

III. CONCLUSIONES

El humedal construido por la empresa Bahco resultó eficiente para la remoción de contaminantes de sus efluentes industriales, caracterizados por la presencia de metales y elevados valores de pH y conductividad. El humedal representa un estudio de caso en un área geográfica y una industria particular donde no se registran antecedentes éditos sobre el tema. Por esta razón, se estudió el desarrollo de una asociación vegetal con composición inicial similar a los ambientes naturales regionales.

Se demostró experimentalmente que el enriquecimiento con nutrientes aumentó la tolerancia de *S. herzogii* a los metales estudiados. Por esta razón, se procedió a volcar simultáneamente el efluente industrial y el cloacal en el humedal definitivo con el objeto de aumentar la tolerancia de la vegetación a la exposición a los metales.

La eficiencia del humedal definitivo resultó muy satisfactoria, ya que se registró una remoción importante de todos los parámetros determinados, con excepción del PRS y amonio. Asimismo, resulta de interés destacar la pequeña variabilidad temporal en los parámetros estudiados a la salida del humedal a pesar de la gran variabilidad de las concentraciones la entrada del mismo. La baja eficiencia en la remoción de PRS y amonio del humedal fue provocada por las condiciones de anaerobiosis predominantes en el sistema.

En ambos humedales, tanto el experimental a escala reducida como así también el definitivo, las macrófitas flotantes mostraron un aumento inicial de cobertura para desaparecer posteriormente. Los experimentos de invernadero demostraron que la salinidad y el pH del afluente en el humedal a escala reducida resultaron tóxicos para las especies flotantes. Asimismo, tanto las concentraciones de metales en el agua como en el tejido de las macrófitas fueron menores que los citados en la bibliografía en ambientes donde la vegetación se desarrolla alcanzando altos valores de biomasa. La evidencia disponible sugiere que la desaparición de las macrófitas flotantes y probablemente de algunas de las emergentes del ensayo a escala reducida, se deba más al efecto de la salinidad y pH que a la exposición a los metales. Con posterioridad desaparecieron también la mayoría de las especies emergentes trasplantadas con excepción de *P. elephantipes* y *T. domingensis*. Hacia el final del estudio, el humedal presentó dominancia absoluta de *T. domingensis*, y vestigios de *P. elephantipes*. *T. domingensis* alcanzó mayor altura y biomasa que en los ambientes naturales. Indudablemente, *P.*

elephantipes se vio afectada por el crecimiento de *T. domingensis* y por las condiciones que predominaron en el humedal, presentando una respuesta competitiva débil. La jerarquía competitiva en este ambiente tan particular por sus características químicas poco favorables resultó:

T. domingensis > *P. elephantipes* > *P. stratiotes* > *E. crassipes* > *S. herzogii* > otras emergentes.

La composición de la vegetación depende de la interacción entre la habilidad competitiva de las especies presentes, la disponibilidad de recursos y el grado de disturbio. Tanto el humedal a escala reducida como el definitivo pueden interpretarse como un ambiente artificial donde se desarrolla una asociación vegetal con composición inicial semejante a la de los ambientes naturales del valle aluvial del Río Paraná, cuyos componentes compiten en condiciones de elevada disponibilidad de recursos (concentraciones de nutrientes) y un grado de disturbio muy drástico, representado por la toxicidad del afluente. En estas condiciones, *T. domingensis* mostró la mayor tolerancia y jerarquía competitiva hasta ser la única especie que ocupó casi la totalidad de la superficie del humedal, con una biomasa mayor que la que caracteriza los humedales naturales. Pareciera desprenderse de los resultados obtenidos que en estos humedales construidos para el tratamiento de un efluente industrial, la tolerancia al estrés, representado por las elevadas concentraciones de metales, conductividad y pH, resultó ser más importante que la habilidad competitiva de cada especie, debido a que la desaparición de las macrófitas que resultaron sucesivamente dominantes fue repentina y no parecían que fueran reemplazadas paulatinamente por otra que se imponga mediante mecanismos biológicos como el sombreado, el desplazamiento físico por su mayor porte o por ser más eficientes en la utilización de nutrientes. Las macrófitas flotantes desaparecieron por su menor tolerancia al elevado pH y conductividad del efluente, dejando el ambiente disponible para una posterior ocupación por parte de las emergentes. Sólo en el caso del humedal a escala reducida podría interpretarse el reemplazo de *P. elephantipes* por *T. domingensis* como un efecto donde la competencia fuese importante. Asimismo, el hecho de registrar mayor biomasa y tamaño en el humedal construido que en los ambientes naturales, sugiere que aquellas especies cuyo rango de tolerancia lo permite, están en condiciones de aprovechar la mayor disponibilidad de nutrientes y por

lo tanto aumentar su jerarquía competitiva. En el humedal definitivo también durante la efímera dominancia de *E. crassipes*, la biomasa fue mayor que en el ambiente natural. La tolerancia al estrés sería la presión de selección más importante en estos humedales.

En el humedal definitivo el desarrollo de la vegetación puede dividirse en tres etapas. La primera, estuvo representada por la dominancia de *E. crassipes*, la segunda, por la dominancia mixta de *E. crassipes* y *T. domingensis*, y la última, por la dominancia de *T. domingensis*. Durante la etapa de dominancia de *E. crassipes*, los metales fueron retenidos por la vegetación. Durante las etapas de dominancia mixta y de la emergente *T. domingensis*, la remoción de contaminantes se llevó a cabo tanto por la vegetación como por los sedimentos, aunque mayormente por éstos últimos.

En el primer caso, las macrófitas flotantes representan el principal compartimiento de acumulación de contaminantes de estos sistemas, debido a su capacidad de asimilación directa de los contaminantes en sus tejidos. En el segundo caso, la eficiencia de retención de metales y nutrientes se relacionaría con la capacidad de las plantas arraigadas de transferir oxígeno desde las partes aéreas hacia las raíces, desarrollando en la rizósfera un microambiente oxigenado, aumentando la actividad bacteriana y promoviendo una variedad de reacciones químicas y bioquímicas que mejoran la retención de contaminantes por el sedimento.

Si bien los mecanismos de retención fueron diferentes entre las etapas de dominancia de vegetación, las eficiencias de remoción del humedal definitivo no dependieron de la vegetación dominante, excepto en el caso del PRS y amonio. Por lo tanto, la elección de las especies más adecuadas a utilizar en un humedal construido dependerá de la tolerancia de las macrófitas a las condiciones del efluente a tratar. Las macrófitas flotantes libres, en particular *E. crassipes*, no representan una alternativa aconsejable para su utilización en humedales construidos para el tratamiento de aguas de desecho como el estudiado.

Debido a que *T. domingensis* creció hasta el final de los períodos estudiados en ambos humedales, sin mostrar síntomas de toxicidad y presentando una biomasa significativamente superior que la del humedal natural representa, entre las especies regionales estudiadas, la mejor alternativa para ser utilizada en sistemas de tratamiento de alta conductividad y pH, característica común de muchos procesos industriales.

La dominancia de *T. domingensis* en numerosos ambientes naturales es consistente con el estudio de Keddy et al. (1994), quien comparó experimentalmente la jerarquía competitiva de 20 especies de macrófitas, señalando a *T. domingensis* como una de las mayores, y permitían suponer con anterioridad al estudio llevado a cabo, que *T. domingensis* sería importante en la estructura de la vegetación del humedal construido. Al respecto era también de suponer que la comunidad resultante contendría menor diversidad que los ambientes naturales por su menor tamaño y heterogeneidad espacial. No obstante resultó inesperado que la vegetación definitiva del humedal esté representada por solo una especie. Resulta de interés señalar, además de su elevada tolerancia al estrés, la enorme plasticidad fenotípica de *T. domingensis*, que alcanzó mayor porte que en los humedales naturales y registró un más prolongado período de crecimiento. En los ambientes naturales la parte aérea de *T. domingensis* casi desaparece durante varios meses en invierno mientras que en el humedal construido mantuvo una importante biomasa y registró crecimiento prácticamente todo el año.

El humedal construido lleva ya 4 años de operación, la vegetación parece haberse estabilizado, y las concentraciones de metales en tejido continúan comparativamente bajas permitiendo suponer que el humedal puede seguir en operación por un largo período de tiempo sin mayores cambios.

Habiendo tenido en cuenta los niveles guía para la concentración de metales en suelos de uso agrícola, se decidió utilizar la biomasa cosechada en la fabricación de compost para el cultivo de especies vegetales ornamentales en un invernadero ubicado en el mismo predio. Actualmente, los monitoreos de nutrientes y metales se siguen efectuando en el agua, macrófitas y sedimentos. Además, se planifica controlar las concentraciones de metales en los tejidos de las plantas ornamentales.