

Una revisión a estudios recientes de los aspectos ecológicos y económicos de la aplicación de descargas municipales con tratamiento secundario a pantanos en del sur de Louisiana

J. W. Day, Jr.¹, J. M. Rybczyk², L. Cardoch³, W. H. Conner⁴,
P. Delgado-Sánchez⁵, R. I. Pratt⁶, A. Westphal⁷

¹ Coastal Ecology Institute, Louisiana State University, South Stadium Rd., Baton Rouge, LA 70803, Tel: 225-388-6508; Fax: 225-388-6326; email: ceiday @lsuvm.sncc.lsu.edu

² Department of Biological and Environmental Sciences, California University, 250 University Avenue, California, PA 15419; email: rybczyk@cup.edu

³ Coastal Ecology Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803; email: cardoch @lsu.edu

⁴ Baruch Forest Science Institute, Clemson University, Box 596, Georgetown, SC 29442

⁵ Coastal Ecology Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803

⁶ Coastal Ecology Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803

⁷ Coastal Ecology Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803; email: awestph@lsuvm.sncc.lsu.edu

RESUMEN

Insuficiente sedimentación, y alta tasas de elevación relativa del nivel del mar (ERNM), son dos importantes factores contribuyendo a la pérdida de pantanos en la costa de Louisiana. Nuestra hipótesis es que el aporte de desechos municipales tratados y ricos en nutrientes a pantanos costeros resulta en cuatro beneficios: (1) mejoría en la calidad del agua; (2) incremento de la tasa de acreción, ayudando a contrarrestar subsidencia costera; (3) incremento de productividad vegetal; y (4) ahorros de capital por la no-inversión en sistemas convencionales de tratamiento terciario. Para probar esta hipótesis, se hizo un seguimiento de varios pantanos que reciben descargas de agua de desecho de tratamiento secundario en la costa de Louisiana. En uno de los sitios donde la sedimentación Autor: Sáinz-Lara acumulada fue medida, las tasas de acreción se incrementaron significativamente después del comienzo de la descarga de aguas residuales en el sitio de tratamiento (de 7.8 a 11.4 mm año⁻¹), aproximándose a la tasa estimada de ERNM regional (12.0 mm año⁻¹). En un sitio de control adyacente se observó ningún incremento correspondiente. En este mismo sitio, la reducción de nutrientes en agua superficial, entre la entrada y salida de la descarga (1600 m), varió de 100% para NO₃-N a 66% para P total. En otro sitio, un pantano que ha estado recibiendo aguas de desecho por 40 años, el análisis dendrocronológico revela un incremento significativo en el crecimiento de troncos en el sitio de tratamiento después de haber empezado con la descarga de agua de desecho y fue significativamente mayor que el sitio de control. Resultados preliminares indican que estos sitios tienen el potencial de asimilar todo el aporte de nitrógeno y diversos porcentajes de fósforo. Los resultados de la evaluación de las implicaciones económicas entre el tratamiento convencional y el tratamiento por pantanos en tres sitios indican ahorros entre \$500,000 y \$1.5 millón.

From the Symposium Recent Research in Coastal Louisiana: Natural System Function and Response to Human Influence. Rozas L. P., J. A. Nyman, C. E. Proffitt, N. N. Rabalais, D. J. Reed, and R. E. Turner (editors). 1999. Published by Louisiana Sea Grant College Program.

Introducción

Numerosos estudios han mostrado que los pantanos pueden ser efectivos procesadores terciarios de aguas de desecho municipales (Kadlec y Knight 1996). Estudios previos indican que, tanto pantanos naturales como construidos han sido exitosamente usados para depurar estos aportes (Richardson y Davis 1987; Conner et al. 1989; Reed 1991; Kadlec y Knight 1996). Los pantanos son eficaces removiendo el exceso de nutrientes y contaminantes mediante fijación física y por filtración, precipitación química y adsorción, y por procesos metabólicos biológicos que resultan en entierro, almacenamiento en vegetación, y denitrificación (Conner et al. 1989; Kadlec y Alvord 1989; Patrick 1990). Estas funciones de los pantanos pueden ser especialmente críticas para la zona costera en Louisiana afectada por agua de calidad degradada causada, en parte, por el inadecuado tratamiento de desechos (Louisiana DEQ 1988).

Los aportes de desechos pueden servir también como una herramienta de restauración en pantanos costeros impactados por altas tasas de elevación relativa del nivel del mar (ERNM). Los pantanos han mostrado persistencia ante la ERNM, cuando la acreción vertical y la elevación son iguales o mayores que la tasa de subsidencia (Delaune et al. 1983; Cahoon et al. 1995). Históricamente, los desbordamientos estacionales del Río Mississippi depositan sedimentos y nutrientes en los pantanos de la planicie deltaica. Estas inundaciones no sólo proveen una fuente aloctona de sedimentos minerales, los cuales contribuyen directamente a la acreción vertical ya que también los nutrientes asociados con estos sedimentos inducen la acreción vertical a través de producción de materia orgánica así como depositación (Nyman y Delaune 1991). Esta fuente de sedimentos y nutrientes a la mayoría de los pantanos en la costa de Louisiana ha sido eliminada desde principios de la década de 1930 con el construcción de bordos, "levees", a lo largo del curso del bajo Mississippi, resultando en una acreción vertical deficitaria (acreción < ERNM), largos periodos de inundación, disminución de la productividad y carencia de regeneración vegetal (Conner y Day 1988).

En estos sistemas presionados, conjeturamos cuatro beneficios primarios derivados del tratamiento de desechos por pantanos en Louisiana: (1) mejor calidad de agua de la descarga; (2) mayores tasas de acreción; (3) mayor productividad de la vegetación; y (4) ahorros de capital al no invertir en sistemas convencionales de tratamiento terciario (Breux 1992; Breux y Day 1994). La alta tasa de entierro debido a subsidencia y mayor que las tasas nacionales promedio de denitrificación debido a altas temperaturas son razones adicionales para el uso de tratamiento por pantanos en Louisiana. El incremento de la productividad vegetal es especialmente crítico en muchas partes de Louisiana donde la subsidencia costera en el delta del Mississippi resulta en una elevación relativa del nivel del mar aproximadamente diez veces mayor que la elevación eustática del nivel del mar (Conner y Day 1988; Penland et al. 1988). El incremento de la productividad vegetal resulta en mayor producción de raíces provocando la formación de suelo orgánico lo que puede incrementar la acreción necesaria para contrarrestar la subsidencia que contribuye a la pérdida de humedales.

Desde 1988, el Instituto de Ecología Costera de la Universidad Estatal de Louisiana ha trabajado con la Agencia de Protección del Ambiente (EPA), el Departamento de Calidad Ambiental de Louisiana (DEQ), y varias plantas de descarga para evaluar el impacto de proyectos de asimilación de aguas residuales en pantanos y marismas en la costa de Louisiana (para una revisión de la reglamentación general ver Breux y Day 1994). Las plantas de descarga incluyen dos municipalidades, Thibodaux y Breux Bridge y un procesador de alimentos, la fábrica de botana de papa Zapp en Gramercy (Fig. I). Dos

municipalidades adicionales (Amelia y St. Bernard) están en las fases finales de los requerimientos de la EPA de los Análisis de Accesibilidad de Uso antes de permitir la descarga formal y un estudio de viabilidad se realizó recientemente para el tratamiento por pantanos de desechos de procesamiento de camarón en Dulac, Louisiana. Todos los pantanos receptores potenciales y reales han sido alterados hidrológicamente por alguna combinación de bordos "levees", bancos de despojo, canalización para petróleo y gas, o vías de ferrocarril. Además, previo al tratamiento del pantano, toda descarga se vertía directamente en los cuerpos de agua abiertos. La descarga a pantanos proporciona tratamiento adicional reduciendo los nutrientes de las zonas más lejanas de la descarga antes de entrar en los cuerpos de agua.

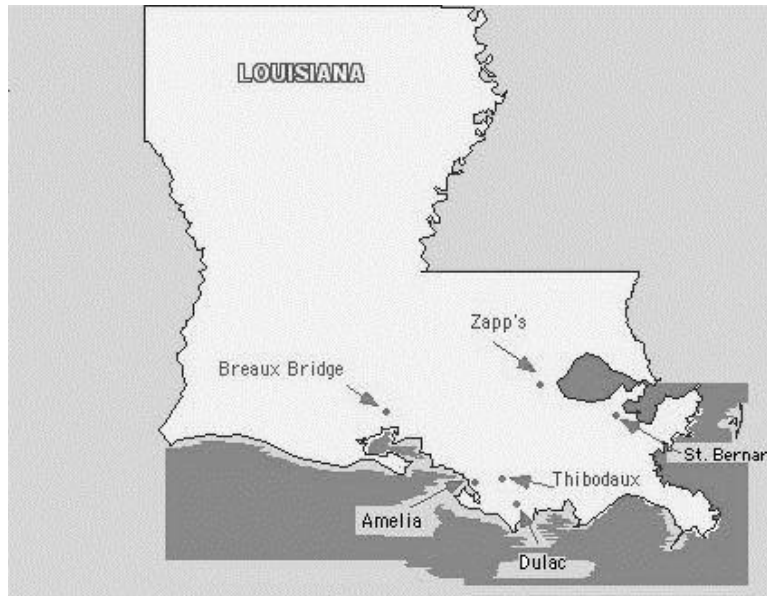


Figura 1. Sitios de estudio de pantanos de tratamiento

Para examinar el efecto del tratamiento por pantanos en la calidad del agua de las descargas, acreción del sedimento, productividad y ahorros económicos, se revisaron los resultados de estudios realizados en Amelia, Breaux Bridge, Dulac, Thibodaux y St. Bernard (Conner y Day 1989; Day et al. 1994; Day et al. 1997a, b; Day et al. 1998; Cardoch et al. 2000). A lo largo de esta revisión, usamos el término *significante*, implicando una significancia estadística que se documenta en las referencias. Muestreos de comunidades de invertebrados bentónicos y del necton no indicaron un efecto claro debido al aporte de desechos y no se presentan aquí estos resultados. Para más información, refiérase a Conner y Day (1989), Breaux y Day (1994), Day et al. (1994), Day et al. (1997a), Day et al. (1997b) y Pratt (1998). Información adicional puede encontrarse en Breaux (1992), Hesse (1994), Delgado-Sánchez (1995), Zhang (1995), Blanick (1997), Boustany et al. (1997), Rybczyk (1997).

Mejora en la calidad del agua descargada

Nosotros suponemos que la calidad del agua de la descarga se mejorará a través de la eficaz captación de nutrientes y líneas de eliminación dentro del pantano. En la Tabla 1 se listan las proporciones de carga y las reducciones porcentuales de nutrientes para los pantanos de tratamiento de desechos municipales. Los datos del pantano de tratamiento Point au Chene para la Ciudad de Thibodaux es un ejemplo para el impacto en la calidad de agua de la descarga.

Tabla 1. Proporciones de Carga y reducciones porcentuales de nutrientes en cuatro pantanos de tratamiento en la costa de Louisiana. Todas las concentraciones se reportan como mg l⁻¹

Sitio	Cuenca (ha)	Carga de Nitrógeno (gm ⁻² año ⁻¹)	Carga de Fósforo (gm ⁻² año ⁻¹)	Nutriente	Concentración de la Descarga	Salida	% Reducción
Amelia ¹	1012	9.8 - 19.6	1.1 - 2.1	TKN	2.98	1	66 ⁵
				P total	0.73	0.06	92 ⁵
Breaux Bridge ²	1475	1.87	0.94	NO ₃ ⁻ N	0.8	<0.1	100
				PO ₄ ⁻ P	1	0.2	80
				P total	2.9	0.3	87
St. Bernard ³	1536	2	0.42	TKN	13.6	1.4	89.7
				P total	3.29	0.23	95
Thibodeaux ⁴	231	3.1	0.6	NO ₃ ⁻ N	8.7	<0.1	100
				TKN	2.9	0.9	69
				PO ₄ ⁻ P	1.9	0.6	68
				P total	2.46	0.85	66

¹ Day et al. (1997a); ² Day et al. (1993); ³ Day et al. (1977b); ⁴ Zhang (1995).
⁵ Las reducciones son calculadas por promedio de las estaciones T1 y LW en el muestreo de abril de 1996 (Day et al. 1997a). No hubo diferencias consistentes entre el sitio de Control y el sitio Amelia

El sitio de Thibodeaux consiste en dos pantanos subsidentes casi permanentemente inundados, separados por un bordo con vegetación arbórea ligeramente elevado. Desde 1992, las 231 ha de pantano en el lado occidental del bordo han recibido descarga municipal secundariamente tratada a una tasa media de 15,140 m³ d⁻¹. El pantano del lado oriental del bordo que no es impactado por la descarga sirvió como sitio de control. En 1988, empezó un monitoreo de línea base para supervisar la vegetación, suelos, agua superficial, hidrología y fauna, en ambos sitios. Prolongadas inundaciones se han documentado durante los estudios (Conner y Day 1989). Una amplia descripción del sitio se proporciona en Breaux y Day (1994) y Rybczyk et al. (1995).

Mediciones realizadas en Thibodeaux por Zhang (1995) indican que mejoró la calidad del agua de esa descarga al ser los nutrientes asimilados y la concentración reducida significativamente. La corriente de la descarga fue favorablemente nitrificada a la forma dominante de N, NO₃⁻N y, el conteo de PO₄⁻P soluble se aproximó a 77% del P total en la descarga. Después del paso a través del pantano de tratamiento, las concentraciones de muchos parámetros de calidad de agua en la estación de salida estaban significativamente reducidas comparadas con las concentraciones de entrada. De 1992 a 1996, la reducción anual media (de entrada a salida) de NO₃⁻N en la descarga, fue de 96% a 99% (Fig. 2). En la estación de salida, la concentración de NO₃⁻N estaba debajo del límite de detección (<0.1 mg l⁻¹) durante la mayoría de los periodos de muestreo, indicando que el sistema del pantano removía NO₃⁻N. La Figura 3 ilustra reducciones en las concentraciones de NO₃⁻N como función de la distancia recorrida en el pantano. En los primeros 800 m, las concentraciones fueron comparables a aquéllas encontradas en el sitio de control. El NO₃⁻N fue extraído por crecimiento de plantas, inmovilizado el N orgánico o removido por desnitrificación (Boustany et al.1997). Las concentraciones de P total en el sitio de tratamiento variaron durante el periodo del estudio. De 1992 a 1994, la reducción media anual de P total en el sitio de tratamiento varió de 33% a 71% de la entrada a la salida (Fig. 4, Zhang 1995).

Zhang (1995) describió los efectos de la descarga de desechos en la calidad del agua, concentración de nutrientes en sedimento y la composición química de la vegetación acuática flotante en el sitio Pointe au Chene. Este estudio evaluó la habilidad a largo plazo del pantano para depurar descargas municipales tratadas secundariamente de la ciudad de Thibodeaux. En general, Zhang encontró que dentro de las 231 ha de la zona de tratamiento, las concentraciones de N y P en el agua habían disminuido 100% y 66%,

respectivamente, de la entrada a la salida (Tabla 1). En una revisión relacionada, Rybczyk et al. (1996) concluyen que el eficaz procesamiento terciario de la descarga a este sitio puede atribuirse a: (1) las especies dominantes de N en la descarga son las formas oxidadas de NO_3N y no las especies reducidas de NH_4N . Estos pantanos naturalmente distróficos fácilmente denitrifican el NO_3N , produciendo una pérdida neta de N en el sistema como gases N_2 o N_2O (ver Boustany et al. 1997); (2) las proporciones de carga son bajas comparadas con otros pantanos de tratamiento. Por ejemplo, el Estado de Florida ha adoptado regulaciones para el manejo de pantanos de tratamiento estableciendo proporciones máximas de P de $9 \text{ gm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ por pantano hidrológicamente alterado (Harvey 1988), un orden de magnitud superior que la mayoría de nuestros sitios, y; (3) altas tasas de acreción y entierro de sedimentos en estos sistemas subsidentes mantienen una trampa permanente de fósforo. Otros dos estudios también documentaron las altas proporciones de denitrificación en este sitio (Crozier et al. 1996; Boustany et al. 1997).

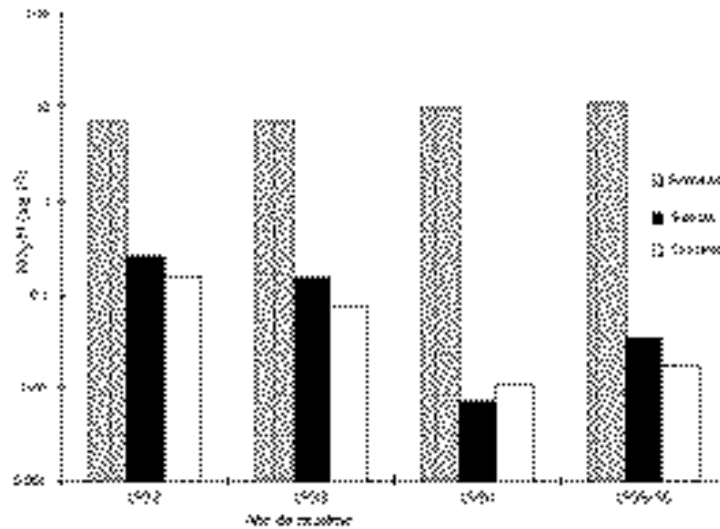


Figura 2. Concentraciones medias anuales de NO_3^- en la entrada de la tubería de descarga, a la salida de la descarga, y en los primeros 100 m del sitio de control. Las concentraciones de entrada son reducidas 96-99%. Nota: Escala logarítmica.

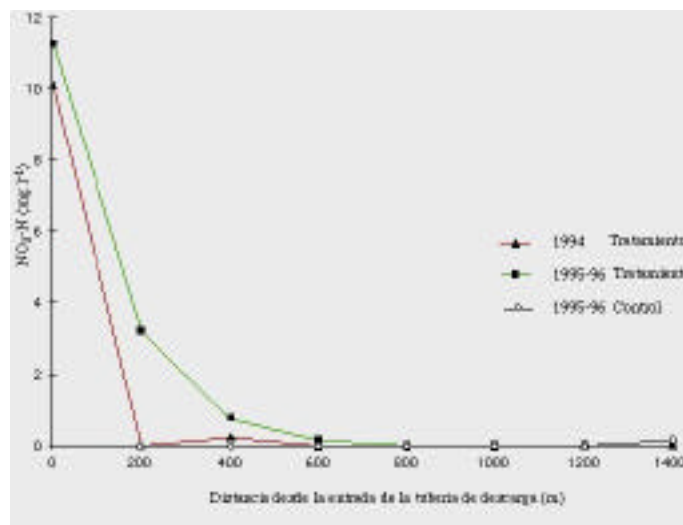


Figura 3. Concentraciones medias de NO_3N a lo largo del transecto de muestreo en el sitio de tratamiento durante 1994 y 1995, y en el sitio de control en 1995. Las concentraciones del nitrato son reducidas 99%

Se han documentado mejoras similares en la calidad del agua para pantanos de tratamiento en Amelia, Breaux Bridge y St. Bernard (Tabla 1). Tasas altas de reducción de N y P indican que los pantanos actúan ahí como trampa de nutrientes y que los sitios son eficaces para el tratamiento terciario. Comparativamente, en Florida, las normas para Tratamiento Terciario Avanzado de Desechos (AWT –por sus siglas en inglés-) de N total y P total son 3 mg l^{-1} y 1 mg l^{-1} , respectivamente. Para muchos de estos sitios, las concentraciones de nutrientes han estado debajo de ese límite, indicando que se ha logrado el tratamiento terciario.

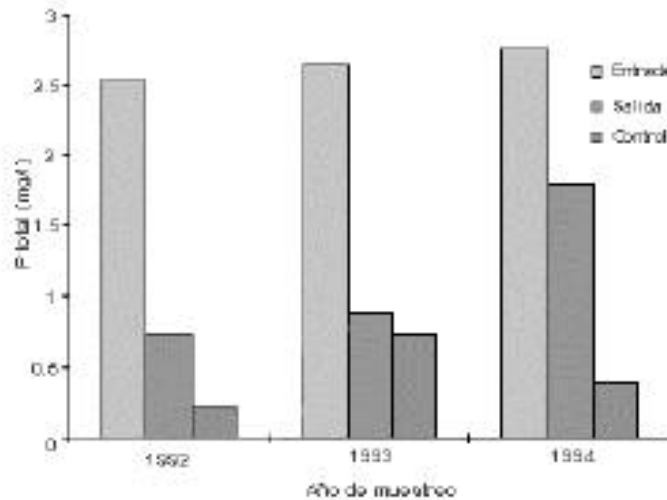


Figura 4. Concentraciones medias anuales de P Total para la tubería de entrada, la salida de la descarga, y en los primeros 100 m del sitio de control. Las concentraciones de entrada se reducen 35-71%.

Incremento de Acreción del Sedimento

La evidencia actualmente indica que el aumento del nivel de agua está ocasionando la pérdida de pantanos, erosión costera y la intrusión salina en varias áreas costeras (Stevenson et al. 1988; Sestini 1992). Si los pantanos costeros, sobre todo aquéllos en los deltas, no crecen verticalmente a una tasa igual a la ERNM, ellos se verán afectados por la inundación constante y la tensión por sal, y finalmente desaparecerán (Mendelssohn y McKee 1988). Muchos pantanos en Louisiana padecen de acreción deficitaria; es decir, no mantienen el paso de la ERNM. La descarga de desechos secundariamente tratados puede estimular la producción de la biomasa y reforzar las proporciones de acreción de sedimento. Mantener la vegetación es crucial para la supervivencia de los pantanos.

La subsidencia en los deltas lleva a una elevación relativa del nivel del mar (ERNM) que es a menudo mucho mayor que la elevación eustática. Por ejemplo, mientras la proporción actual de elevación eustática está entre $1 \text{ y } 2 \text{ mm año}^{-1}$ (Gornitz et al. 1982), la ERNM en el delta del Mississippi es más de 10 mm año^{-1} , así el aumento eustático del nivel del mar representa sólo 10-15% de la ERNM total en este delta. Nosotros supusimos que el aporte de descargas ricas en nutrientes pueden aumentar las tasas de acreción del sedimento promoviendo la producción de materia orgánica y atrapando materia mineral. La evidencia del pantano de tratamiento de Pointe au Chene y Thibodaux apoyan esta hipótesis.

La tasa de elevación relativa del nivel del mar en el pantano de tratamiento Thibodaux (Fig.5) basada en el análisis de las mediciones de marea (Penland et al. 1988), fue de 1.23 cm año^{-1} para el periodo 1962 a 1982. Para mantener la elevación, la acreción de suelos debe igualar esta tasa de ERNM. Sin embargo, análisis de ^{137}Cs en un perfil del suelo (ver Delaune 1978 para una descripción de métodos), estimó que la acreción promedió sólo $0.44 \pm 0.04 \text{ cm año}^{-1}$, llevando a un déficit de acreción de 0.79 cm año^{-1} (Rybczyk 1997).

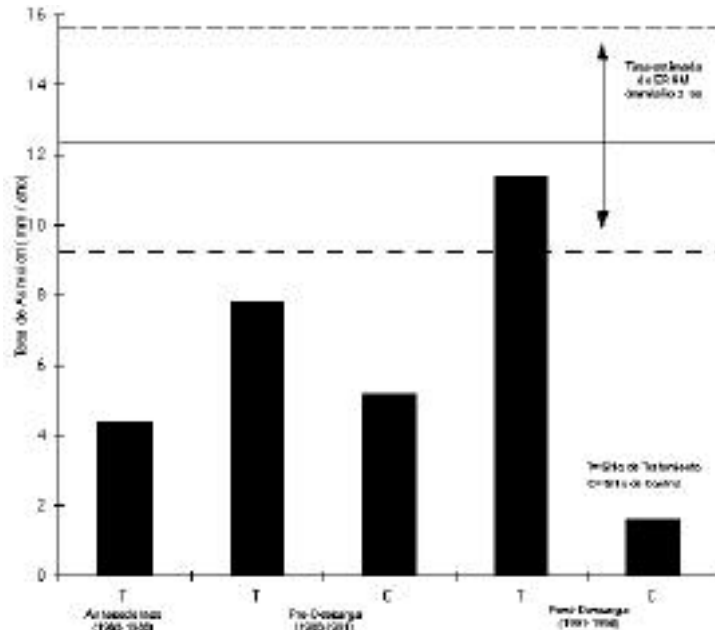


Figura. 5. Tasas de acreción, elevación relativa del nivel del mar y balance de acreción deficitaria para los Antecedentes (^{137}Cs), pre-descarga y poste-descarga para los sitios de tratamiento (T) y Control (C) en Thibodaux. T y C no fueron significativamente diferentes durante el periodo del pre-tratamiento, pero T fue significativamente mayor durante el periodo post-descarga

Para determinar si las descargas de aguas residuales estimularon la acreción, se utilizó una técnica de marcado de horizonte con feldespato (Cahoon y Tornero 1989) para estimar las proporciones de acreción en el sitio receptor y en un sitio de control adyacente, ambos antes (1988-1991) y después (1992-1994) de que empezaran las descargas de desechos en el sitio de tratamiento. Las tasas de acreción previas a la descarga promediaron 0.78 cm año^{-1} en el sitio del tratamiento y 0.52 cm año^{-1} en el sitio del control sin ser significativamente diferentes (Fig. 1). Después de empezar la descarga, la tasa de acreción en el sitio del tratamiento (1.1 cm año^{-1}) fue significativamente más alta que las del sitio de control (0.14 cm año^{-1}). Adicionalmente, las tasas de acreción estimadas en el sitio de tratamiento cayeron dentro de la desviación estándar de la tasa estimada de ERNM en la región (Rybczyk 1997).

Usando una aproximación integrada de campo y modelaje, Rybczyk et al. (1996), Rybczyk (1997) y Rybczyk et al. (1998) se enfocaron en el uso de descargas de desechos al pantano Pointe au Chene para su restauración y mejoramiento. Sus estudios revelaron que ni la producción de árboles ni las tasas anuales de descomposición se afectaron por la descarga de desechos. Sin embargo debido al incremento de la producción de vegetación acuática flotante, las tasas de acreción del sedimento aumentaron significativamente después de que las descargas de aguas residuales cayeron dentro del error estándar de la tasa estimada de aumento relativo del nivel del mar. La elevación en un sitio específico

del modelo de pantano revela que tal elevación en esta región subsidente era más sensible a la incertidumbre de las estimaciones circundantes de levantamiento eustático del nivel del mar y a la subsidencia profunda que a los posibles efectos relacionados a la descarga en procesos autógenos como la descomposición y producción primaria (Rybczyk 1997). El modelo también indicó que la sola incorporación de nutrientes no era suficiente llevar a la restauración a largo plazo del pantano y que la entrada de algún sedimento mineral era necesaria.

Aumento de productividad vegetal

Descargas con tratamiento secundario vierten agua rica en nutrientes al pantano, estimulando la productividad vegetal. Impactos a largo plazo en el pantanos pueden ser evaluados analizando los datos del pantano de tratamiento Breaux Bridge. Este pantano es único debido a la larga historia de descarga al pantano receptor. Esta población de 6,000 habitantes ha descargado sus desechos municipales de un estanque de oxidación ($3,785 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) a un pantano de 1475 ha de ciprés-tupelo durante casi 50 años (Breaux y Day 1994). El monitoreo del sitio de descarga y un sitio de referencia adyacente empezaron en 1992. Una extensa descripción del sitio se proporciona en Day et al. (1993).



Figura 6. La proporción (tratamiento/control) de crecimiento anual de tronco (medido como el crecimiento en el diámetro) para cipreses en Breaux Bridge. Antes de las aplicaciones de descargas al sitio del tratamiento (fines de los años cuarenta y principios de los 1950), el crecimiento en el sitio de control era significativamente más alto que el crecimiento en el sitio del tratamiento ($P > 0.05$). Después de que las aplicaciones empezaron, el crecimiento del tallo fue significativamente más alto en el sitio del tratamiento. Ambos sitios eran similares en el tamaño y estructura (Hesse et al. 1997).

Hesse (1994); Hesse et al. (1997) realizaron un análisis dendroecológico para determinar los impactos de largo plazo de la descarga de desechos en la productividad fotosintética (Fig. 6). Se midió el crecimiento de troncos de 1920 a 1992 en el sitio de tratamiento y un sitio de control adyacente. Se calculó la tasa de incremento anual del diámetro comparando el crecimiento del tronco en ambos sitios. Los registros indican que la ciudad empezó a descargar en el pantano entre 1948 y 1953. Antes de que la descarga de aguas residuales

empezara, Hesse et al. (1997) encontraron mayor significancia estadística en el crecimiento en el sitio de control que en el sitio del tratamiento. Sin embargo, después del inicio de la descarga, el crecimiento aumentó en el sitio de tratamiento, produciendo incremento en las tasas de diámetro anual con mayor significancia estadística (Hesse et al. 1997). El pico en las tasas de incremento de diámetro anual coincide con el inicio del tratamiento. La elevada tendencia sostenida en el sitio del tratamiento ilustra los beneficios a largo plazo del pantano de tratamiento en este sitio.

Registros a corto plazo en este sitio también confirman estos resultados. En enero de 1994, la descarga se cambió del pantano histórico (antiguo sitio de tratamiento), a un nuevo sitio que no había recibido descargas previamente. En 1992, se establecieron puntos de muestreo permanentes en ambos sitios para medir la caída anual de hojarasca y crecimiento del tronco (Tabla 2). No hubo diferencia estadística significativa en la producción total fotosintética (por arriba del suelo) entre el antiguo y nuevo sitios durante 1993 (Delgado-Sánchez 1995). Sin embargo, durante 1994 y 1995, cuando la descarga se cambió al nuevo sitio de tratamiento, la producción total fue significativamente mayor aquí (Delgado-Sánchez 1995). Esta diferencia se debió principalmente al aumento en la biomasa de madera de tronco en el sitio nuevo y no la producción de hoja.

Tabla 2. Producción por arriba del suelo ($\text{g m}^{-2} \text{ año}^{-1} \pm \text{se}$) medida en el sitio de tratamiento Breaux Bridge				
Año	Sitio	Producción por crecimiento de tronco	Producción por hojas	Producción total por arriba del suelo
1993	Sitio antiguo*	780 \pm 358.5	420	1200.9
1993	Sitio nuevo	677.9 \pm 69.21	514	191.9
1994	Sitio antiguo	593.2 \pm 46.8	547.3 \pm 9.2	1140.5
1994	Sitio nuevo*	1383.4 \pm 186.4	745.8 \pm 8.2	2129.2 **
1995	Sitio antiguo	574.8 \pm 187.4	705.2 \pm 81.1	1280
1995	Sitio nuevo*	847.7 \pm 200.1	763.6 \pm 45.5	1611.3 **

¹. Tomado de Delgado Sánchez, 1995: *. Indica sitio que recibe descargas residuales: **. Indica diferencia estadística

Resultados similares se han reportado para otros pantanos de tratamiento. Por ejemplo, un estudio realizado en Amelia indica un aumento de productividad primaria. La Ciudad de Amelia está investigando la viabilidad ecológica de incorporar el pantano Ramos como parte de su sistema del tratamiento para perfeccionar el tratamiento secundario de descargas municipales (Day et al. 1997a). Un estudio de un año de la productividad primaria indica un aumento de crecimiento en los sitios del tratamiento (Tabla 3). La productividad, expresada como caída promedio de hojarasca durante un año, fue significativamente más alta en el sitio de tratamiento que en uno de los sitios de control (Day et al. 1997a).

Ahorros económicos

El tratamiento convencional del aguas residuales es a menudo muy caro para muchas de las pequeñas comunidades en el sur Louisiana. La asimilación por pantanos puede ser una opción económica y eficaz del tratamiento de desechos. En una serie de artículos, Breaux (1992), Breaux y Day (1994) y Breaux et al. (1995), hacen un análisis del costo-beneficio del funcionamiento de tratamiento de aguas residuales en Breaux Bridge y Thibodaux (Tabla 4). Ellos estimaron conservadoramente un ahorro del costo usando el tratamiento de desechos por pantano natural en lugar del tratamiento terciario convencional. En Breaux Bridge, el ahorro del costo estimado fue aproximadamente \$1.4 millones, en un periodo del 30 años. En Thibodaux, hay un ahorro potencial de aproximadamente \$500,000. Sin

embargo, es importante considerar que los ahorros podrían llegar a \$1,300,000 en 30 años, dependiendo del sistema de desinfección empleado antes de a la descarga al pantano.

Tabla 3. Caída de hojarasca Total promedio (g m^{-2}) colectada en el pantano de tratamiento Amelia de Sept. 1995 - Sept. 1996. Aquellas medias con letra diferente son estadísticamente diferentes (Day et al. 1997a).

Sitio	Caída de Hojarasca promedio (g m^{-2}) \pm s.e.
Control 1	581.09 \pm 35.68
Control 2	42.45 \pm 38.24
Tratamiento	716.65 \pm 38.08
Lake 1 Sitio 1	546.06ab \pm 47.24
Lake 1 Sitio 2	665.35 \pm 49.52

1 el sitio del tratamiento es adyacente al Lago Palourde. El Lake Site 2 se conecta directamente al sitio del tratamiento por un pequeño canal. Se hicieron los muestreos a la orilla del lago dónde hay influencia potencial de la decarga

Los procesadores industriales no tóxicos, como los de camarón, pueden beneficiarse del uso de pantanos para sus descargas estacionales. Recientemente se realizó un estudio para determinar la viabilidad de usar pantanos para el tratamiento de agua desechada en el procesamiento de camarón en Dulac, Louisiana (Cardoch et al. 2000). La aproximación de estimar prevención de costos se usó para comparar los costos del tratamiento convencional de la descarga del procesamiento de camarón con los costos del tratamiento por pantanos. El tratamiento convencional costaría aproximadamente \$200,000 por año durante 25 años, contra al tratamiento por pantano que cuesta \$64,000 por año durante 25 años. Éste es un ahorro del costo potencial de \$1.5 millones de dólares (Tabla 4).

Tabla 4. Comparaciones del Costo para tres proyectos de tratamiento por pantanos.

Sitio	Tratamiento Convencional	Tratamiento Por Pantano	Ahorro
Breaux Bridge ¹	1,500,00	125,000	1,350,000
Thibodaux ¹	1,650,000	1,150,000	500,000
Dulac ²	2,200,000	700,000	1,500,000

1. costos en dolares (1992) según Breaux y Day (1994) y Breaux et al. (1995). La capitalización se descuenta al 9% durante 30 años.
2. costos en dolares (1995) según Cardoch et al. (2000). La capitalización se descuenta al 8% durante 25 años.

La mayoría del tratamiento por pantanos se ha enfocado principalmente en los pantanos construidos para mantener un grado alto de control del tratamiento. En Louisiana, la densa red de canales y bordos (levees) ha dejado a muchos de los pantanos hidrológicamente aislados y les ha conferido el mismo grado de control que los pantanos construidos. Con la abundancia de sistemas naturales, es innecesario construir pantanos artificiales en Louisiana, aunque muchos se han construido. Estos pantanos aislados proveen una solución económica y práctica a las pequeñas comunidades ampliamente dispersas en la zona costera.

Conclusiones

Los resultados de varios estudios continuos y completos del tratamiento de aguas residuales por pantanos indican que ellos están logrando las metas ecológicas de mejorar la calidad de agua de las descargas, estimulando la acreción vertical, e incrementando la

productividad. Económicamente, los ahorros son sustanciales para las comunidades pequeñas y los procesadores industriales no tóxicos. Los cálculos de retención de nutrientes y pérdida vía denitrificación, retención de plantas, y entierro indican que los pantanos receptores debieran asimilar todo el $\text{NO}_3\text{-N}$ y más del 50% del fósforo de las proporciones actuales. Como la normatividad de la calidad del agua se volvió más severa, y los apoyos federales para mejoras del tratamiento de desechos son escasos, aumentara la dificultad para las pequeñas comunidades costeras de alcanzar las normas de calidad del agua. El tratamiento por pantanos podría proporcionar una alternativa económicamente viable y eficaz al costoso tratamiento terciario convencional. Adicionalmente, sirven potencialmente como una forma de restauración del pantano en la subsidente zona costera.

LITERATURA CITADA

- Blahnik, T. P. 1997.** Effects of varied hydraulic and nutrient loading rates on water quality and hydrologic distributions in a natural forested pantano receiving waste water. Masters Thesis. Department of Oceanography and Coastal Sciences. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- Boustany, R. G., C. R. Crozier, J. M. Rybczyk y R. R. Twilley. 1997.** Denitrification in a South Louisiana wetland forest receiving treated sewage effluent. *Wetlands Ecology and Management* 4: 273-283.
- Breaux, A. M. 1992.** The use of hydrologically altered wetlands to treat wastewater in coastal Louisiana. Ph.D. Dissertation, Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- Breaux, A. M. y J. W. Day, Jr. 1994.** Policy considerations for wetland wastewater treatment in the coastal zone: a case study for Louisiana. *Coastal Management* 22: 285-307.
- Breaux, A., S. Farber y J. Day. 1995.** Using natural coastal wetlands systems for wastewater treatment: an economic benefit analysis. *Journal of Environmental Management* 44: 285-291.
- Cahoon, D. R. y R. E. Turner. 1989.** Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wetland II. Feldspar marker horizon technique. *Estuaries* 12: 260-268.
- Cahoon, D., D. Reed y J. Day. 1995.** Estimating shallow subsidence in microtidal salt marshes of the southeastern United States: Kaye and Barghoorn revisited. *Marine Geology* 130: 1-9.
- Cardoch, L., J. W. Day, Jr., J. M. Rybczyk y G. P. Kemp. 2000.** An economic analysis of using wetlands for treatment of shrimp processing wastewater: A case study in Dulac, Louisiana. *Ecological Economics*, 33(1): 93-101.
- Conner, W. H. y J. W. Day, Jr. 1988.** Rising water levels in coastal Louisiana: implications for two coastal forested wetland areas in Louisiana. *Journal of Coastal Research* 4: 589-596.
- Conner, W. H. y J. W. Day, Jr. 1989.** A use attainability analysis of wetlands for receiving treated municipal and small industry wastewater: a feasibility study using baseline data from Thibodaux, LA. Center for Wetlands Resources, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- Conner, W. H., J. W. Day Jr. y J. D. Bergeron. 1989.** A use attainability analysis of forested wetlands for receiving treated municipal wastewater. Report to the City of Thibodaux, Louisiana.
- Crozier, C. R., J. M. Rybczyk y W. H. Patrick, Jr. 1996.** Spatial gradients of dissolved nitrate and nitrous oxide in a wetland forest receiving treated sewage effluent, p. 65-68. In Kathryn Flynn (ed.), *Proceedings of the Southern Forested Wetlands Ecology and Management Conference*. Clemson University, South Carolina.
- Day, J. W., A. M. Breaux, S. Feagley, P. Kemp y C. Courville. 1994.** A use attainability analysis of longterm wastewater discharge on the Cypriere Perdue Forested Wetland at Breaux Bridge, LA. Coastal Ecology Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- Day, J. W., J. Rybczyk, R. Pratt, A. Westphal, T. Blahnik, G. Garson y P. Kemp. 1997a.** A use attainability analysis for longterm wastewater discharge on the Ramos Forested Wetland at Amelia, LA. Coastal Ecology Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.

Day, J. W., J. Rybczyk, R. Prarr, M. Sutula, A. Westphal, T. Blahnik, P. Delgado, P. Kemp, A. J. Englande, C.Y. Hu, G. Jin y H.W. Jeng. 1997b. A use attainability analysis for longterm wastewater discharge to the Poydras-Verret Wetland in St. Bernard Parish, LA. Coastal Ecology Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.

Day, Jr., J. W., L. Cardoch, J. M. Rybczyk y G. P. Kemp. 1998. Food Processor and Community Development of Rural Coastal Areas through the Application of Wetland Wastewater Treatment Systems. Report submitted to National Coastal Resources Research and Development Institute. Coastal Ecology Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803.

Delaune, R. D., W. H. Jr. Patrick y R. J. Buresh. 1978. Sedimentation rates determined by Cs dating in a rapidly accreting salt marsh. *Nature* 275: 532-533.

Delaune, R. D., R. H. Baumann y J. G. Gosselink. 1983. Relationship among vertical accretion, coastal submergence, and erosion in a Louisiana gulf coastal marsh. *Journal of Sedimentary Petrology*, 53:147-157.

Delgado-Sanchez, P. 1995. Effects of longterm wastewater discharge into the Cypiere Perdue forested wetland at Breaux Bridge, Louisiana. Maste's Thesis, Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.

Gornitz, V., S. Lebedeff y J. Hansen. 1982. Global sea level trend in the past century. *Science*, 215: 1611-1614.

Harvey, R. 1988. Interoffice memo. Re: Revisions to Chapter 17-6 pursuant to wetland application. 9/28/88, 5 pages. And Reclaimed Water to Wetlands Rule. 17-6.030. 19 pages. State of Florida, Department of Environmental Regulations.

Hesse, I., T. Doyle y J. Day. 1997. Long-term growth enhancement of baldcypress (*Taxodium distichum*) from municipal wastewater application. *Environmental Management*, 22: 119-127.

Hesse, I. D. 1994. Dendroecological determination of municipal wastewater effects on *Taxodium distichum* (L.) rich productivity in a Louisiana swamp. Masters Thesis. Department of Oceanography and Coastal Sciences Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.

Kadlec, R. H. y H. Alvord, Jr. 1989. Mechanisms of water quality improvements in wetland treatment systems, p. 489-498. In D.W. Fisk (ed.), *Wetlands: Concerns and Successes*. Proceeding sponsored by American Water Resources Association, September 17-22, 1989, Tampa, Florida.

Kadlec, R. H. y R. L. Knight. 1996. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, New York.

Louisiana Department Of Environmental Quality. 1988. *Water Quality Management Plan*, Volume 5 Part A.

Mendelsshon, I. Y K. Mckee. 1988. *Spartina alterniflora* die-back in Louisiana: time-course investigation of soil waterlogging effects. *J. Ecology* 76: 509-521.

Nyman, J. A. y R. D. Delaune. 1991. Mineral and organic matter accumulation rates in deltaic coastal marshes and their importance to landscape stability. GCSSEPM Foundation 12th Annual Research Conference. Program and Abstract: 166-170.

Patrick, W. H., Jr. 1990. Microbial reactions of nitrogen and phosphorus in wetlands, p. 52-63. In *Utrecht Plant Ecology News Report*, Utrecht, Netherlands.

Penland, S., K. E. Ramsey, R. A. McBride, J. T. Mestayer y K. A. Westphal. 1988. Relative sea level rise and delta-plain development in the Terrebonne Parish Region. Coastal Geology Technical Report No. 4. Louisiana Geological Survey. Baton Rouge, Louisiana.

Pratt, R. I. 1998. The use of benthic macro invertebrates for monitoring the discharge of municipal effluent into a forested wetland at Amelia, Louisiana. Masters Thesis. Department of Oceanography and Coastal Sciences. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.

Reed, S. C. 1991. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Biocycle*: pp. 44-49.

Richardson, C. J. y D. S. Davis. 1987. Natural and artificial ecosystems: ecological opportunities and limitations, p. 819-854. In K. R. Reddy and W. H. Smith (eds.), *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*. Magnolia Publishing Inc., Orlando, Florida.

Rybczyk, J. M., J. C. Callaway y J. W. Day, Jr. 1998. A relative elevation model (REM) for a subsiding coastal forested receiving wastewater effluent. *Ecological Modeling*. Accepted for publication.

Rybczyk, J. M., J. W. Day, I. D. Hesse y P. Delgado Sanchez. 1996. An overview of forested wastewater treatment projects in the Mississippi River delta region, p. 78 -82. In Kathryn Flynn (ed.), *Proceedings of the Southern Forested Wetlands Ecology and Management Conference*. Clemson University, South Carolina.

Rybczyk, J. M. 1997. The use of secondarily treated wastewater effluent for forested restoration in a subsiding coastal zone. Ph. D. Dissertation. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.

Sestini, G. 1992. Implications of climatic changes for the Po Delta and the Venice Lagoon, p. 429-495. In L. Jeftic, J. Milliman and G. Sestini (eds.), *Climate Change and the Mediterranean*. E. Arnold, London.

Stevenson, J. C., L. Ward y M. Kearney. 1988. Sediment transport and trapping in marsh systems: implications of tidal flux studies. *Marine Geology* 80: 37-59.

Zhang, X. 1995. Use of a natural swamp for wastewater treatment. Masters Thesis, Department of Agronomy, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.