

El transporte de sustancias en el océano y su concentración depende de distintos y numerosos factores medioambientales, tales como biológicos (acumulación y transporte mediante los organismos marinos), químicos (reacciones con otras sustancias y transformaciones a otras fases, por ejemplo, en gases o en productos sólidos), físicos (mezcla, coagulación, absorción, etc.) y mecánicos (transporte mediante las corrientes o estructuras dinámicas oceánicas, deriva, etc.).

En la mayoría de los procesos de mezcla en el océano intervienen tanto la advección como la difusión de sustancias. Si la velocidad del flujo cambia de un punto al otro, como, por ejemplo, pasa en los vórtices oceánicos, los efectos de cizalladura local van a transformar la mancha, cambiar su forma inicial y probablemente formar un campo de estelas en forma de espirales (Munk 2001). En algún caso el proceso de generación de convoluciones o mezcla a gran escala “stirring” se desarrolla sin difusión (turbulenta) apreciable. Pero casi siempre el proceso de difusión turbulenta, que llega hasta las escalas más pequeñas y por tanto produce mezcla molecular irreversible, tiene lugar en el océano. El área acuática donde actúa la difusión crece y los gradientes medios de la concentración de la sustancia derramada en el mar aumentan también. La diferencia principal entre los procesos de advección y difusión es que el primero puede ser reversible y el segundo no.

La difusión tiene lugar en muy distintas escalas: desde el nivel molecular (viscosidad y difusión moleculares) a escalas de procesos turbulentos oceánicos (de centímetros y metros en escala vertical a decenas y centenas de kilómetros en escala horizontal).

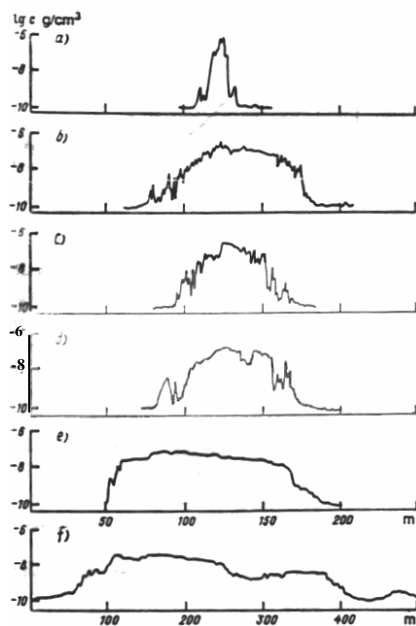


Figura 3.2.1. Distribución horizontal de la concentración de contaminante *in situ* dentro de a) 44 min, b) 93 min, c) 108 min, d) 128 min, e) 172 min, y f) 258 min. Fuente Ozmidov (1986).

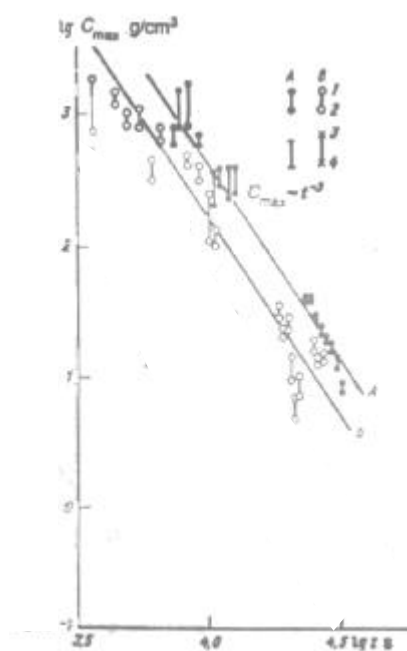


Figura 3.2.2. Cambio de la concentración  $C_{\max}$  en el centro de la mancha en función del tiempo [s]. A – experimento de septiembre del 1968 y B – experimento de agosto del mismo año. Fuente Ozmidov (1986).

En la figura 3.2.1 se muestra un ejemplo de cómo cambia la concentración de contaminante en una mancha depositada en la superficie marina en una escala de centenas de metros dentro de decenas de

minutos en el litoral del Mar Negro (experimento del año de 1968). Inicialmente la concentración disminuye de forma gaussiana pero poco a poco dominan los procesos no-lineales y aparecen nuevas escalas activas dinámicamente mientras el área de la mancha crece.

La figura 3.2.2 se muestra el cambio de la concentración máxima del contaminante  $C_{\max}$  en el centro de la mancha en la superficie marina en el Mar Báltico en función del tiempo en segundos (en un experimento similar cuyos resultados se muestran en la figura 3.2.1). La pendiente de la curva es 1/3 aproximadamente y  $C_{\max}$  es proporcional a  $t^3$ .

El estudio de difusión turbulenta se realiza mediante dos métodos generalmente. El primero, Lagrangiano, se basa en el seguimiento y análisis numérico de movimientos de las partículas o trazadores marcados de una u otra manera. Este método tiene sus raíces en la teoría de Einstein de análisis estadístico del movimiento Browniano. Taylor en el 1922 utilizó esta teoría para describir los principios de la difusión turbulenta. Según sus conclusiones, una partícula que en un momento dado tiene una velocidad y la dirección de su movimiento dentro de un pequeño período de tiempo no va a sufrir grandes cambios de sus características dinámicas, pero dentro de un período del tiempo mayor, sus movimientos estarán más y más dominados por procesos caóticos y la correlación de su velocidad con los valores anteriores disminuye. Si se analizan estadísticamente los resultados de experimentos del seguimiento del conjunto de partículas, podemos predecir las características medias de las velocidades de partículas en diferentes partes de la mancha y así obtener las características de difusión de un proceso concreto.

En el otro método, Euleriano, en calidad de la característica principal de la difusión turbulenta, se utiliza la concentración del volumen de la sustancia derramada al fluido y se considera que la velocidad del cambio de la concentración de la sustancia en un volumen dado depende del flujo de la masa a través de superficies que limitan este volumen. Se supone que el flujo dentro de una superficie elemental será proporcional al gradiente perpendicular de la concentración de la sustancia. Entonces, en este método la variable principal es la medición periódica de la concentración en diferentes puntos de la nube de la sustancia difundida (o número de las boyas usadas por unidad de área).

### 3.2.1. Difusión y fenómenos asociados

Además del transporte advectivo (tipo Lagrangiano) de derrames por corrientes y vientos, existe el desplazamiento superficial del crudo mediante la difusión turbulenta (no isotrópica).

La transformación de la concentración de contaminante normalmente se describe mediante una ecuación tridimensional de difusión turbulenta, teniendo en cuenta la interacción físico-química entre el contaminante y el medio ambiente y la existencia de fuentes puntuales contaminantes.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w + w_c) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K_v \frac{\partial C}{\partial z} + K_H \nabla^2 C + Q \mathbf{d}(x - x') \mathbf{d}(y - y') \mathbf{d}(z - z') - \frac{C}{t_0} \quad (3.4.1)$$

en el caso de isotropía horizontal ( $K_x = K_y = K_H$ ), donde:

$C$  - concentración de contaminante

$u, v, w$  - constituyentes de la velocidad de la corriente por ejes ortogonales  $x, y, z$

$w_c$  - la velocidad vertical del contaminante

$t_0$  - constante de descomposición bioquímica del contaminante

$\delta$  - la Delta de Dirac

$K_V, K_H$  - coeficientes de difusión turbulenta vertical y horizontal

$Q$  - flujo de la masa del contaminante por unidad del tiempo

$x', y', z'$  - coordenadas tridimensionales de la fuente de contaminación

La ecuación 3.4.1 describe no los campos instantáneos del contaminante y de la corriente, sino sus valores promedios obtenidos en un período del tiempo  $t$ .

La medida de la difusión turbulenta horizontal puede realizarse a partir del ajuste de una curva de Gauss a las dimensiones de la mancha de petróleo.

Si  $s_{(t)}$  es la desviación standard del tamaño horizontal de una mancha de petróleo se tiene (Einstein, 1905),

$$K_H = \frac{1}{2} \frac{ds_{(t)}^2}{dt} \quad 3.4.2$$

al mismo tiempo se puede evaluar la disminución de la concentración  $C$  en el tiempo de la siguiente forma:

$$C = C_0 e^{-\frac{t}{\tau_t}} \quad 3.4.3$$

considerando  $\tau_t$  como un período del tiempo característico de la difusión turbulenta, que a su vez depende de los factores ambientales (velocidad de la corriente  $u$  y  $v$ , altura del oleaje  $H$  y velocidad de fricción asociada al viento  $u_*$ ).

$$\tau_t(u, v, H, u_*)$$

Este parámetro caracteriza el tiempo de la persistencia de la mancha de petróleo en la superficie del mar. Las observaciones demuestran claramente una fuerte anisotropía en la dispersión además de la forma alargada de la mayoría de las manchas asociadas a estelas. En el apartado 4.2.4 discutiremos más sobre las escalas de difusión turbulenta, la relación entre la persistencia y la difusión turbulenta, el tamaño inicial y el tiempo de persistencia de las manchas en el mar.

### 3.2.2 Aspectos principales de la transformación de las manchas

Experimentalmente se ha demostrado que la velocidad de deriva superficial de derrames de crudo es el 60% de la velocidad de la corriente marina (Vladimirov et al., 1991). Bajo la acción del viento la velocidad de deriva superficial de derrames corresponde al 2% - 4% de la velocidad del viento.

Diversos modelos matemáticos permiten pronosticar el trayecto y el cambio de la forma geométrica de manchas de petróleo (Espino et al., 1998). Para efectuar los cálculos es necesario tener una exacta información hidrometeorológica "in situ" y las previsiones de los cambios en la adecuada escala espacial y temporal sobre la velocidad y la dirección de la corriente principal y del viento (Becerra et al., 1998). También es necesario conocer los valores empíricos de los coeficientes de difusión turbulenta.

Los datos aproximados sobre las corrientes marinas locales pueden ser estimados mediante varias fuentes científico-técnicas, tales como los resultados de estudios oceanográficos especiales, atlas y derroteros marítimos, cartas náuticas, etc.

La información sobre el estado del tiempo y los datos necesarios para el uso de los modelos matemáticos de seguimiento de las manchas puede ser obtenida en los centros meteorológicos. En los mapas periódicos meteorológicos de la superficie terrestre (1000 mb) hay datos del viento superficial, velocidad y dirección observados en las estaciones meteorológicas, también se tiene información de las isobaras (isolíneas de la presión atmosférica). Interpolando los valores de las isobaras y aplicando simples

cálculos de gradientes se puede obtener el campo vectorial del viento local, viento geostrófico o térmico teniendo en cuenta la espiral de Ekman (Hess, 1959). Además, los mapas de previsión sinóptica tienen información sobre las tendencias de cambios de la presión atmosférica, de desplazamiento de frentes, trayectos de ciclones, etc., que pueden dar una información complementaria.

Para efectuar un correcto seguimiento de las manchas de petróleo, en primer lugar, necesitamos una información hidrometeorológica lo más precisa posible en el lugar donde se encuentra la mancha oleosa. La información hidrometeorológica deberá de constar de datos sobre oleaje (la dirección, la altura de las ondas), la dirección y velocidad del viento en las estaciones meteorológicas más cercanas, mapas meteorológicos superficiales en la escala adecuada, previsiones del tiempo para uno, dos o tres días actualizadas según nuevos datos de observaciones meteorológicas. También son necesarios datos sobre las corrientes marinas predominantes (velocidad y dirección) en la zona de estudio, datos de las mareas, particularidades de la batimetría local.

Una de las mayores dificultades en el modelado matemático de la transformación y de la advección de los derrames de crudo es la determinación de los coeficientes locales de turbulencia: son empíricos y suelen ser determinados mediante los experimentos oceanográficos *in situ* (Bezerra et al., 1998; Bezerra, 2000; Díez et al., 2000). Para este caso, habitualmente, se usa la Ley de Richardson: los coeficientes se calculan aplicando análisis dimensional y métodos matemáticos (el cálculo de escalas integrales y dimensiones fractales) en el análisis de las series de las imágenes de satélites (Gade y Redondo, 1999; Jolly et al., 2000).

La llamada ley de “4/3” de Richardson (1926) puede derivarse fácilmente suponiendo que el espectro de la turbulencia es de tipo inercial (Kolmogorov, 1941), donde  $\epsilon$  es la dispersión de la energía cinética y  $k = 2\pi/l$  es el número de ondas.

$$E(k) = c \epsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (3.4.4)$$

Con la integral del espectro de la energía cinética de la turbulencia,

$$\int E(\mathbf{k}) d\mathbf{k} = \frac{1}{2} (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) \quad (3.4.5)$$

suponiendo isotropía e integrando obtenemos que  $u'^2 = c' \epsilon^{2/3} l^{2/3}$  con lo que

$$u' \propto \epsilon^{1/3} l^{1/3} \quad (3.4.6)$$

dando una de las hipótesis básicas de la teoría de Kolmogorov K41

$$\epsilon = \frac{u'^3}{\ell} \quad (3.4.7)$$

como dimensionalmente el coeficiente de la difusión turbulenta tiene dimensión  $[K] = L^2 T^{-1}$  o sea el producto de una velocidad por una escala, podemos utilizar las escalas típicas turbulentas que es una forma de la ley de Richardson.

$$K = u' \ell \propto \epsilon^{1/3} \ell^{4/3} \quad (3.4.8)$$

Utilizando la información adecuada se puede determinar la variabilidad espacial de los coeficientes horizontales de difusión turbulenta en mesoescala  $K(x,y)$ . Sus valores se pueden calcular según se describe en Jolly et al, 2000, utilizando la relación.

$$K(x,y) \approx l(x,y)^2 f \quad (3.4.9)$$

donde  $l(x,y)$  es la escala integral espacial definida como

$$l(x,y) = \int R(x) dx, \quad (3.4.10)$$

siendo  $R(x)$  la correlación espacial de las intensidades del SAR imagen;  $f = 2\Omega \sin\varphi$ ,  $\Omega$  es la velocidad angular de rotación de la Tierra y  $\varphi$  es la latitud. Normalmente los valores  $K(x,y)$  se obtienen en modo empírico realizando las mediciones de velocidades de difusión de colorantes o indicadores *in situ*. Es un procedimiento bastante complicado y para su realización es necesario aplicar métodos adecuados (personal cualificado, barcos o aviones para seguimiento de las manchas de colorantes, etc.), pero sus valores son muy importantes para los modelos numéricos de transformación y dinámica de derrames de crudo en la superficie oceánica.

[Regresar al Índice](#)

[Seguir](#)