil que se presente las condiciones necesarias para que el fenómeno tome lugar siempre y cuando la cuenca tenga una amplia plataforma para poder tener la superficie suficiente con un volumen de agua moderado que sea factible de ser evaporado y que tengan pendientes suaves. Si la cuenca tiene límites con pendientes pronunciadas y una plataforma estrecha,

entonces la desecación o abatimiento del nivel del agua es menos factible, teniendo el inconveniente de que para alcanzar las concentraciones salinas propicias por la precipitación de minerales evaporíticos, es necesario eliminar más del 50% del volumen original, lo que requeriría de mucho tiempo y condiciones sumamente estables.

La diferencia de densidades se basa primordialmente en la interacción química de dos capas de agua con salinidades y densidades diferentes, que al ponerse en contacto producen la precipitación de minerales evaporíticos sin la intervención directa de la evaporación. Dentro de la cuenca existirá una cierta evaporación debido a que la superficie del agua está expuesta a las condiciones climatológicas, haciendo que esta evaporación produzca un incremento en la salinidad y densidad de la capa de agua más superficial al desplazarse hacia la parte interna de la cuenca. Cuando esta agua alcanza las porciones distales de la cuenca, tanto la salinidad como la densidad de la capa superficial de agua aumentará considerablemente produciéndose de esta forma un gradiente horizontal de salinidad a través de toda la cuenca. A medida que la capa acuosa superior se vuelve más densa, propiciando que capas se hundan en la columna de agua hasta encontrar aguas del mismo peso específico, en donde se producen una serie de soluciones acuosas con diferentes concentraciones en forma estratificada, las soluciones producidas durante largos períodos de evaporación, tendrán las mayores densidades y estarán enriquecidas en cloruros de magnesio, una vez que este sistema dinámico ha sido establecido, el proceso introducción de agua marina normal-evaporación-reflejo de agua saturada, mantendrá una secuencia estratificada de masas acuosas con diferentes concentraciones a diferentes profundidades. Si tomamos en cuenta las fluctuaciones relativas del nivel del mar a través del tiempo geológico, tenemos que; durante períodos prolongados da niveles del mar altos, por consiguiente la profundidad del agua en la cuenca y sobre la plataforma es mayor dando como resultado un intercambio de aguas entre la cuenca y el océano. En este caso existe suficiente tirante de agua en la zona de barrera para permitir el paso de corrientes de agua marina normal hacia dentro de la cuenca y al mismo tiempo prevalecerán corrientes en el fondo con mayor densidad y alta salinidad que fluye hacia fuera de la cuenca (reflujo). Si el nivel del mar baja, existirá condiciones de menor profundidad, por lo que únicamente las aguas con bajas salinidades podrán moverse

en reflujo fuera de la cuenca; continuándose este proceso hasta que únicamente entra el agua marina normal y el reflujo se lleva a cabo por filtración a través de la barrera. La cristalización de uno o más minerales evaporíticos ocurre a profundidad, en la interfase entre dos capas con concentraciones diferentes, al mismo tiempo se están formando las soluciones con diferentes concentraciones, se puede precipitar grandes concentraciones de halita en la superficie y en particular en las porciones distales de la cuenca. Los cristales de halita se pueden formar también en el fondo de la cuenca debido a soluciones con alta saturación de cloruros de sodio.

Ciclo yeso-anhidrita

Los minerales de sulfato de calcio pueden encontrarse en la naturaleza como cristales individuales, aislados o bien como agregados de cristales en rocas encajonantes calcáreas o detríticas, aún más frecuentemente forman la mayor parte de las evaporitas estratificadas, con proporciones menores de material calcáreo, silíceo o carbonoso. En la naturaleza los sulfatos de calcio están representados principalmente por dos minerales; yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y anhidrita CaSO_4 . Uno de los problemas principales que existen en estos depósitos es el de esclarecer cual fue en realidad la mineralogía original al momento de la precipitación, ya que es sumamente fácil pasar de un mineral a otro por hidratación o deshidratación, este problema es importante no sólo por el hecho de entender el origen y la historia de la roca, sino también para poder apreciar varios aspectos geológicos asociados a estos depósitos. Si el sedimento se encuentra ahora en la forma de anhidrita pero en realidad se formó como yeso, esto significa que tuvo forzosamente que existir una pérdida del 38% del volumen original, esta enorme pérdida de volumen presenta varios efectos secundarios como el cambio a un sedimento soportado por el fluido desalado (no soportado por granos), el fluido ejercerá una presión anormal en los poros que pueden llegar a ser cercana a la presión litostática si el flujo no encuentra la permeabilidad necesaria. Esta alta presión puede permitir que el depósito comience a fluir y por lo tanto crear estructuras de deformación dentro de cada capa, en ocasiones cuando se tienen horizontes similares, con presiones anormales, pueden actuar como focos para la generación de fallas de cabalgaduras.

En la naturaleza el ciclo entre los minerales de sulfatos de calcio, el cual resulta de las relaciones de es-

tabilidad mineral que se encuentran en un sistema químico sulfato-agua y la secuencia normal de depósito-soterramiento-levantamiento-erosión, el mineral original más factible de haberse formado al tiempo de depósito parece ser yeso, aunque pueden existir excepciones.

Este yeso podrá ser precipitado a partir de una masa de agua marina, la que fue evaporada hasta el punto de precipitación del yeso o bien pudo haberse formado en la zona vadosa o por debajo de ella en planicies de marea o lagos desérticos. El yeso formado en la zona vadosa o freática puede ser reemplazado localmente por anhidrita en condiciones cercanas a la superficie y esta puede persistir el soterramiento si el material se mantiene dentro del campo de estabilidad de la anhidrita; estando controlado por la temperatura, la actividad química del agua de la solución asociada y la presión, aunque puede ser reemplazado nuevamente a yeso dentro de los primeros metros de soterramiento. Los cristales de yeso originalmente precipitados como tales o como producto de reemplazamiento de anhidrita cerca de la superficie, son depositados al subsuelo hasta que se presenten las condiciones óptimas para el reemplazamiento por anhidrita, dependiendo de la salinidad de la solución acuosa circulante y del gradiente geotérmico, este proceso se lleva a cabo a una profundidad que varía de 300 a 3000 metros. Después de haberse realizado la conversión mineralógica, el siguiente paso será el depósito de la anhidrita a la superficie por medio de levantamiento tectónico o por erosión; durante esta etapa, la composición del agua subterránea tiende a ser menos salina que durante el depósito inicial y la profundidad de la transición anhidrita-yeso que será más somera, debido a la presencia de esta agua menos salobres al depósito evaporítico que tendrá una marcada tendencia a ser reemplazado nuevamente a yeso, este reemplazamiento se lleva a cabo en la parte alta de la sección en la zona cercana a la superficie debido a que la transición de anhidrita a yeso requiere de la adición de agua al sistema y esta no es fácil de incorporar a grandes profundidades ya que se encuentra con grandes presiones. En algunos casos la anhidrita alcanza los afloramientos en superficie sin haber sido reemplazado por yeso.

Distribución de evaporitas

Geomorfológicamente la depresión geológica conocida como Cuenca o Provincia de Tlaxiaco, está empla-

zada en la provincia fisiográfica denominada "Mixteca Oaxaqueña". Su marco tectónico está constituido por una serie de rocas complejas y de edades que varían desde el Precámbrico hasta el Pleistoceno.

A partir del levantamiento continental a principios del Terciario sólo hubo depósitos de este tipo, formándose grandes espesores de rocas clásticas (capas rojas) producto de la erosión de las rocas preexistentes, derrames volcánicos y de tobas, conglomerados y depósitos evaporíticos (yeso, anhidrita, halita, travertino y posibles yesos redepositados), estos afloran en la fosa correspondiente al valle de Tehuacán y Mixteca Oaxaqueña. Que durante la Orogenia Laramide ocurrió una regresión marina, levantamiento regional, fallamientos (en bloques y desplazamientos horizontales) y plegamientos afectando a toda la secuencia Mesozoica. En donde hubo condiciones lacustres que favorecieron los grandes depósitos y desarrollo de yeso como los que se exhiben en San Sebastian Tecomaxtlahuaca, Zapotitlán Lagunas, San Juan Reyes, Michapa de los Reyes, Santo Domingo Tonalá, Parián; estos depósitos se encuentran encajonados en rocas calizas de edad Cretácicas. Algunos yacimientos de yeso se encuentran en su etapa de explotación actualmente, como es el caso de Santo Domingo Tonalá y Parián con las variedades de selenita y nieve blanca.

Debe indicarse que en las localidades antes mencionadas aparentemente no hay una continuidad de los acontecimientos históricos, sin embargo puede observarse que los rumbos de los pliegues son generalmente Norte-Sur, a excepción del límite con el estado de Guerrero que se aprecia en un arco de plegamiento Este-Oeste con un intenso fracturamiento y fallamiento.

En la región de la Mixteca Oaxaqueña durante el Triásico parece haberse mantenido como un área continental aparentemente sin sufrir invasiones marinas de tal manera que la erosión llega a ser el proceso geológico dominante durante este período y parte del Jurásico Inferior. Durante el Jurásico Medio hubo en la Mixteca Oaxaqueña ambientes mixtos de depositación como lo demuestra la alternancia de rocas continentales y marinas en su mayor parte marginales que son una alternancia de areniscas, lutitas, lutitas carbonosa y que prueban un período inestable de los mares Jurásicos, la presencia de carbón en la región de San Juan Mixtepec. Tezoatlá-Santiago Tamazola, Olinalá, nos indican condiciones semicontinentales y la actividad tectónica durante el Jurásico y la base del Cretácico de esta región está com-

probada por la discordancia angular existente en las intermediaciones de Tezoatlán de Segura y Luna, la columna Jurásica que aflora en la cuenca de Tlaxiaco alcanza un espesor de unos 600 metros. Sin embargo durante el Cretácico el mar invadió de nuevo transgrediendo los límites del mar Jurásico y llegando a invadir gran parte de la región del Estado de Oaxaca, como lo demuestra la presencia de calizas Cretácicas cercanas a Puerto Angel, Miahuatlán, Teposcolula, Juxtlahuaca, santo Domingo Tonalá, Zapotitlán Lagunas, Huamuxtitlán, Santa Catarina Ocotlán y que hacen pensar que los océanos Atlántico y Pacífico, llegaron a unirse en esta época. Los restos de calizas Cretácicas encontrados yaciendo discordantemente sobre el Complejo Basal indica que aún estas grandes masas de rocas cristalinas descendieron de nivel, hasta permitir la gran transgresión del Cretácico, para la época del Terciario el territorio se vio afectado por el evento tectónico denominado La Revolución Laramide que provocó una emersión del continente separando definitivamente el Océano Pacífico del Atlántico.

Como se puede apreciar el estudio de las rocas en la Región de la Mixteca Oaxaqueña tanto superficial como del subsuelo es compleja, debido a los procesos geológicos externos e internos, en este caso se dispone de gran cantidad de minerales evaporíticos semejantes, sin embargo las impurezas, las características estructurales y la lejanía de los centros de consumo así como la falta de una comunicación apropiada hacen incosteable la producción comercial para ser explotados y que son materias primas para la industria 

Bibliografía

ARAKEL, A.B.V.

- 1980 *Genesis and diagenesis of Holocene evaporitic sediments in Hutt Lagoons, western Australia.* Jour. Sed., vol 50 no.4 pp1305-1326.

BUTLER, C.P.

- 1961 *Modern evaporite deposition and geochemistry of coexisting brines, the sabkha, Trucial Coast.* Vol 39 No. 39 pp 70-89.

ENCICLOPEDIAS OF EART SCIENCES. SEDIMENTOLOGY, GEOCHEMISTRY, Rhodes Fairbridge. Vol IV. 19.

GILL, DAN.

- 1977 *Salina A-1 sabkha cycles and the late Silurian paleogeography of the Michigan Basin.* Vol 47 No. 3 pp 979-1017.

HOLSER, W. T.

- 1966 *Diagenetic polyhalita in recent salt from Baja California: Am. Mineralogistg,* v.51, pp 99-109.

KINSMAN, D. J. J.

- 1969 *Modes of formation, sedimentary Associations and Diagnostic Features of Shallow-water and Supratidal Evaporites.* Amer. Assoc. Petroleum Geologists. Bull. pp 830-840.

KRUMBEIN, W. C. Y L.L.

- 1969 *Estratigrafía y sedimentología.* Editorial UTHEA.

LÓPEZ RAMOS, E.

- 1981 *Geología de México* Tomo II, segunda edición

ORTLIEB, LUC.

- 1978 *Reconocimiento de las terrazas marinas cuaternarias en la parte central de Baja California:* Univ. Nac. Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v.2, pp 200-211.

PHLEGER, I. B.

- 1969 *A Modern evaporite deposit in México:* Am. Assoc. Petroleum Geol. Bull. V. 53 p284-829.

SARG, J. F.

- 1981 *Petrology of the carbonate-evaporite facies transsition of the seven Rivers Formation,* vol 51 No. 1 pp 73-96.

SHERMAN, D. J.

- 1966 *Origin of marine evaporites by diagenes.* Inst. Mining. Met. Trans. pp 2208-215.

Joaquín Cirilo Guerrero Hernández
Universidad Tecnológica de la Mixteca