

DIFUSIVIDADES EN LA PLUMA DEL RÍO BIOBÍO PARA UN PERÍODO DE ALTA DESCARGA

BIOBIO RIVER PLUME DIFFUSIVITIES DURING HIGH DISCHARGE

ALEJANDRO URRUTIA *

DANTE FIGUEROA **

LUIS SOTO **

* Instituto de Investigación Pesquera Octava Región S.A.,
Departamento de Estudios Ambientales,
Colón 2780, Talcahuano

** Departamento de Física de la Atmósfera y del Océano,
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Concepción,
Casilla 4009, Concepción,
Chile.

RESUMEN

En base a un estudio de naturaleza Lagrangiana, se han estudiado los procesos de transporte y difusión que se llevan a cabo en la pluma del río Biobío. En particular, se han estimado las difusividades macroscópicas y la tasa de cambio de las propiedades del agua superficial a partir de variaciones de la distribución (densidad) de derivadores. Para la estimación de las difusividades macroscópicas se utilizó la metodología propuesta por OKUBO (1982), mientras que la tasa de cambio de la densidad de derivadores fue determinada mediante una metodología implementada por los autores. Las estimaciones mencionadas anteriormente se realizaron en la Pluma del río Biobío en un período de alto caudal ($1.200 \text{ m}^3/\text{s}$) durante los días 20 y 21 de agosto de 1991, tanto para marea ascendente como descendente.

Los resultados muestran que la marea es el principal agente que proporciona energía para la modificación de la difusión, el transporte y de las variaciones temporales de la densidad de derivadores.

Dependiendo de si se está en un período de marea ascendente o descendente, la marea modifica la difusión y el transporte en una dirección preferencial o en otra, con respecto a un sistema de referencia ubicado en el centro de cada grupo de derivadores. La marea ascendente produce una desviación en la dirección del flujo del río y una difusión significativamente mayor en la dirección paralela al transporte, en comparación con la observada en la dirección perpendicular a él. La marea descendente tiende a producir un aumento de la difusión en la dirección perpendicular al eje del transporte.

Key words: transport; diffusion; river plume; drifters.

Recibido para publicación: 22 de julio de 1992.

Las difusividades macroscópicas encontradas en la dirección del transporte son del orden de $50 \text{ m}^2/\text{s}$ y $10 \text{ m}^2/\text{s}$ para la marea ascendente y descendente, respectivamente, mientras que en la dirección perpendicular al transporte, ellas asumen valores del orden de $10 \text{ m}^2/\text{s}$ y $20 \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente.

A partir de las variaciones de la densidad superficial de cada grupo de derivadores se observa una disminución en aquellas propiedades del agua caracterizables a través de la densidad de derivadores, tanto en marea ascendente como en marea descendente, siendo esta pérdida alrededor de 10 veces mayor en marea descendente que en marea ascendente.

SUMMARY

Transport and diffusion processes for the Biobío river plume have been studied from results of Lagrangean measurement. In particular, gross diffusivities and rates of change of superficial water properties have been estimated using a distribution of drifters. Whilst gross diffusivities were determined using procedures proposed by Okubo (1982), a new scheme had to be devised to calculate drifter surface density. Estimated values relate to high discharge conditions ($1200 \text{ m}^3/\text{s}$) observed the 20th and 21th of August, 1991, both for flood and ebb tide stages.

Results show that tide is the most significant energy source for diffusion, transport and superficial water properties changes. Diffusion and transport change along a preferential direction (relative to a reference frame centered on each group of drifters), which differs depending on tide stage (flood or ebb). For flood tide conditions, river flow direction change and diffusion is larger parallel to transport as compared to that perpendicular to it. By contrast, diffusion tends to be larger in a direction perpendicular to the transport axis for ebb tide.

Measured transport parallel gross diffusivities are about $50 \text{ m}^2/\text{s}$ and $10 \text{ m}^2/\text{s}$ for flood and ebb tide, respectively, whilst corresponding transport perpendicular values are around $10 \text{ m}^2/\text{s}$ and $20 \text{ m}^2/\text{s}$.

Superficial water properties decay is estimated from drifter surface density variations for each drifter groups, for both flood and ebb tide, the decay being 10 times larger during ebb tide.

INTRODUCCIÓN

El incremento del derrame de sustancias derivado de la actividad humana en aguas costeras, estuarios, ríos y lagos, ha provocado una creciente preocupación en el ámbito científico. Esto es particularmente evidente en el caso de la interacción de los ríos y los sistemas costeros, ya que los ríos se presentan como agentes que favorecen las actividades biológicas a través del aporte significativo de nutrientes.

De lo anterior, se desprende la importancia de conocer y evaluar los procesos de transporte y mezcla que se llevan a cabo en la zona de interacción entre el río y el ambiente costero. El conocimiento de estos procesos es fundamental para tener una evaluación de los niveles de concentración de cualquier propiedad del agua.

La dinámica de una pluma de río ingresando a un sistema costero puede ser descrita a través del estudio de las tasas de alguna propiedad que difunda en el medio y sea transportada por éste. Ejemplo de propiedades de este tipo son la salinidad, la temperatura y la concentración de contaminantes (PRITCHARD, 1960), sedimento en suspensión, patch-es de plancton (OKUBO, 1978), etc.

La variación temporal de las tasas mencionadas pueden ser descritas mediante

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -V_x \frac{\partial n}{\partial X} - V_y \frac{\partial n}{\partial Y} + K_x \frac{\partial^2 n}{\partial X^2} + K_y \frac{\partial^2 n}{\partial Y^2}$$

En esta ecuación, "n" representa cualquier propiedad del agua superficial que difunda y sea transportada en el sistema, por lo que $\delta n / \delta t$ describe la tasa de cambio temporal de ella. Los dos primeros términos del lado derecho representan la advección, donde V_x y V_y son las velocidades horizontales. Los dos últimos términos del lado derecho representan la difusión, con K_x y K_y los coeficientes de difusión en cada dirección.

Dependiendo de la escala temporal y espacial de mezcla que sean observadas es posible distinguir la difusividad macroscópica ("gross diffusivity"), la

cual no considera explícitamente la difusión turbulenta ni la molecular, de la difusión de pequeña escala que sí considera éstas. La decisión de considerar una u otra se basa en cuan precisamente se desea describir los procesos de mezcla en el espacio y el tiempo.

Para el estudio de los procesos de advección y difusión en el océano han sido desarrollados varios métodos experimentales, algunos de ellos lagrangianos, por ejemplo, usando tintas, a través de fotografías aéreas, mediante derivadores, etc., y otros eulerianos, por ejemplo, haciendo mediciones con correntómetros fondeados.

La técnica utilizada con mayor frecuencia para la medición de la difusión es el seguimiento de la concentración máxima de una sustancia o trazador en una pluma. Sin embargo, este método tiene la desventaja de la incerteza producida por la pérdida del trazador debido a la absorción por partículas en suspensión, decaimiento fotoquímico, etc. Por este hecho, se considera a la varianza del desplazamiento de partículas como una medición más confiable de la expansión de una sustancia y, por lo tanto, de su difusión (OKUBO, 1971, 1982).

En el presente estudio se calcula la varianza y su evolución en el tiempo y las difusividades macroscópicas ("gross diffusivities"), tanto en la dirección del transporte (dirección X) como perpendicularmente a él (dirección Y), a partir de las posiciones de un grupo de derivadores con respecto a un sistema de referencia ubicado en el centro del grupo. Para estimar la varianza y la difusividad macroscópica se utilizó la metodología propuesta por OKUBO *et al.* (1982), técnica basada en una estadística de las posiciones de los derivadores, sin considerar la estadística de la turbulencia ni las transformaciones lagrangianas.

Otro término importante evaluado es la tasa de cambio temporal de la concentración del grupo de derivadores ($\delta n / \delta t$), utilizando una metodología implementada por los autores. La forma de calcular el término $\delta n / \delta t$ puede aplicarse también a la obtención de variaciones temporales de niveles de de concentración de otros materiales, por ejemplo de plancton, contaminantes, etc.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el 20 y 21 de agosto de 1991, en un período de alto caudal (1200 m³/s), fueron liberados derivadores de superficie en la boca norte del río Biobío, tanto en marea ascendente (llenante) como en marea descendente (vaciente). Estos derivadores son del tipo utilizados por GARVINE (1977) e INGRAM (1982) en el estudio de la pluma de los ríos Connecticut y Great Whale, respectivamente. Fueron construidos usando madera terciada de un espesor de 8mm con el fin de evitar el arrastre por el viento, con una superficie de 6.400 cm², lo que es apropiado para que sean vistos desde un avión volando hasta 8.000 pies de altura.

Los derivadores fueron posicionados a partir de fotografías aéreas, éstas fueron tomadas desde un avión que realizó líneas de vuelo (rumbo) corregidas con un G.P.S. La altura se mantuvo constante en cada línea de vuelo, ésta se registró con la lectura de un altímetro. Las fotografías fueron tomadas en intervalos aproximados cada 10 minutos y durante aproximadamente media hora en cada período de deriva.

A partir de este set de fotografías se reconstruyó las trayectorias y campos de velocidad superficial. Las figuras 1 y 2 muestran las trayectorias seguidas por los derivadores en el caso de llenante y de vaciante, respectivamente. A partir de las trayectorias se obtuvo la posición promedio del grupo en diferentes instantes y las varianzas en las direcciones X e Y con respecto a un sistema de referencia relativo a cada grupo. X e Y representan coordenadas locales, estando X en la dirección paralela al transporte e Y en la dirección perpendicular a éste.

OKUDO *et al.* (1982) muestran que la difusividad macroscópica en cada dirección pueden ser asociadas a las varianzas en la forma

$$K_x = \frac{1 \Delta \sigma_x^2}{2 \Delta T}$$

$$K_y = \frac{1 \Delta \sigma_y^2}{2 \Delta T}$$

donde $\Delta \sigma_x^2$ y $\Delta \sigma_y^2$ representan los cambios de las varianzas en las direcciones X e Y respectivamente, y Δt el tiempo transcurrido entre las determinaciones de las varianzas.

Por otra parte se calculó el valor n y el término $\delta n / \delta t$. Para la determinación de n se obtuvo primero el área que cada grupo ocupaba a diferentes instantes, obteniéndose así un valor de n para cada posicionamiento, en la forma

$$n_i = \frac{C}{A_i}$$

donde n_i es la densidad superficial de cada grupo de derivadores, C es el número de derivadores en el grupo considerado, y A_i es el área total ocupada por el grupo en cada instante considerado. Las figuras 3 y 4 muestran la evolución espacial y temporal del área ocupada por los derivadores en llenante y en vaciante, respectivamente. De esta forma se obtuvo la evolución en el tiempo de n, a partir de la cual se determinó la tasa de cambio temporal $\delta n / \delta t$.

Simultáneamente a las mediciones iagrangianas se determinó el caudal del río, la altura de la marea, la velocidad de las corrientes costeras y la velocidad de los vientos en el sector de la desembocadura (ver Tabla I).

	Factores externos			
	Corrientes (Z=10 m)		Vientos	
	Rap.(cm/s)	Dir.(°)	Rap.(cm/s)	Dir.(°)
Llenante	10,0	254	350	184
Vacante	7,5	132	200	80

Tabla I.- Vientos y corrientes costeras durante el período de medición, para llenante y vaciante.

Table I.- Winds and coastal currents during the analyzed period, for flood and ebb tide stages

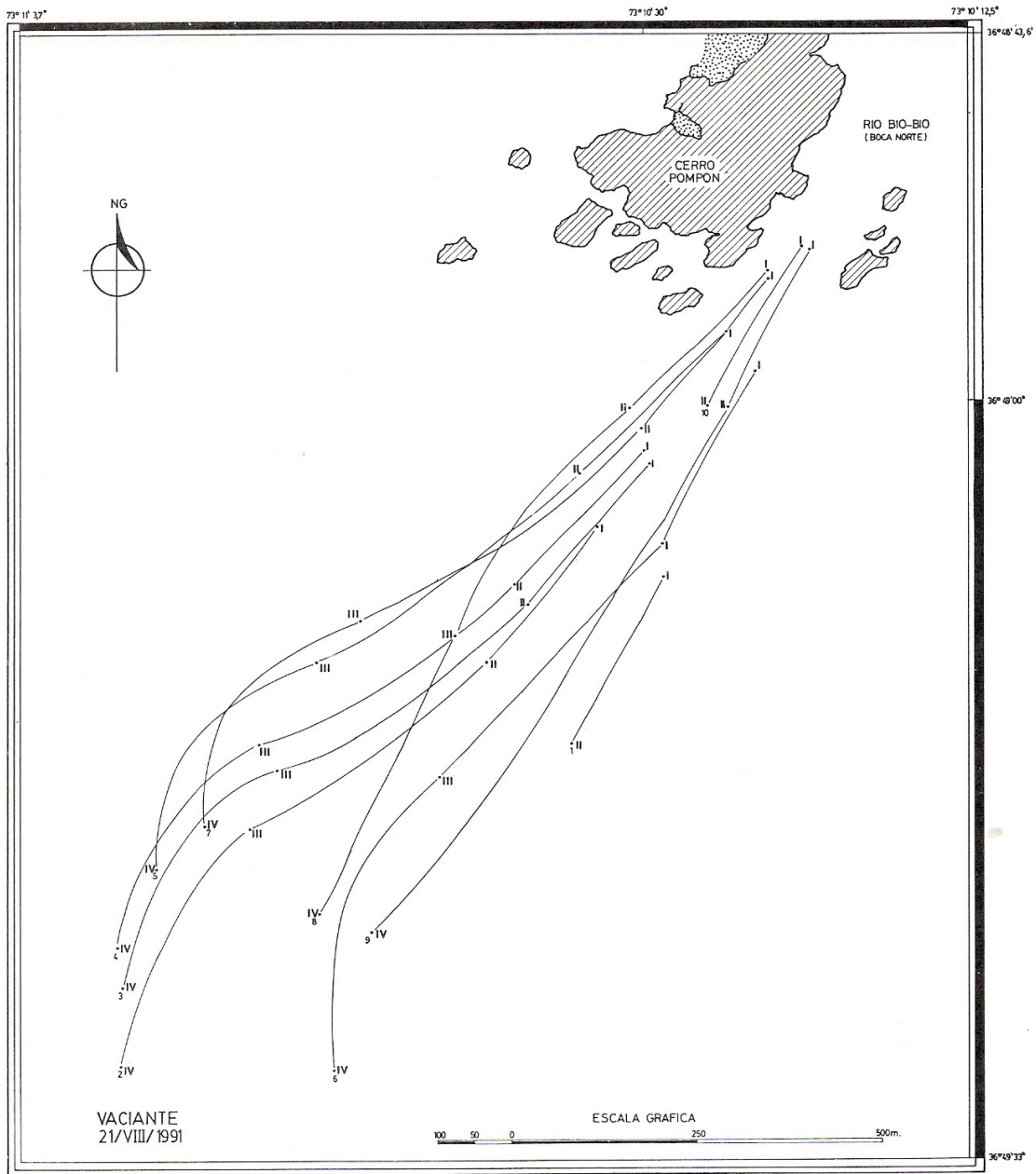


Figura 2.- Trayectorias seguidas por los derivadores en marea descendente (vaciente).
 Figure 2.- Tracks of the drifters for ebb tide conditions.

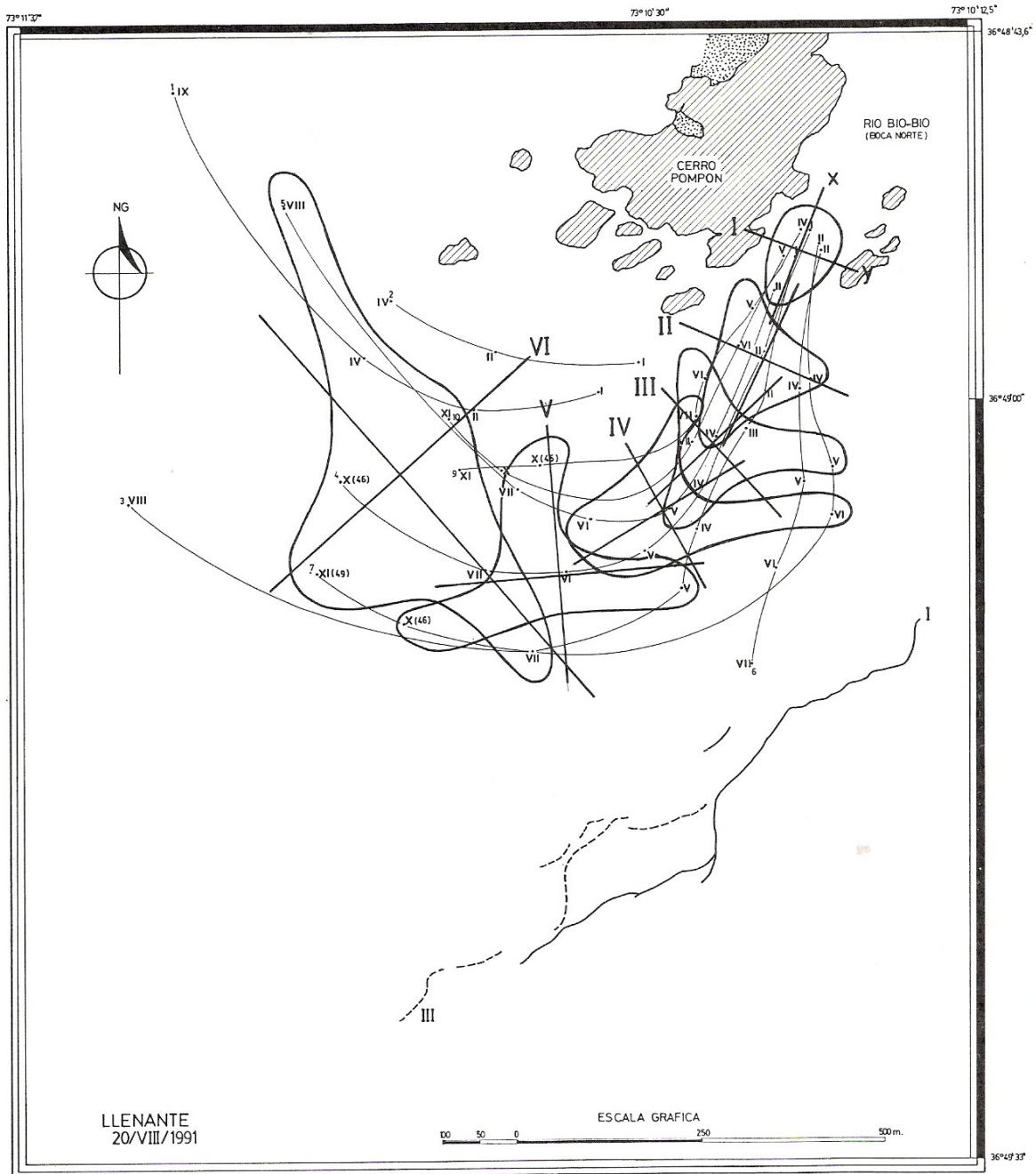


Figura 3.- Area ocupada por el grupo de derivadores en diferentes instantes, junto con el sistema local de referencia utilizado (marea ascendente).

Figure 3.- Area of drifters group at different times, and the used local reference system (for flood tide conditions).

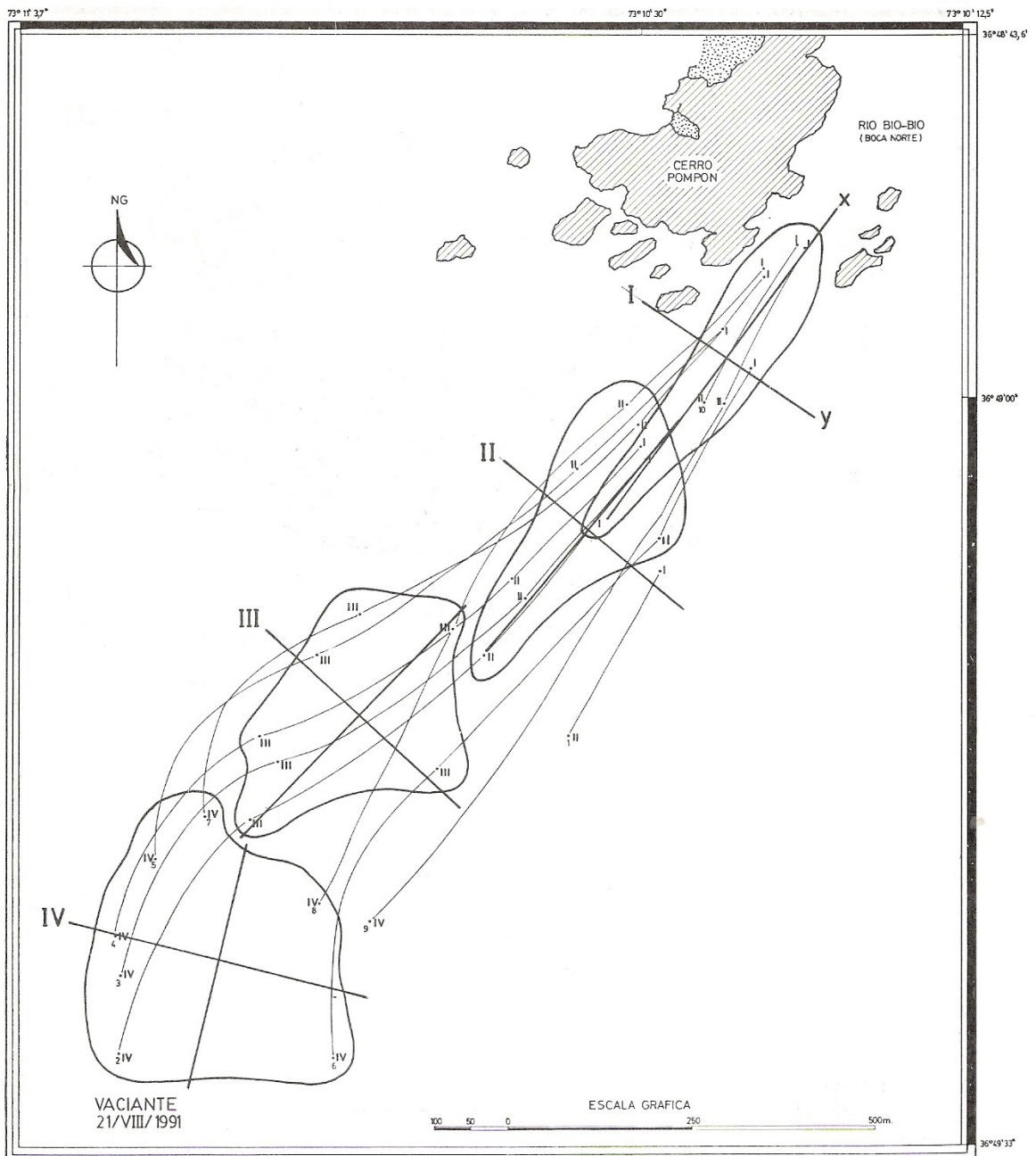


Figura 4.- Area ocupada por el grupo de derivadores en diferentes instantes, junto con el sistema local de referencia utilizado (marea descendente).

Figure 4.- Area of drifters group at different times, and the used local reference system (for ebb tide conditions).

RESULTADOS

La evolución temporal de las varianzas se muestran en la figura 5 en período de llenante y en la figura 6 en período de vaciante. Se observa que las varianzas aumentan en el tiempo, tanto en dirección paralela al transporte como en la dirección perpendicular a éste. Los órdenes de magnitud para varianza en llenado y en dirección paralela al transporte van desde $5 \times 10^3 \text{ m}^2$ hasta $200 \times 10^3 \text{ m}^2$ en llenante, y desde $50 \times 10^3 \text{ m}^2$ hasta $80 \times 10^3 \text{ m}^2$ en vaciante. En la dirección perpendicular al transporte se tiene valores desde 600 m^2 hasta $40 \times 10^3 \text{ m}^2$ en llenante, y de $2 \times 10^3 \text{ m}^2$ hasta $50 \times 10^3 \text{ m}^2$ en vaciante.

De la figura 5, para el caso de llenante, se observa que el coeficiente de difusión en la dirección X (K_x) aumenta entre los intervalos de muestreo, lo que refuerza lo mostrado en la figura 3. En la componente Y, en cambio, K_y muestra valores mucho menores, mostrando incluso un valor negativo, lo que evidencia que entre algunos intervalos de muestreo los derivadores tendieron levemente a agruparse (en Y) en vez de alejarse entre sí (ver figura 1 y 3). Los órdenes de magnitud para K_x van desde $3 \text{ m}^2/\text{s}$ hasta $200 \text{ m}^2/\text{s}$ en la dirección paralela al transporte, y desde $-0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ hasta $1 \text{ m}^2/\text{s}$ en la dirección perpendicular al transporte.

De la figura 6, para el caso de vaciante, se observa que el coeficiente de difusión tiene valores negativos en el caso del eje X. Los valores negativos indican que los derivadores se alejan de su punto de liberación mostrando una tendencia a acercarse entre sí en vez de distanciarse. En el caso de los coeficientes en el eje perpendicular al transporte, K_y muestra una marcada tendencia a aumentar, lo que implica una fuerte dispersión en ese eje (ver figura 2 y 4). Los órdenes de magnitud de K_x van de $-15 \text{ m}^2/\text{s}$ hasta $-8 \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que K_y va desde $-0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ hasta $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$.

En cuanto a $\delta\langle n \rangle / \delta t$, se tiene $-6,34 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}^{-1}$ en período de llenante. En caso de vaciante el valor obtenido para $\delta\langle n \rangle / \delta t$ fue de $-6,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^{-1}$.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Aunque en primera instancia sea difícil diferenciar y separar el transporte de la difusión, ya que en este tipo de estudios el transporte es significativo, en particular en la proximidad de la desembocadura del río, es posible cuantificar la difusión en el dominio en que el transporte comienza a perder significancia. Esto es, a partir de 400 ó 500 m de la desembocadura, en caso de llenante, y de 800 ó 900 m desde la desembocadura en caso de vaciante (URRUTIA y FIGUEROA, 1992).

La marea se presenta como el principal agente que proporciona energía para la modificación de la difusión, del transporte y de la densidad superficial de derivadores en el tiempo. La marea actúa en forma diferencial, produciendo un aumento de la difusión y el transporte en la dirección X o Y del sistema de referencia ubicado en el centro del grupo. Para el caso de llenante la marea produce una desviación en la dirección del flujo del río y una difusión significativamente mayor en la dirección X, paralela a la dirección del transporte, en comparación con la observada en la dirección Y. En el caso de vaciante ésta tiende a producir un aumento de la difusión en la dirección Y, perpendicular al eje del transporte.

La tasa de cambio de la propiedad n calculada muestra una pérdida de la concentración ($\delta n / \delta t < 0$), presentando valores negativos tanto en llenante como en vaciante, y, siendo aproximadamente 10 veces mayor en vaciante que en llenante. Esto se debió a la influencia de factores externos, como por ejemplo, al significativo amortiguamiento y perturbaciones del flujo del río debido a la marea, a las corrientes costeras no-mareales y a los vientos predominantes (ver tabla I).

Al comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo (tabla II) con los obtenidos en otros trabajos, por OKUBO *et al.* (1982), se observa que los obtenidos aquí son mucho mayores, con valores hasta 100 veces más grandes. Esta situación se puede explicar por el hecho de tratarse de un sistema con una fuente cercana de agua dulce ($1.200 \text{ m}^3/\text{s}$), la

que afecta al comportamiento de las aguas costeras. Las mediciones de OKUBO (1982) fueron realizadas

en lugares sin fuentes. Los resultados más importantes están resumidos en la tabla II.

	t(s)	Varianza		Dist. (m)	Difusividades		Vel. Derivadores		$\delta\langle n \rangle / \delta t$ ($m^2 s^{-1}$)
		VarX (m^2)	VarY (m^2)		K_x (m^2/s)	K_y (m^2/s)	Rap (cm/s)	Dir ($^\circ$)	
Llenante	360	4756	624	—	—	—			
	720	6952	5456	179	3.1	6.7			
	1080	17251	19779	294	14.3	19.9			
	1440	49204	27130	429	44.4	10.2	55	245	-6.34×10^{-8}
	1800	57748	26397	615	11.9	-1.02			
	2160	208178	40262	897	208.9	19.3			
Vaciante	480	89505	2036	—	—	—			
	960	74697	12714	224	-15.4	11.1			
	1320	62903	21765	499	-12.3	9.4	85	218	-6.34×10^{-7}
	1680	55008	53957	897	- 8.2	33.5			

Tabla II.- Varianzas, distancia desde la desembocadura del río, difusividades, velocidad media del grupo de derivadores y cambio relativo de la densidad superficial de derivadores en diferentes instantes, para marea ascendente y descendente.

Table II.- Variances, distance from the river mouth, diffusivities, velocity means of the drifters group and relative change of the superficial density of the drogues at times, for flood and ebb tide stages.

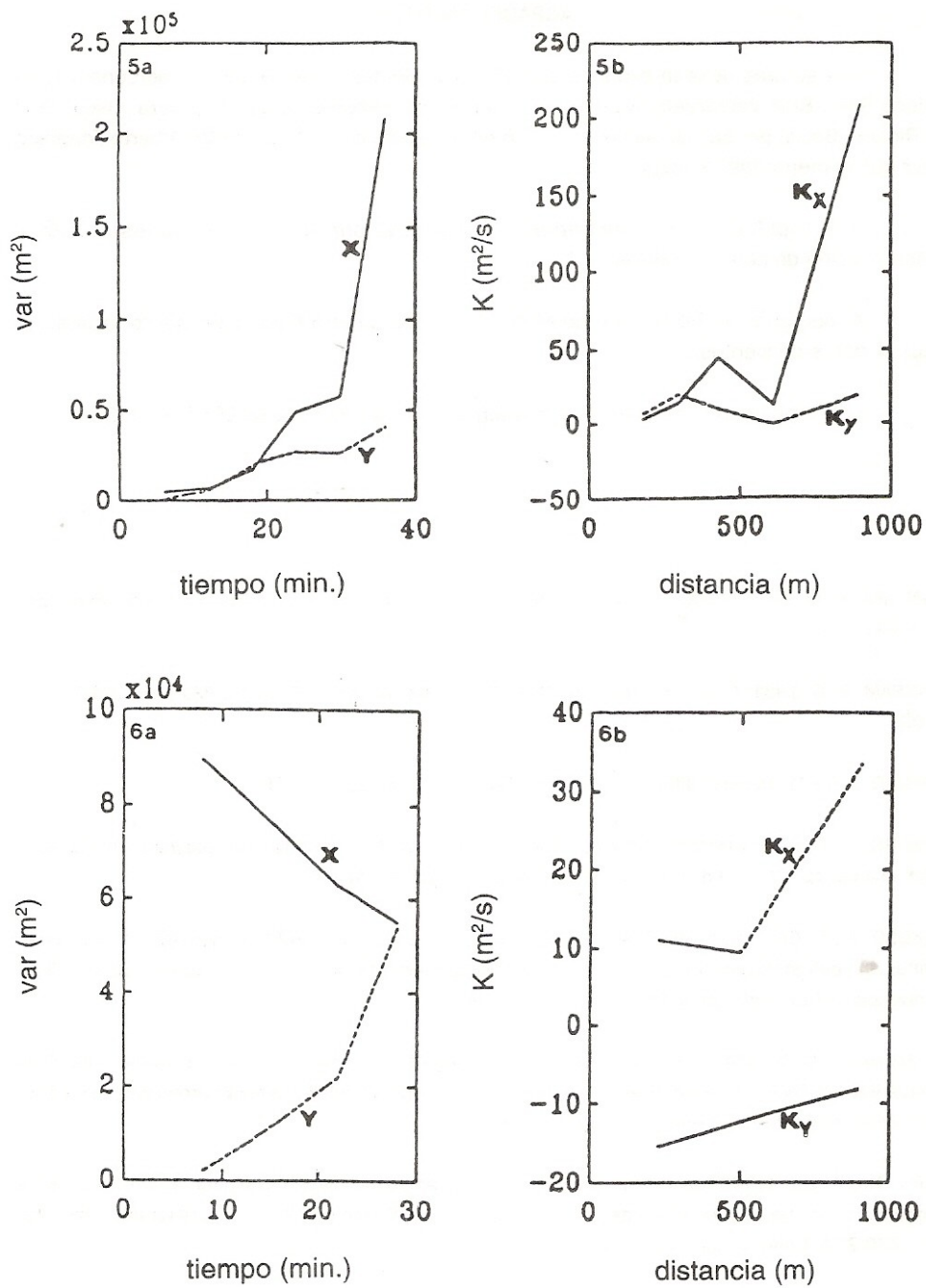


Figura 5 (arriba).- Varianzas y coeficientes de difusión en período de llenante.
 Figure 5 (top).- Variances and diffusion coefficients for flood tide stage.

Figura 6 (abajo).- Varianzas y coeficientes de difusión en período de vaciante.
 Figure 6 (bottom).- Variance and diffusion coefficients for ebb tide stage.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos a las siguientes personas: Francisco Brito, Blas Valenzuela, Marcos Cisterna, Pedro Sánchez, Álvaro Espinoza, Oscar Díaz y Ricardo Barra, por su valiosa colaboración en el trabajo de campo, y al Dr. Alberto Foppiano por sus comentarios al texto.

A la tripulación de la embarcación "Kay-Kay" por su apoyo en la instalación y recuperación de correntómetros.

Al personal del laboratorio de Meteorología del Centro Eula-Chile, por la facilitación de los datos de vientos.

Este trabajo fue financiado parcialmente por el proyecto FONDECYT 92-253.

REFERENCIAS

GARVINE, R. W. 1977. Observations of the motion field of the Connecticut river plume. *J. Geophys. Res.*, 82, 441- 454.

INGRAM, R. G. 1981. Characteristic of the Great Whale river plume. *J. Geophys. Res.*, 86, 2017-2023.

OKUBO, A. 1971. Oceanic diffusion diagrams. *Deep- Sea Res.*, 18, 789- 802.

OKUBO, A. 1978. Horizontal dispersion and critical scales for phytoplankton patches. In: *Plankton Communities*, pp. 21-41, Ed. J. Steele, NATO Conference Series, New York.

OKUBO, A., H. CARTER, R. WILSON, B. SANDERSON and E. PARTCH 1982. A Lagrangian and Eulerian Diffusion study in the coastal surface layers. Final Report under Marine Sciences Research Center, State University of New York, Stony Brook, New York 11794.

PRITCHARD, D. W. 1960. The movements and mixing of contaminants in tidal estuaries. In: *Tidal estuaries*, pp. 512- 525. Proc. First Int. Conf. on Waste Disposal in the Marine Environment, July 1959, University of California, Berkeley, Pergamon Press.

URRUTIA, A. y D. FIGUEROA. 1992. Campo de velocidad superficial de la pluma del río Biobío para condiciones de baja y alta descarga. In: *Actas IV Simposio Chileno de física experimental y aplicada*, pp. 230-234, Universidad de Concepción, Chile.