

Urban River Lab

-Technical Reports-

vol. 5



**Efecto del tiempo de residencia hídrica sobre la
calidad del agua en ecosistemas acuáticos
receptores de aguas residuales tratadas**

Mayo-Junio 2021



1. Introducción

1.1 Antecedentes

El tiempo de residencia (TR) del agua (o tiempo necesario para la renovación total del volumen de agua del sistema) en ecosistemas acuáticos es una característica relevante, ya que puede afectar la estructura y función de la comunidad de organismos que se desarrollan; al mismo tiempo, puede tener consecuencias importantes sobre la calidad del agua de estos ecosistemas. En concreto, la turbidez del agua puede estar influenciada por el TR del agua en estos ecosistemas. La turbidez del agua viene determinada por la cantidad de partículas en suspensión en la columna de agua. En general, a mayor cantidad de partículas en suspensión, mayor turbidez y menor transparencia del agua. Sin embargo, el efecto del incremento de la turbidez sobre el ecosistema puede variar en función del origen de las partículas, ya que pueden ser orgánicas (materia orgánica detrítica o bacterias, hongos y algas) o inorgánicas (sedimentos). Si hay más partículas aumenta la dificultad en la penetración de la luz, con posibles implicaciones en el funcionamiento de los organismos fotoautótrofos (p. ej., algas o plantas subacuáticas). Una disminución de la actividad fotosintética en estos ecosistemas acuáticos puede afectar el balance entre las tasas de producción primaria (producción de oxígeno) y la respiración (consumo de oxígeno) de la comunidad de organismos; por lo tanto, puede tener consecuencias directas sobre la concentración de oxígeno disuelto en el agua y su variación diaria. Una tasa elevada de respiración puede provocar condiciones de hipoxia (concentración de oxígeno $< 2 \text{ mg L}^{-1}$) durante la noche que pueden ser críticas, e incluso letales, para los macroinvertebrados y peces del ecosistema acuático.

En lagunas artificiales con plantas acuáticas (helófitos) diseñadas para el tratamiento terciario de aguas residuales, el TR del agua puede ser un factor clave en la capacidad de eliminación de los nutrientes disueltos en el agua: amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) y fosfato (SRP). Estos elementos son esenciales para los organismos de los ecosistemas y al mismo tiempo, son los que determinan la calidad del agua. De forma general, se ha visto que a mayor TR, mayor interacción entre los nutrientes y los organismos; por lo tanto, puede haber un aumento de la eficiencia de retención.

1.2 Objetivo

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del TR en ecosistemas acuáticos sobre diversos parámetros, como son la turbidez, la biomasa de productores primarios en la columna de agua, la concentración de oxígeno y la capacidad de eliminación de nutrientes, que pueden tener consecuencias importantes sobre la calidad del agua de estos ecosistemas.

Este estudio se llevó a cabo en los 12 canales del Urban River Lab (URL; www.urbanriverlab.com). Los canales tienen 12 m de longitud, 60 cm de ancho y 40 cm de profundidad; y están alimentados por agua residual tratada que proviene del efluente de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Montornés del Vallés. Esta agua tiene concentraciones medias de nitrógeno inorgánico disuelto (NID), SRP y carbono orgánico disuelto (COD) de 4.5, 0.5 y 15 mg L⁻¹ respectivamente.

1.3 Metodología

En los 12 canales se generó un rango de TR de 18 a 141 horas a partir de la modificación del caudal de entrada de cada canal en un gradiente entre 0.2 y 1.2 L min⁻¹. El experimento se llevó a cabo del día 28/05/21 (día 0) al 14/06/21 (día 19). Durante este período, se realizaron 8 muestreos, que correspondían a los días 0, 2, 5, 7, 9, 12, 14 y 19. Las variables medidas fueron:

- **Turbidez del agua (en NTU).** Se determinó al final de cada canal (metro 11) con un nefelómetro modelo AQ3010 ORION. Además, se midió la turbidez del agua en la entrada de los canales durante el experimento. Para realizar estas medidas se seleccionaron solo 3 canales, los que tenían TR de 18, 54 y 141 horas.
- **Concentración de sólidos en suspensión (en mg L⁻¹).** Se midieron al final de cada canal (metro 11). Se filtró un volumen determinado de agua con una jeringa y un portafiltros hasta saturar un filtro pre-pesado de 0.7 µm de fibra de vidrio. Una vez saturado, el filtro se secó a 60°C durante 48h y se volvió a pesar. La concentración de sólidos en suspensión se calculó como la diferencia entre el peso del filtro con el material filtrado y el peso del filtro dividido por el volumen de agua filtrada. Para determinar la fracción orgánica de estas muestras (en %), se muflaron los filtros a 450° durante 6 horas para determinar el peso seco libre de cenizas. El % de fracción orgánica del filtro se determinó restando el peso seco del peso seco libre de cenizas.
- **Biomasa de productores primarios en la columna de agua (en µg chla L⁻¹).** En el muestreo de los días 9 y 19 se midió la cantidad de clorofila a (chla) en la columna de agua de los canales como proxy de la biomasa de productores primarios. Para realizar esta medida se filtró un volumen conocido de agua del final del canal (metro 11) y se midió la cantidad de chla en el filtro con un fluorímetro de campo (BenthoTorch). Con la BentoTorch se obtienen valores de la cantidad de clorofila (en µg chla cm⁻²) de 3 grupos de productores primarios: diatomeas, algas verdes y cianobacterias. La suma de los valores de los tres grupos es la cantidad total de chla. Los valores de chla por unidad de superficie (µg chla cm⁻²) se convirtieron en valores de chla por unidad de volumen (µg chla L⁻¹) utilizando el área del filtro que tenía chla para estimar toda la chla en el filtro y dividiendo este valor por el volumen de agua filtrado.
- **Concentración de oxígeno disuelto (mg O₂ L⁻¹).** Se midió al final de cada canal (metro 11) cada 10 minutos durante 48h utilizando oxímetros ópticos de mano de la marca Hach e YSI. Para cada canal, se realizaron varios ciclos de 48 horas durante el experimento.

- **Capacidad de retención de nutrientes.** Al final del experimento (día 19) se cogieron muestras de agua en la entrada y la salida de los canales, teniendo en cuenta los TR del agua en cada canal. Es decir, el agua de la salida se cogía “n” horas después de muestrear el agua de la entrada, donde “n” es el TR en cada canal. En cada canal se cogieron 3 muestras de entrada y 3 muestras de salida, separadas por 1 hora. El agua se filtró con un filtro de fibra de vidrio de 0.7µm y se recogió en viales que se congelaron a -20°C hasta ser analizadas en el servicio de química analítica del Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC). Las muestras se analizaron en un autoanalizador Alliance Futura para estimar la concentración de fósforo reactivo soluble (SRP), amonio (NH_4^+) y nitrato+nitrito ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) utilizando métodos colorimétricos estándar. La capacidad de retención de los diferentes nutrientes en cada canal se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Retención (\%)} = \frac{\text{Conc}_{\text{IN}} - \text{Conc}_{\text{OUT}}}{\text{Conc}_{\text{IN}}} \times 100$$

Donde Conc_{IN} y Conc_{OUT} son las concentraciones de nutrientes en la entrada y la salida de cada canal, respectivamente.

1.4 Análisis de resultados

Para evaluar la variación temporal de la turbidez y los sólidos en suspensión medidas en los canales durante el experimento y compararla entre los diferentes TR, se utilizó un análisis de covarianzas (ANCOVA) considerando la turbidez del agua (en NTU) y los sólidos en suspensión (en mg peso seco L^{-1}) como variables respuesta, el tiempo como covariable continua y el TR del agua como factor fijo. Es decir, se comparó si la tendencia de variación de las variables en el tiempo (pendiente de regresión entre la variable y el día de muestreo) era igual o diferente en función del TR del agua en los canales. En este caso, si la interacción del modelo es no significativa ($p > 0.05$) indicará que las pendientes son similares entre los canales y si es significativa ($p < 0.05$) indicará que las pendientes son diferentes entre canales con TR diferentes.

También se exploró la relación entre la turbidez del agua y los sólidos en suspensión en la columna del agua medida el último día del experimento (día 19) y el TR; y que modelo matemático se ajustaba mejor (lineal, potencial o asintótico) utilizando el criterio de información akaike (AIC). También se exploró la relación entre la biomasa de productores primarios y el TR medido en los diferentes canales, y como esta relación variaba entre los dos muestreos realizados el día 9 y el 19 del experimento.

En caso necesario, las variables respuesta se transformaron para alcanzar los supuestos de normalidad y homoscedasticidad necesarios para realizar tests estadísticos paramétricos. Los análisis estadísticos se realizaron con R.

2. Resultados y discusión

2.1 Resultados y discusión

Variación temporal de la turbidez y los sólidos en suspensión durante el estudio. La turbidez del agua en la entrada de los canales fue baja y se mantuvo constante durante el experimento (promedio y error estándar = 1.0 ± 0.1 NTU). En cambio, la turbidez del agua al final de los canales aumentó durante el experimento (Figura 1). Sin embargo, el incremento de la turbidez por unidad de tiempo (pendiente de la recta entre tiempo y turbidez) fue diferente entre los diferentes canales (test ANCOVA, interacción; p-valor = 0.006). En general, la turbidez aumentaba más rápidamente a medida que el TR del agua en los canales era mayor.

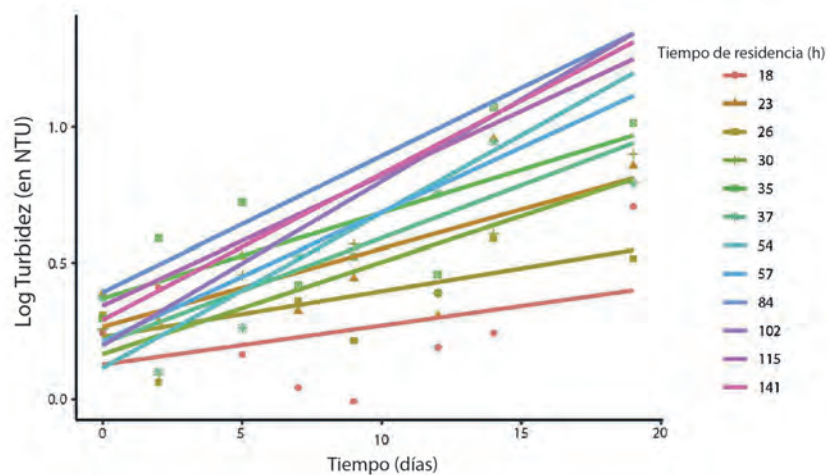


Figura 1: Variación de la turbidez del agua (en NTU) durante el experimento (días) en los 12 canales expuestos a tiempos de residencia del agua que varían entre 18 y 141 horas.

Los resultados de la variación de la concentración de sólidos en suspensión en la columna de agua durante el experimento fueron similares a los de la turbidez. En general, se observó un aumento de la concentración de los sólidos en suspensión durante el experimento en la mayoría de canales,

exceptuando los dos canales con TR más bajos (Figura 2). Además, el incremento de los sólidos en suspensión por unidad de tiempo (pendiente de la recta entre sólidos en suspensión y días de experimento) era mayor en los canales con mayor TR (test ANCOVA, interacción; p-valor = 0.004).

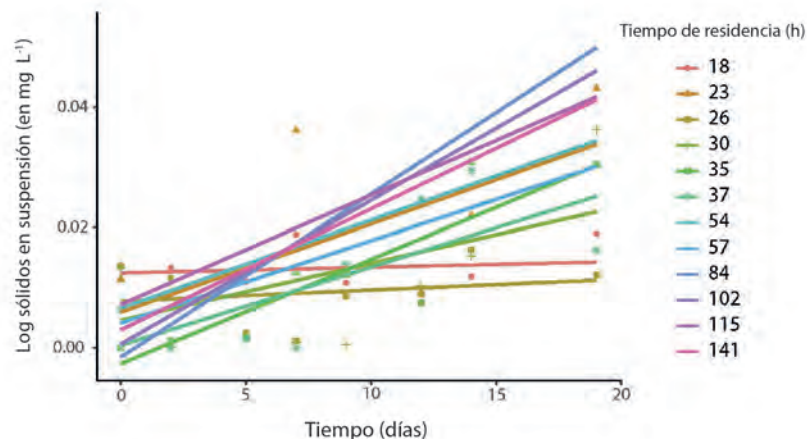


Figura 2: Variación de los sólidos en suspensión en la columna de agua (mg L^{-1}) durante el experimento (días) en los 12 canales expuestos a tiempos de residencia del agua que varían entre 18 y 141 horas.

En cuanto a la relación entre la turbidez y los sólidos en suspensión en la columna de agua al final del experimento (día 19) y el TR de cada canal, se observa que el modelo que mejor se ajusta es un modelo asintótico (menor valor AIC) para las dos variables de estudio (Figura 3). Es decir, la turbidez y los sólidos en suspensión en el agua tienden a aumentar a medida que el TR en los canales es más elevado. Sin embargo, este incremento no es proporcional a TR sino que tiende a estabilizarse en los TR más elevados (Figura 3).

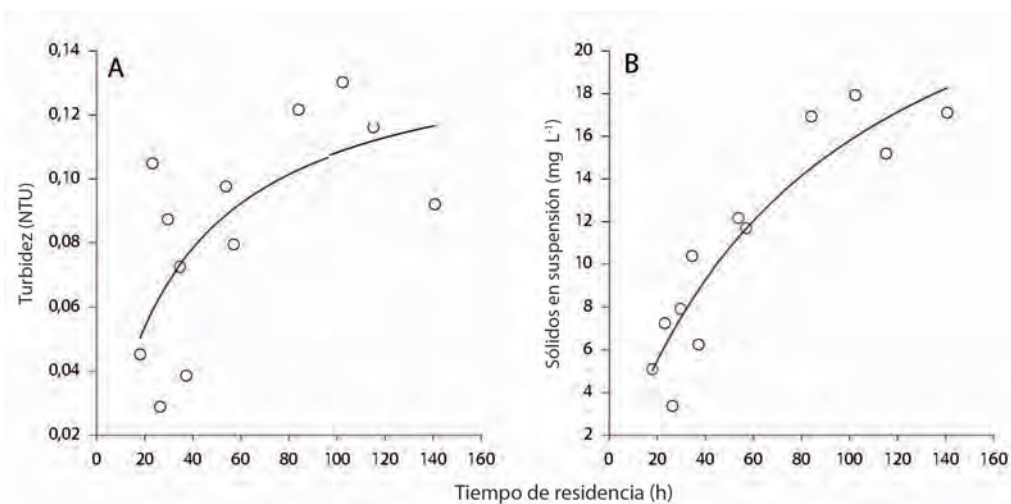


Figura 3: Variación de los sólidos en suspensión en la columna de agua (mg L^{-1}) durante el experimento (días) en los 12 canales expuestos a tiempos de residencia del agua que varían entre 18 y 141 horas.

El porcentaje promedio ($\pm$ error estándar) de peso seco libre de cenizas de los filtros fue del $96.8 \pm 0.3\%$. Estos % tan elevados indican que los sólidos en suspensión eran mayoritariamente

materia orgánica.

Biomasa de los productores primarios en la columna de agua.

Comparando las medidas de chla hechas el día 9 i el 19, se observa que la biomasa total de productores primarios (suma de alga verde, cianobacterias y diatomeas), tienden a incrementar durante el experimento, y este incremento es más elevado para aquellos canales con TR más alto. Además, para cada fecha de muestreo, se observa que la chla tiende a incrementar en el rango bajo de TR, pero a $TR > 80$ h los valores tienden a estabilizarse (Figura 4). Por otro lado, se observó que la biomasa total en la columna de agua fue mayor al final del experimento que a la mitad del mismo, indicando un crecimiento de la comunidad de productores primarios a lo largo del tiempo. En cuanto a la composición de la comunidad, se observaron diferencias entre los dos muestreos. El día 9, el 91.7% de la biomasa total correspondía a alga verde y el 8.3% restante a cianobacterias, y no se observaron diatomeas. Al final del experimento (día 19), los porcentajes de algas verdes, cianobacterias y diatomeas fueron del 80.2%, 16.6% y 3.3%, respectivamente. El elevado porcentaje de materia orgánica de los sólidos en suspensión sugieren que estos son básicamente organismos autotróficos en suspensión.

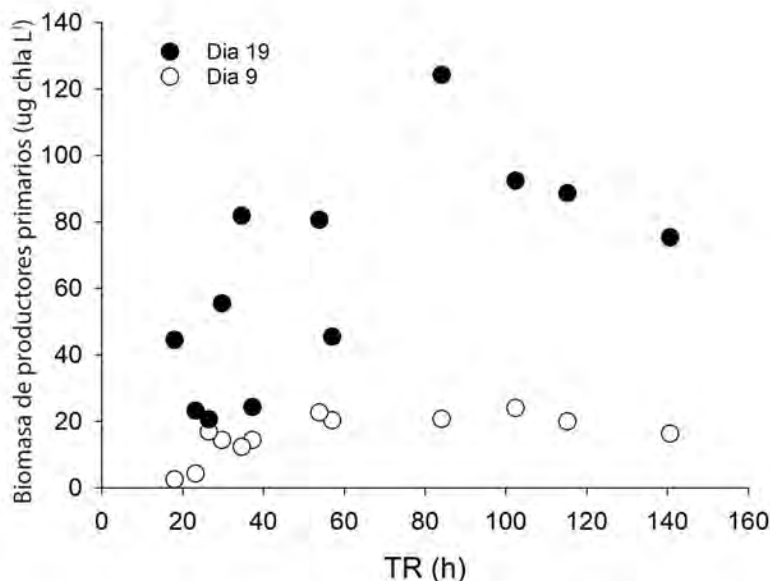


Figura 4: Variación de la biomasa de productores primarios (en $\mu\text{g chl a L}^{-1}$) en la columna de agua en los canales en relación con el tiempo de residencia (TR, en h) de los diferentes canales. El gráfico muestra las medidas hechas en dos fechas del experimento, el día 9 i el 19

Concentración de oxígeno disuelto. Los valores mínimos diarios de oxígeno disuelto registrados durante los diferentes ciclos de 48h variaron entre 1 y 11 mg L^{-1} entre los diferentes canales (Figura 5). Los valores mínimos tienden a ser más altos a medida que el TR del agua es más elevado (Figura 5). Solamente se lograron valores de hipoxia ($< 2 \text{ mg L}^{-1}$) en el canal con TR más bajo ($TR=18\text{h}$). Por otro lado, los valores máximos diarios de oxígeno registrados durante los diferentes ciclos de 48h variaron entre 18 y 40 mg L^{-1} . No se observó ninguna relación clara entre el valor máximo de

oxígeno disuelto y el TR (Figura 5). Como referencia, concentraciones de unos 10 mg L^{-1} de oxígeno disuelto corresponden a valores del 100% de saturación de oxígeno en el agua y concentraciones de 40 mg L^{-1} corresponden a valores de alrededor del 450%. Por lo tanto, los canales muestran condiciones de sobresaturación de oxígeno extremas, probablemente asociadas a que buena parte de la turbidez está asociada a la presencia de productores primarios en la columna de agua. La diferencia entre el valor mínimo y máximo de oxígeno disuelto para cada condición de TR da una idea del amplio rango diario de concentraciones de oxígeno en los canales, y sugiere una elevada actividad metabólica (producción y respiración) en estos sistemas acuáticos.

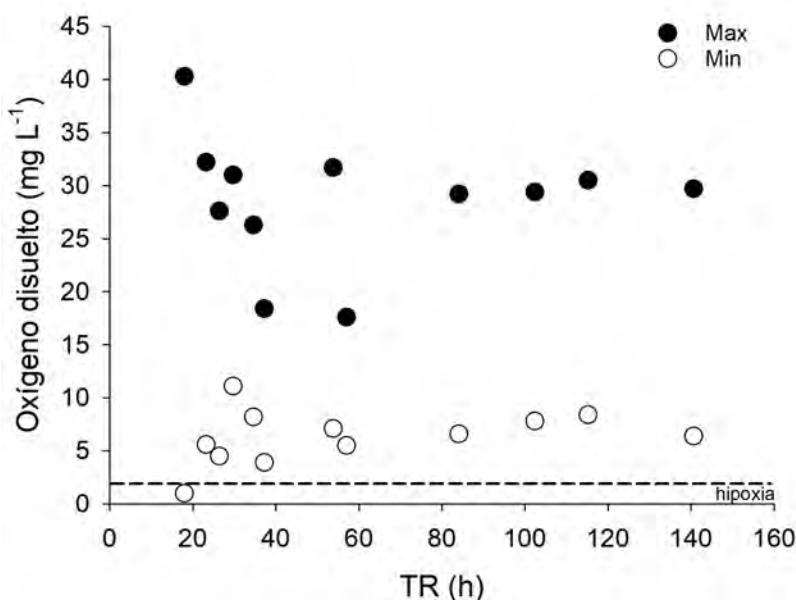


Figura 5: Variación de la concentración mínima y máxima de oxígeno disuelto (en mg L^{-1}) registrada en los canales durante los ciclos de 48 horas en función del tiempo de residencia del agua (TR) en los diferentes canales. La línea discontinua indica la concentración de oxígeno disuelto que comporta condiciones de hipoxia ($< 2\text{ mg L}^{-1}$).

Capacidad de retención de nutrientes. Los porcentajes de retención de nutrientes medidos en los canales varían mucho en función del TR y del nutriente considerado. La capacidad de retención del SRP fue relativamente baja (30%) al rango bajo de TR (18-35h) y aumentó de repente hasta valores del 70% en los canales con TR 37h, manteniéndose relativamente constante en el resto de tratamientos de TR (Figura 6A). La capacidad de retención de NH_4^+ en los canales aumentaron de manera progresiva hasta alcanzar el 100% en los canales con tiempos de residencia de 37h y se mantuvo en estos valores tan altos en el resto de tratamientos (Figura 6B). Finalmente, en cuanto al $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, se observó que la capacidad de retención tendía a aumentar a medida que el TR aumentaba, hasta alcanzar valores alrededor del 100% en el canal con mayor TR (Figura 6C). Sin embargo, el patrón de variación de la retención de $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ en función del TR del agua en los canales es diferente al observado por la retención de NH_4^+ . Mientras que para el NH_4^+ se observa un patrón de saturación a medida que incrementa el TR, para el caso del $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ el patrón no es tan claro, aunque se observa un incremento más gradual.

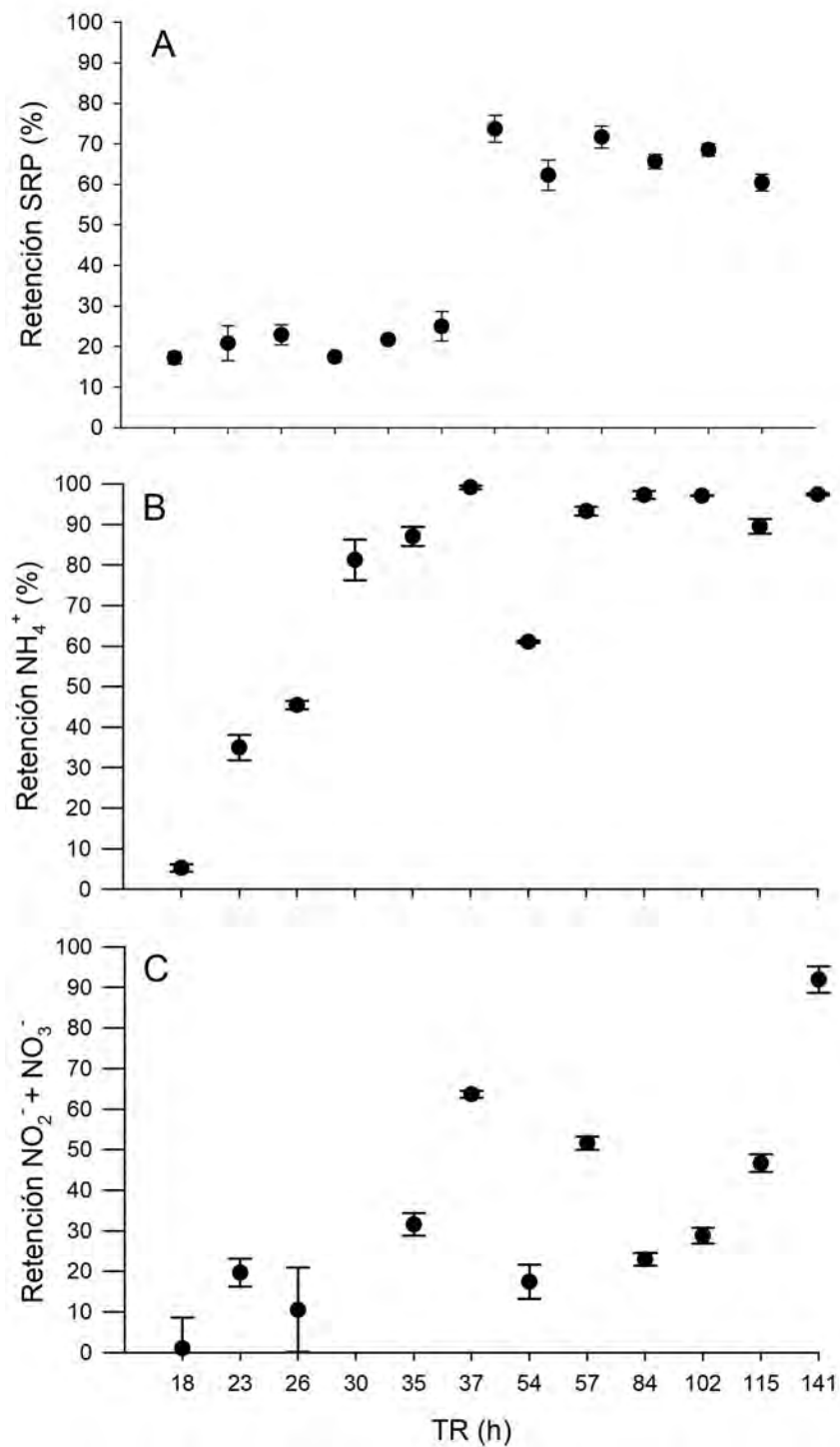


Figura 6: Variación de los porcentajes de retención de fósforo (SRP, A), amonio (NH_4^+ , B) y nitrito + nitrato ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, C) en relación con los tiempos de residencia (TR, en h) en los canales.

Estos resultados muestran que los canales presentan una capacidad muy importante de retener nutrientes y los valores más altos (100%) se observaron en las condiciones de mayor TR. Cabe destacar que las condiciones desarrolladas en los canales durante este experimento muestran una elevada capacidad de retener SRP y $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, cosa que no se había observado en anteriores experimentos donde se testó la capacidad de retención de nutrientes en sistemas con flujo de agua subsuperficial que fluía entre gravas y donde había helófitos (Technical Report volum 2). Ahora bien, hay que tener en cuenta que el TR del agua en los experimentos con helófitos era de unas 7-8h; por lo tanto, los resultados no son del todo comparables y abre la puerta a futuros experimentos en el URL. En el caso del NH_4^+ , ambos diseños experimentales resultan ser muy eficientes para retener esta forma de NID.

2.2 Conclusiones

- El aumento del tiempo de residencia (TR) del agua en los canales fue asociado a una mayor turbidez del agua y del contenido de sólidos en suspensión. Ahora bien, este incremento parece que tiende a estabilizarse en TR elevados (>80h).
- La biomasa de productores primarios en suspensión incrementa durante el experimento, aunque el incremento es más alto en los canales con mayor TR del agua. Los elevados % de materia orgánica de los sólidos en suspensión en la columna de agua sugieren que la turbidez del agua es debida mayoritariamente a la presencia de organismos autotróficos.
- Las concentraciones de oxígeno en los canales presentan un rango de variación diario muy amplio, dominado por condiciones de sobresaturación de oxígeno, probablemente favorecidas por la actividad metabólica de los productores primarios. Solamente se dieron condiciones de hipoxia (2 mg L^{-1}) en el canal con menor TR (18h).
- La capacidad de retención de nutrientes varía considerablemente en función del nutriente considerado, pero en general tiende a ser más elevada en los canales con mayor TR. El incremento de biomasa de productores primarios en la columna del agua a medida que el TR incrementa podría explicar este patrón en la retención de nutrientes.
- Independientemente de la diferencia en TR entre los canales, la mayor capacidad de retención de nutrientes en este sistema fue para el NH_4^+ , seguido del SRP y finalmente para el $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$.
- Finalmente, mirando de manera conjunta los tres nutrientes estudiados, los resultados sugieren que hay un valor de TR situado alrededor de las 37h donde la eficiencia de retención de nutrientes es en general máxima y se mantiene en estos niveles independientemente que el TR siga aumentando.



3. Equipo de trabajo

3.1 Personal

Este trabajo ha sido realizado por:

- Miquel Ribot, Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC).
- Sara Castelar, Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC).
- Eugènia Martí, Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC).
- Esperança Gacia, Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC).
- Eduard Piera, Naturalea Conservación.
- Albert Sorolla, Naturalea Conservación.
- Francesc Sabater, Universidad de Barcelona (UB).

3.2 Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el proyecto OPERANDUM en el cual participa Naturalea Conservación; también ha sido financiado por el proyecto ECO-REACTORS y P-Removal. Queremos agradecer el soporte técnico y económico del Consorcio Besós Tordera durante la realización del experimento.

Instituciones promotoras Urban River Lab

