

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOLOGÍA



***Hidrología, nutrientes e influencia de las aguas
residuales en la Laguna de Santa María, Sinaloa.***

Tesis que para obtener el grado **de**

Maestro en Ciencias

Con **especialidad en**

Manejo de Recursos Marinos

presenta:

Diana Cecilia Escobedo Urías

La Paz, B.C.S

Septiembre de 1997

INDICE

GLOSARIO	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCION	1
1.1, Antecedentes	4
1.2 Objetivos	7
1.3 Justificación	8
1.4 Area de estudio	9
II. MATERIALES Y METODOS	12
2.1 Trabajo de campo	12
2.2 Trabajo de laboratorio	16
2.3 Trabajo de gabinete	17
2.3.1 Cálculos	17
2.3.2 Análisis estadístico	19
2.3.3 Modelación numérica	20
2.3.3.1 Fundamento	20
III. RESULTADOS	23
3.1. Dinámica hidrológica	23
3.2. Variables físicas y químicas	28
3.2.1 Distribución espacial	28
3.2.1.1 Laguna Santa Maria	28
3.2.1.2 Estero Esterón	34
3.2.2. Distribución temporal	37
3.2.2.1 Laguna Santa Maria	37
3.2.2.2 Estero Esterón	40

3.2.3 Variación diurna	43
3.3 Modelación	46
IV. DISCUSION	49
4.1. Dinámica hidrológica	49
4.2. Variables físicas y químicas	52
4.2.1 Distribución espacio-temporal	52
4.2.1.1 Temperatura	52
4.2.1.2 Salinidad	53
4.2.1.3 Oxígeno disuelto	55
4.2.1.4 pH	57
4.2.1.5 Nutrientes	58
4.2. 1.5.1 Nitrógeno	59
4.2.1.5.2 Fósforo	61
4.3. Impacto de las aguas residuales	63
4.4. Modelo numérico	69
V. CONCLUSIONES	72
VI. RECOMEDACIONES	74
BIBLIOGRAFIA	75
ANEXOS	87
Anexo A. <i>Laguna Santa María.</i>	I
Anexo B. <i>Estero Esterón.</i>	XXIV
Anexo C. <i>Modelación hidrodinámica.</i>	XXXVII
Anexo D. <i>Modelación de la dispersión de contaminantes.</i>	XLII

GLOSARIO

Absorción. Fenómeno de retención de un gas o vapor por un líquido, o de un líquido por un sólido.

Adsorción. Fenómeno de naturaleza física o química por el que las moléculas de un fluido que inciden sobre una superficie sólida quedan retenidas sobre la misma un determinado tiempo, produciendo un aumento de su concentración relativa en ella.

Bajamar. Es la mínima altura registrada en un descenso de marea: La bajamar se debe a las fuerzas de mareas periódicas.

Barotrópico. Cuando las superficies isobáricas de un fluido son paralelas a las superficies de densidad.

Constituyente. Es uno de los elementos armónicos en una expresión matemática para producir la fuerza de la marea y en fórmulas correspondientes a la marea o corriente de marea. Cada constituyente representa un cambio periódico o variación en la posición relativa de la tierra, luna y sol. Una sola constituyente usualmente se escribe de la siguiente fórmula $y = A \cos(at + \alpha)$, donde y está en función del tiempo, el coeficiente A es la amplitud de la constituyente, el ángulo $(at + \alpha)$ cambia uniformemente y su valor en cualquier tiempo se le llama fase.

Contaminación. Alteración nociva de las condiciones normales de cualquier medio por la presencia de agentes físicos, químicos o biológicos ajenos al mismo.

Dirección del viento. Lugar de donde está soplando el viento.

Difusión. Transporte molecular de uno o más componentes de una mezcla fluida.

K₁. Constituyente lunisolar diurna. Esta constituyente con la O₁ expresan el efecto de la declinación de la luna, con la P, expresa el efecto de la declinación del sol.

K₂. Constituyente lunisolar semidiurna. Esta constituyente modula la amplitud y frecuencia de la M₂ y S₂ de la declinación de la luna y el sol respectivamente.

Lixiviación. Separación (natural o artificial) de componentes de una mezcla sólida por contacto con un disolvente adecuado.

M₂. Constituyente lunar principal semidiurna. Esta constituyente representa la rotación de la tierra con respecto a la luna.

N₂. Constituyente gran lunar elíptica semidiurna.

3.2.3 Variación diurna	43
3.3 Modelación	46
IV. DISCUSION	49
4.1. Dinámica hidrológica	49
4.2. Variables físicas y químicas	52
4.2.1 Distribución espacio-temporal	52
4.2.1.1 Temperatura	52
4.2.1.2 Salinidad	53
4.2.1.3 Oxígeno disuelto	55
4.2.1.4 pH	57
4.2.1.5 Nutrientes	58
4.2.1.5.1 Nitrógeno	59
4.2.1.5.2 Fósforo	61
4.3. impacto de las aguas residuales	63
4.4. Modelo numérico	69
V. CONCLUSIONES	72
VI. RECOMEDACIONES	74
BIBLIOGRAFIA	75
ANEXOS	87
Anexo A. <i>Laguna Santa María.</i>	I
Anexo B. <i>Estero Esterón.</i>	XXIV
Anexo C. <i>Modelación hidrodinámica.</i>	XXXVII
Anexo D. <i>Modelación de la dispersión de contaminantes.</i>	XLII

O₁. Constituyente lunar diurna.

P₁. Constituyente solar diurna.

Pleamar. Es la máxima altura registrada en un ascenso de marea. La pleamar es debida a las fuerzas de mareas periódicas.

S₂. Constituyente principal solar semidiurna. Esta constituyente representa la rotación de la tierra con respecto al sol.

Semidiurno. Es el período o ciclo de aproximadamente la mitad de un día de marea. El tipo predominante de marea en el mundo es la semidiurna, con dos pleamares y dos bajamares en un día de marea.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Localización del área de estudio y ubicación de los puntos de muestreo de las variables físicas y químicas.	11
Fig. 2. Vista parcial del sistema de riego agrícola del Valle del Fuerte, Ahorne, Sinaloa.	12
Fig. 3. Ubicación de los correntómetros y ológrafo en la laguna de Santa Maria.	13
Fig. 4. Ubicación de transectos para la determinación de la batimetría.	14
Fig. 5. Diagrama polar de velocidad en el fondo de la boca de la laguna durante los días 12 y 13 de octubre de 1994.	23
Fig. 6. Diagrama polar de velocidad de las corrientes medidas en la boca del estero Esterón durante los días 12 y 13 de octubre de 1997.	24
Fig. 7. Diagrama polar de las corrientes medidas en la boca del estero Boca Colorado durante los días 12 y 13 de octubre de 1995.	24
Fig. 8. Diagrama polar de velocidad de las corrientes medidas en el canal frente a Punta Santa María durante los días 15-19 de octubre de 1995.	25
Fig. 9. Gráfico polar de velocidad de las corrientes medidas en el centro de la Laguna Santa María los días 15 al 19 de octubre de 1995.	25
Fig. 10. Diagrama polar de las corrientes medidas en la superficie del estero Esterón durante los días 16-20 de octubre de 1995.	25
Fig. 11. Diagrama polar de las corrientes medidas en el fondo del estero Esterón durante los días 16-20 de octubre de 1995.	25
Fig. 12. Diagrama polar de las corrientes medidas a 3 metros de profundidad en el estero Boca Colorado durante los días 17 al 20 de octubre de 1995.	26
Fig. 13. Registro de oleaje y marea en la cabecera de la laguna durante los días 18 al 20 de octubre de 1995.	26
Fig. 14. Batimetría (m) de la Laguna de Santa Maria.	27
Fig. 15. Distribución espacial de salinidad (‰) superficial en la Laguna de Santa María durante el muestreo de invierno de 1995.	30
Fig. 16. Distribución de pH superficial en la Laguna de Santa Maria durante	30

invierno de 1995.

Fig. 17. Distribución de oxígeno disuelto (mg/l) en los niveles de superficie (a) y fondo (b) en la Laguna de Santa María durante el muestreo de invierno de 1995.	31
Fig. 18. Distribución superficial de amonio (μM) en la Laguna de Santa María durante invierno de 1995.	31
Fig. 19. Distribución superficial de fósforo reactivo (a) y fósforo total (b) solubles en la Laguna de Santa María durante invierno de 1995.	33
Fig. 20. Distribución espacial de sólidos suspendidos totales (mg/l) en la Laguna de Santa María durante otoño de 1995.	33
Fig. 21. Distribución de salinidad (‰) y oxígeno disuelto (mg/l) en el estero Esterón durante los muestreos de invierno (A y C) y verano (B y D) de 1995.	34
Fig. 22. Distribución de salinidad (‰) y oxígeno disuelto en el estero Esterón durante primavera (A y C) y otoño (B y D) de 1995.	36
Fig. 23. Valores medios de salinidad en la Laguna de Santa María durante el periodo febrero-octubre de 1995.	37
Fig. 24. Concentraciones promedio de oxígeno disuelto en la Laguna de Santa María durante el período febrero-octubre de 1995.	38
Fig. 25. Concentraciones estacionales medias de nitratos (a) y nitritos (b) en la Laguna de Santa María durante el período de muestreo.	39
Fig. 26. Valores estacionales promedio de amonio en la Laguna de Santa María durante el período de estudio.	39
Fig. 27. Concentraciones estacionales medias de fósforo reactivo soluble en la Laguna de Santa María durante el período febrero-octubre de 1995.	39
Fig. 28. Valores estacionales promedio de salinidad en el estero Esterón durante el período febrero-octubre de 1995.	41
Fig. 29. Concentraciones estacionales medias de oxígeno disuelto en el estero Esterón durante el período de estudio.	41
Fig. 30. Concentración estacional media de amonio en el Esterón durante el período de estudio.	42

Fig. 31. Concentración estacional promedio de fósforo reactivo (a) y fósforo total (b) solubles en el Esterón durante el periodo de muestreo.	42
Fig. 32. Perfil de temperatura (°C) y salinidad (‰) durante la variación diurna efectuada en el estero Esterón del 17 al 18 de octubre de 1995.	43
Fig. 33. Perfil vertical de pH y oxígeno disuelto (mg/l) en el estero Esterón durante la variación diurna efectuada del 17 al 18 de octubre de 1995.	44
Fig. 34. Perfil vertical de nitratos (a), nitritos (b), amonio (c), fósforo reactivo (d) y fósforo total (e) en el estero Esterón durante la variación diurna efectuada del 17 al 18 de octubre de 1995.	45
Fig. 35. Distribución vectorial de corrientes simuladas en el quinto octavo del período de la marea.	46
Fig. 36. Distribución vectorial de corrientes simuladas en el sexto octavo del período de marea.	46
Fig. 37. Distribución de masa simulada al primer(a) y trigésimo día (b) de inyección con un coeficiente de difusión turbulenta de 10^4 .	47
Fig. 38. Distribución de masa simulada al primer (a) y tercer día (b) de inyección con un coeficiente de difusión turbulenta de 10^7 .	48
Fig. 39. Valores promedio de aporte de aguas residuales incorporadas, evaporación, precipitación y salinidad en la Laguna de Santa María, durante 1995.	54
Fig. 40. Razón FR/FT en el cuerpo lagunar(a) y estero Esterón (b) durante el período de estudio.	64
Fig. 41. Valores de fósforo total y reactivo solubles en el transecto: Dren Juárez-estero Esterón-laguna durante el muestreo de verano de 1995.	68
Fig. 42. Gráfico comparativo de las velocidades de corrientes modeladas y las obtenidas en la boca de la Laguna de Santa María durante octubre de 1995.	69
Fig. 43. Distribuciones de Sólidos Suspendidos totales (A) y dispersión teórica del material (B) en la Laguna de Santa María, Sinaloa.	70
Fig. 44. Distribución simulada del material incorporado durante el flujo (a) y reflujo (b) de la marea.	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Intervalos de detección de las técnicas utilizadas en los análisis efectuados.	16
Tabla 2. Areas y gastos del Dren Juárez para cada época climática durante el periodo de estudio.	23
Tabla 3. Valores promedio de variables físicas y químicas en la Laguna de Santa Maria durante el período de estudio.	29
Tabla 4. Valores de nitrógeno total en el Dren Juárez y estero Esterón durante verano y otoño de 1995.	32
Tabla 5. Valores estacionales promedio de las variables físicas y químicas en el estero Esterón durante el período de estudio.	35
Tabla 6. Tabla de ANDEVA para cada variable medida en la Laguna Santa María durante el periodo de estudio (95% de confianza).	38
Tabla 7. Tabla de ANDEVA para cada variable medida en el estero Esterón durante el período de estudio .	40
Tabla 8. Registro de velocidad y dirección del viento en el estero Esterón durante los días 17 y 13 de octubre de 1995.	44
Tabla 9. Alturas de marea del Puerto de Topolobampo, Sinaloa para cada campana de muestreo.	60
Tabla 10. Valores promedio de nutrientes superficiales (μM) en la Laguna de Santa Maria durante los trabajos efectuados desde 1987 al actual.	64

RESUMEN

La Laguna de Santa María, Sinaloa, situada en los límites de un extenso valle agrícola en el que se practica una agricultura intensiva, recibe durante todo el año, las aguas residuales originadas por los excedentes del riego, las aguas municipales de la Cd. de Los Mochis y las originadas en la zona industrial adyacente. Debido al escaso conocimiento sobre este cuerpo costero y por su gran importancia como área de cría y alimentación de especies económicamente relevantes, se efectuó el presente trabajo con la finalidad de conocer la hidrodinámica de la zona, caracterizar la variación espacial y temporal de variables físicas y químicas y determinar la influencia de las aguas residuales incorporadas. Para ello se efectuaron 4 monitoreos estacionales durante el periodo febrero-octubre de 1995, en 30 puntos de muestreo en los niveles de superficie y fondo, en los que se midieron la temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto, nutrientes (nitratos, nitritos, amonio, fósforo total y reactivo), profundidad de disco de Secchi y sólidos suspendidos totales de superficie. Por otra parte se realizó la determinación del gasto (Q) y la cuantificación de nitrógeno total del dren de aguas residuales que descarga sobre la laguna, y dos estudios de corrientes en el cuerpo lagunar. Por último y con el fin de predecir el impacto en la zona por un incremento en las descargas, se efectuó la modelación hidrodinámica de la laguna y se aplicó un modelo de dispersión de contaminantes, utilizando para éste último los coeficientes de difusión turbulenta 10^4 y 10^5 en dos pruebas distintas. Los resultados del estudio de corrientes muestran que el patrón está determinado por el efecto conjunto del viento y la marea. El tipo de circulación es de "estuario positivo" originado por la influencia de las aguas residuales. Respecto a las variables fisicoquímicas se distinguen dos zonas en el área: *Laguna Santa María* y *Estero Esterón*. En la laguna se observaron mayores concentraciones de nutrientes y menores de oxígeno disuelto, salinidad y pH en la zona cercana al estero Esterón, lo cual es debido a la influencia de las descargas de aguas residuales sobre las variables analizadas. La distribución temporal muestra las mayores concentraciones de nutrientes durante las épocas de verano y otoño, que corresponden a la temporada de lluvias. En el estero, se observa un gradiente de mayores concentraciones de nutrientes y menores de oxígeno y pH hacia la parte más interna debido al efecto regulador de la marea, que diluye las concentraciones del material incorporado. Estacionalmente, las mayores concentraciones de nutrientes se presentaron durante el invierno. Al comparar los resultados de la modelación de la dispersión con los medidos en el campo, se obtuvo que las distribuciones simuladas no concuerdan totalmente con las experimentales, lo que posiblemente se debió a la falta de consideración del efecto del viento, el adecuado tiempo de evacuación de la laguna (2.26 días) y la presencia del extenso bosque de manglar circundante, el cual actúa como una importante zona de amortiguamiento del material incorporado en épocas de lluvias, y su sedimento arcilloso sirve como una eficiente trampa de nutrientes. Sin embargo se observa un aumento en las concentraciones de nutrientes en el área con respecto a estudios previos, originadas por el incremento en las descargas de origen agrícola e industrial. Se propone la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales con el fin de disminuir el impacto de la gran cantidad de aguas residuales incorporadas al área de estudio.

ABSTRACT

The Santa Maria lagoon is located in the state of Sinaloa and lies in the limits of an important farming industry. The lagoon receives the waste waters originated from the farming areas, the city of Los Mochis and a Sugar Company. Due to the poor understanding of this coastal lagoon and its relevance as a nursery grounds, an study was initiated to investigate the hydrodynamic behavior of the lagoon, to characterize the spatial and temporal changes of the physical and chemical parameters and to determine the impact of the wastewater discharges. Four seasonal field experiments were carried out during February-October of 1995 to measure surface and bottom temperature, salinity, pH, dissolved oxygen, nutrients (nitrate, nitrite, ammonium, total and reactive phosphates), disk of Secchi measurements and total surface suspended solids. In addition volume rates of wastewater transport (Q) were estimated, the determination of total nitrogen from the most important, next to the lagoon, estuary (Estero Esterón) and the upstream drain (Dren Juárez), and two currents determinations (October 1994 and October 1995) in some places in the lagoon. In order to determine the possible ecological impact to the environment caused by an increase in the flow discharges, a hydrodynamic model was used to determine the dispersion of pollutants in the lagoon. Simulations were made using 10^4 and 10^5 values of the diffusion coefficients. It is found that the currents are mainly driven by wind and tides. The circulation in the area is estuarine due at the wastewater influence. Two different zones are early evident in the area: *Laguna Santa María* and *Estero Esterón*. The *laguna* showed high concentrations of nutrients and low oxygen, salinity and pH in the adjacent area of the Estero Esterón which is clearly due to the influence of wastewater discharges. The temporal distribution showed high concentrations of nutrients during the rainy season (summer and fall). In the *Estero*, it is observed a strong gradient of high nutrients concentration, low oxygen and pH in the inner zone, due to the effect of tidal currents which diluted the material incorporated. Seasonally, the highest concentrations of nutrients were observed in winter. A comparison of the numerical simulations and field observations, show significant differences which seems to be due to the exclusion of the wind driven circulation in the model, also the adequate flushing time in the lagoon (2.26 days) and the presence of the great extension of mangrove in the adjacent area, that is an important buffer zone for the rains contributions, and their clay-mud sediments are an efficient tramp of nutrients. It is observed an increase of nutrient concentrates in the area with-respect to earlier studies which seems to be due to the increase of antropogenic origin. From the results, it is suggested to consider a wastewater treatment with the interest of minimizing the impact of the large quantities of wastewater's incorporated to the lagoon.

I. INTRODUCCION

Las lagunas costeras son cuerpos de agua semicerrados de forma alargada y relativamente angostos, separados del mar por islas o barreras arenosas y orientados en forma paralela a la línea de costa (Phleger, 1969). Ecológicamente son sistemas de **interacción** con el mar adyacente y su importancia reside en que son zonas de alta **productividad**, que al interactuar con aguas oceánicas aportan grandes cantidades de nutrientes al mar, lo que permite el sostenimiento de grandes volúmenes de especies de plataforma (Villalba Loera, 1980).

Esta última característica ha propiciado el asentamiento de numerosas poblaciones en la zona costera, lo que ha originado un aumento considerable de las descargas de aguas residuales producto de las actividades antropogénicas, que aportan entre otros contaminantes, grandes volúmenes de materia orgánica, detergentes, microorganismos patógenos y sustancias tóxicas. Estos materiales al ser incorporados al medio lagunar causan alteraciones en el equilibrio ecológico del cuerpo receptor, lo que origina modificaciones en la dinámica general del ecosistema acuático, especialmente en aguas someras. Debido a ello, éstas alteraciones deben ser cuidadosamente observadas a fin de obtener resultados óptimos en las actividades de explotación y evitar efectos nocivos en el medio (Waldichuk, 1977).

En el Noroeste de México la agricultura se ha caracterizado por ser intensiva y altamente tecnificada con predominio de monocultivos extensos, lo que ha originado la creación de complejas redes de distritos de riego con elevados rendimientos por unidades de producción (De la Lanza-Espino, 1991). El enorme desarrollo de la superficie cultivada, además de aumentar la utilización de diversos agroquímicos, ha introducido cantidades **elevadas** de fertilizantes, lo que ha provocado cierto tipo de contaminación específica, cuyos resultados son muy severos en los ecosistemas costeros. Estos compuestos pueden desencadenar procesos rápidos de eutroficación, alterando los mecanismos de sucesión natural, favoreciendo la proliferación de algunas especies en detrimento de otras (De la Lanza-Espino, 1994). Su introducción al medio acuático se lleva a cabo por el lavado de los suelos realizado por la lluvia, y su concentración en las corrientes de agua, que finalmente

drenan hacia el medio marino (Aldeco, 1979). Por otra parte, las aguas residuales generadas por las comunidades humanas, originan serios impactos ecológicos en aquellas zonas litorales donde se vierten debido a la incorporación de grandes volúmenes de materia orgánica, detergentes y otras sustancias producto de sus **diversas** actividades.

En las lagunas litorales de la costa oriental del Golfo de California, sobresalen tres zonas altamente impactadas por las descargas de aguas residuales: la región de la Bahía de **Mazatlán**, y zonas Sur de Sonora y Norte de Sinaloa (De la Lanza, 1991). En **tales** áreas se han observado diversas alteraciones en las condiciones naturales del medio, como lo son altas concentraciones de nutrientes y bajos valores de oxígeno en las zonas de influencia **de las** aguas residuales, como las obtenidas en el Puerto de **Guaymas**, Sonora (Ocha-Manchetto, 1987; Ortíz-Gallarza *et al.*, 1991); así como en **Yavaros**, Sonora (Ortega-Salas y Stephenson, 1976), quienes obtuvieron altos valores de nutrientes (amonio y nitratos+nitritos), y mencionan que estos valores se deben al uso de fertilizantes agrícolas en el área agrícola circundante.

Para poder determinar el impacto causado por la introducción de cualquier fuente contaminante en un ecosistema acuático, es imprescindible conocer tanto cualitativa como cuantitativamente los parámetros que determinan la calidad del agua del cuerpo lagunar, con el fin de no alterar su estabilidad, persistencia y utilidad de recursos. Por ello los estudios de caracterización ecológica son indispensables para establecer mecanismos de conservación y óptimo aprovechamiento de los recursos de los ambientes costeros.

A fin de conocer la naturaleza de cualquier sistema acuático es necesario describir las características fisicoquímicas que soportan a los mencionados sistemas (**Botello**, 1981 en Cervantes, 1982), ya que una gran parte de las **caraterísticas** de la columna de agua **están** dadas por las múltiples reacciones químicas que se llevan a cabo en ella (Mee, 1977). Además, no es posible referir los mecanismos químicos y biológicos que se llevan a cabo en un ambiente determinado, sin una consideración previa de los procesos **físicos** que actúan sobre el mismo, debido a que éstos últimos son la **determinante** primaria del tipo de ecosistema que se desarrollará en una región en particular (**Yañez Arancibia**, 1986).

Por lo anterior, es sumamente importante que los estudios de caracterización y descripción de la hidrología de los cuerpos lagunares receptores de aguas residuales, se enfoquen al conocimiento de los procesos químicos que se llevan a cabo en la columna de agua (con especial **énfasis** en la zona de descarga), **al** análisis de las características **físicas** imperantes, y al estudio de la dispersión de la masa contaminante incorporada. Ello permitirá no sólo obtener información de la zona en **términos** descriptivos espacio-temporales, sino de incorporar el aspecto **físico** que aporte mas elementos que **permitan** estimar la capacidad de soporte del medio y el impacto causado sobre las poblaciones autóctonas, **con** el fin de predecir el estado que eventualmente pudiera exhibir el sistema debido a alguna alteración de las condiciones originales del **mismo**.

1.1 ANTECEDENTES

Debido a la gran importancia económica y ecológica de la zona costera, en los últimos años se han intensificado los trabajos sobre la hidrología de los sistemas lagunares-estuarinos principalmente en los aspectos de su dinámica hidrológica, calidad de agua y geoquímica. Así, se han realizado trabajos sumamente importantes en diversas áreas de la república mexicana que han permitido conocer ampliamente su dinámica físico-química y relaciones ecológicas, como son los realizados en la laguna de Términos en Campeche, las Lagunas de Tamiahua y de Alvarado en el estado de Veracruz, y el Sistema Lagunar de Huizache-Caimanero en el Estado de Sinaloa.

Estudios importantes se han llevado a cabo en diversos sistemas lagunares del Estado de Sinaloa. Destacan los realizados por Conde (1991) quien efectuó un análisis hidrológico y de contaminación en el sistema Altata-Ensenada del Pabellón. Reyes (1981) trabajó sobre la dinámica de nutrientes y producción primaria en el Estero El Verde, mientras que Arenas (1980) realizó el balance de carbono orgánico, nitrógeno y fósforo en Huizache-Caimanero, entre otros.

En el Sistema Lagunar de Topolobampo se han llevado a cabo diversos estudios sobre las condiciones hidrodinámicas del sistema. Se puede mencionar lo reportado por De Alba-López (1965), López-Gutiérrez (1965, 1966) y Olivares-Beltrán (1969), quienes realizaron estudios para resolver los problemas de acceso a la bahía de Topolobampo, efectuando estimaciones de oleaje, mareas y vientos en la región de la boca del sistema, y experimentos con trazadores radioactivos para determinar tendencias de acarreo de materiales sólidos.

Phleger y Ayala Castañares (1969) describieron la geología del Sistema Lagunar de Topolobampo y efectuaron una descripción general de las corrientes, la granulometría y el transporte sedimentario. Por otra parte, Muhech (1990) observó una modificación en la distribución y el contenido de materia orgánica y carbono orgánico en los sedimentos del área con respecto al trabajo de Phleger y Ayala (*op cit*) debido al aumento del aporte antropogénico.

La ecología de manglares del sistema lagunar **fué** descrita por Lecuanda (1967). **Gilmartin** y **Revelante** (1978) determinaron las comunidades fitoplanctónicas del Golfo de California y sus lagunas costeras, en el que reportan los primeros valores de producción primaria y nutrientes en el Estero Lechuguilla (Santa María).

Entre los estudios' sobre las diversas comunidades de organismos en el área se pueden mencionar los trabajos efectuados por **Hernández y Juárez (1988)**, quienes describieron la comunidad bentónica de la zona; **Sánchez Bolaños et al., (1988)** realizaron un estudio sobre crustáceos decápodos; **González-Monares (1984)** estudió la comunidad íctica, encontrando que el 64% de las especies **capturadas** tienen importancia comercial. **Salgado y Juárez (1986)** analizaron la presencia de helmintos en la lisa *Mugil cephalus*, mientras que **Nuñez Moreno (1991)**, realizó un trabajo sobre el zooplancton en el sistema lagunar de Topolobampo.

Aún cuando el área representa un lugar preponderante en el Estado en cuanto a la captura de **peneidos** (solamente superado por Mazatlán), estudios al respecto son sumamente escasos, resaltando los realizados por **Pedroza (1977)** y **Audelo (1992)**.

Entre los trabajos sobre hidrología de la zona se pueden mencionar los efectuados por **López-Ruelas (1985)**, quien describió algunas variables físicas y químicas durante el ciclo **febrero-noviembre** de 1982. **Sigala-Morales(1990)** realizó un estudio de corrientes con el método de cuerpos de deriva, y describió la distribución de temperatura y salinidad en la porción sur de la laguna; mientras que **Verdi-Lara et al., (1982)**, efectuaron un estudio preliminar sobre hidrología y comunidades planctónicas únicamente en las lagunas de Topolobampo y **Ohuira**.

La distribución espacio-temporal de nutrientes en el Sistema Lagunar **fue** descrita por primera vez por **Hernández et al., (1992)** durante el ciclo anual 1987-1988. En el período 90-91 (**Hernández y Escobedo, en prensa**) efectuaron un estudio sobre variables físicas y químicas en ambos **periodos** mareales. Sin embargo, en ambos trabajos se recabó escasa información sobre Santa María.

Se han realizado diversos trabajos sobre contaminación en la zona, como los efectuados por la S.R.H. (1971), quienes evaluaron la influencia de los pesticidas sobre las condiciones ecológicas de la Bahía de Topolobampo y datos climatológicos de **Ohuira**, sin referirse a la laguna de Santa María. En 1973 realizaron otro estudio en el que se pretendió determinar las condiciones ecológicas de Bahía Topolobampo. Durante 1975 la misma dependencia realizó un trabajo sobre aspectos físicos, químicos, bacteriológicos, medición de canales y ruta de pesticidas en la zona, pero obteniendo datos en un solo muestreo y pocos puntos en el área. El primer trabajo sistemático sobre calidad bacteriológica fué realizado por Hernández *et al.*, (1992, 1995) durante el periodo 90-91 en el que se determinó un mayor impacto causado por las descargas antropogénicas en las lagunas de Santa María y **Ohuira**. Muhech y Orozco (1994) analizaron la concentración de **coliformes** totales y fecales en sedimentos del sistema lagunar y su relación con la distribución granulométrica y carbono orgánico.

Otros trabajos sobre **contaminantes** fueron realizados por Hernández y Escobedo (1992) quienes en 1987 efectuaron una evaluación inicial de la contaminación por metales traza en sedimentos del sistema lagunar, en el que se observa la influencia de las actividades antropogénicas sobre la distribución espacial de cobre y plomo principalmente. Recientemente Hernández y Fierro (1994) efectuaron un estudio preliminar sobre la contaminación por plaguicidas en las zonas de descarga de aguas residuales sobre las lagunas de **Ohuira** y Santa María, en el que reportan valores de **Endosulfán** y Heptacloro que rebasan los límites establecidos para sustancias tóxicas en cuerpos receptores, de acuerdo al Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de las aguas (SEDUE, 1989), en el punto de descarga de aguas residuales sobre la laguna de Santa María; mientras que Hernández y Escobedo (1996) realizaron un análisis de la calidad del agua del sistema lagunar en el periodo 1987-1995 en que observaron un decremento en la calidad por influencia antropogénica.

1.2 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Describir la dinámica hidrológica y la variación espacio-temporal de las variables físicas y químicas; así como determinar el impacto de las aguas residuales que inciden sobre la Laguna de Santa María, Ahorne, Sinaloa.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1) Descripción de la hidrodinámica de la laguna de Santa María, Sinaloa.
- 2) Determinación de la fluctuación espacio-temporal de las variables físicas y químicas.
- 3) Cuantificación de la cantidad de agua residual que es incorporada a la laguna.
- 4) Aplicación de un modelo hidrodinámico numérico,
- 5) Aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las investigaciones oceanográficas realizadas en el área de Topolobampo se iniciaron formalmente hace 25 años aproximadamente con el trabajo geológico realizado por Phleger y Ayala (1969). Sin embargo, aún cuando la importancia ecológica y económica de este sistema lagunar es evidente por la gran cantidad de organismos de importancia comercial que son capturados en la zona (González Monares, 1984), los estudios realizados son escasos, y la mayor parte de los mismos se refieren principalmente a las lagunas de Topolobampo y Ohuira. Por otra parte, con el proyecto de incorporación del puerto de Topolobampo al Corredor Comercial de la Cuenca del Pacífico, se efectuaron en la zona diversas modificaciones al medio entre las que destacan dragados y rellenos para adecuar las condiciones de navegabilidad del puerto de acuerdo a las nuevas expectativas. Sin embargo, los trabajos efectuados aparentemente no contemplaron la conservación de uno de los sistemas más productivos en cuanto a captura de especies de escama y **peneidos** tanto de bahía como de **altamar**, ya que las modificaciones solo están encaminadas a la construcción de la infraestructura necesaria para la recepción , de los productos comerciales y al alojamiento de personal, Si tomar en cuenta que el incremento tanto de las actividades portuarias y poblacionales, además de las diversas modificaciones en el medio, pondrían en peligro el equilibrio ecológico de las lagunas aledañas.

En el Sistema Lagunar de Topolobampo, aún cuando el volúmen de aguas residuales incorporadas es **importante**, **no existe ningún** tratamiento de las descargas incorporadas, causando diversas alteraciones en el medio, como lo son: el azolve de las zonas internas de las lagunas de Ohuira y Santa María, y el decremento de la calidad del agua para usos acuaculturales y recreativo con contacto primario entre otros (Hernández y Escobedo, 1996). El presente trabajo pretende describir la hidrología del cuerpo lagunar menos estudiado del sistema, la dinámica de nutrientes y partículas incorporadas al medio, y la predicción del impacto causado en la zona por cualquier modificación introducida en el volumen o composición de las descargas residuales.

1.4 AREA DE ESTUDIO

La Laguna de Santa Maria se encuentra situada en el Noroeste del Estado de Sinaloa entre los 25° 33' y los 25° 42' de latitud Norte, y los 109° 09' y 109° 16' de longitud Oeste (Fig. 1). Junto con las lagunas de Topolobampo y Ohuira forma un sistema lagunar de 225 km² de superficie denominado **Sistema Lagunar de Topolobampo** (Díez-Pérez y Ramírez-García, 1976). Esta laguna es la más pequeña los tres cuerpos lagunares con un área de aproximadamente 40 km² (Phleger y Ayala-Castañares, 1969). Hacia su parte Este presenta varios esteros, entre los que destacan por su extensión El Desecho y El Esterón, de los cuales el último transporta las aguas residuales de la Cd. de Los Mochis, de la Compañía Azucarera y de la amplia zona agrícola aledaña. En la parte Oeste se separa del Golfo de California por una isla de barrera (isla Santa Maria) que tiene una longitud de 2 1.72 1 km por 1.601 km de ancho. Hacia el Sur se localiza el estrecho que la comunica con la laguna de Topolobampo (González-Monares, 1984).

De acuerdo a Phleger y Ayala-Castañares (1969) el área tuvo su origen durante el Pleistoceno como producto de la acción del antiguo delta del Río Fuerte sobre las rocas de la sierra Navachiste. Durante esa época el área se consideraba tectónicamente activa representada por levantamientos corticales acompañados por vulcanismo y regresiones marinas. Dicho vulcanismo dió lugar a la actual Sierra de San Ignacio. Para ello el Río Fuerte vertía sus aguas en el mar al norte de Topolobampo, dando lugar a un delta, cuyos sedimentos fueron redistribuidos por el oleaje y las corrientes de marea y depositados en la desembocadura del sistema formando una barra que limita la Bahía del Colorado y la laguna de Santa Maria llamada actualmente “Isla Santa Maria” (Olivares Beltrán, 1969; Phleger y Ayala Castañares, 1969).

La vegetación circundante está compuesta principalmente por *Rhizophora mangle*, *Avicennia nitida* y algunos ejemplares del tipo *Salicornia* (Lecuanda, 1967; Phleger y Ayala, *op cit*).

La marea en la región es de tipo semidiurno con un rango medio de 1.138 m (UNAM, 1989). El oleaje incidente es de dos tipos: el formado por olas largas oceánicas que provienen del

SW, con **periodos** de 15 a 20 segundos y longitud de 350 a 620 m que incide sobre la isla Copas con ángulos **pequeños**; y el oleaje del WNW formado por olas irregulares de características variables y **periodos** cortos (de 3 a 5 segundos) que se forman en el Golfo de California y que deben su irregularidad precisamente a su cercanía a la zona donde se generan (**Olivares-Beltrán, op cit**). No hay antecedentes de registros de oleaje en el interior del sistema lagunar.

El clima de la región es muy cálido y seco, del tipo Bw (**h'**) hw (e). La temperatura media anual es de 25.1 °C, siendo julio, agosto y septiembre los meses de mayores temperaturas, con un promedio máximo de 30.5 °C. La temperatura extrema mínima anual es de 12 °C, siendo enero y febrero los meses más fríos (Secretaría de Marina, 1980). La precipitación es escasa, con un promedio anual de 224 mm, y un patrón de lluvias de finales del verano y principio del otoño. Otro fenómeno climático importante en la zona es la incidencia de ciclones tropicales durante el verano (**Sánchez-Santillán y De la Lanza, 1994**).

Los vientos dominantes en los meses de octubre a mayo son del noroeste con intensidad promedio de 2.5 m/seg, mientras que durante los meses de junio a septiembre son del suroeste con la misma intensidad (**Phleger y Ayala Castañares, op cit; Olivares-Beltrán, op cit; Secretaría de Marina, 1980**). Debido al clima, el fenómeno de brisas es importante, ya que el calentamiento de la capa de aire que está en contacto con la tierra disminuye su densidad y asciende por convección, ocasionando la sustitución de esta capa por aire mas fresco y mas húmedo proveniente de la capa que se encuentra en contacto con el mar.

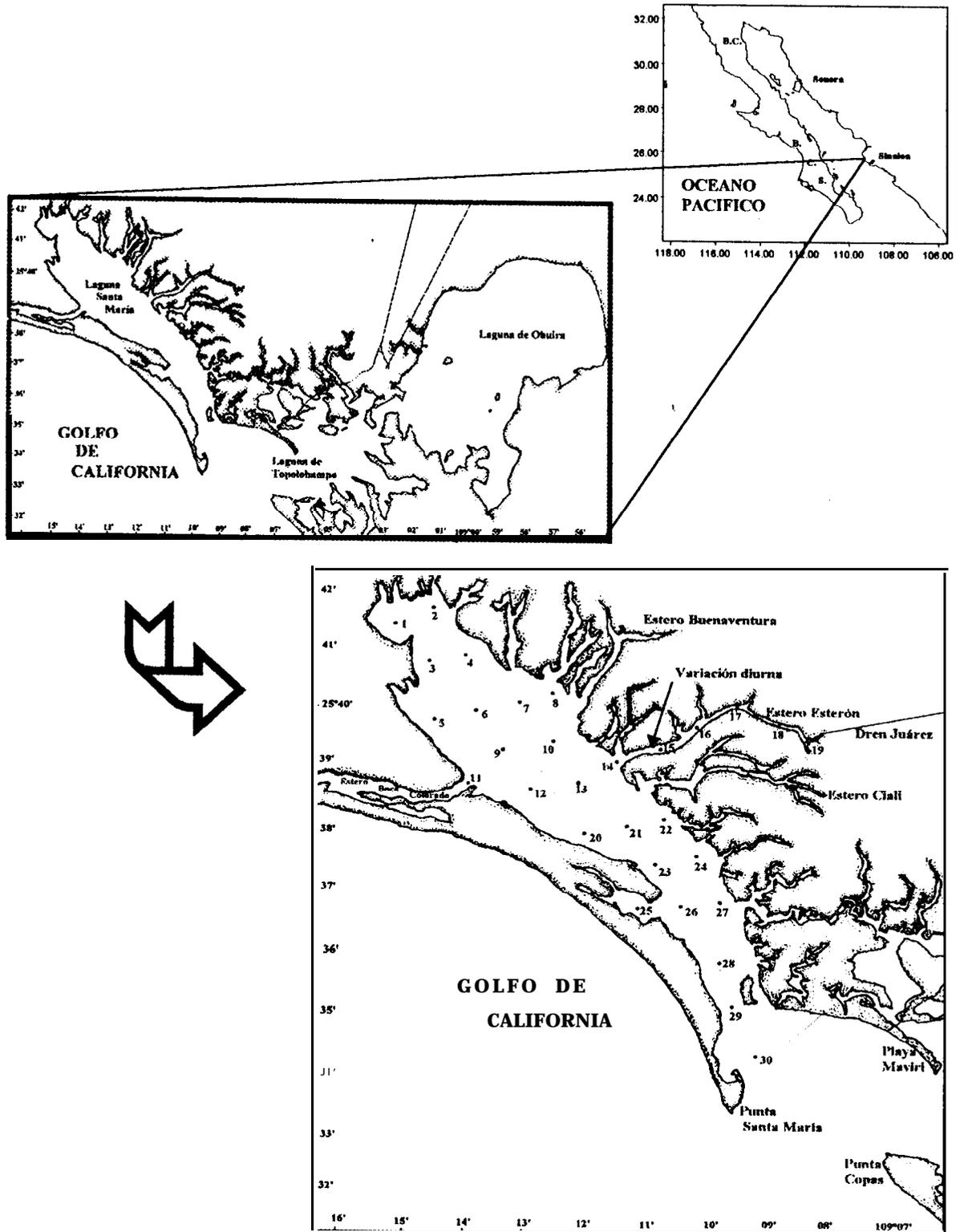


Fig. 1. Localización del área de estudio y ubicación de los puntos de muestreo de las variables físicas y químicas.

II. MATERIALES Y METODOS

2.1 TRABAJO DE CAMPO.

Con el fin de cuantificar la cantidad de agua residual que es incorporada a la Laguna de Santa María, se midió estacionalmente la sección transversal del canal que transporta las aguas residuales de la Cd. de Los Mochis, Ingenio Azucarero y la zona agrícola aledaña (**Dren Juárez**), y que conecta directamente con el estero **Esterón** (Fig. 2). Para ello se determinó la batimetría de un transecto perpendicular del canal, utilizando un **estadal** de 4 m de longitud, tomando la profundidad del dren a intervalos de 50 cm. El flujo promedio de la corriente fue determinado con el método de cuerpos de deriva (Alvarez-Sánchez et *al.*, 1982).

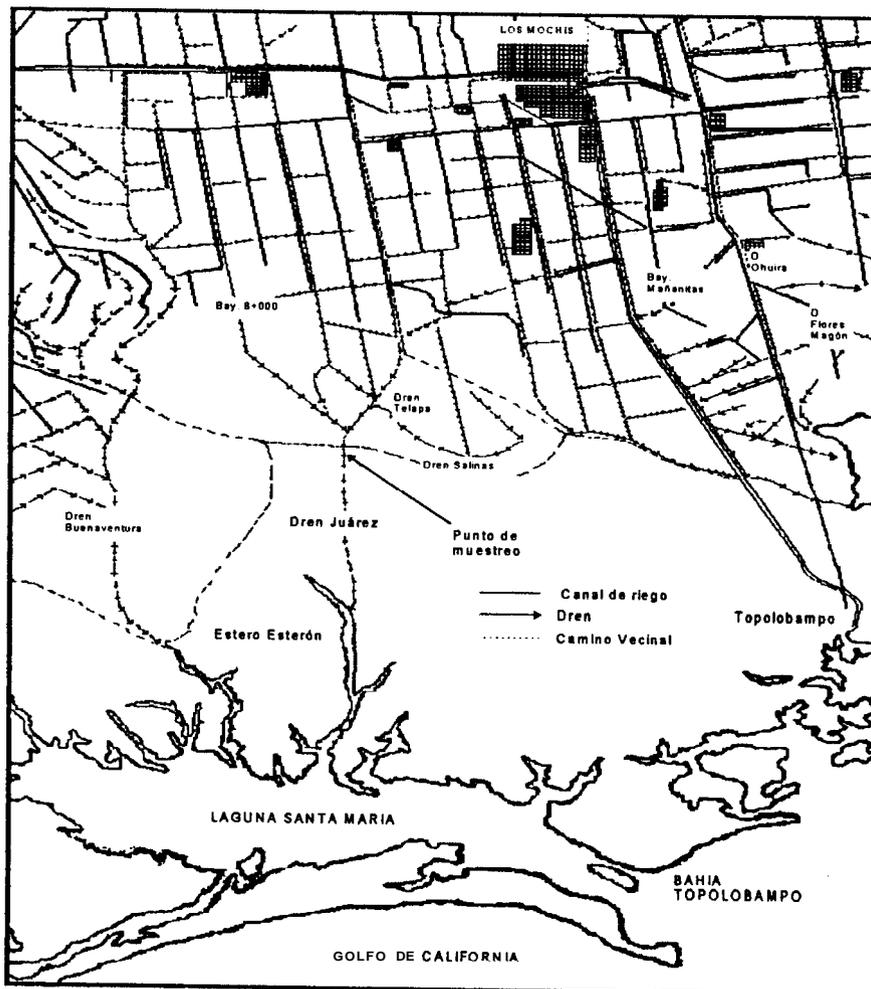


Fig. 2. Vista parcial del sistema de riego agrícola del Valle del Fuerte, Ahorne, Sinaloa.

Durante Octubre de 1994 y Octubre de 1995 se efectuaron 2 estudios de corrientes en la laguna de Santa María, para los cuales se **utilizaron** correntómetros programables **InterOcean S4** con resolución de 0.5 segundos. Durante el primer muestreo se colocaron en el nivel de fondo 3 equipos distribuidos en la boca de la laguna (13.5 m de prof.), zona de descarga del dren Juárez (7.0 m), y estero Boca Colorado (3.0 m). Durante octubre de 1995 se utilizaron 5 correntómetros ubicados en la zona de la siguiente manera: boca de la laguna, estero Boca Colorado, parte media de la laguna, y en el estero **Esterón** a dos niveles: fondo (6.0 m) y **superficie** (**Fig. 3**). Los equipos **fueron** programados para medir un minuto -de cada 5 minutos y obtener un valor promedio, y se posicionaron en el sitio mediante un **GPS Magellan 5000**. Adicionalmente se colocó en ambas **campañás** de muestreo un **ológrafo** direccional en la parte más interna de la laguna, el cual registró la marea cada 4 minutos.

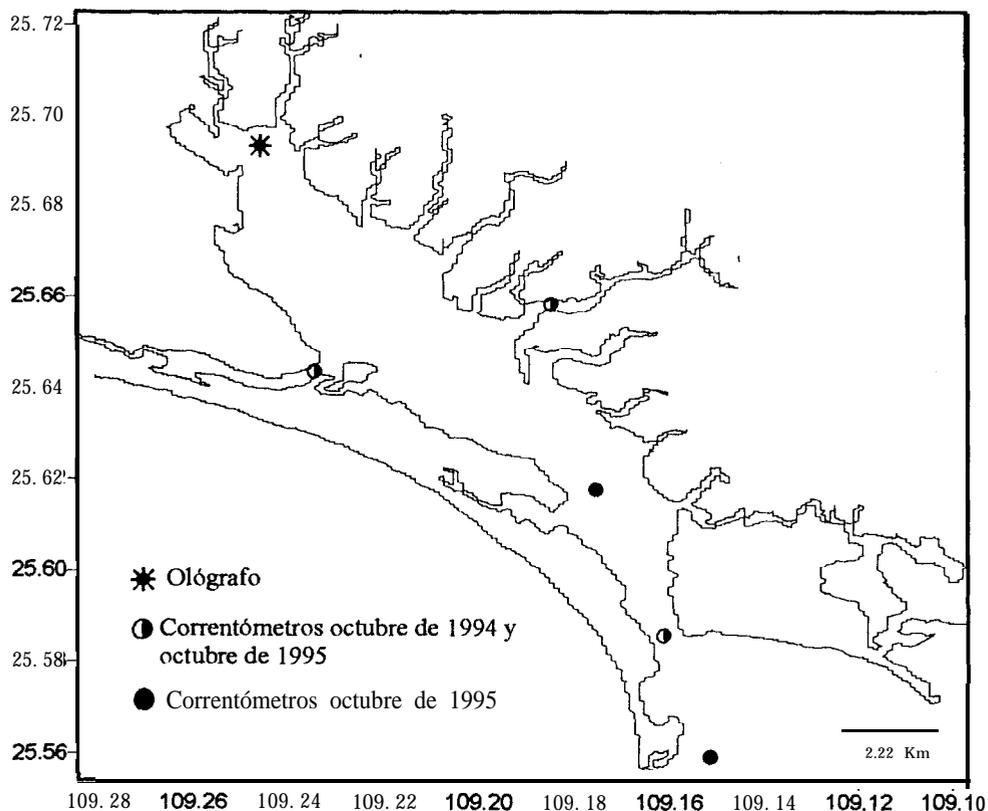


Fig. 3.- Ubicación de los correntómetros y ológrafo en la laguna de Santa María.

Con el fin de determinar la batimetría de la zona, se efectuó un recorrido sobre 10 transectos en el cuerpo de la laguna (Fig. 4) en los que se midió la profundidad cada 15 segundos mediante un sonar digital marca Humminbit-d 400, y se tomó la posición del punto con un GPS Magellan 5000 cada minuto (Wright, 1974).

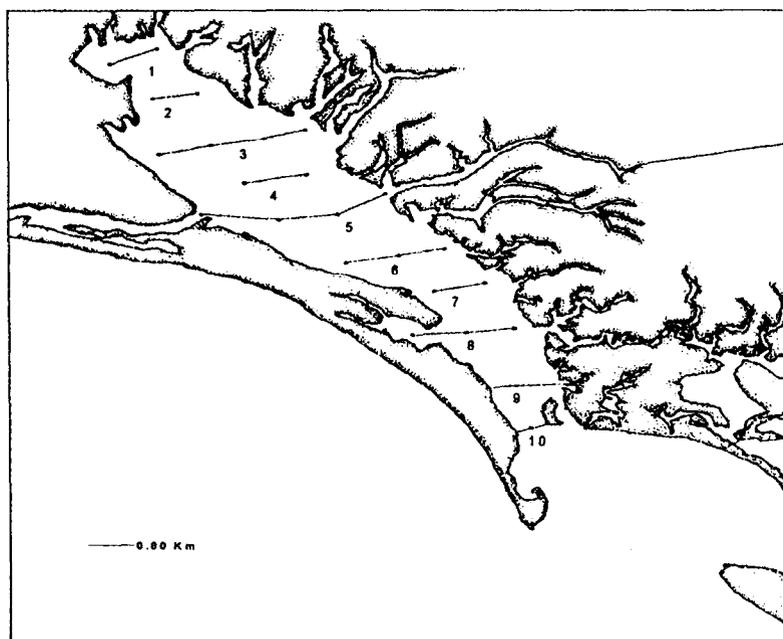


Fig. 4.- Ubicación de transectos para la determinación de la batimetría.

Con el propósito de describir la fluctuación estacional de las variables físicas y químicas en la zona se efectuaron durante el período febrero-octubre de 1995, 4 muestreos en 24 puntos distribuidos en el cuerpo lagunar y 6 a lo largo del Estero Esterón (Fig. 1) durante los días 9 de febrero, 16 de mayo, 22 de agosto y 20 de octubre, y que correspondieron a las épocas climáticas de invierno, primavera, verano y otoño respectivamente. En tales puntos se determinaron *in situ* en superficie y fondo la temperatura ($T^{\circ}\text{C}$), salinidad ($S_{\text{‰}}$), potencial de hidrógeno (pH) y profundidad de disco de Secchi (S); y se obtuvieron muestras para el análisis de oxígeno disuelto (O.D.), nitratos (NO_3), nitritos (NO_2), amonio (NH_3), nitrógeno total (NT), fósforo total ($\text{PO}_4\text{ T}$) y reactivo ($\text{PO}_4\text{ R}$), y sólidos suspendidos totales (SST). Por otra parte, para conocer la variación diurna de las mismas variables de las aguas mayormente impactadas por las descargas antropogénicas incorporadas, se efectuó un muestreo de 24 horas los días 17 y 18 de octubre de 1995 en un punto cercano a la zona de descarga del estero

Esterón sobre la laguna (Fig. 1). Cada dos horas se registraron datos de: T°C, S‰ y pH cada metro de profundidad; y se obtuvieron muestras para análisis de: O.D., NO₃, NO₂, NH₄, PO₄ T y PO₄ R en los niveles de superficie y fondo.

La obtención de datos de temperatura, salinidad y pH se efectuó mediante un equipo medidor de Calidad de agua marca Horiba modelo U10, con precisión de 0.1 °C, 0.1 ‰ y 0.01 unidades de pH.

Para el análisis de nutrientes, se tomaron muestras de agua con una botella Niskin de 1.7 lt de capacidad y se preservaron en botellas de plástico de 250 ml las cuales se congelaron inmediatamente en el campo con hielo seco (CO₂ sólido), para posteriormente ser analizadas en el laboratorio de la Estación Oceanográfica del Pacífico Centro (Secretaría de Marina, Topolobampo, Sinaloa). Las muestras obtenidas para la cuantificación de amonio fueron analizadas de inmediato. Para el análisis de Sólidos Suspendedos Totales y Nitrógeno Total se colectaron muestras en la superficie de la columna de agua en botellas de plástico de 1 lt. de capacidad, mientras que las correspondientes para el análisis de oxígeno disuelto fueron tomadas en botellas D.B.O. de 300 ml.

Los datos de dirección e intensidad del viento fueron tomados de la estación meteorológica del Sector Naval de Topolobampo, la cual se encuentra ubicada en el Sector Naval de Topolobampo. Por otra parte, se utilizó un anemómetro manual Khalsico para la determinación de la dirección e intensidad del viento durante la campaña de muestreo de otoño de 1995.

Con el fin de obtener el coeficiente de difusión turbulenta en el área de estudio para la calibración del modelo de dispersión de contaminantes, se efectuó un experimento de dispersión mediante la inyección de la tinta fluorescente **fluoresceína** (uranina) en solución acuosa en el punto mas cercano a la zona de descarga del dren Juárez sobre el estero **Esterón** (estación 19). La tinta se siguió en una embarcación menor de 4 m de eslora. El trazador fue detectado visualmente, y se tomaron muestras de agua **superficiales** cada 5 minutos con botellas de plástico de 250 ml, tomando la posición del punto de muestreo mediante un posicionador por satélite Magellan 5000. La colección de muestras se suspendió cuando la tinta dejó de ser detectada (Wright, 1974).

2.2 TRABAJO DE LABORATORIO.

Los análisis de las muestras obtenidas en el trabajo de campo fueron realizados en las instalaciones del laboratorio de Protección al Medio Ambiente Marino (PROMAM) de la estación Oceanográfica del Pacífico Centro (Secretaría de Marina) en el Puerto de Topolobampo, Sinaloa, y en el laboratorio de Investigación del Dpto. de Biología de la Universidad de Occidente, Campus Los Mochis.

La determinación de oxígeno disuelto se efectuó mediante el método Winkler con la modificación de azida (técnica 4500-OC, APHA, 1989). Las muestras obtenidas para el análisis de nutrientes, a excepción del amonio, fueron filtradas con filtros de fibra de vidrio GF/C antes de su cuantificación.

La determinación de los nitratos se efectuó mediante el método de Morris y Riley (1963) con algunas modificaciones sugeridas por Grasso (1964) nitritos según el método descrito por Bendschneider y Robinson (1952); amonio con el método del fenol-hipoclorito descrito por Riley (1953) con algunas modificaciones descritas por Solórzano (1969); fósforo reactivo según lo descrito por Murphy y Riley (1962), y fósforo total de acuerdo al método del molibdato con una previa digestión con persulfato de amonio (técnica APHA, 1989). Todas las técnicas fueron desarrolladas según lo recomendado en Strickland y Parsons (1972) para cada caso.

La cuantificación de los sólidos suspendidos totales fue realizada mediante el método gravimétrico (técnica 2540 D) según lo estipulado en APHA (1989). Los intervalos de detección para cada análisis efectuado se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Intervalos de detección de las técnicas utilizadas en los análisis efectuados.

VARIABLE	O.D mg/l.	NO ₃ μM	NO ₂ μM	PO ₄ R μM	PO ₄ T μM	NH ₄ μM
Rango	± 50.0	0.05-45.0	0.01-2.5	0.03-5.0	0.08-6.0	0.1-10.0

A fin de medir la concentración de la tinta fluorescente en las muestras de agua obtenidas en el experimento de dispersión efectuado en el estero Esterón, se efectuó un análisis de barrido a un estándar de solución conocida de la tinta mediante un espectrofotómetro Spectronic 21, para obtener la longitud de onda adecuada para la lectura de las muestras. La cuantificación de la

concentración de las muestras se efectuó por diferencia entre las aguas antes de la inyección de la tinta, y las obtenidas posteriormente.

2.3 TRABAJO DE GABINETE.

2.3.1 Cálculos.

Las cálculos para la determinación de la cantidad del agua residual incorporada el estero **Esterón** se efectuaron mediante el cálculo del gasto del dren Juárez aplicando la ecuación: (Trueba Coronel, 1984):

$$Q = V * A$$

$$V = Dx/Dt$$

Donde:

V = Velocidad (m/s)

Dx = Distancia (m)

Dt = Tiempo (s)

A = Area (m²)

Q = Gasto (m³/s)

La batimetría de la zona **fue obtenida** de los datos colectados en el monitoreo de la batimetría los cuales **fueron** corregidos al nivel medio del mar, y se procesaron mediante programas de interpolación bidimensional y **graficado** en ambiente windows, para crear las isolíneas de profhdidad correspondientes.

Con el fin de conocer el volúmen lagunar, se realizó la **digitalización** del contorno de la laguna por medio de una tableta digitalizadora a partir de la carta INEGI N° G12D26, escala 150,000) mediante el uso de un programa apropiado para tal fin. Los datos georeferenciados **fueron** grabados en un archivo y éste he procesado para obtener las isolíneas y el contorno. Así mismo, se

determinó el área de la laguna mediante una programa elaborado en el CICIMAR para tal propósito, siguiendo las indicaciones de Dyer (1973). Una vez obtenido el área, se calculó el volumen del agua contenida de la siguiente manera:

$$V = \sum_{i=1}^n v(i, j)$$

Donde:

$$v(i) = a(i) \cdot h(i)$$

$a(i)$ = área de un elemento de volumen (m^2)

$h(i)$ = profundidad del elemento (NMM) (metros)

n = número de elementos con $prof. \neq 0.0$

Por otra parte, se calculó el prisma de marea en la zona., el cual se define como el volumen de agua contenido en la laguna costera entre el nivel de pleamar medio superior y el nivel de bajamar medio interior, de acuerdo a la siguiente ecuación (Dyer, *op cit*; Aldeco y Salas, 1994):

$$P = V_{ma} - V_{mb} \quad \text{Donde:}$$

P = Prisma de marea

V_{ma} = Volúmen de la laguna en pleamar media superior (m^3)

V_{mb} = Volúmen de la laguna en bajamar media inferior (m^3)

Con el fin de conocer el tiempo de renovación del agua en la Laguna de Santa Maria, se calculó el *tiempo de evacuación* mediante el método del prisma de marea (Dyer, *op. cit.*; Wright, 1974), el cual consiste en suponer: que el agua que entra en el flujo se encuentra completamente mezclada con la que se encuentra adentro, y que los volúmenes introducidos de agua de mar y de agua dulce, igualan al volúmen del prisma de marea. En el reflujó, el volumen de agua que sale y el contenido de agua dulce de él debe ser igual al incremento en el flujo del agua dulce. Si V es el volúmen en bajamar y P es el volúmen intermareas (prisma de marea) entonces el tiempo de residencia en ciclos de marea es:

$$T = \frac{V + P}{P}$$

Donde:

T= Tiempo de residencia

V= Volúmen de la laguna (BMI) (m³)

P= Prisma de marea (m³)

2.3.2 Análisis estadístico

Para el análisis de la distribución espacial y temporal de los resultados obtenidos, fue necesario separar los resultados en 2 zonas: *a) Laguna costera* (estaciones 1-3 y 20-30) y *b) Estero Esterón* (estaciones 14-19). El criterio para tal decisión se fundamentó en las grandes diferencias de magnitud de todos los nutrientes medidos en la totalidad del periodo estudiado, puestas de manifiesto en un análisis de grupos (Cluster) con el método de distancias Euclidianas. El análisis de los datos de salinidad contra pH, oxígeno disuelto y nutrientes, indicó también una diferencia marcada entre el Esterón y la laguna.

La distribución espacial de las variables analizadas fueron graticadas y se hizo un análisis de la distribución temporal. Por otra parte, y con el fin de determinar diferencias significativas entre las estaciones de año y los niveles de muestreo, se aplicó a los datos un análisis de **varianza** bifactorial (ANOVA) con un nivel de confianza del 95 % (Daniel, 1989).

2.3.3 Modelación Numérica.

Con el fin de estimar las posibles modificaciones en la distribución y concentración de las diversas características de las aguas de la laguna por el incremento de las concentraciones de material introducido en las aguas residuales incorporadas, se planteó la **modelación** de la dispersión de contaminantes en la zona de estudio. Para éste análisis se aplicaron dos modelos acoplados, uno de hidrodinámica y el segundo, que toma la salida del primero, para modelar el transporte de las sustancias incorporadas.

2.3.3.1. Fundamento.

El primer paso para obtener una buena simulación de los parámetros de calidad de agua, es optimizar la solución de la parte hidrodinámica, la cual es primordialmente importante en cuerpos de agua donde la influencia de la marea es dominante.

El modelo debe tomar en cuenta los dos procesos de transporte hidrodinámico **fundamentales**:

1. Advección de los constituyentes.
2. Dispersión de la concentración en el perfil por difusión turbulenta.

Para completar la simulación de un estuario ó laguna costera, se deben tomar en cuenta todos los detalles batimétricos como el canal de transporte (de mareas) y el área de almacenamiento aunque se comporten hidrodinámicamente distintos, pues de esta manera aseguran que incluyendo el canal y sus embalses, la ecuación de conservación de masa, reproduce mas fielmente el proceso de mezcla de un contaminante en el estuario (Jiménez, 1983).

Aunque de antemano se sabe que la Laguna de Santa María cooscila con todo el sistema lagunar Topolobampo y éste con el Golfo de California (Phleger y Ayala, 1969), como una aproximación se consideró el modelo de la laguna aislada, con condiciones de frontera abierta similares a la variación del nivel que se presenta en la boca de la misma.

Se aplicó el modelo hidrodinámico numérico que simula las corrientes inducidas por mareas en lagunas costeras implementado por Jiménez (1996) y modificado para la zona de estudio. El modelo tiene como base la ecuación de continuidad o de conservación de masa y las ecuaciones de movimiento o conservación de momento, con las cuales se describe el movimiento del agua en forma macroscópica.

Se realizó la malla numérica mediante la digitalización de la zona y se construyó la matriz de integración de la laguna y el estero Esterón con un paso espacial uniforme ($\Delta x = \Delta y$) de 250 m de resolución, obteniéndose una matriz de 77 renglones por 55 columnas que representó con detalle la batimetría del área de estudio, y cuya representación en *isolíneas* se presentará en el capítulo de resultados. Entre las fuerzas actuantes o involucradas están la fuerza del gradiente de presión (W), Coriolis ($-2\rho\Omega X V$), la fuerza de gravedad ($-\rho g K$), fuerzas viscosas ($1/3 \mu V(V.V) + \mu V^2 V$) y la fuerza de marea (F_M) (González-Orduño, 1996).

Se incluye las tres componentes del movimiento (x, y, z), las cuales se encuentran normalmente hacia el este, hacia el norte y hacia arriba respectivamente. El modelo es de tipo barotrópico (se considera que la columna de agua se encuentra totalmente mezclada) por lo que está integrado verticalmente en dirección x y y , y el sistema de ecuaciones se resolvió numéricamente para encontrar las incógnitas u, v, η (velocidad en dirección x , en dirección y , y η la elevación de la superficie libre) (Jiménez, 1996).

Las componentes de la corriente (u, v) se integran verticalmente desde una profundidad media hasta la superficie variable

Las condiciones de frontera son las naturales que corresponden a la línea de costa y fondo del cuerpo de agua. La condición establecida en ellas es un flujo nulo en dirección perpendicular a la frontera y no deslizamiento en dirección tangencial. En el fondo se consideran condiciones de impermeabilidad, y velocidad tangencial nula. Como frontera artificial o abierta, se consideró la boca del sistema, y se impuso como condición de frontera la amplitud y fase de la componente M_2 de la

marea. (Jiménez, 1996). Se utilizaron las componentes semidiurnas M_2 , S_2 , K_2 , y las componentes diurnas O_1 , P_1 , K_1 , que sumadas reproducen las **características** principales de la marea en la Laguna Santa Maria. Las amplitudes y fases de los armónicos fueron obtenidos de las tablas de predicción de mareas del Instituto de Geofísica de la U.N.A.M.

Las ecuaciones diferenciales parciales de movimiento para (x, y) y la ecuación de continuidad, se integran en forma numérica, temporal y espacialmente, pasando de la forma continua de las ecuaciones diferenciales a una forma discreta de las ecuaciones en diferencias finitas adelantadas en tiempo y centradas en espacio. La discretización del modelo se ilustra en Jiménez (1996) y el detalle de las suposiciones se presenta en Obeso (1986).

En la **modelación** de la dispersión de contaminantes las ecuaciones básicas son la ecuación de continuidad, y la ecuación de advección-dispersión (Kjerfve, 1988). La difusión turbulenta es parametrizada mediante los coeficientes K_x , K_y y K_z . Los valores de éstos coeficientes se determinan por medio de experimentos de **difusión** (descargas de tinta instantáneas o continuas) en el área de interés (Morales y Ramírez, 1996). En el presente trabajo, el término de difusión vertical K_z se desprecia, debido a que se considera que la columna de agua esta completamente mezclada, por lo que se presenta únicamente la difusión horizontal.

Las condiciones de frontera son: en la frontera abierta hay un flujo del constituyente (contaminante), mientras que en la **frontera** sólida o bordes de la malla, el flujo del constituyente no existe 0 es igual a cero.

III. RESULTADOS

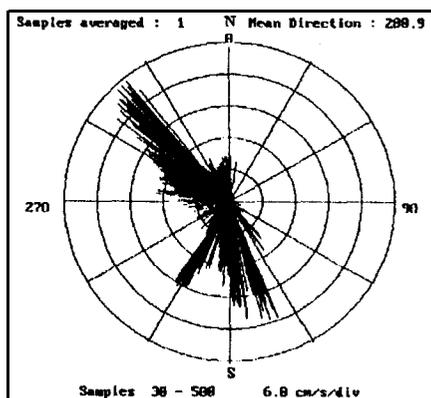
3.1 DINAMICA HIDROLOGICA.

El volumen de aguas residuales incorporadas a la laguna de Santa Maria fue obtenido mediante la determinación del gasto del Dren Juárez para cada época climática. Durante el periodo de muestreo se observaron fluctuaciones en el volumen incorporado, habiéndose registrado el gasto máximo durante el verano con **476,064 m³/día** y el mínimo durante el otoño (**290,304 m³/día**). Los gastos y áreas estacionales obtenidos durante el periodo de estudio en m³ se ilustran en la tabla 2.

Tabla 2.- Areas y gastos del Dren Juárez para cada época climática durante el periodo de estudio.

ESTACION	AREA DREN (m ²)	GASTO (m ³)
Invierno	7.78	37'480,320
Primavera	7.78	39'968,640
Verano	12.53	42'845,760
Otoño	10.19	26'127,360

De los resultados obtenidos durante el monitoreo de corrientes efectuado durante octubre de 1994 en la región de la boca de la laguna., se observó que las corrientes dominantes en ese punto son en dirección noroeste-sureste, correspondiendo a la orientación del canal, y con velocidades



máximas de 30 cm/seg durante el periodo de flujo (Fig. 5).

Fig. 5.- Diagrama polar de velocidad en el fondo de la boca de la laguna durante los días 12 y 13 de octubre de 1994.

En el **Esterón** se observó un comportamiento de canal con dirección predominantemente Noreste-Suroeste con cierta dispersión, y las magnitudes de las velocidades son mayores en dirección Noreste (20 **cm/seg**) (Fig. 6). El registro de la boca del estero Boca Colorado mostró las máximas velocidades con dirección Noreste y su comportamiento es el de un canal con mayor dispersión en dirección Suroeste con una velocidad máxima de 20 **cm/seg** (Fig. 7).

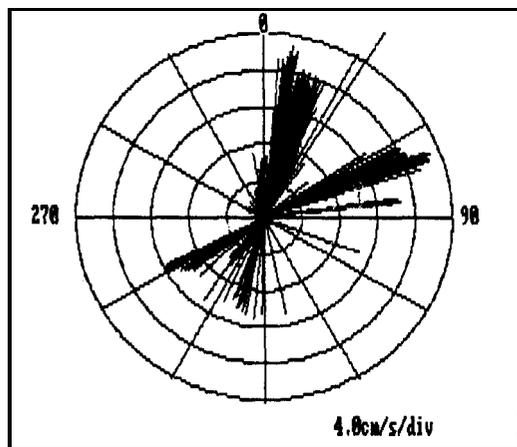


Fig. 6.- Diagrama polar de velocidad de las corrientes medidas en la boca del estero **Esterón** durante los días 12 y 13 de octubre de 1994.

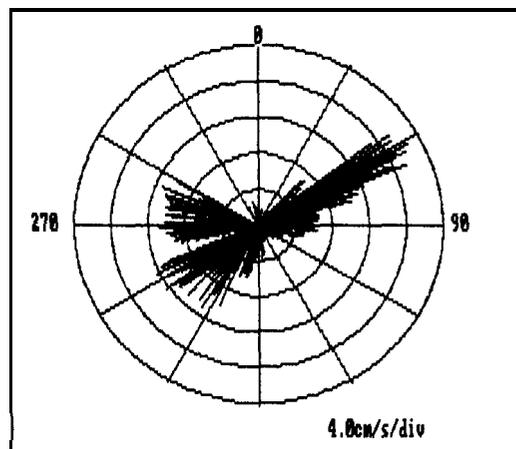


Fig. 7.- Diagrama polar de las corrientes medidas en la boca del estero Boca Colorado durante los días 12 y 13 de octubre de 1994.

Durante el muestreo de octubre de 1995, los datos obtenidos del correntómetro colocado cerca de la boca principal del sistema lagunar mostraron un flujo y reflujo de agua con dirección noreste-suroeste con mayor magnitud en dirección noreste (velocidad máxima de 40 **cm/seg**) y una mayor dispersión hacia el suroeste, debida al efecto del litoral de la punta de la Isla Santa María (Fig. 8). Los datos generados por el correntómetro colocado en la boca de la laguna, no fue posible recuperarlos por fallas en el funcionamiento del aparato.

En el centro de la laguna se registró un flujo y reflujo de agua en dirección noroeste-sureste. La dirección de la corriente fue muy uniforme con aproximadamente 180° de diferencia en dirección entre ambos con la mayor magnitud de la velocidad durante el flujo, con un valor máximo de 35 **cm/seg** (Fig. 9). El cambio de dirección en las corrientes corresponde al cambio de fase de la marea en la zona.

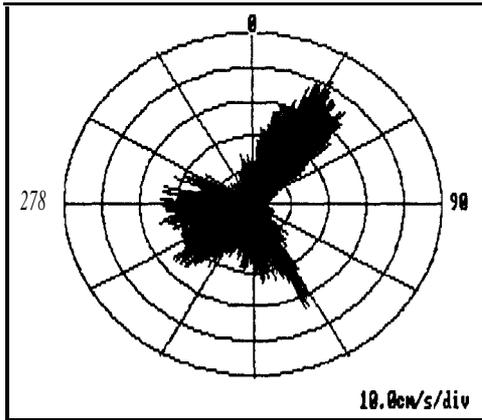


Fig. 8 Diagrama polar de velocidad de las corrientes medidas en el canal frente a Punta Santa María durante 15-19 de octubre de 1995.

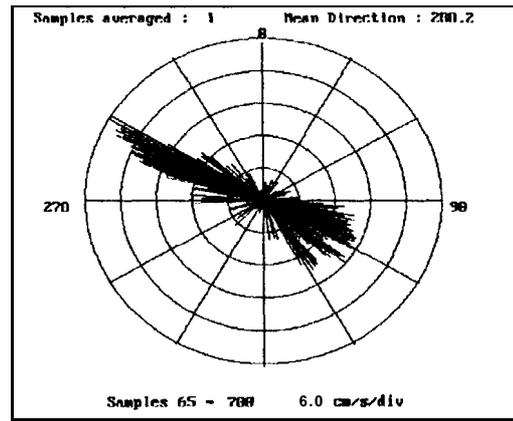


Fig. 9. Gráfico polar de velocidad de las corrientes medidas en el centro de la laguna Santa María los días 15 al 19 de octubre de 1995.

El equipo colocado en la superficie de la boca del Esterón muestra un flujo y refluo bien definido en dirección este-oeste, lo que corresponde a la orientación del estero. LA dirección de la corriente fue muy uniforme con aproximadamente 180° de diferencia en dirección entre ambos con las mayores velocidades en dirección oeste, con un valor máximo de 21 cm/seg (Fig. 10). En el fondo del Esterón se observa que la dirección de las corrientes son predominantemente suroeste-sureste, con los valores máximos durante el refluo de marea (28 cm/seg) (Fig. 11).

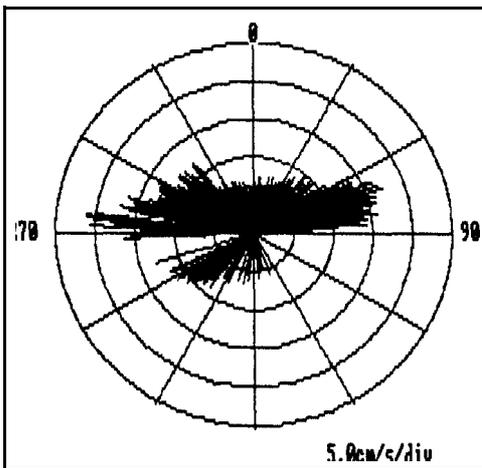


Fig. 10. Diagrama polar de las corrientes medidas en la superficie del estero Esten'm durante los días 16-20 de octubre de 1995.

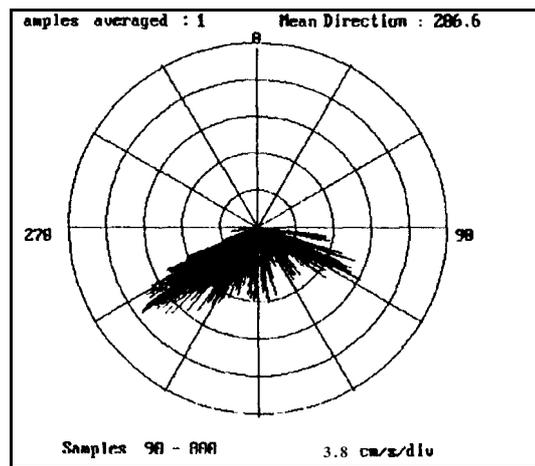


Fig. 11. Diagrama polar de velocidad de las corrientes medidas en el fondo del estero Estero Esten'm los días 16 al 20 de octubre de 1995.

En la boca del estero Boca Colorado se observó que las corrientes presentaron un comportamiento de canal con la mayor dispersión y las velocidades más intensas (28 cm/seg) en dirección noreste y que coincide con la fase de reflujos de marea (Fig. 12).

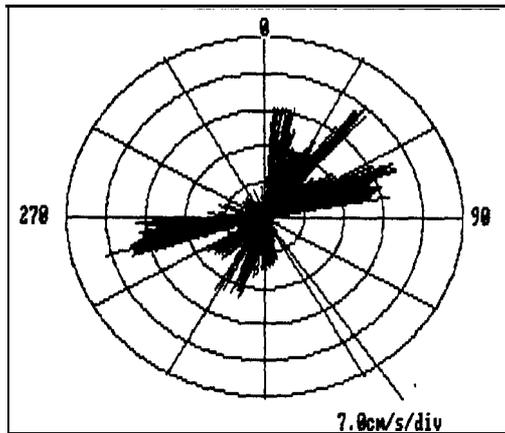


Fig. 12. Diagrama polar de las corrientes medidas a 3 metros de profundidad en el estero Boca Colorado los días 17 al 20 de octubre de 1995.

La marea registrada durante este muestreo en la cabecera de la laguna, mostró un comportamiento semidiurno, esto es, tiene un periodo de 12.42 hrs, siendo la componente principal la M_2 . Las alturas máxima y mínima se observaron el día 20 de octubre de 1995. El registro del oleaje presenta valores característicos de 1 cm de altura con un periodo de 4 segundos (Fig. 13).

Por otra parte, y con el fin de estimar el volumen de la laguna, se calculó el área del cuerpo

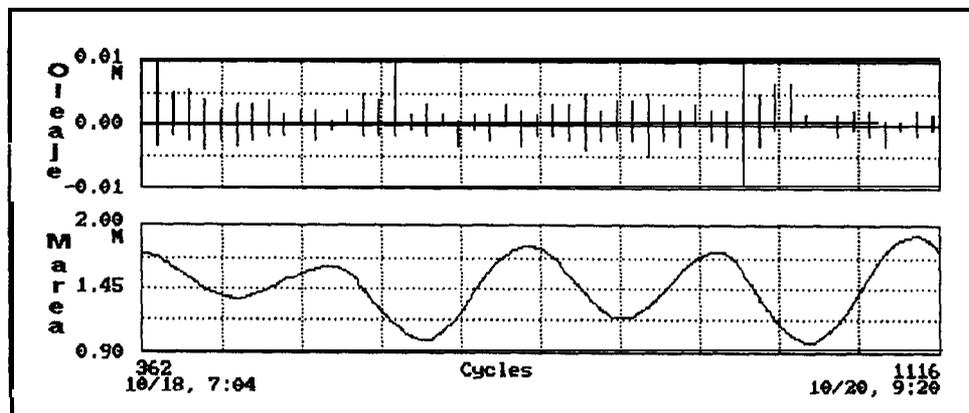


Fig. 13.- Registro de oleaje y marea en la cabecera de la laguna durante los días 18 al 20 de octubre de 1995.

3.2 VARIABLES FÍSICAS Y QUÍMICAS.

El análisis de grupos aplicados a cada una de las variables analizadas permitió distinguir 2 áreas diferentes en la zona de estudio: Laguna Santa María y Estero Esterón, por lo que se presentan para cada zona la distribución espacial y temporal de cada área por separado. Los valores máximos, mínimos y promedio se ilustran en la tabla 3 para la Laguna Santa María y en la tabla 5 para el estero Esterón.

3.2.1 Distribución Espacial.

3.2.1.1 Laguna Santa María.

La distribución espacial de temperatura superficial muestra que para las épocas de invierno y primavera los valores mínimos se localizaron en la zonal del canal de la laguna (20.5°C y 23.4 °C), mientras que los mayores se localizaron en la parte mas interna (22.0°C y 27.0°C para invierno y primavera respectivamente). Durante las estaciones de verano y otoño se observaron las menores temperaturas en la parte interna de la laguna (31.0 y 29.0°C respectivamente), y valores superiores en la región cercana al estero Esterón (32.8°C durante el verano y 32.0°C durante el otoño). Las temperaturas de fondo fueron siempre menores a las medidas en superficie durante todo el periodo de estudio (Tabla 3).

La distribución de salinidad muestra para las épocas de invierno, verano y otoño, menores concentraciones en la zona cercana al estero Esterón (27.0, 33.8 y 21.0 ‰ respectivamente), mientras que para la primavera las menores concentraciones se localizaron en la parte mas interna de la laguna (33.2 ‰). Por otra parte, los valores máximos para todas las estaciones climáticas se midieron en la boca (Fig. 15.). Los valores de fondo fueron siempre superiores a los de superficie (Tabla 3).

Los valores de pH en superficie mostraron para las épocas de invierno y verano menores

Tabla 3. Valores promedio de variables físicas y químicas en la Laguna de Santa María durante el periodo de estudio

VARIABLE	NIVEL		INVIERNO	PRIMA VERA	VERANO	O TORO
TEMPERATURA (°C)	SUPERFICIE	Max	22.6	27.2	32.9	32.0
		Min	20.1	23.4	31.4	28.7
		Prom	20.9	25.8	32.1	29.6
	FONDO	Max	20.7	26.6	32.0	20.9
		Min	19.0	23.2	31.3	28.3
		Prom	19.6	25.1	31.5	28.6
SALINIDAD (‰)	SUPERFICIE	Max	34.0	36.2	36.8	34.1
		Min	27.0	33.2	33.0	21.0
		Prom	32.8	34.9	35.2	30.9
	FONDO	Max	34.5	36.4	36.9	34.2
		Min	33.0	34.0	35.6	26.6
		Prom	33.8	35.8	36.4	32.6
pH	SUPERFICIE	Max	6.48	8.31	8.39	8.20
		Min	7.92	7.80	6.01	7.30
		Prom	6.12	6.00	6.23	7.90
	FONDO	Max	8.60	8.29	0.54	6.10
		Min	8.06	7.90	8.16	7.80
		Prom	8.19	8.08	0.34	7.93
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	SUPERFICIE	Max	7.76	7.64	6.53	9.66
		Min	5.61	5.08	3.66	6.41
		Prom	6.60	6.96	5.34	7.92
	FONDO	Max	8.04	8.23	6.08	6.49
		Min	7.01	6.06	2.77	4.79
		Prom	7.38	7.02	4.89	5.68
QOF. SECCHI (m)	Max	3.20	2.00	2.00	0.80	
	Min	0.50	0.40	0.50	0.30	
	Prom	1.67	1.09	1.07	0.46	
NITRATOS (µM)	SUPERFICIE	Max	13.2	3.60	5.21	16.95
		Min	0.08	0.03	0.05	0.24
		Prom	1.73	0.32	2.09	2.64
	FONDO	Max	1.13	0.69	4.27	2.33
		Min	0.35	0.22	0.05	0.38
		Prom	0.73	0.47	1.43	1.14
NITRITOS (µM)	SUPERFICIE	Max	1.14	0.15	7.51	1.48
		Min	0.01	0.01	0.01	0.01
		Prom	0.14	0.03	0.53	0.24
	FONDO	Max	0.12	0.077	0.66	0.67
		Min	0.01	0.01	0.01	0.12
		Prom	0.06	0.02	0.25	0.42
AMONIO (µM)	SUPERFICIE	Max	2.64	1.39	8.11	1.70
		Min	0.10	0.10	0.10	0.69
		Prom	0.67	0.47	1.93	1.32
	FONDO	Max	1.61	1.99	9.66	1.46
		Min	0.58	0.18	0.10	0.88
		Prom	1.02	0.54	1.52	1.15
FOSFORO REACTIVO (µM)	SUPERFICIE	Max	3.71	3.16	0.57	6.08
		Min	1.00	1.11	1.50	0.11
		Prom	1.99	2.19	5.92	3.44
	FONDO	Max	1.07	2.34	5.00	3.40
		Min	0.69	0.76	1.12	1.54
		Prom	1.27	1.52	2.55	2.26
FOSFORO TOTAL (µM)	SUPERFICIE	Max	8.38	20.06	15.35	0.78
		Min	1.03	1.42	1.76	1.14
		Prom	3.63	5.04	0.19	5.77
	FONDO	Max	1.74	36.36	9.09	3.19
		Min	0.97	0.64	1.46	2.85
		Prom	1.43	0.188	4.77	3.23
SST (mg/l)	Max	102.66	42.70	44.49	44.00	
	Min	11.12	18.91	18.00	20.86	
	Prom	30.10	29.07	20.45	31.67	

concentraciones en la zona cercana al Esterón, con un claro gradiente de concentración de mayores valores hacia la boca y zona interna de la laguna (Fig. 16). Durante primavera y otoño, los pH menores se localizaron en la parte mas interna del cuerpo lagunar (7.9 y 7.6 respectivamente), y los mayores en la boca (8.3 y 8.2 para primavera y otoño respectivamente). Los valores de fondo fueron sensiblemente superiores a los de superficie durante todo el periodo de muestreo (Tabla 3).

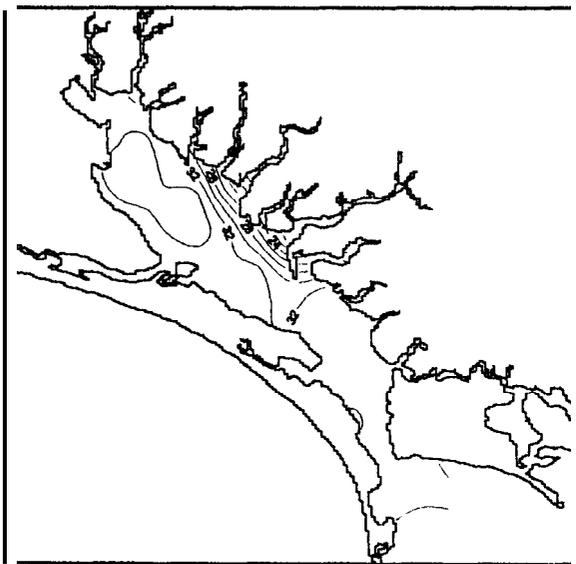


Fig. 15. Distribución espacial de salinidad (‰) superficial en la Laguna de Santa María durante el muestreo de invierno de 1995.

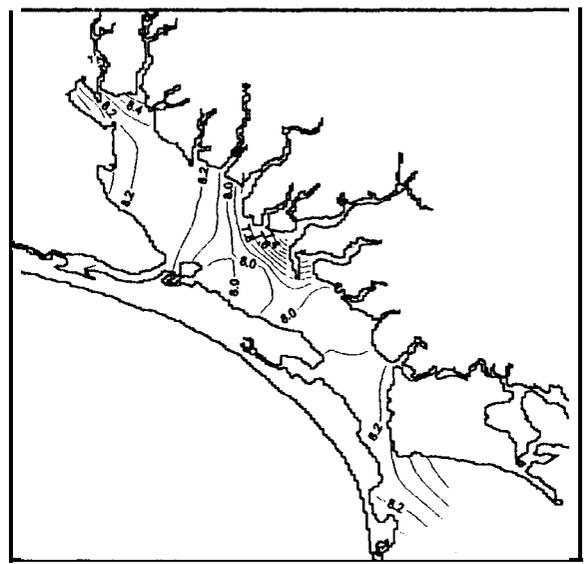


Fig. 16. Distribución de pH superficial en la Laguna de Santa María durante invierno de 1995.

La distribución de oxígeno. disuelto superficial presento las menores concentraciones (0.0 mg/l) durante el invierno en la zona cercana del estero Esterón (Fig. 17a), mientras que durante las épocas de primavera, verano y otoño se localizaron en la parte mas interna de la laguna (6.2, 4.2 y 7.0 mg/l respectivamente). Las concentraciones en el nivel de fondo mostraron mayores concentraciones en la zona de la boca y menores en zona de esteros (costa oriental de la laguna) (Fig. 17b).

Durante todo el estudio, los valores de profundidad de disco de Secchi fueron menores en la zona cercana al estero Esterón (<0.7 m), mientras que los máximos se midieron en la región de

la boca (3.2, 2.0, 2.0 y 0.8 m para invierno, primavera, verano y otoño respectivamente).

La distribución de nutrientes nitrogenados mostraron que los valores de NO_3 y NO_2 presentaron las concentraciones máximas hacia la parte media de la laguna para todas las épocas anuales con un rango para NO_3 de 0.03-1 8.95 μM , y de <0.01-7.51 μM para nitritos. El amonio mostró las mayores concentraciones en la zona cercana al estero Esterón durante las épocas de

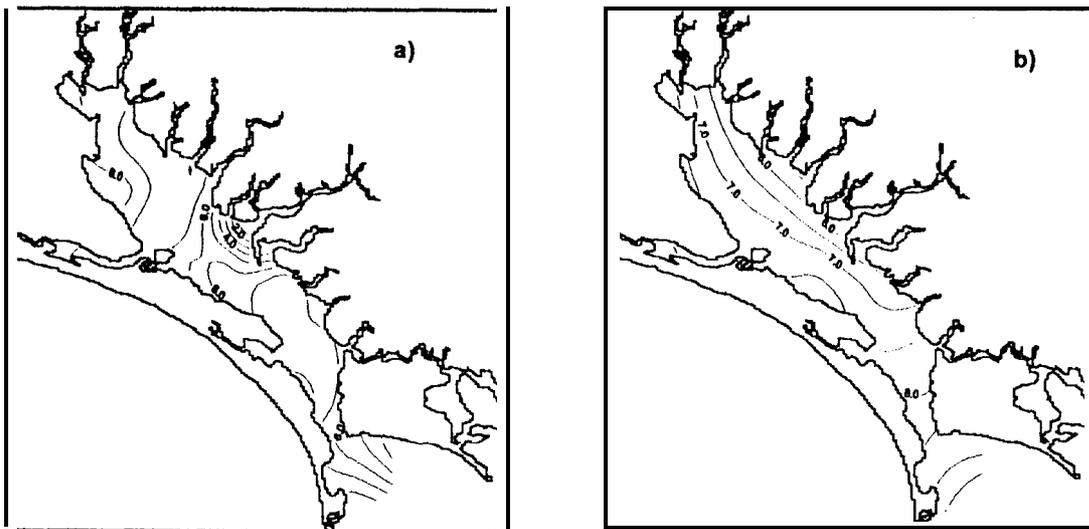


Fig. 17. Distribución de oxígeno disuelto (mg/l) en los niveles de superficie (a) y fondo (b) en la Laguna de Santa María durante el muestreo de invierno de 1995.

invierno, verano y otoño (2.64, 8.11 y 1.70 μM respectivamente), con los valores mínimos hacia la boca de la laguna. Se observa una clara influencia de los aportes de aguas residuales en ésta zona particularmente durante el muestreo de invierno (Fig. 18).

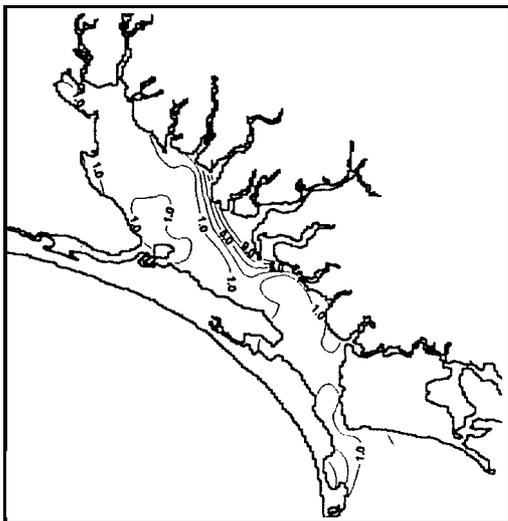


Fig. 18. Distribución superficial de amonio (μM) en la Laguna de Santa María durante invierno de 1995.

Los resultados obtenidos de nitrógeno total en las campanas de verano y otoño de 1995 en algunos puntos del estero Esterón y en el Dren Juárez se ilustran en la Tabla 4. Se observaron las mayores concentraciones en el Dren Juárez, mientras que en el estero los valores máximos se midieron en la parte más interna del mismo, con clara dilución en la concentración hacia la laguna.

Tabla 4. Valores de nitrógeno total en los drenes y estero Esterón durante verano y otoño de 1995.

ESTACION	VERANO <i>mg NH₃-N/l</i>	OTOÑO <i>mg NH₃-N/l</i>	INVIERNO(1996) <i>mg NH₃-N/l</i>
<i>14-S</i>	*	1.06	*
<i>14-F</i>	*	1.60	*
15-S	2.41	*	*
<i>15-F</i>	1.11	0.49	*
17-S	3.42	3.40	*
<i>17-F</i>	*	0.98	*
<i>Dren Juárez</i>	4.75	4.95	6.60

(*) No se efectuaron análisis.

Las distribuciones de fósforo reactivo y fósforo total solubles mostraron las máximas concentraciones en la zona cercana al Esterón con una clara influencia de las aguas residuales que inciden en el área (Fig. 19). Los valores mínimos se localizaron en la región de la boca para todo el ciclo anual.

Los sólidos suspendidos exhibieron en todas las estaciones climáticas las mayores concentraciones en la zona cercana al estero Esterón, con un gradiente de dilución hacia el resto de la laguna el cual fue más notorio durante el muestreo de otoño (Fig. 20). Los valores promedio, máximos y mínimos se ilustran en la Tabla 3.

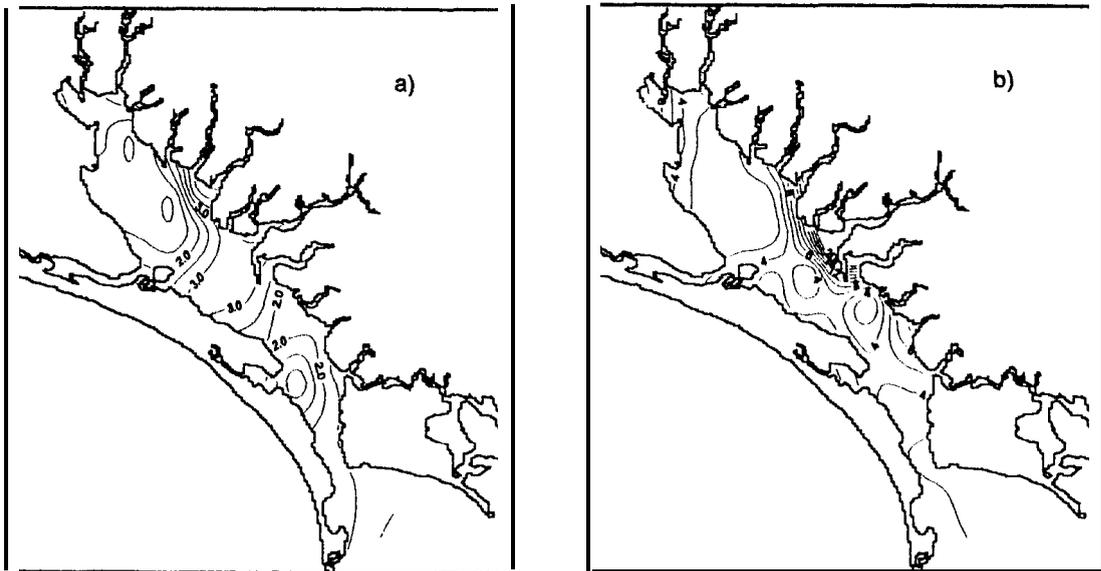


Fig. 19. Distribución superficial de fósforo reactivo (a) y fósforo total (b) solubles (μM) en la Laguna de Santa María durante invierno de 1995.

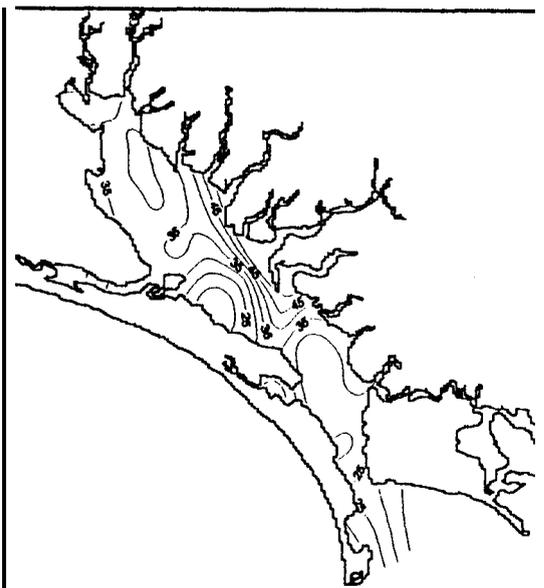


Fig. 20. Distribución espacial de sólidos suspendidos totales (mg/l) en la Laguna de Santa María durante otoño de 1995,

3.2.1.2 Estero Esterón.

Los resultados obtenidos de la distribución espacial de las variables físicas y químicas en el estero Esterón muestran para la temperatura, una clara estratificación con valores mayores en el nivel de superficie (Tabla 5). Esta estratificación es mas notoria durante las épocas de invierno y verano, mientras que durante primavera y otoño se observó mayor homogeneidad de la columna de agua.

Para el resto de las variables fisicoquímicas se observó una fuerte influencia de las aguas residuales en la zona., ya que se presentó estratificación de la columna de agua en todas las épocas climáticas, con valores mínimos de salinidad, pH y oxígeno disuelto, y máximos de nutrientes en superficie (Tabla 5). Durante invierno y verano se observó una mayor estratificación que en las otras épocas, con un alcance de las menores salinidades y valores anóxicos hasta la estación 14. (Fig. 2 1). Durante las épocas de primavera y otoño se observó la columna de agua mas mezclada, y la estratificación se observó hasta la estación 17 (Fig. 22).

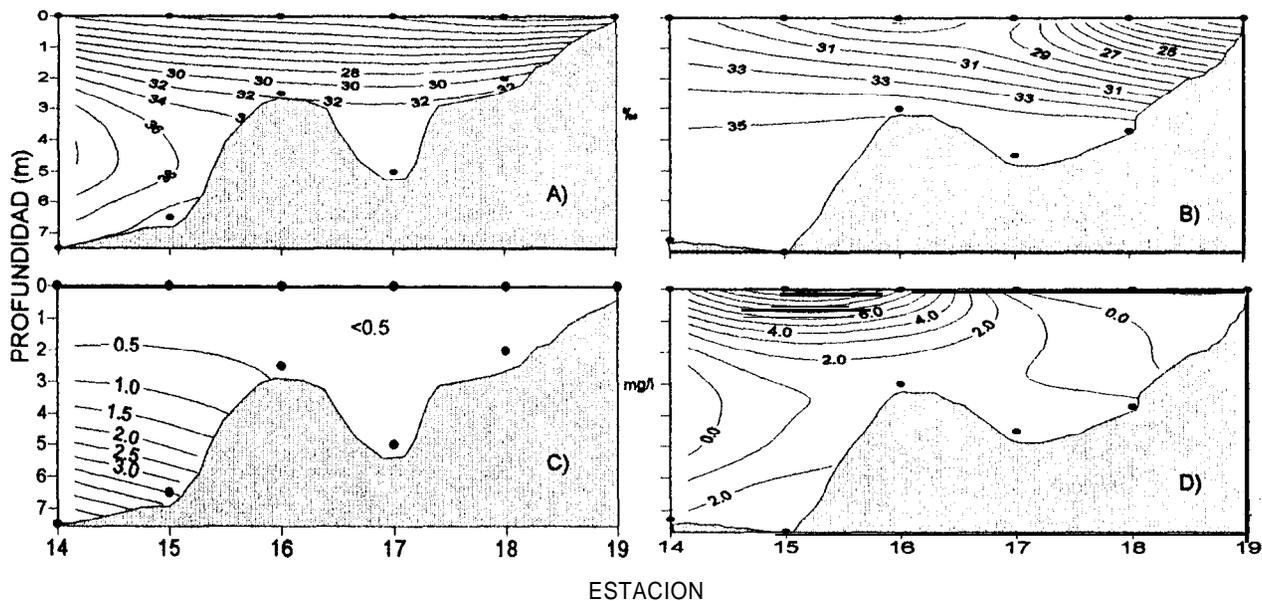


Fig. 21. Distribución de salinidad (‰) y oxígeno disuelto (mg/l) en el estero Esterón durante los muestreos de invierno (A y C) y verano (B y D) de 1995.

Tabla 5. Valores promedio de las variables físicas y químicas en el estero Esterón durante el periodo de estudio.

VARIABLE	NIVEL	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	
TEMPERATURA (°C)	SUPERFICIE	Max	22.8	29.3	33.5	31.8
		Min	21.78	25.5	30.9	28.4
		Prom	22.4	27.3	32.7	30.4
	FONDO	Max	19.8	26.0	32.1	29.3
		Min	19.2	25.8	31.6	29.1
		Prom	19.5	25.6	31.6	29.2
SALINIDAD (‰)	SUPERFICIE	Max	20.0	34.4	31.6	27.9
		Min	13.0	12.0	16.7	11.8
		Prom	16.3	28.1	26.4	19.7
	FONDO	Max	34.0	34.9	35.4	33.0
		Min	32.0	26.5	34.2	32.0
		Prom	33.0	32.2	34.9	32.9
PH	SUPERFICIE	Max	7.06	7.90	6.10	7.90
		Min	6.90	7.10	7.53	7.40
		Prom	6.96	7.42	7.61	7.63
	FONDO	Max	6.10	7.70	8.07	7.90
		Min	7.54	7.30	7.85	7.70
		Prom	7.75	7.56	7.96	7.60
OXIGENO DISUELTO (mg/l)	SUPERFICIE	Max	0.00	7.84	11.08	10.64
		Min	0.00	0.00	0.00	0.00
		Prom	0.00	2.36	4.16	3.80
	FONDO	Max	5.61	6.47	2.77	3.59
		Min	0.00	0.00	1.07	0.00
		Prom	2.06	2.08	1.88	1.26
PROF. SECCHI (m)	Max	0.70	0.40	0.70	0.30	
	Min	0.25	0.20	0.40	0.20	
	Prom	0.44	0.27	0.52	0.25	
NITRATOS (µM)	SUPERFICIE	Max	2.39	0.59	0.77	6.25
		Min	0.11	0.15	0.35	0.51
		Prom	0.88	0.33	0.45	1.90
	FONDO	Max	1.29	1.11	4.14	1.48
		Min	0.32	0.28	0.58	0.81
		Prom	0.806	0.508	2.21	1.228
NITRITOS (µM)	SUPERFICIE	Max	0.184	0.092	6.260	0.435
		Min	0.01	0.030	0.395	0.069
		Prom	0.085	0.070	2.690	0.272
	FONDO	Max	0.310	0.135	0.409	0.776
		Min	0.050	0.015	0.01	0.569
		Prom	0.129	0.060	0.244	0.661
AMONIO (µM)	SUPERFICIE	Max	82.06	118.89	62.45	14.87
		Min	24.61	0.31	1.64	2.11
		Prom	53.05	34.76	33.79	10.8
	FONDO	Max	18.27	22.70	29.06	2.40
		Min	1.10	0.45	4.41	1.53
		Prom	9.67	6.66	12.81	1.90
FOSFORO REACTIVO SOLUBLE (µM)	SUPERFICIE	Max	46.44	46.76	16.46	25.56
		Min	26.84	5.15	11.86	8.61
		Prom	35.52	23.12	13.63	16.56
	FONDO	Max	5.33	16.78	4.00	6.18
		Min	1.66	5.09	1.31	3.97
		Prom	3.48	8.77	2.25	5.22
FOSFORO TOTAL SOLUBLE (µM)	SUPERFICIE	Max	52.54	53.64	19.07	36.44
		Min	34.93	5.43	14.00	13.00
		Prom	43.0	24.21	16.36	22.71
	FONDO	Max	5.13	34.36	7.89	6.00
		Min	2.05	6.36	1.6	4.00
		Prom	3.42	19.718	5.23	5.94
SST (mg/l)	Max	76.36	89.00	68.17	553.47	
	Min	39.27	41.5	20.4	42.42	
	Prom	56.22	62.416	48.56	181.96	

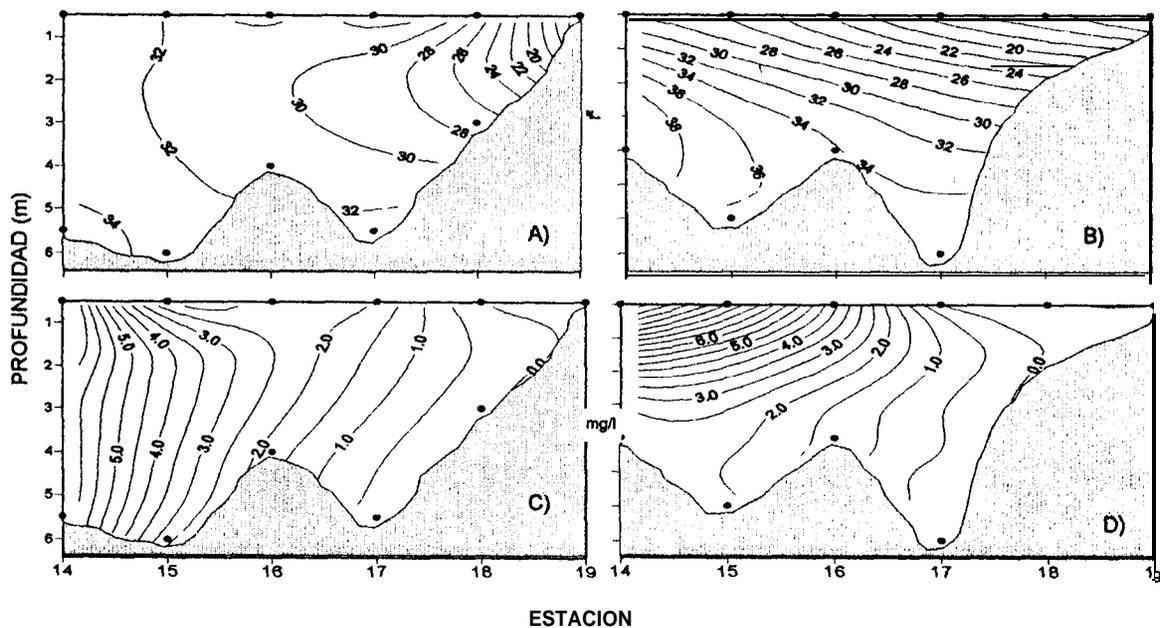


Fig. 22. Distribución de salinidad (‰) y oxígeno disuelto en el estero Esterón durante primavera (A y C) y otoño (B y D) de 1995.

3.2.2. Distribución temporal.

3.2.2. 1. Laguna Santa María.

El análisis gráfico de la temperatura muestra los valores máximos durante el verano y los mínimos en invierno con una marcada estacionalidad. Las temperaturas medias máximas se midieron en el nivel de superficie para todo el periodo de muestreo. Estadísticamente se obtuvieron diferencias significativas entre todas las épocas anuales y los niveles de muestreo (Tabla 6).

Las concentraciones promedio máximas de salinidad se presentaron durante el verano y las mínimas en otoño, con menores concentraciones en superficie para todo el ciclo anual (Fig. 23). Estadísticamente se observaron diferencias significativas entre el otoño y las demás épocas climáticas y entre los niveles de muestreo (Tabla 6).

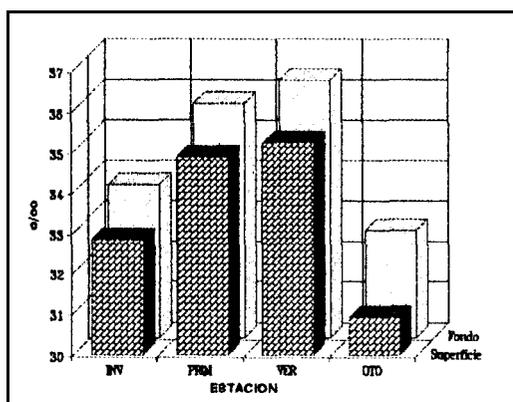


Fig.23.- Valores medios de salinidad en la laguna de Santa María durante el periodo febrero-octubre de 1995.

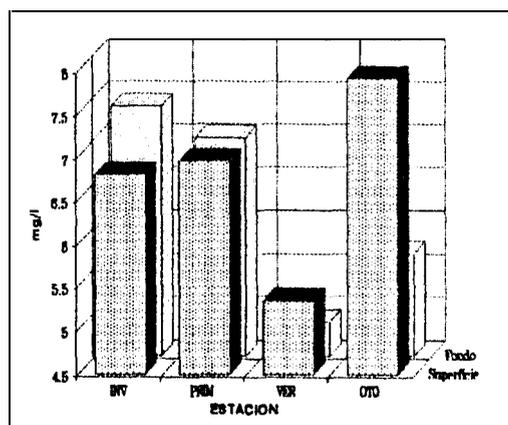
El pH mostró los promedios máximos en el nivel de fondo y durante el verano (8.16), mientras que los mínimos para ambos niveles de muestreo se obtuvieron durante el otoño (7.90 y 7.93 para superficie y fondo respectivamente). El análisis de varianza mostró diferencias entre todas las estaciones anuales y entre los niveles de muestreo (Tabla 6).

Las concentraciones promedio máximas de oxígeno disuelto fueron medidas durante el otoño en superficie (7.92 mg/l) y durante invierno en el nivel de fondo (7.38 mg/l), con valores mínimos durante el verano para ambos niveles de muestreo (3.66 y 2.77 mg/l para superficie y fondo respectivamente) (Fig. 24). Estadísticamente la épocas climáticas diferentes fueron otoño y

verano, las cuales mostraron diferencias entre ellas y entre las demás épocas climáticas, mientras que entre los niveles de muestreo no se observó diferencias (Tabla 6).

Tabla 6. Tabla de ANDEVA para cada variable medida en la Laguna de Santa María durante el período de estudio (95% de confianza).

VARIABLE	Fuente de Variación	G.L.	Cuadrado Medio	Razón de Varianza	Nivel de Signif.	F_T
PC	Estaciones	3	835.06	58.70	0.0000	2.68
	Nivel	1	23.92	16.78	0.0000	3.92
S%	Estaciones	3	125.4978	1000.00	0.0000	2.68
	Nivel	1	35.8694	45.50	0.0001	3.92
pH	Estaciones	3	0.7164	27.14	0.0000	2.68
	Nivel	1	0.1523	5.77	0.0178	3.92
O.D.	Estaciones	3	33.0622	60.50	0.0000	2.68
	Nivel	1	2.2765	4.17	0.0434	3.92
% Saturación de Oxígeno	Estaciones	3	11067.328	30.93	0.0000	2.68
	Nivel	1	1947.459	5.44	0.0212	3.92
NO ₃	Estaciones	3	24.0885	2.66	0.0511	2.70
	Nivel	1	19.4373	2.15	0.1453	3.94
NO ₂	Estaciones	3	1.1421	2.46	0.0651	2.68
	Nivel	1	0.1464	0.32	0.5815	3.92
NH ₄	Estaciones	3	11.4090	5.42	0.0016	2.68
	Nivel	1	0.0108	0.01	0.9435	3.92
P O, R	Estaciones	3	79.0407	57.81	0.0000	2.68
	Nivel	1	64.1813	46.94	0.0000	3.92
P O, T	Estaciones	3	85.2703	4.80	0.0035	2.68
	Nivel	1	21.6822	1.22	0.2718	3.92
S S T	Estaciones	3	42.667	0.37	0.7727	2.76



(*) Denota diferencia significativa

Fig. 24.- Concentraciones promedio de oxígeno disuelto en la Laguna de Santa María durante el periodo febrero-octubre de 1995.

Las concentraciones de nutrientes presentaron un patrón similar para todas las especies, con valores máximos durante los monitoreos de verano y otoño (Tabla 3). Las

concentraciones de superficie fueron superiores a las de fondo para todo el ciclo (Figs. 25-27). El análisis estadístico mostró cierta discrepancia con el análisis gráfico, ya que visualmente se observa diferencias estacionales para nitratos y nitritos (Fig. 25), mientras que estadísticamente no se obtuvieron diferencias significativas entre épocas climáticas ni entre niveles de muestreo. La distribución de amonio mostró diferencias estacionales, específicamente entre el verano con las estaciones de invierno y primavera. Para el caso del fósforo reactivo se obtuvieron 3 grupos distintos: 1) invierno-primavera, 2) otoño y 3) verano con diferencias entre ambos niveles de muestreo (Tabla 6). Las concentraciones de fósforo total sólo fueron diferentes entre las épocas de invierno y verano.

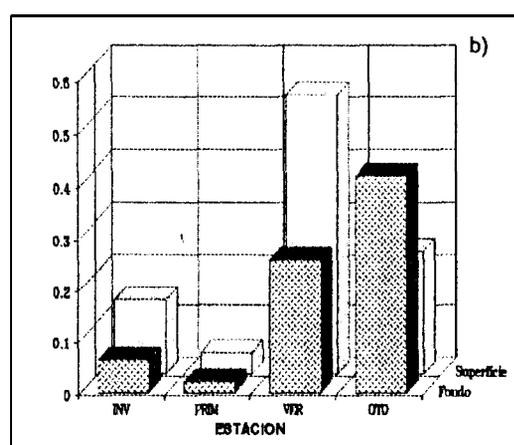
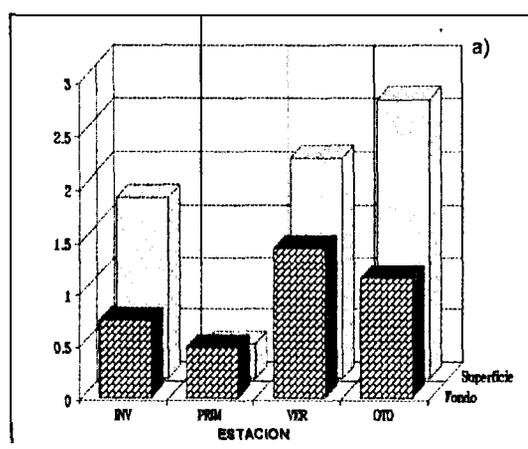


Fig. 25.- Concentraciones estacionales medias de nitratos (a) y nitritos (b) en la laguna de Santa María durante el periodo de muestreo

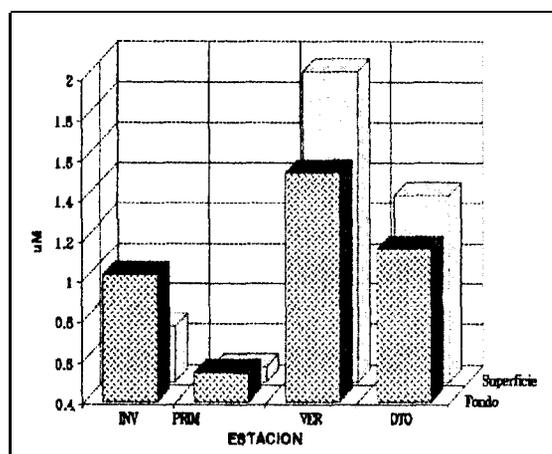


Fig. 26.- Valores estacionales promedio de amonio en la laguna de Santa María durante el periodo de estudio.

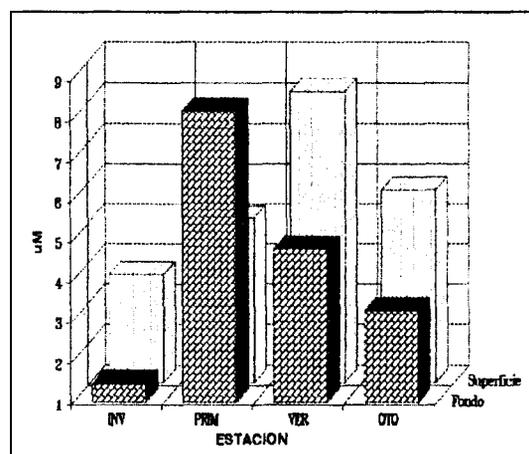


Fig. 27. Concentraciones estacionales medias de fósforo reactivo soluble en la Laguna de Santa María, durante el periodo febrero-octubre de 1995.

Los valores promedio de profundidad de disco de Secchi y sólidos suspendidos totales presentaron patrones de distribución inversos, con menor profundidad Secchi (0.46 m) y la máxima concentración de sólidos suspendidos (31.67 mg/l) durante el otoño (Tabla 3). Estadísticamente los valores de SST fueron muy homogéneos, sin diferencia significativa entre todas las épocas anuales (Tabla 6).

3.2.2.2 Estero Esterón.

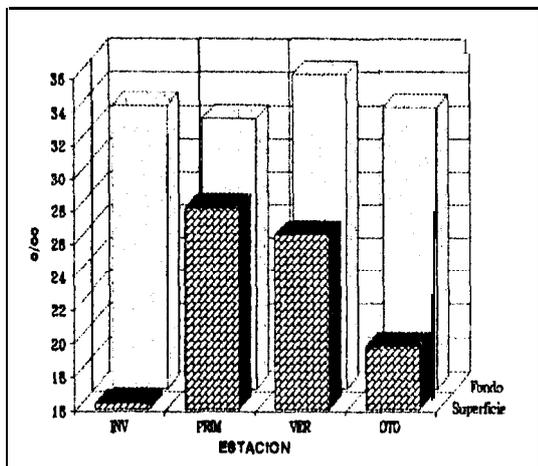
Los resultados obtenidos de los valores de temperatura en el estero Esterón muestran los promedios máximos durante el verano (33.5°C) y los mínimos durante el invierno (19.5°C), con valores superiores en el nivel de superficie (Tabla 6). El análisis estadístico mostró una marcada estacionalidad con fuerte estratificación, ya que se observaron diferencias significativas entre todas las épocas anuales y los niveles de muestreo (Tabla 7).

Tabla 7. Tabla de ANDEVA para cada variable medida en el estero Esterón durante el período de estudio (95% de confianza).

VARIABLE	Fuente de Variación	G.L.	Cuadrado Medio	Razón de Varianza	Nivel de Signif.	F _T
T°C	Estaciones	3	257.6330	304.32	0.0000	2.84
	Nivel	1	27.1978	32.13	0.0000	4.08
S‰	Estaciones	3	109.7389	5.18	0.0045	2.92
	Nivel	1	1179.1221	55.71	0.0000	4.17
pH	Estaciones	3	0.6515	15.31	0.0000	2.92
	Nivel	1	1.0258	24.11	0.0000	4.17
O.D.	Estaciones	3	10.9348	1.16	0.3379	2.92
	Nivel	1	3.4414	0.37	0.5556	4.17
% Saturación de Oxígeno	Estaciones	3	6613.9237	1.42	0.2506	2.84
	Nivel	1	2295.0894	0.49	0.4937	4.08
NO ₃	Estaciones	3	2.6021	1.94	0.1450	2.92
	Nivel	1	1.0182	0.76	0.4002	4.17
NO ₂	Estaciones	3	6.4119	5.23	0.0045	2.92
	Nivel	1	3.9965	3.26	0.0799	4.17
NH ₄	Estaciones	3	1361.5182	2.06	0.1240	2.92
	Nivel	1	68.0628	10.32	0.0029	4.17
PO ₄ R	Estaciones	3	333.5196	5.49	0.0035	2.92
	Nivel	1	3207.3536	52.83	0.0000	4.17
PO ₄ T	Estaciones	3	337.8660	3.11	0.0427	2.96
	Nivel	1	2698.5516	24.87	0.0000	4.21
SST	Estaciones	1	20975.8610	2.13	0.1296	3.13

(*) Denota diferencia significativa

Las concentraciones de salinidad mostraron cierta homogeneidad en el fondo, con valores promedio similares en todo el ciclo y el máximo en verano (34.9 ‰). Las concentraciones de superficie fueron máximas en primavera y mínimas en invierno (Fig. 28). Estadísticamente se

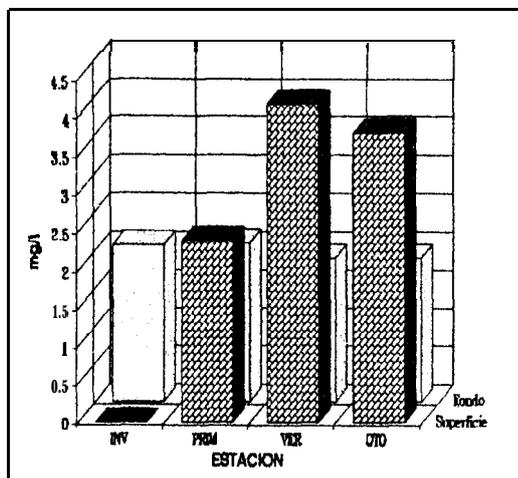


determinó diferencias entre el invierno con las épocas de primavera y verano, y se demostró la estratificación de la columna de agua ya que se observaron diferencias entre los niveles de muestreo (Tabla 7).

Fig. 28. Valores estacionales promedio de salinidad en el estero Esterón durante el período febrero-octubre de 1995.

Los valores promedio de pH se mantuvieron bajos durante todo el muestreo (6.90-8.10), con las mayores magnitudes en el fondo. Los mínimos se midieron durante el invierno y los máximos en verano (Tabla 5). Estas diferencias fueron corroboradas con el análisis estadístico para ambos casos (Tabla 7).

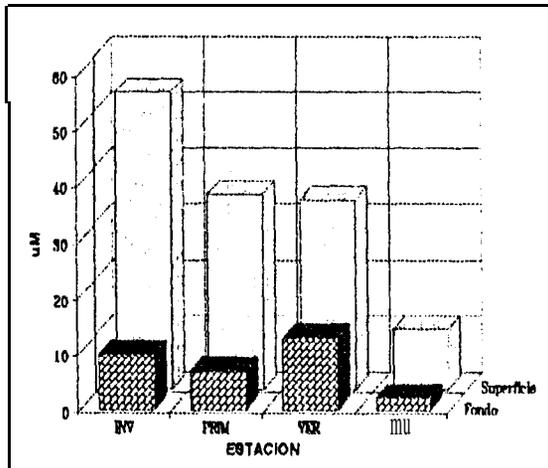
Las concentraciones de oxígeno disuelto fueron muy homogéneas en el nivel de fondo con valores promedio entre 1.26 y 2.08 mg/l (Tabla 5), mientras que en la superficie se observó mayor



variabilidad, con los promedios mínimos en invierno y los máximos en verano (Fig. 29). Estadísticamente no se observaron diferencias significativas entre épocas anuales ni entre niveles de muestreo (Tabla 7).

Fig. 29. Concentraciones estacionales medias de oxígeno disuelto en el estero Esterón durante el período de estudio.

La distribución temporal de nutrientes presentó cierta variabilidad, con los valores promedios máximos de nitratos y nitritos durante las épocas de verano y otoño (Tabla 5), mientras que para amonio, fósforo total y fósforo reactivo, las concentraciones medias máximas se midieron durante el invierno (Figs. 30 y 31). Estadísticamente no se observó variabilidad estacional para nitratos, amonio, y fósforo total, con diferencias para los nitritos entre el verano con las épocas de invierno y primavera. Entre niveles de muestreo se observó diferencias para amonio, fósforo reactivo y fósforo total (Tabla 7).



con las épocas de invierno y primavera. Entre niveles de muestreo se observó diferencias para amonio, fósforo reactivo y fósforo total (Tabla 7).

Fig. 30.- Concentración estacional media de amonio en el Esterón durante el periodo de estudio.

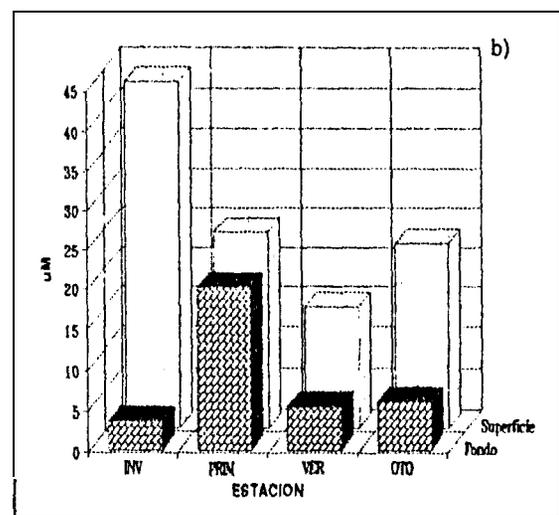
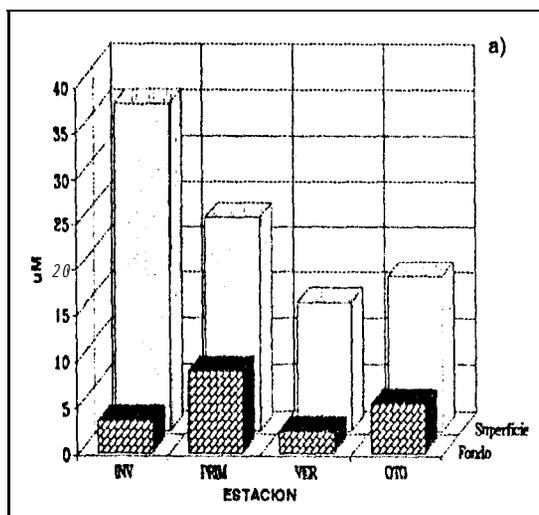


Fig. 31.- Concentración estacional promedio de fósforo reactivo (a) y fósforo total (b) solubles en el Esterón durante el periodo de muestreo.

Los valores de profundidad del disco de Secchi y los sólidos suspendidos totales presentaron magnitudes inversas, con menores profundidades Secchi (0.30 m) y mayores concentraciones de sólidos (553.47 mg/l) durante el otoño (Tabla 5). Esta diferencia para los

sólidos suspendidos no fue estadísticamente significativa para ninguna época climática (Tabla 7).

3.2.3. Variación diurna.

Los resultados obtenidos en el análisis gráfico de las variables fisicoquímicas, mostraron para la temperatura fluctuaciones térmicas inherentes a la variación diurna ambiental, con las mayores temperaturas durante las horas de mayor iluminación. Las aguas de menor salinidad (10-32 ‰) se localizan en la superficie entre 1 y 1.5 metros de profundidad para todo el muestreo. Durante las primeras horas del día se observa una fuerte estratificación en el primer metro de la columna de agua. Alrededor de las 14:00 hrs. disminuye la estratificación (Fig. 32) probablemente debido a que durante tales horas se registraron los vientos de mayor intensidad (Tabla 8).

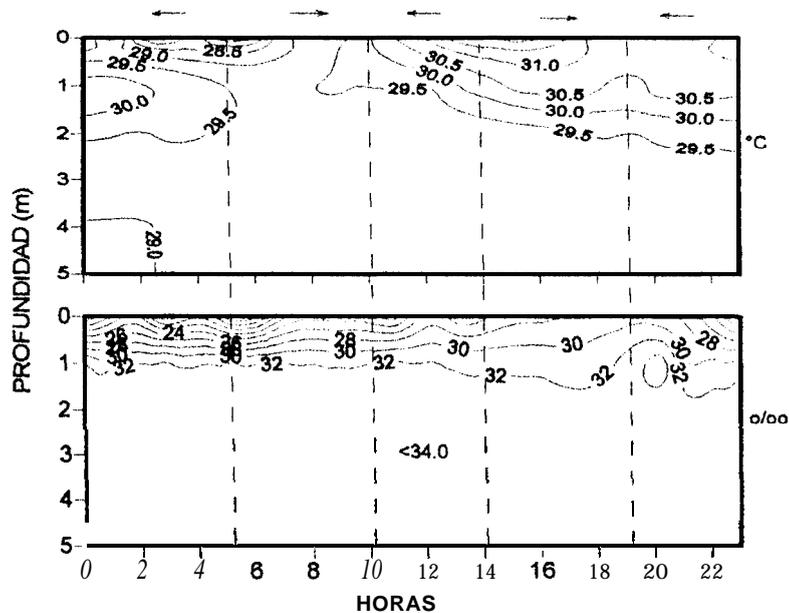


Fig. 32. Perfil de temperatura (°C) y salinidad (‰) durante la variación diurna efectuada en el estero Esterón del 17 al 18 de octubre de 1995(→ Flujo +Reflujo).

El pH mostró los valores mayores entre las 08:00 y 12:00 entre los 2-3 m. Las concentraciones de oxígeno disuelto presentaron fluctuaciones a lo largo del día, con valores menores en las primeras horas (00:00 a 05:00 hrs.) y aumentaron hasta alcanzar su máximo entre las 15:00 y las 20:00 (Fig. 33).

Las concentraciones de nutrientes fueron siempre mayores en superficie observándose una fuerte estratificación entre las 00:00 hasta 14:00 horas. Posteriormente se rompió la estratificación

por efecto de viento y ésta se restableció a partir de las 20:00 horas (Fig. 34).

Tabla 8. Registro de velocidad y dirección del viento en el estero Esterón durante los días 17 y 18 de octubre de 1995.

<i>DIA</i>	<i>HORA</i>	<i>INTENSIDAD</i> <i>(m/s)</i>	<i>DIRECCION</i> <i>(grados)</i>
<i>17</i>	13:06	6.0	155
	13:40	3.0	150
	14:35	4.5	180
	15:04	5.0	160
<i>18</i>	11:00	1.5	215
	11:30	2.0	255
	12:10	5.0	238
	12:16	5.0	330
	13:08	3.0	255
	13:12	2.0	240
	13:31	4.5	240
	14:30	6.0	290
	14:33	5.0	210
	16:20	6.0	255
	16:44	6.5	250
17:00	5.0	260	

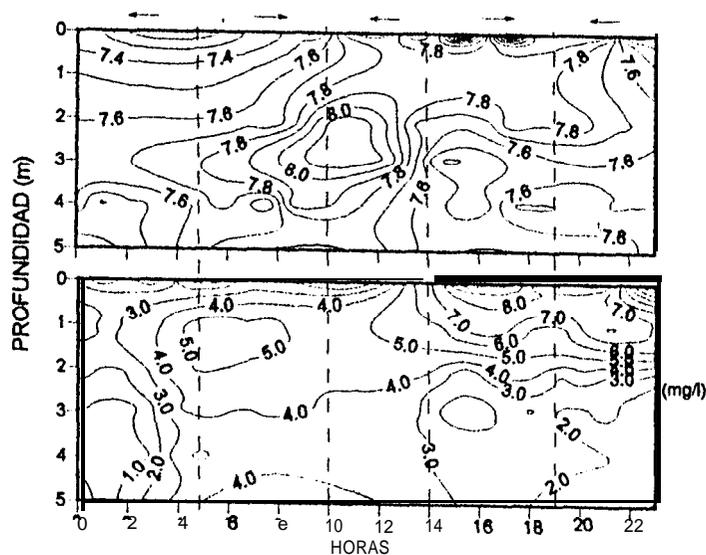


Fig. 33. Perfil vertical de pH y oxígeno disuelto (mg/l) en el estero Esterón durante la variación diurna efectuada del 17 al 18 de octubre de 1995 (→ Flujo ← Reflujó).

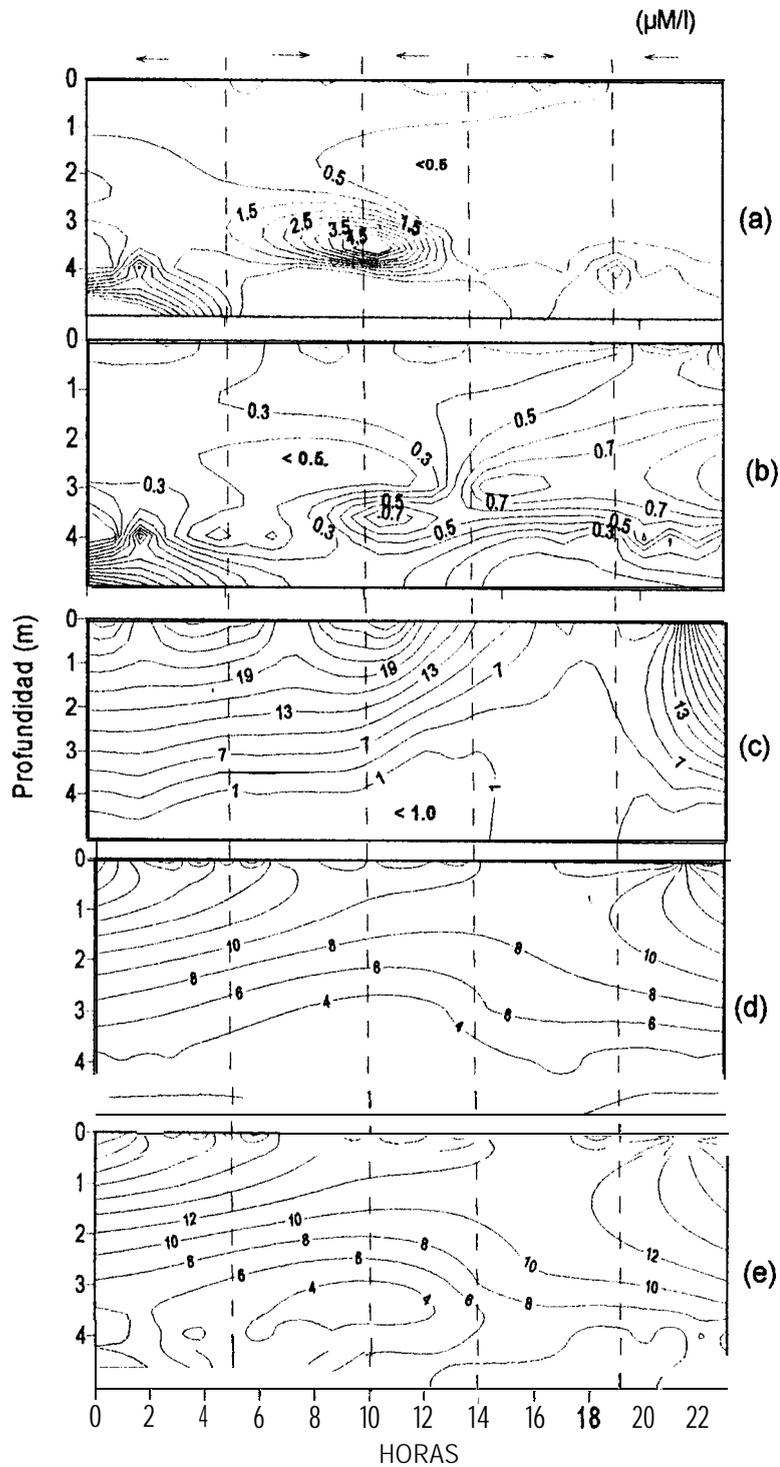


Fig. 34. Perfil vertical de nitratos (a), nitritos (b), amonio (c), fósforo reactivo (d) y fósforo total (e) en el estero Esterón durante la variación diaria efectuada del 17 al 18 de octubre de 1995. (→ Flujo +-Reflujo)

3.3. MODELACION

Los resultados obtenidos en la modelación hidrodinámica de las corrientes inducidas por la componente M_2 mostró para el reflujó, las mayores velocidades en el quinto octavo del ciclo de marea (0.63 m/s) en la boca de la laguna con un giro al sureste de la misma, originado por la zona de bajos localizada en esa área (Fig. 35). Las velocidades máximas durante el flujo de marea se obtuvieron en el sexto octavo (Fig. 36).

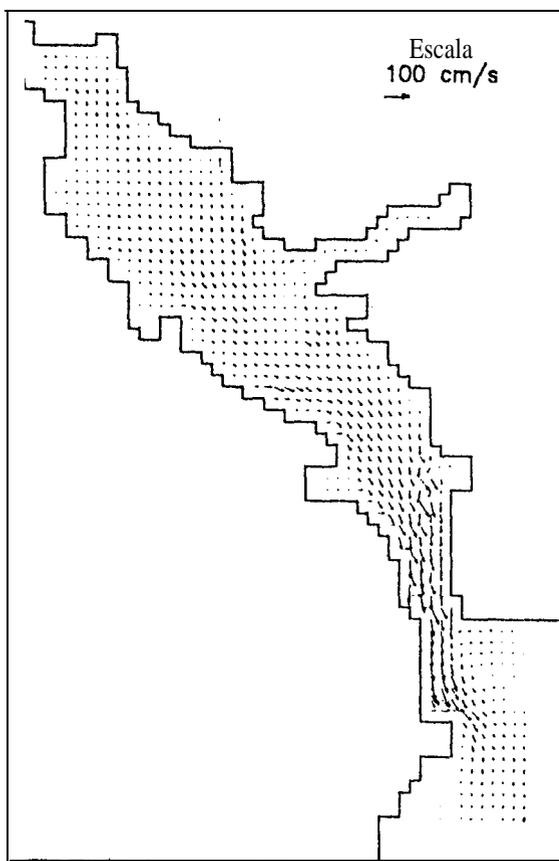


Fig 35. Distribución vectorial de corrientes simuladas en el quinto octavo del periodo de la marea.

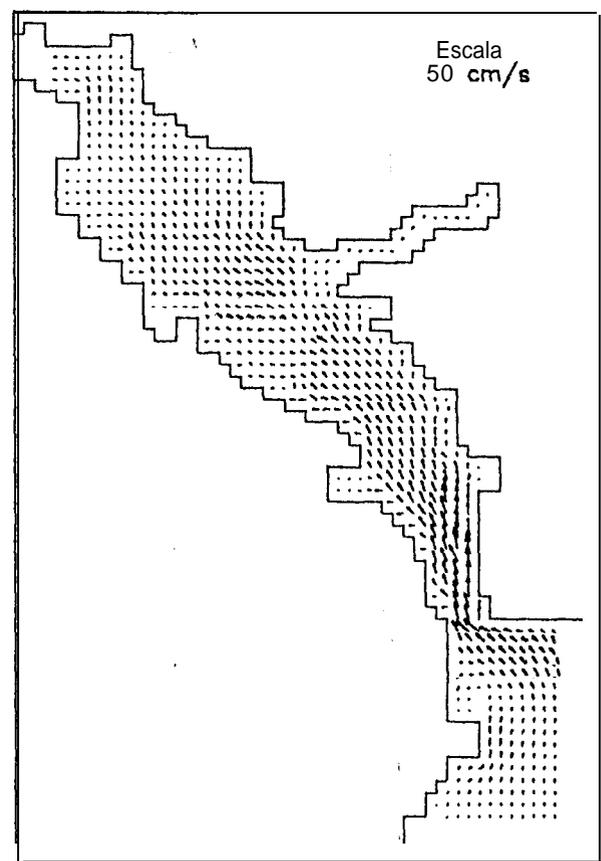


Fig. 36. Distribución vectorial de corrientes simuladas en el sexto octavo del periodo de marea.

Durante el experimento de dispersión de tinta realizado en el estero Esterón, no fué posible determinar coeficiente de difusión turbulenta debido a problemas con el tiempo de permanencia de la tinta en la zona, originadas aparentemente por la gran cantidad de material incorporado en el estero, cuya coloración no permitió distinguir por mucho tiempo al trazador, por

lo que se **determinó** que la tinta utilizada no fue la adecuada para la zona. Por ello, para correr el modelo de dispersión se aplicaron los **índices** de difusión turbulenta: a) 10^4 y b) 10^5 , los cuales son coeficientes **comunmente** reportados en diversos trabajos efectuados en varias lagunas costeras de características similares a la zona de estudio (Zaytzev *et al.*, 1992). Los resultados obtenidos son expresados sin unidades debido a que las concentraciones iniciales en los puntos de inyección (esteros Esterón y Buenaventura) son valores hipotéticos.

En la figura 37a se observa la dispersión del material después de un día de inyección con un coeficiente de dispersión de 10^4 , y se distingue una mayor difusión en el punto de inyección del estero Esterón. El núcleo de mayor concentración se localiza en la parte media de la laguna y los abanicos de difusión del material crecen con ligeras diferencias en el área de cobertura, y alcanza al **trigésimo día** (Fig. 37b) una igualdad en las concentraciones en la parte central, con mayor área de dispersión hacia la parte mas interna de la laguna, conforme va **avanzando** el tiempo.

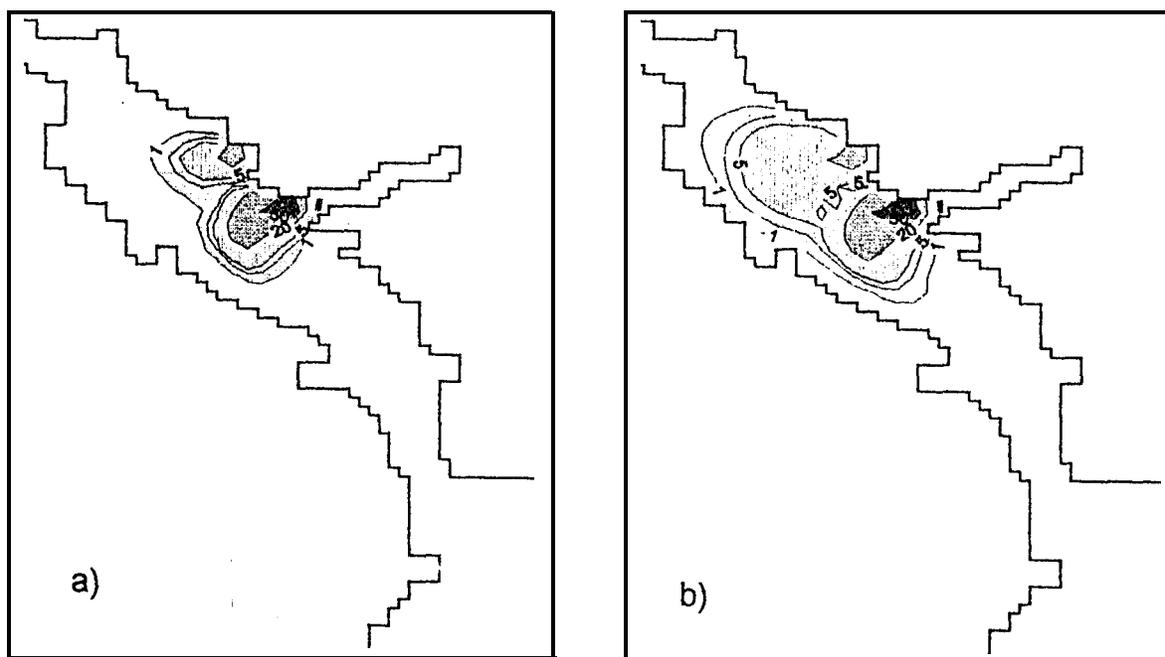


Fig. 37. Distribución de masa simulada al **primer** (a) y **trigésimo día** (b) de **inyección** con un coeficiente de difusión turbulenta de 10^4 .

Los resultados obtenidos aplicando un **índice** de difusión de 10^5 muestran una mayor rapidez en la **distribución** del material. Las **isolíneas** que corresponden a la concentración de 5.0

se observan mezcladas desde el primer día de dispersión y alcanzan su área máxima de cobertura hasta tener valores de 1.0 en el tercer día (Fig. 38).

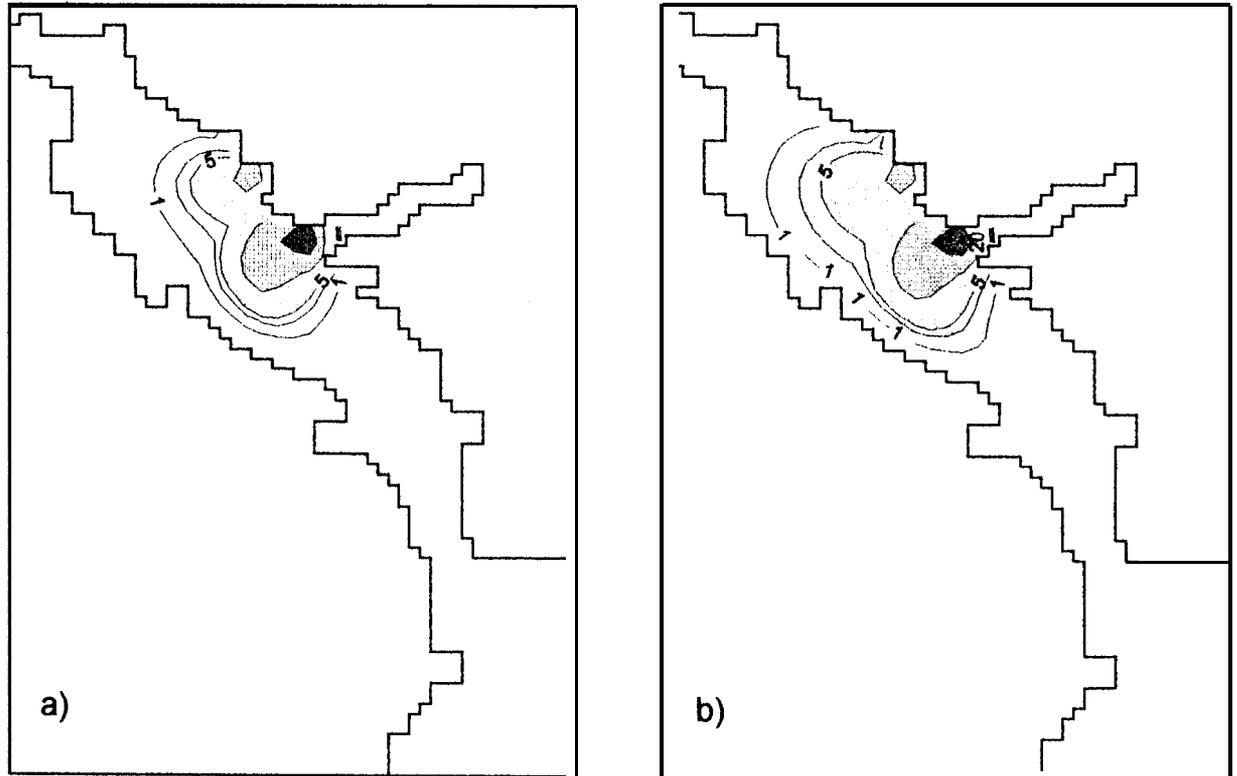


Fig. 38. Distribución de masa simulada al primer (a) y tercer día (b) de inyección con un coeficiente de difusión turbulenta de 10^5 .

IV. DISCUSION

4.1. *DINÁMICA HIDROLÓGICA.*

El flujo de las corrientes que se presentan dentro del área de estudio son el resultado de las diferencias en la altura entre el agua del Golfo de California y la laguna o más **específicamente**, entre la porción oeste de la Laguna de **Topolobampo** con la Laguna de Santa María (Phleger y Ayala, 1969). Las máximas intensidades registradas en la boca de la laguna en el trabajo efectuado por los autores anteriormente mencionados, fueron de una magnitud de **70 cm/seg** durante el reflujó y de **50 cm/seg** durante el flujo, con corrientes muy leves en las zonas adyacentes al canal principal (**20 cm/seg**). Esto concuerda con lo reportado por Sigala (1990) quien menciona una velocidad máxima en la boca de la laguna de **60 cm/s** durante el reflujó en noviembre de 1987.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran una ligera variación en las magnitudes de corrientes en la boca respecto a los estudios antes mencionados, con máximos de **30 cm/s** durante el flujo, y de **23 cm/s** durante el reflujó. Tal diferencia pudo ser originada por la distancia de colocación del correntómetro, ya que éste se encontraba a **40 cm** del fondo aproximadamente, por lo que no se obtuvieron los datos en la zona de máxima velocidad la cual se encuentra aproximadamente a **40%** de la profundidad total (Chow, 1959). Debido a esto, la velocidad **obtenida** es menor a la de los estudios mencionados anteriormente ya que **tales trabajos** muestran resultados de corrientes superficiales, además de que el efecto de fricción con el **sustrato** disminuye las corrientes en el punto de nuestro muestreo (Aldeco y Salas, 1994). El criterio para la **colocación** del correntómetro a esa profundidad estuvo en función de que la boca de la laguna es una zona altamente transitada por pescadores **ribereños**, ya que se efectúa en el área la pesca de camarón en esa época del **año**, por lo que se buscó la protección de los equipos colocándolos a mayor profundidad.

Es particularmente notorio que las velocidades máximas obtenidas en el presente estudio se hayan medido durante el flujo, lo cual contradice lo reportado en los trabajos realizados en la

zona anteriormente (Phleger y Ayala, 1969. y Sigala, 1990). Durante ambos muestreos el viento del sureste predominó, con una intensidad promedio de 5.25 m/s en octubre de 1994 de y de 5.35 m/s para octubre de 1995, pudiendo intensificar las corrientes de flujo y frenar las de reflujos, lo que originó el patrón de corrientes obtenidas. Esto concuerda con lo referido por Mee (1977), quien menciona que los vientos son una importante influencia en el patrón de circulación de las lagunas costeras, ya que pueden frenar o intensificar las corrientes, así como determinar su dirección. Otro aspecto coadyuvante para éste patrón de máximas velocidades durante el flujo, pudieran ser las corrientes de reflujos de las lagunas de Topolobampo y Ohuira, las cuales al salir al Golfo de California por la boca principal del Sistema, pudieran presentar resistencia a las aguas provenientes de la Laguna Santa María, dando como resultado una disminución en la velocidad de las corrientes de reflujos. Esta situación puede observarse en el diagrama polar de corrientes del correntómetro colocado frente a la Punta Santa María, ya que su distribución de corrientes mostró una mayor dispersión durante el reflujos, originado por el efecto de la isla Santa María y por el encuentro de las aguas provenientes de la laguna y de los otros dos cuerpos costeros (Fig. 8).

Otro factor importante en la distribución general de corrientes fue la batimetría, ya que las velocidades máximas se presentaron en la zona de los canales, mientras que en las áreas *aledañas* son menores o prácticamente despreciables. Tal situación había sido referida anteriormente (Phleger y Ayala, *op. cit*) y fue particularmente notoria en la boca, donde se presentó un comportamiento de canal debido a su morfología, ya que se trata de un estrecho de aproximadamente 750 m de longitud. Esto origina un incremento en las velocidades de la corriente al pasar por la zona en ambos periodos de marea, por lo que las mayores velocidades de la corriente se obtuvieron en éste punto. La mayor dispersión de las corrientes durante el reflujos debe al ensanchamiento de la sección transversal.

El tipo de circulación en la laguna es *estuarina* o de *estuario positivo*, ya que las aguas de menor densidad se mueven por la superficie, con una diferencia de salinidad entre los niveles superficial y de fondo de aproximadamente 2‰ en todas las épocas anuales, lo cual representa un caso típico de éste tipo de circulación (Elliot, 1976). Tal patrón de circulación fue reportada

anteriormente por Sigala (1990) en la Bahía de Topolobampo, quien lo atribuyó al efecto de las descargas de aguas residuales incorporadas.

En el estero Esterón el flujo de la corriente presenta un patrón muy particular, ya que se observa un incremento en las velocidades con dirección oeste (Fig. 10 y 11). Ello se debe al efecto de las descargas de aguas residuales incorporadas, las cuales son replegadas hacia la parte mas interna del estero durante la pleamar, lo que ocasiona un incremento en el nivel del agua en esta zona debido al aporte **continuo** de agua residual, resultando en un aumento de la velocidad durante la bajamar por la mayor diferencia en el nivel. La circulación, al igual que en la laguna es de tipo *estuarina*, con un intervalo de diferencias entre **superficie** y fondo que fluctúa entre 1 y 20 ‰ dependiendo de la estación anual y la altura de marea.

4.2. VARIABLES FÍSICAS Y QUÍMICAS,

4.2.1. Distribución espacio-temporal.

4.2.1.1 Temperatura

Entre los factores climáticos de una laguna litoral, la temperatura es una de las variables ecológicas más importantes. Junto con la salinidad, oxígeno y otros factores, contribuye a determinar la composición faunística y florística así como el comportamiento de los organismos que habitan este tipo de ecosistemas (Chávez, 1978).

En el medio acuático, las variaciones de temperatura generalmente responden a las variaciones climáticas locales (Contreras, 1993). Esta situación se cumple en la zona de estudio, ya que las fluctuaciones de temperatura durante el período de estudio estuvieron fuertemente relacionadas con la variabilidad climática, ya que estacionalmente, las mayores temperaturas se midieron durante el verano y las menores durante el invierno, mientras que la variación diurna presentó los máximos en las horas de mayor radiación. Estas variaciones estacionales fueron corroboradas con el análisis estadístico efectuado ya que se obtuvieron diferencias significativas entre todas las épocas anuales (Tabla 6).

Espacialmente se observa influencia del factor batimétrico, ya que durante las épocas de invierno y primavera las mayores temperaturas se midieron en la parte mas interna de la laguna, la cual es la región somera del área de estudio, mientras que durante verano y otoño se midieron temperaturas bajas en la misma zona. Ello sugiere que aún en las épocas frías, esta zona se calienta mas rápidamente que el resto del cuerpo lagunar, por lo que se obtuvieron altas temperaturas, mientras que durante las épocas cálidas la intensa evaporación permite el intercambio calórico entre la columna de agua y la atmósfera, de tal modo que al evaporarse ésta, el agua cede calor a la última bajando su temperatura (Weihaupt, 1984). Las temperaturas máximas registradas en la parte cercana al estero, son producto de la absorción de calor en la zona por la gran cantidad de sólidos suspendidos que en todas las épocas anuales son aportados por las aguas residuales y los escurrimientos de lluvia; así como por la generación de calor en los procesos de degradación de la materia orgánica incorporada (Mee, 1977).

4.2.1.2 Salinidad.

La salinidad en las lagunas costeras muestra variaciones considerables tanto en el espacio como en el tiempo, ya que la mayoría de ellas recibe afluentes de ríos cuyo volumen cambia en cada estación ó algunos en su carácter de cuerpos receptores de aguas residuales, reciben aportes dulceacuícolas que alteran su contenido de sales disueltas (Contreras, 1993). Estudios realizados en diversas lagunas en el mundo con marcada influencia de los aportes fluviales, pluviales y antropogénicos, presentan éste comportamiento (Nixon, 1982; De la Lanza, 1994). Tal situación también se manifiesta en nuestra área de estudio, ya que se observaron las menores salinidades en la zona cercana al estero Esterón para todo el periodo de muestreo (Fig. 15), lo cual es originado por la dilución del agua marina procedente del Golfo de California con las aguas residuales, que a través del Dren Juárez, son incorporadas al cuerpo lagunar. En el fondo los valores son sensiblemente más altos y similares a los registrados en las zonas adyacentes del Golfo de California (Phleger y Ayala, 1969), lo que permite distinguir para todas las épocas climáticas estratificación en la columna de agua, con una diferencia de aproximadamente 1.8 ‰. Esta diferencia de concentración entre los niveles de muestreo fue estadísticamente significativa para todas las épocas del año y pone de manifiesto la influencia de los aportes de aguas residuales en el área que determinan el tipo de circulación en la zona ya discutido anteriormente.

Estacionalmente las concentraciones máximas se obtuvieron durante el verano, aún cuando los mayores aportes de aguas residuales fueron registradas durante esa época. Ello se debe a que en ese periodo se dio el nivel máximo de evaporación (Fig. 39) originado por las altas temperaturas registradas. Sin embargo, su concentración a lo largo del año es sensiblemente inferior a lo reportado en las aguas adyacentes del Golfo de California (Phleger y Ayala, *op. cit.*; Gilmartin y Revelante, 1978).

Las menores salinidades obtenidas durante el otoño, fueron producto de la dilución de las aguas de la laguna con los aportes pluviales, cuyo régimen en la zona es de finales de verano y principios de otoño (Secretaría de Marina, 1980). Por otra parte, el análisis de varianza mostró diferencia entre el otoño y las demás épocas climáticas (Tabla 4). Ello sugiere que estacionalmente el factor más importante que afecta la distribución de la salinidad en la laguna

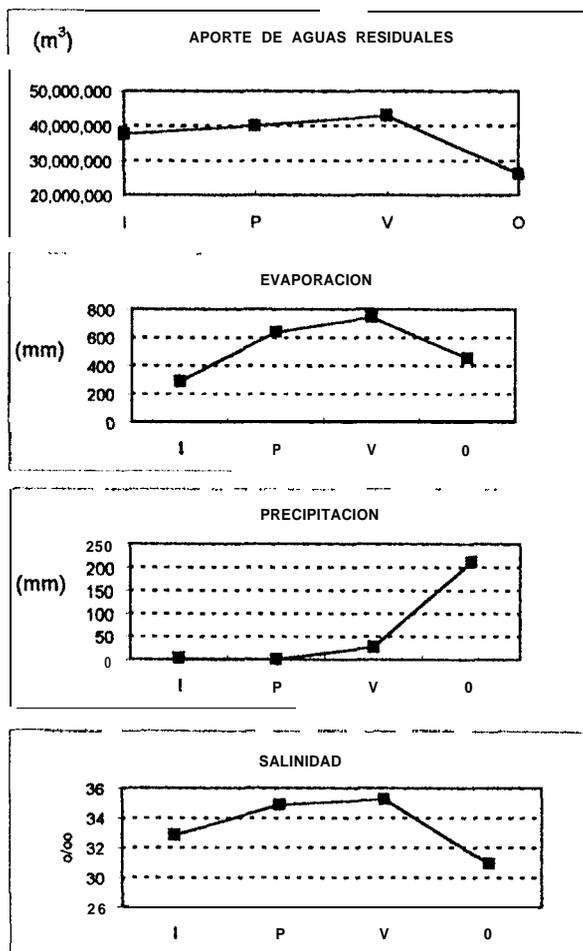


Fig. 39. Valores promedio de aporte de aguas residuales incorporadas, evaporación, precipitación y salinidad en la laguna de Santa María, durante 1995.

está dado por el régimen de lluvias. De esta manera, se distinguen dos épocas climáticas: lluvias y secas, las cuales agrupan las estaciones de verano y otoño e invierno y primavera para lluvias y secas respectivamente. Tal patrón de distribución ha sido reportado en otras lagunas costeras del estado con anterioridad (De la Lanza, 1994; Caballasi-Flores, 1985).

En el estero, la salinidad tuvo su máxima concentración en el verano en el fondo y la menor durante el invierno en superficie, con fuerte estratificación en todas las épocas climáticas. Esta diferencia entre los niveles de muestreo es debida al aporte continuo de aguas residuales de menor salinidad que circulan por la superficie, en tanto que en el nivel de fondo fueron superiores

debido a la influencia de las corrientes de marea que penetran por ese nivel. Ello origina menores salinidades en superficie para todas las épocas anuales, con una marcada estratificación (Tabla 5). Esto fué mas notorio en las épocas de invierno y verano, donde todo el transecto del estero presentó estratificación; mientras que durante primavera y otoño ésta se limitó hasta la estación 17. Sin embargo, tal distribución estuvo determinada por la influencia del periodo de la marea, ya que en los monitoreos de invierno y verano fueron efectuados durante la bajamar y los restantes en la pleamar, lo cual influyó en el nivel de mezcla de la columna de agua. Esta situación fue claramente visible durante la variación diurna, ya que durante todo el muestreo se observó una fuerte estratificación salina (Fig. 2 1).

Durante las épocas de invierno y otoño se observaron bajas salinidades en la laguna originadas por un incremento en el aporte de aguas dulces incorporadas, debido a que durante el invierno se lleva a cabo el cultivo de hortalizas las cuales requieren riego abundante, y a un mayor aporte de aguas de lluvia durante el otoño (Secretaría de Marina, 1980). El análisis estadístico corroboró esta tendencia, ya que se observaron diferencias significativas entre el invierno y las épocas de primavera y verano. Sin embargo, al comparar los gastos medidos en el dren Juárez (Tabla 2) para cada época climática con las tendencias de las variables físicas y químicas en el estero no existe correspondencia, debido a que se observa mayor aporte durante la primavera que durante el invierno, lo cual no se refleja en los resultados. Esto se debe a que los gastos no fueron obtenidos simultáneamente con los datos de los muestreos en el estero, por lo que los resultados del dren no reflejan el aporte mas representativo de cada época climática.

4.2.1.3. Oxígeno **disuelto**

En las lagunas costeras el oxígeno disuelto es una variable sumamente relevante, ya que además de su carácter biológico es un importante indicador de la calidad del agua y puede determinar el grado de eutroficación del medio (De la Lanza, 1994).

En el presente trabajo se obtuvieron valores entre n.d. (no detectado) y 9.66 mg/l en todo el periodo de muestreo, con altos niveles de oxígeno en todas las épocas anuales (Tabla 3). Las

concentraciones menores localizadas en la parte cercana al Esterón en el nivel de superficie para todas las épocas climáticas es producto de su utilización para la degradación de las altas cantidades de materia orgánica incorporadas a través del Dren Juárez (Tabla 4).

Estacionalmente, las concentraciones máximas se obtuvieron durante las épocas de otoño y primavera, lo cual puede ser producto de alta productividad en ambas épocas climáticas que es reforzada por la disminución en la concentración de nutrientes observada en primavera y otoño respecto a las épocas que les anteceden (Tabla 3). Esto concuerda con lo obtenido por Rojas-Trejo (1984) y Caballasi-Flores (1985) en la Bahía de Mazatlán, quienes mencionan que se dan dos picos de alta productividad en el año: primavera y otoño, con un incremento importante durante el verano. Estas distribuciones, con el aumento subsecuente en la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua, las atribuyen a las floraciones fitoplanctónicas características de ambientes templados, con una mayor intensidad en la productividad durante la primavera, mientras que el incremento durante el verano lo suponen producto de factores climáticos locales. En nuestro estudio, las mayores concentraciones de oxígeno y saturación se midieron durante el otoño (Tabla 3), lo cual difiere con los resultados mencionados anteriormente para la Bahía de Mazatlán y los obtenidos para la zona de Topolobampo por Hernández y Escobedo (1992) y Hernández y Escobedo (en prensa), quienes midieron los máximos de oxígeno durante la primavera. Los factores climáticos inducen la productividad en ambas épocas, sin embargo durante este trabajo estuvieron presentes ciertos elementos de influencia local que estimularon una mayor intensidad en la floración de otoño. En la lagunas costeras de baja profundidad, el viento es un factor sumamente importante que puede incrementar la productividad al resuspender sedimentos ricos en nutrientes que fertilizan la columna de agua (Mee, 1977). Este fenómeno se presentó en nuestra área de estudio, ya que durante septiembre de 1995 azotó la zona el huracán Ismael (vientos de 120 km/h) lo que originó una mezcla intensa que incrementó la disponibilidad de nutrientes hacia la columna de agua, lo que dió lugar a mayores índices de productividad que durante la primavera.

Gilmattin y Revelante (1978) reportan en un estudio efectuado durante el verano en la zona, que el Estero Lechuguilla (Laguna Santa María) es la segunda laguna más productiva del

Golfo de California, lo cual nos sugiere que en el área se presentan altos niveles de productividad en todo el ciclo anual.

En el estero, el oxígeno disuelto alcanzó las concentraciones promedio máximas durante el verano en **superficie** (4.16 mg/l) y menores (n.d.) en el invierno, mientras que en el nivel de fondo los valores fueron muy homogéneos (1.26-2.08 mg/l). Esto concuerda con lo obtenido por Rojas-Trejo (1984) y Caballasi-Flores (1985) en el Estero de Utiás, ya que mencionan que el nivel máximo de productividad en esa zona se da durante el verano y lo atribuyen a factores ambientales de tipo local. Por otra parte en el área de estudio se incorporaron aguas residuales con menor carga orgánica, ya que se dio un incremento en el volumen del aporte del dren Juárez, producto probablemente del aumento del uso del agua por la población de las zonas urbana y rural de la región, una menor aplicación de agroquímicos y la ausencia de *zafra cañera*. Esto se tradujo en aguas residuales con menor carga orgánica, lo que dió lugar a una menor utilización de oxígeno para la oxidación de la materia orgánica. Sin embargo, el análisis estadístico no muestra diferencia estacional ni entre niveles, lo cual nos sugiere que la influencia de aguas residuales es tal, que determina bajas concentraciones de oxígeno a lo largo del estero durante todo el ciclo anual.

4.2.1.4 Potencial de hidrógeno (pH)

Desde el punto de vista químico esta variable es definida como el logaritmo negativo base 10 de la concentración de iones hidrógeno ó $-\log_{10}[\text{H}^+]$. El dióxido de carbono que se disuelve en el agua reacciona y forma ácido carbónico inestable que tiende a bicarbonatos y a su vez a carbonatos (sistema amortiguador o regulador) con un comportamiento reversible, que se traduce en niveles de pH desde ácidos hasta alcalinos.

La tendencia a formar bicarbonatos y carbonatos en las aguas marinas es debida a que éstas contienen más radicales alcalinos y usualmente el pH de las aguas superficiales es de 8.0 a 8.3. Normalmente en cuerpos costeros semicerrados como lagunas e incluso estuarios y marismas puede variar entre 6.5 a 9.5 (De la Lanza, 1994). Esto concuerda con lo obtenido en el presente

trabajo ya que la distribución espacial muestra los valores menores de pH en la zona del **esterón**, con niveles de hasta 6.9. Esto es originado por una mayor descomposición de la materia orgánica incorporada y bajas salinidades (Mee, 1977; De la Lanza y Arenas, 1986).

Estacionalmente los valores menores se midieron durante el otoño, lo cual pudo ser originado por las bajas salinidades debidas a las lluvias que cayeron a finales del verano y principios del **otoño** (Mee, *op cit*), y aún cuando se midieron altas concentraciones de oxígeno, producto probablemente del incremento de la actividad fotosintética, la gran cantidad de aguas residuales incorporadas enmascaran la productividad primaria, predominando la influencia de los aportes antropogénicos que inducen bajas concentraciones de pH.

En el **Esterón** el pH mínimo se dio durante el invierno en la **superficie** originado por la descomposición de gran cantidad de materia orgánica incorporada, ya que en esa época se registro la mayor carga orgánica en el Dren Juárez (Tablas 2 y 5). Por otra parte, los valores máximos medidos durante el verano en el fondo se deben a la asimilación fotosintética de CO₂ (De la Lanza, *op. cit.*; Gilmartin y Revelante, *op. cit.*) y a la intrusión de agua marina en ese nivel.

4.2.1.5. Nutrientes.

La productividad real y potencial de las lagunas costeras ha sido considerada como una de las mas altas del mundo, rebasando inclusive, a algunos sistemas terrestres cultivados por el hombre con técnicas modernas. La condición principal de dicha productividad es la presencia constante y significativa de ciertos elementos, a partir de los cuales se genera la producción básica. Estos elementos son conocidos con el nombre de nutrientes y son básicamente compuestos de nitrógeno, fósforo y sílice. Las fuentes principales de nutrientes para los ecosistemas **lagunares-estuarinos** son: la lluvia, los escurrimientos por ríos, los procesos biogeoquímicos involucrados en la interfase sedimento-agua con la consecuente resuspensión y reciclamiento, así como el **continuo** aporte de materiales de diverso tipo (y su consecuente transformación vía descomposición bacteriana) proveniente de la vegetación sumergida y aledaña (De la Lanza y Arenas, 1978).

3.2.1.5.1. Nitrógeno

Los compuestos nitrogenados inorgánicos predominantes en los sistemas costeros son los nitratos, nitritos y amonio, con una preponderancia indistinta entre el primero y el último, según las condiciones locales. Sus concentraciones presentan una amplia variación espacial y temporal; desde lo indetectable para las tres formas hasta más de **50.0** μM para NO_3 y NH_4 y 10 μM para NO_2 (De la Lanza, 1994). Esto concuerda con los resultados obtenidos en el presente trabajo, ya que el rango de las concentraciones de nutrientes nitrogenados en el área de estudio fueron de <0.05 a 18.95 μM para nitratos, <0.01 a 7.51 μM para nitritos, y de 0.10 a 118.89 μM para amonio. Los valores máximos en el cuerpo lagunar fueron medidos durante el verano (Tabla 3), lo cual concuerda con los resultados obtenidos en estudios anteriores en la zona (periodo 1987-88: Hernández Real y Escobedo Urías, 1994; y ciclo 1990-91: Hernández y Escobedo, en prensa), y en otros sistemas lagunares como en Bahía Chesapeake (Baird *et al.*, 1995; Rhoads *et al.*, 1979). Estos autores atribuyen este valor máximo en verano al proceso de **remineralización** la cual **señalan**, es estimulada por valores altos de oxígeno y pH, los cuales deben sus altas concentraciones a la entrada de agua marina, pues aunque el monitoreo fue realizado durante la bajamar, el nivel de bajamar inferior fue leve (Tabla 9) por lo que el agua muestreada había sido diluida por agua marina en momento del muestreo.

Durante el otoño la concentración de nutrientes disminuye, debido probablemente a su utilización por los productores primarios. Esto es corroborado por los máximos valores de oxígeno y sobresaturación medidos.

En el Estero, durante el invierno se observa que el aporte de aguas residuales que penetran por la superficie posee la mayor carga de materia orgánica de todo el año (Tabla 5), por lo que los máximos de nutrientes se dan en este nivel, además de bajos niveles de oxígeno, pH y S%. Esto es debido al impacto de las descargas del Ingenio Azucarero, el cual realiza **lazafrá cañera** en esa época; y a que se realiza el cultivo de hortalizas en la zona agrícola **aledaña**, las cuales requieren de una cantidad mayor de fertilizantes fosforados y nitrogenados (Banderas, 1994).

Los nitratos tienen sus máximos durante el verano en el fondo, mientras que en superficie es en otoño. Esto se debe a que las aguas con altas concentraciones de nutrientes oxidados producto de la remineralización durante el verano son introducidas en el fondo, mientras durante el **otoño** se debe al aporte de las escorrentías las cuales son mayores en la época de lluvia y que aportan cantidades importantes de nutrientes oxidados al medio (Aston, 1977).

Tabla 9. Alturas de marea del Puerto de Topolobampo, Sinaloa para cada **campaña** de muestreo.

PECHA	HORA	ALTURA (m)
9/FEB/95	00:00	2.20
	06:00	2.40
	12:00	0.90
	14:00	0.20
	16:00	0.30
	18:00	1.00
16/MAY/95	05:18	-0.40
	12:11	0.79
	16:36	0.43
	22:26	1.25
22/AGO/95	02:24	0.21
	09:00	1.13
	13:53	0.70
	19:43	1.34
20/OCT/95	01:25	0.21
	07:47	1.13
	13:47	0.21
	19:49	1.10

Las concentraciones de nitritos en el Esterón fueron muy variables. Esto se debe a que en su carácter de especie de transición entre los nitratos y el amonio, es posible detectar altas o bajas concentraciones en la columna de agua, dependiendo de la concentración de material incorporado al medio. De ésta manera, en épocas de alta concentración de nutrientes, los valores serán altos y **visceversa** en épocas de poco aporte o en medios reducidos, donde el amonio domina sobre las

formas oxidadas (Hernández-Ayón et al., 1994). Los resultados mostraron los valores promedio máximos durante el verano ($2.89 \mu\text{M}$) y los mínimos en primavera ($0.06 \mu\text{M}$).

El amonio dominó sobre las otras formas nitrogenadas a lo largo del periodo de muestreo en el Esterón, imperando el ambiente reductor en superficie debido al aporte continuo de aguas residuales tanto urbanas como agrícolas que aportan grandes cantidades de materia orgánica y fertilizantes. La distribución estacional mostró esta influencia, ya que las máximas concentraciones se midieron durante el invierno en superficie y menores durante el otoño; cuando los aportes de agua residuales son menores.

De lo anterior puede mencionarse que en el Estero, las fluctuaciones en la concentración de nutrientes está determinada por los aportes de aguas residuales y el efecto de la marea.

4.2.1.5.2. Fósforo

El fósforo es considerado como el factor más crítico y complejo en los ciclos biogeoquímicos. Se encuentra tanto disuelto como **particulado**, sea orgánico como inorgánico. En la forma disuelta inorgánica predomina el fosfato monoácido (HPO_4^{2-}) en un 87%, el fosfato u ortofosfatos (PO_4^{3-}) en un 12% y el diácido (H_2PO_4^-) con un 1% para aguas marinas, con 20°C de temperatura y un pH de 8.0. La concentración de ortofosfatos disueltos en las lagunas costeras puede oscilar desde lo indetectable hasta contenidos altos cercanos a $10 \mu\text{M}$ resultado de la complejidad local (De la Lanza, 1994). Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran valores superiores para las dos formas de fósforo medidas que las reportadas, ya que se obtuvieron valores de hasta $48.76 \mu\text{M}$ para fósforo reactivo y de $53.64 \mu\text{M}$ para fósforo total (Tablas 3 y 6).

Estacionalmente los valores promedio máximos de ortofosfatos (fósforo reactivo) obtenidos en la laguna de Santa María se midieron durante el verano ($5.92 \mu\text{M}$), lo cual puede deberse a los procesos de remineralización inducidos principalmente por efecto de la temperatura (Mee, 1977; Liss, 1976).

Las altas concentraciones medidas durante el **otoño** pueden deberse a la intensa mezcla provocada por los fuertes vientos del huracán Ismael (vientos de 120 km/h) que azotó la zona durante Septiembre de 1995, y que de acuerdo a Shoellhamer (1995), pudieron causar resuspensión del material del **sustrato** fertilizando la columna de agua; además de la posible contribución de nutrientes regenerados (Mee, 1977). Este máximo durante el **otoño** concuerda también con el reportado por Contreras (1993), quien menciona que las concentraciones mas elevadas de nutrientes se sitúan después del periodo de **lluvias**, cuando además de los elementos autóctonos, se suman los provenientes del arrastre terrígeno originado por los ríos.

En el estero, el fósforo reactivo alcanzó los valores máximos en invierno en superficie debido a una mayor carga orgánica incorporada y los mínimos en verano, debido probablemente a una mayor utilización por los productores primarios (Caballasi-Flores, 1985). Por otra parte, la aplicación de fertilizantes fosforados disminuye, para luego darse un incremento de nuevo durante el **otoño** debido probablemente a las escorrentías dadas en la temporada de lluvias y efecto de resuspensión de materiales atrapados en los sedimentos, provocados por los fuertes vientos generados durante el huracán Ismael (Aston, 1977).

4.2.3. IMPACTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.

En el área de estudio se incorpora permanentemente una gran cantidad de material a través de una compleja red de drenes que transportan las aguas residuales producto de las actividades urbanas, agrícolas e industriales de la región (Fig. 2), lo que se traduce en un fuerte aporte de material sobre el medio marino, como se ha evidenciado en lo concerniente a nutrientes incorporados, ya que en el estudio realizado durante los meses de enero y marzo de 1974 en el Valle del Fuerte, se obtuvo que los diferentes drenes transportaron un promedio de 1037 kg/día de fosfato (PO₄) y 1017 kg/día de nitrógeno total (NT). El aporte del Dren Juárez se estimó en 641 kg/día de PO₄ y 671 kg/día de NT (Banderas, 1994).

Tal cantidad de material incorporado origina elevadas concentraciones de nutrientes en el Esterón y zona central de la laguna (estaciones 11-19) donde se observa claramente para cada variable medida, el alcance de las aguas residuales que inciden en el área, ya que se midieron para esa zona, bajas concentraciones de oxígeno, pH y salinidad; y altos valores de nutrientes (Figs. 15-20) con una fuerte estratificación en el estero especialmente durante las épocas de invierno y verano (Fig. 21). Así mismo, al efectuarse el análisis de la razón fósforo total/fósforo reactivo (Fig. 40) se observó para todas las épocas climáticas, que un alto porcentaje del fósforo en la laguna y el estero está disponible a la biota como fósforo reactivo. Esto sugiere que la fuente principal de fósforo en el área son las aguas residuales incorporadas en forma de detergentes y fertilizantes, ya que la razón máxima se detectó durante el invierno, época en la que se reciben en la zona costera, los aportes más importantes de la industria azucarera local y de los excedentes del riego de hortalizas a las cuales se les aplican una gran cantidad de compuestos nitrogenados y fosforados (Banderas, 1994).

Por otra parte, al comparar las concentraciones promedio anual de nutrientes en el presente trabajo con los registrados para la zona en los estudios de Hernández y Escobedo (1992) durante el ciclo 1987-1988, y el ciclo 1990-1991 (Hernández y Escobedo, en prensa), se observa un importante incremento en la concentración de NO₃ y PO₄ (Tabla 10), lo cual puede deberse a un aumento en el volumen de las descargas antropogénicas por el incremento de las actividades

urbanas, agrícolas e industriales originadas por el crecimiento de los centros poblacionales aledaños.

Tabla 10.- Valores promedio anuales de nutrientes superficiales (μM) en la Laguna de Santa María durante los trabajos efectuados desde 1987 al actual.

Variable	1987-1988 (Hernández y Escobedo, 1992)	1990-1991 (Hernández y Escobedo, en prensa)	Este trabajo
NO_3	0.40	1.49	1.70
NO_2	-	0.15	0.24
PO_4	1.4	2.60	3.39
NH_4	-		1.10

Es importante mencionar que el mayor alcance del área de influencia de las aguas residuales fue obtenido durante los muestreos de invierno y verano, los cuales fueron realizados en la fase de bajamar, mientras que los de primavera y otoño lo fueron durante la pleamar, donde se observó que las aguas residuales son replegadas hacia adentro del estero (Fig. 41). Esta situación nos sugiere que en el estero la marea tiene un efecto sumamente importante en la distribución y alcance del material incorporado.

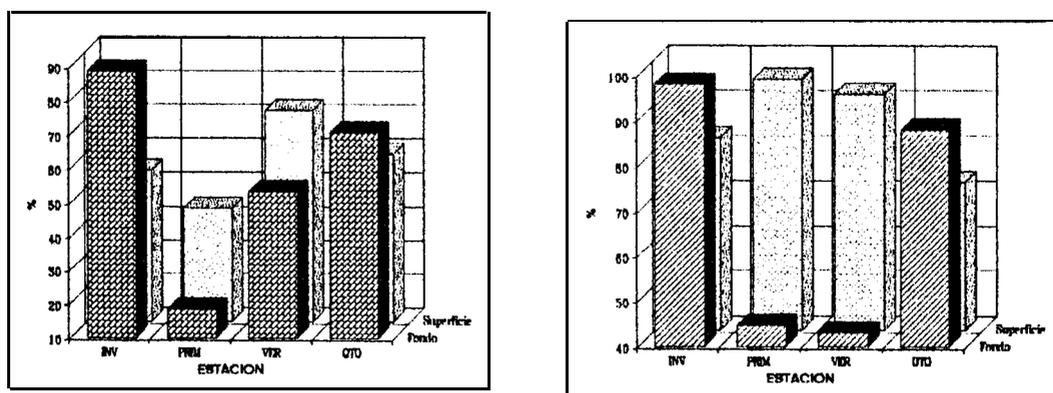


Fig. 40.- Razón FR/FT en el cuerpo lagunar(a) y estero Esterón (b) durante el periodo de estudio.

Por otra parte, aun cuando los aportes de aguas residuales incorporadas a la Laguna de Santa María son considerables a lo largo del año (Tabla 2), y que alrededor de un 80% de la porción litoral de la laguna esta rodeada por manglar que en sí es una fuente importante de

nutrientes a la columna de agua (Nixon, 1980), las concentraciones de nutrientes en el cuerpo lagunar no son superiores a diversas lagunas costeras tropicales con menor o nulo impacto antropogénico, ya que Nixon (1982) en su trabajo realizado en alrededor de 20 lagunas costeras libres de contaminación, obtuvo rangos de concentración de 1 a 5 μM para fosfatos y entre 1 y 100 μM para nitratos, mientras que Castro-Longoria y Grijalva-Chor(1991) reportaron valores de fosfato del orden de 0.021 a 3.6 μM , nitratos de 0.42 a 3.8 μM , y nitritos de 0 a 0.38 μM en la Laguna de La Cruz, Sonora. Esas concentraciones reportadas son similares a las obtenidas en el presente trabajo, lo cual nos sugiere que en la zona se dan lugar ciertos procesos que permiten la disminución del impacto causado por la introducción de los altos volúmenes de aguas residuales incorporadas a la zona.

Uno de ellos es la excelente dinámica de la laguna, ya se obtuvo un tiempo de evacuación de 2.26 días lo que significa, que en un intervalo corto de tiempo se tiene una adecuada renovación del agua contenida en el área, lo que permite la dilución de la gran cantidad de material incorporado a través de las aguas residuales, pues aún cuando el resultado del cálculo es un dato ideal y que no corresponde al tiempo real de renovación, es una buena estimación de la dinámica física de la zona (Dyer, 1979). Esto concuerda con lo obtenido en la Ensenada de La Paz, B.C.S. donde se observó un tiempo de evacuación similar que permite el saneamiento del material incorporado a través de las aguas residuales que se vierten en el área (Jiménez, 1983).

Otro mecanismo importante es el fenómeno denominado *trampa de nutrientes*, el cual se lleva cabo en los sistemas lagunares y estuarinos con aporte de aguas continentales, y consiste en que en las zonas de baja salinidad, las aguas dulces incorporadas aportan una gran cantidad de arcillas en suspensión, las cuales suspendidas por la turbulencia de las corrientes de descarga de los ríos predominantes en iones negativos, se neutralizan y precipitan. Esta floculación y las corrientes lentas, mantienen estos coloides en las partículas de los sedimentos, los cuales tardan en incorporarse a los patrones bioquímicos y ocasionan la inmovilización de las diversas sustancias incorporadas a la zona costera (Yáñez-Arancibia, 1986; Contreras, 1993; Chester, 1990).

Por otra parte, los suelos de manglar generalmente compuestos de sedimentos limo-arcillosos, tienen una elevada capacidad para absorber o inmovilizar los nutrientes que entran con las mareas o por aportes antropogénicos. Esto ha sido demostrado con respecto a fosfatos y nitratos por Hesse (1962), quien reporta que la mayor parte del fósforo inorgánico en sedimentos de manglar se encuentra en la forma de fosfatos de Ca, Fe y Al, o como fósforo reactivo soluble absorbido o incorporado en hierro hidratado y óxidos de aluminio. f Iobbie *et. al* (1975, en: De la Lanza, 1994) menciona que los ortofosfatos pueden retirarse del agua por adsorción en sedimentos (efecto amortiguador) en un 60 %, mientras que De la Lanza (*op. cit.*) menciona que los niveles de adsorción de ortofosfatos en los sedimentos arcillosos de hasta 300 $\mu\text{M/l}$, incluso bajo condiciones anóxicas. Esta capacidad alta de retención del sedimento juega un papel no sólo para regular la biomasa fitoplanctónica, sino también en el control de los desechos antropogénicos (Arenas y De la Lanza, 1981).

Esta condición en particular se presenta también en la Laguna de Santa María, ya que debido a la alta capacidad de adsorción de materia orgánica de los sedimentos del estero Esterón, de composición arcillo-limosa (Díaz Arredondo, 1996) se ha permitido que un alto porcentaje del material incorporado quede retenido en los sedimentos, particularmente en la zona de mezcla de las aguas residuales con las aguas marinas. Yáñez Arancibia (1986) señala que el punto crítico o zona en la que se efectúa la máxima floculación en los estuarios es el área de salinidades de 6‰, mientras que Dyer (1979) menciona que las partículas finas y muy finas flocculan en salinidades de 4‰.

En el presente trabajo no fue posible muestrear la zona de mezcla debido a la imposibilidad de transitar en el litoral del manglar por su carácter pantanoso, pero las concentraciones de nutrientes medidas en el Dren Juárez y las obtenidas en la parte más interna del estero (estación 19), muestran una pérdida de aproximadamente un 80% de los nutrientes incorporados en las aguas residuales, además de que al graficar las concentraciones de nutrientes contra salinidad en el transecto de las estaciones 11-19 (laguna-estero) y se incluyen las medidas en el Dren Juárez, se observa una disminución de la concentración conforme se va introduciendo agua marina (Fig. 41). Tal tipo de comportamiento se denomina no conservativo (Chester, 1990),

y muestra la incorporación al **sustrato** de las sustancias disueltas o en suspensión de la columna de agua, lo cual explica en la zona la alta capacidad del medio para **amortiguar** el impacto causado por la incorporación indiscriminada de las aguas residuales generadas en las diversas actividades regionales. Por otra parte, la inmovilización del material incorporado puede deberse a las bajas concentraciones de oxígeno originadas por el consumo del mismo en la oxidación de la materia orgánica incorporada, y al efecto bacteriostático del lecho de taninos de la descomposición de *Rhizophora mangle* (More11 y Corredor, 1993).

Por otra parte, Vázquez-Correa (1996) menciona que la liberación del fosfato bajo condiciones aeróbicas puede darse a partir de valores de pH del agua **superficial** de 9.5, debido probablemente a la solubilización de complejos de hierro y **aluminio**, por lo que el ambiente reductor de las aguas y sedimentos del estero fueron otro factor importante en la inmovilización de los nutrientes incorporados. Esto ha sido reportado también por Arenas y De la Lanza, 1990, quienes mencionan que la disponibilidad de nutrientes esta regulada por el estado **redox** de los sedimentos adyacentes y principalmente en la interfase con el agua.

Sin embargo, dado el incremento de las actividades antropogénicas, el sedimento de las lagunas costeras particularmente las que colindan con campos agrícolas, ha disminuido su capacidad de adsorción por saturación. Tal situación ha sido reportada por De la Lanza (1991), quien reportó para la Laguna de Ensenada del Pabellón, Sinaloa, áreas de impacto por aportes agrícolas particularmente en los drenes que llegan a la laguna, y determinó que los sedimentos de los drenes están en el límite de su capacidad de adsorción. Páez-Osuna *et. al* (1992), **cuantificaron** el contenido del fósforo inorgánico en los sedimentos de la misma laguna, y demostraron que los de los drenes sobrepasaron en aproximadamente el doble de los no impactados (con máximos de 1113 ppm en sedimentos contaminados y 513 ppm en áreas fuera de influencia directa). Este incremento en la fase sedimentaria origina que las concentraciones de nutrientes nitrogenados y de ortofosfatos se incrementen en la columna de ambientes lagunares y estuarinos (De la Lanza, 1994). Esta situación se ha **presentado** también en nuestra área de estudio, ya que aún cuando no se midió la concentración de nutrientes en sedimentos y aguas intersticiales, en la columna de agua se determinó que las concentraciones medias de nutrientes han observado un incremento

substantial con respecto a estudios anteriores efectuados en la zona como ya se mencionó anteriormente.

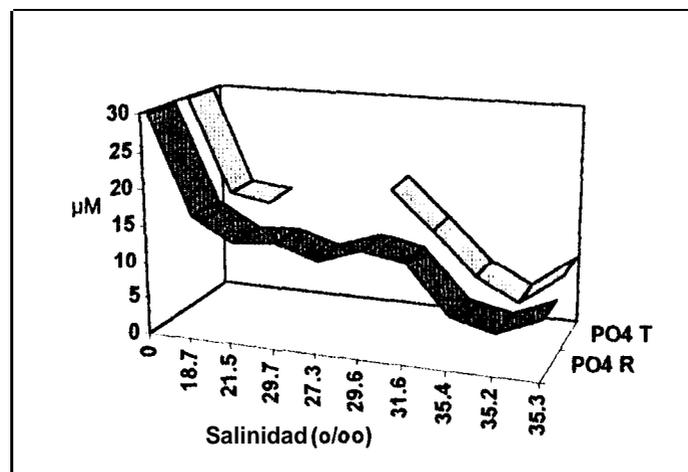


Fig. 41.- Valores de fósforo total y reactivo solubles en el transecto: Dren Juárez-Estero Esterón-Laguna durante el muestreo de verano de 1995

Por ello, queda de manifiesto que las concentraciones de nutrientes encontradas en el cuerpo lagunar a lo largo del ciclo anual, con niveles normales para cualquier laguna costera del noroeste Mexicano son probablemente originadas por el adecuado tiempo de renovación del agua (Smith, 1984) y a la alta capacidad de adsorción de los sedimentos estuarinos del Esterón. Esto último concuerda con el trabajo efectuado por Díaz Arredondo (1996) sobre composición granulométrica de la Laguna de Santa María y el estero Esterón, ya que menciona que la laguna esta constituida principalmente por arenas finas (50%) y muy finas(45%), mientras que el estero posee sedimentos arcillo-limosos (64%), con sedimentos cerca de la desembocadura a la laguna que indican ambientes de transición. Respecto al contenido de carbono orgánico detectó en la laguna valores mas altos que los encontrados por Muhech (1990) (0.03-0.90 %) aunque menciona que tales valores (0.69-3.21%) se encuentran dentro del intervalo de valores de origen natural, mientras que al Esterón lo caracterizó como un cuerpo de agua altamente impactado con valores de 1.63-5.91%.

4.3. MODELO NUMERICO

Los resultados obtenidos en la modelación hidrodinámica de la zona permitieron describir satisfactoriamente la dinámica de la laguna en un periodo de marea, con ligeras variaciones en la magnitud de las corrientes obtenidas y las modeladas, ya que durante la simulación se obtuvieron intensidades máximas de hasta 0.62 m/s en la región de la boca de la laguna, mientras que en la misma zona, las corrientes máximas medidas fueron del orden de 0.30 m/s (Fig 5), sin embargo, al comparar gráficamente los datos de campo y los resultados del modelo hidrodinámico para la región de la boca de la laguna, se observa que las tendencias son muy similares (Fig. 42) con un coeficiente de correlación de 0.63. Estas diferencias en la magnitud pueden deberse a que durante la modelación de las corrientes de marea no se tomó en cuenta el forzamiento de las corrientes por efecto de viento, el cual es un factor sumamente importante que rige la dirección e intensidad del patrón de corrientes en la zona de estudio. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Jiménez Illescas (1983 y 1996) en la Ensenada y Bahía de La Paz, respectivamente; Obeso (1986) en la Bahía de La Paz, y Obeso *et. al* (1996) en Bahía Concepción, quienes mencionan que las discrepancias que se presentan entre las variables simuladas y las mediciones registradas, se deben principalmente a la influencia del viento, a efectos batimétricos y a los errores introducidos por la discretización de la bahía, con lo cual se pasa de una situación *continua* a una situación *discreta*. Por otra parte, los resultados del modelo son valores promedio de toda la columna de agua, mientras que los resultados de campo se refieren únicamente a las corrientes medidas a 40 cm del

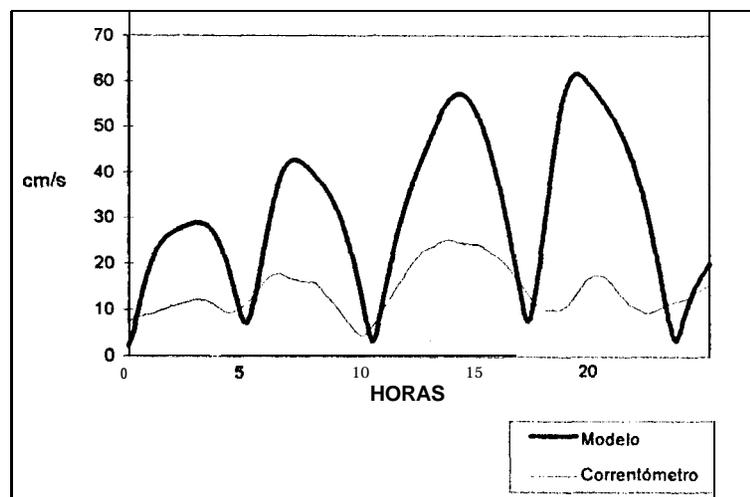


Fig. 42. Gráfico comparativo de las velocidades de corrientes modeladas y las obtenidas en la boca de la Laguna de Santa Hilaria durante octubre de 1995.

La utilidad del modelo de dispersión de contaminantes aplicado en el presente trabajo ha sido probado en otros sistemas costeros por Zaytzev *et. al* (1992). En el presente trabajo, el modelo aplicado fue útil para determinar el alcance del impacto en la distribución de los diversos contaminantes incorporados, pues aún cuando no se observó una total concordancia entre las **distribuciones** observadas de Sólidos Suspendidos Totales y las modeladas, si se observó que las **distribuciones** guardan cierta similitud (Fig. 43). Esto pudo ser originado, al igual que para la **modelación** de la hidrodinámica, que no se tomó en cuenta el efecto del viento en la distribución de corrientes simuladas, y éste causa una distribución distinta del material incorporado, debido al efecto de fricción con la superficie de la columna de agua que puede ocasionar giros.

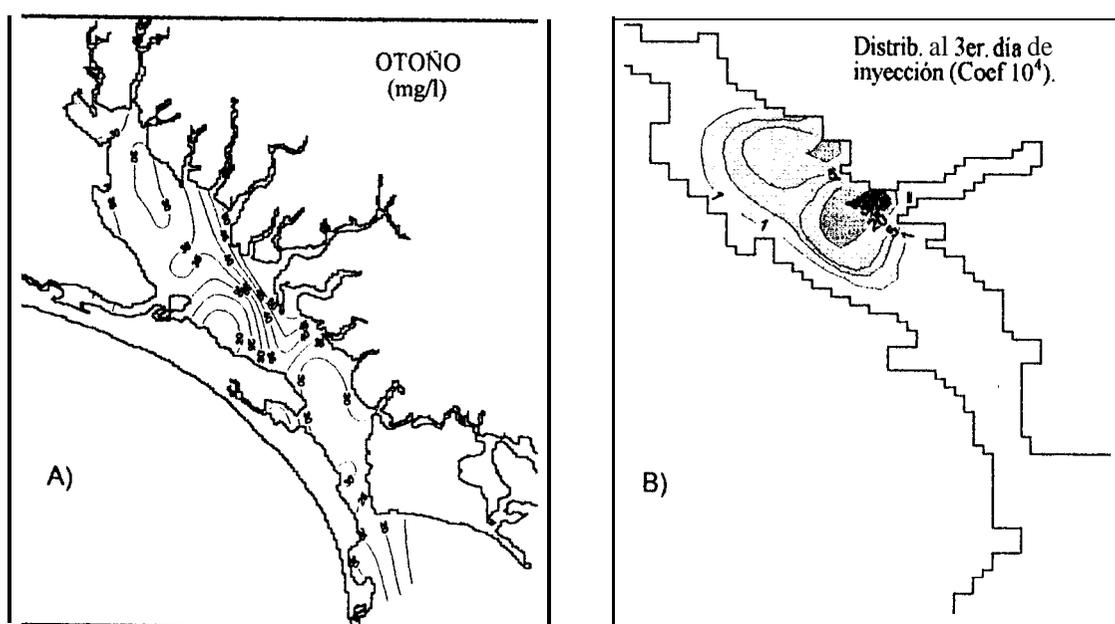


Fig. 43 Distribuciones de Sólidos Suspendidos Totales (A) y dispersión teórica del material (B) en la Laguna de Santa María, Sinaloa.

Por otra parte, se observó en los resultados que el núcleo de alta concentración del material incorporado permanece estable en la zona media del cuerpo lagunar para todas las distribuciones modeladas con ambos coeficientes de dispersión. Esto es originado por el efecto regulador de las corrientes de marea, ya que durante la pleamar los contaminantes son arrastrados hacia la parte mas interna de la laguna (Fig. 44a) y durante la bajamar hacia la parte exterior de la misma (Fig. 44b). Al sumar ambos efectos y debido a que la fuente de inyección es constante, el núcleo central permanece sin cambio, observándose la variación de la concentración en cuanto a

un aumento en el **área** de cobertura del material incorporado.

Por otra parte, como ya se mencionó anteriormente, el bosque de manglar que rodea la laguna y la composición sedimentaria del estero Esterón, no permite que el material contaminante incorporado no penetre mas allá del límite del estero. Por ello, **las distribuciones** obtenidas a lo largo del presente estudio, no se asemejan a las modeladas, ya que el modelo no contempla estos mecanismos de autodepuración en esta laguna costera.

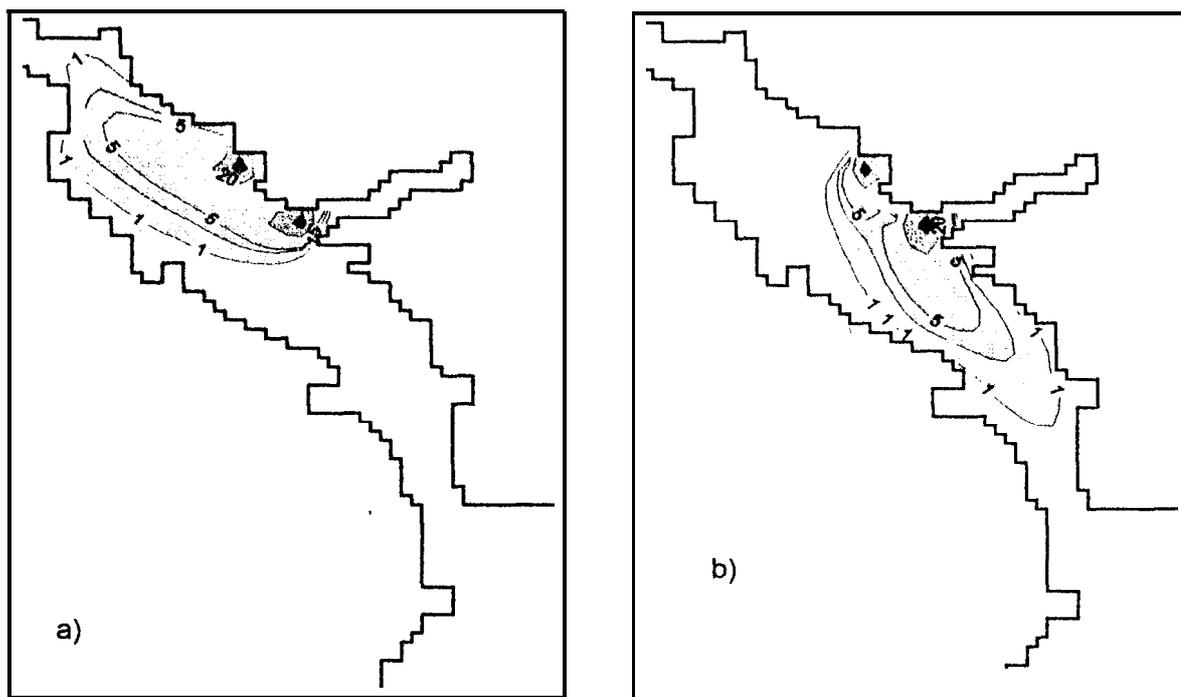


Fig. 44.- Distribución simulada del material incorporado durante el flujo (a) y reflujó (b) de la marea

V. CONCLUSIONES

De manera general, los datos obtenidos de corrientes muestran que la **dinámica** de la laguna, así como la zona de canales **está** determinada por la acción de la marea, la batimetría y el viento.

Se distinguen 2 zonas en el área de estudio con características bien definidas: laguna costera (Laguna Santa Maria) y estuario (Estero Esterón).

En ambos cuerpos costeros se presenta una circulación de *estuario positivo*.

Espacialmente las mayores concentraciones de nutrientes en la **laguna se** presentan en la zona cercana al estero **Esterón**, mientras que estacionalmente las mayores concentraciones se dan durante el verano producto de la **remineralización** la cual es mas eficiente en ese época debida al efecto de la temperatura.

Se distinguen dos épocas anuales: lluvias y secas, con mayores concentraciones de nutrientes durante la época de lluvias (**verano-otoño**).

En el **estero** las mayores concentraciones de nutrientes se obtuvieron en la parte mas interna del mismo con un efecto importante de las fluctuaciones de la marea en la dilución de las concentraciones. Estacionalmente los valores máximos se midieron durante el invierno, debido al mayor aporte de fertilizantes aplicados en la zona agrícola y a la descarga del Ingenio Azucarero durante esa época.

En la **laguna**, la variación mas importante es la ESTACIONAL, mientras que en el **estero lo es** la DIURNA, debido a que la marea es el factor principal que determina las fluctuaciones en esa zona.

Las concentraciones de nutrientes medidos en la laguna se encuentran dentro de los rangos normales para cualquier laguna costera con escaso o nulo impacto antropogénico, debido al

rápido tiempo de renovación en la laguna y al efecto de trampa de nutrientes de los sedimentos del estero.

Se observa un incremento en las concentraciones de nutrientes con **respecto** a estudios previos realizados en la zona, originados por **un aumento en las descargas antropogénicas** de origen industrial, doméstico y agrícola.

La modelación de la marea en la zona fue realizada con éxito, y las discrepancias entre algunas magnitudes determinadas con las mediciones obtenidas **en campo**, son producto de la distancia del fondo del coniómetro y a la influencia del viento.

La modelación de la dispersión de contaminantes en la zona permite distinguir la zona mayormente afectada por los diversos materiales incorporados al sistema mediante el aporte de las aguas residuales en **periodos** de aguas tranquilas y vientos moderados (Coeficiente de difusión turbulenta= 10^4 y 10^5), obteniéndose una mayor rapidez en la difusión de los materiales principalmente hacia la parte superior de la laguna.

No se observa una relación directa entre las concentraciones hipotéticas generadas por el modelo de dispersión y las observadas, debido al carácter no conservativo de las nutrientes y sólidos suspendidos, y el efecto de la zona de manglar con una importante y eficiente trampa de nutrientes, que atrapan en el sedimento una gran cantidad del material incorporado.

VI. RECOMENDACIONES

La gran importancia de los estuarios y lagunas costeras ha originado que se efectúen estudios interdisciplinarios en tales ambientes con el fin de generar una serie de conocimientos indispensables para el control y conservación de los mismos. En el presente trabajo se logró una visión general de la variabilidad espacio-temporal de la zona en términos físicos y químicos lo que representa un valioso marco de referencia para los estudios a realizarse en el futuro. Con base en los resultados obtenidos, se recomienda el análisis detallado de los procesos químicos que se dan lugar en la fase sedimentaria y la interfase agua-sedimento, la determinación de la productividad primaria, la contribución específica de las aguas residuales y las tasas de sedimentación en la zona. Por otra parte, se sugiere que los muestreos se efectúen a escalas de tiempo mensuales y diurnas, así como en las distintas fases de la marea con el fin de determinar con más precisión las fuentes de variabilidad.

Es fundamental que se realicen los estudios necesarios para implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales en la zona, ya que los resultados obtenidos en el presente trabajo mostraron un incremento importante en el impacto causado por los aportes antropogénicos vertidos en la Laguna de Santa María.

La aplicación de los modelos hidrodinámico y de dispersión son muy útiles como herramientas en la generación de información relevante para la conservación y manejo de la zona costera, por lo que se recomienda que se afinen todos los detalles para su calibración a fin de que pueden ser utilizados satisfactoriamente.

BIBLIOGRAFIA

Aldeco, O.R., 1979. "Agentes de contaminación de las aguas." En: Mem. II Simp. Binac. Sobre Medio Amb. Del Golfo de California." La Paz, B.C.S. 26-30 abril de 1978. Inst. Nal. Forest. Esp. Nº 14: 111-114. SARH.

Aldeco, J. y D. Salas de León, 1994. "Lagunas costeras y el litoral mexicano: Física." En: *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*. De la Lanza y Cáceres. (Eds) U.A.B.C.S. pp. 120-123.

Alvarez Sánchez, L.G.; M. Uyeji M. y R. Durazo A., 1982. "Observaciones de corrientes costeras superficiales mediante trazadores Lagrangianos. I. Bahía Todos Santos, B.C. (1980-81)." Informe Técnico OC-82-03. Departamento de Oceanografía. CICESE.

Arenas, F.V., 1980. "Balance anual del carbono orgánico, nitrógeno y fósforo en el sistema lagunar Huizache y Caimanero, Sinaloa, México." Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, UNAM.

Arenas, V. y G. De la Lanza, 1990. "The effect of dried and cracked sediments on the availability of phosphorus in a coastal lagoon." *Estuaries*. Vol. 4, Nº 3 p. 206-212.

Aston, S.R., 1977. "Estuarine chemistry." In: *Chemical Oceanography*. Riley and Chester (Eds). (7:41), 361-440.

APHA AWWA WPCF, 1989. "Standard methods for the examination of water and wastewater." 17th. Edition.

Audelo del Valle, S.J., 1992. "Análisis de la eficiencia de las artes de pesca empleadas en la captura de camarón de bahía en Topolobampo, Sinaloa." Res. IV Congr. AIMAC. 2-4 Sept. de 1992. Ensenada, B.C.

Baird, D., R E. Ulanowicz and W. R. Boyton, 1995. " Seasonal Nitrogen Dynamics in Chesapeake Bay: a Network Approach." *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 4 1, 137- 162.

Banderas, T.A., 1994. "Impacto ambiental de los desarrollos hidroagrícolas sobre las lagunas costeras del Noroeste Mexicano." En: *Lagunas costeras y el litotal mexicano.* De la Lanza y Cáceres. Editores. U.A.B.C.S. pp. 471-492.

Bendschneider y Robinson, 1952. *J. Marine Res.* II :87

Castro-Longoria, R y M. Grijalva-Chon, 1991. "Variabilidad espacio temporal de nutrientes y seston en la laguna costera La Cruz, Sonora." *Ciencias Marinas.* Vol. 17. Nº 2 pp. 83-97.

Cervantes Duarte, R 1982. " Distribución de nutrientes en la Ensenada de La Paz, B.C.S. durante el periodo primavera -verano de 1981." TESIS. CICIMAR-IPN. 119 p.

Chow, V.T., 1959. "Open-channel hydraulics." *McGraw-Hill Civil Engineering Series.* p.24-37.

Conde Gómez, J., 1991. "Análisis hidrológico y de contaminación en bahía Ensenada del Pabellón-Alatata, Sinaloa." Tesis Prof. Fac. Cien. UNAM. 42 p.

Conde Gómez, J. y G. De la Lanza, 1994. "Hidrología contra contaminación en la laguna Ensenada del Pabellón, Sinaloa." *Oceanología.* V. 1 Nº 2 p. 43-59.

Contreras Espinosa, F., 1992. "Ecosistemas costeras mexicanos" U.A.M. pp.15-73.

Chávez Ortiz, E., 1978. " Estudio ecológico de dos lagunas costeras del Pacífico de México con especial referencia a la biología pesquera del camarón." TESIS DOCTORAL. I.P.N.-E.N.C.B. 287 p.

Chester, R., 1981. “Marine geochemistry.” Edit. UNWIN-NYMAN. London England p. 42-50.

Daniel, W.W., 1989. “Bioestadística.” Edit. LIMUSA. 667 p. México.

Day, J.W.; C. Hall; W. M. Kemp and A. Yáñez-Arancibia, 1989. “Estuarine Ecology”. John Wiley and Sons Edt. pp. 47-143.

De Alba-López, P.A., 1965. “Estudio general de acceso al Puerto de Topolobampo, Sin. Aplicaciones de trazadores radiactivos.” Tesis Prof. Fac. Ing. UNAM. 1-I 07 p.

De la Lanza-Espino, G. y V. Arenas, 1986. “Naturaleza química de las hojas y rizomas de los pastos marinos y su ambiente sedimentario.” *Rev. Biol. Trop.* 26(2):277-289.

De la Lanza-Espino, G., 1991. “Oceanografía de mares mexicanos.” A.G.T. Editor. México, D.F. 569 p.

De La Lanza Espino, G., 1994. “Química de las lagunas costeras y el litoral mexicano.” En: *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*. De la Lanza E. G. y C. Cáceres M. Editores, U.A.B.C.S. pp. 127-198.

Díaz Arredondo, M.A., 1996. “Granulometría y parámetros sedimentológicos de la Bahía de Santa María, Sinaloa, México.” Resúmenes II Simposium sobre Investigaciones Científicas de la Bahías del Norte de Sinaloa y Mar Adyacente. S.M.-DIGONAV. E.I.O.P.C. 5-7 Nov. 1995. pp. 28.

Díaz Arredondo, M.A. y A. Fierro Martínez, 1996. “Distribución de la materia orgánica en sedimentos superficiales de la Bahía de Santa María, Sinaloa.” Resúmenes II Simposium sobre Investigaciones Científicas de la Bahías del Norte de Sinaloa y Mar Adyacente. S.M.-DIGONAV. E.I.O.P.C. 5-7 Nov. 1995. pp. 27-28.

Diez **Pérez, J.** y F. Ramírez C., 1976. " Estudio de las bahías de Santa María, Ohuira y Topolobampo mediante imágenes Landsat." Congr. Nal. de Fotometría, Fotointerpretación y Geodesia. S.R.H.

Dyer, K.R., 1973."Estauries: A Physical Introduction." Ed. John Wiley and Sons. London, England. pp. 109-1 21.

Dyer, K.R., 1979. "Estuarine hydrography and sedimentation estuarine and brackish-water sciences association handbook. Cambridge University Press. 230 p.

Elliot, A.J., 1976. "A study of the effect of meteorological forcing on the circulation in the Potomac estuary." Special report 56. Chesapeake Bay Institute. The John Hopkins Univ. Baltimore, MD.

Gilmartin, M. and N. Revelante., 1978. " The Phytoplankton Characteristics of the Bartier Island Lagoons of the Gulf of California." Estuarine and Coastal Marine Science. 7, 29-47.

González Monares, J., 1984. " Lista comentada de los peces colectados en las bahías de Topolobampo, Sinaloa." TESIS. U.N.A.M.

González Orduño, A.M., 1996. "Aplicación de un modelo hidrodinámico en estanques para maricultivo". TESIS DE MAESTRIA. CICIMAR-IPN. 79 p.

Grassoff, 1964. Kiel. Meeresforsch. 20:5

Hernhdez-Ayón, J.M.;; S. Galindo-Bect; B.P. Flores-Báez and S. Alvarez-Borrego, 1993. "Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River Delta." Estuatinee, Coastal and Shelf Science. 37, 593-602.

Hernández-Real, M.T. y J. Juárez-Arroyo, 1988. "Inventario de la flora y fauna bentónicas en la Bahía de Topolobampo, Sinaloa." *Sría. De Marina.DJGONAV.ETOT.* 22 p.

Hernhdez Real, M.T. y D. Escobedo-Urías, 1992. "Distribución de metales traza no residuales en el Sistema Lagunar de Topolobampo, Sinaloa, México." Res. IV Long. AIMAC. 2-4 Sept. de 1992. Ensenada, B.C.

Hernández Real, M.T., D. Escobedo y M. Díaz, 1992. "Distribución espacio-temporal de parámetros físicos y químicos en el sistema lagunar de Topolobampo, Sinaloa." Resum. IV Cong. AIMAC. Nov. de 1992.

Hernández Real, M.T. y A. Fierro M., 1994. "Evaluación preliminar de contaminación por plaguicidas en el Norte de Sinaloa." Mem. V Congreso AIMAC. 24-27 de Abril de 1994.

Hernhdez Real, M.T., D. Escobedo y A. Fierro M., 1994. "Estado de la Contaminación Marina de las bahías de Topolobampo, Ohuira y Santa María, Sinaloa." *Investigaciones Científicas de las bahías de Topolobampo, Chira y Santa María, Sinaloa.* Secretaria de Marina-Armada de México. DIGONAV.EIPOC. Editores. pp. 5-

Hernández-Real, M.T., D. Escobedo y M. Grajeda, 1995. "Water quality at the lagoon complex of Topolobampo, Sinaloa, México." Resum. First International Meeting of Microbial Ecology. 8-12 Mayo de 1995. CINVESTAV-IPN. México, D.F.

Hernhdez-Real, M.T. y D. Escobedo-Urías, 1996. "Calidad del agua del sistema lagunar de Topolobampo, Sinaloa. Periodo 1987-1995." Informe Técnico. S.M. DIGONAV, EIOPC. 22 p.

Hernhdez Real, M.T. y D. Escobedo U., en prensa. "Dinámica de parámetros fisicoquímicos en el sistema lagunar de Topolobampo, Sinaloa." SM-DIGONAVEIOPC. Topolobampo, Sinaloa.

Hesse, P.R., 1962. "Phosphorus fixation in mangrove swamp muds." NATURE N° 183 p. 295-296.

Jiménez Illescas, A.R, 1983. "Aplicación de un modelo hidrodinámico numérico a la Ensenada de La Paz, B.C.S." TESIS DE MAESTRIA. C.I.C.E.S.E. 109 p.

Jiménez Illescas, A.R, 1996. " Análisis de procesos barotrópicos y baroclínicos en la Bahía de La Paz, B.C.S. TESIS DOCTORAL. Inst. Cienc. Mar y Limnol. U.N.A.M. 193 p.

Kjerfve, B., 1988. "Hydrodynamics of estuaries." Vol. I. Estuarine Physics. P. 344 1.

Lecuanda, R., 1967. Ecología y sedimentación de los manglares en las lagunas de Topolobampo, Sinaloa, México. Resultados preliminares. *III Congr. Nal. Oceanogr.*

Liss, P.S. 1976. "Conservative and non-conservative behavior of dissolved constituents during estuarine mixing." 93-130. En: *Estuarine Chemistry*. Burton J.D. y P.S. Liss (Eds) Academic Press, London.

Mpez-Gutiérrez, H., 1965. "Aplicación de radioisótopos a problemas de ingeniería de costas. Estudios en Topolobampo, Sinaloa." Bol. Tec. Dpto. Est. Labs. Sría. Marina. 1(1):21-43.

Mpez-Gutiérrez, H., 1966. "Estudio de acceso a la Bahía de Topolobampo, Sin." Bol. Tec. Dpto. Est. Labs. S.M. 2(2-3):3-3 1.

López Ruelas, J., 1985. "Hidrología del sistema lagunar de Topolobampo, Sinaloa." TESIS U.A.B.C. 66 pp.

Mee, L.D., 1977. " Coastal Lagoons." In: *Chemical Oceanography*. Riley y Chester Eds. 7,441-490.

Morales, R.A., and H. Ramírez, 1996. “The simulation of dispersion by tidal eddies in a coastal waters.” En: Computational methods in water resources XI Vol. 2. Computational Methods in surface flow and Transport problem. (Eds. A. Aldama, J. Aparicio, C.A. Brebbia, W.G. Gray, I. Herrera y G.F. Pinder). Computational Mechanics Publications. p. 347-354.

Morell, J.M. and J.E. Corredor, 1993. " Sediment Nitrogen Trapping in a Mangrove Lagoon." Estuarine, Coastal and Shelf **Science**.37, 203-212.

Morris y Riley, 1963. Anal. Chim. Acta. 29:272

Muhech, H. E., 1990. " Distribución granulométrica y contenido de carbón orgánico en sedimentos de la bahías de Ohuira, Topolobampo y Santa María, Sinaloa, México." SEC. MAR. DIGONAV/EIOPC.

Muhech, H.E. y J. Orozco, 1994. “Coliformes totales y fecales en sedimentos del sistema lagunar Topolobampo y su relación con la distribución sedimentaria y el carbono orgánico.” Res. V Simp. AIMAC. 24-27 Abril de 1994. La Paz, B.C.S.

Murphy y Riley, 1962. Anal. Chim. Acta. 27:31

Nixon, S.W., 1980. “Between coastal marshes and coastal waters -a review of twenty years of speculation and research on the role of salt marshes in estuarine productivity and water chemistry.” P. 437-525. In: Hamilton P. and K.B. MacDonald (Eds). Estuarine and wetland process with emphasis on modeling. Marine Science II, Plenum Press.

Nixon, S.W., 1982. “Nutrient dynamics, primary production and fisheries yields in Lagoons.” Oceanologia Acta, Proceedings International Symposium on Coastal Lagoons. SCOR/IABO/UNESCO. Bordeaux. 8-14 Sept., 1981. P. 357-371.

Núñez-Moreno, A., 1991. "Variación temporal del zooplancton en el sistema lagunar de Sta. Maria-Topolobampo-Ohuira, Sinaloa, México. S.M. EIOT. 22 p.

Obeso Nieblas, M., 1986." Propagación de la constituyente M_2 de la marea en la Bahía de La Paz, B.C.S., México, mediante un modelo hidrodinámico numérico." TESIS DE MAESTRIA. CICIMAR-IPN. 123 p.

Obeso Nieblas, M., M.A. Alatorre Mendieta y A. Jiménez I., 1996. " Modelación de la marea en Bahía Concepción, B.C.S., México." *Oceánides*, II (1):1-8.

Ochoa-Maccheto, L.M., 1987. "Estudio de la evaluación de la calidad del agua de la bahía de Guaymas, Sonora." Tesis de Maestría. Instituto de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Guaymas, México.

Olivares Beltrán, G., 1969. " Acceso a la Bahía de Topolobampo, Sinaloa, México." En: *Lagunas Costeras, Un Simposio.* Mem. Simp. Intem. Lagunas Costeras. UNAM-UNESCO pp. 407-420.

Ortega-Salas, A.A. y RR Stephenson, 1976. "Some aspects of the hydrography and hydrochemistry of the Yavaros and Huizache-Caimanero Lagoon Complexes in North-West Mexico. Informe Centro de Ciencias del Mar y Limnología. U.N.A.M.

Ortíz-Gallarza, S.M., G. de la Lanza y M.R García-Hernández, 1991. "Hidrología vs contaminación en la Bahía de Guaymas al Noroeste de México". IV Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ciencias del Mar. Coquimbo, Chile. Memoria de Resúmenes.

Paéz-Osuna, F., P.H. Zazueta y F.G. Izaguirre, 1991. "Trace metals in bivalves from Navachiste Lagoon, México." *Marine Bulletin*. 22(6):305-307.

Palazón-Fernández, J.L. y E. Penoth, 1994. " Condiciones hidroquímicas de la Laguna de Raya, Isla Margarita, Venezuela, durante el periodo comprendido entre Febrero de 1986 y Febrero de 1987." Bol. Inst. Oceanogr. Venezuela, Univ. Oriente. 33, 5-17.

Pedroza, M.H., 1977. "Estudio de postlarvas de camarón (*P. spp.*) en el área marina de Topolobampo, Sinaloa, México." Mem. Simp. sobre Din. Pobl. de camarones. Tomo III.

Phleger, F.B., 1969. " Some Features of Coastal Lagoons." *En: Lagunas Costeras, Un Simposio.* Mem. Simp. Intern. Lagunas Costeras. UNAM-UNESCO pp. 5-26.

Phleger, F.A. y A. Ayala Castañares, 1969. " Marine Geology of Topolobampo lagoons, Sinaloa, México." *En : Lagunas Costeras, Un Simposio.* Mem. Simp. Intem. Lagunas Costeras. UNAM-UNESCO pp. 101-136.

Postma, H., 1969. "Chemistry of coastal lagoons." *En: Lagunas Costeras. Un Simposio.* Simp. Internl. de Lagunas Costeras. UNAM-UNESCO. 241-430.

Reyes, G.J. 1981. "Estudio preliminar sobre la producción primaria y la dinámica de los nutrientes en el estero El Verde, Sinaloa, México." Tesis de Maestría. UACPP-CCH, UNAM. 32 p.

Rhoads, D. C., K. Tenore and M. Browne, 1983. " The Role of Resuspended Bottom mud in nutrient Cycles of Shallow Embayments." *Estuarine Research.* 563-579.

Riley, 1953. *Anal. Chim. Acta.* 9:575.

Rojas-Trejo, S.P., 1984. "Ciclo anual del fitoplacton de la Bahía de Mazatlán, Sinaloa, México. (1980)." Tesis. Univ. Autom. Del Edo. de Morelos. Escuela de Biología. 54 p.

Salgado, M.G. y J. Juárez, 1986. "Helminetos de la "lisa" *Mugil cephalus* en Topolobampo, Sinaloa." Res. I Simp. Nal. Acuic. p 34.

Sánchez-Santillán, N, y G. De la Lanza-Espino, 1994. "Aspectos climáticos en una laguna costera (ejemplo de caso: Laguna de Huizache-Caimanero)." En: Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano. De la Lanza y Cáceres Eds. p.199-219.

S.A.RH., 1971. "Informe sobre el estudio de la influencia de los pesticidas sobre las condiciones ecológicas de la Bahía de Topolobampo. EI-71-52/22-14.

Sánchez-Bolaños, T., J. Juárez y M.T. Hernández, 1988. "Contribución al conocimiento de la fauna carcinológica (Decápoda-Brachyura) en las bahías de Topolobampo, Sinaloa, México." Sría. de Marina. EIOT. 35 p.

SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, 1989. "Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente." Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas. p 185-216. México, D.F.

SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, 1990. "Gaceta ecológica." Vol. II 124 p.

Schoellhamer, D. H., 1995. " Sediment Resuspension Mechanisms in Old Tampa Bay, Florida. '1 Estuarine, Coastal and Shelf Science. 40, 603-620.

Secretaría de Marina, 1980. " Estudio Geográfico de la región de Topolobampo, Sinaloa." SEC. MAR/DIGONAV.

Sigala Morales, R, 1990, " Observaciones de corrientes superficiales obtenidas mediante el método Euleriano y distribución de temperatura y salinidad en el sistema lagunar de Topolobampo, Sinaloa." SEC. MAR. DIGONAV/EIOPC. 60 pp.

Smith, S.V., 1984. "Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment." Limnol. Oceanogr. 29:1149-1 160.

Sokal, R.R. and F. J. Rohlf, 1981. "Biometry" Second Edition. W.H. FREEMAN CAMPANY. N.Y.

Solórzano, 1969. Limnol. Oceanogr. 14:799

Soto Balderas, M. G. y S. Alvarez Borrego, 1991. "Nutrientes inorgánicos en los canales de inundación de las marismas de una laguna costera del noroeste de Baja California." Ciencias Marinas. Vol. 17. No. 3.

Strickland, J.D. and T.R. Parsons, 1972. " A practical handbook of the seawater analysis." Fisheries Research Board of Canada. Bull. 167. Second Edition.

Trueba Coronel, S., 1984. Hidráulica. C.E.C.S.A. México. p. 50.

Twilley, R.R, R H. Chen and T. Hargis, 1992. "Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems." Water, air, and soil pollution. 64: 265-288. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

U.N.A.M., 1989. "Tablas de predicción de mareas" Puertos de Océano Pacífico. Instituto de Geofísica. P. 243.

Vazquez Correa, P., 1996. "Bacterias solubilizadoras de fosfatos inorgánicos asociadas a la tizosfera de los mangles: *Avicennia germinans* (L.) y *Laguncularia racemosa* (L.) Gaerth." U.A.B.C.S. TESIS. 44 p.

Villalba Loera, F.A., 1980. " Aplicación de un modelo numérico unidimensional de dispersión en el estero de Punta Banda." Escuela Superior de Ciencias Marinas. U.A.B.C. TESIS. 12 1 p.

Verdi.Lara, A., J.C. Faustch, J. Luna, J. Juárez y H. Wogau, 1982. "Estudio preliminar de las condiciones hidrológicas de la Bahía Topolobampo, Sinaloa." S.M. EIOT.OI-82.40 p.

Waldichuk, R, 1977. "La contaminación mundial del mar. Una recapitulación." FAO/UNESCO. Bol. Nº 2. 110 p.

Weihaupt, J.G., 1984. "Exploración de los océanos. Introducción a la oceanografía." Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. p. 234 y 283.

Wright, F.F., 1974. " Estuarine Oceanography." American Geological Institute. CEGS Programs Publication Number 18.McGraw Hill Book Company.

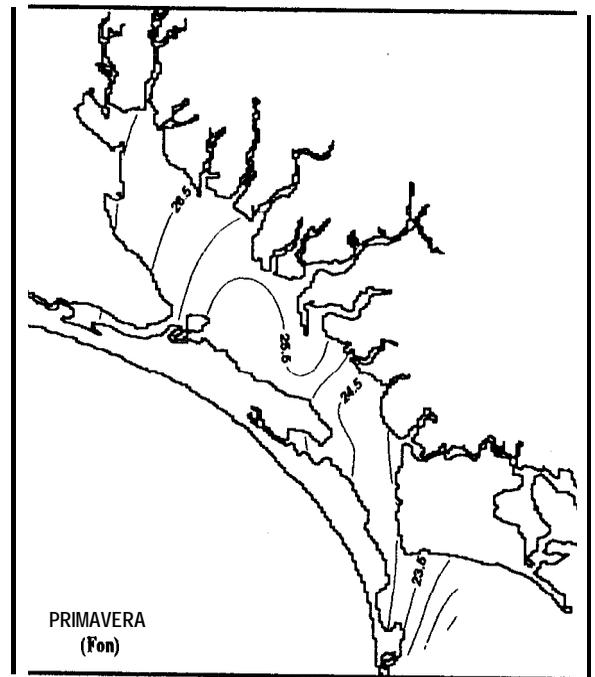
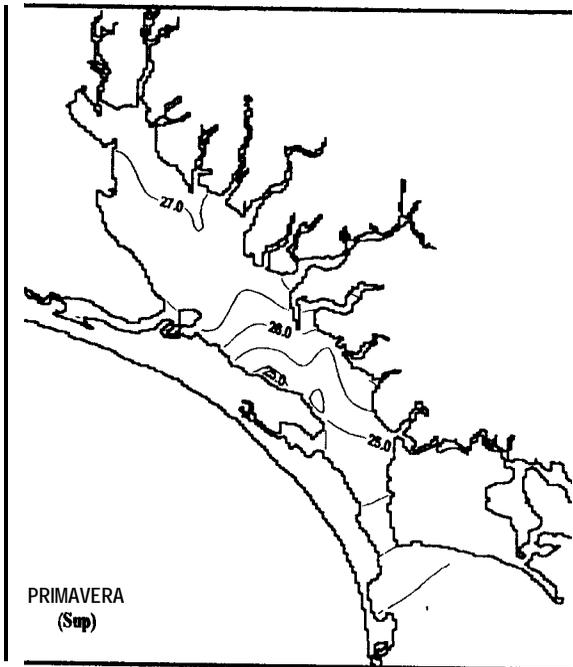
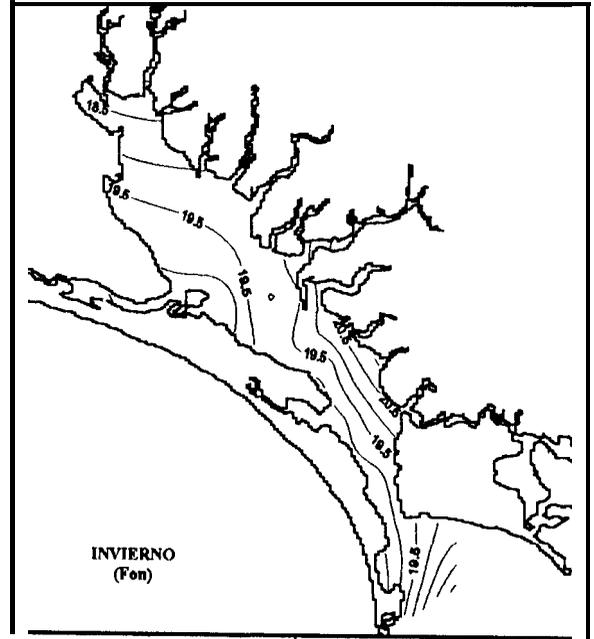
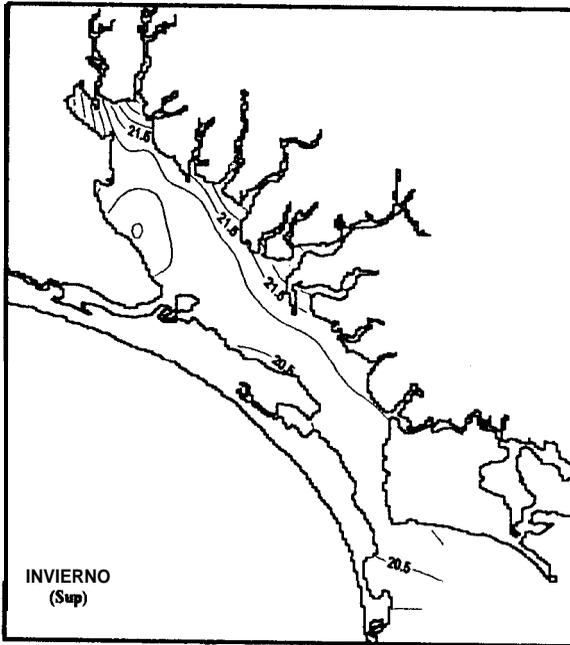
Yáñez Arancibia, A., 1986 " Ecología de la zona costera. Análisis de siete tópicos ". A.G.T. Editor. México, D.F. pp. 41-47.

Zaytzev, O.V., V.V. Anikiev and A.V. Voitko, 1992. "Numerical modelling of nonconservative pollutant transport in the coastal zone." Oceanic and Anthropogenic Controls of Life in the Pacific Ocean. V.I. Ilyichev and V.V. Anikiev (Eds.), 333-345. Kluwer Academic Publisher.

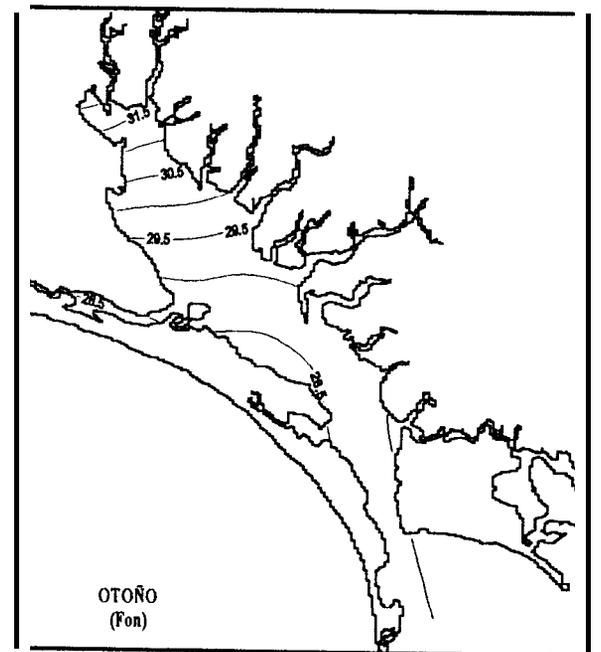
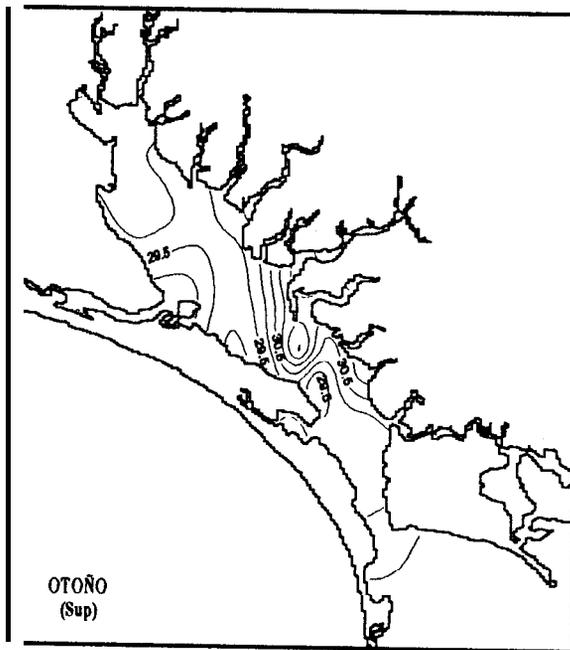
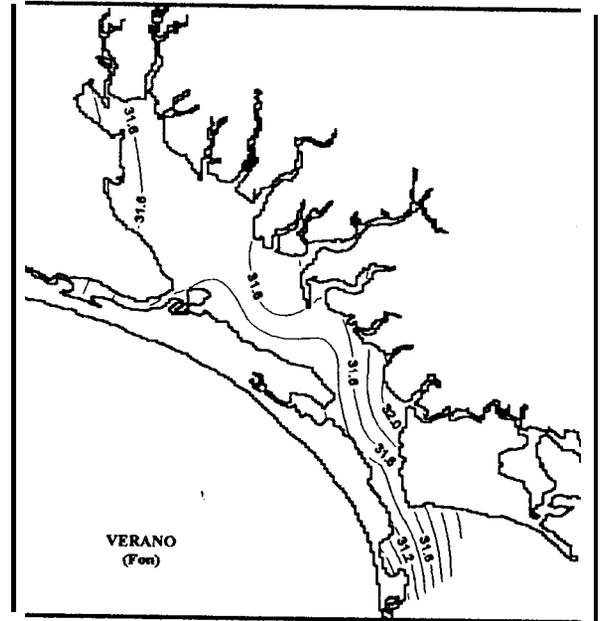
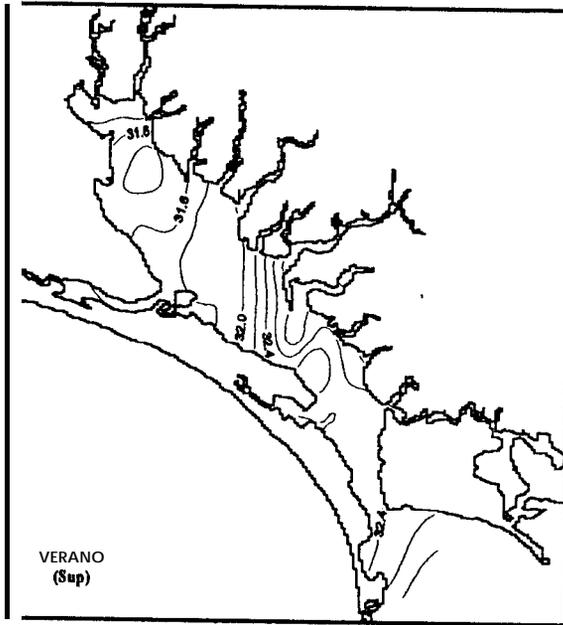
ANEXOS

Anexo A:

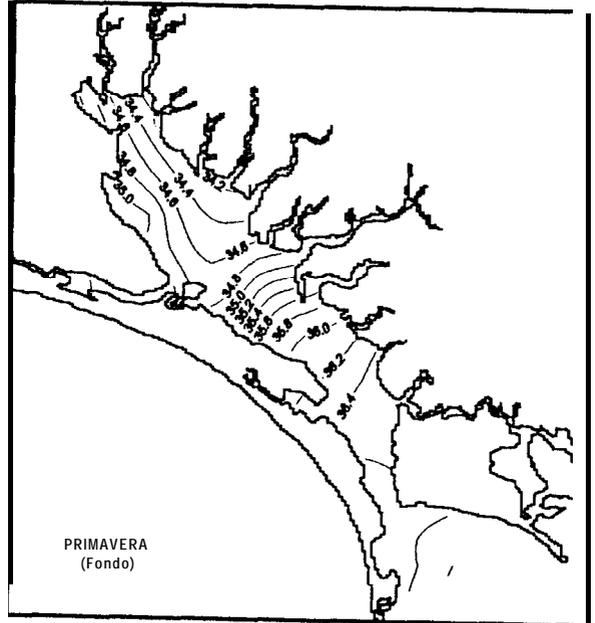
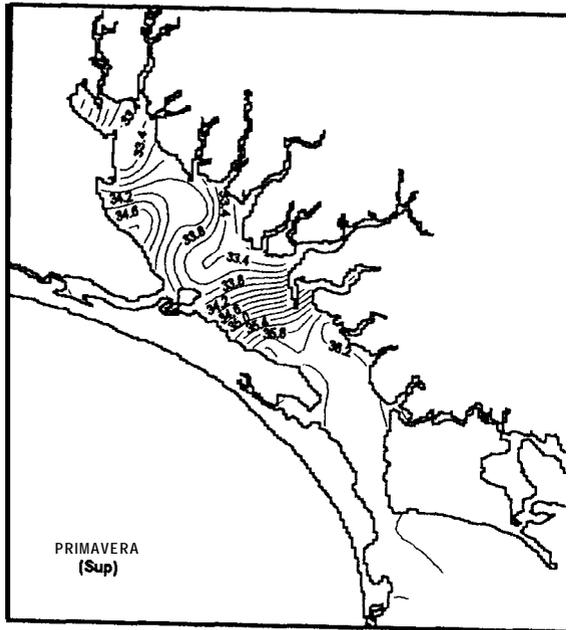
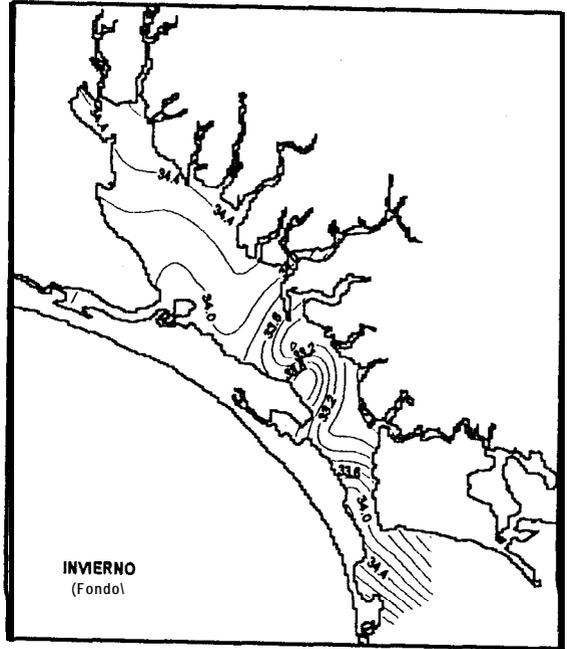
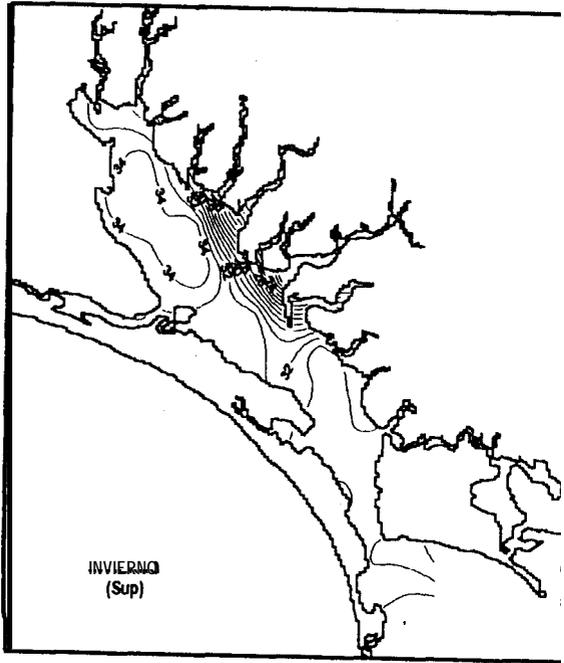
Laguna Santa María



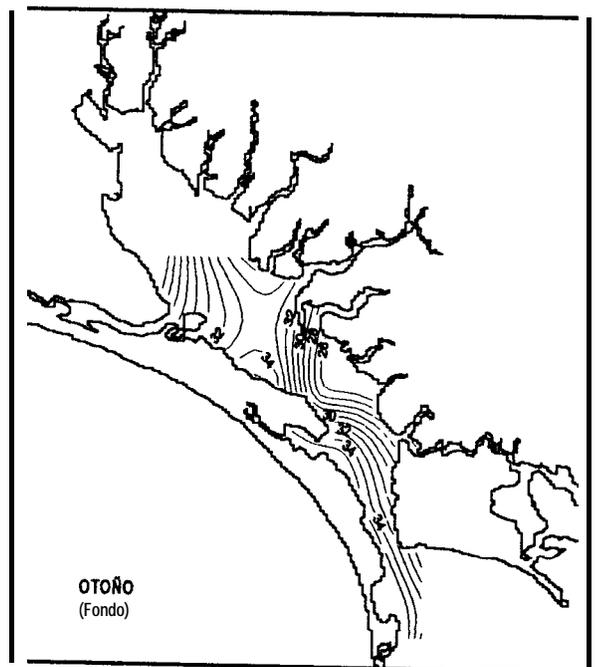
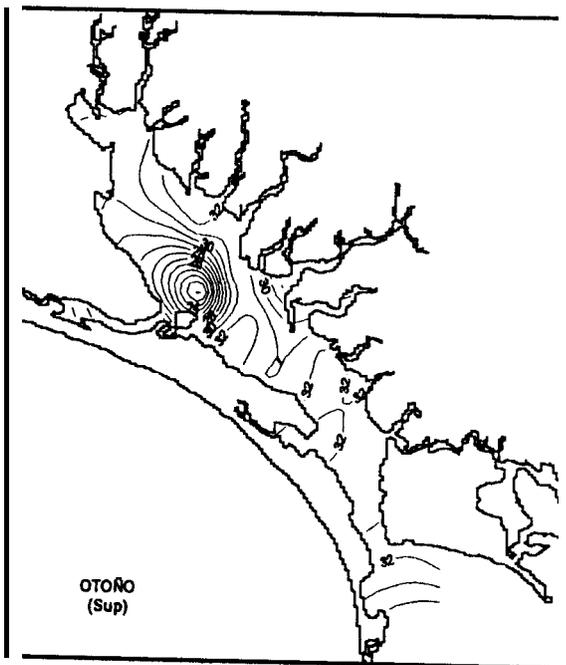
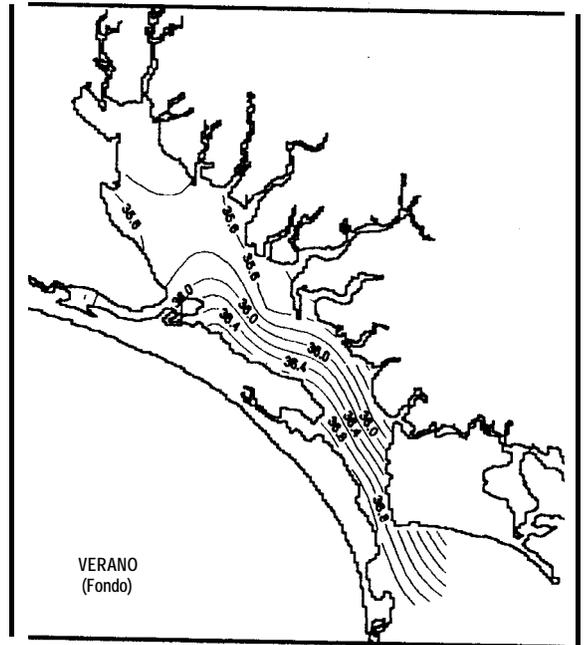
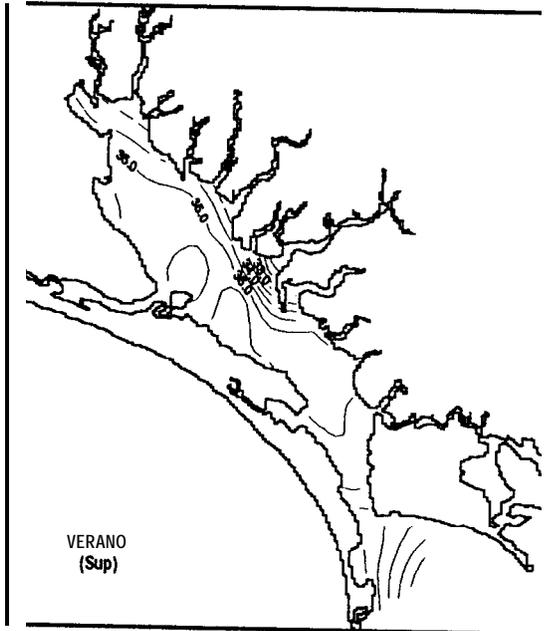
Distribución espacial de temperatura (°C) en la Laguna de Santa María durante Invierno y Primavera de 1995.



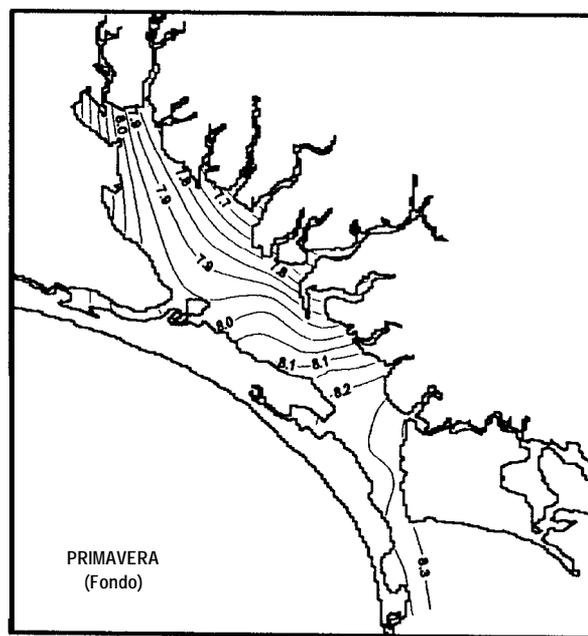
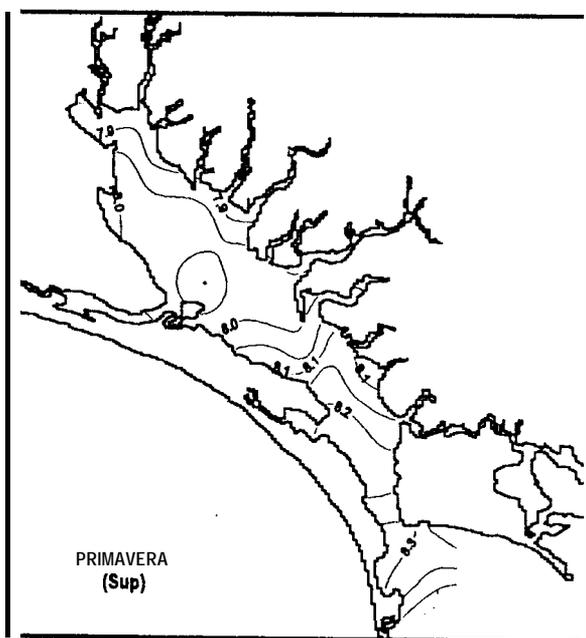
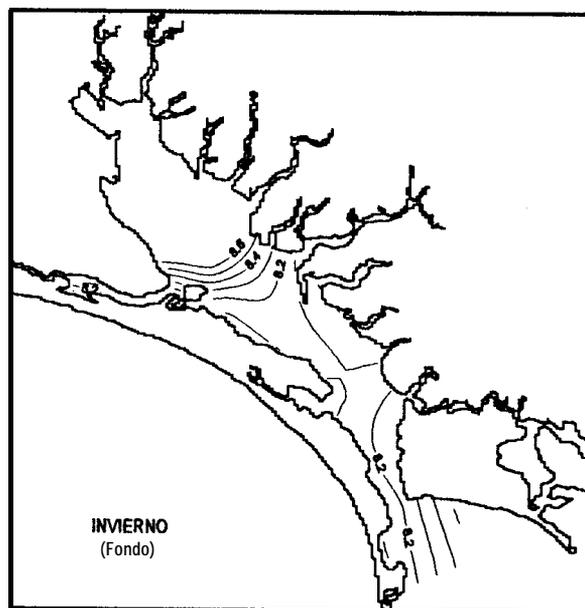
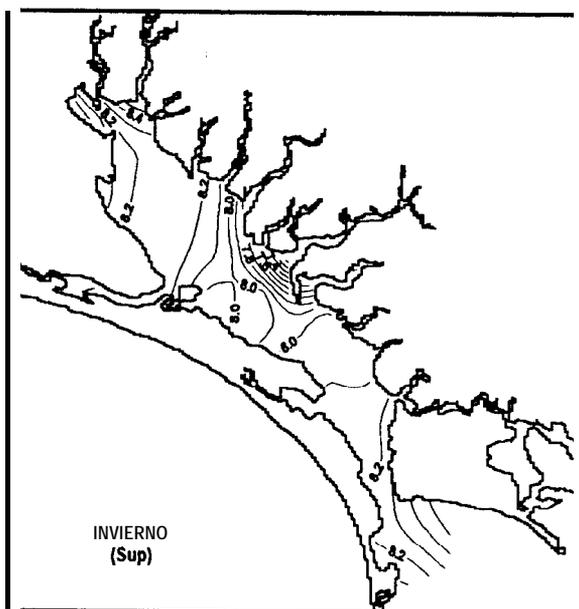
Distribución espacial de temperatura (°C) en la Laguna de Santa María durante las épocas de verano y otoño de 1995.



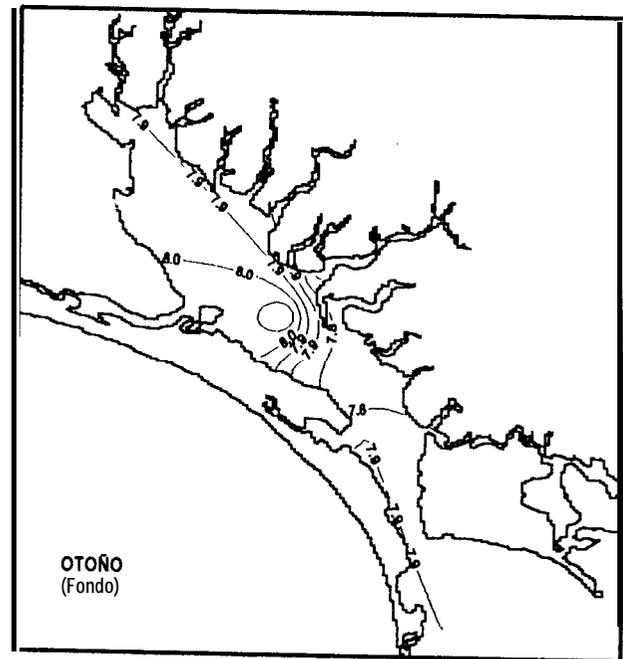
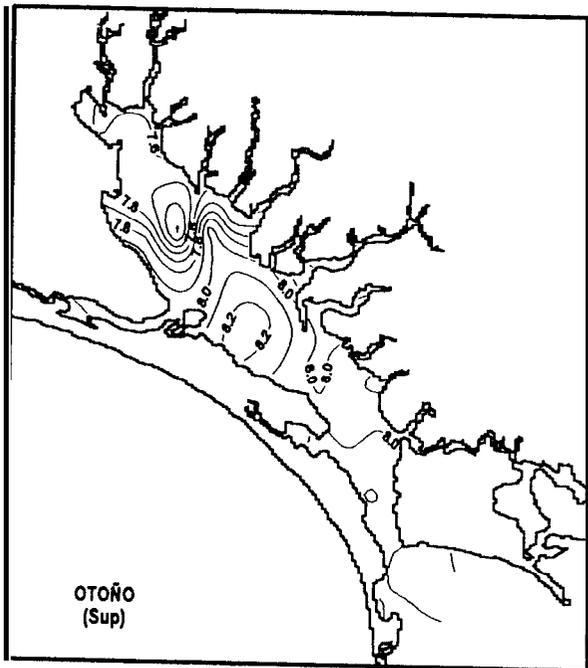
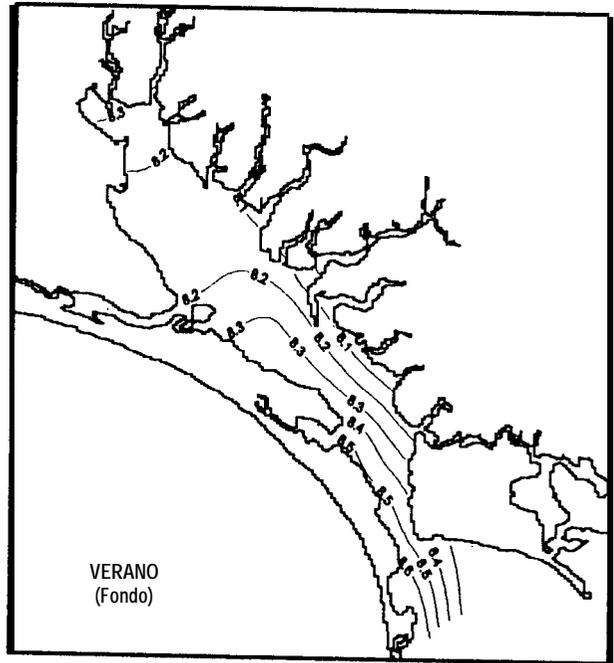
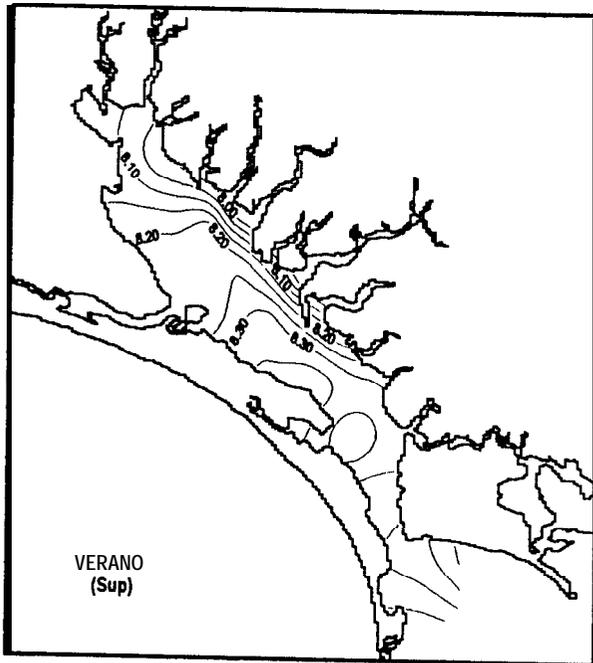
Distribución de salinidad (o/oo) en la Laguna de Santa María durante invierno y primavera de 1595.



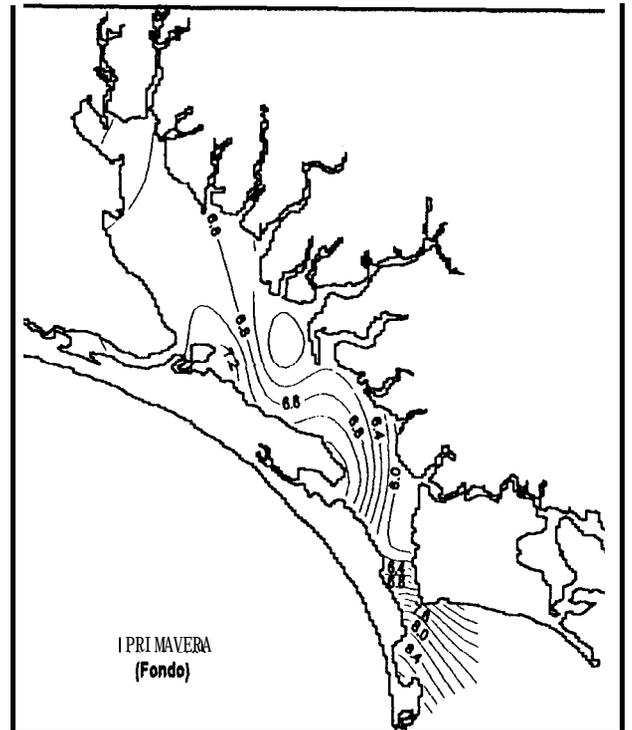
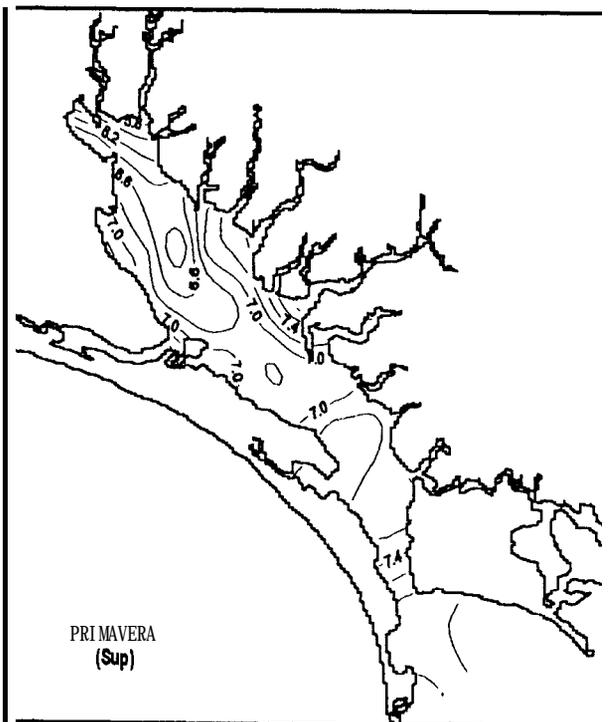
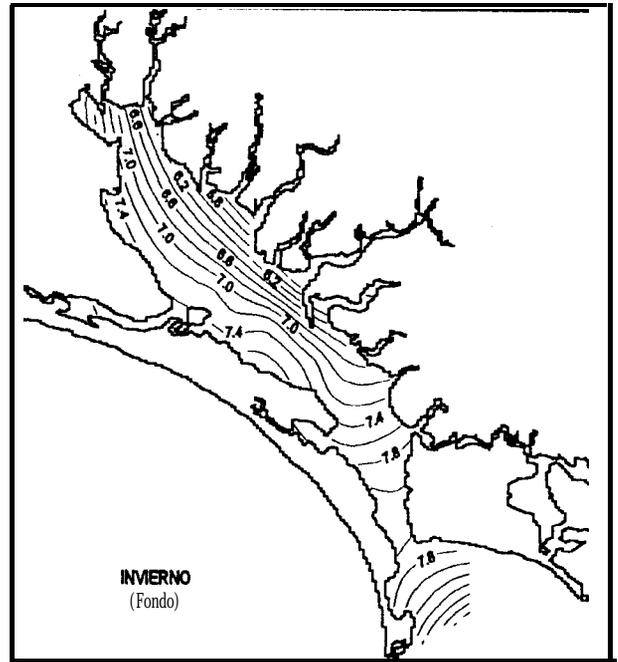
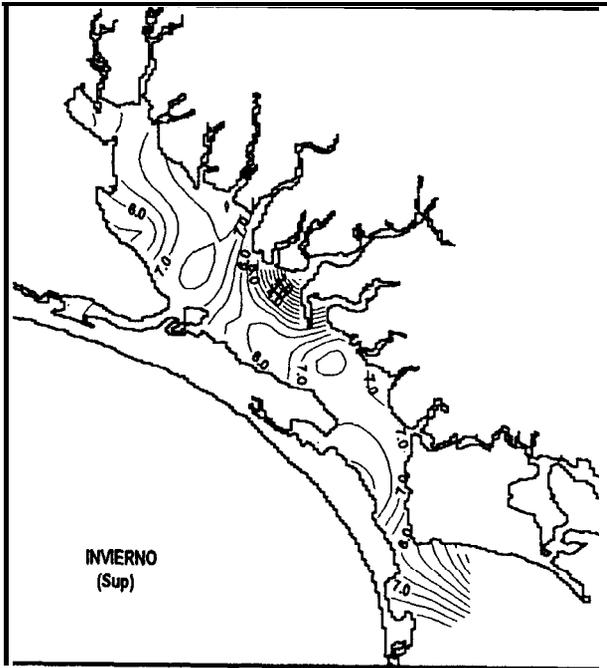
Distribución espacial de salinidad (o/oo) en la Laguna de Santa María durante verano y otoño de 1995.



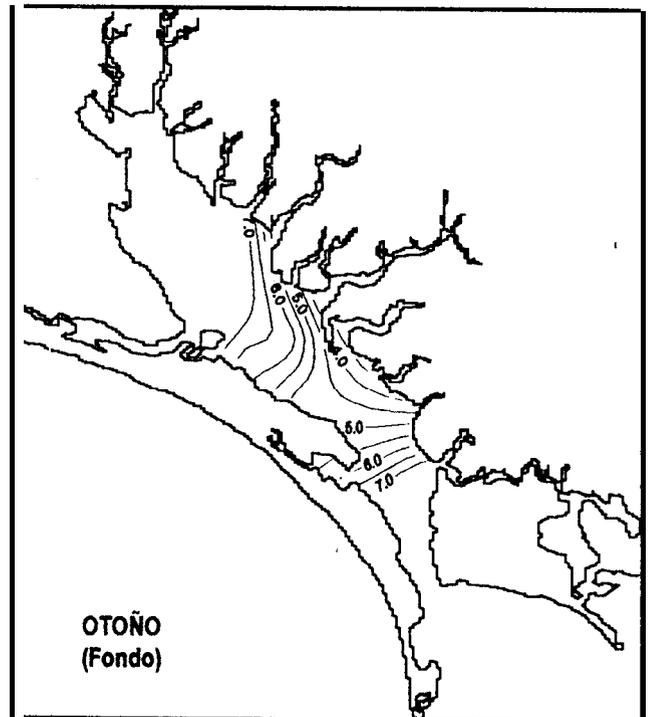
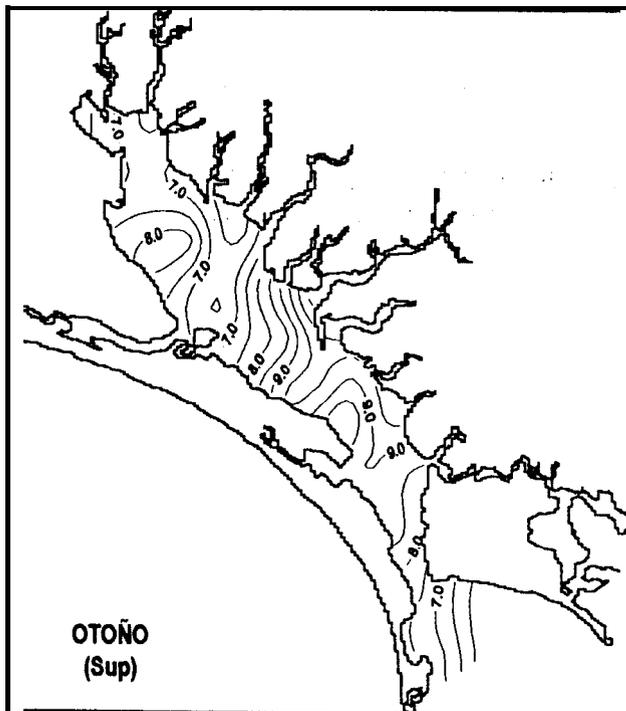
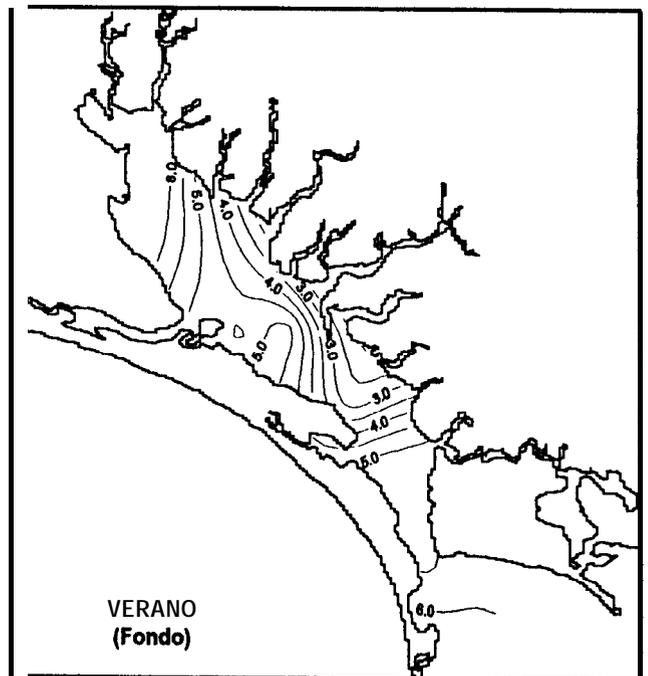
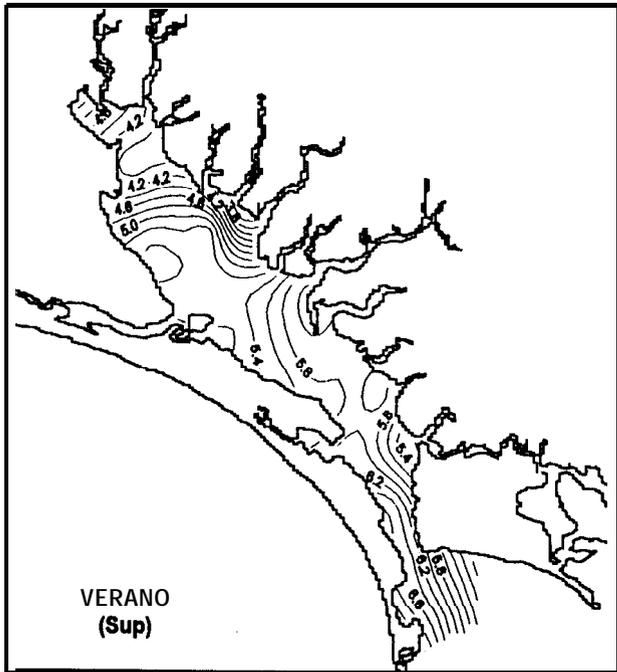
Distribución espacial de pH en la Laguna de Santa María durante invierno y primavera de 1995.



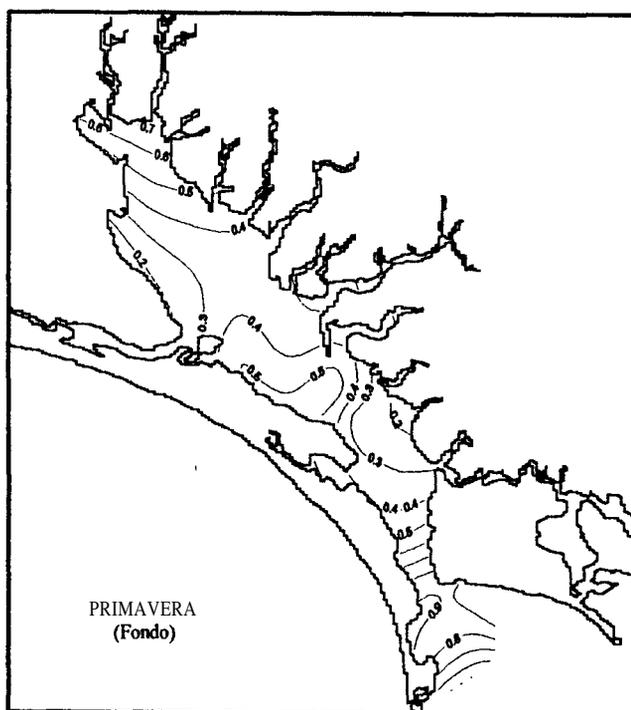
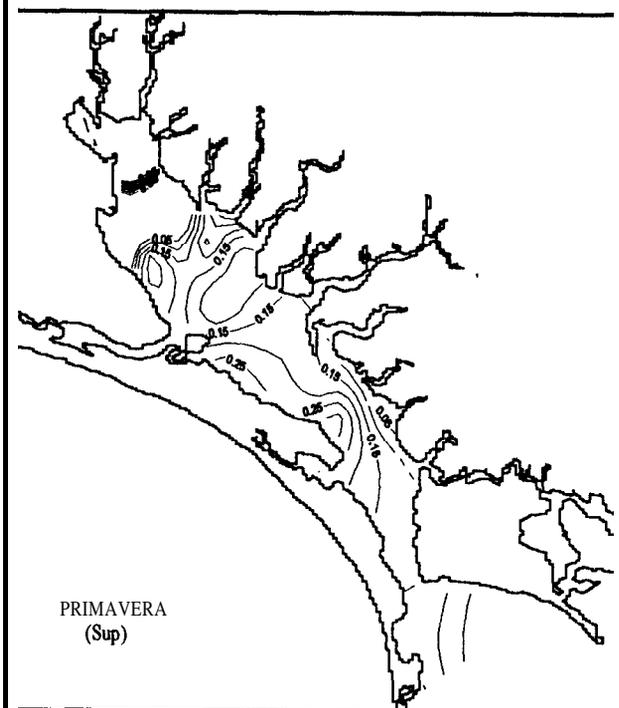
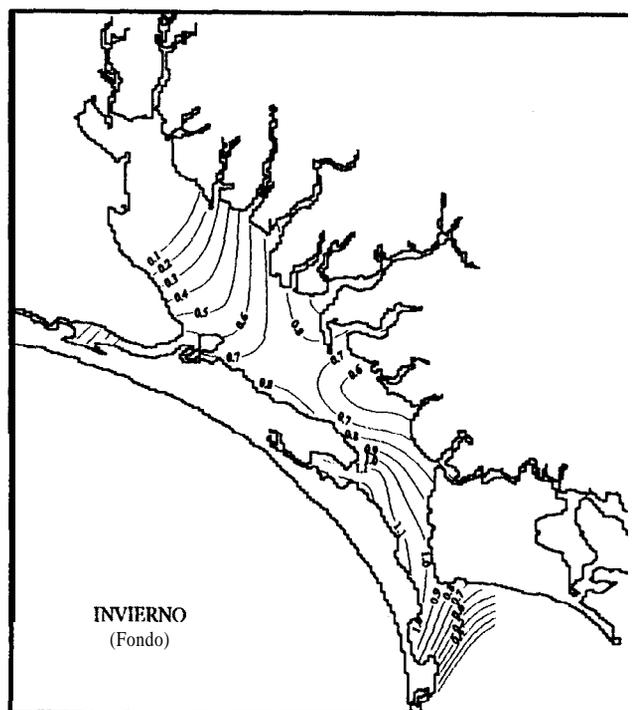
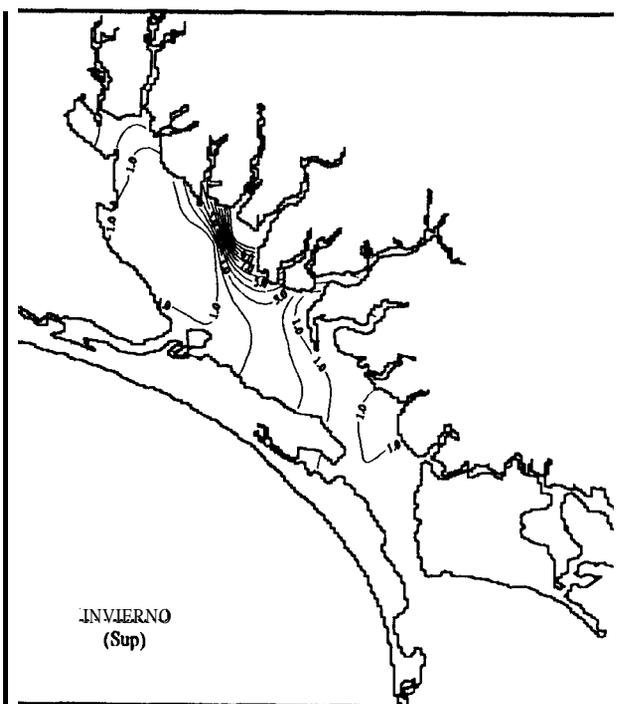
Distribución espacial de pH en la Laguna de Santa María durante verano y otoño de 1995.



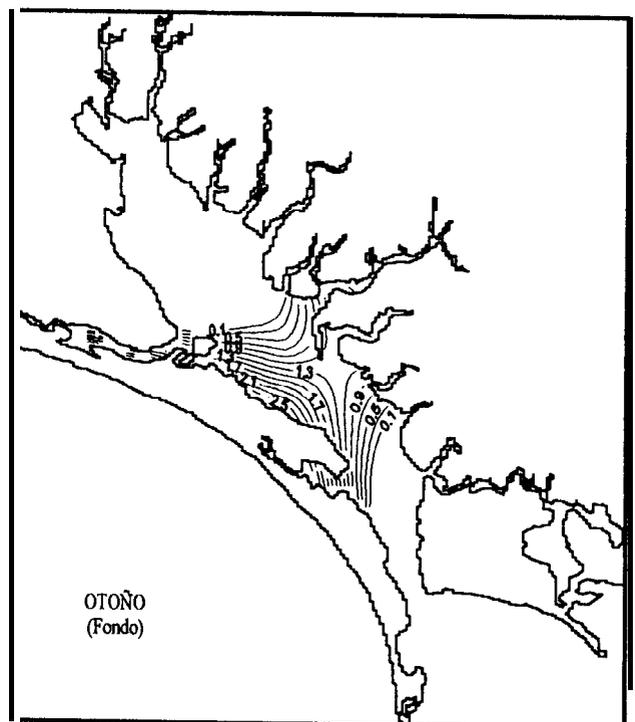
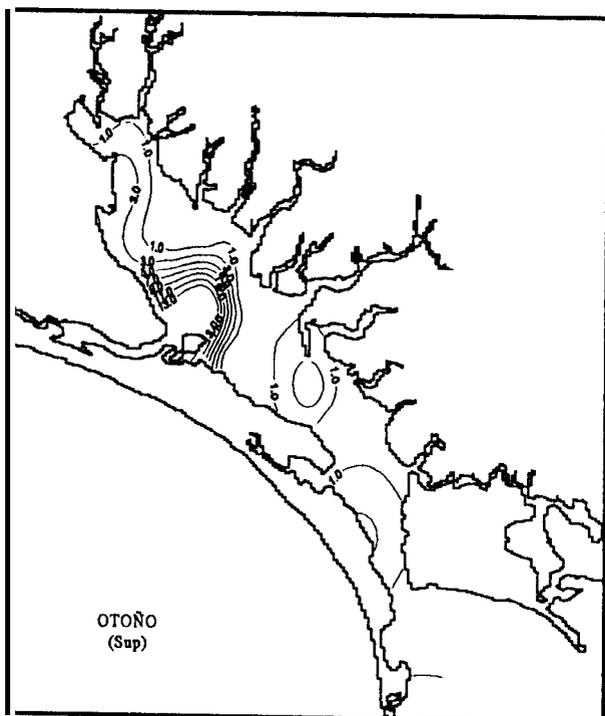
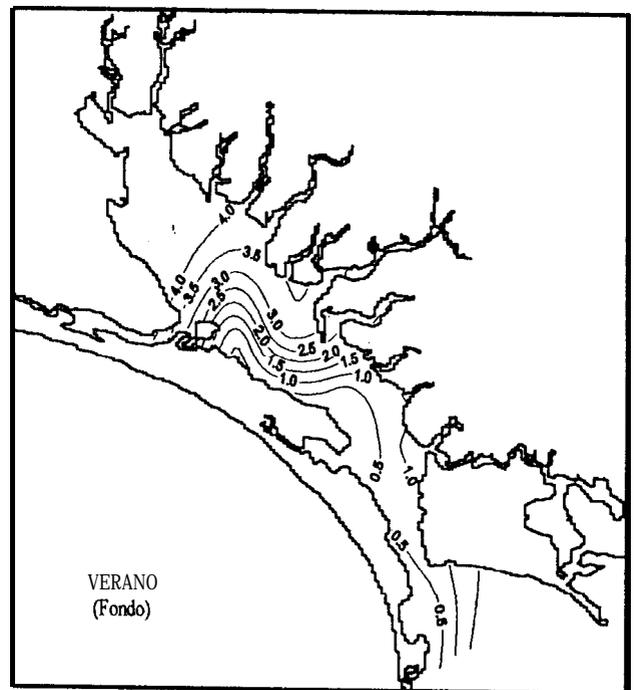
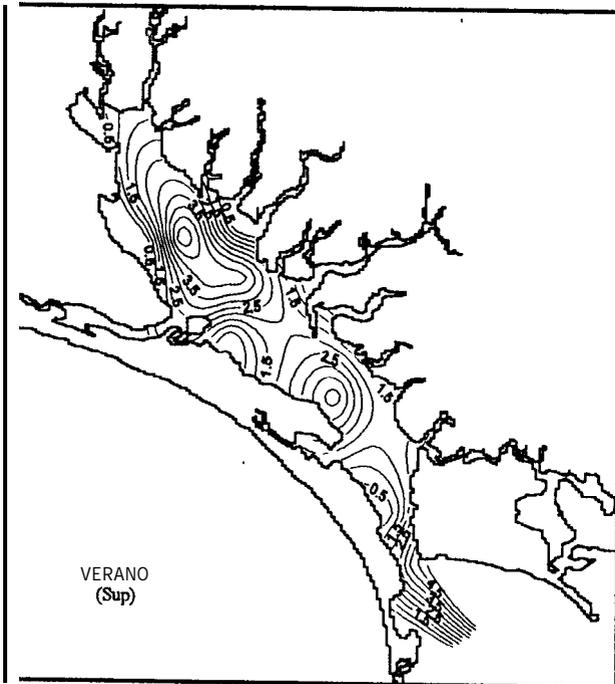
Distribución espacial de oxígeno disuelto (mg/l) en la Laguna Santa María durante las épocas de invierno y primavera de 1995.



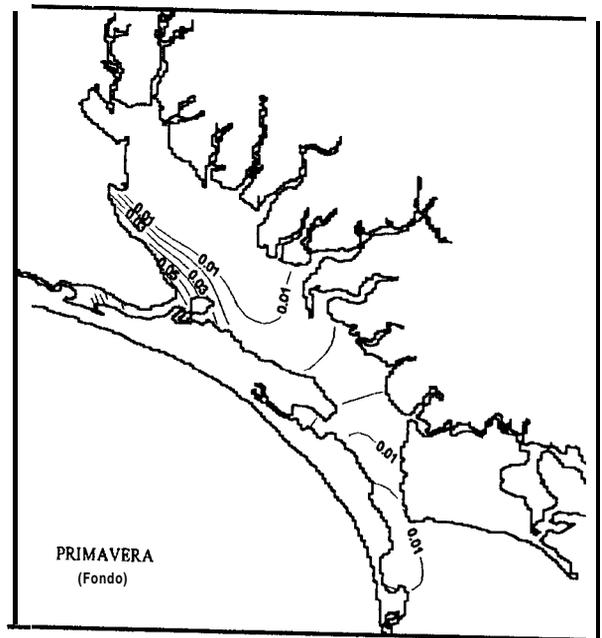
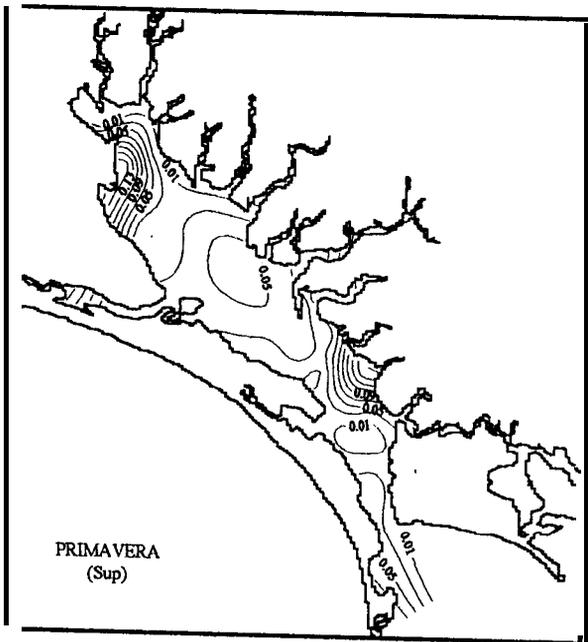
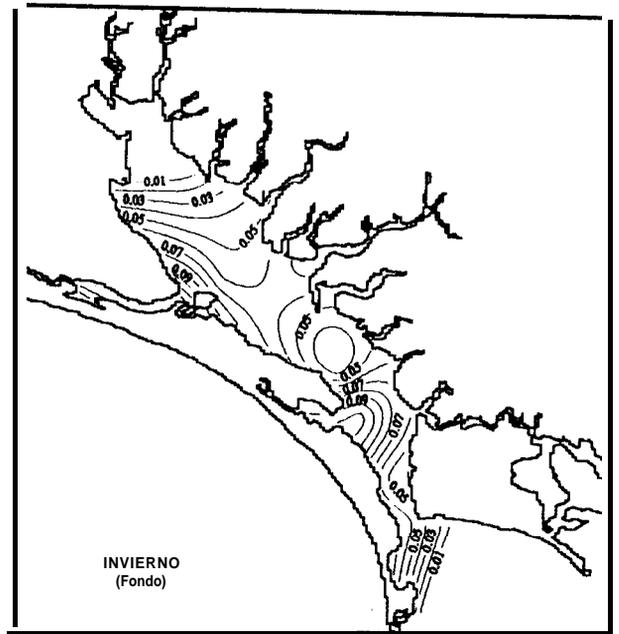
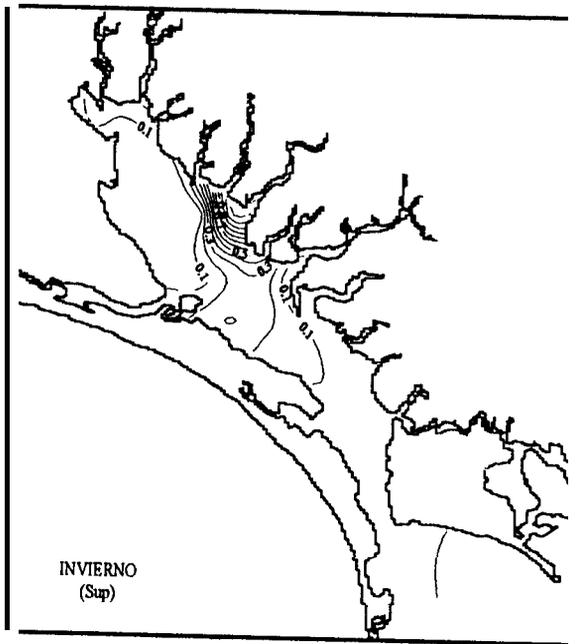
Distribución espacial de oxígeno disuelto (mg/l) en la Laguna de Santa María durante verano y otoño de 1995.



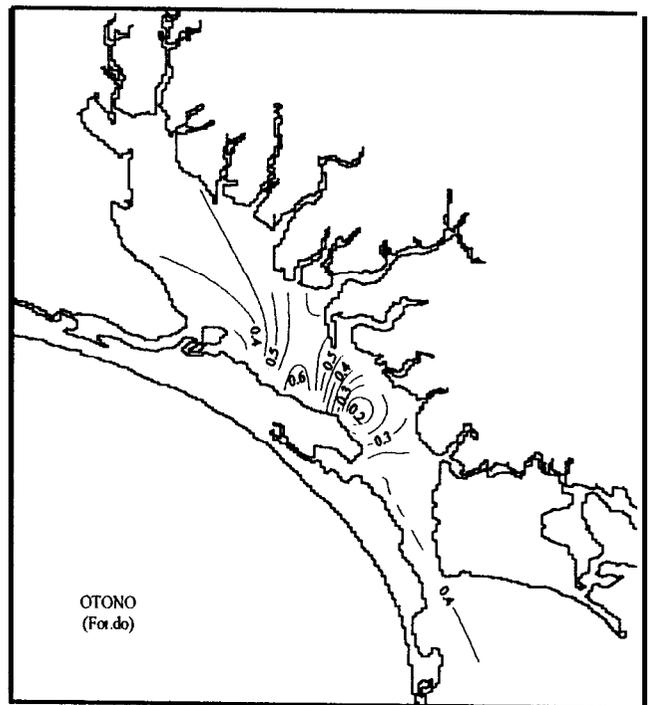
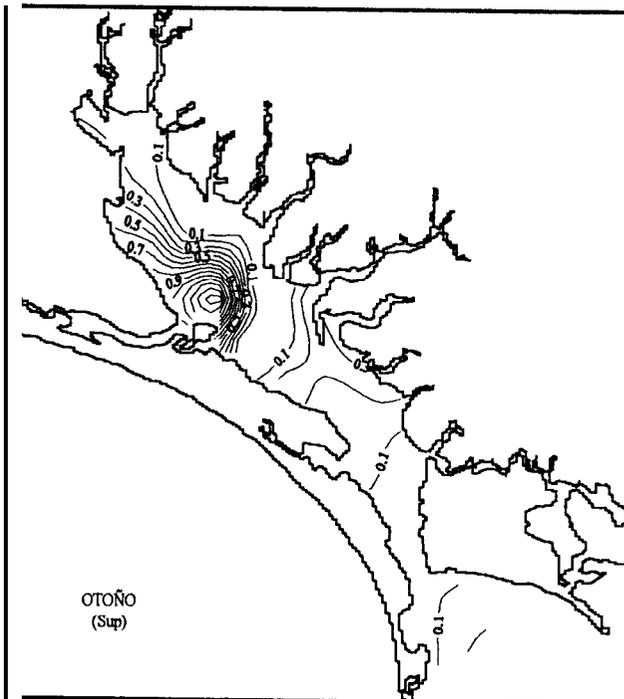
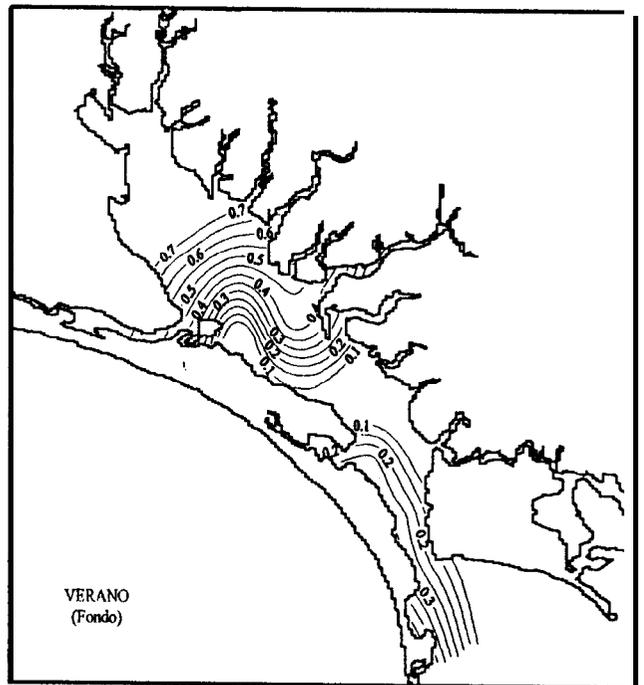
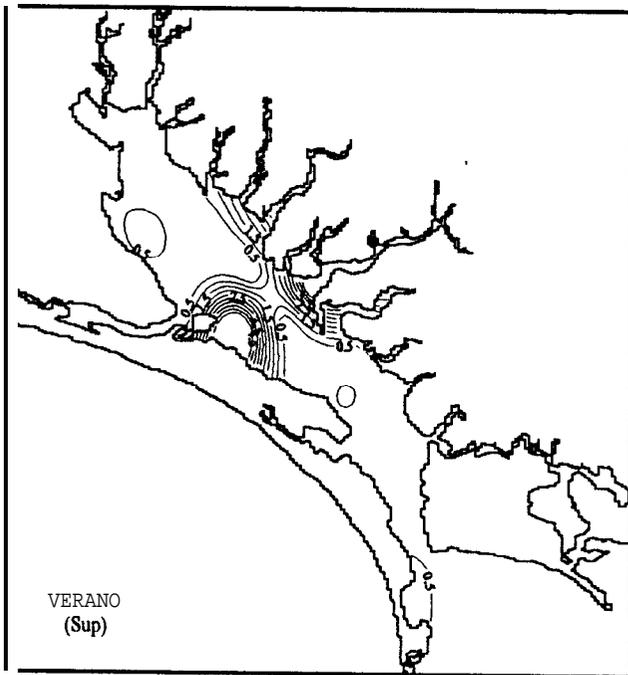
Distribución espacial de nitratos (μM) en la Laguna de Santa María durante las épocas de invierno y primavera de 1995.



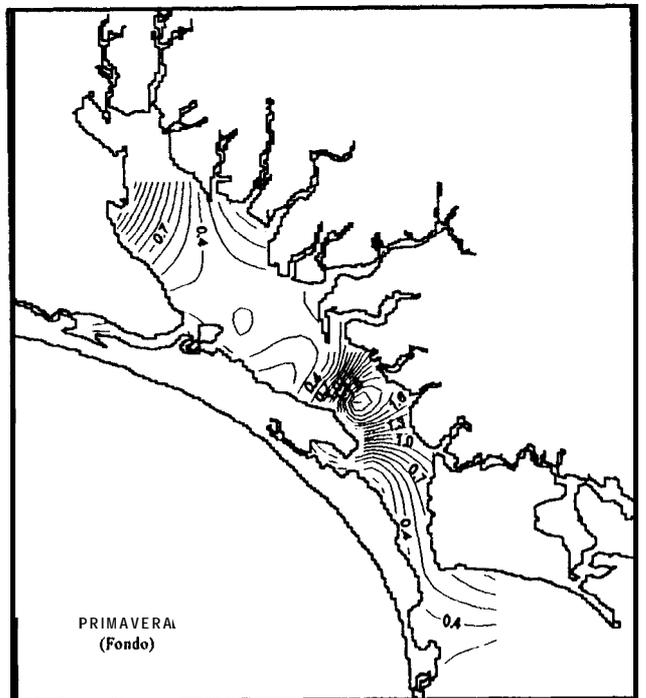
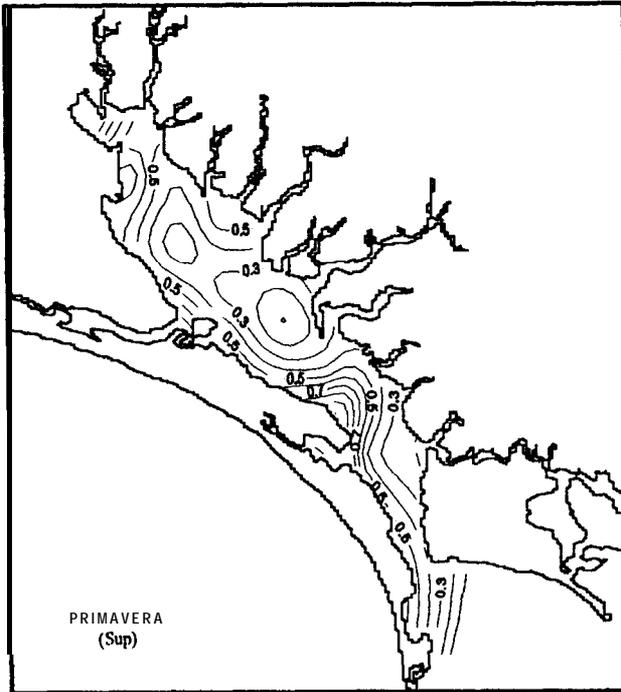
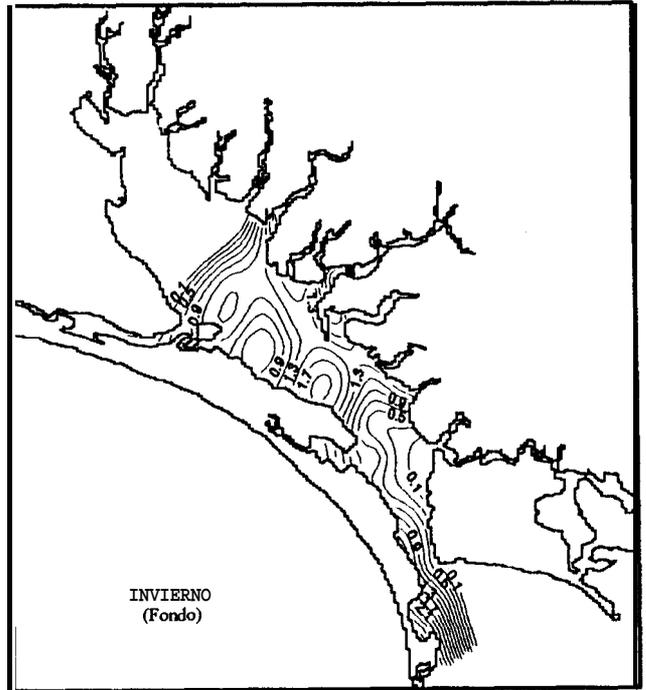
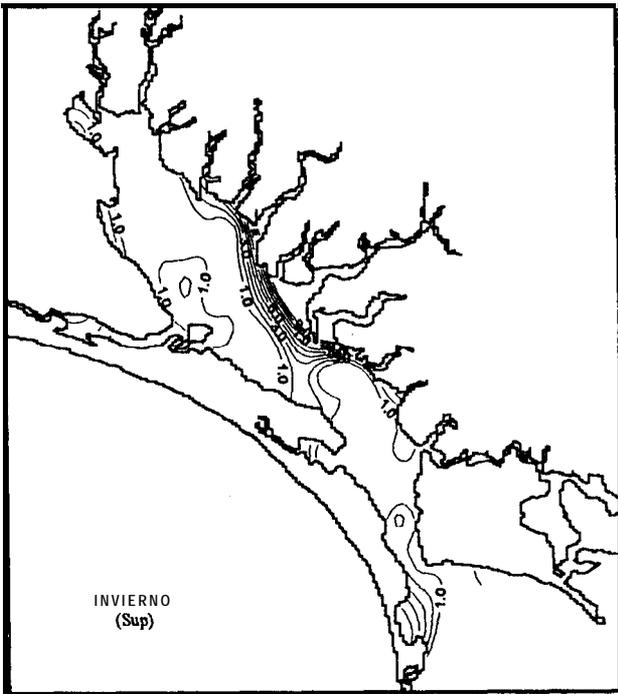
Distribución espacial de nitratos (μM) en la Laguna de Santa María durante las épocas de verano y otoño de 1995.



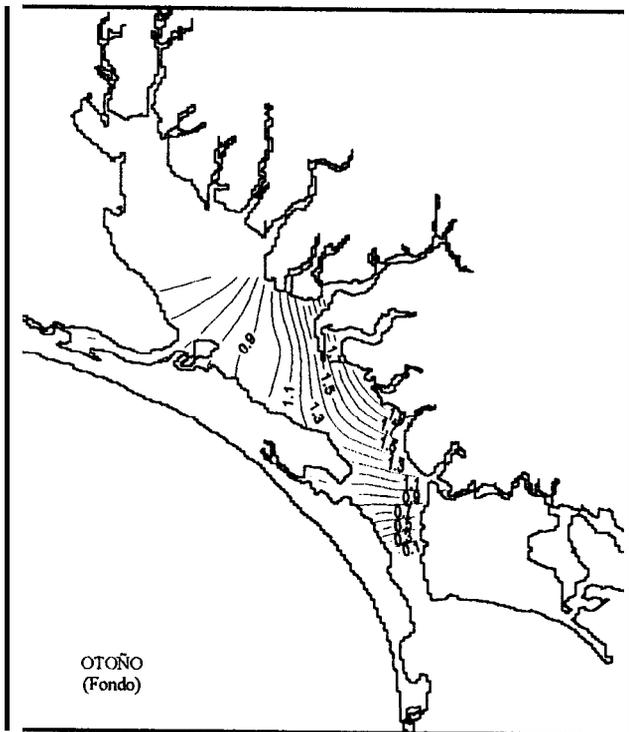
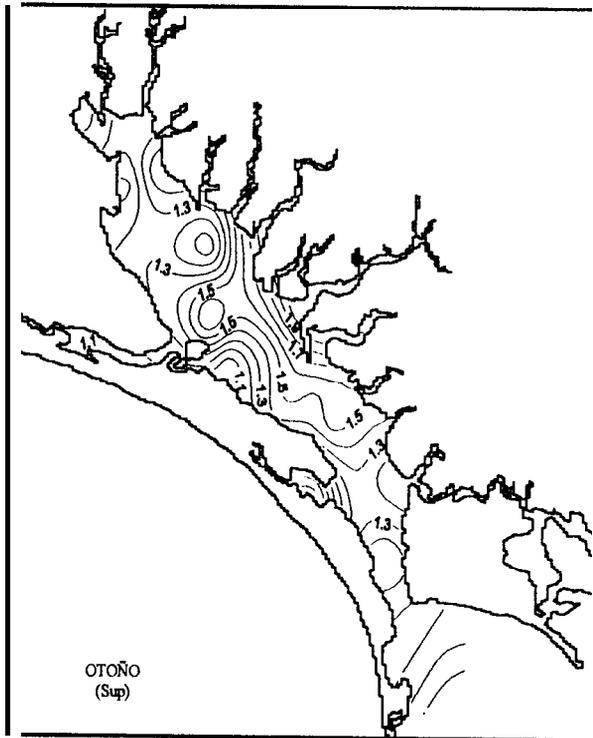
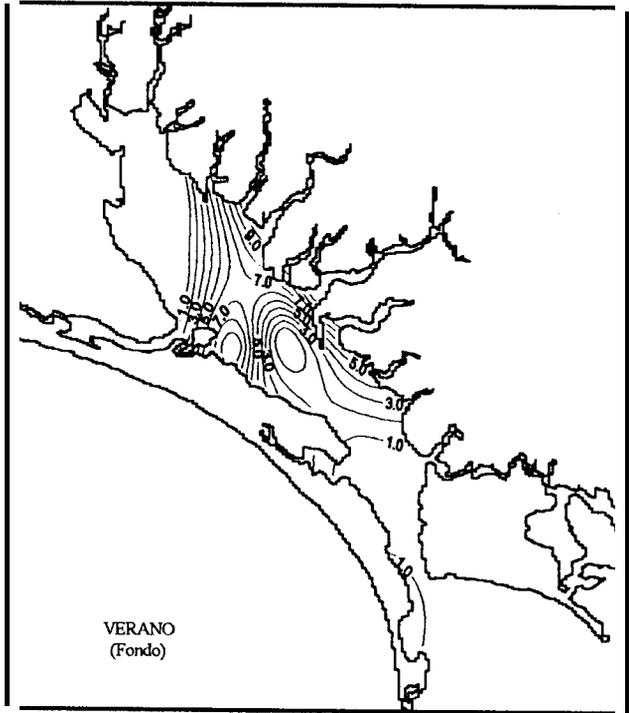
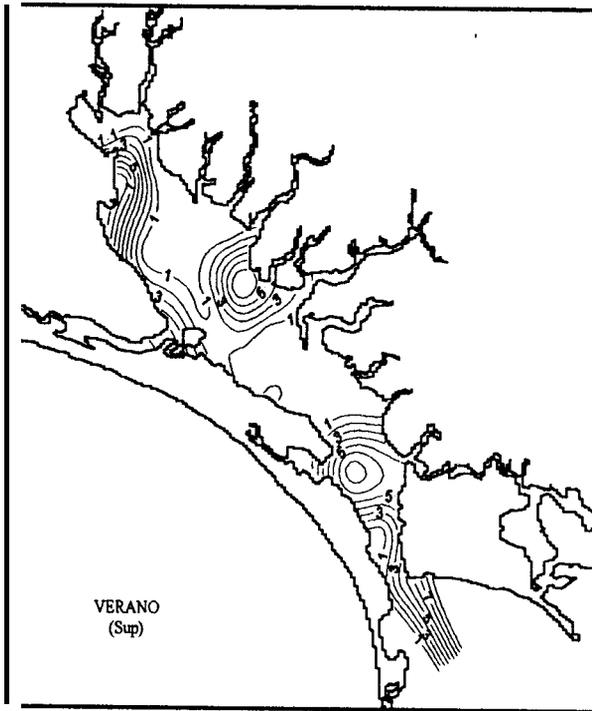
Distribución espacial de nitritos (μM) en la Laguna de Santa María durante invierno y primavera de 1995.



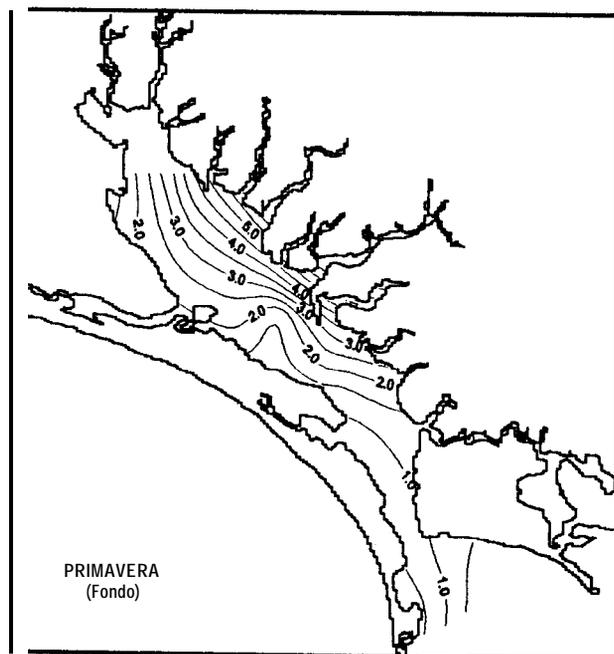
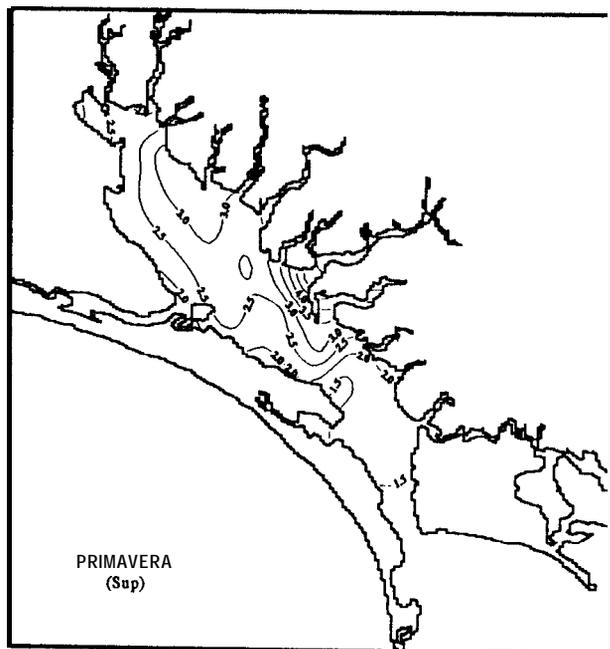
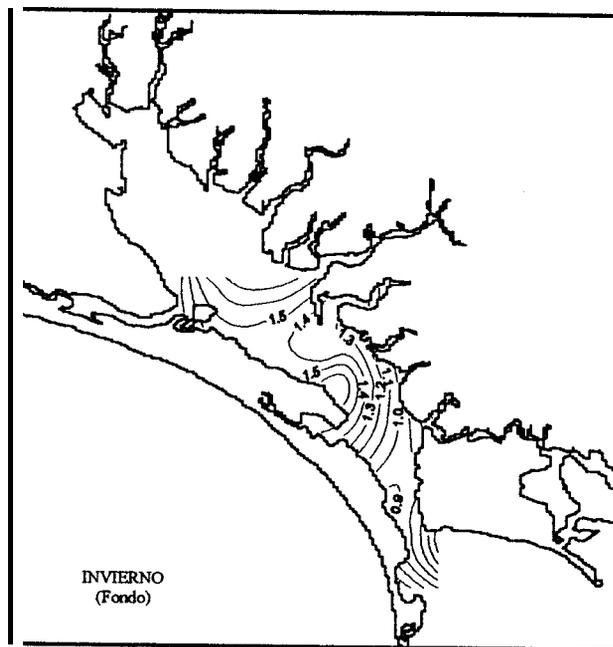
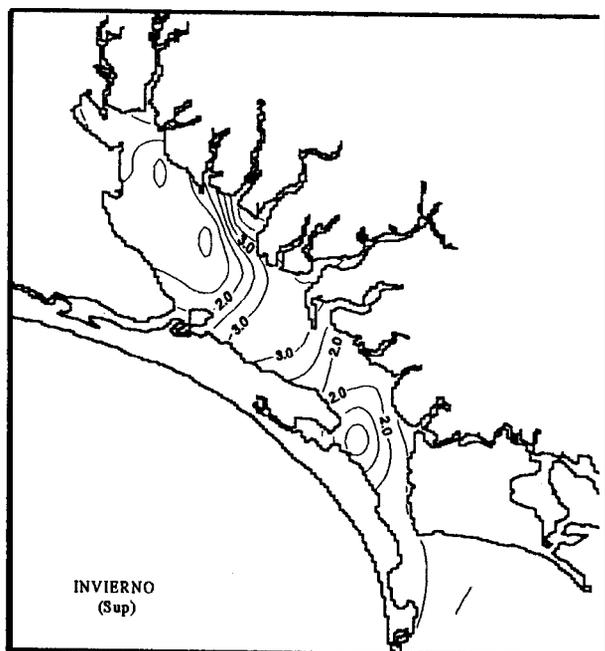
Distribución espacial de nitritos ($\mu\text{M/l}$) en la Laguna de Santa María durante las épocas de verano y otoño de 1995.



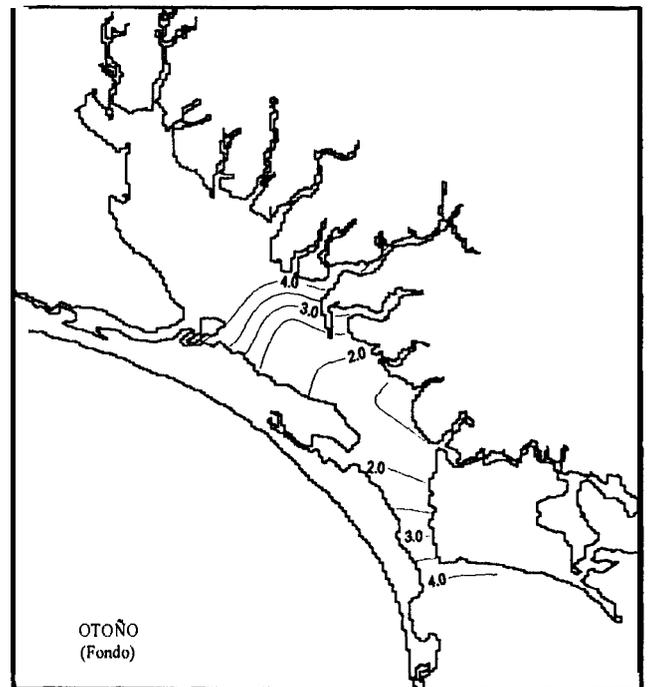
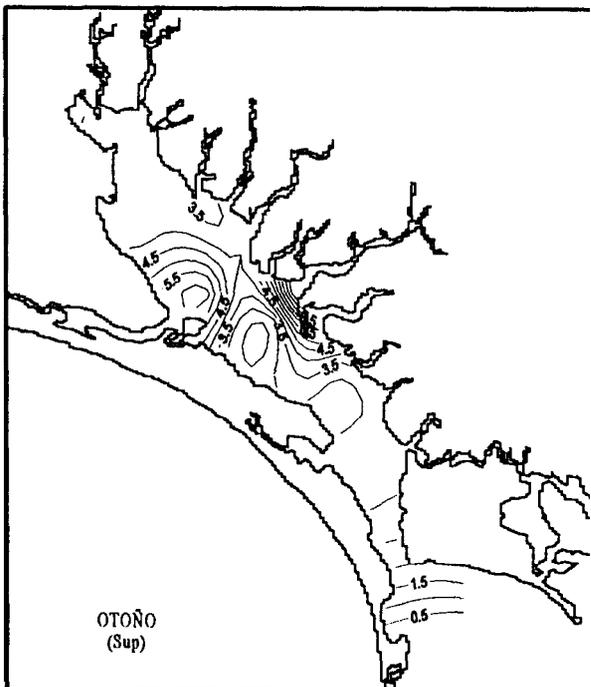
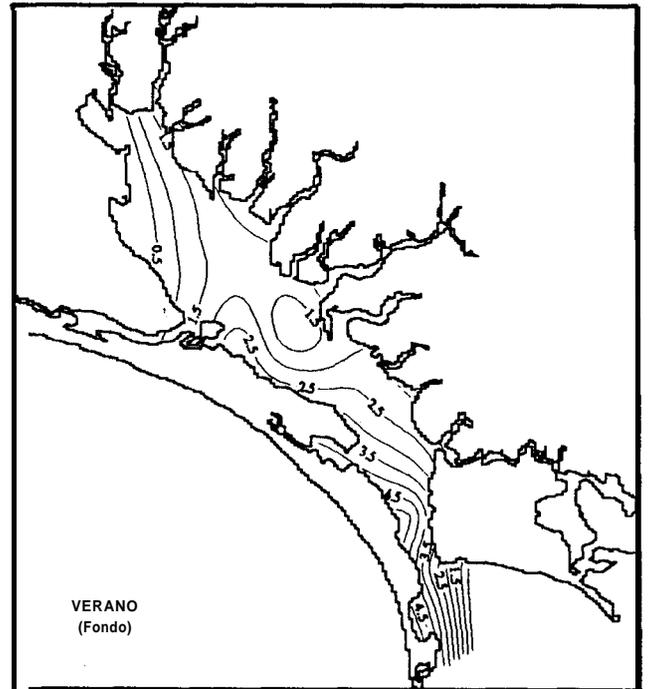
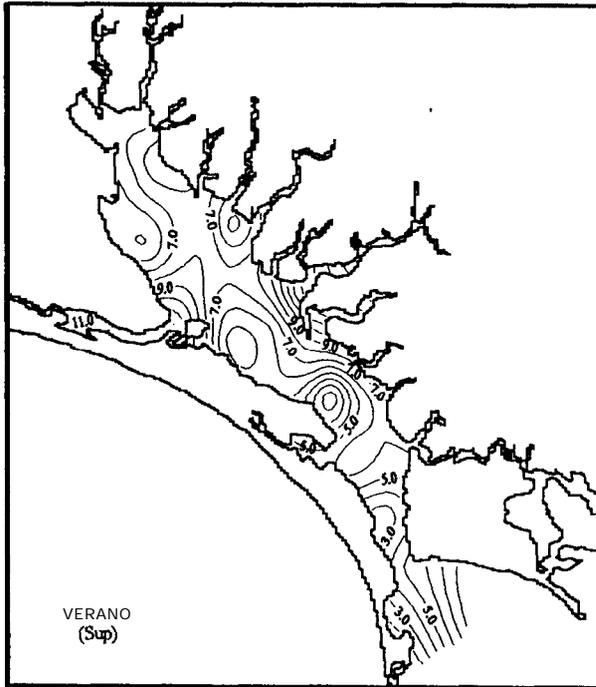
Distribución espacial de amonio (μM) en la Laguna de Santa María durante invierno y primavera de 1995.



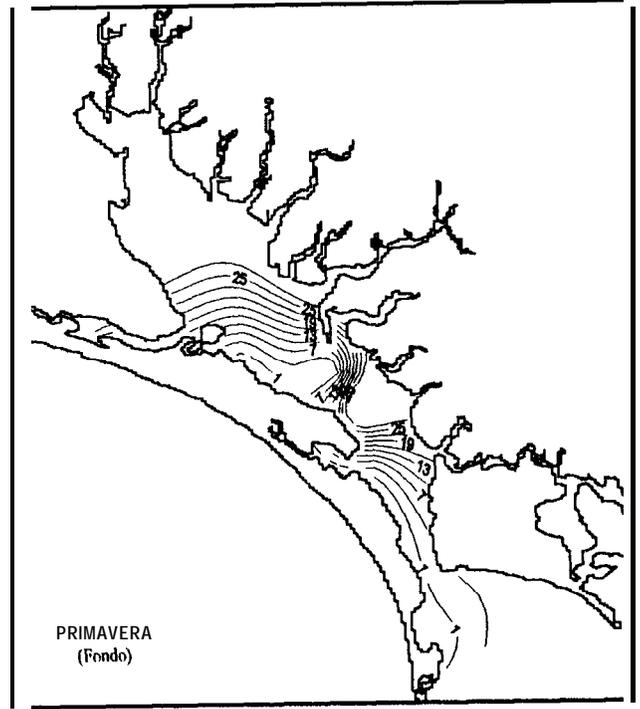
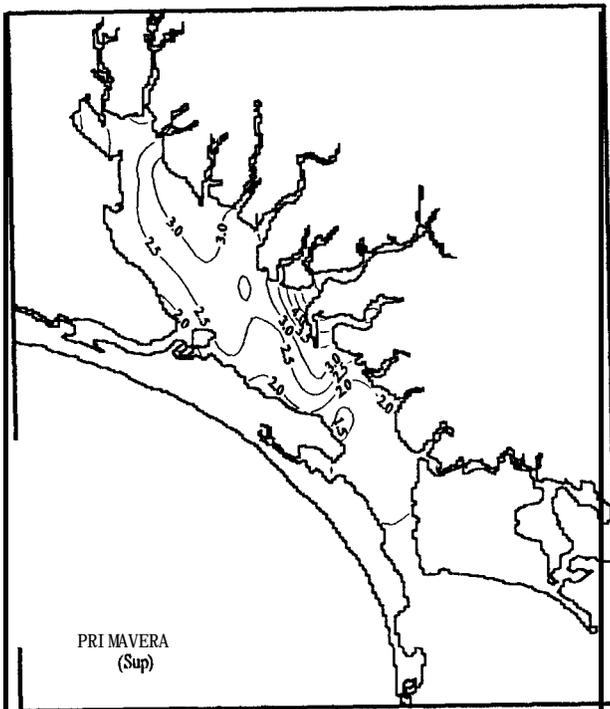
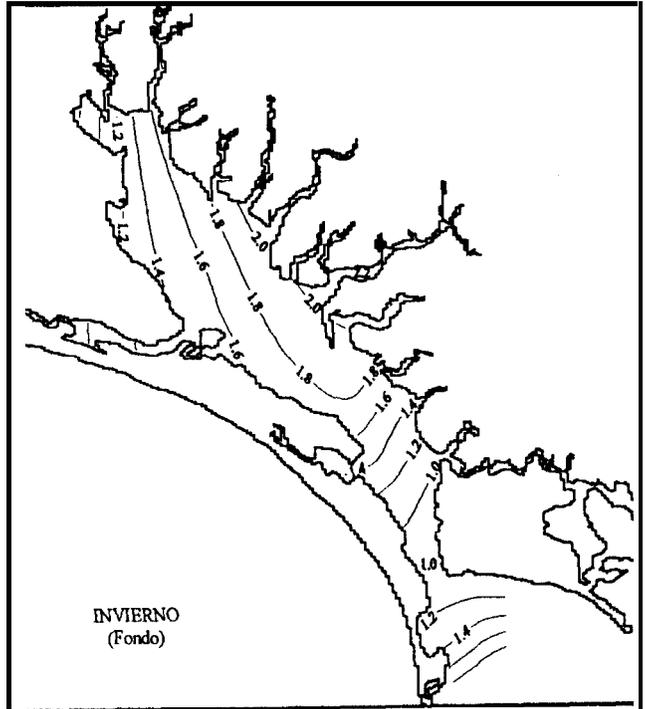
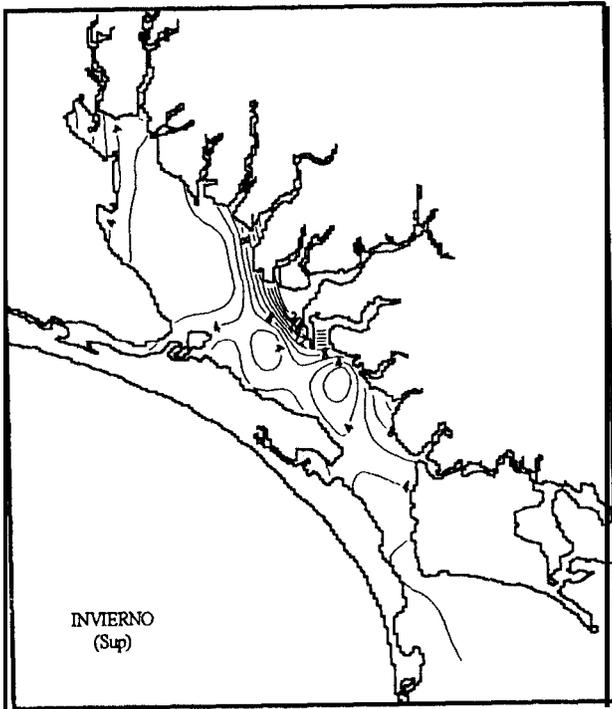
Distribución espacial de amonio (μM) en la Laguna de Santa María durante verano y otoño de 1995.



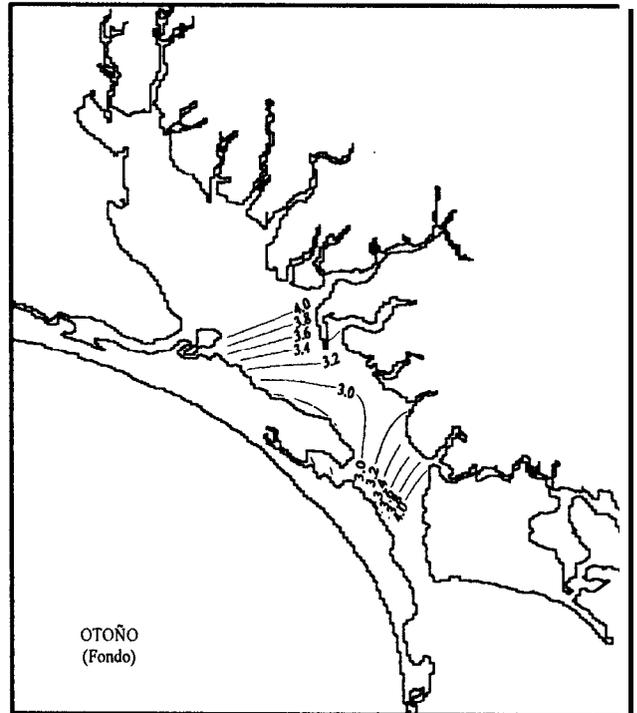
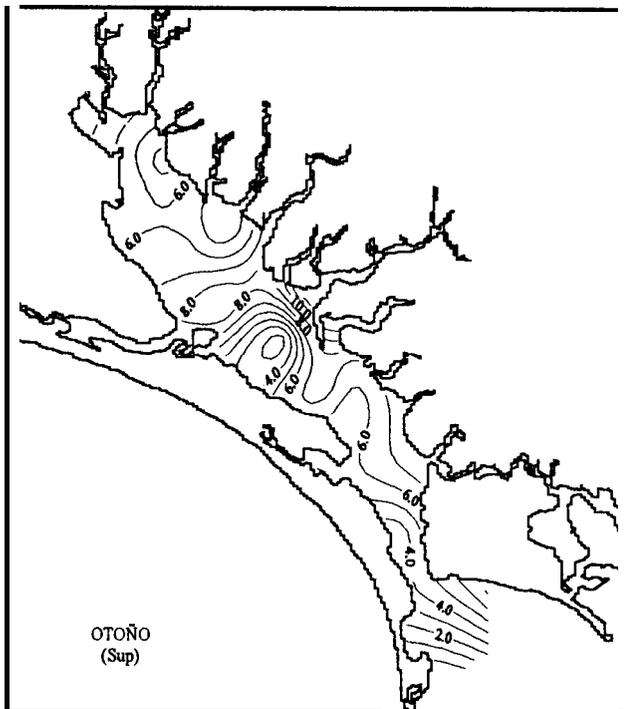
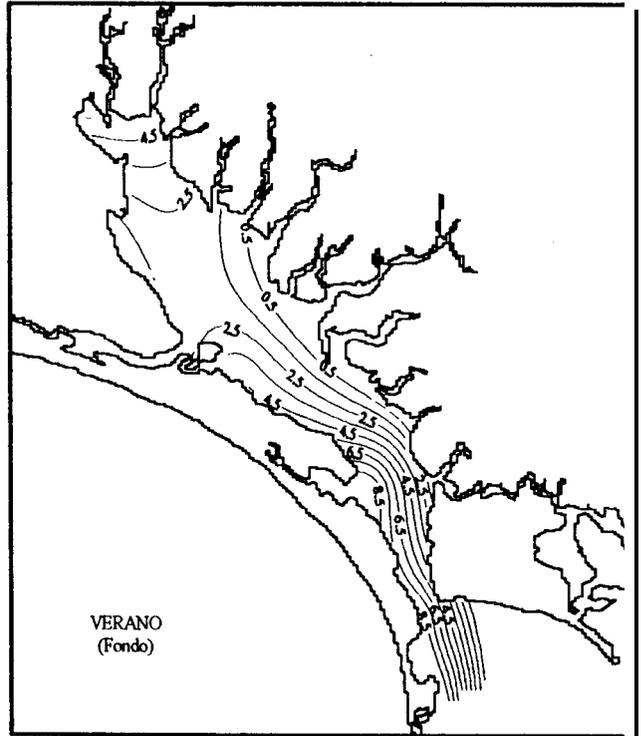
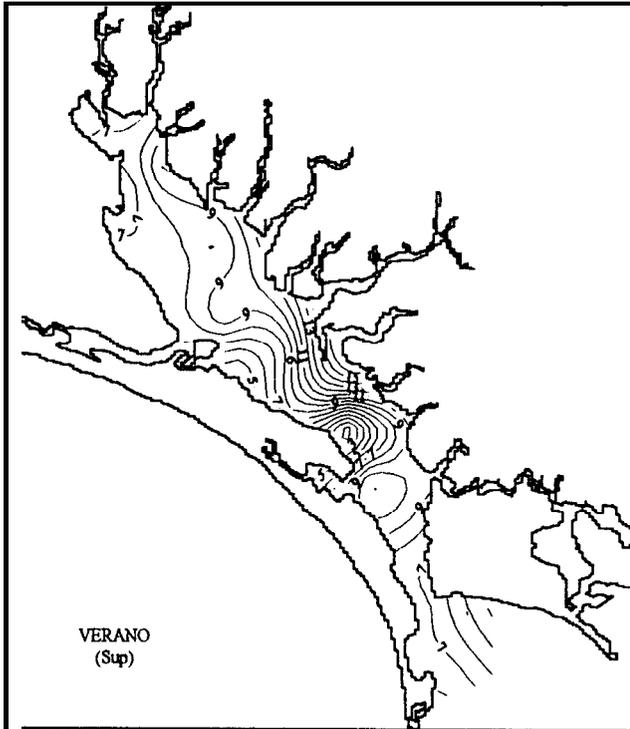
Distribución espacial de fósforo reactivo soluble (μM) en la Laguna de Santa María durante invierno y primavera de 1995.



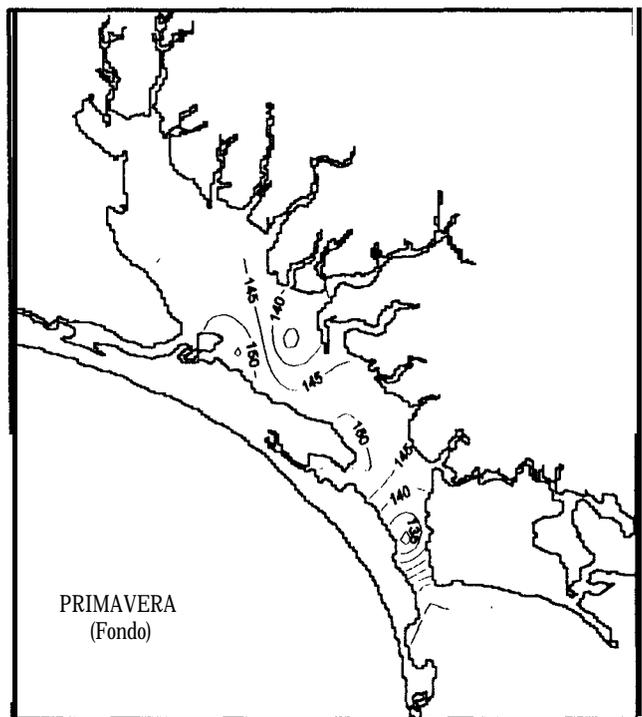
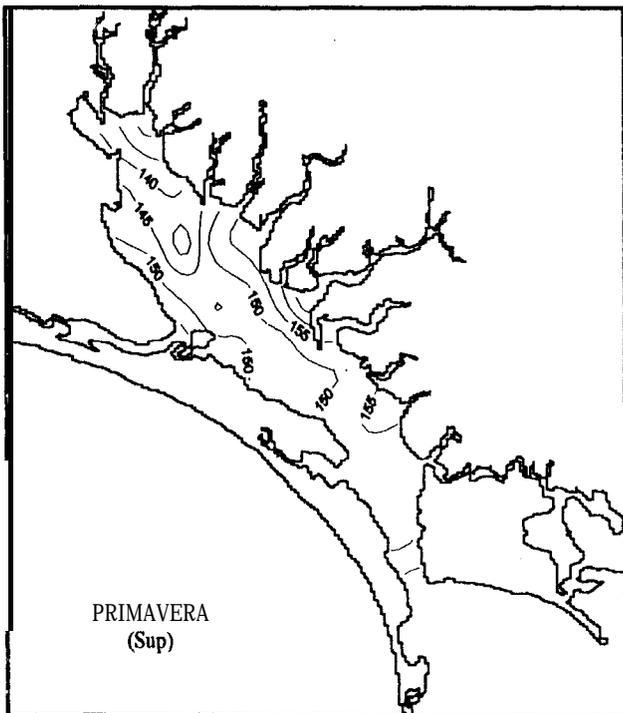
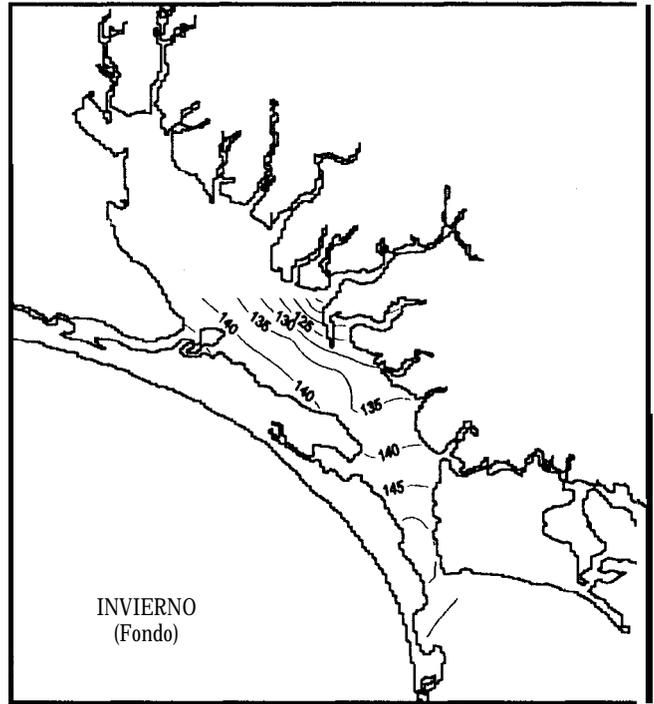
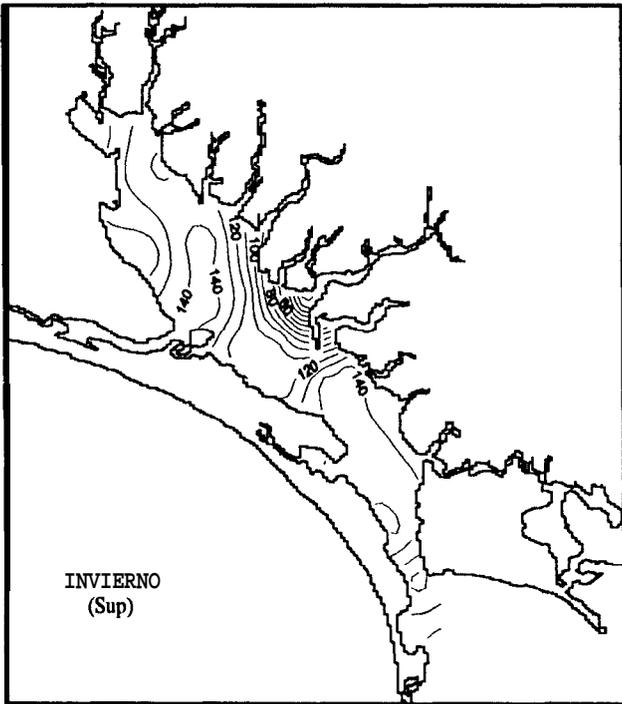
Distribución espacial de fósforo reactivo soluble (μM) en la Laguna de Santa María durante verano y otoño de 1995.



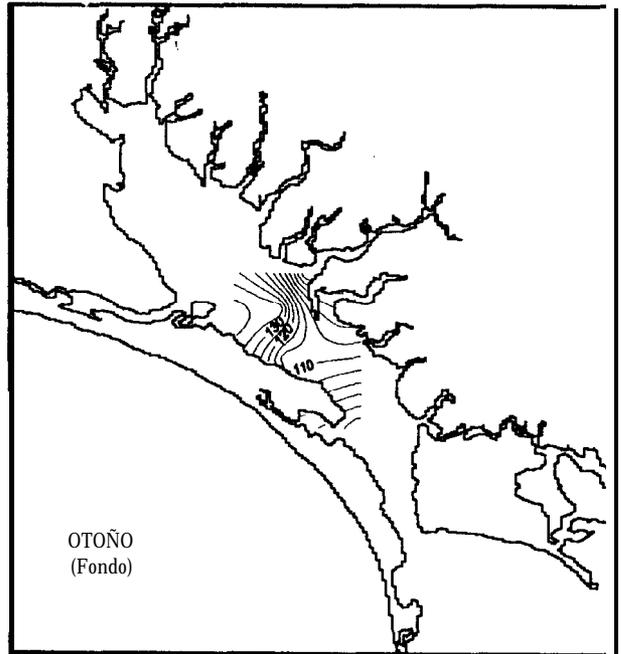
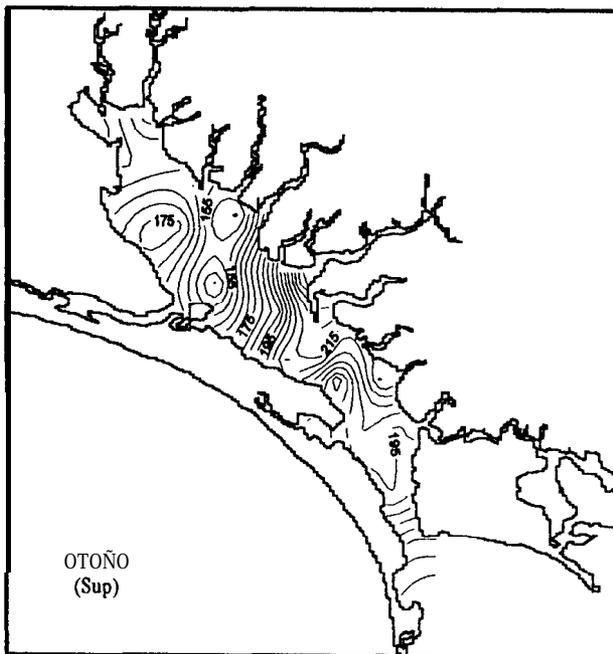
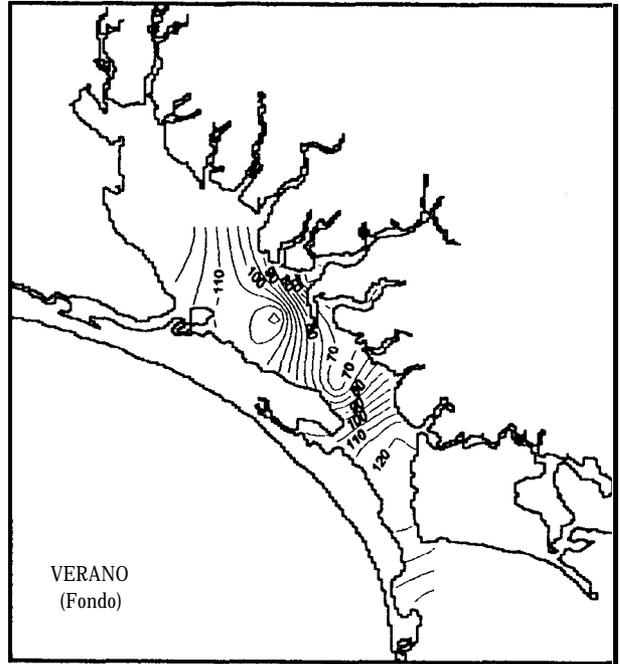
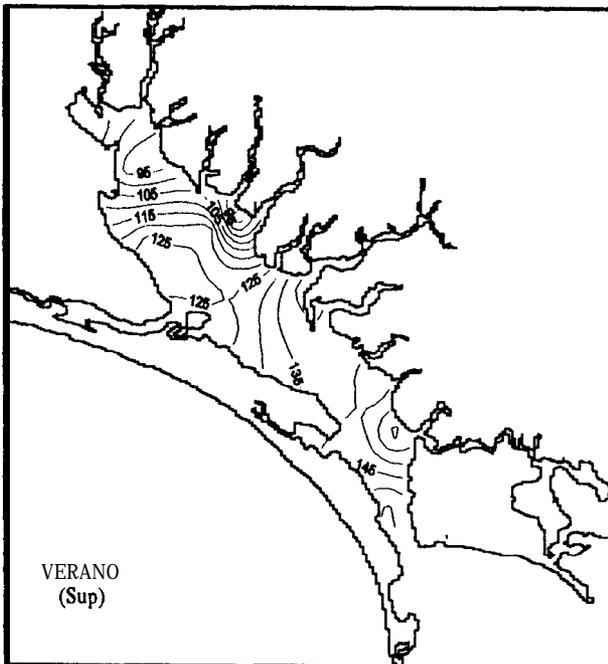
Distribución espacial de fósforo total soluble (μM) en la Laguna de Santa María durante las épocas de invierno y primavera de 1995.



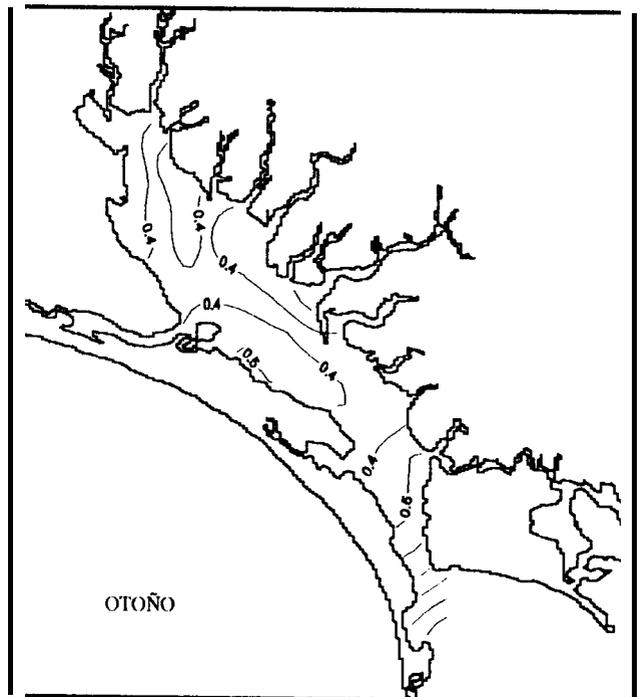
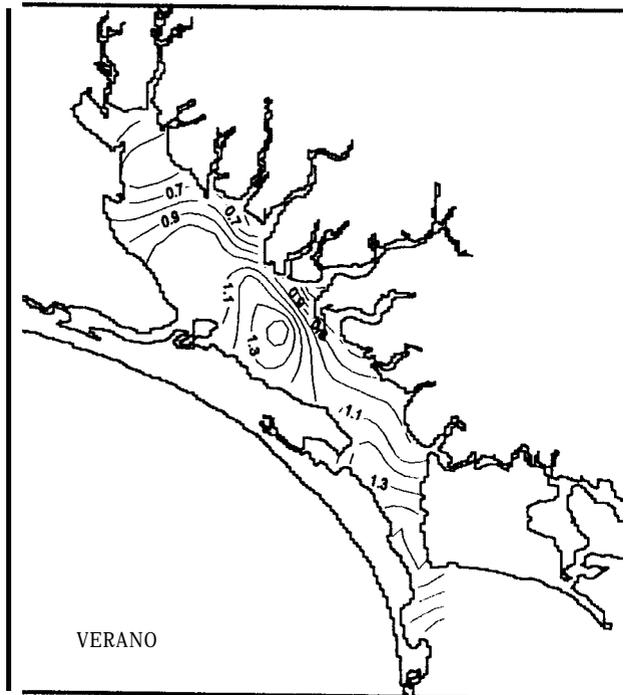
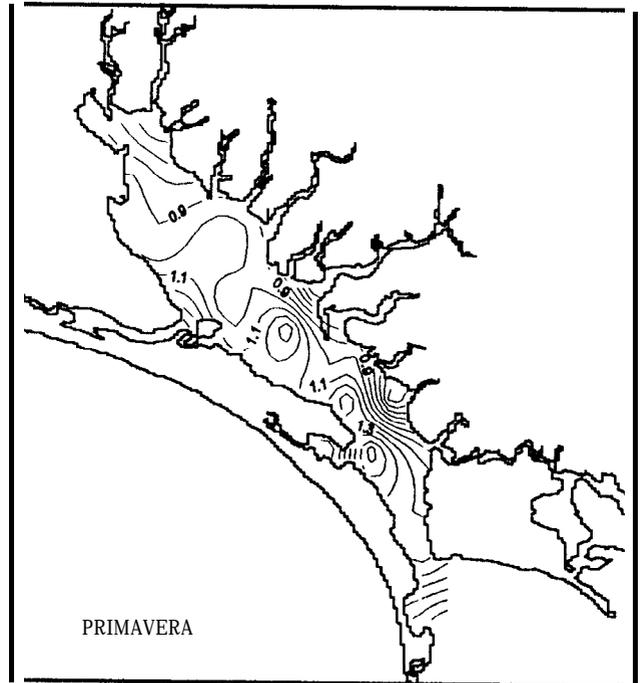
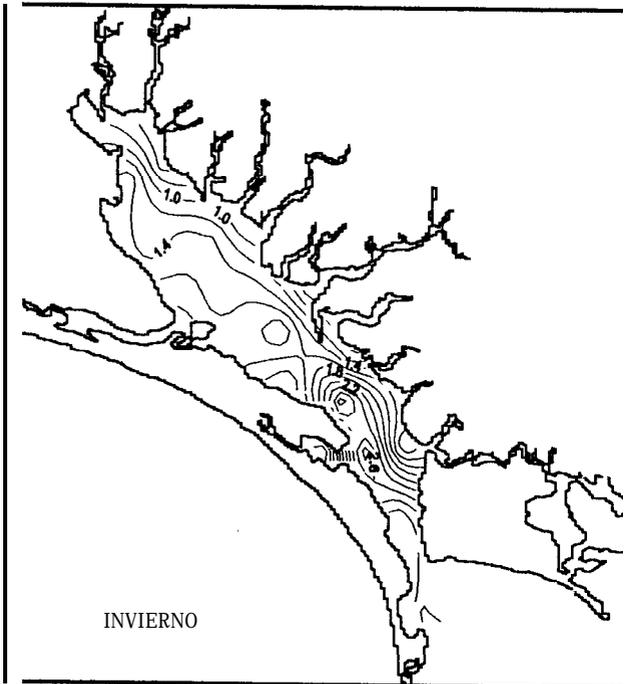
Distribución espacial de fósforo total soluble (μM) en la Laguna de Santa María durante verano y otoño de 1995.



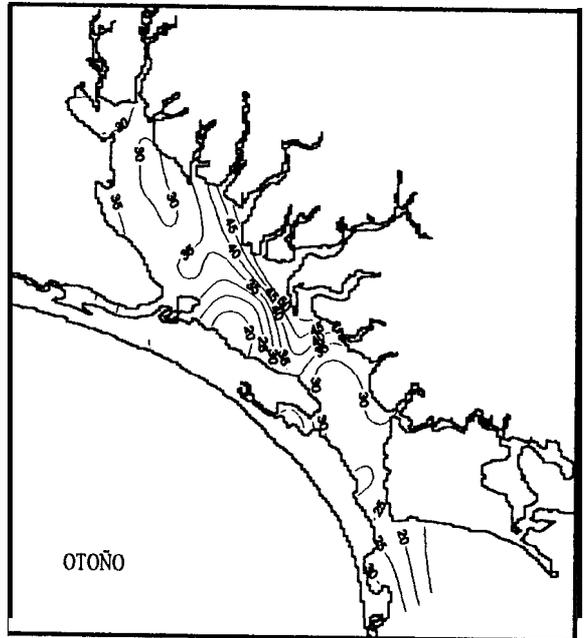
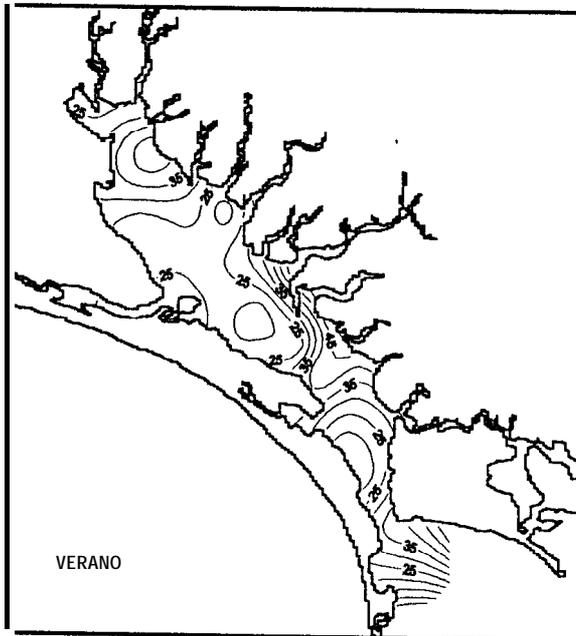
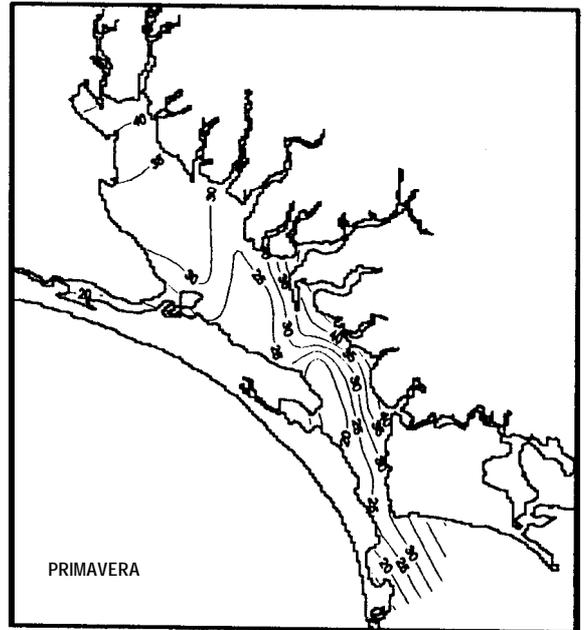
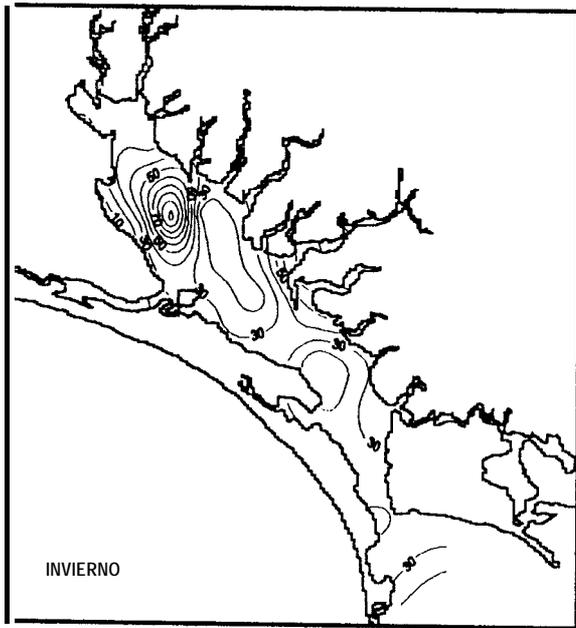
Distribución espacial de % de saturación de oxígeno en la Laguna de Santa María durante invierno y primavera de 1995.



Distribución espacial de % de saturación de oxígeno en la Laguna de Santa María durante verano y otoño de 1995.



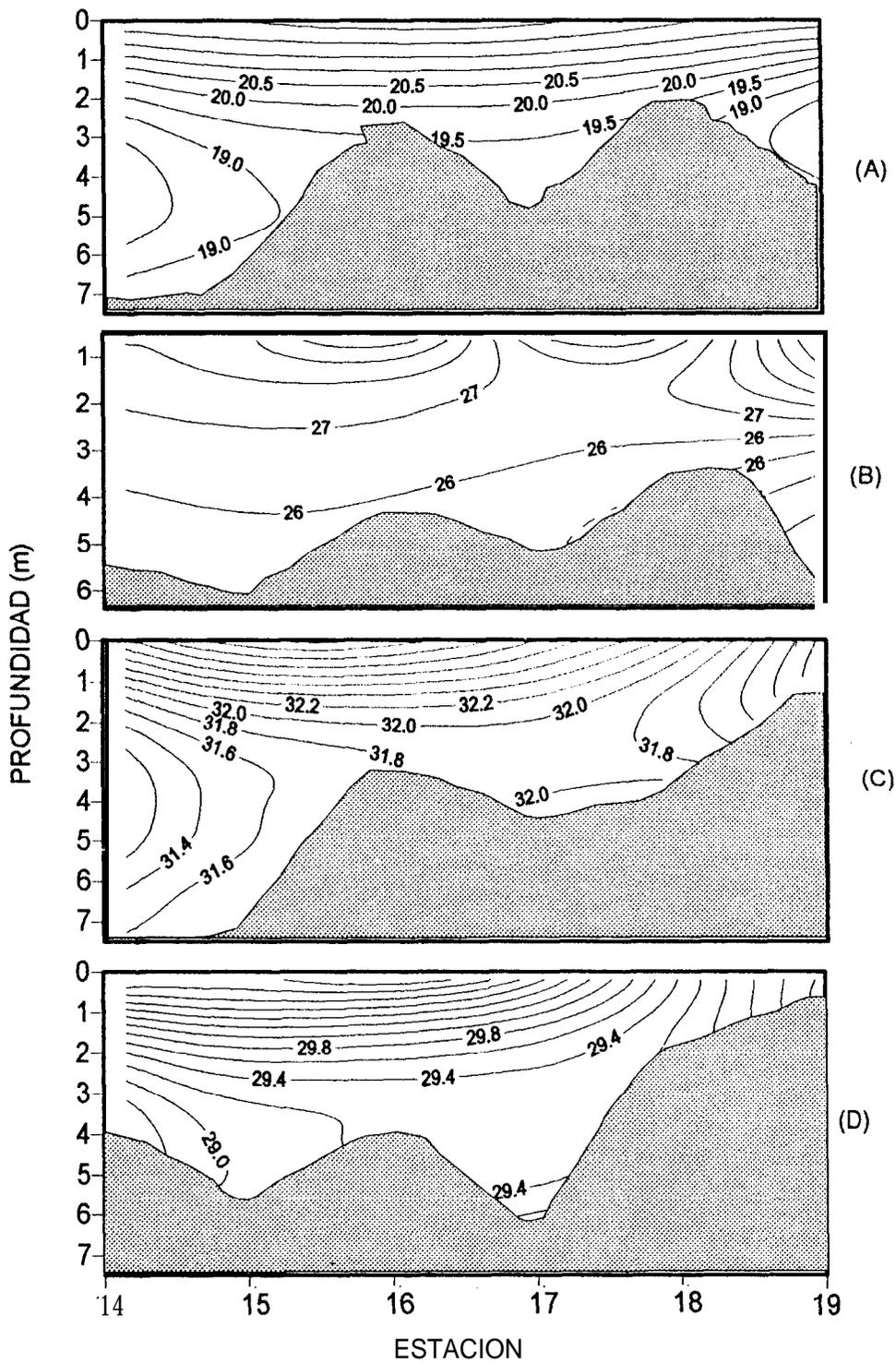
Distribución espacial de profundidad de disco de Secchi (m) en la Laguna de Santa María durante el periodo febrero-octubre de 1995.



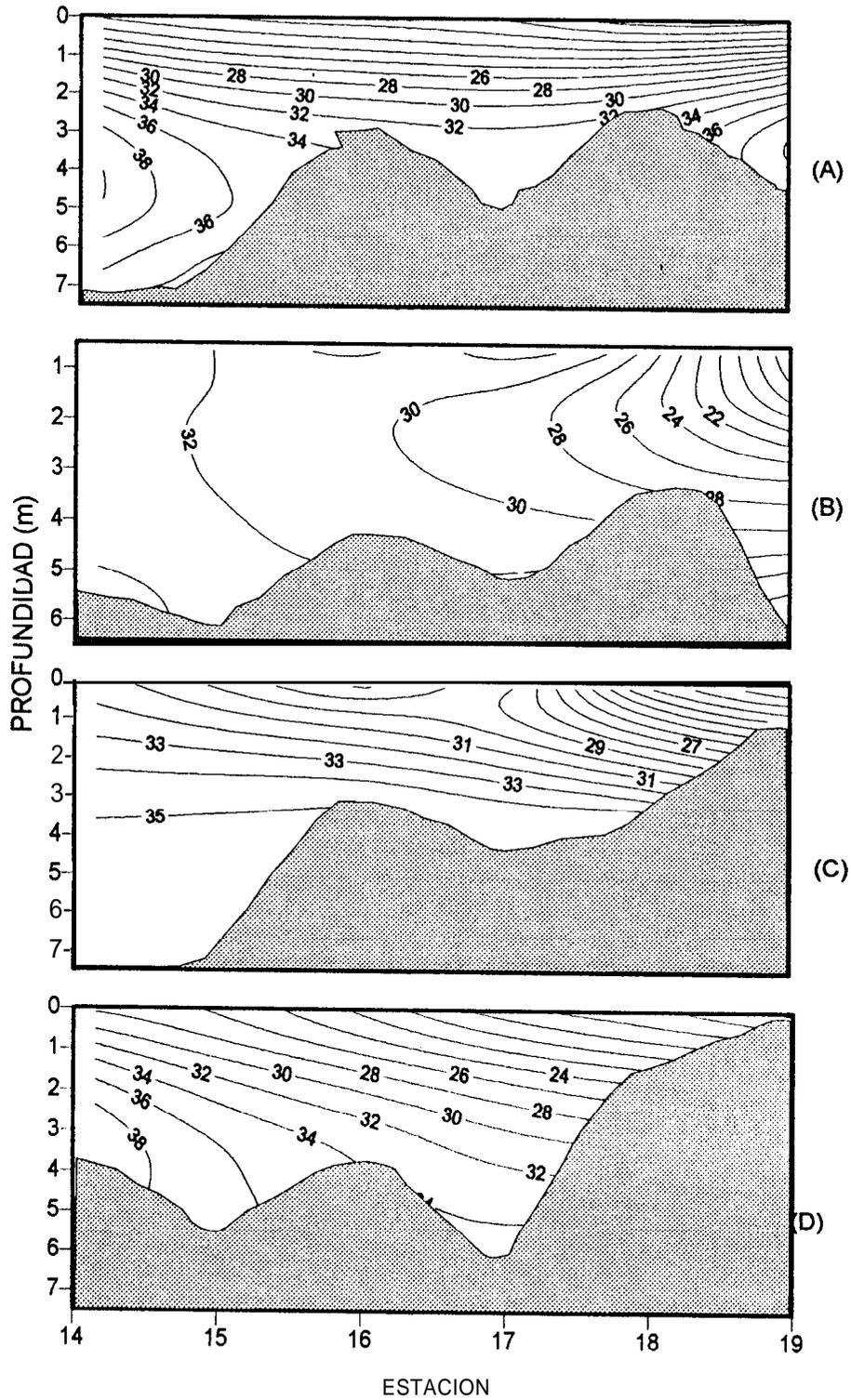
Distribución espacial de sólidos suspendidos totales (mg/l) en la Laguna de Santa María durante invierno, primavera, verano y otoño de 1995.

Anexo B:

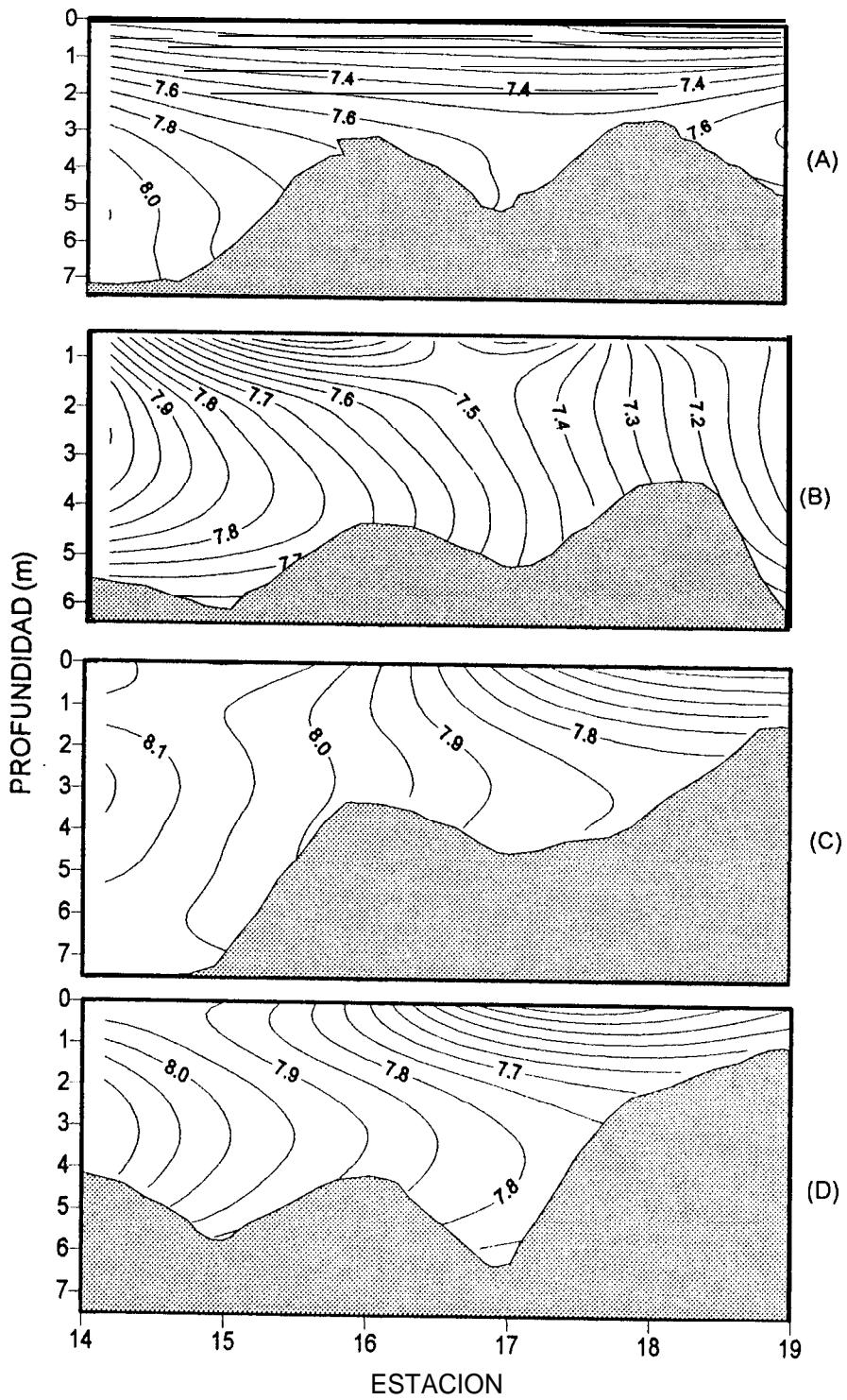
Esteros Esterón



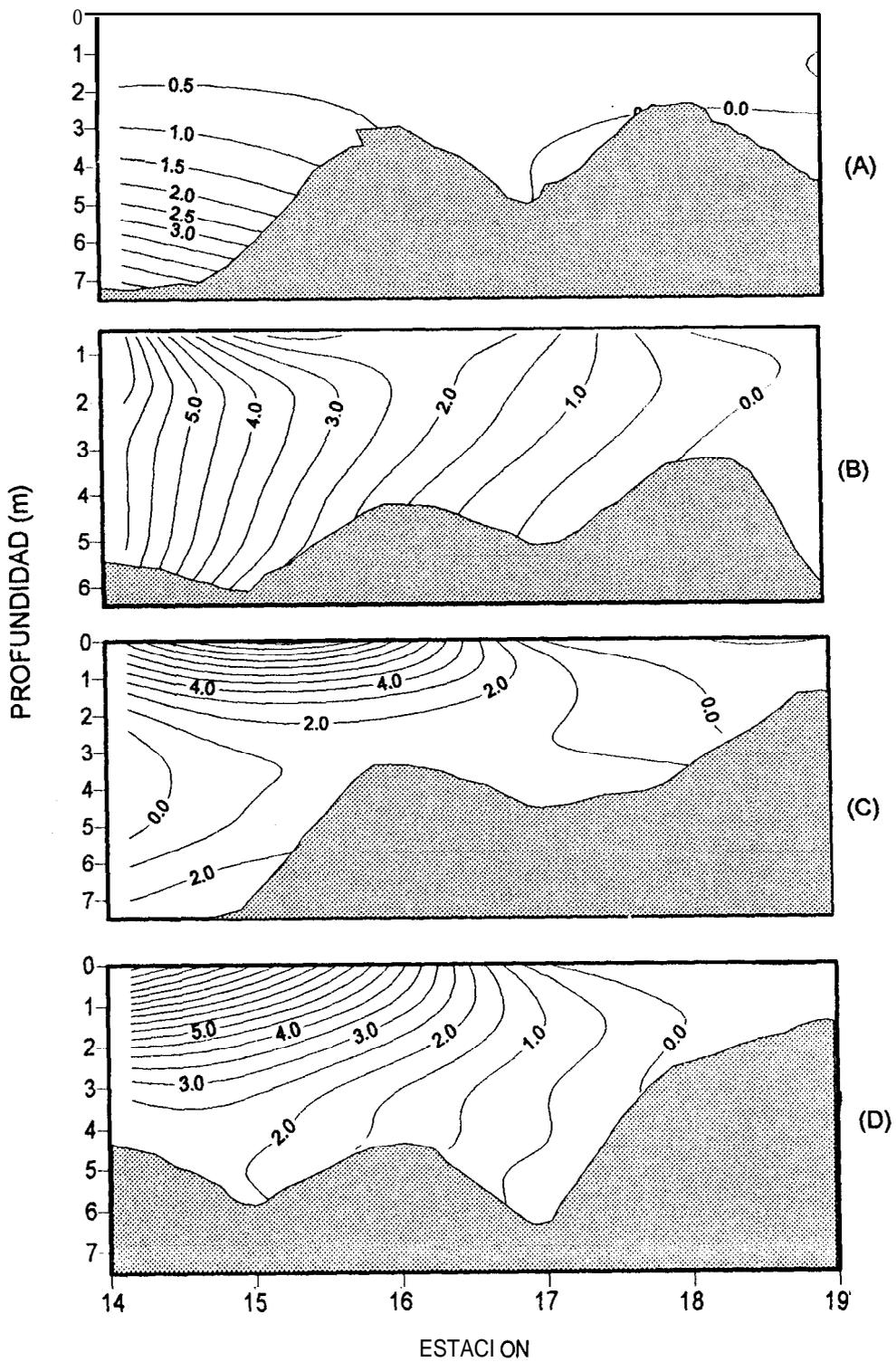
Distribución de temperatura (°C) en el estero Esterón durante invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



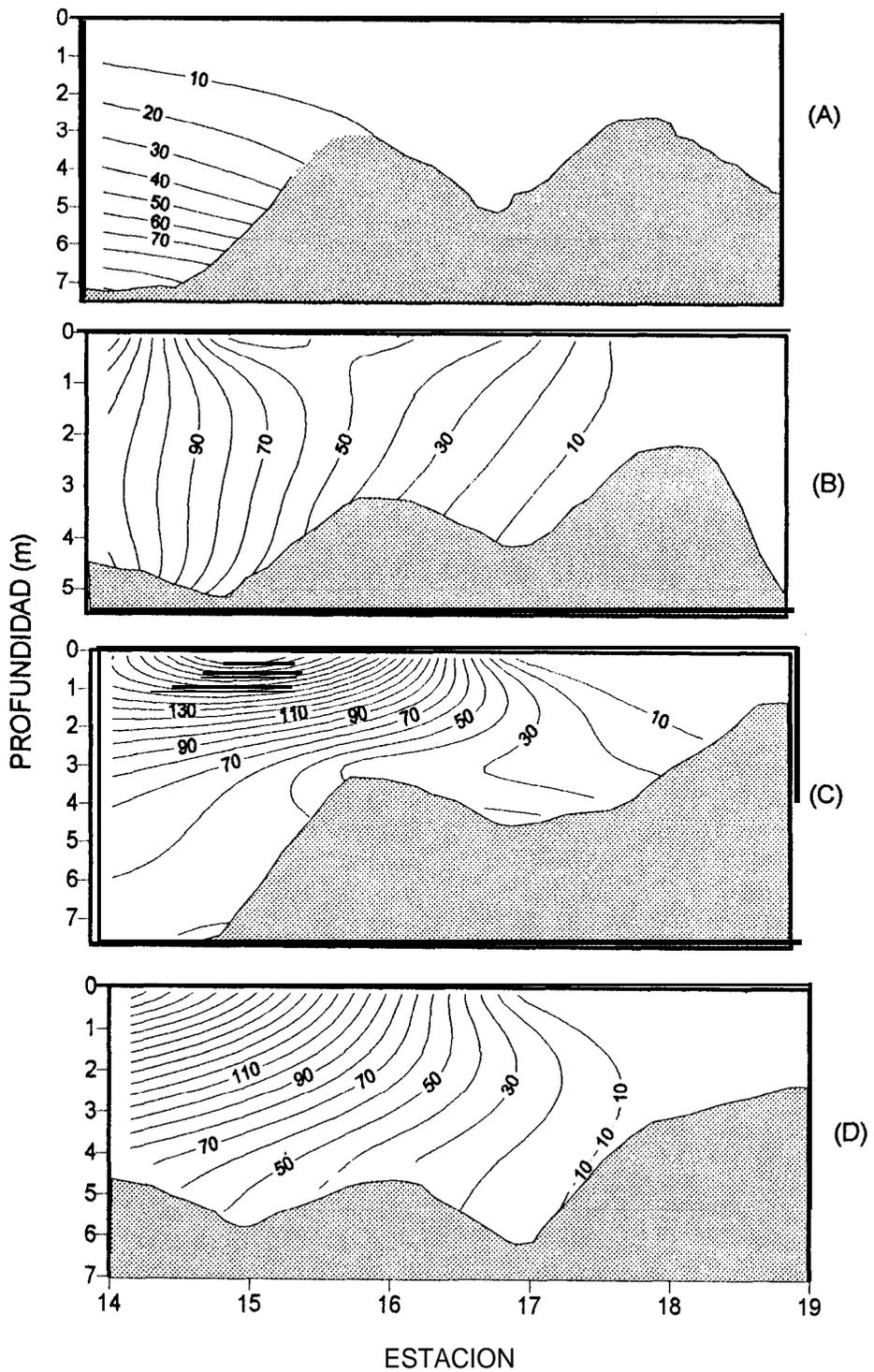
Distribución de salinidad (o/oo) en el estero Esterón durante las épocas de invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



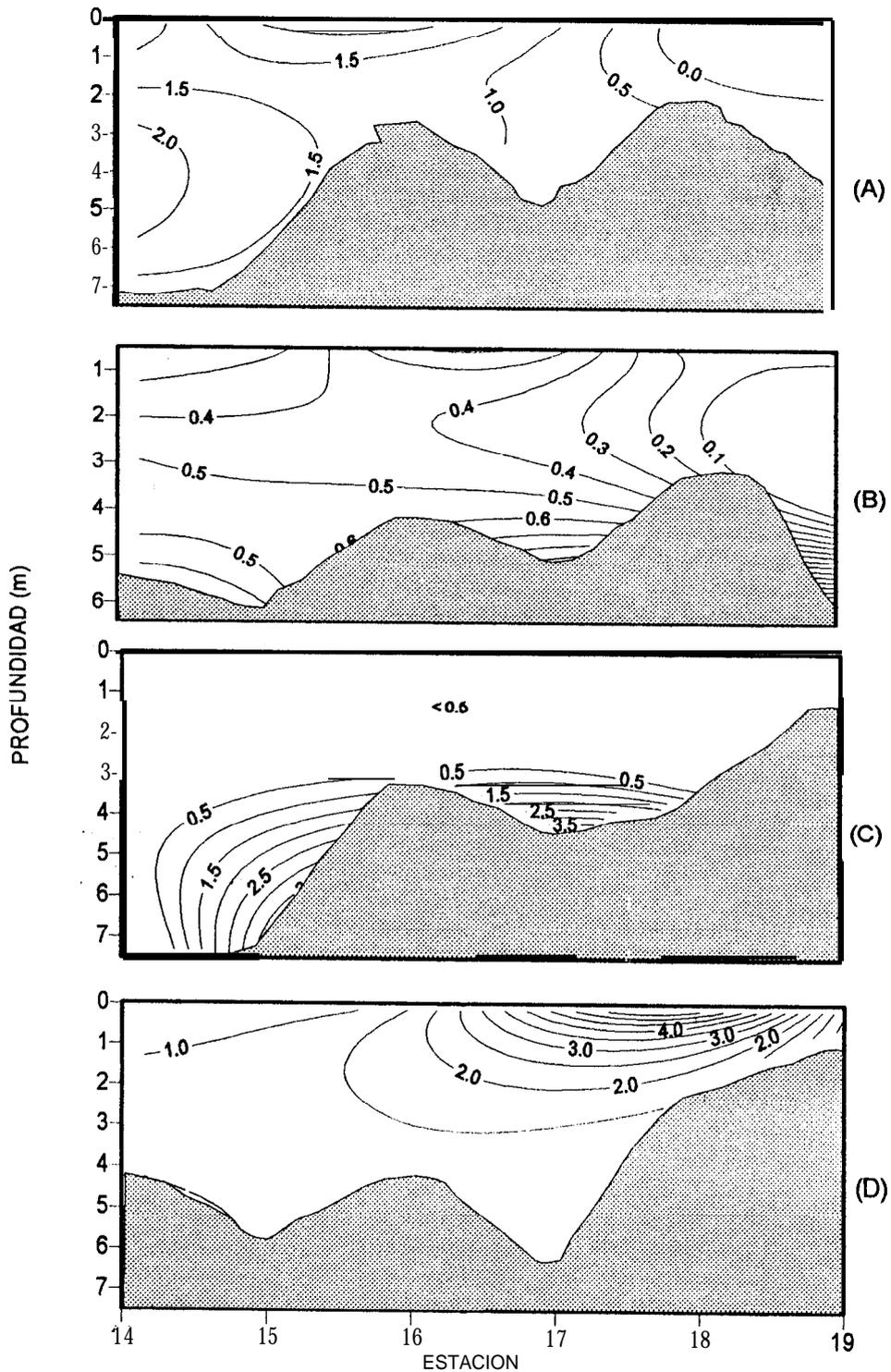
Distribución de pH en el estero Esterón durante invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



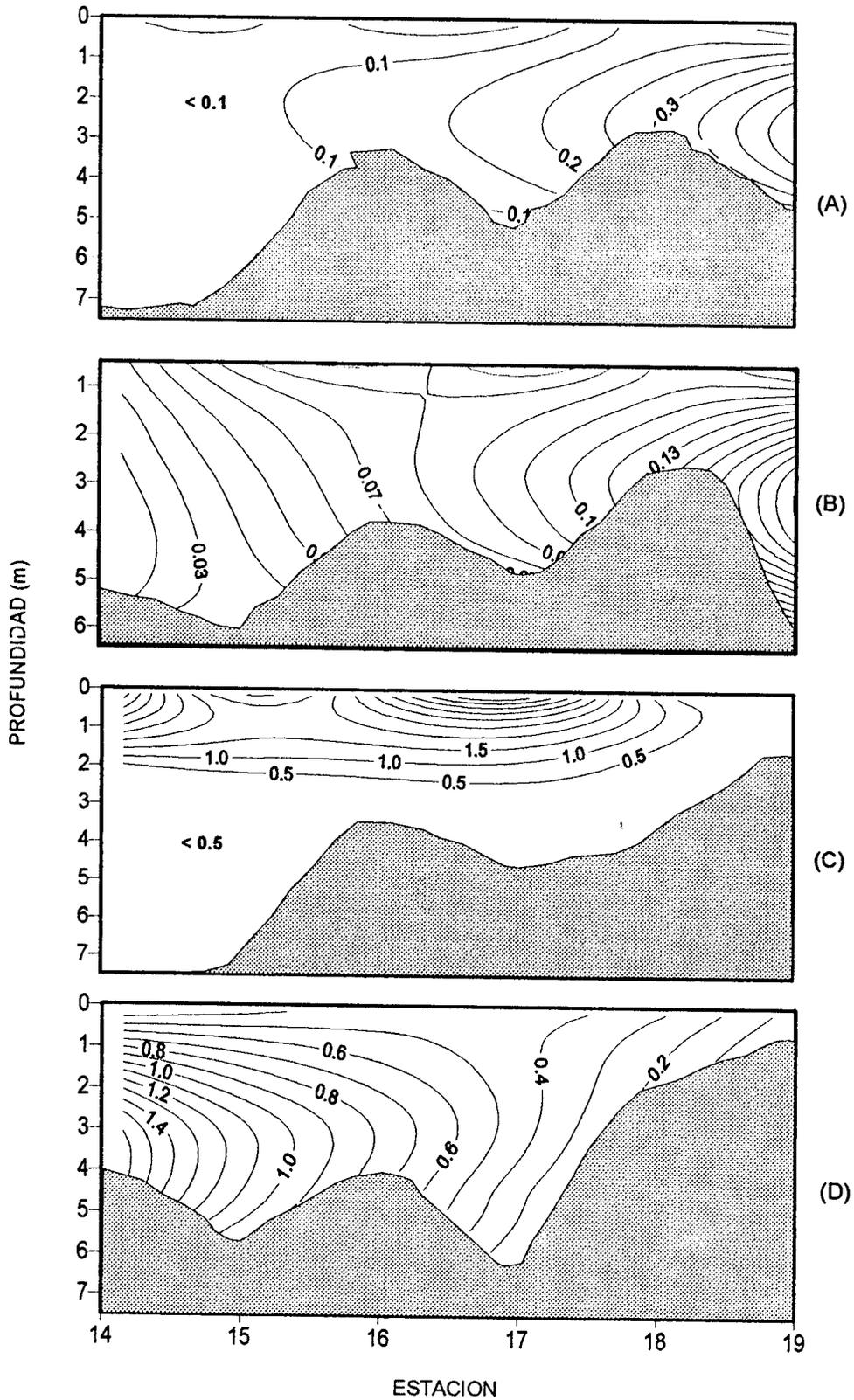
Distribución de oxígeno disuelto (mg/l) en el estero Esterón durante invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



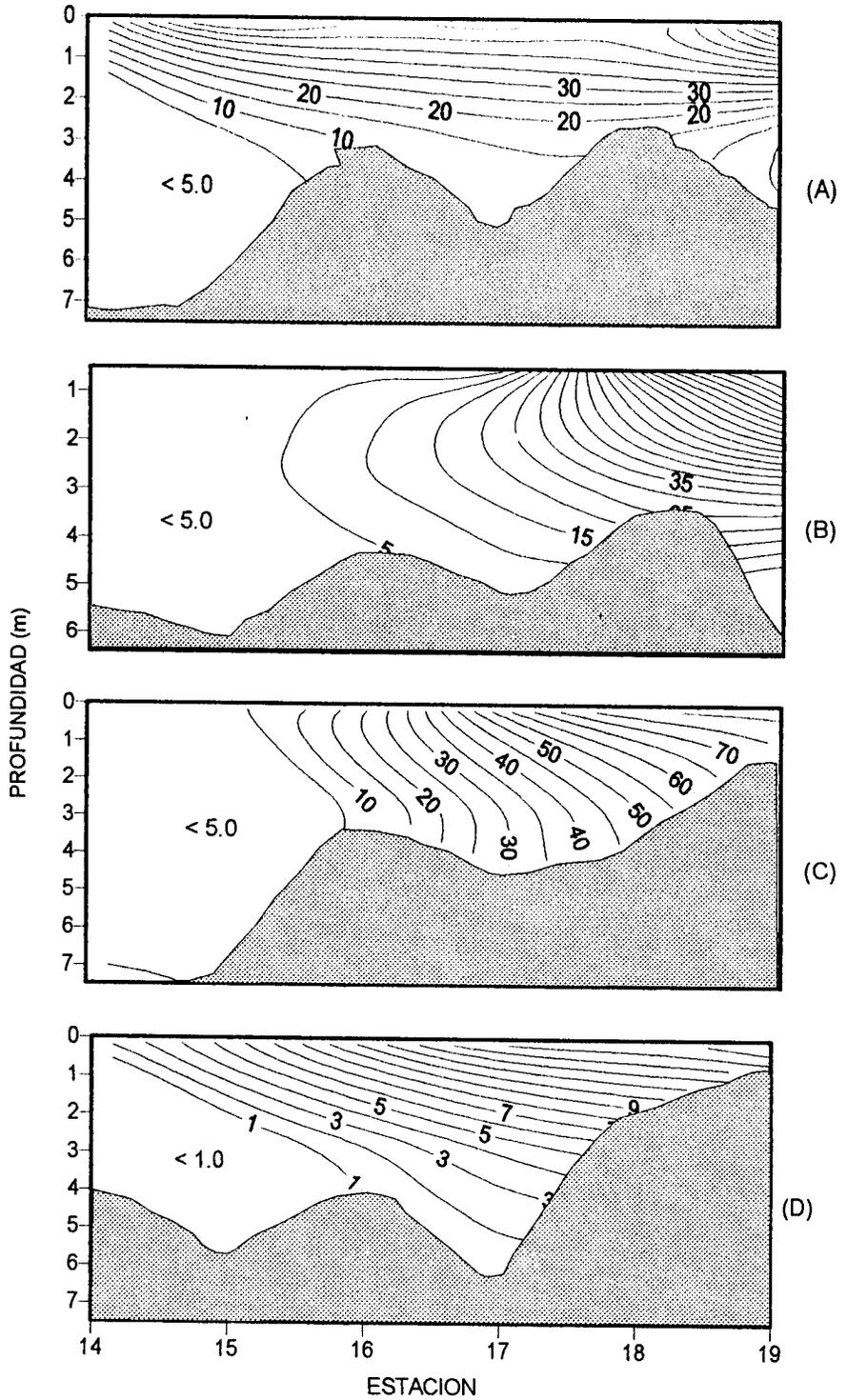
Distribución vertical de % de saturación de oxígeno en el estero Esterón durante invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



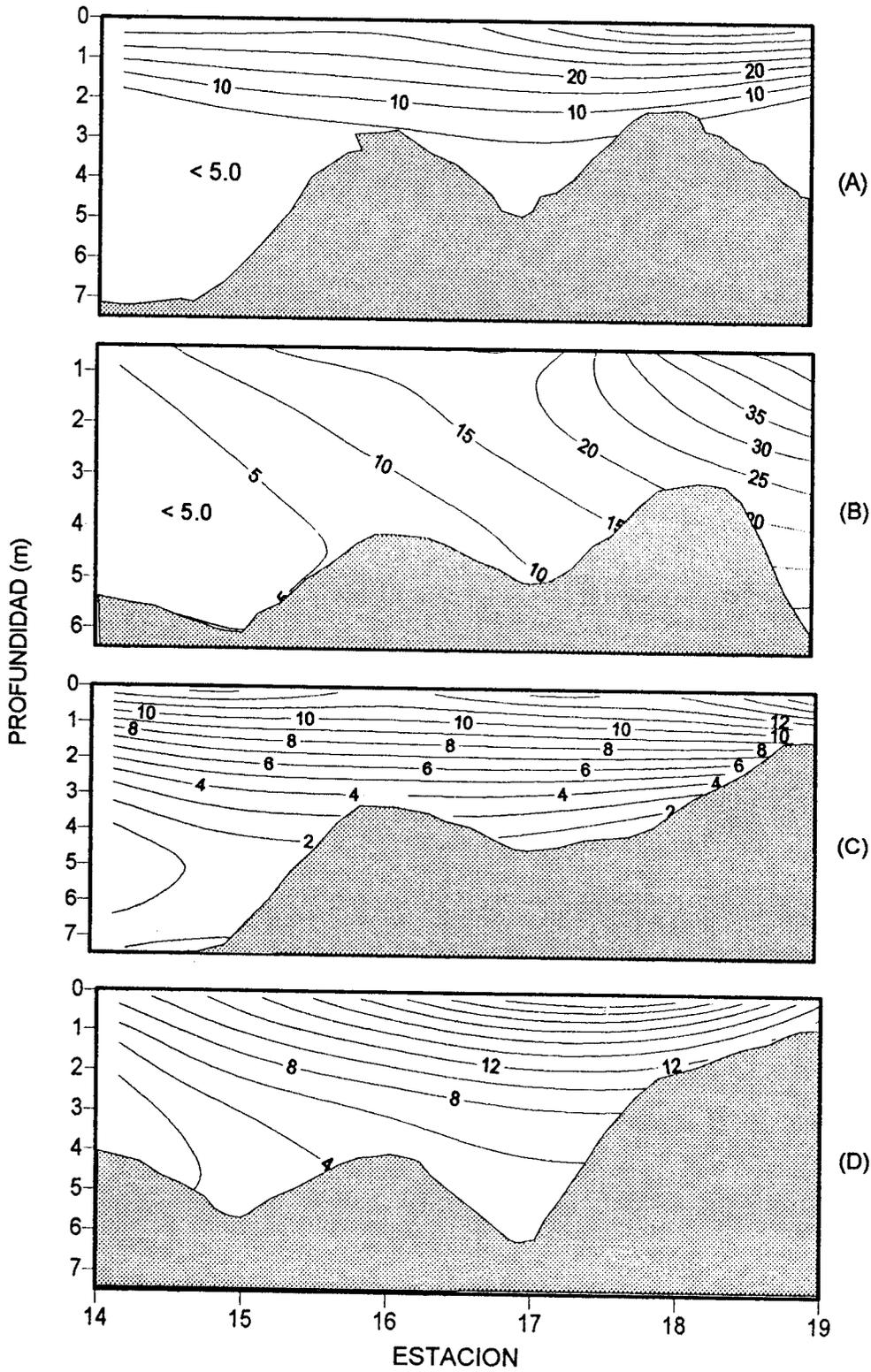
Distribución de nitratos (μM) en el estero Esterón durante invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



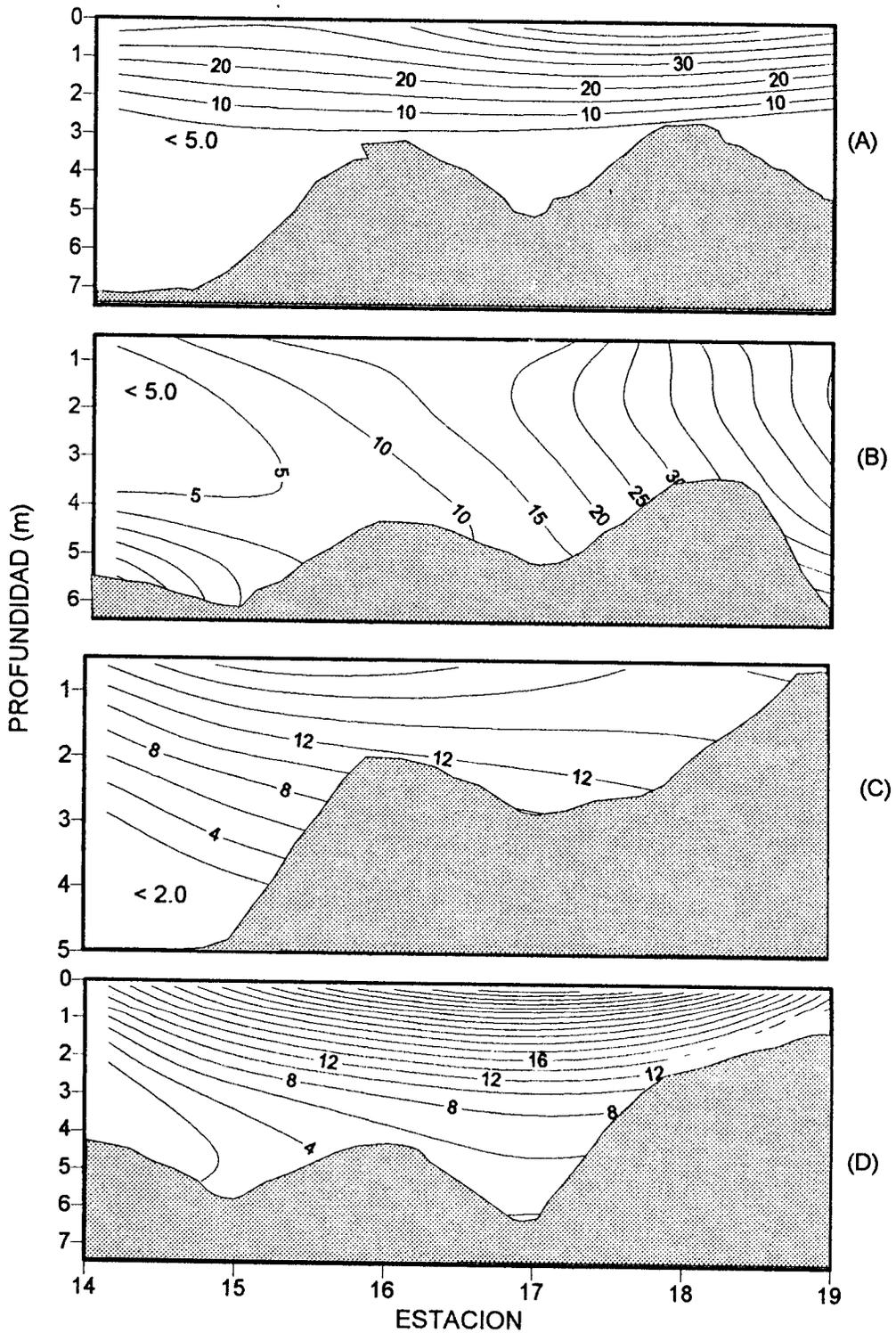
Distribución de nitritos en el estero Esterón durante invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



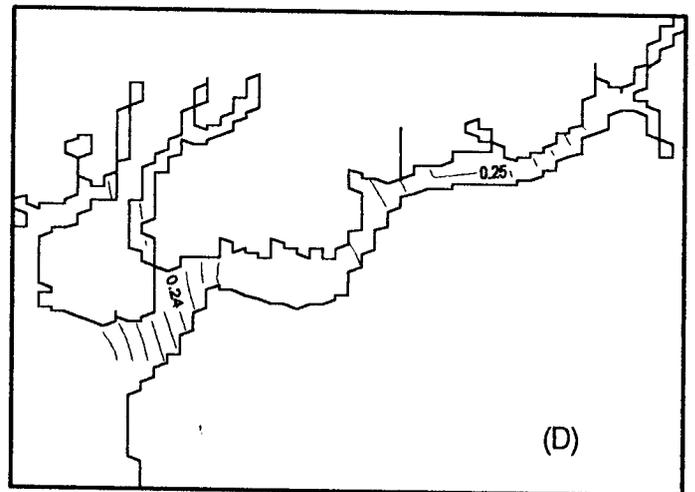
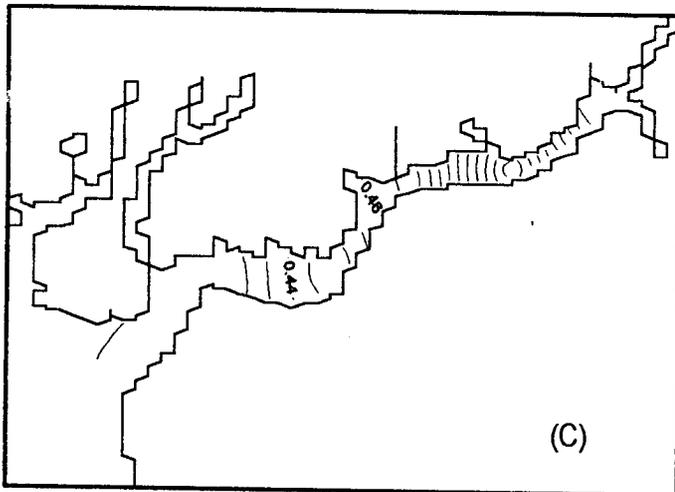
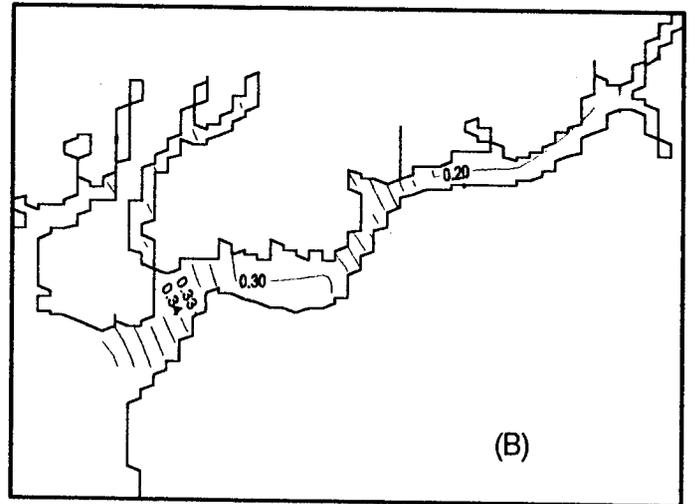
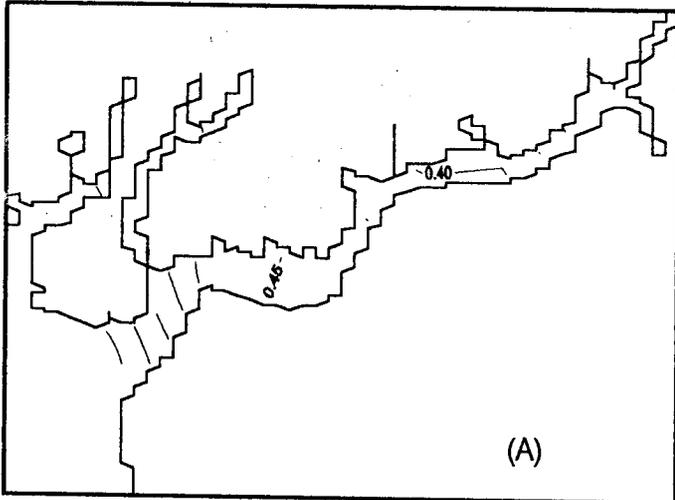
Distribución de amonio en el estero Esterón durante invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



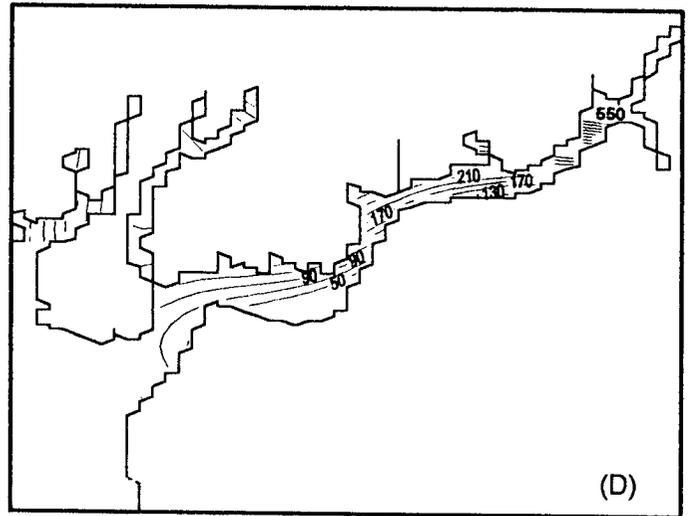
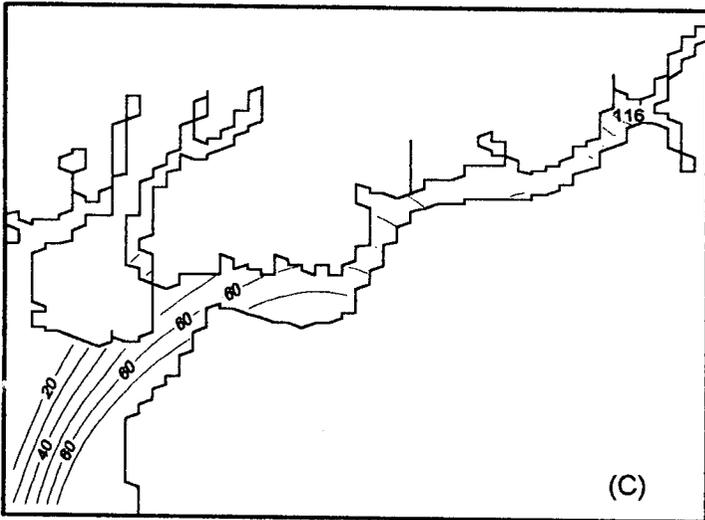
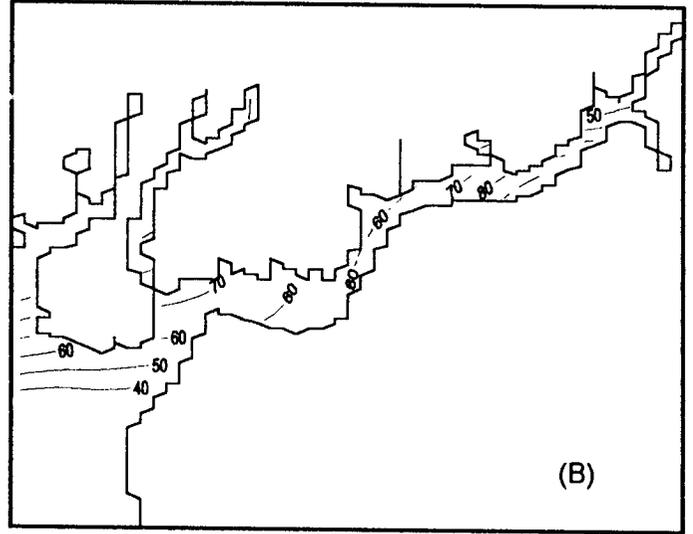
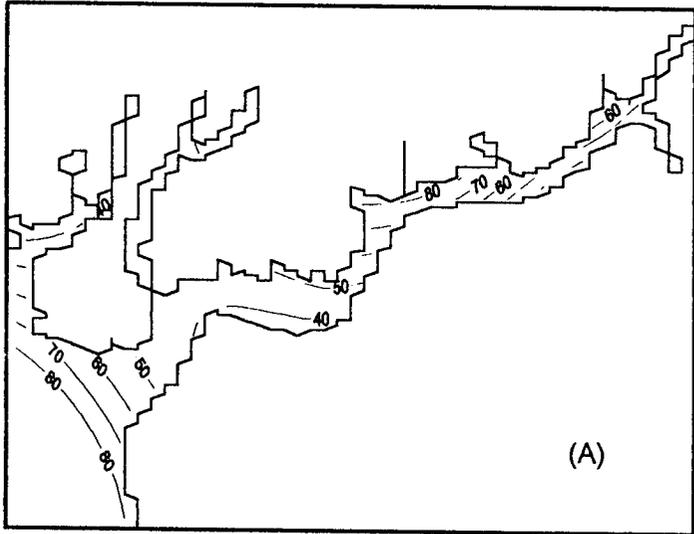
Distribución de fósforo reactivo soluble ($\mu\text{M/l}$) en estero Esterón durante invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



Distribución de fósforo total soluble ($\mu\text{M/l}$) en el estero Esterón durante invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



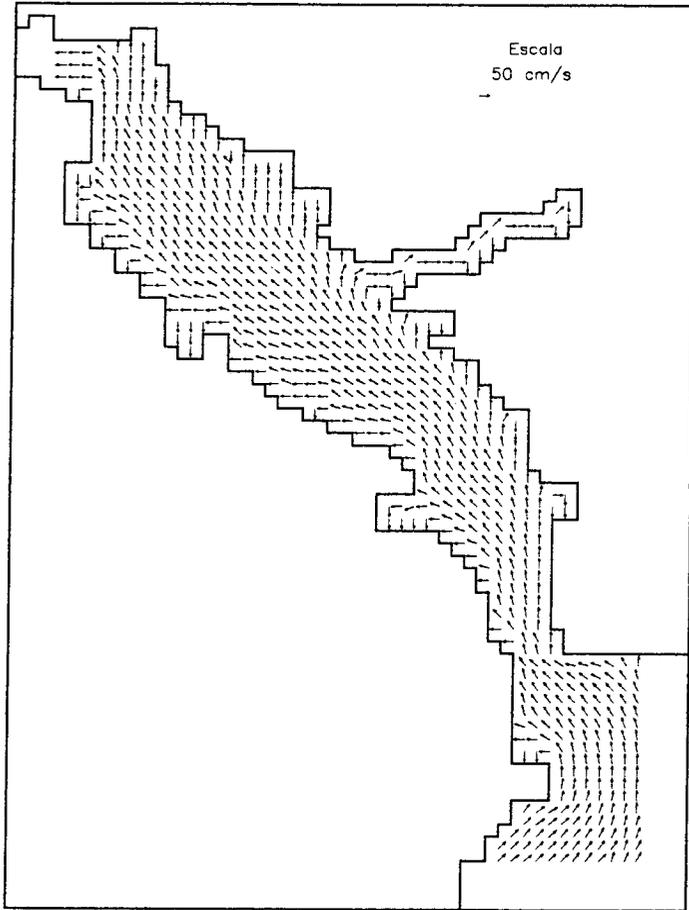
Profundidad de disco de Secchi en el estero Esterón durante las épocas de invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.



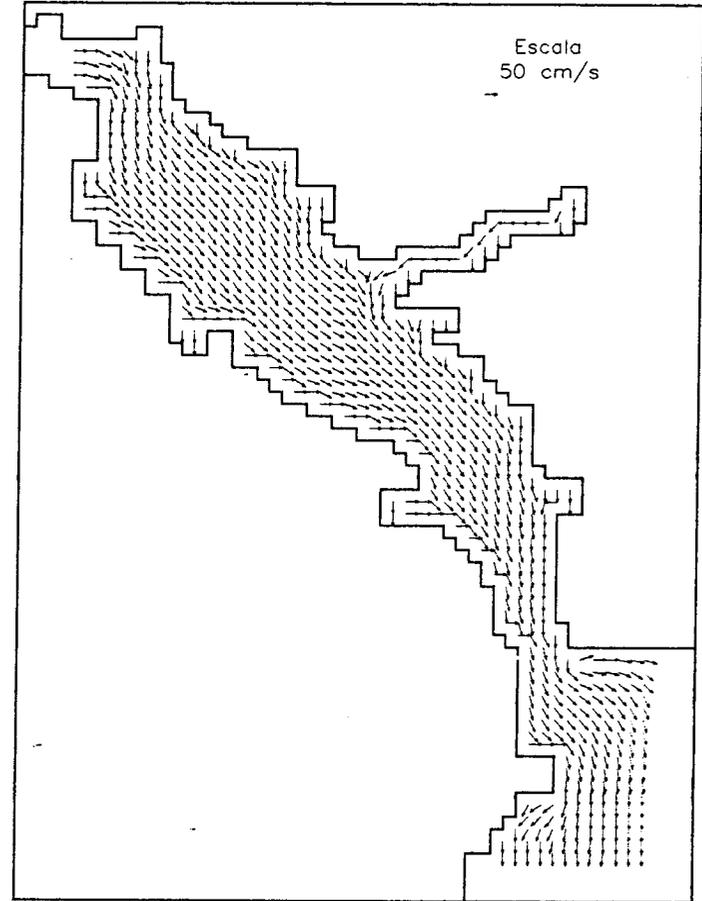
Distribución de sólidos suspendidos totales (mg/l) en el estero Esterón durante las épocas de invierno (A), primavera (B), verano (C) y otoño (D) de 1995.

Anexo C:

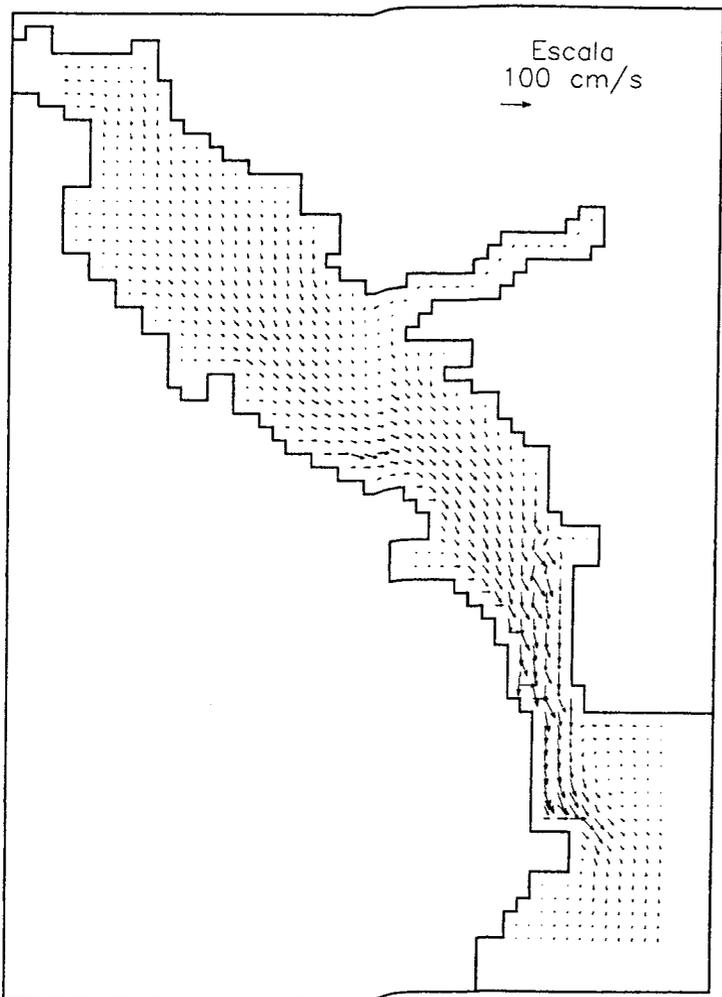
**Modelación
hidrodinámica**



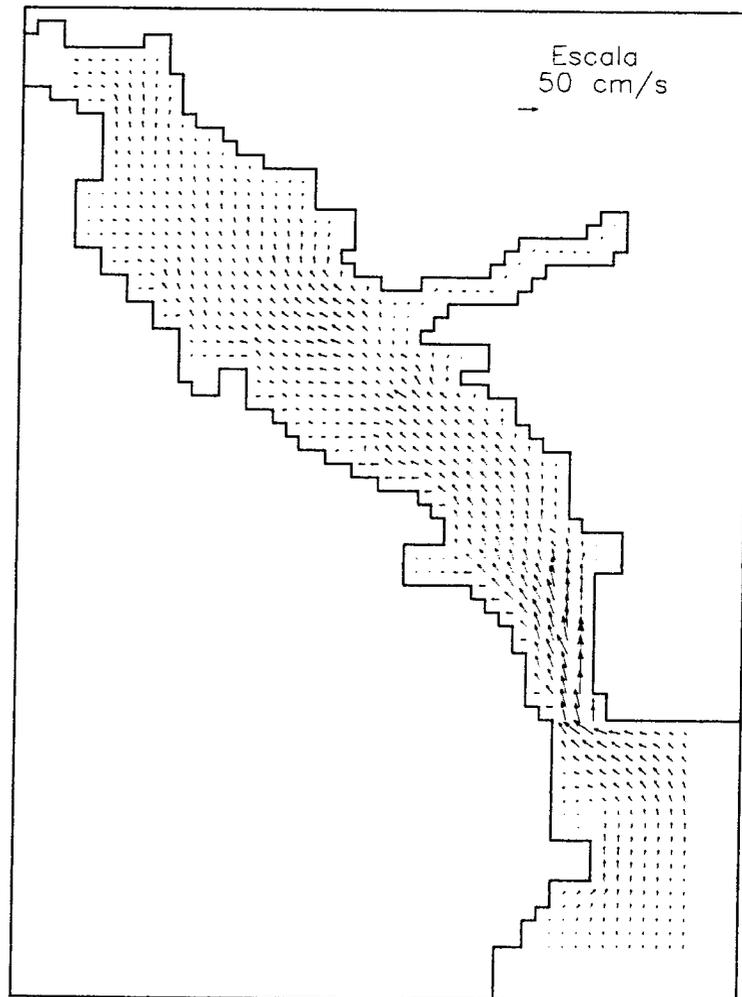
Distribución de corrientes modeladas en el tercer octavo de la marea.



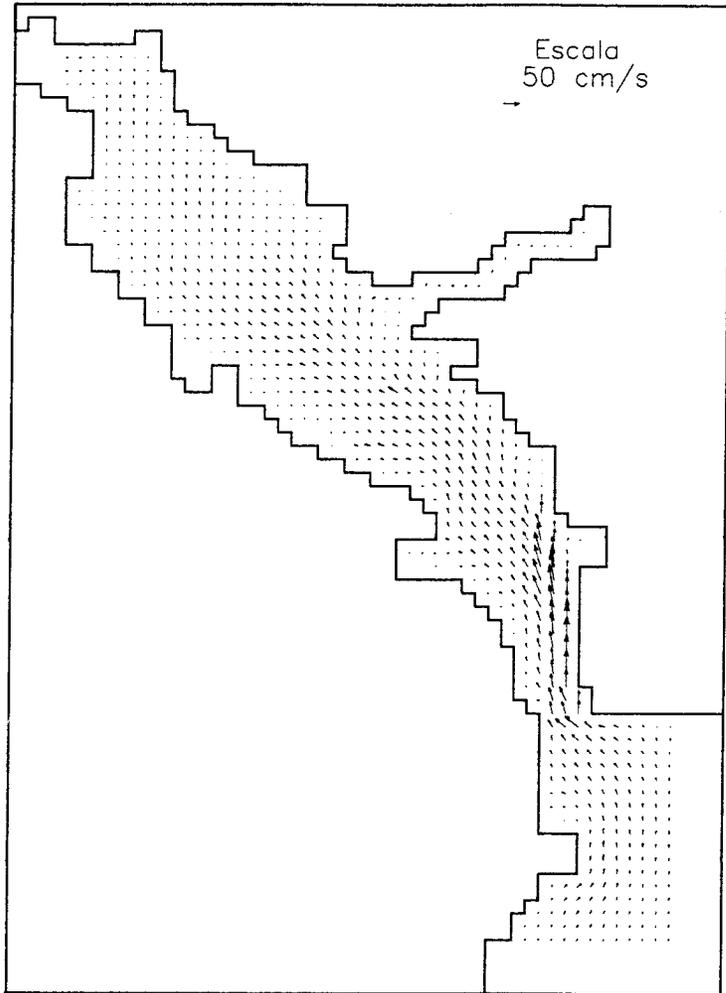
Distribución de corrientes modeladas en el cuarto octavo de la marea.



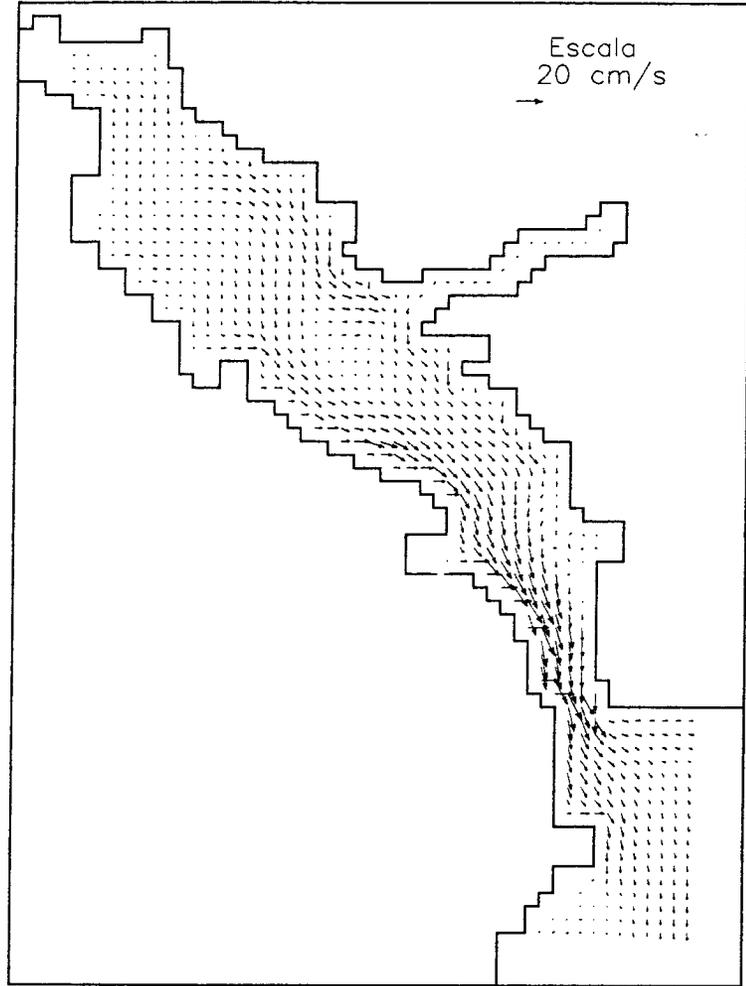
Distribución de corrientes simuladas en el quinto octavo del periodo de marea.



Distribución de corrientes simuladas en el sexto octavo del periodo de marea.



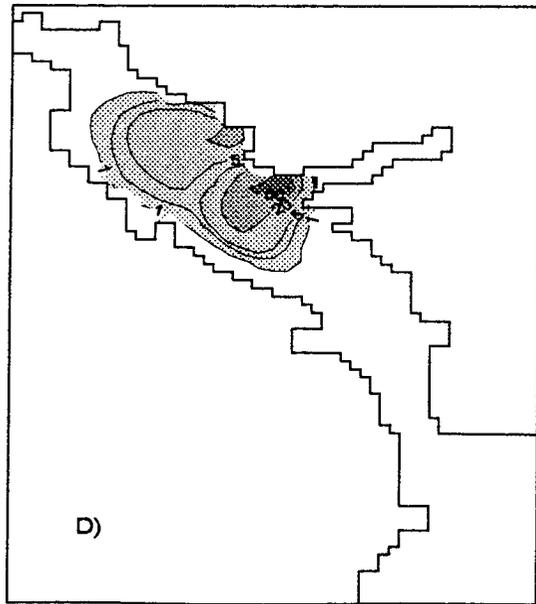
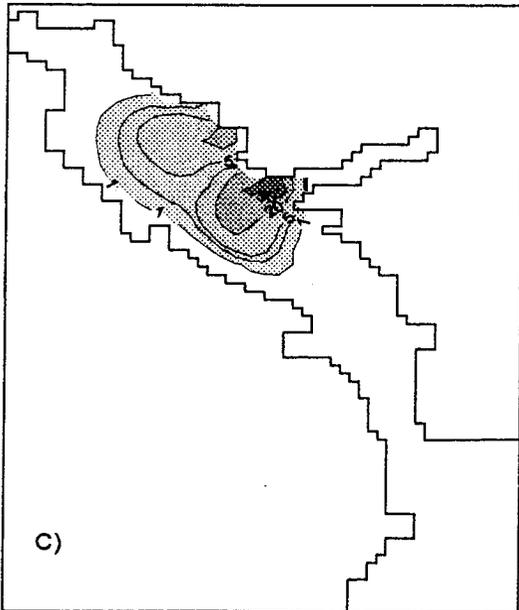
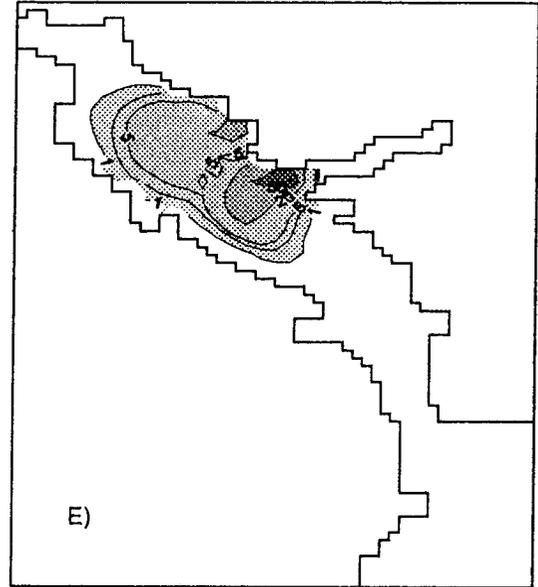
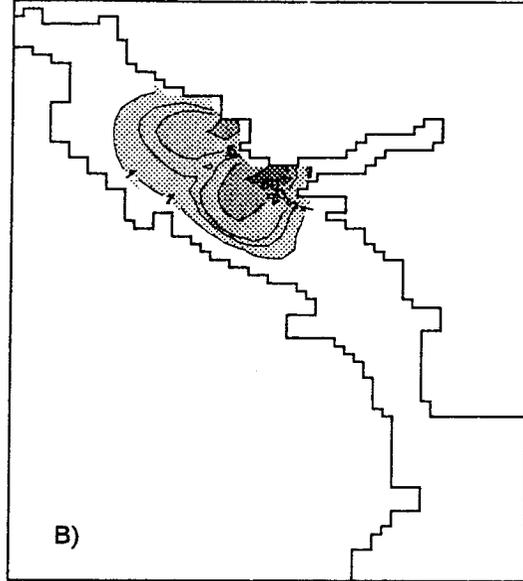
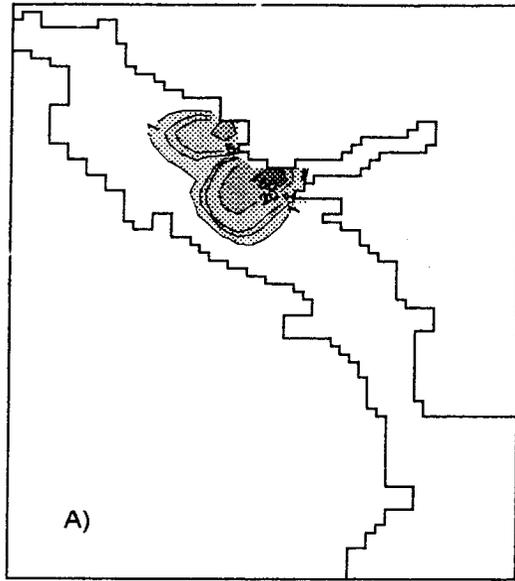
Distribución de corrientes simuladas en el séptimo octavo del periodo de marea.



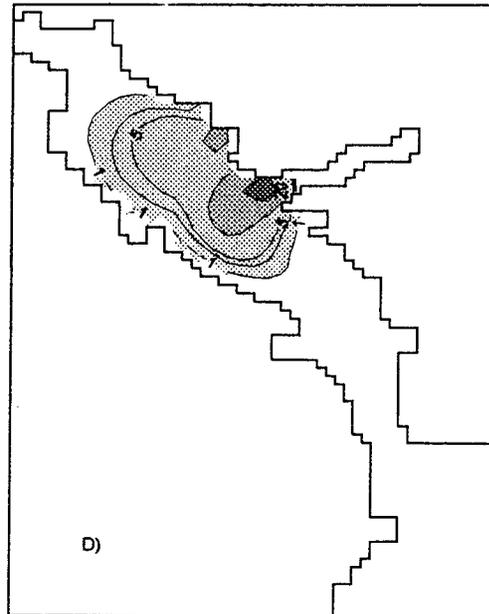
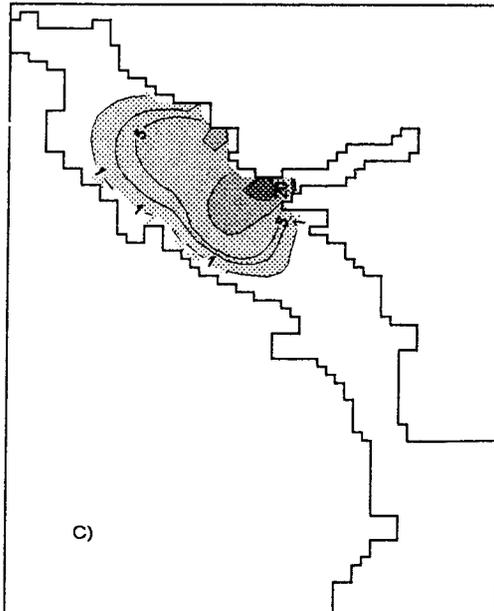
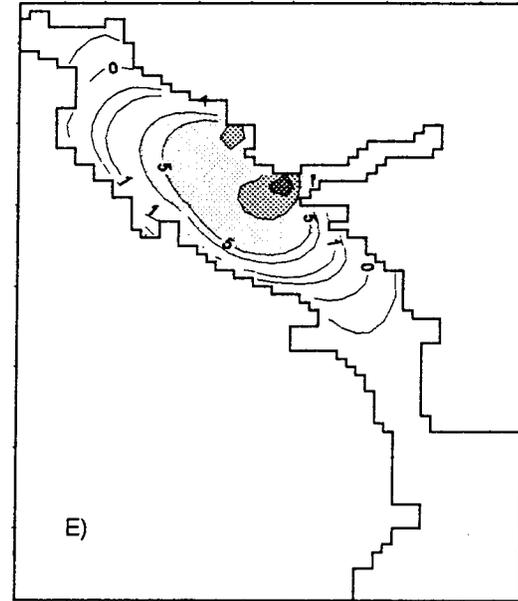
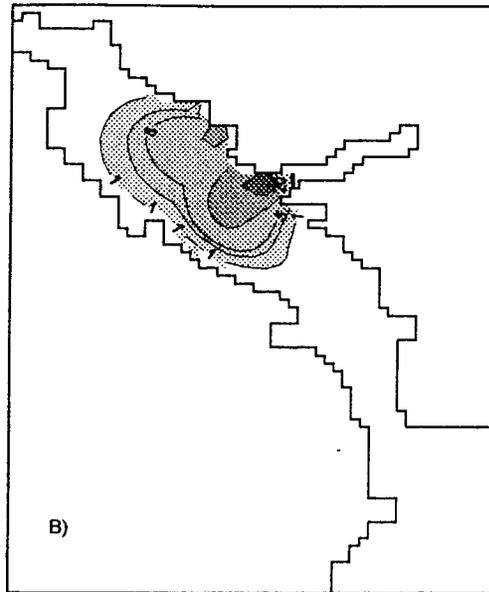
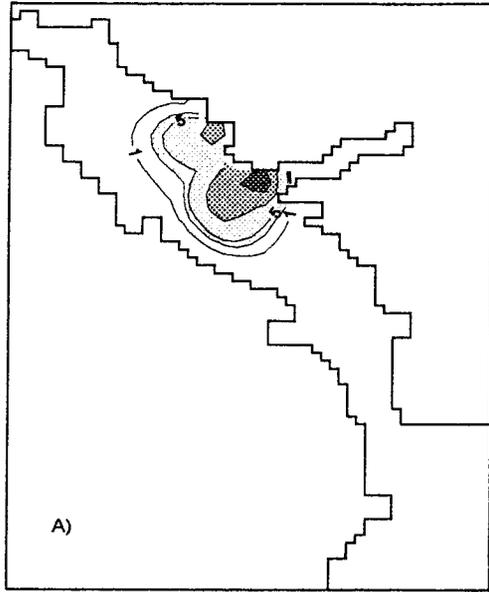
Distribución de corrientes simuladas en el último octavo del periodo de marea.

Anexo D:

**Modelación de la
dispersión de
contaminantes**



Distribución de masa simulada al primer (A), tercer (B), quinto (C), décimo (D) y trigésimo (E) día de inyección.
 Coef. difusión= 10^4



Distribución de masa simulada después del primer (A), tercer (B), quinto (C), décimo (D) y trigésimo (E) día de inyección.
Coeficiente de difusión 10^5