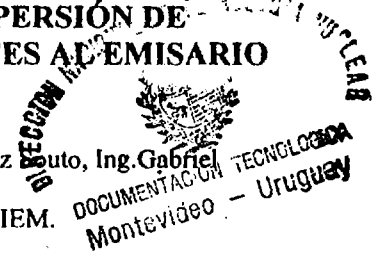




DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LAS AGUAS COSTERAS ADYACENTES AL EMISARIO SUBACUÁTICO DE PUNTA CARRETAS.

Dr. Roberto Suárez Antola, Lic. Alejandro Malek, Q.F. Rosario Odino, Q.F. Beatriz Artucio y A/P José Baralbar.

División Promoción y Desarrollo, Dirección Nacional de Tecnología Nuclear, MIEM.
Mercedes 1041, CP 11100, Montevideo, Uruguay.



RESUMEN: Se describen algunos resultados de estudios sobre procesos de transporte, efectuados mediante trazadores, en la pluma de descarga del emisario subacuático de Punta Carretas y en las aguas costeras adyacentes al emisario, en las condiciones preponderantes durante la temporada estival. Se comprobó el atrapamiento y la estabilidad de la pluma. Se simuló un vertimiento localizado y súbito de un contaminante. Se obtuvo un coeficiente de efecto de escala próximo a uno. Se estimaron coeficientes de dispersión longitudinal y transversales del orden de $1\text{m}^2/\text{seg}$ y $0.02\text{m}^2/\text{seg}$ respectivamente. Se discute la posibilidad de obtener información sobre las primeras etapas del transporte analizando grabaciones de video de una mancha de trazador fluorescente mediante herramientas de geometría fractálica.

(A) **Introducción:** Los estudios experimentales sobre los que se basa el presente trabajo fueron efectuados en el marco de los Proyectos URU/8/007 "Isótopos en Hidrología" y URU/8/009 "Calidad Ambiental de la Bahía de Montevideo". En una investigación previa sobre la circulación y la renovación del agua en la Bahía de Montevideo (efectuado también en el marco del Proyecto URU/8/007) se encontró evidencia indirecta acerca de un posible efecto contaminante de la Bahía sobre las playas del Departamento situadas al este (1). Por este motivo la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República y la Intendencia Municipal de Montevideo solicitaron a la Dirección Nacional de Tecnología Nuclear un estudio experimental específico, que incluyera ensayos en el emisario subacuático de Punta Carretas y una investigación sobre los procesos de dispersión en la franja adyacente a la costa, entre la Bahía y el Arroyo Carrasco (Fig. 1). En marzo y abril de 1993 se empleó yodo-131 para simular el vertido de un contaminante disuelto en el agua del emisario y poder estudiar así la estabilidad de su pluma de descarga (2). El cuerpo de agua receptor se encontraba estratificado, presentando dos capas superpuestas, separadas por una halóclina bastante neta. La pluma quedaba atrapada y se expandía horizontalmente por debajo de la halóclina, ocupando parte de la capa inferior del cuerpo de agua. Para estudiar lo que podría ocurrir si un contaminante se vertía en forma localizada y súbita en la capa superior de las aguas costeras adyacentes al emisario, en abril, mayo y junio de 1995 se simularon varios accidentes de contaminación inyectando soluciones de uranina y se midió el transporte advectivo y la dispersión de las manchas de colorante (3). En sus primeras etapas estos procesos se veían muy influidos por la forma de la mancha inicial y por las características de la microcirculación en la zona. Las técnicas de medición de las concentraciones de colorante, en flujo continuo mediante un fluorímetro a bordo y durante una secuencia de maniobras de navegación efectuadas sobre la mancha en cada una de las etapas de evolución seleccionadas, no permiten una resolución espacial suficiente para estudiarse efecto de histéresis. Por ese motivo se hicieron grabaciones de video de las manchas, desde un helicóptero, de modo de aplicar posteriormente técnicas digitales y herramientas de geometría fractálica. En todos los casos los estudios con trazadores se acompañaron de mediciones de temperaturas, conductividades y velocidades de flujo a diferentes profundidades y se complementaron con información meteorológica pertinente. La región donde se encuentra el emisario y sus alrededores forma parte de una franja de aguas costeras que se extiende desde la boca de la Bahía de Montevideo hasta la desembocadura del Arroyo Carrasco. En esta región más extensa se efectuó un estudio euleriano del transporte de una masa de agua marcada con tritio, muestreando sobre cinco transectas fijas. Los principales resultados obtenidos ya han sido comunicados (4,5). Si bien están muy relacionados con el tema que nos ocupa, no serán considerados en este trabajo. Nuestro propósito aquí es comparar y explicar algunos de los resultados obtenidos en experimentos lagrangianos efectuados en la pluma de descarga del emisario y en la capa superior de las aguas costeras adyacentes, centrando la discusión en la estimación de los parámetros de dispersión.

L

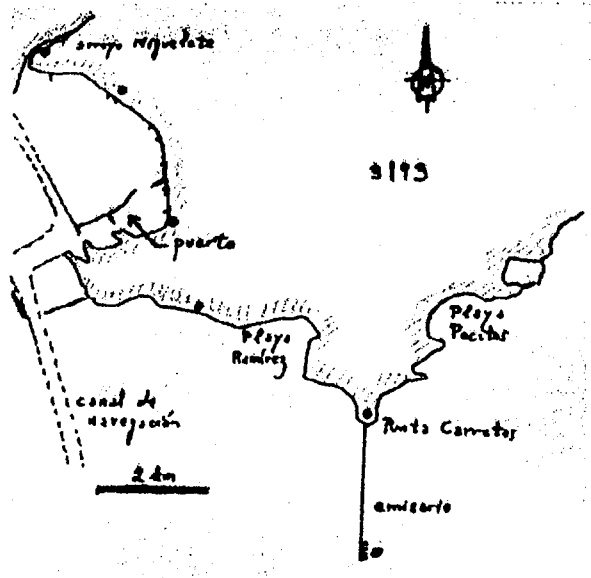


Fig. 1

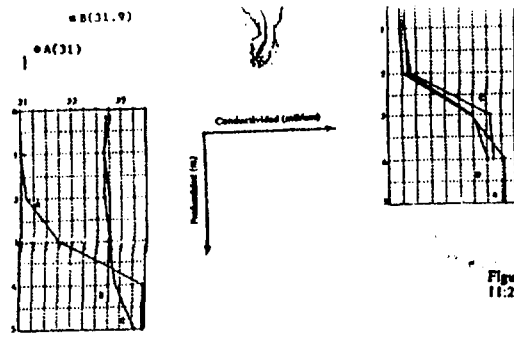


Figura 1.7. Valores de σ_t 11:23h (datos de tabla 1.7)

Fig. 2

(B) Estratificación del cuerpo de agua receptor - (Fig. 2).

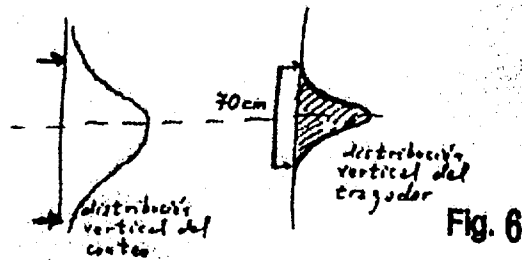
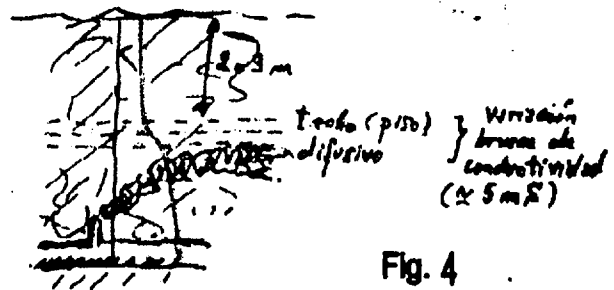
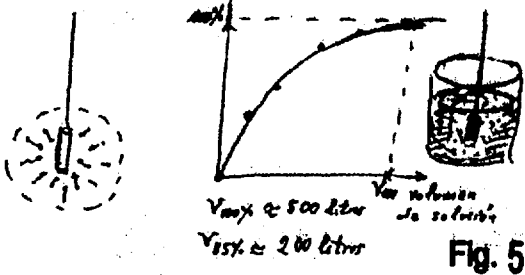
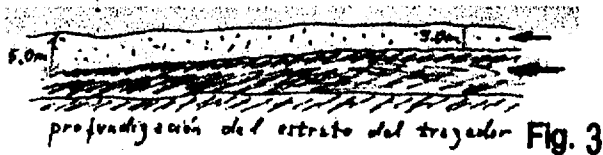
En los experimentos efectuados en marzo y abril de 1993 y 1995, se encontró que el cuerpo de agua presentaba una estratificación vertical bastante neta. Generalmente aparecían dos capas de agua superpuestas separadas por una pycnoclina. Por el contrario, en los experimentos de mayo de 1995 la estratificación vertical no era significativa. En marzo y abril las diferencias de temperatura entre la superficie y el fondo no superaban los 2 °C. En mayo no superaron las dos décimas de grado. Como una diferencia de temperatura de 2 °C equivale a una diferencia de densidad de 0.6 g/l, mientras que la diferencia de conductividad entre la superficie y el fondo era del orden de 10 mS/cm en marzo y abril, lo que corresponde a una diferencia de densidad de 7 g/l, la temperatura no incide en forma significativa en la génesis del perfil vertical de densidad. Cuando existe, la estratificación vertical se debe al perfil vertical de salinidad debido a la coexistencia de una capa superior de agua más dulce, de río, sobre una capa inferior de agua más salada proveniente del océano. Si bien la conductividad varía continuamente en cada capa, es posible determinar una halóclina asociada a una región de transición donde la salinidad varía bastante bruscamente. Los 10 mS/cm se distribuyen en unos seis metros de profundidad del cuerpo de agua, mientras que en la región de transición en torno a la halóclina la variación de conductividad es del orden de 5 mS/cm en menos de 1m.

Al mismo tiempo la conductividad variaba horizontalmente aumentando hacia el este tanto en la superficie como en el fondo. De un día para otro se producían variaciones en más o en menos respecto de los valores obtenidos previamente en el mismo punto y a la misma distancia de la superficie. Estas modificaciones, bien conocidas se deben al avance o al retroceso de masas de agua salada provenientes del océano, o de masas de agua dulce provenientes del río. Pero, el patrón de estratificación vertical se mantenían en todos los casos. Durante los experimentos sobre la pluma de descarga del emisario subacuático, la pycnoclina se encontraba a una profundidad de dos o tres metros de la superficie, a la altura de los difusores. Al avanzar hacia el oeste, la pycnoclina descendía progresivamente hasta situarse a cuatro o cinco metros de la superficie del agua, aproximadamente a unos 5 km, al oeste del emisario (Fig. 3).

Los experimentos con biplanos y correntómetros, así como las mediciones de velocidad efectuadas utilizando el frente de avance del trazador en la pluma de descarga del emisario, muestran en general una diferencia significativa en las velocidades promedio entre una capa y la otra, dependiendo de los vientos y del instante en el ciclo de la marea astronómica. Por ejemplo, durante el segundo experimento con yodo-131 en la pluma del emisario, las velocidades en la capa superior fueron aumentando desde 140 m/h hasta 310 m/h, mientras que las velocidades en la capa inferior aumentaron desde 360 m/h hasta 1200 m/h, para descender luego a 960 m/h hacia el final del experimento.

El gradiente vertical en la velocidad horizontal en la pycnoclina tiende a aumentar el transporte turbulento en dirección vertical. La variación brusca de la densidad en dirección vertical, a través de la pycnoclina tiende a disminuir ese transporte. Los efectos combinados de ambos procesos se pueden resumir en un número de Richardson local. El coeficiente de difusión turbulenta vertical, promediado sobre un ciclo de marea se puede correlacionar con el número de Richardson local, también promediado sobre un ciclo de marea (correlaciones de Mamayev, y de Munk y Anderson) (3) en situaciones como las consideradas en este trabajo, el coeficiente de difusión turbulenta puede disminuir en la interfase entre las capas hasta más de un 80% de sus valores en cada una de dichas capas. Por lo tanto la interfase opera como un verdadero techo para la difusión turbulenta vertical

en la capa inferior y como un verdadero piso para la difusión turbulenta vertical en la capa superior (Figuras 4 y 6).



(C) La estabilidad de la pluma y el factor de dilución en los difusores del emisario.

Se inyectó una solución de yoduro de potasio marcada con yodo-131 en una de las piletas de tratamiento previas al emisario, durante dos horas y tres cuartos, a razón de 0.5 litros por minuto. La concentración del trazador era de 1377 micro-curios/m³. La sensibilidad del detector en las condiciones del experimento fue de 2.1 cuentas por segundo (cps) por metro cúbico sobre micro-curio. Efectuando un balance de masa se puede estimar una concentración de 442 micro-curios por metro cúbico a la salida del emisario, cuando el flujo era de un metro cúbico por segundo. Esto corresponde a una respuesta de 928 cps en el detector. Como el máximo valor medido en el penacho formado a la salida de los difusores fue de 181 cps, esto indica que el factor de dilución en ese punto era de 5.1. La medición de la actividad del trazador mostró que el agua descargada quedaba atrapada por debajo de la pycnoclina, en forma completamente estable. Viajaba hacia el oeste arrastrada por la corriente de marea, aumentando paulatinamente su profundidad y expandiéndose horizontalmente más y más (Figuras 7 y 8).

El espesor inicial de la pluma de descarga puede estimarse a partir del factor de dilución mínimo, del flujo descargado por unidad de longitud del tramo de difusores y de la velocidad de la corriente ambiental (transversal al tramo de los difusores) (6). Si se toma un valor estimado de 400 m/h (que corresponde a la situación al comienzo del experimento), una longitud de 67 m para el tramo de los difusores y se tiene en cuenta el flujo total de un metro cúbico por segundo, se obtiene un espesor inicial de aproximadamente 0.7 m. El espesor estimado a partir de los perfiles de actividad (cps) medidos es de aproximadamente 2 m. Ambas estimaciones son compatibles entre sí por las siguientes razones. En primer lugar, el trazador no viaja en una lámina de concentración estrictamente constante y fronteras netas, como se supone al estimar el espesor de la lámina de la forma indicada. Su concentración disminuye en dirección vertical, desde un valor máximo en la capa central, en forma continua y hacia los bordes, más o menos rápida. En segundo lugar el detector es capaz de captar fotones gama provenientes de partículas marcadas situadas bastante lejos de él. En un experimento de laboratorio efectuado con agua de la región del emisario y con una concentración similar del trazador, se pudo estimar que este volumen de captación era de aproximadamente 500 l. (2). Aunque el peso del aporte de un pequeño elemento de volumen al número de cuentas total cae rápidamente con la distancia entre dicho elemento y el detector, este último comienza a producir una señal significativamente por encima del ruido de fondo cuando todavía se encuentra algo alejado de la nube de trazador (Figuras 5 y 6).

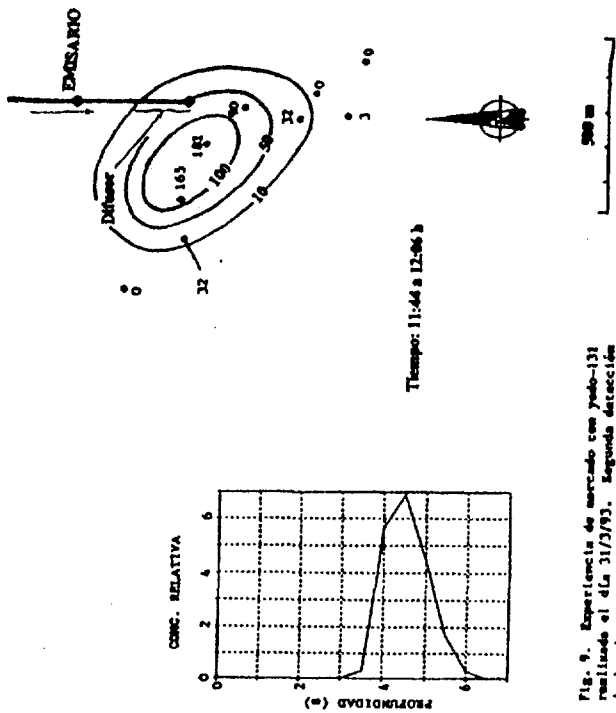


Fig. 7

Fig. 9. Experimento de marcado con yodo-131 realizado el día 31/5/95. Segunda detección de la pluma.

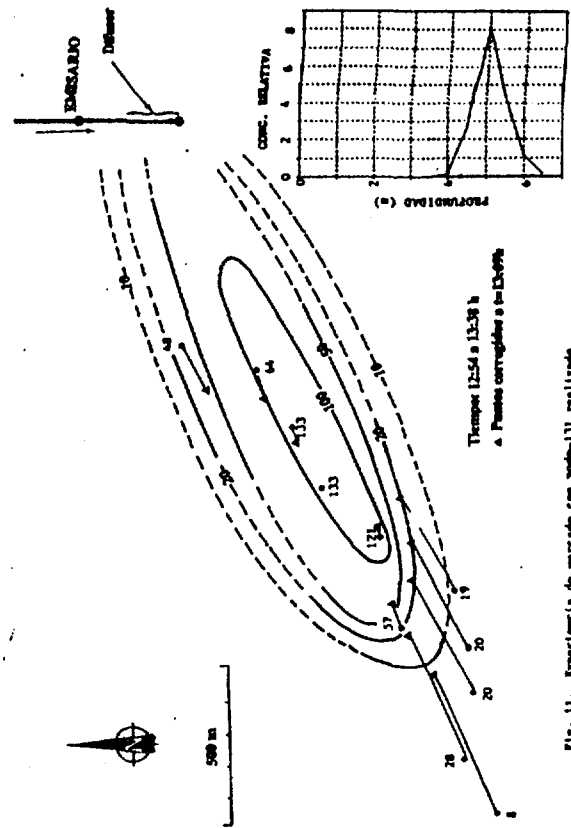


Fig. 8

Fig. 11. Experimento de marcado con yodo-131 realizado el día 31/5/95. Cuarta detección de la pluma.

(D) El efecto de escala y la dispersión.

Para determinar los parámetros de la dispersión se efectuaron dos inyecciones en la capa superior del cuerpo receptor estratificado y una inyección en el cuerpo receptor no estratificado. Las concentraciones se midieron empleando un fluorímetro a bordo operando en flujo continuo. Las maniobras de navegación en cada detección de la mancha fueron las usuales (7). Se corrigieron las coordenadas para tener en cuenta la advección durante las sucesivas pasadas componentes de una misma etapa de detección. Se obtuvieron las líneas de isoconcentración del trazador para cada imagen instantánea de una misma mancha (Fig. 9). Se utilizó el método de los círculos equivalentes (3) para determinar el parámetro q de efecto de escala, suponiendo un coeficiente de dispersión horizontal de la forma $E_h = A \cdot r^q$ (aquí r es el radio del círculo). Se obtuvieron valores de q comprendidos entre 0 y 1. Comenzando por valores próximos a 1 en las primeras etapas del proceso de advección-dispersión, el parámetro q disminuía continuamente hasta anularse cuando la nube del trazador se hacía lo bastante extensa (alrededor de hora y media después de la inyección). A partir de este momento se podía asumir un proceso de gradiente. Aplicando un procedimiento simple cuyos fundamentos fueron expuestos previamente (3) se obtuvieron las siguientes estimaciones para los coeficientes de dispersión longitudinal K_L y transversal K_T , correspondientes a los experimentos efectuados en mayo de 1995: $K_L = 0.83 \text{ m}^2/\text{seg}$ y $K_T = 0.018 \text{ m}^2/\text{seg}$. En los demás experimentos los coeficientes K_L también resultaron del orden de $1 \text{ m}^2/\text{seg}$ mientras que los coeficientes K_T resultaron de treinta a cincuenta veces menores.

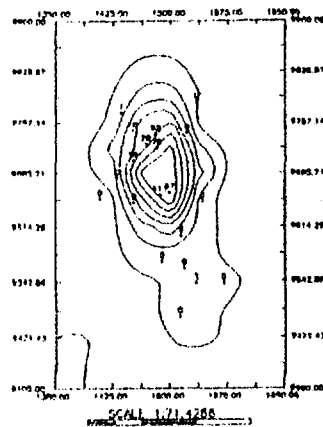


Fig. 9

(E) Discusión y Conclusiones.

- (a) En las condiciones de estratificación predominantes en la temporada estival la pluma de descarga del emisario subacuático queda atrapada en forma estable en la capa inferior del cuerpo del receptor. Se expande y se diluye progresivamente a varios kilómetros de la costa, desplazándose arrastrada por las corrientes predominantes, fundamentalmente debidas al ciclo de mareas. El coeficiente de dilución inicial estimado a partir de las mediciones de radioactividad es casi la tercera parte del calculado sobre la base de la teoría de chorros en medios estratificados. Este resultado será discutido en otro trabajo.
- (b) El proceso de advección y dispersión de una mancha de trazador que simula el transporte de un contaminante inyectado en forma súbita en la superficie presenta efectos de escala análogos a los que se han encontrado en otros sistemas estuarinos y aguas costeras. Mientras el parámetro q se encuentra próximo a uno puede aplicarse el modelo matemático de Joseph y Sendner (8,9) para describir la difusión turbulenta del contaminante. Cuando q se hace cero, puede aplicarse el modelo gaussiano convencional. Al aplicar estos resultados en un pronóstico se debe tener en cuenta que los ejes principales de la matriz de coeficientes de dispersión pueden cambiar de dirección de una zona a otra. Dicha matriz puede emerger de una estructura de corrientes compleja en la que la velocidad horizontal cambie de magnitud y dirección no solo aguas abajo, sino también con la posición vertical del punto considerado (9).
- (c) El vertido de unos 5 kg. de uranina disueltos en 0.2 m^3 durante unos cinco minutos, desde una embarcación detenida, puede producir manchas muy alargadas y curvadas de unos 7 m de ancho por 70 m de largo, cuando las corrientes superficiales locales son intensas. El efecto de la forma inicial de la mancha se mantiene incluso hasta que sus dimensiones son de varios cientos de metros. Por este motivo presenta cierto interés el estudio de la microcirculación, a través de la grabación de las manchas desde el aire mediante cámaras de vídeo. La estructura de la turbulencia en superficie puede analizarse entonces estudiando los bordes de las manchas. Luego de haber digitalizado la información, mediante herramientas de geometría fractal (10). Las dimensiones de similitud que pueden asignarse a esos bordes irregulares se relacionan con las características espaciales y temporales de las cascadas locales de torbellinos que determinan el transporte turbulento. Ese estudio se encuentra actualmente en proceso.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la I.M.M., la Armada Nacional, la Fuerza Aérea, las Facultades de Ingeniería, Química y Ciencias de la Universidad de la República, la Facultad de Ingeniería y el Departamento de Ciencias de la Comunicación de la Universidad Católica, la Dirección Nacional de Minería y Geología de M.I.E.M., I.N.A.P.E., la D.I.N.A.M.A. y demás instituciones que de una u otra forma colaboraron en el desarrollo de los proyectos URU/8/007 y URU/8/009. Asimismo agradecen a la Sra. Mariana Suárez, al Sr. Diego Suárez y al Ing. Teón Wilton de la Fuente por su ayuda en el procesamiento del texto.

Referencias Bibliográficas

- (1) A. Plata, A. Kurucz, R. Suárez Antola y otros (1992). "Circulación y renovación del agua en la Bahía de Montevideo" (Informe de Avance, Proyecto URU181007, Viena, Austria).
- (2) A. Plata, R. Suárez Antola, A. Dellepere y otros (1993). "Estudio de la contaminación costera de la zona de Montevideo mediante técnicas de trazadores". (Informe de Avance, Proyecto URU181017, Viena, Austria).
- (3) R. Suárez Antola y A. Malek (1995). "Los parámetros de la dispersión en las aguas costeras del Departamento de Montevideo. Parte I: Fundamentos y descripción de la técnica experimental" (Informe de Avance, Proyecto URU181009, Montevideo, Uruguay).
- (4) R. Suárez Antola, A. Badano, A. Dellepere y otros (1993). "Metodología de la seguridad radiológica en el empleo de trazadores radiactivos en estudios hidrodinámicos y ambientales" (II Congreso Regional de Protección Radiológica y Seguridad Nuclear, Zacatecas, México).
- (5) R. Suárez Antola, L. Crossignani, A. Dellepere y otros (1994). "Estudio experimental, mediante trazadores, de la dispersión de contaminantes vertidos en la Bahía de Montevideo, en las playas al este de la ciudad" (XXIV Congreso Panamericano de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Buenos Aires, Argentina).
- (6) H. Fischer, B. List, A. Koh y otros (1979) "Mixing in inland and coastal waters" (Academic Press, N. Y).

(7) J. Edens(1972)"Some applications of radioisotopes in coastal pollution control"(en "Peaceful uses of atomic energy",vol.14, IAEA,Viena,Austria).

(8) K. White(1983)"Dispersión in surface waters"(en Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, IAEA, Viena, Austria).

(9) K. Bowden(1983)"Physical Oceanography of Coastal Waters"(Ellis Horwood, London).

(10) R.Hilborn(1994)"Chaos and Nonlinear Dynamics"(Oxford University Press,N.Y).