

5. *MODELADO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS NUTRIENTES EN EL TRAMO ESTUARINO DEL EBRO*

5.1. *Dificultades para desarrollar un modelo ecológico en el estuario del Ebro*

Los sistemas costeros como los estuarios, están sujetos a cambios climáticos y a las actividades humanas. Los problemas más importantes se concentran en los estuarios, debido a la presión que reciben por parte del desarrollo urbano e industrial, las descargas agrícolas y la explotación de recursos vivos o minerales. La complejidad de los procesos que se llevan a cabo en un estuario con las características del Ebro, como pueden ser los fuertes gradientes de salinidad y densidad, la abundancia de materia en suspensión, el tiempo de residencia, la influencia de las mareas, la producción biológica y el papel de la cadena trófica, deben ser tomados en cuenta para determinar el flujo y el destino de los nutrientes y contaminantes. La circulación del agua y el transporte de partículas influyen muchos de estos procesos, como la distribución espacial de los organismos, el transporte de nutrientes y contaminantes, la penetración de la luz y su efecto en la producción primaria, la naturaleza del fondo, los intercambios biogeoquímicos en la interfase agua sedimento y los procesos de erosión y sedimentación. Por estas razones, primero se desarrollan herramientas para simular la dinámica hidrodinámica y la sedimentaria, y se complementan con modelos que integran los fenómenos biológicos.

Generalmente, para desarrollar un modelo ecológico, se utiliza el principio general de la conservación de la masa, con el objeto de formular las ecuaciones de los constituyentes de importancia para el análisis en un modelo de este tipo. En su forma más simple, estas ecuaciones definen la concentración de un nutriente y, directa o indirectamente, relacionan su disponibilidad con el crecimiento del fitoplancton. En sus formas más complejas, pueden incorporar la interacción entre diferentes nutrientes, la especificación de diferentes tipos de fitoplancton y las relaciones depredador-presa entre niveles tróficos contiguos. Los nutrientes, que pueden atravesar diferentes transformaciones biogeoquímicas, pueden tener fuentes naturales o antropogénicas, y también pueden ser reciclados de fuentes internas por la excreción y la muerte de los organismos y el decaimiento de la materia orgánica dentro del sistema. Los constituyentes básicos del análisis son los nutrientes, el fitoplancton y el zooplancton. En un modelo ecológico se desarrolla una ecuación de balance de masa para cada uno de ellos (O'Connor, 1981).

En el caso del Estuario del Ebro, el desarrollo de un modelo ecológico, se dificulta principalmente por la falta de medidas experimentales para calcular la mayoría de los

coeficientes necesarios, como los coeficientes de crecimiento y mortalidad del fitoplancton, tasas de depredación, mortalidad de zooplancton, y otros, que servirían para el cálculo de los coeficientes para cada término de las ecuaciones necesarias. Por estos motivos y teniendo en cuenta que se contaba únicamente con los datos de las concentraciones de los nutrientes en la columna de agua, se optó en centrarse en el cálculo de los flujos de nutrientes del estuario al mar durante el periodo de estudio de este proyecto.

5.2. *Relación Salinidad-Nutrientes*

Las propiedades químicas en solución que son conservativas (no reactivas) o que parecen no tener reacciones por sus altas concentraciones, pueden ser usadas en estuarios como trazadores de la mezcla entre el agua dulce y el agua marina (Cifuentes *et al.* 1990). La salinidad es el índice primario de la mezcla. Las variaciones en las concentraciones y distribuciones de una sustancia en el agua dulce pueden ser evaluadas con su relación con el campo de salinidades. Bajo condiciones estables, se esperan distribuciones lineales de la propiedad y salinidad cuando la escala de tiempo de la variabilidad de la zona de mezcla en el río es mayor que el tiempo de residencia en el estuario (Cifuentes *et al.* 1990).

Las distribuciones propiedad-salinidad de sustancias disueltas que son conservativas, pero que varían significativamente en su concentración en periodos de tiempo similares o inferiores que el tiempo de residencia en el estuario pueden ser no lineales. Si los datos graficados caen en una línea recta, se dice que la sustancia se mezcla conservativamente. Si resulta una línea curva, entonces diferentes masas de agua con diferentes concentraciones se están mezclando o existe una fuente interna o un sumidero (Loder y Reichard, 1981) -ver figura 5.1-. Sin embargo, es usual que los ríos industrializados o con descargas urbanas tengan concentraciones que son muy variables. Consecuentemente, en estuarios con tiempos de residencia mayores que unos pocos días, estos cambios en las concentraciones pueden afectar la forma de la curva de mezcla. La eficacia de esta aproximación simple para interpretar los diagramas de propiedad-salinidad depende en la validez en asumir el estado estacionario. Cuando las concentraciones de la parte final varían con el tiempo, pueden producirse diagramas no lineales debido a la mezcla conservativa (Loder y Reichard, 1981). Kaul y Froelich (1984), indicaron que en un estuario prístino, las variaciones en las concentraciones de nutrientes podrían corresponder hasta un 10% de la reactividad aparente.

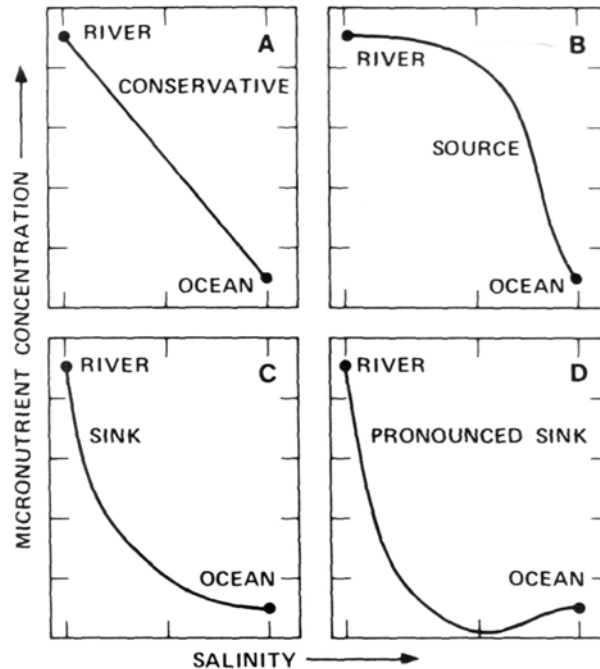


Figura 5.1. Diagrama idealizado de relaciones nutriente- salinidad, con la concentración y la mezcla de agua de río con el agua de mar. A. comportamiento conservativo. B. El estuario actúa como fuente. C. El estuario actúa como sumidero. D. Sumidero pronunciado (Tomado de Biggs y Cronning, 1981).

Los cambios en el flujo de río y las fluctuaciones de marea causan las variaciones en el tiempo de residencia en un estuario. Las propiedades químicas del medio marino pueden variar en diferentes escalas de tiempo. En consecuencia, para una propiedad conservativa, la curva de mezcla es función de la variabilidad en las propiedades del río y del flujo, el tiempo de residencia del estuario y cambios en las propiedades del medio marino. Por lo tanto, si se conocen el tiempo de residencia y las variaciones de las partes en función del tiempo, es posible predecir el comportamiento de la curva de mezcla para un estuario (Loder y Reichard, 1981). Officer y Lynch (1981), demostraron que para una relación del tiempo de residencia y la variación del aporte en el río, τ/T de aproximadamente 0.33, el aporte del río puede causar curvaturas en los diagramas de mezclas en la parte baja del rango de salinidades.

Loder y Reichard (1981) demostraron en su trabajo que las variaciones en las curvas de mezcla, comúnmente interpretadas como indicativas de fuentes o sumideros, pueden ser también producidas por constituyentes conservativos con variabilidad en el tiempo de las concentraciones en el tramo final. Y concluyeron que las curvas de mezcla entre la salinidad y las propiedades, producidas bajo condiciones conservativas o no conservativas en un estuario, pueden ser no lineales debido a la variabilidad temporal en las

concentraciones de la propiedad en el tramo final. La interpretación de procesos estuarinos a partir de las curvas de mezcla, debe efectuarse con el conocimiento de la variabilidad de los constituyentes y su relación con las propiedades de mezcla del estuario y el tiempo de residencia. Para evitar los problemas de balance de masa en la dinámica de nutrientes de los estuarios se utilizan también los diagramas de mezcla, ya que la medición del flujo de masa a través de una sección del estuario es técnicamente difícil y costosa (Pritchard y Schubel, 1981).

Uno de los usos frecuentes que tienen los diagramas de mezcla es el de cuantificar la adición o remoción de los nutrientes en el estuario (Hydes y Liss, 1977, Sanders *et al.* 1997). Este método implica la extrapolación hacia atrás de la regresión del Nutriente vs. Salinidad hasta la salinidad cero para encontrar la concentración efectiva del agua dulce ($C_{x,0}$). Esta concentración es después comparada con la concentración medida de la concentración de agua dulce en su tramo final ($C_{x,o}$) para calcular la adición o remoción (figura 5.2).

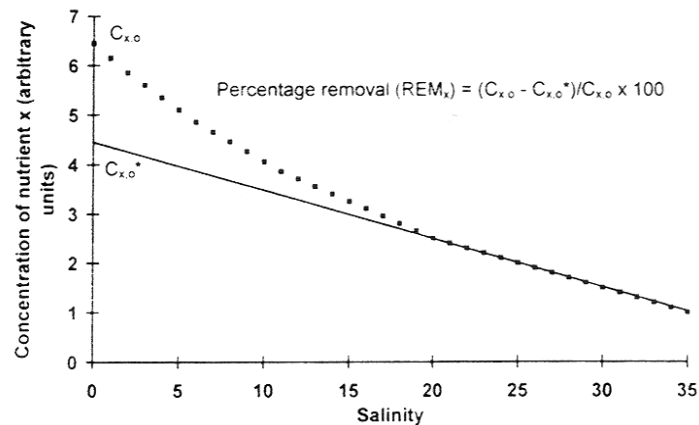


Figura 5.2. Método usado para inferir proporciones de adición o remoción de perfiles individuales de diagramas de mezcla, Hydes y Liss (1977).

5.3. Estimación de la distribución de nutrientes

La estimación de la distribución de los nutrientes en el estuario a lo largo del periodo de estudio, se realizó con el modelo de advección - dispersión descrito anteriormente (MIKE 12), sustituyendo los valores de la salinidad por valores de las concentraciones medidas de los nutrientes durante las campañas PIONEER. Se modelaron los valores obtenidos en el campo para Nitrógeno Total NT ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2 + \text{NH}_4$), Fósforo (PSR) y Silicio (SiO_4). Se incluyen valores de coeficientes de decaimiento para cada nutriente, los cuales han sido obtenidos de bibliografía. El valor del coeficiente de decaimiento, así como cada valor o expresión usado, es de mucha importancia en el proceso de modelación (Bowie *et al.*,

1985). Los valores de muchas constantes son dependientes de la forma en que van a ser usadas en las formulaciones del modelo. Ya que los valores de los coeficientes nunca son conocidos con certeza, se utilizaron varios pares con diferentes coeficientes de decaimiento para cada nutriente. Como en la mayoría de la bibliografía no existe un valor fijo para cada uno de ellos, se probó con varios de ellos y se optó por los que mejor se ajustaban a las medidas tomadas en el campo. Después de realizar varias pruebas con los coeficientes de decaimiento encontrados en la bibliografía, se escogieron los valores usados en el modelo, que se encuentran en la tabla V.1.

Tabla V.1. Coeficientes de decaimiento usados para el modelado de la dispersión de los nutrientes.

Constituyente	Coeficiente decaimiento [día ⁻¹]	Origen
NT (NO ₃ + NO ₂ + NH ₄)	0.022	Quenzer <i>et al.</i> , 1998
PSR	0.009	Quenzer <i>et al.</i> , 1998
SiO ₄	0.04	Scavia 1980, en Bowie <i>et al.</i> , 1985.

El modelado de la dispersión de los nutrientes se realizó para el periodo comprendido entre el 1 de marzo de 1999 y el 5 de Febrero del 2000. Los resultados del modelado se pueden observar en las gráficas 4.24 a 4.59.

5.3.1. Nitrógeno total

Para el modelado del Nitrógeno, las especies analizadas en las muestras de campo (NO₃ + NO₂ + NH₄) se juntaron en una sola para formar el Nitrógeno total (NT), debido a que en ambas capas la porción del NO₃ constituye el mayor porcentaje de entre las especies analizadas en los muestreos de la capa superior y de la capa inferior (94 y 70% respectivamente). En ambos casos el NO₂ solo constituía el 1% del total y el NH₄ el 5% en la capa superior y hasta el 29% en la inferior (ver tabla V.2).

Tabla V.2. Porcentaje de las especies del Nitrógeno en el Nitrógeno Total (NT).

Especie del Nitrógeno	capa superior	capa inferior
NO ₃	94%	70%
NO ₂	1%	1%
NH ₄	5%	29%

Los resultados del modelo para el NT en la capa superior (agua dulce) muestran, en general, que este tiende a sobreestimar los valores medidos en el campo, especialmente en invierno y en menor medida en primavera (ver figuras 5.3 a 5.8). Sin embargo, tienden a ajustarse mas durante el verano y el otoño. También se observa que siguen la misma tendencia que los resultados obtenidos en los muestreos. Según los resultados del modelo, las concentraciones de NT aumentan a medida que se incrementa la distancia a la desembocadura, pasando de un máximo aproximado de 800 μM en R1 a mas de 1000 μM en R6 (ambos en invierno).

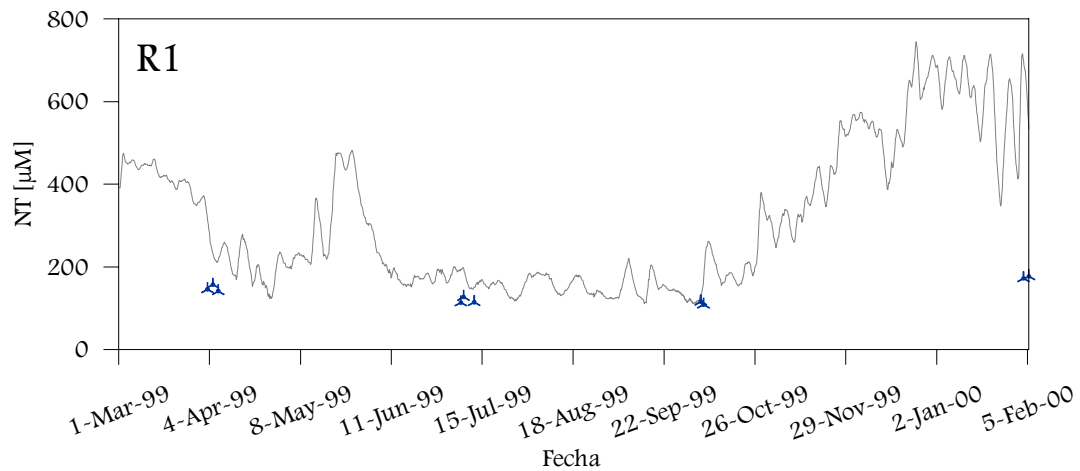


Figura 5.3. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R1, capa superior.

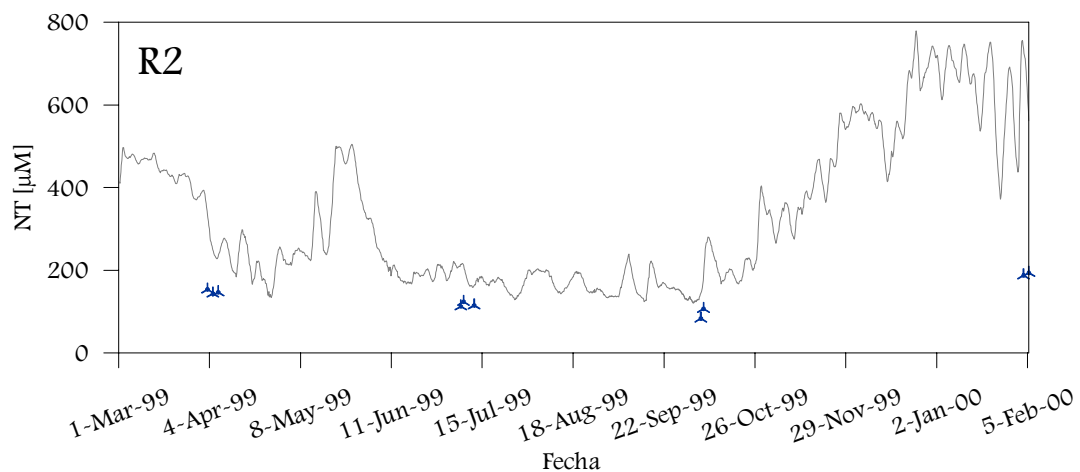


Figura 5.4. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R2, capa superior.

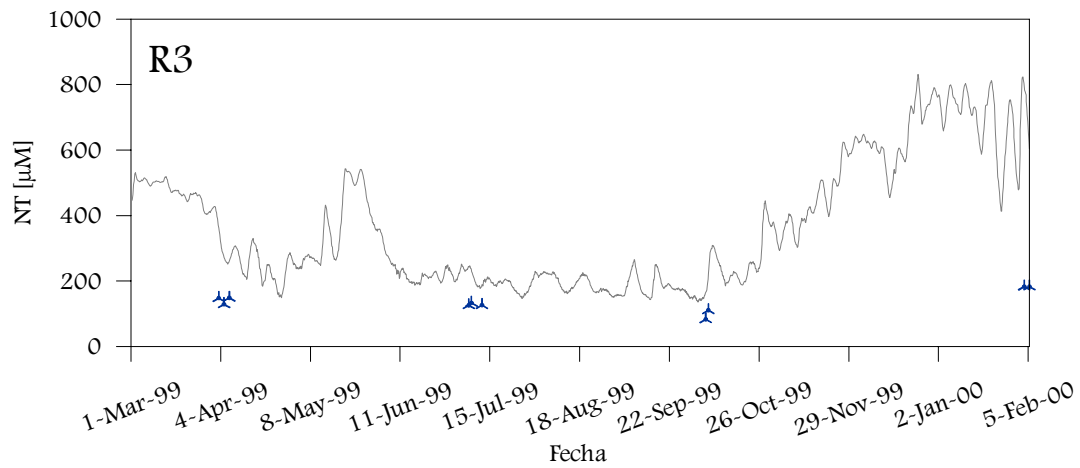


Figura 5.5. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R3, capa superior.

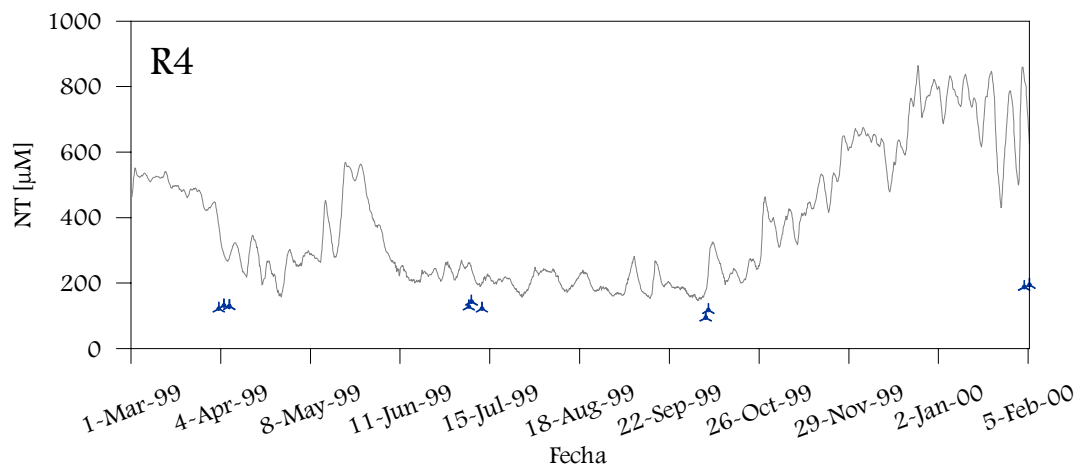


Figura 5.6. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R4, capa superior.

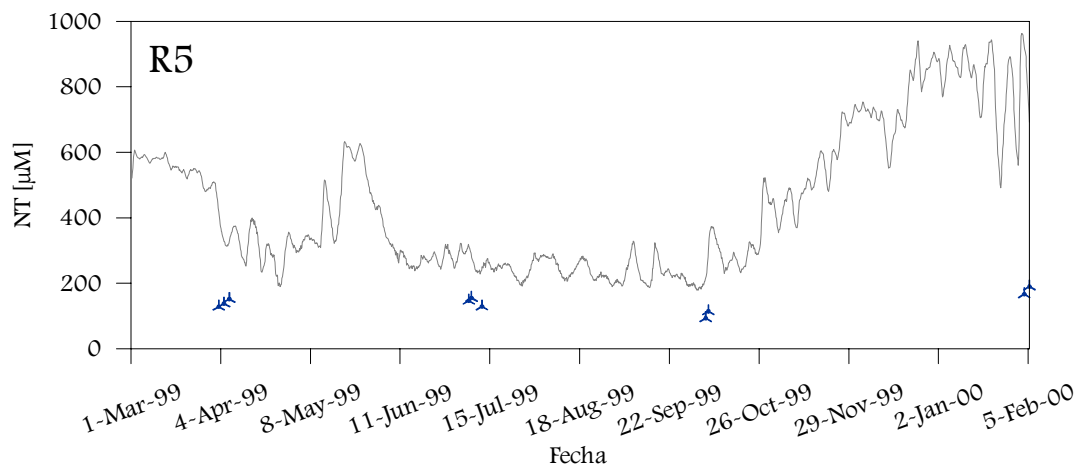


Figura 5.7. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R5, capa superior.

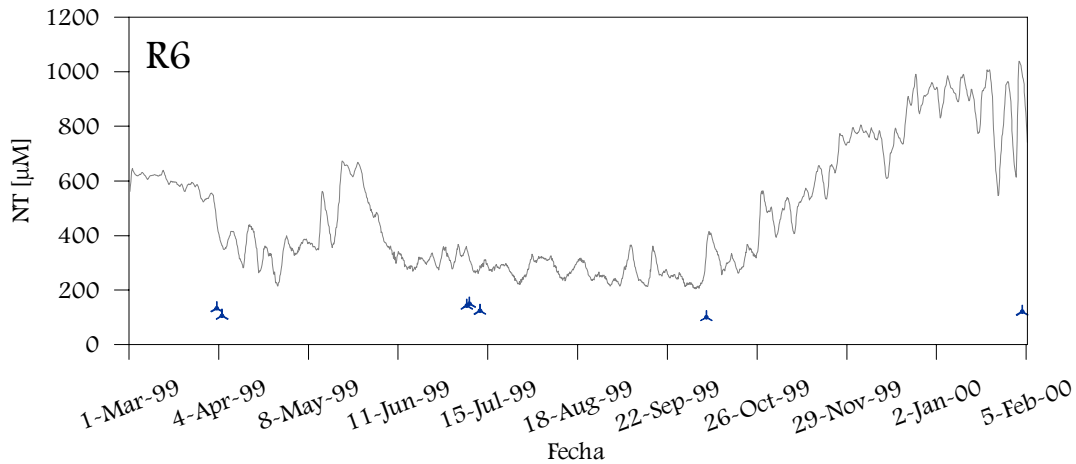


Figura 5.8. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R6, capa superior.

En el caso de la capa inferior (cuña salina), los resultados del modelo muestran en las estaciones R1 a R4 un ajuste bastante bueno con los resultados obtenidos en los muestreos de campo. En las estaciones R5 y R6 se observa un mejor ajuste para las épocas de primavera e invierno (en R6 no hubo muestreo de invierno porque no se localizó cuña salina). Estas estaciones (R5 y R6) muestran unas diferencias grandes en las épocas de verano y otoño, que pueden ser debidas a la influencia del agua salada que ya se presenta en esta zona. El modelo tiende a aumentar la concentración del NT en la boca del estuario (R1), de 500 μM hacia la mitad del estuario, donde alcanza los 900 μM , volviendo a disminuir hacia la isla de Gracia, de nuevo a 500 μM (figuras 5.9 a 5.14).

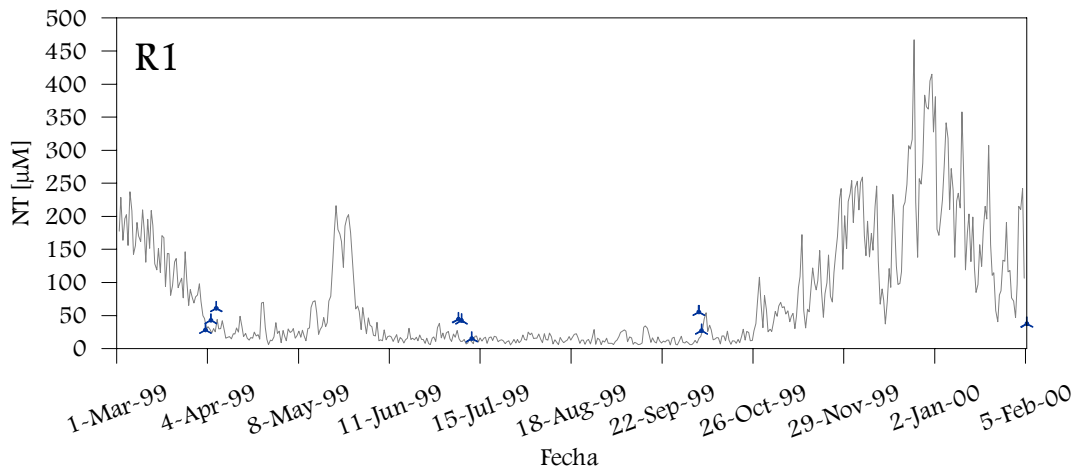


Figura 5.9. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R1, capa inferior.

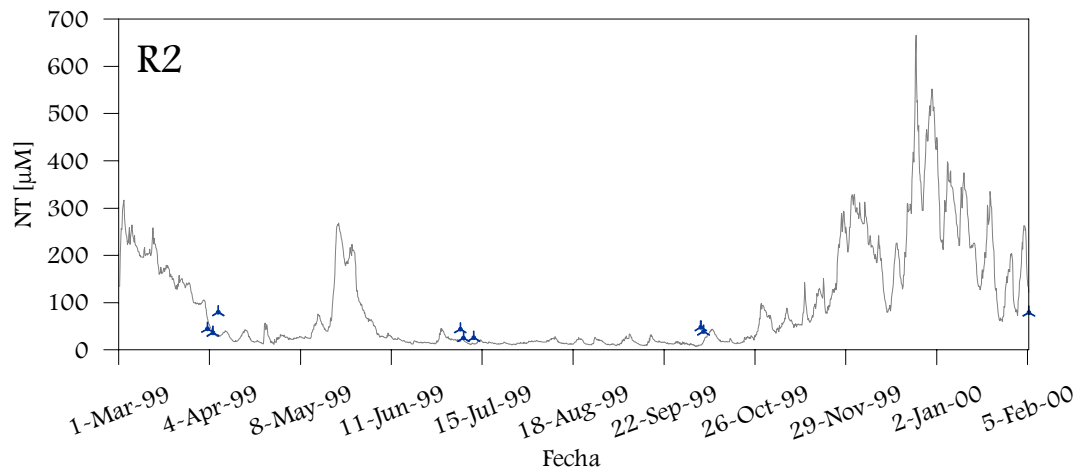


Figura 5.10. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R2, capa inferior.

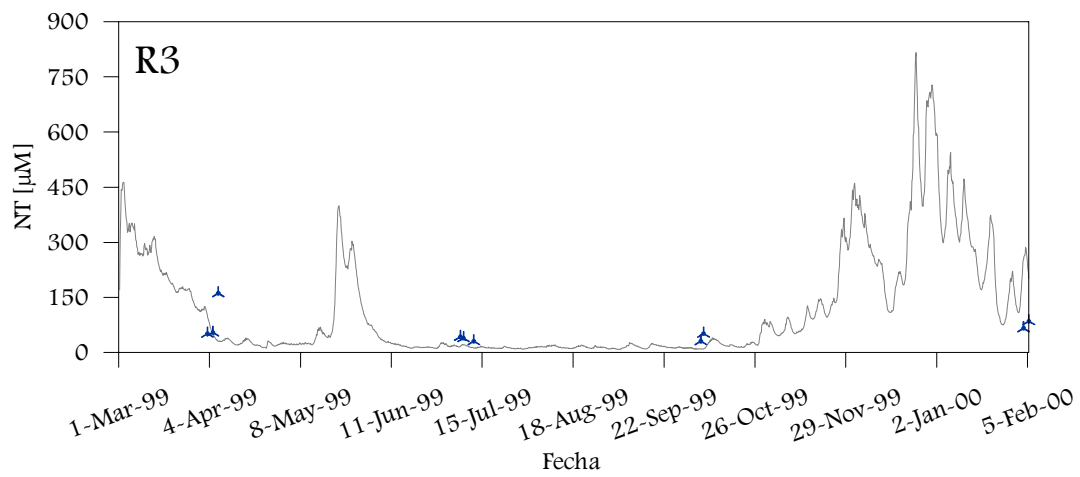


Figura 5.11. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R3, capa inferior.

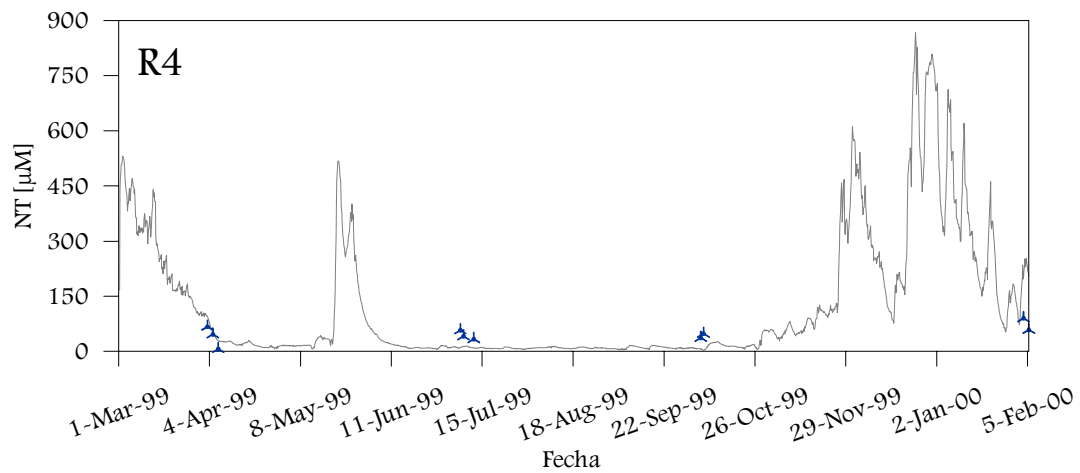


Figura 5.12. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R4, capa inferior.

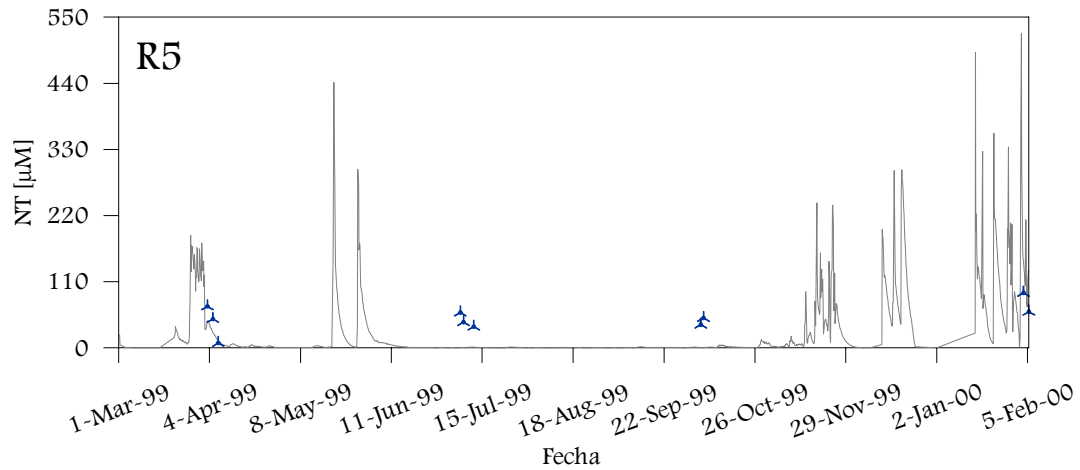


Figura 5.13. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R5, capa inferior.

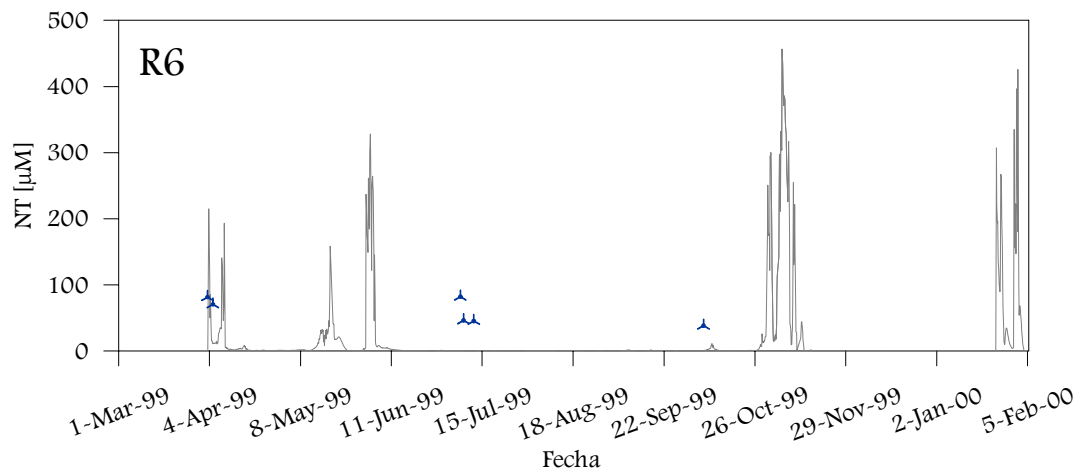


Figura 5.14. Distribución de la dispersión del NT durante el periodo de estudio, estación R6, capa inferior.

5.3.2. Fósforo soluble Reactivo (PSR)

Al igual que con el NT, los resultados del modelo sobreestiman los valores medidos para el PSR, aunque también se observa que se sigue la misma tendencia que los datos muestreados. Se puede apreciar un aumento en la concentración del ortofosfato a medida que crece la distancia a la estación más cercana a la boca (R1), de 8 μM en esta estación hasta 20 μM en R6 (figuras 5.15 a 5.20).

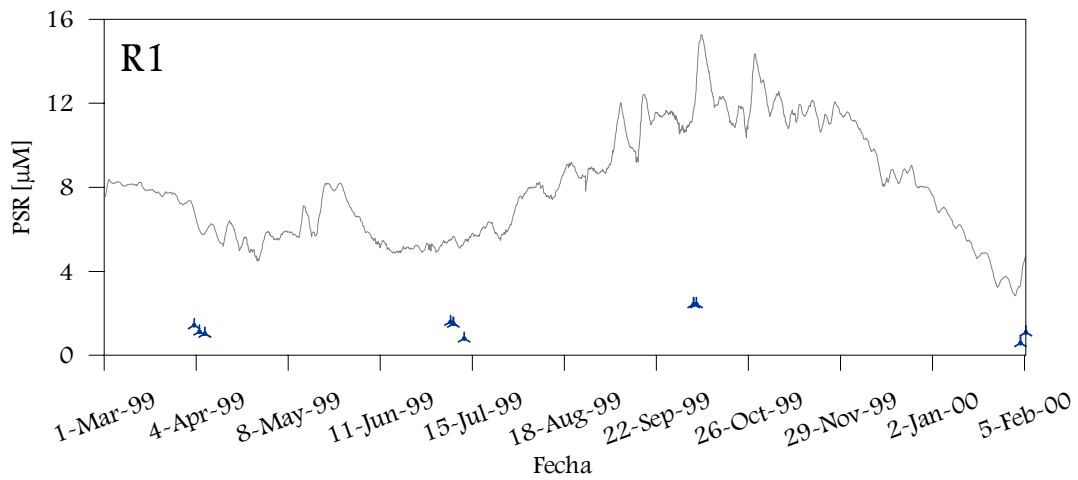


Figura 5.15. Distribución de la dispersión del FSR durante el periodo de estudio, estación R1, capa superior.

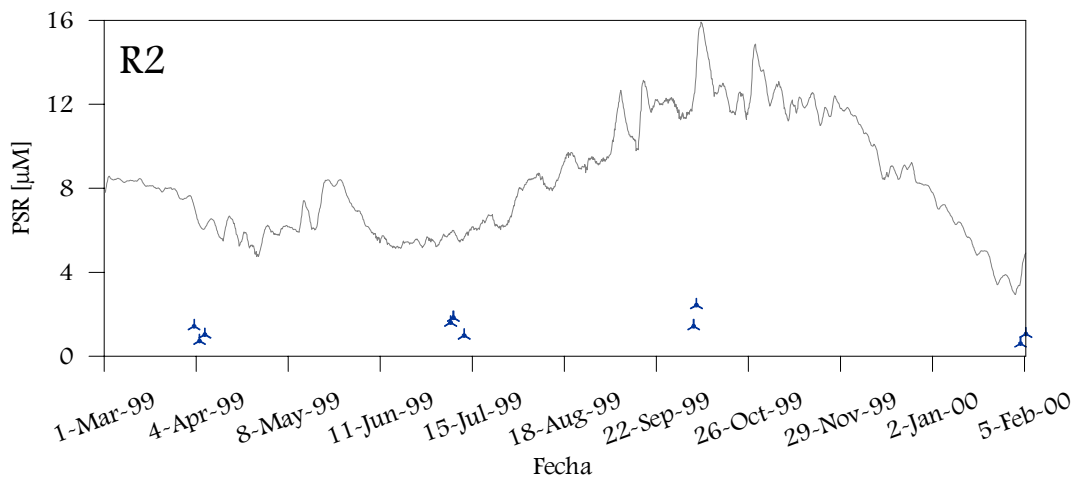


Figura 5.16. Distribución de la dispersión del FSR durante el periodo de estudio, estación R2, capa superior.

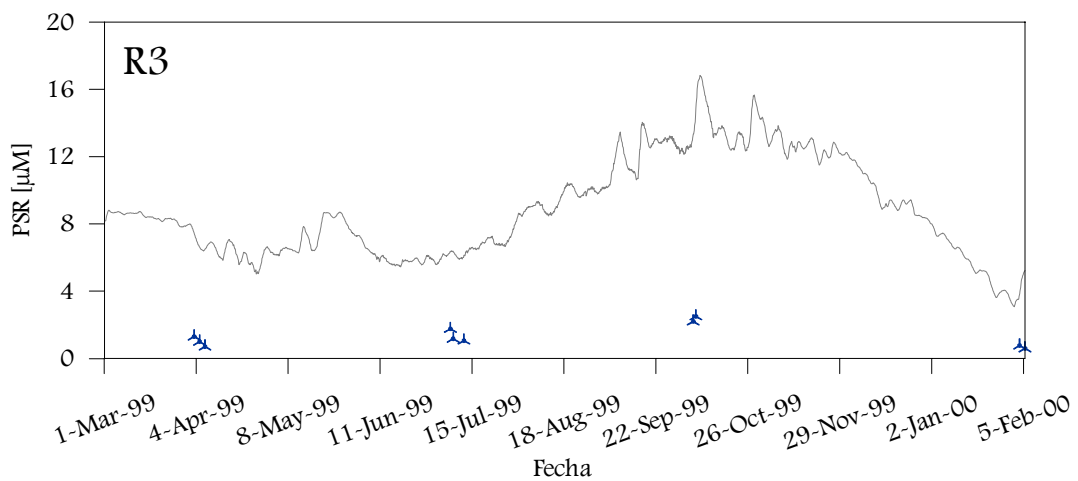


Figura 5.17. Distribución de la dispersión del FSR durante el periodo de estudio, estación R3, capa superior.

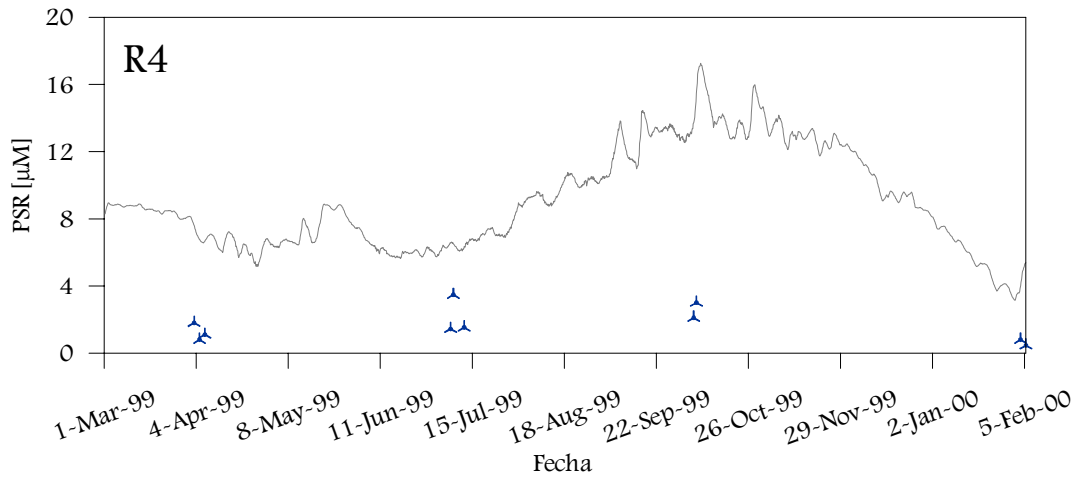


Figura 5.18. Distribución de la dispersión del FSR durante el periodo de estudio, estación R4, capa superior.

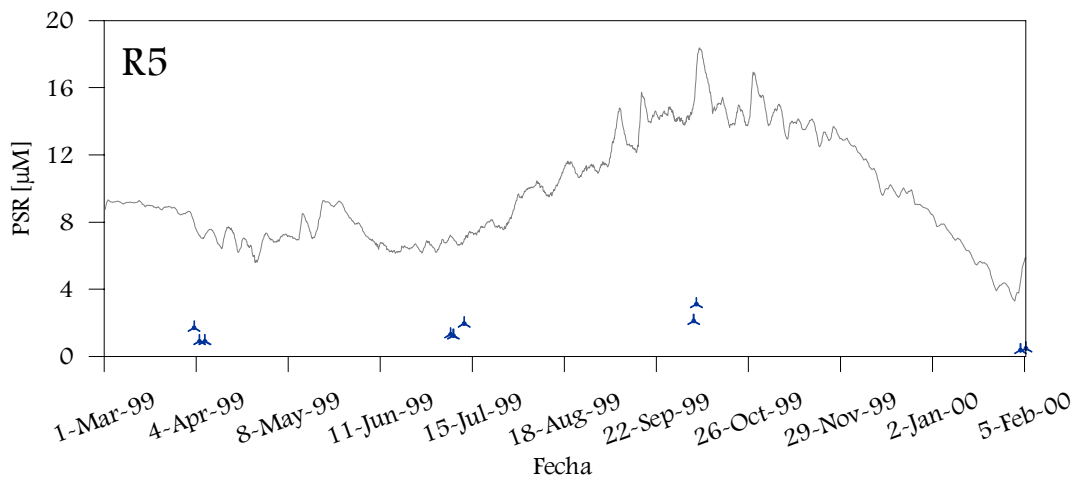


Figura 5.19. Distribución de la dispersión del FSR durante el periodo de estudio, estación R5, capa superior.

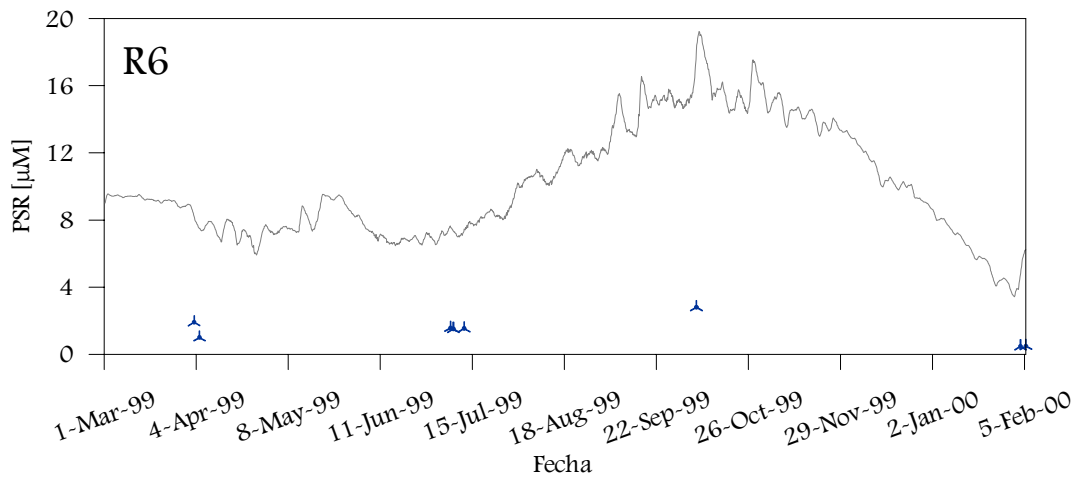


Figura 5.20. Distribución de la dispersión del FSR durante el periodo de estudio, estación R6, capa superior.

Las siguientes figuras (5.21 a 5.26) muestran los resultados del modelo para el PSR en la cuña salina (capa inferior). Aquí se puede observar que los resultados se ajustan muy bien a las medidas de campo. Sin embargo, ya en la estación R4 (figura 4.45) se observa que para los periodos de verano y otoño el modelo tiende a subestimar a los valores medidos en las campañas, y se hace mas notable en las estaciones R5 y R6 (figuras 4.46 y 4.47 respectivamente), aunque en primavera y en invierno muestran un mejor ajuste.

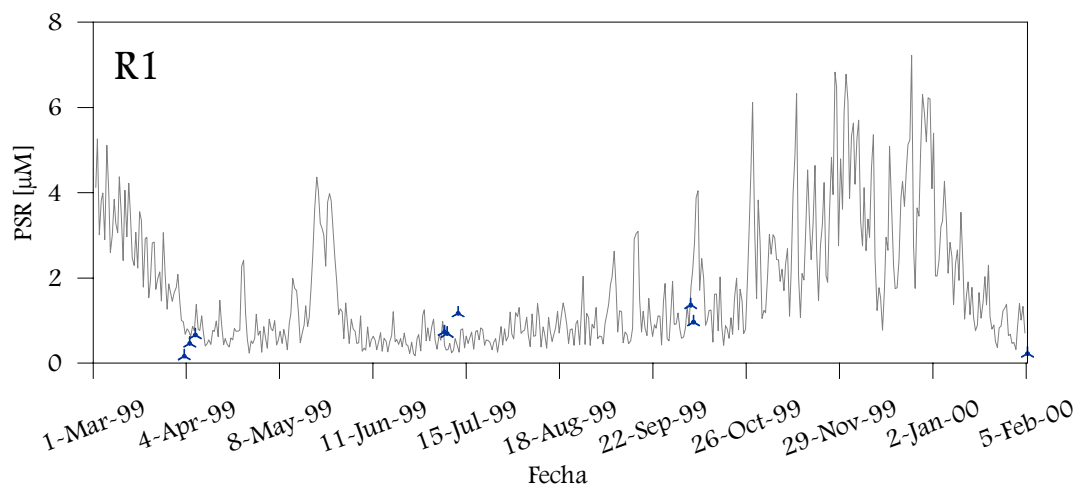


Figura 5.21. Distribución de la dispersión del PSR durante el periodo de estudio, estación R1, capa inferior.

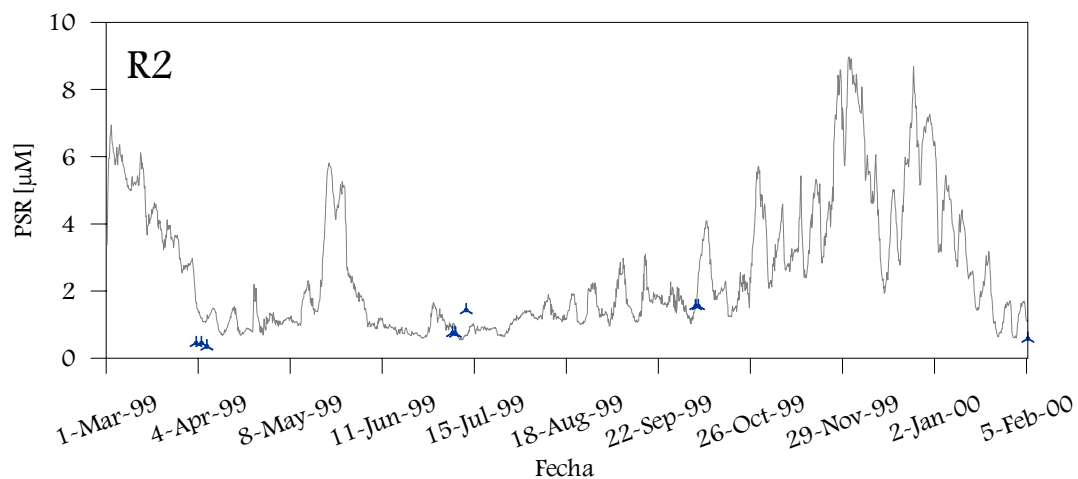


Figura 5.22. Distribución de la dispersión del PSR durante el periodo de estudio, estación R2, capa inferior.

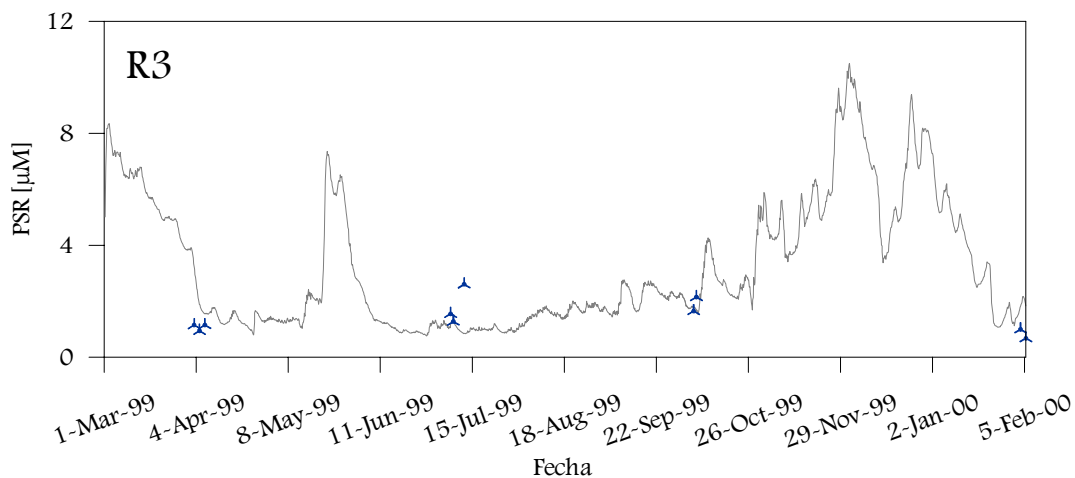


Figura 5.23. Distribución de la dispersión del PSR durante el periodo de estudio, estación R3, capa inferior.

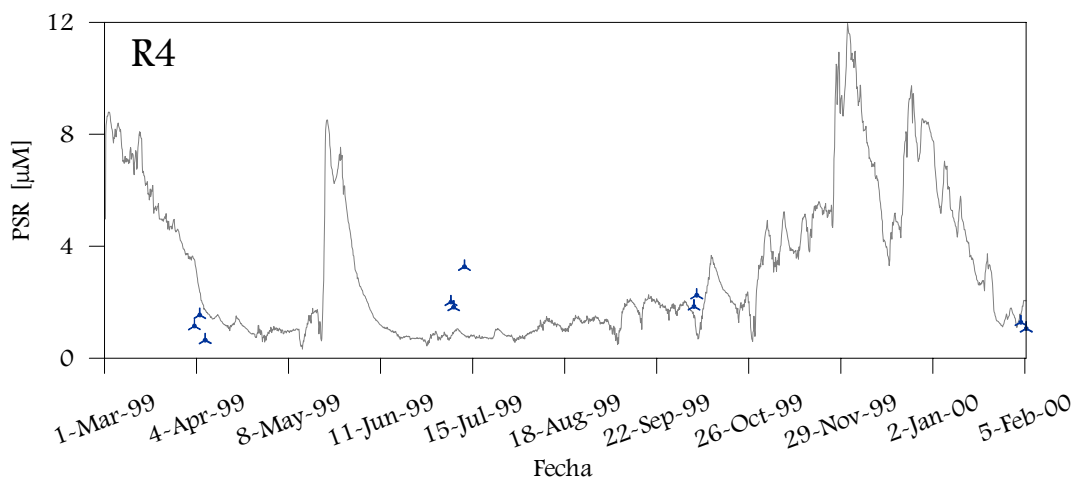


Figura 5.24. Distribución de la dispersión del PSR durante el periodo de estudio, estación R4, capa inferior.

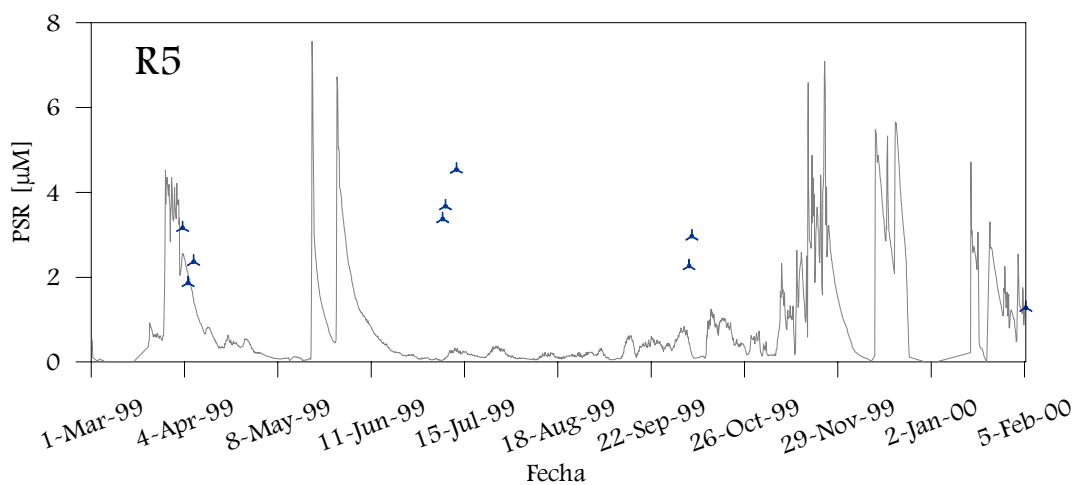


Figura 5.25. Distribución de la dispersión del PSR durante el periodo de estudio, estación R5, capa inferior.

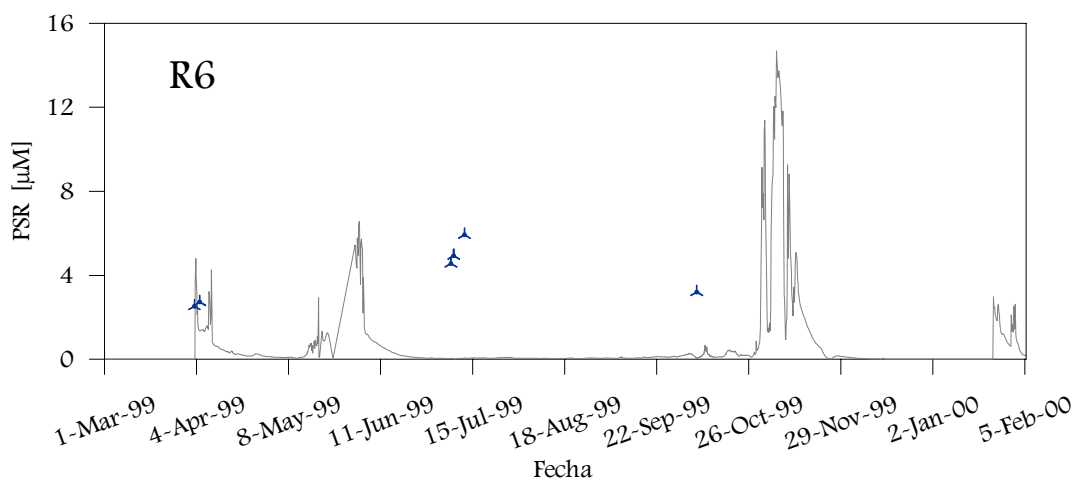


Figura 5.26. Distribución de la dispersión del FSR durante el periodo de estudio, estación R6, capa inferior.

5.3.3. Ácido Ortosilícico (SiO_4)

Al contrario que en los dos casos anteriores (NT y PSR), el ácido ortosilícico muestra un mejor ajuste en la capa superior (figuras 5.27 a 5.32), especialmente en la primavera y el invierno, mientras que el modelo subestima notablemente los valores medidos en verano y otoño.

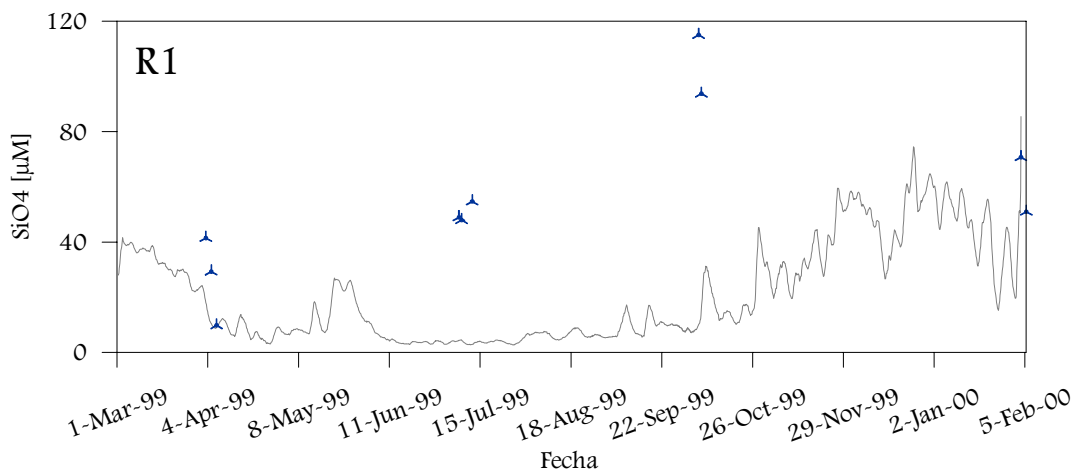


Figura 5.27. Distribución de la dispersión del SiO_4 durante el periodo de estudio, estación R1, capa superior.

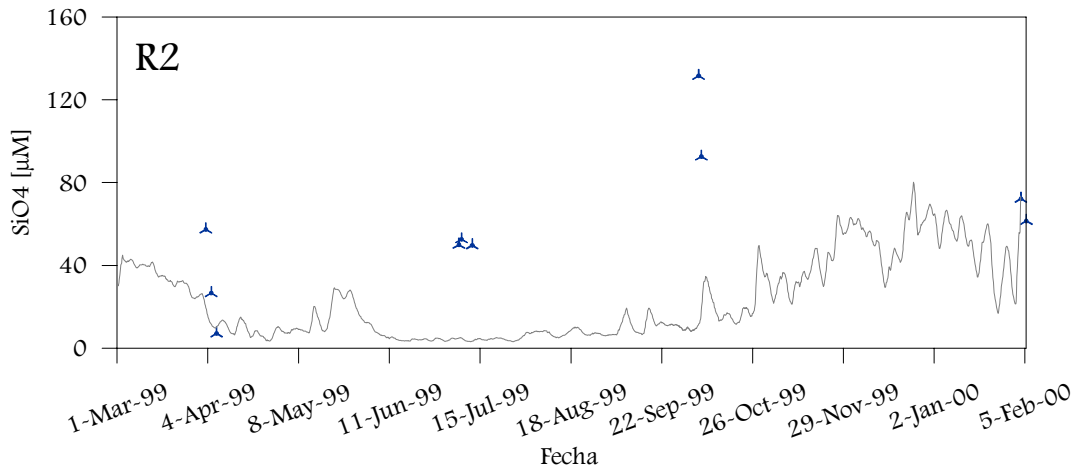


Figura 5.28. Distribución de la dispersión del SiO₄ durante el periodo de estudio, estación R2, capa superior.

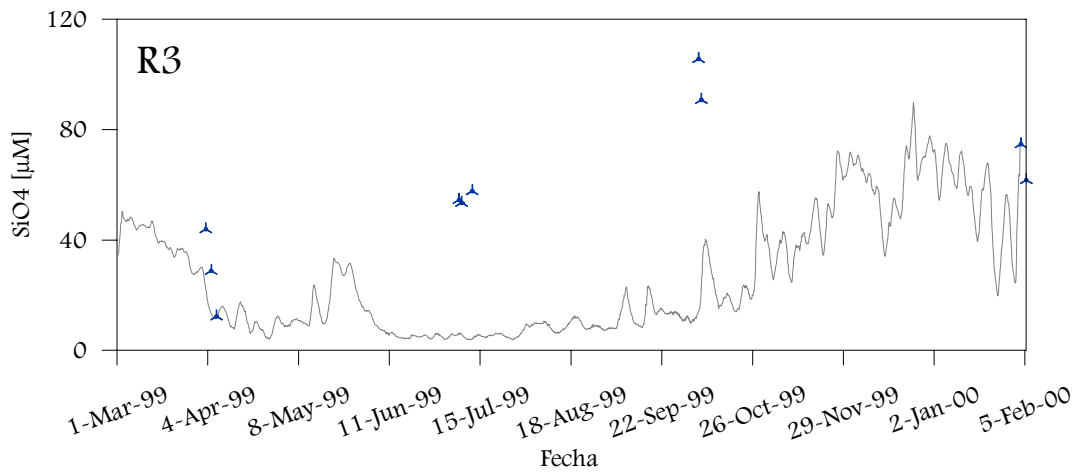


Figura 5.29. Distribución de la dispersión del SiO₄ durante el periodo de estudio, estación R3, capa superior.

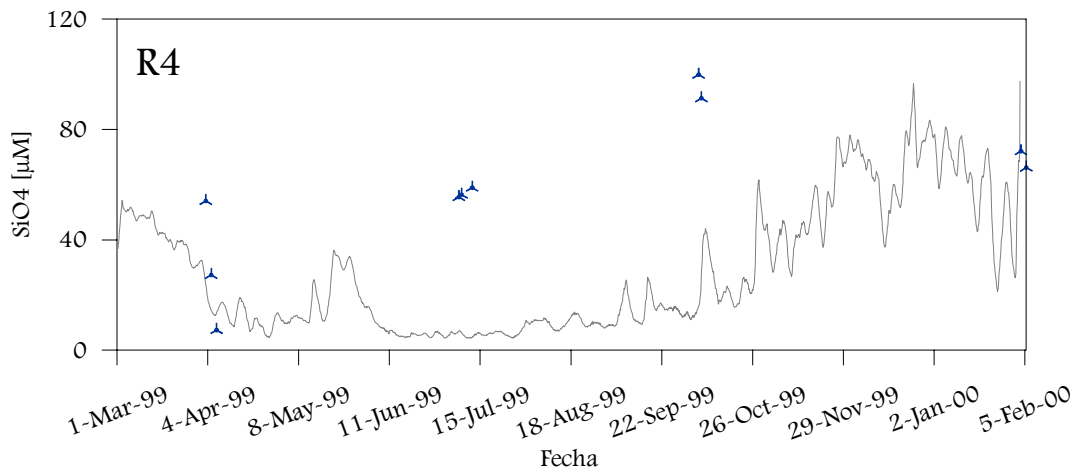


Figura 5.30. Distribución de la dispersión del SiO₄ durante el periodo de estudio, estación R4, capa superior.

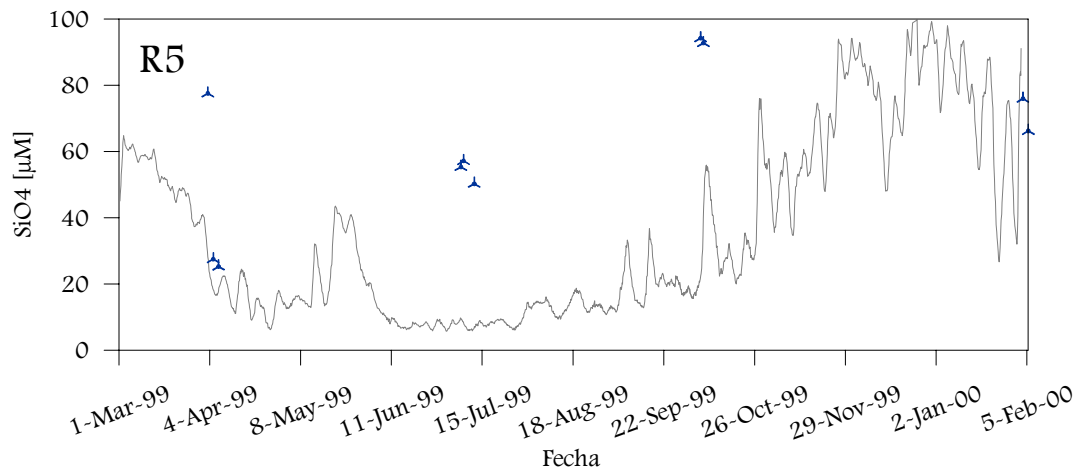


Figura 5.31. Distribución de la dispersión del SiO₄ durante el periodo de estudio, estación R5, capa superior.

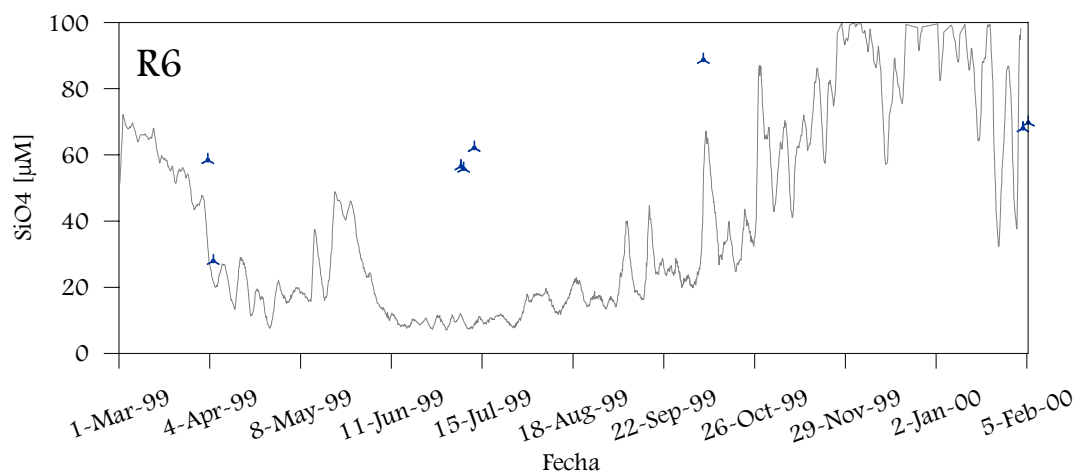


Figura 5.32. Distribución de la dispersión del SiO₄ durante el periodo de estudio, estación R6, capa superior.

En el caso silicio en la cuña salina (figuras 5.33 a 5.38), el modelo subestima en todos los casos las medidas de campo, excepto en el caso de invierno; en primavera se consigue un ajuste mas o menos aceptable, pero en verano y otoño, los resultados arrojados por el modelo están muy por debajo de lo medido en el campo.

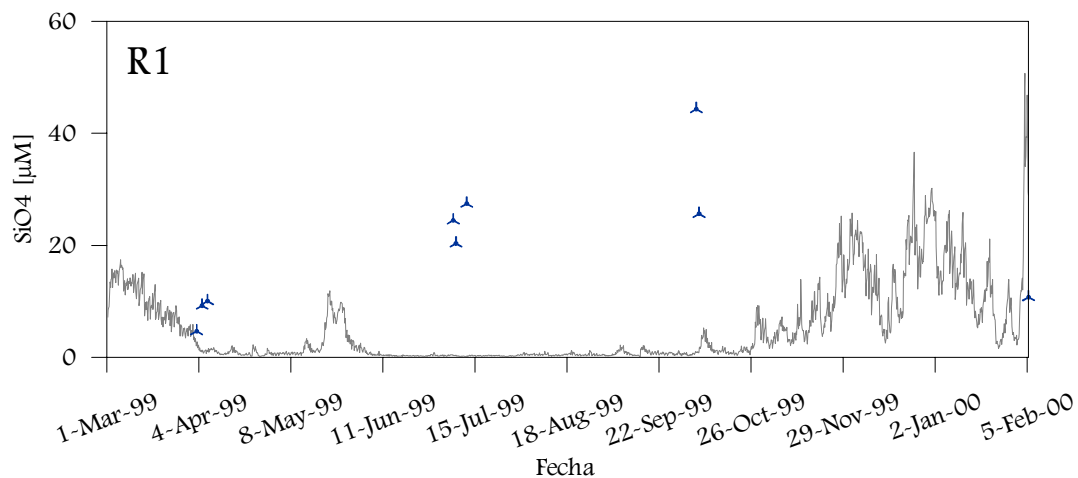


Figura 5.33. Distribución de la dispersión del SiO₄ durante el periodo de estudio, estación R1, capa inferior.

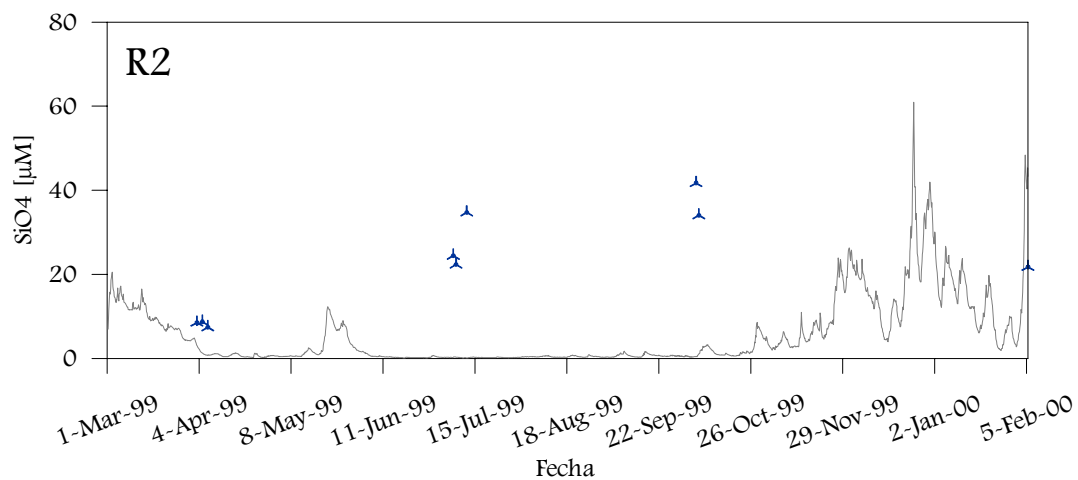


Figura 5.34. Distribución de la dispersión del SiO₄ durante el periodo de estudio, estación R2, capa inferior.

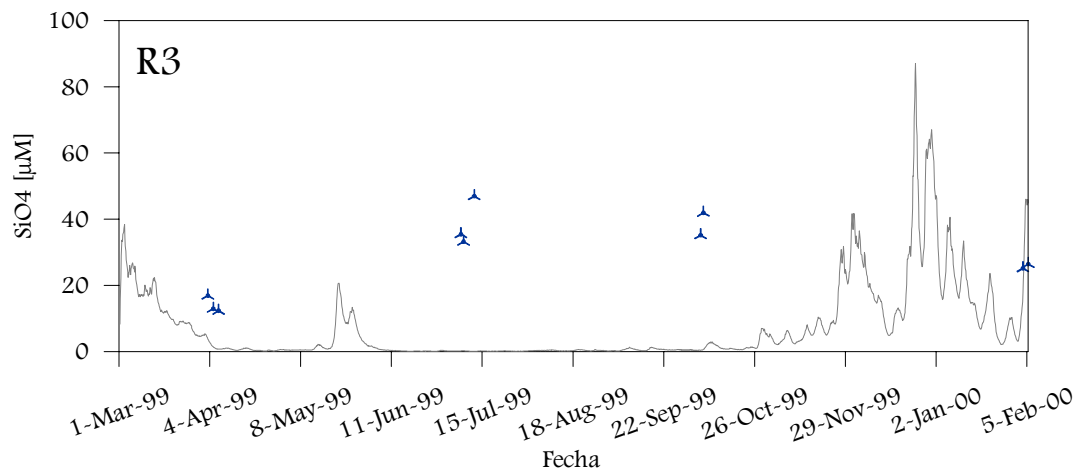


Figura 5.35. Distribución de la dispersión del SiO₄ durante el periodo de estudio, estación R3, capa inferior.

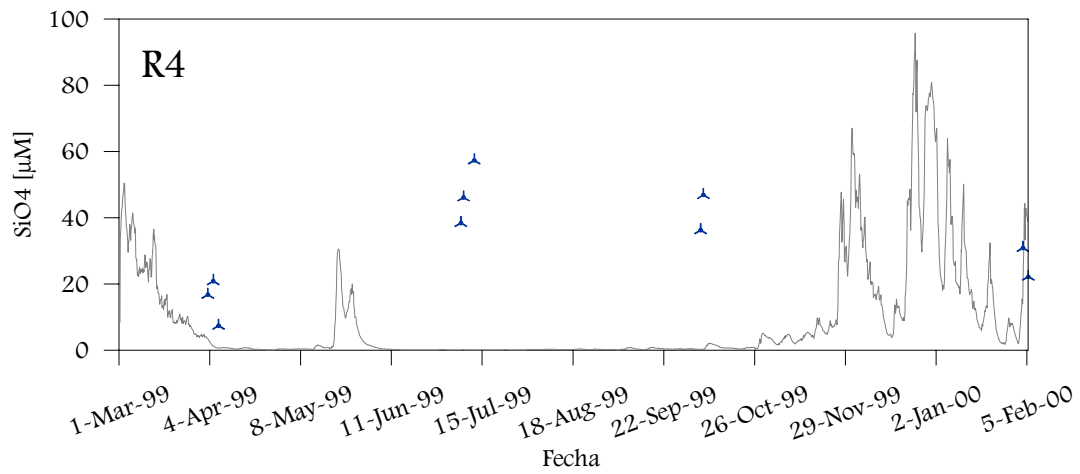


Figura 5.36. Distribución de la dispersión del SiO_4 durante el periodo de estudio, estación R4, capa inferior.

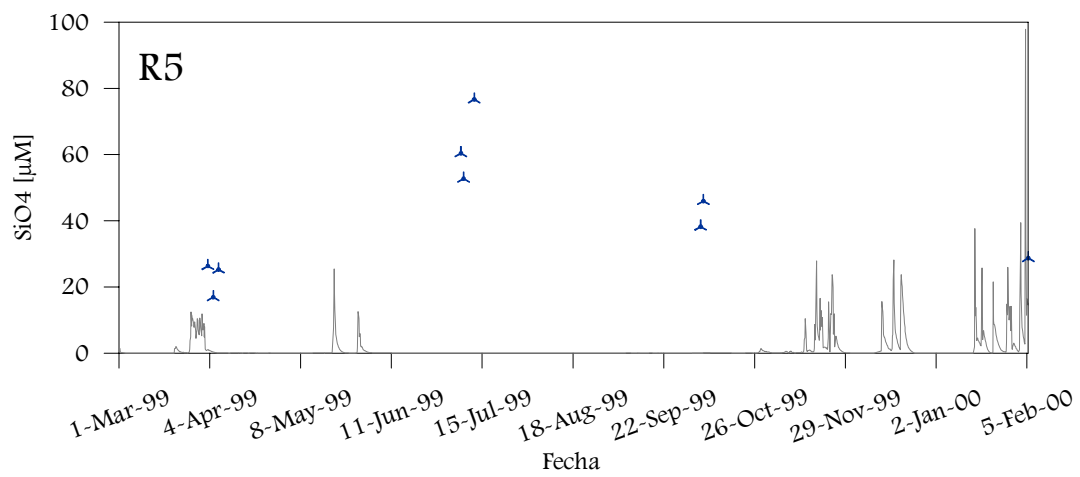


Figura 5.37. Distribución de la dispersión del SiO_4 durante el periodo de estudio, estación R5, capa inferior.

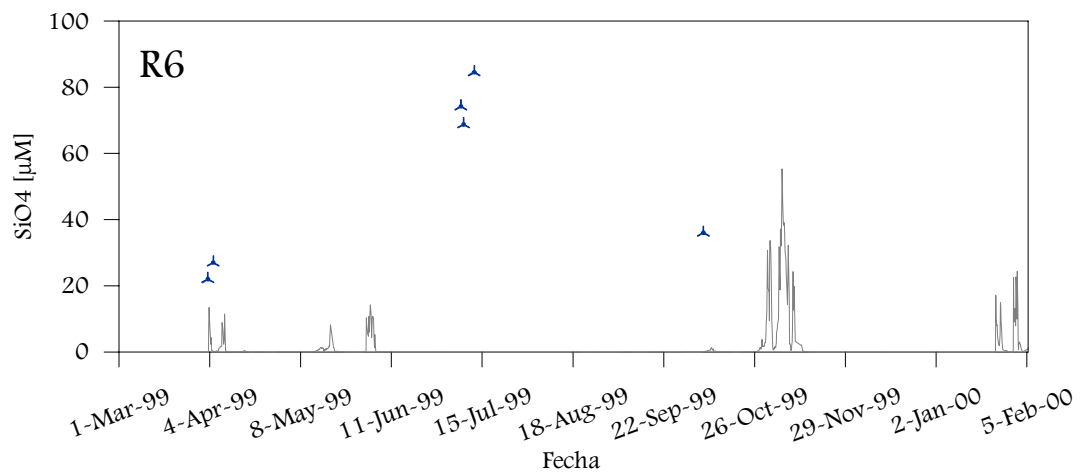
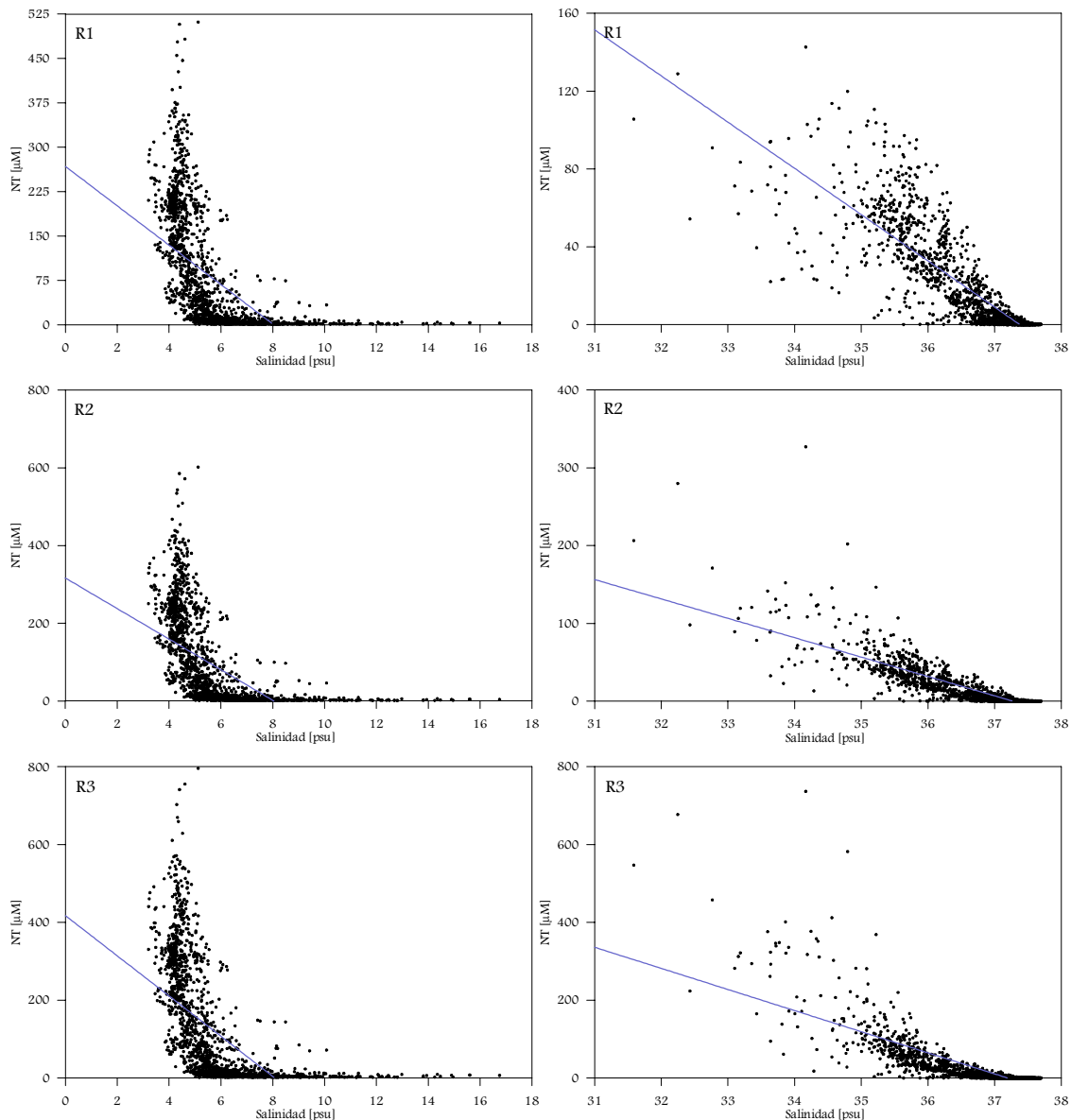


Figura 5.38. Distribución de la dispersión del SiO_4 durante el periodo de estudio, estación R6, capa inferior.

5.3.4. Diagramas Salinidad - Nutriente.

La figura 5.39 muestra la relación salinidad-nutriente para el NT de los resultados obtenidos en el modelo, tanto para la capa superior (a) como para la cuña salina (b). En todos los casos se observa que la capa superior funciona como un sumidero de nutrientes y que las concentraciones disminuyen desde R6 hacia la desembocadura. Además, la principal zona de pérdida de nutrientes está en las salinidades bajas (entre 4 y 6 psu). En cambio, en la zona de la cuña salina, el NT se comporta de una forma conservativa, con una clara relación lineal entre la salinidad y la concentración del nutriente, aunque en R5 y R6 el comportamiento es diferente. En dichas estaciones, en la zona de mas alta salinidad, que puede considerarse la mas cercana al fondo, hay un aporte de nitrógeno, presumiblemente debido a la descomposición de la materia orgánica del fondo.



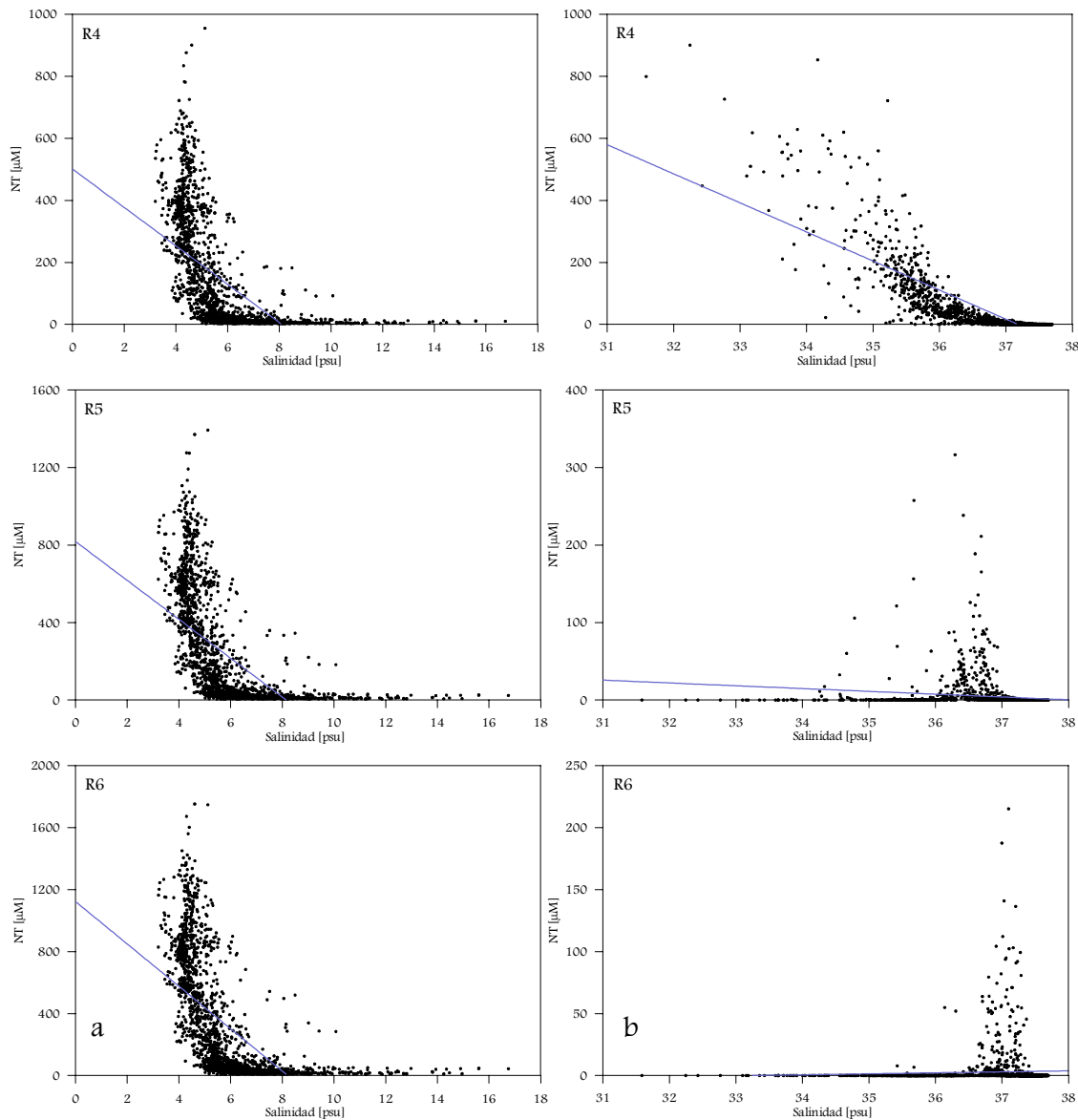
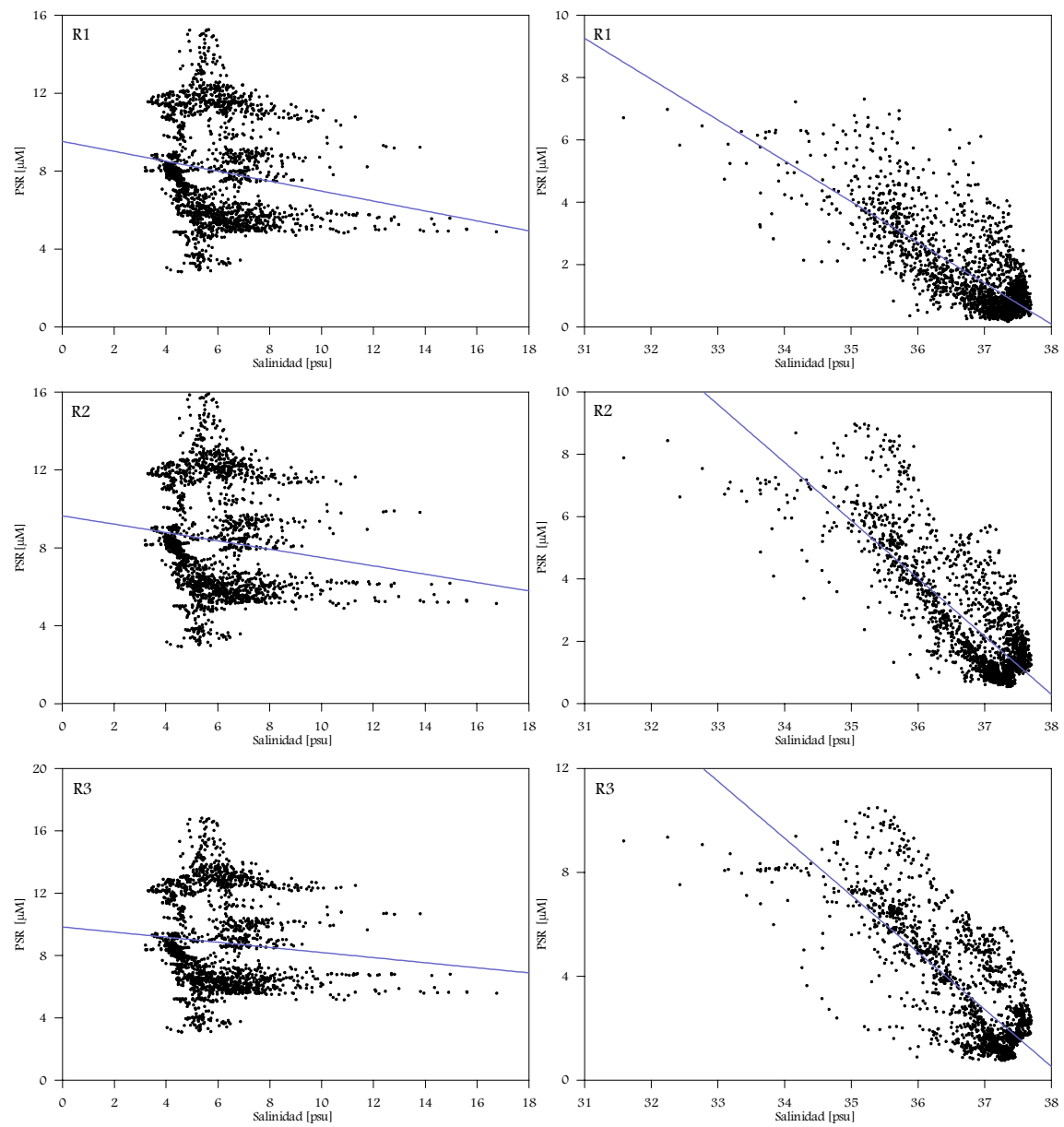


Figura 5.39. Diagramas salinidad - nutriente para el NT, a la izquierda (a) la capa superior (agua dulce) y a la derecha (b) la capa inferior (cuña salina).

El caso del PSR (figura 5.40) tiene en la capa superior un comportamiento singular según los resultados del modelo. Cabe señalar que en estos gráficos se tienen en cuenta los resultados globales de la simulación, incluyendo todo el periodo de estudio. En la zona de bajas salinidades (4 - 6 psu) se concentra la mayor parte de los valores encontrados para esta capa. Si bien esto es lógico, debido a que en la capa superior las salinidades son en general más bajas, este comportamiento también puede ser debido a las varias reacciones que sufre el PSR en la interfase, como es el buffer del fosfato (descrito anteriormente). La capa inferior muestra un comportamiento similar al del NT, con un comportamiento conservativo entre las estaciones R1 y R4, pero en R5 se empieza a observar un aporte en las

altas salinidades, comportamiento que es dominante en R6. Estos aportes pueden ser debidos a la liberación de PSR por el sedimento.



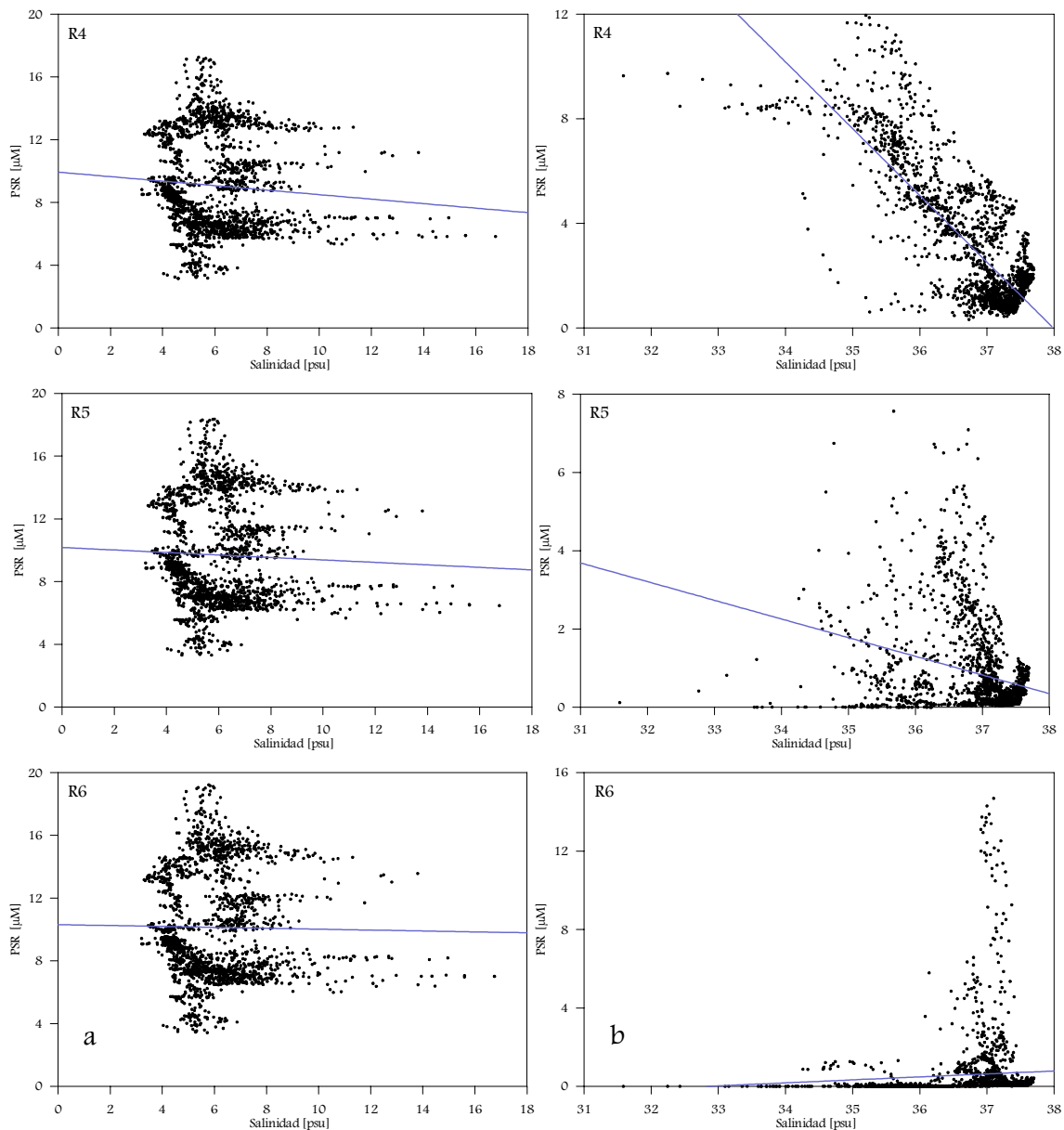
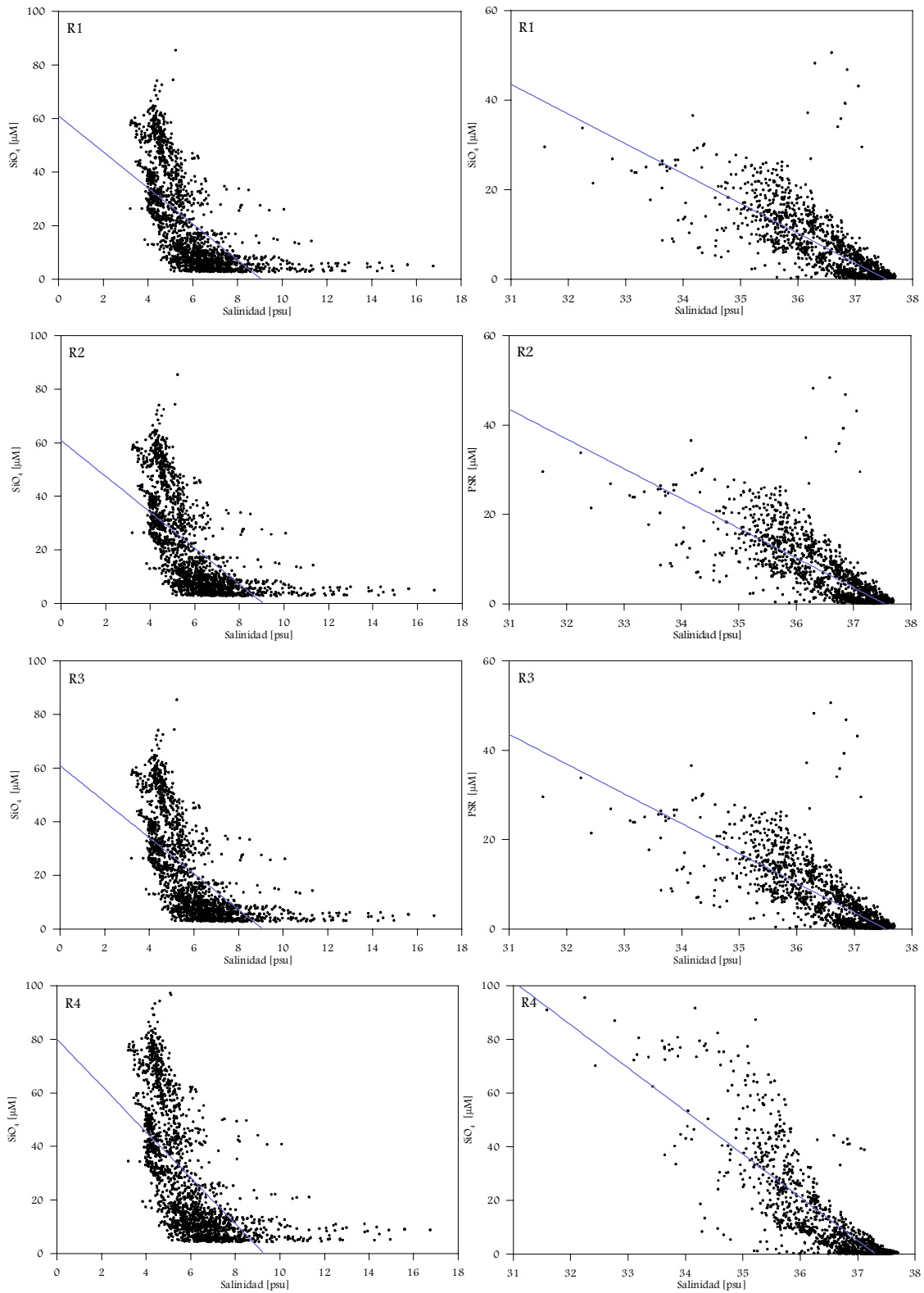


Figura 5.40. Diagramas salinidad - nutriente para el PSR, a la izquierda (a) la capa superior (agua dulce) y a la derecha (b) la capa inferior (cuña salina).

El ácido ortosilícico muestra un comportamiento prácticamente idéntico al del NT (figura 5.41), ya que en la capa superior actúa como un claro sumidero en las salinidades bajas (4 - 8 psu) y tiene un comportamiento conservativo en la cuña salina, excepto en R5 y R6 donde se aprecia un aporte en la parte de altas salinidades, que se puede explicar por la descomposición y posterior liberación de silicio por parte de las diatomeas que mueren con el cambio de salinidades.



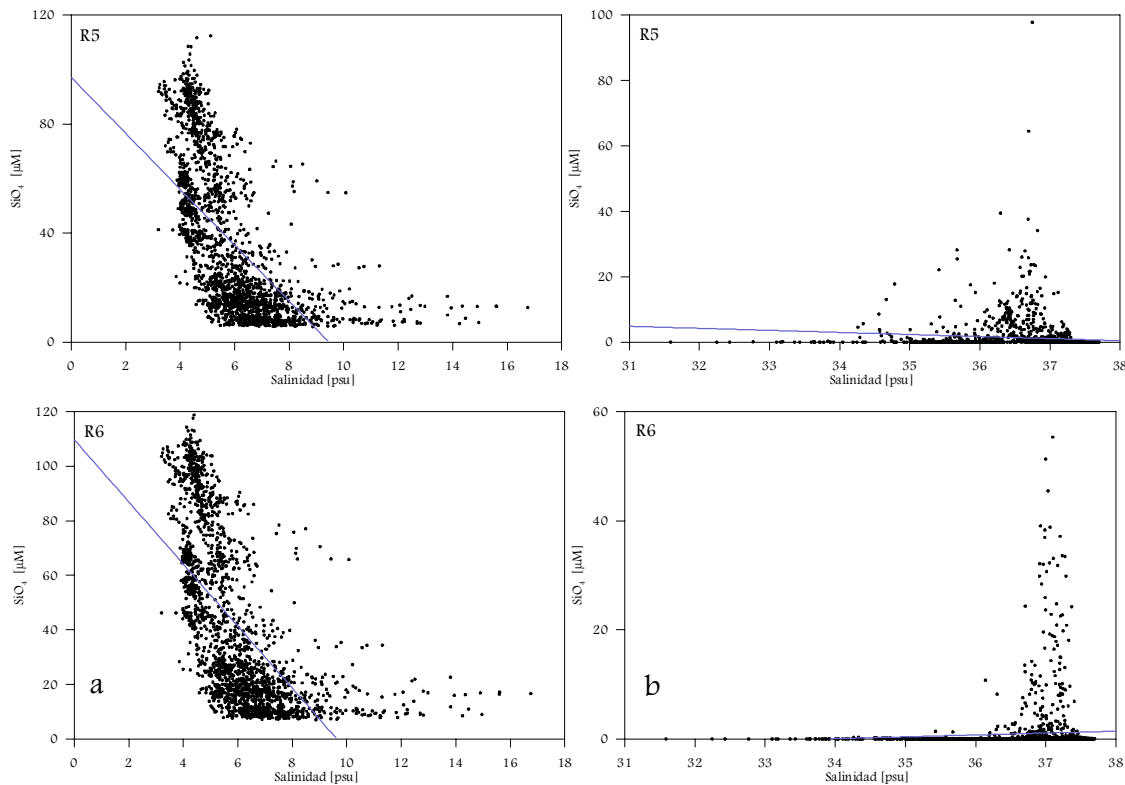


Figura 5.41. Diagramas salinidad - nutriente para el Silicio (SiO_4), a la izquierda (a) la capa superior (agua dulce) y a la derecha (b) la capa inferior (cuña salina).

5.4. Flujos de nutrientes

Para el cálculo de nutrientes se usaron los métodos descritos en el capítulo 2, tales como el método de diagramas salinidad – nutriente (Hydes y Liss, 1977), el cual calcula los flujos de manera sencilla multiplicando los caudales instantáneos por la concentración obtenida en los gráficos.

El cálculo de los flujos de nutrientes es en base a los flujos medios (Lebo y Sharp, 1992). El flujo medio se obtiene realizando una media de los flujos calculados individualmente como el producto del caudal instantáneo del río y las concentraciones de los nutrientes a cada profundidad de muestreo. Para este cálculo solo se estimó el flujo del agua dulce hacia el mar.

En un trabajo anterior (Palacio, 2000 y Sierra *et al.*, 2001) se realizaron unos cálculos de los flujos de nutrientes basados en los resultados obtenidos en el campo. Para esto, se escogió el día mas representativo de cada campaña al disponer de todos los datos necesarios para realizar el cálculo y con las mejores condiciones posibles. En la tabla V.3 se muestran los días escogidos de cada campaña para realizar los cálculos.

Tabla V.3. Días seleccionados para el cálculo de flujos de nutrientes

Campaña	Día
PIONEER I	5 de Abril de 1999
PIONEER II	12 de Julio de 1999
PIONEER III	6 de Octubre de 1999
PIONEER IV	5 de Febrero del 2000

5.4.1. Resultados por Diagramas de Salinidad – Nutriente

A continuación, se presentan los resultados de los cálculos de los flujos de nutrientes exclusivamente con los datos obtenidos de las campañas PIONEER y mas adelante se hará lo mismo para los obtenidos con los resultados del modelo. Los resultados obtenidos por el método de los diagramas de salinidad-nutriente para los datos de los días escogidos de cada campaña, sólo se muestran para los nutrientes que siguen un comportamiento conservativo, que en este caso fueron el Nitrito y el Nitrato, ver tablas V.4 a V. 7 y figuras 3.52 a 3.56.

Tabla V.4. Flujo de nutrientes por estación de acuerdo con el método de salinidad-nutriente. PIONEER I

NITRITO			
Estación	Q m ³ s ⁻¹	Conc. Efec. (µM)	FLUJO(mmol·s ⁻¹)
R1	225	2.0327	457
R2	215	2.0257	436
R3	205	1.9583	401
R4	148	1.9128	283
R5	132	1.8501	244
R6	120	1.9300	232
NITRATO			
Estación	Q m ³ s ⁻¹	Conc. Efec. (µM)	FLUJO(mmol·s ⁻¹)
R1	225	185.2312	41677
R2	215	167.1704	35942
R3	205	161.3917	33085
R4	148	150.9507	22341
R5	132	175.8913	23218
R6	120	99.5	11940

Tabla V.5. Flujo de nutrientes por estación de acuerdo con el método de salinidad-nutriente. PIONEER II

NITRITO			
Estación	Q m ³ s ⁻¹	Conc. Efec. (μM)	FLUJO(mmol·s ⁻¹)
R1	135	0.9900	134
R2	133	1.0200	136
R3	112	0.9900	111
R4	108	0.9100	98
R5	109	0.8600	94
R6	112	0.8300	93
NITRATO			
Estación	Q m ³ s ⁻¹	Conc. Efec. (μM)	FLUJO(mmol·s ⁻¹)
R1	135	134.3000	18131
R2	133	134.3600	17870
R3	112	141.7000	15870
R4	108	139.5400	15070
R5	109	145.2000	15827
R6	112	127.3000	14258

Tabla V.6. Flujo de nutrientes por estación de acuerdo con el método de salinidad-nutriente. PIONEER III

NITRITO			
Estación	Q m ³ s ⁻¹	Conc. Efec. (μM)	FLUJO(mmol·s ⁻¹)
R1	296	1.4600	432
R2	259	1.6700	433
R3	200	2.1500	430
R4	101	3.0200	305
R5	101	3.3600	339
R6	110	3.5500	391
NITRATO			
Estación	Q m ³ s ⁻¹	Conc. Efec. (μM)	FLUJO(mmol·s ⁻¹)
R1	296	120.5200	35674
R2	259	122.8000	31805

R3	200	129.8000	25960
R4	101	129.0100	13030
R5	101	132.8000	13413
R6	110	116.3000	12793

Tabla V.7. Flujo de nutrientes por estación de acuerdo con el método de salinidad-nutriente. PIONEER IV

NITRITO			
Estación	Q m ³ s ⁻¹	Conc. Efec. (μM)	FLUJO(mmol·s ⁻¹)
R1	208	2.9700	618
R2	195	2.7600	538
R3	180	2.7600	497
R4	168	2.7445	461
R5	155	2.7358	424
R6	146	2.5500	372
NITRATO			
Estación	Q m ³ s ⁻¹	Conc. Efec. (μM)	FLUJO(mmol·s ⁻¹)
R1	208	210.20	43722
R2	195	210.69	41085
R3	180	193.61	34850
R4	168	195.56	32855
R5	155	188.60	29233
R6	146	175.20	25579

5.4.2. Resultados por el método de los flujos medios

En este caso para los datos de los días que se escogieron para analizar de las campañas se realizaron los cálculos por este método para las especies de nutrientes que no fueron analizadas por el método de los diagramas de salinidad – nutriente, que son el Amonio, el PSR y el Ac. Ortosilícico. Los resultados obtenidos se ven en las tablas V8 a V.11

Tabla V.8. Flujo de nutrientes por estación de acuerdo con el método de flujos medios. PIONEER I

AMONIO		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	225	456
R2	215	310
R3	205	792
R4	148	459
R5	132	666
R6	120	452
PSR		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	225	267
R2	215	166
R3	205	219
R4	148	127
R5	132	130
R6	120	87
A.Ortosilícico.		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	225	6712
R2	215	5877
R3	205	6013
R4	148	4107
R5	132	3685
R6	120	3440

Tabla V.9. Flujo de nutrientes por estación de acuerdo con el método de flujos medios. PIONEER II

AMONIO		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	135	483
R2	133	539
R3	112	560
R4	108	765
R5	109	1097
R6	112	890
PSR		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	135	116
R2	133	111
R3	112	130
R4	108	176
R5	109	223
R6	112	183
A.Ortosilícico.		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	135	7459
R2	133	6700
R3	112	6518
R4	108	6417
R5	109	5526
R6	112	7009

Tabla V.10. Flujo de nutrientes por estación de acuerdo con el método de flujos medios. PIONEER III

AMONIO		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	296	2410
R2	259	2301
R3	200	1672
R4	101	1210
R5	101	1309
R6	110	1406
PSR		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	296	704
R2	259	630
R3	200	510
R4	101	315
R5	101	323
R6	110	316
Ac. Ortosilícico		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	296	25338
R2	259	22555
R3	200	16967
R4	101	8829
R5	101	8390
R6	110	9811

Tabla V.11. Flujo de nutrientes por estación de acuerdo con el método de flujos medios. PIONEER IV

AMONIO		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	208	1581
R2	195	1509
R3	180	1381
R4	168	1408
R5	155	1162
R6	146	763
PSR		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	208	243
R2	195	223
R3	180	78
R4	168	94
R5	155	99
R6	146	86
Ac. Ortosilícico		
Estación	Q (m ³ s ⁻¹)	FLUJO (mmol·s ⁻¹)
R1	208	10712
R2	195	11310
R3	180	12390
R4	168	11206
R5	155	10230
R6	146	10256

5.4.3. Flujos de nutrientes obtenidos de los resultados del modelo

En el caso de los flujos calculados para los resultados obtenidos por el modelo, se ha seguido el mismo sistema que el usado por Palacio (2000). Ya que el modelo hace los cálculos para todo el año, se usaron los valores promedio de caudales para los días medidos en las campañas, obteniéndose el flujo de nutriente anual para el NT, pero además de calcular los flujos que van del río hacia el mar, se han calculado los flujos que van del mar hacia dentro

del estuario, usando el caudal de la cuña medido con el correntímetro doppler. Al igual que Palacio (2000), para los nutrientes que presentaron un comportamiento conservativo (NT) se utilizó el método de los diagramas de salinidad – nutriente, y para el PSR y el Ácido ortosilícico se empleó el de los flujos medios. En las tablas V.12 y V.13 se pueden ver los resultados.

Tabla V.12. Flujo de nutrientes anuales por estación de acuerdo con el método de diagramas Salinidad – Nutriente con los datos del modelo (NT).

Estación	Capa	Conc. Eff (μM).	Conc. Med. (μM)	Q prom. (m^3 s^{-1})	Flujo. ($\text{mmol}\cdot\text{s}^{-1}$)
R1	Sup.	267.52	511.5	216	110485.76
	Inf.	808.12	142.7	222.24	179515.78
R2	Sup.	316.5	601.85	200.50	63458.25
	Inf.	928.72	327.06	209.60	194659.71
R3	Sup.	417.39	785.90	174.25	72730.2
	Inf.	2017.22	736.63	196.55	396440
R4	Sup.	500.61	955.12	131.25	65705.06
	Inf.	3485.94	900.60	124.53	434100
R5	Sup.	817.80	1392.80	124.25	101610
	Inf.	137.87	316.50	118.80	16378.95
R6	Sup.	1122.34	1746.90	122	136820
	Inf.	*	215.14	31.20	*

Tabla V.13. Flujo de nutrientes anuales por estación de acuerdo con el método de Flujos medios con los datos del modelo (PSR y Ac. Ortosilícico).

PSR				
Estación	Capa	Conc. prom (μM).	Q prom. (m^3 s^{-1})	Flujo. ($\text{mmol}\cdot\text{s}^{-1}$)
R1	Sup.	8.01	216	1730
	Inf.	1.70	222.24	377.80
R2	Sup.	8.37	200.50	1678.18
	Inf.	2.58	209.60	524
R3	Sup.	8.85	174.25	1542.11
	Inf.	3.22	196.55	631.92
R4	Sup.	9.08	131.25	1191.75

	Inf.	3.10	124.53	386.04
R5	Sup.	9.70	124.25	1205.22
	Inf.	0.77	118.80	91.47
R6	Sup.	10.13	122	1235.86
	Inf.	0.53	31.20	16.54
Ac. Ortosilícico				
Estación	Capa	Conc. prom (μM).	Q prom. ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Flujo. ($\text{mmol}\cdot\text{s}^{-1}$)
R1	Sup.	22.24	216	4838.4
	Inf.	5.16	222.24	1146.75
R2	Sup.	24.42	200.50	4896.21
	Inf.	5.59	209.60	1171.66
R3	Sup.	28.21	174.25	4915.59
	Inf.	7.33	196.55	1440.71
R4	Sup.	30.74	131.25	4034.62
	Inf.	8.74	124.53	1088.39
R5	Sup.	38.99	124.25	4844.50
	Inf.	1.14	118.80	135.432
R6	Sup.	45.75	122	5581.50
	Inf.	0.86	31.20	26.83

5.4.4. *Comparación entre los flujos obtenidos en campaña y el modelo*

Como se puede observar, existen diferencias significativas entre los resultados de los flujos obtenidos con el modelo y los encontrados con los datos de campo los resultados del modelo son mucho mayores que los del campo. Esto puede ser debido a que durante la mayor parte del año el modelo no tiene referencias de datos de campo, tan solo unos cuantos días, por lo que el resto del año el modelo especula en los valores restantes, de acuerdo a los datos del caudal y la salinidad, por eso en los gráficos aparecen a veces valores demasiado altos durante algunos periodos del año con respecto a los valores medidos, (ver tabla V.14).

Tabla V.14. Comparación entre flujos anuales de nutrientes promedio, medidos en campo y por el modelo

Nutriente	Flujos medidos (Palacio 2000) ($\text{mmol}\cdot\text{s}^{-1}$)	Flujos anuales del modelo ($\text{mmol}\cdot\text{s}^{-1}$)
NT	36443.75	110485.76
PSR	332.5	1730
Ac. Ortosilícico	12555.25	4803

Los resultados que se presentan en la tabla anterior corresponden a los flujos anuales de nutrientes que exporta el río a la costa adyacente. En el caso de los flujos calculados con las mediciones en campaña, se promediaron obtenidos para las diferentes especies del Nitrógeno para la estación R1 en su capa superior. Igualmente los resultados de los flujos obtenidos por el modelo son el promedio anual en la capa superior para R1. El flujo de nutrientes fue obtenido al multiplicar la Concentración efectiva (concentración extrapolada a cero salinidad de los diagramas de salinidad-nutriente) por el caudal promedio.

Los valores medidos de las especies del Nitrógeno en las campañas, se han sumado y promediado para obtener el valor del NT y poder compararlo con los resultados del modelo. En ellos se observa una diferencia muy significativa entre los valores medidos y modelados de hasta un orden de magnitud en el NT y en el PSR.

Se puede observar que debido a la limitación de observaciones en el campo a lo largo del año, resulta poco práctico el uso del modelo de advección-dispersión en el cálculo de los flujos del estuario y que se debe de tener un conocimiento amplio de las variaciones de las concentraciones y su comportamiento en el estuario (Lebo y Sharp, 1992).

El uso de los dos métodos para calcular los flujos de los nutrientes se debe a que los cálculos realizados con los datos obtenidos en campaña se y sus diagramas salinidad-nutriente de las especies del Nitrógeno (figuras 3.52 – 3.56) muestran un comportamiento conservativo, a diferencia del Ac. Ortosilícico y el PSR que muestran más reactividad en los diagramas, y que sus flujos fueron calculados por el método de los flujos medios. Para ser congruentes con los datos obtenidos en campo y hacer una comparación mas ajustada a lo obtenido en el campo se realizó el cálculo del NT con los datos obtenidos de los diagramas y el método de flujo medio para el Ac. Ortosilícico y el PSR.

