

## ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

### Características Generales de los Estuarios

El marco ambiental de la zona costera (lagunas, estuarios, marismas, esteros, ensenadas, bahías, etc.) es el producto de una interacción entre factores geológicos, físicos, químicos, climáticos y biológicos, cuyo resultado es en términos generales, que cada rasgo morfológico sea único, (De la Lanza Espino, 1994).

La elevación del nivel del mar ocasionó que el océano invadiera depresiones costeras, valles y deltas de ríos, y generara así la actual línea costera, incluyendo bahías y entradas de mar. En las áreas en donde existía aporte de agua proveniente del drenaje continental, se formaron estuarios y lagunas costeras, y ésta es una propiedad que distingue a esos cuerpos acuáticos (Contreras, 1985).

Hasta ahora todas las definiciones de "laguna costera" hacen hincapié en características geomorfológicas. Por otra parte, todas las referencias conceptuales acerca de "estuarios" ponen énfasis en las características de situaciones hidrodinámicas y gradientes, así como de estratificaciones salinas. La experiencia del profesor Yañez Arancibia (1978) y Yañez Arancibia y R. S. Nuget (1977), luego de trabajar en

estos cuerpos de aguas semicerradas, les permite afirmar que: "una laguna costera presenta características hidrodinámicas estuarinas; sin embargo, un estuario no siempre es una laguna costera. Esto determina que, desde el punto de vista ecológico parece razonable incorporar el concepto de medio ambiente lagunar estuarino". El medio ambiente lagunar estuarino se caracteriza por ser un ecotono litoral, que se encuentra en cuerpos de aguas someras, semicerradas; en depresiones por debajo del nivel medio de las mareas más altas, de volúmenes variables dependiendo de la precipitación, evaporación, escurrimiento, filtración y mareas, con temperaturas y salinidades también muy variables. tienen fondos predominantemente fangosos, alta turbidez, características de topografía y superficies muy irregulares, y comunidades de fauna y flora con un alto grado de adaptaciones evolutivas, cuyo origen es en parte marino y en parte dulce acuícola. La ecología estuarina se define como: "una comprensiva área de las ciencias a la que conciernen las propiedades y características físicas y químicas del agua, las fuerzas y procesos que forman y mantienen estas áreas y sistemas, y las relaciones entre el agua (gradientes de salinidad), la depresión, el clima, los organismos vivientes de la comunidad y los movimientos de la materia y la energía a través del sistema (Ortuzar, 1978).

La configuración de la zona costera no es regular y tanto puede presentar litorales más o menos lineales, como depresiones con diferentes características morfológicas. De esta manera se ubican bahías, estuarios y lagunas costeras, entre otros rasgos. La diferencia entre los dos últimos no es del todo establecida en la denominación regional o local y en consecuencia se confunden los términos. Los estuarios tienen una comunicación libre con el mar abierto, mezclándose las aguas de los aportes fluviales con las marinas; generalmente son perpendiculares a la costa, (Cameron y Pritchler, 1963). Las lagunas son cuerpos de aguas que se encuentran paralelos a la costa, separadas por un tipo de barrera con una comunicación al mar efímera o permanente, (Lankford, 1977).

Los estuarios no son un medio ambiente marino ni de agua dulce, y presentan numerosos problemas de carácter único. En ellos la variabilidad, es mucho mayor que en el océano abierto. La circulación, y las propiedades físicas y químicas del agua cambian rápidamente debido a variaciones en el rango de mareas, descarga fluvial, y condiciones meteorológicas. La variación estacional del rango de marea y la descarga fluvial en un estuario también influyen fuertemente la distribución espacial y temporal de los parámetros físico-químicos así como también el material suspendido. La circulación, que mueve agua salina del océano hacia dentro del estuario y mezcla esta agua con el agua de origen fluvial que se mueve

hacia el océano, es importante en la determinación y patrón de movimiento de todo el material suspendido y disuelto presente en un estuario. Las concentraciones de sales, contaminantes, oxígeno, plancton, nutrientes y sedimentos son en parte controlados por este patrón de movimiento y pueden variar grandemente en cortos períodos, (Cabrera, 1975).

Expuestas estas diferencias es fácil entender el intercambio entre estos cuerpos y el oceano adyacente e incluso las variaciones fisico-químicas, por ejemplo la salinidad que varía espacial y temporalmente en magnitudes y formas distintas, (De la Lanza Espino, 1994).

Las características de las lagunas costeras son por lo general: altos contenidos de nutrientes en agua y sedimentos, múltiples fuentes de producción primaria y secundaria, ingreso de energía al sistema mediante la acción de mareas y vientos, y el aporte de aguas dulces por escurrimiento o por efecto de ríos o emisiones freáticas. Variabilidad fisiográfica (origen, profundidad, superficie, acceso a aguas marinas, configuración) e hidrológica (variación de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, corrientes internas), (Suárez Morales, 1994).

### Características Químicas Generales de los Estuarios

Dentro del ambiente químico de los sistemas costeros, se lleva a cabo la transferencia y movimiento de un buen número de compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, cuyo ciclo es característico para cada cuerpo de agua, dependiendo de la interacción y equilibrio de los factores geológicos, físicos, químicos, climáticos y biológicos, (De la Lanza Espino, 1994).

Wedepohl, (1966), considera que buena parte de los elementos más abundantes provienen de la reacción entre la roca primaria con los volátiles procedentes del interior de la tierra. La mayoría de los cationes y algunos aniones de los océanos aparentemente proceden de la intemperización de los silicatos ígneos y los aniones más abundantes de los volátiles. Dentro de los elementos más abundantes los principales iones en las aguas de los ríos y océanos son: sodio, potasio, magnesio y calcio como cationes; y cloruros, sulfatos, carbonatos y en menor cantidad los bromuros como aniones. Las proporciones relativas en que se encuentran estos contribuyentes en el mar son virtualmente constantes e independientes de la concentración absoluta de sus sales; de esta manera se introdujo el término salinidad, peso en gramos de las sales disueltas en un kilogramo de agua de mar, partes por mil. Debido a que la proporcionalidad de las sales cambia en las lagunas y estuarios por la mezcla indefinida de los ríos y aguas mari-

nas, el término más adecuado fue cambiado por clorinidad, gramos de cloruros/Kg de agua, partes por mil, que representa un medio para cuantificar la mezcla, e incluso sus gradientes en espacio y tiempo (De la Lanza Espino, 1994). La complejidad química de los sistemas costeros debe principalmente a la mezcla de agua dulce y agua de mar, las cuales difieren en sus propiedades físico-químicas y composición química, (Aston, 1980).

El encuentro entre aguas marinas y epicontinentales establece una distribución vertical y horizontal de la salinidad en los estuarios, que ha permitido clasificarlos en forma general en dos grupos:

Estuario positivo: es aquel en el cual el aporte de agua dulce es suficiente para mantener una mezcla y un patrón de incremento de la salinidad desde la cabecera hasta la boca del estuario, en consecuencia puede corresponder a un ambiente polihalino, 18 a 30 partes por mil; la precipitación excede a la evaporación, el agua marina más densa entra por el fondo y sale mezclada con las continentales por la superficie (cuña salina), además de que puede presentar concentraciones bajas de oxígeno en el fondo del estero con alto contenido de materia orgánica.

Estuario negativo: denominado por algunos autores

antiestuario, se caracteriza por ser de regiones áridas de alta evaporación, que excede a la precipitación y escurrimientos; el agua marina penetra por la superficie y con la alta evaporación se torna densa y llega al fondo, lo que permite tener aguas más aereadas en ese nivel; son en buen número de casos hiperhalinos, > 40.0 partes por mil, por lo menos en una época del año (sequías); en algunas lagunas la comunicación con el mar está clausurada, o es efímera y estacional y no permite el intercambio por marea, (De la Lanza Espino, 1994).

La tierra que aportan los ríos, la agitación de sedimentos, la influencia de mareas, los procesos de descomposición en zonas profundas y los asentamientos humanos son factores que propician la variación química en los estuarios. Entre los constituyentes químicos de las lagunas que más se ven afectados y que son de gran importancia en su comportamiento con respecto a la ecología estuarina se mencionan a continuación:

- el pH es un parámetro considerablemente variable justificado por todos los factores que afectan a los estuarios causando un fuerte impacto sobre la biota acuática.
- los nutrientes, que son compuestos abundantes en las lagunas también tienden a ser afectados; una disminución ó aumento causa serios daños ya que participan en los

procesos de productividad primaria. Si hay sobresaturación de nutrientes, habrá sobrepoblación en la biota, esto produce cambios de pH, aparición de una asociación bacteriana dominante, producción de anoxia en la columna de agua, generación de ácido sulfhídrico o metano y baja en el potencial de reducción, (Contreras, 1965).

Dentro del proceso general diagenético, los compuestos de azufre han sido estudiados debido a su importancia como indicadores de óxido-reducción en la formación de minerales autógenos (Price, 1976; Berner, 1980) y en las variaciones de las condiciones físico-químicas (Cohen et. al, 1977; Jørgensen, 1979; Parkin and Brock, 1981) y éstas a su vez en los cambios de ciclos geoquímicos y sistemas biológicos. En el ambiente marino las especies de azufre se encuentran generalmente en forma de sulfatos ( $\text{CaSO}_4^{2-}$ ,  $\text{HSO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) en la columna de agua, a excepción de ciertas áreas y cuencas deficientes en oxígeno donde predominan las especies como sulfuros ( $\text{FeS}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HS}$ ,  $\text{S}$ ). En los sedimentos podemos tener la presencia de minerales como la mackinawita, greigita y pirita, (Ortega, 1986). En los organismos se halla como azufre orgánico formando parte de aminoácidos y otros compuestos nitrogenados, (Lehninger, 1981).

Existen diversas vías de entrada de las especies de azufre al medio marino, entre las cuales se pueden mencionar: ríos, atmósfera, vulcanismo marino y descargas residuales. De éstas, el aporte fluvial es el de mayor importancia. Se estima que los ríos aportan 360 megaton al año de sulfato, el cual viene a ser la especie de azufre más abundante, (Berner, 1972).

#### Comportamiento Químico en sedimentos

El sedimento de las lagunas costeras, es la fase donde se acumulan los nutrientes procedentes de la columna de agua, ya sea que provengan de la remineralización de los materiales orgánicos suspendidos en ella o de aportes fluviales, (De la Lanza Espino, 1994).

Los sedimentos orgánicos producidos bajo ecosistemas acuáticos, son típicamente anóxicos a pocos centímetros de la superficie, debido a que la proporción de oxígeno consumido es más grande que la proporción de oxígeno que se introduce al medio. Mucha de la materia orgánica en estos sistemas, es descompuesta a través de procesos anaeróbicos, (Jørgensen, 1977; Rich and Wetzel, 1978). El oxígeno en sedimentos es fácilmente consumido por bacterias y en casos extremos la descomposición es tan grande que las masas de agua anóxicas se extienden hasta partes superficiales de la laguna, al

igual los productos de mineralización que se obtienen por descomposición regresan al agua superficial, (Postma, 1978).

Los dos principales procesos que determinan las condiciones químicas en un depósito de sedimento son las tasas de sedimentación de materia orgánica y la tasa de renovamiento de agua intersticial, (Manheim and Sayles, 1974).

Dada la poca profundidad de los estuarios y las lagunas costeras, la fase sedimentaria representa un papel importante en la disponibilidad y retiro de nutrientes, con la tendencia a mantener contenidos más o menos homogéneos en la columna de agua, sobre todo cuando son asimilados por el fitoplancton. La fase sedimentaria puede convertirse en una fuente potencial e incluso crítica de nutrientes como el amonio y los ortofosfatos. El ciclo del nitrógeno en los cuerpos de agua costeros está determinado fundamentalmente por procesos biológicos, (Presley and Trefry, 1980) y (Hatton et al., 1982) y sedimentológicos, (Arenas y De la Lanza, 1990).

En aguas poco profundas, la fotosíntesis puede producir oxígeno en la superficie de los sedimentos durante el día. También los cambios estacionales en el régimen de temperatura afectan la velocidad de consumo y los perfiles de oxígeno en el agua intersticial. El perfil de oxígeno es, por lo tanto,

generado en principio por un número de procesos que toman lugar dentro de la superficie del sedimento, (Van der Weijden, 1992).

Revsbech et al. (1980), demostraron estimaciones altas de la profundidad de penetración de oxígeno dentro de los sedimentos, basados en el grosor del estrato oscuro, de la superficie oxidada. La parte anóxica dentro del estrato oscuro es frecuentemente más gruesa que la parte oxidada.

La degradación de materia orgánica, es principalmente un proceso oxidativo, en el cual aceptadores de electrones tienen que estar presentes; la secuencia en la cual los pares de electrones de los agentes reductores (grupos orgánicos, sustancias) con potenciales mayores, es que actúan antes que el siguiente par electrónico con potencial menor sea activo. Esta secuencia en sedimentos marinos es usualmente:  $O_2$ ,  $MnO_2$ ,  $NO_3$ ,  $Fe_2O_3$  /  $FeOOH$ ,  $SO_4$ ,  $HCO_3$ . Las bacterias especializadas en usar la energía liberada en cada una de las reacciones de oxidación-reducción (redox) obedecen esta secuencia, (Van der Weijden, 1992).

Knowles (1982), definió la desnitrificación como la reducción asimilatoria por bacterias esencialmente aeróbicas, de uno o ambos iones oxidados de nitrógeno (nitrato y nitrito),

para los óxidos gaseosos [óxido nítrico (NO) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)], los cuales pueden por si mismos ser reducidos a nitrógeno, N<sub>2</sub>. La desnitrificación es relacionada con el pH positivo, a un pH óptimo de 7-8, exactamente dentro del rango típico de sedimentos marinos.

Rutgers Van der Loeff et al. (1981), discutieron la nitrificación y desnitrificación que se presenta tal vez a nivel simultáneo en sedimentos con un alto contenido de materia orgánica.

La carga de elementos terrígenos y materiales orgánicos fluviales, experimentan una sedimentación y floculación gradual junto con los nutrientes que se encuentran adsorbidos y absorbidos; de ahí la importancia de la fase sedimentaria en los estuarios y lagunas como un almacén de materiales y energía de la zona costera, motivo por lo cual es necesario incluirlos en los estudios de balance de nutrientes en un marco ecológico o calidad del agua, (De la Lanza Espino, 1994).

#### Importancia de la Deposición de Materia Orgánica en Sedimentos

Una de las características más importantes de las lagunas costeras es su alta productividad biológica, que comúnmente

se genera a partir de un elevado aporte de nutrientes que favorece la producción y actividad bacteriana tanto en los sedimentos como en la superficie de la materia orgánica. Esta biomasa microbiana conforma un componente de relevancia en las tramas detriticas de reciclamiento de fósforo y nitrógeno. Lo anterior genera un ambiente favorable para la producción del fitoplancton, que constituye el alimento primordial para el zooplancton herbívoro. De esta manera se va conformando una red trófica especial, aunque en esencia no muy distinta de la que se puede identificar en áreas plenamente marinas. A pesar de esto, en las lagunas costeras los cambios ambientales se establecen en períodos más cortos debido a que las aportaciones externas (alóctonas) e internas (autóctonas) de agua dulce o marina responden a oscilaciones de carácter estacional. Como reflejo de esta variabilidad, los procesos biológicos internos tienden a ser más activos que en mar abierto, por lo que la flora y la fauna, tanto béntica como planctónica se ven sujetas a modificaciones considerables en su habitat. Sin embargo, estas variaciones son cíclicas, de manera que la propia estructura de la comunidad y la dinámica particular de los grupos faunísticos y florísticos que habitan en este tipo de sistemas se han adaptado a estas condiciones, (Suárez Morales, 1994).

La materia orgánica elaborada por los productores primarios, ya sea viva, particulada o en distintos estados de

degradación o disuelta, representa una energía directa para consumidores y potencial para heterótrofos respectivamente; su ciclo biogeoquímico también es referido como el del carbono en donde pueden quedar incluidas las sustancias húmicas, (De la Lanza Espino, 1994).

Es difícil suponer la magnitud de la concentración de la materia orgánica, pues su variación en el espacio y el tiempo es fruto del equilibrio entre las tasas de insumo y de reciclamiento. Las tasas de insumo se enfocan al estudio de transporte de sedimento, es decir la entrada de materia orgánica al área que en algunas lagunas es mayor la que entra que la que sale, por lo cual hay más material de deposición y más reacciones sobre ella. Una alta cantidad de materia orgánica en las lagunas conduce a una mayor productividad, por su aporte de nutrientes, (Strickland, 1972).

El importe neto de materia orgánica, es almacenada en el fondo, y puede ser proveniente de la producción primaria ya sea por algas o por plantas sésiles; la fauna viviente en el fondo aprovecha las grandes cantidades de materia orgánica y otra parte es consumida y modificada por bacterias. Dicha cantidad de material que se encuentra en deposición se ve definido por las tasas de descomposición de materia orgánica (demanda de oxígeno), tasa de agua renovada en la laguna y tasas de cambio entre el agua y el depósito. Estos procesos

son interrelacionados y promueven en cierta forma la remoción de materia orgánica, aunque ésta última principalmente se ve definida por la hidrodinámica de la laguna o área, es decir dependerá de los flujos que a ella lleguen. Un rápido cambio de agua entre una laguna y el mar adyacente promueven relativamente condiciones marinas puras e inhibe a la sedimentación del material reciente depositado y al existir un mayor movimiento de agua, las partículas portadas por los ríos u otros medios se encuentran afectadas por los rápidos flujos sin poder depositarse. Inversamente una laguna aislada con pequeños cambios con el mar adyacente contribuirá a un mayor reservorio de material proveniente de ríos ó erosiones para los sedimentos, (Postma, 1978).

El papel que juega la acumulación de materia orgánica en sedimentos marinos, en el ciclo geoquímico de carbono, nitrógeno, oxígeno y fósforo, y su papel en cambios globales es por ahora la más importante motivación para estudios detallados de los procesos que gobiernan la descomposición de materia orgánica y reciclamiento de los productos mineralizados, (Van der Weijden, 1992).

La degradación de la materia orgánica es un proceso biológico en el cual la macro-, meio- y microfauna es involucrada. La complejidad de estos sistemas es discutida

por Fenchel and Jørgensen (1977), quienes se enfocaron sobre el papel de las bacterias en el metabolismo de detritos orgánicos. Degens and Mopper (1975, 1976), notaron que la actividad de los metazoarios y no la actividad bacteriana, parecía ser la responsable de la descomposición de materia orgánica en la superficie de sedimentos óxicos.

Pedersen and Calvert (1990), concluyeron que las velocidades de degradación de materia orgánica son iguales para condiciones óxicas y anóxicas. En sedimentos con altas velocidades de sedimentación, la materia orgánica lábil es rápidamente enterrada porque ésta es degradada, mientras que en sedimentos con baja velocidad de sedimentación, apreciables cantidades de materia orgánica lábil pueden ser destruidas en la interfase sedimento-agua.

Algunos autores, consideran que la mineralización de la materia orgánica en sedimentos puede ser el factor que controla la disponibilidad de nutrientes, y que la velocidad de remineralización varía, entre otras cosas, debido a su composición química, la naturaleza y composición granulométrica del sedimento y las condiciones fisico-químicas y dinámicas del agua. El papel que juega la materia orgánica y el tipo de descomposición en el sedimento es trascendental, para la fertilidad de estos sistemas costeros, sobre todo en la movilización de nutrientes, (De la Lanza Espino, 1987).

## Comportamiento Químico en el Agua

### Intersticial de Sedimentos

La composición del agua intersticial asociada con los sedimentos marinos es influenciada por la historia hidroquímica del área dada, la interacción agua-sedimento (diagénesis), convección de los espacios intersticiales y movimiento de difusión de iones disueltos, (Manheim and Sayles, 1974).

La importancia del agua intersticial, radica en que sirve como un vehículo para transportar iones disueltos entre el sedimento depositado; se supone que la proporción de difusión iónica a través del sedimento es de una magnitud similar a la proporción de la reacción ocurrida dentro de la columna de sedimento, (Sweeney, 1980).

El factor principal de los cambios en la química del agua intersticial, lo es sin duda la descomposición de materia orgánica durante la primera diagénesis, debido a esto es más pronunciada la actividad en los estratos de la parte superior de los sedimentos. Los estudios del agua intersticial con énfasis sobre el consumo de oxígeno y otros aceptores de electrones y producción conjugada de donadores acompañada por la producción de dióxido de carbono y especies de nutrientes, tuvieron mucha contribución para el entendimiento de las

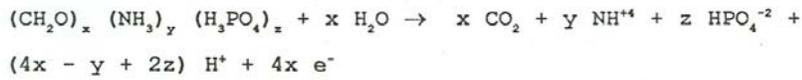
especies y los índices de los procesos de degradación que afectan a la materia orgánica dentro del sedimento. Además del papel que tiene la degradación de la materia orgánica, otras reacciones pueden también tener un impacto sobre cambios en la química del agua intersticial. Los sedimentos consisten de una mezcla de partículas sólidas inmersas en agua intersticial. Se presentan reacciones secundarias porque las partículas de una especie o en combinación con otros tipos diferentes, pueden ser inestables en su habitat sedimentario, dando aumentos para disolución, recristalización o neoformación de fases minerales, porque muchas reacciones tienen un impacto sobre la química del agua intersticial, los estudios de cambios en ella frecuentemente generan evidencias de la presencia de tales reacciones diagenéticas. La diagnosis de los perfiles de la química del agua intersticial pueden también revelar la presencia de fuentes (ejm. evaporaciones de asientos profundos) o hundimientos (de basaltos de pisos oceánicos) por constituyentes de agua intersticial y eventos sedimentológicos registrados (ejm. turbidez), (Van der Weijden, 1992). Revisiones sobre la química del agua intersticial y su uso en la interpretación de registros y procesos sedimentológicos y paleoceanográficos se pueden encontrar en (Rieke and Chilingarian, 1974; Gieskes, 1975, 1983; Manheim, 1976; Price, 1976 y Hesse, 1986).

Estudios sobre agua intersticial como menciona Gieskes, (1975), tuvieron desde entonces que ampliarse y ahora pueden ser resumidos como sigue:

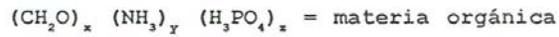
- (1) Estudios de las primeras diagénesis de materia orgánica, esto es, reacciones químicas concomitantes y velocidades de reacción que son involucradas, y su papel en el entierro o reciclamiento de sólidos y constituyentes disueltos en los sedimentos.
- (2) Conocer mejor las reacciones diagénéticas secundarias y su carácter (disolución, recristalización y neoformación de fases de mineral), que se presentan dentro de la columna sedimentaria en una variedad de regimenes depositados.
- (3) Generar información sobre cuales y cuantos flujos de elementos hay dentro o fuera de la columna de sedimento, esto es en los límites externos (interfase sedimento-agua).
- (4) Revelar eventos que cambian los límites o las condiciones limitantes como la salinidad, turbidez, intrusión de localidades ó umbrales, la presencia de fuentes de asientos-profundos (ejm., evaporaciones) o procesos de advección inducidos externamente (ejm., actividad hidrotérmica).

De acuerdo a Aller et al. (1983), las reacciones redox pueden aparecer de la siguiente manera:

(a)

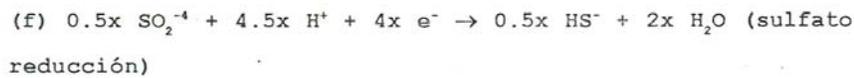
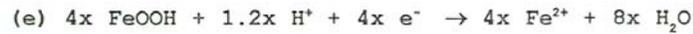
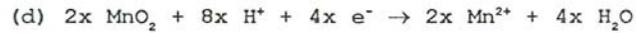
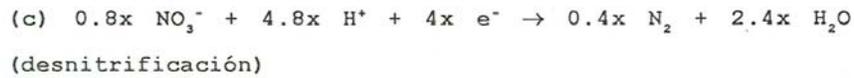


donde:



$$\text{e}^- = \text{electrón}$$

Para cada nivel redox durante la diagénesis, esta reacción puede ser combinada con una de las siguientes reacciones pertinentes:



Es posible traslapar algunas reacciones consecutivas en esta secuencia. La combinación de reacciones (a) con reacciones (b)-(f) substituyendo la relación Redfield  $x:y:z = 106:16:1$ , es discutida con gran detalle por Froelich et al. (1979). El término subóxico es utilizado para procesos que toman lugar cuando todo el oxígeno ha sido consumido y son involucradas las reacciones (c)-(e), (Van der Weijden, 1992).

Aceptando la fijación y conociendo la relación del carbono sobre elementos nutrientes en la degradación de materia orgánica, la estequiometría de estas reacciones puede ser usada ventajosamente para describir y explicar reacciones diagenéticas en los sedimentos para análisis cuidadosos de cambios en la química del agua intersticial (ejm. Emerson et al., 1980; Elderfield et al., 1981; Anderson et al., 1986; De Lange, 1986).

La química del agua intersticial, tiene cambios muy rápidos en el medio sedimentario. Anderson et al. (1986), dan características a un tiempo de un año para un perfil de agua intersticial en condiciones que se ajustan a cambios de 10 cm. Estos seguimientos no se hacen para cambios estacionales ya que los perfiles de agua intersticial se afectarían en la superficie de los sedimentos con altas velocidades de sedimentación orgánica, ejm., Rutgers Van der Loeff, (1980); Elderfield et al., (1981); Jørgensen y Sørensen, (1985); Martin y Bender, (1988).

El efecto de la degradación aeróbica de materia orgánica dentro del sedimento produce un decremento del pH del agua intersticial, debido a la disponibilidad de materia orgánica lábil, las velocidades de degradación, la presencia de buffers sólidos y constituyentes disueltos, así como la velocidad de difusión de las varias especies involucradas en el control del pH, (Van der Weijden, 1992).