

Evaluación de un Humedal Artificial para la Remoción de Nitrógeno de un Agua Residual de Origen Sintético

Esther
Barrios¹
Yuraima
Córdova
de Colella²

RESUMEN - Esta investigación describe el uso de un humedal artificial a escala protopiloto para la remoción de nitrógeno, de un agua residual sintética que simula las características de un agua residual doméstica de débil concentración en cuanto al contenido de materia orgánica carbonosa. La vegetación utilizada en el reactor biológico, *Typha domingensis* Pers., fue plantada en un lecho conformado por tres medios diferentes: arena amarilla, arena lavada y grava. Durante la aplicación de las tasas de alimentación de 2,5 a 15,0 cm/semana, se obtuvieron porcentajes de remoción de NO_3^- superiores o iguales a 98%; 92% y 96% de Nitrógeno Total Kjeldahl y mayor a 90% de carbono expresado como DQO.

PALABRAS CLAVES: HUMEDAL ARTIFICIAL, REACTOR BIOLÓGICO, REMOCIÓN DE NITRÓGENO.

EVALUATION OF ARTIFICIAL WETLAND TO REMOVE NITROGEN FROM SYNTHETIC WASTEWATER

ABSTRACT - This investigation describes the use from an artificial wetlands to scale proto-pilot for the nitrogen removal, of an synthetic water that simulates the characteristics of domestic wastewater of low concentration for the content of carbonaceous organic matter. The vegetation used in the biological reactor, *Typha domingensis* Pers., was planted in a bed conformed by three different mediums: yellow sand, washed sand and gravel. During the application of the feeding rates of 2,5 to 15,0 cm/week, percentages of more removal were obtained or similar to 98% NO_3^- -N; 92% and 96% of Total Kjeldahl Nitrogen and bigger than 90% of carbon expressed as COD.

Key words: ARTIFICIAL WETLANDS, BIOLOGICAL REACTOR, REMOVAL NITROGEN.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de agua derivada del aumento de la población, así como el incremento de la polución y contaminación producida por las actividades humanas ha ocasionado que este recurso sea cada vez más escaso y costoso en cuanto a su tratamiento. Las razones antes expuestas han motivado a nivel mundial la realización de una serie de estudios vinculados con la reutilización de las aguas residuales municipales así como de las aguas provenientes de actividades agrícolas. Para solventar los problemas en pequeñas comunidades de zonas urbanas o rurales, se han propuesto sistemas de humedales artificiales como una alternativa con efectividad energética para el tratamiento de aguas residuales ya que generan un ahorro estimado en $1,4 \times 10^9$ Btus/año, al ser comparados con el consumo energético de un proceso de tratamiento convencional de lodos activados. (Tchobanoglous y col., citado por Gersberg y col.(1984)).

De acuerdo a la revisión bibliográfica efectuada, hasta la fecha en Venezuela no se han reportado estudios que arrojen resultados referidos al uso de humedales artificiales con lechos de medios percolantes para el tratamiento de aguas residuales municipales, agrícolas o industriales; por consiguiente, el objetivo de este trabajo consiste en generar información sobre

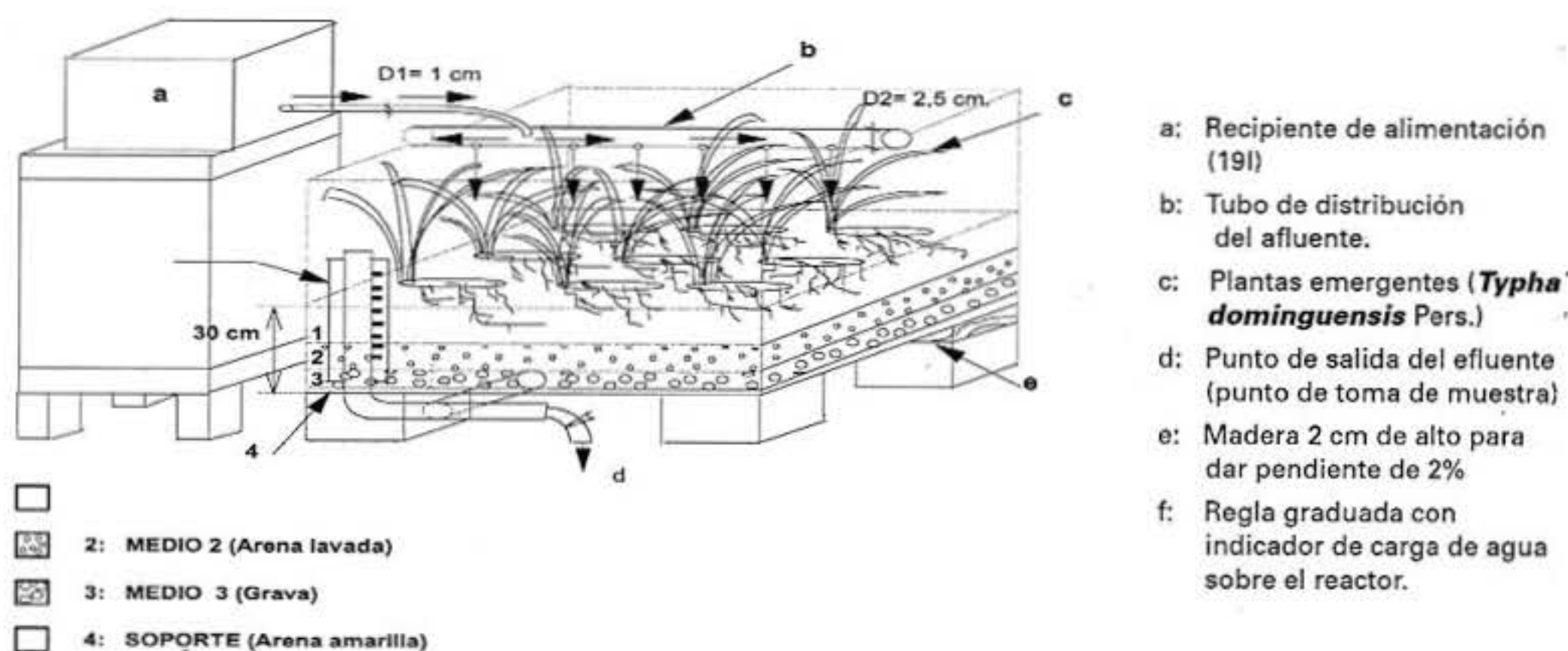
1 Profesora-Investigadora del Laboratorio de Biología Sanitaria. Departamento de Ingeniería Sanitaria. Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, U. C. V.
2 Profesora-Investigadora del Laboratorio de Biología Sanitaria. Departamento de Ingeniería Sanitaria. Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, U. C. V.

la utilización de estos sistemas no convencionales de tratamiento del agua residual para conocer específicamente su capacidad de remoción de nitrógeno, de acuerdo a variantes relacionadas con la altura de la lámina de agua aplicada. Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la evaluación de un humedal artificial construido a escala protopiloto y expuesto a condiciones ambientales externas tratando una fuente de alimentación de agua sintética que simula las características de un agua residual de concentración débil en cuanto al contenido de materia orgánica carbonosa. Se utilizó en nuestro caso una planta acuática emergente, conocida vulgarmente como "Eneas", "Totora" y "Cola de gato" (*Typha dominguensis* Pers.), en razón a su gran capacidad de remoción de nitrógeno en suelos saturados de agua según lo señalan Boyt y col. (1977), Gersberg y col. (1983, 1984, 1986), Leopoldo y col. (1996).

EXPERIMENTACIÓN

El reactor biológico fue ubicado en el área externa colindante al laboratorio de Procesos Unitarios del Departamento de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, en Caracas, a una altura aproximada de 865 msnm, expuesto a condiciones ambientales naturales durante los meses de mayo y junio de 1999. El reactor a escala protopiloto, está conformado por un tanque metálico de láminas galvanizadas de 16 mm de espesor, de sección cuadrada (100 cm. x 100 cm.) y de 80 cm. de altura, inclinado con una pendiente del 2%. En uno de los laterales externos del reactor se colocó un piezómetro que registra la carga hidráulica diaria; asimismo se perforó un punto de salida correspondiente al de toma de la muestra, ubicado a 2 cm con respecto al fondo y en una de las paredes del tanque cercano al centro de gravedad del mismo, orientado en dirección a la pendiente antes indicada. Ver Figura 1.

FIGURA 1: HUMEDAL ARTIFICIAL A ESCALA PROTOPILOTO



En el interior del reactor se colocaron capas de medios percolantes distribuidos de acuerdo al orden señalado en la Tabla 1.

TABLA 1: CARACTERIZACION DE LOS MEDIOS UTILIZADOS EN EL REACTOR BIOLOGICO

Medio	Tipo de Medio	Espesor (cm)	Permeabilidad	Tamaño de los granos (mm)*	Proporción en peso de los medios (%)	Indices de Plasticidad
1	Arena amarilla	20	moderada	2,38 - menores de 0,074	65	Limos
2	Arena lavada	5	Alta	6,35 - 0,149	19	NA
3	Grava	3	Alta	19,00 - 9,51	10	NA
Soporte	Arena amarilla	2	Moderada	2,38 - menores de 0,074	7	Limos

El medio 1, representa la capa superior del lecho cuya función es la de contener los rizomas y raíces de las plantas, se caracteriza por ser un material de mediana drenabilidad, de acuerdo al coeficiente obtenido de 10^{-3} cm/s. En este medio se plantó una vegetación emergente (*Typha dominguensis* Pers.), mediante la colocación de rizomas y plantas en un número de 10 unidades distribuidas uniformemente en toda la superficie del lecho.

El tipo de flujo en el sistema es vertical descendente, ya que el líquido se distribuye sobre la superficie del lecho para que atraviese las tres capas conformadas por los diferentes medios antes mencionados. Con relación al suministro del agua de alimentación, el sistema está conformado por un recipiente de 19 litros

de capacidad conectado a un tubo perforado con orificios de 0,5 cm de diámetro espaciados regularmente, cuya función consiste en distribuir el agua de alimentación sintética constituida por una mezcla de 5 g de melaza, y solución nutritiva preparada utilizando 19 ml de cada una de las siguientes soluciones: cloruro férrico, cloruro de calcio, sulfato de magnesio y solución amortiguadora de fosfato, de acuerdo a la metodología indicada para el análisis de la $DBO_{5,20}$ (APHA - AWWA, 1995). Adicionalmente se agregaron 2,31 g de nitrato de sodio como fuente de nitrato, completando con agua de grifo hasta un volumen final de 19 litros, lo cual proporciona una relación carbono/nitrógeno (C/N) de aproximadamente 5,5 mg $DBO_{5,20}$ /mg N- NO_3^- , y cuyas características químicas se señalan en la Tabla 2.

TABLA 2: COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA DE ALIMENTACION

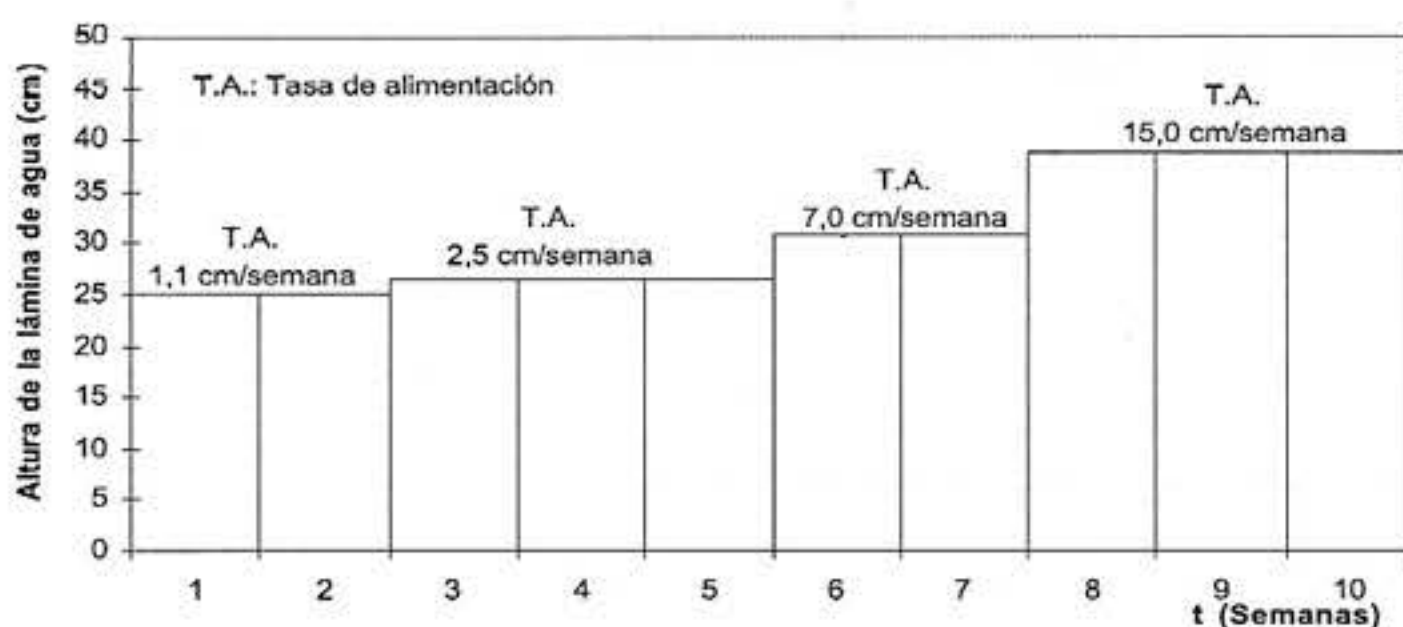
Alc (mg/l- CaCO ₃)	OD (mg/l)	pH	DBO _{5,20} (mg/l)	DQO (mg/l)	Conc. Norg. (mg/l-N)	Conc.NH ₃ (mg/l-N)	Conc.NTK (mg/l-N)	Conc. NO ₃ ⁻ (mg/l-N)
151	6,2	6,9	88	217	2,4	0,1	2,5	16,07

LEYENDA

Alc.: Alcalinidad
 OD: Oxígeno disuelto
 DBO_{5,20} : Demanda bioquímica de oxígeno (5 días, 20°C)
 DQO: Demanda química de oxígeno

Norg.: Nitrógeno orgánico
 NH₃: Nitrógeno amoniacal
 NTK: Nitrógeno total kjeldahl
 NO₃⁻ : Nitrógeno en forma de nitrato

FIGURA 2: VARIACIONES DE LA ALTURA DE LA LAMINA DE AGUA DE ACUERDO AL HIDROPERIODO PROPUESTO



El agua de alimentación del reactor biológico por sus características químicas contentivas de las formas de nitrógeno amoniacal, orgánico y nitrato puede ser asociado a un agua proveniente del uso agrícola (Metcalf y col. 1985).

A objeto de cuantificar el volumen de agua de alimentación requerida en el reactor para mantener la serie de hidroperíodos propuestos (ver Figura 2), se agregó agua residual sintética hasta saturar el lecho con una carga de líquido similar a la altura del nivel del mismo bajo condiciones de compactación (25 cm), obteniéndose un volumen de 10,6 litros.

Considerando el volumen mínimo de alimentación (10,6 litros), el área superficial del reactor de 1m² y un tiempo de retención hidráulico de una semana, se calculó una tasa mínima de alimentación de 1,1 cm/semana, que sirvió como parámetro de referencia para indicar las variaciones de altura de la lámina de agua, es decir la carga de agua por encima del lecho de acuerdo al hidroperíodo a ensayar durante los diez semanas de experimentación.

El resto de las tasas de alimentación: 2,5 cm/semana (24,6 litros); 7,0 cm/semana (69,6 litros) y 15 cm/semana (149,6 litros), se seleccionaron considerando las recomendaciones señaladas por Metcalf y col. (1985) para tierras pantanosas (2,5 a 60,0 cm/semana). Ver Tabla 3.

TABLA 3: VARIACIONES DE LA ALTURA DE LA LAMINA DE AGUA Y LAS TASAS DE ALIMENTACION ESTABLECIDAS DURANTE LA EXPERIMENTACION

Semana Número i	Lectura en el piezómetro " Li " (cm)	Carga de agua por encima del lecho " hi " (cm)	Cantidad de agua sintética " Vi " (cm?)	Área del reactor " A " (cm?)	Tasa de alimentación "T"(cm/semana) (aproximadamente)
1	25,0	0,0	10.600	10.000	1,1
2	25,0	0,0	10.600	10.000	1,1
3	26,4	1,4	24.600	10.000	2,5
4	26,4	1,4	24.600	10.000	2,5
5	26,4	1,4	24.600	10.000	2,5
6	30,9	5,9	69.600	10.000	7,0
7	30,9	5,9	69.600	10.000	7,0
8	38,9	13,9	149.600	10.000	15,0
9	38,9	13,9	149.600	10.000	15,0
10	38,9	13,9	149.600	10.000	15,0

Fórmulas aplicadas: $Li = 25cm + hi$; $hi = Vi / A - 1,1 cm$; $Vi = hi \times A + 10.600cm^3$

Los efectos producidos por los cambios climatológicos que alteraron la altura de la lámina de agua propuesta durante el período de experimentación, fueron ajustados diariamente al nivel original alimentando con agua de grifo para compensar las pérdidas en caso de evaporación; y con doble concentración de agua de alimentación en caso de precipitaciones pluviales.

Para evaluar la efectividad del tratamiento de este sistema biológico se determinaron periódicamente (3 veces a la semana) en el efluente los siguientes parámetros físico-químicos: temperatura, pH, oxígeno disuelto, alcalinidad, demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno orgánico (N-Norg.), nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y nitrógeno en forma de nitrato (N-NO₃⁻), siguiendo los procedimientos analíticos especificados en el manual "Métodos estándar para el análisis de aguas y aguas residuales", APHA y col. (1975, 1995).

Así mismo, se cuantificó semanalmente durante el tiempo de experimentación, el número de nuevas plantas.

Se aplicaron las formulaciones estadísticas correspondientes al valor promedio, desviación estándar y coeficiente de variación a los datos obtenidos de los análisis químicos relacionados con las concentraciones de nitrógeno total kjeldahl (N-NTK), nitrógeno en forma de nitrato (N-NO₃⁻) y demanda química de oxígeno (DQO), en el líquido tratado expuesto a diferentes tasas de alimentación.

Los porcentajes de remoción (R) reportados, se determinaron en base a la diferencias existentes entre la concentración obtenida en el líquido tratado (Cf) y la existente en el líquido original (Ci):

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_f}{C_i} \right) \times 100$$

TABLA 4: DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO DEL AGUA TRATADA BAJO LAS DIFERENTES TASAS DE ALIMENTACION SEMANAL

Tasa de alimentación semanal (cm/semana)	Semana Número	DQO (mg/l)
2,5	3	20
2,5	4	12
2,5	5	8
7,0	6	12
7,0	7	16
15,0	8	20
15,0	9	16
15,0	10	20

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados obtenidos sobre los porcentajes de remoción de nitrógeno total kjeldahl (N-NTK), nitrógeno en forma de nitrato (N-NO₃⁻) y los de carbono expresados como demanda química de oxígeno (DQO), así como los datos del crecimiento de la vegetación contenida en el reactor biológico durante las 10 semanas de experimentación, pueden observarse en la Tabla 5 y en la Figura 3.

Bajo la tasa de alimentación de 1,1 cm/semana considerada como un pre-ensayo de dos semanas de duración, se ajustó en el reactor la carga de agua diariamente, añadiendo agua residual sintética para compensar las pérdidas por evaporación, esto originó una reducción en el porcentaje de remoción del nitrógeno total kjeldahl de 52% a 32%; no obstante, la remoción de nitrógeno en forma de nitrato resultó

TABLA 5: PORCENTAJES DE REMOCION OBTENIDOS

Tasa de alimentación (cm/semana)	Semana Número	N-NTK (%)	N-NO ₃ ⁻ (%)	DQO (%)
1,1	1	52	99	85
	2	32	>99	NA
	3	68	>99	91
2,5	4	84	ND	94
	5	92	>99	96
7,0	6	92	>99	95
	7	96	>99	93
	8	96	98	91
15,0	9	96	99	93
	10	92	99	91

LEYENDA

N-NTK: Nitrógeno total kjeldahl
 N-NO₃⁻: Nitrógeno como nitrato

DQO: demanda química de oxígeno.
 ND: No determinado,
 NA: No aplicable.

con un porcentaje mayor al 99%, esto puede explicarse por el aumento en el crecimiento de la vegetación de 10 a 16 unidades (Ver Figura 3); por otra parte, se generó en el efluente un aumento en la concentración de carbono, reflejado en los datos obtenidos expresados como demanda química de oxígeno: 20 mg/l, 24 mg/l, 32 mg/l, 40 mg/l, 28 mg/l

y 628 mg/l. Durante las semanas número 3, 4 y 5 sometidas a la tasa de alimentación de 2,5 cm/semana, se observó una variación en el porcentaje de remoción de nitrógeno total kjeldahl en forma creciente de: 68%, 84% y 92% respectivamente y del nitrato mayor del 99% (Ver tabla 5), la cual se atribuye al crecimiento de la vegetación de 17 a 24 unidades (Ver Figura 3).

FIGURA 3: CRECIMIENTO PROMEDIO DE LA VEGETACION CONTENIDA EN EL REACTOR BIOLÓGICO ASOCIADO A LA TASA DE ALIMENTACION SEMANAL

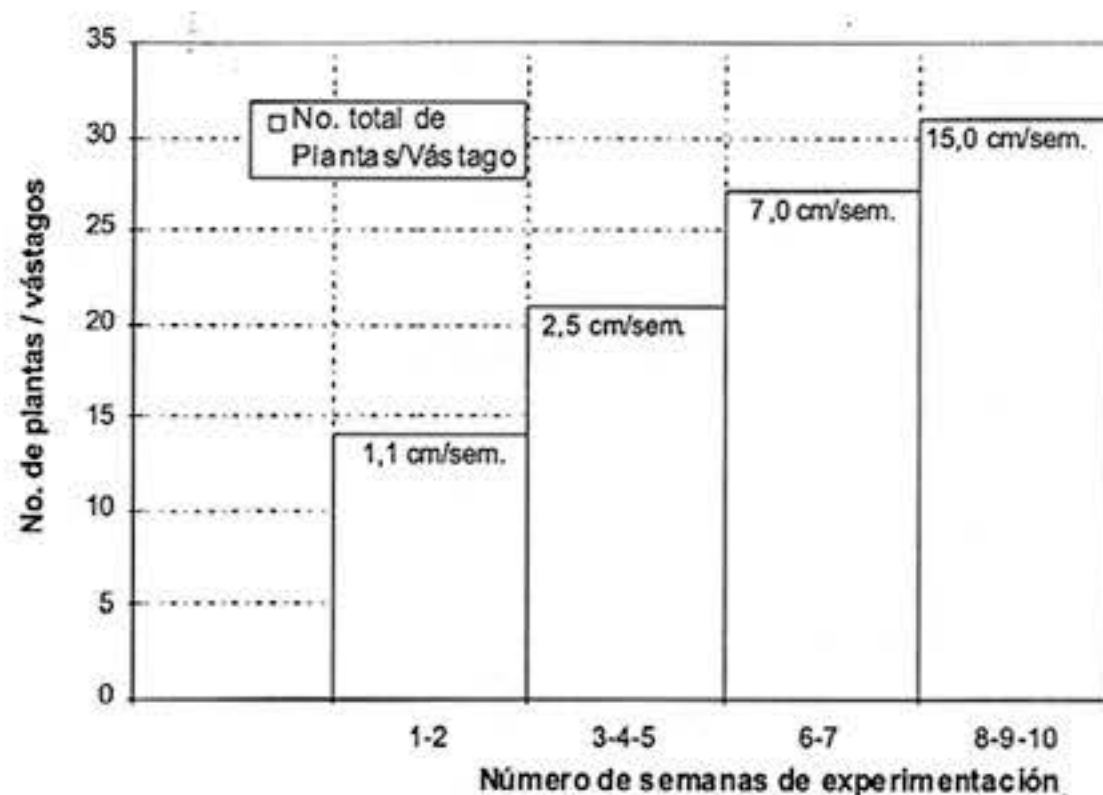
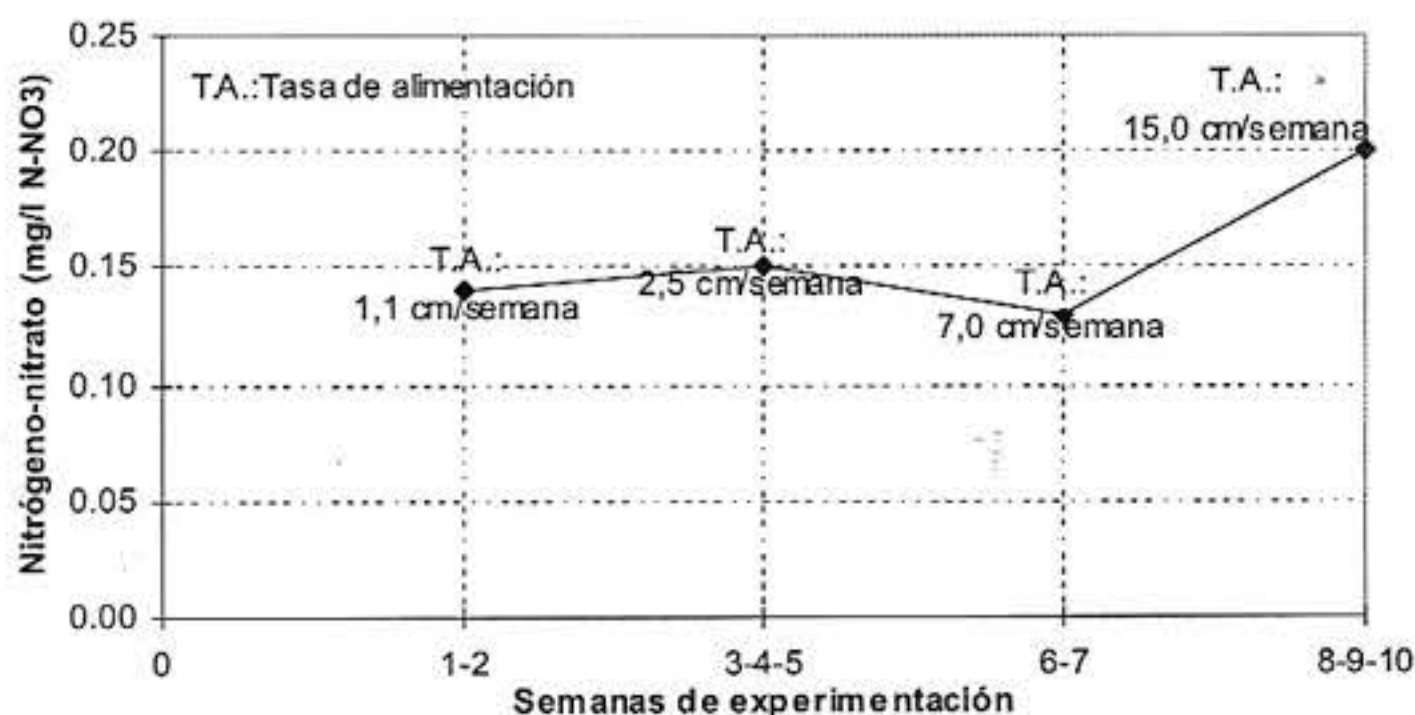


FIGURA 4: CONCENTRACION PROMEDIO DE NITROGENO EN FORMA DE NITRATO OBTENIDA EN EL EFLUENTE



Bajo las tasas de alimentación de 7,0 y 15,0 cm/semana se mantuvo la efectividad de remoción del nitrógeno ya que en ambos casos se obtienen eficiencias de remoción de nitrógeno total kjeldahl de 92% y 96%, así mismo la remoción del nitrato resultó igual o mayor a 98% (Ver tabla 5). Durante este tiempo de experimentación se reportó un crecimiento de 25 a 31 unidades de vegetación (Ver Figura 3).

Con relación a la remoción de carbono expresado como demanda química de oxígeno (DQO) durante las tasas de alimentación de 2,5 hasta 15 cm/semana se obtuvieron las concentraciones señaladas en la Tabla 4, indicando a través de estos resultados porcentajes de remoción superiores al 90% (Ver tabla 5).

Independientemente de cual sea el principal mecanismo de remoción que intervenga en el reactor biológico ya sea la desnitrificación o la absorción por las plantas, los valores promedio obtenidos de nitrógeno en forma de nitrato sujetos a las tasas de alimentación indicadas, reflejaron una eficiente respuesta del sistema biológico (ver Figura 4).

Durante las tasas de alimentación de 2,5 a 15,0 cm/semana, el oxígeno disuelto medido diariamente mostró una ligera variación creciente en los valores promedios obtenidos, de 3,0 mg/l a 3,5 mg/l. Los valores promedios de alcalinidad sujetos a las tasas de alimentación de 1,1 a 7,0 cm/semana mostraron la siguiente variación en forma creciente: 333 mg/l

,412 mg/l y 415 mg/l como CaCO₃ respectivamente; no obstante al incrementar la tasa de alimentación a 15,0 cm/semana se apreció una ligera disminución en la concentración, al obtener un valor de 407 mg/l como CaCO₃.

En cuanto al pH, los valores obtenidos durante las 10 semanas de experimentación, se encontraron entre 6,7; 6,8 y 6,9; valores que están en el intervalo óptimo de 6,5 y 7,5 sugeridos por Metcalf y col. (1985) para el proceso de desnitrificación.

CONCLUSIONES

- 1.- Durante el pre-ensayo bajo una tasa de alimentación de 1,1 cm/semana, cuando la vegetación estuvo sujeta a un período de adaptación, se observaron los menores porcentajes de remoción de nitrógeno: 28% de remoción de nitrógeno total kjeldahl y 85% de remoción de nitrógeno en forma de nitrato.
- 2.- La mayor efectividad del tratamiento se observó bajo las tasas de alimentación de 2,5; 7,0 y 15,0 cm/semana con un crecimiento reportado de 24 a 31 unidades de vegetación distribuidos en la superficie del reactor y los siguientes porcentajes de remoción: entre 92% y 96% para nitrógeno total kjeldahl, para nitrógeno en forma de nitrato igual o mayor a 98% y demanda química de oxígeno superior al 90%.

- 3.- La relación demanda bioquímica de oxígeno y nitrógeno en forma de nitrato ($\text{DBO}_{5,20}/\text{N-NO}_3^-$) resultó favorable, de acuerdo a los porcentajes de remoción de nitrato observados, igual o mayor a 98% .
- 4.- La alcalinidad aumentó durante las semanas de experimentación, partiendo de una concentración inicial en el afluente de 151 mg/l como CaCO_3 y finalizando con valores promedios en el efluente de: 333 mg/l, 412 mg/l, 415 mg/l y 407 mg/l expresados como CaCO_3 . El pH no mostró variaciones significativas, obteniéndose valores cercanos a la neutralidad: 6,7; 6,8 y 6,9.

BIBLIOGRAFÍA

- APHA, A.; A. AWWA (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Edición No. 19. Washington, U.S.A.
- _____ (1975). *Standard Methods For The Examination of Water And Wastewater*. Edición No.14. Washington, U.S.A.
- Barrios E. (1999). *Diseño, Construcción y evaluación de un humedal a escala laboratorio para la remoción de nutrientes (nitrógeno) de un agua residual de origen sintético*. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil.
- Boyt, F.; J. Bayley ; Jr. Zoltek, (1977). "Removal of nutrients from treated municipal wastewater by wetland vegetation". *Journal Water Pollution Control Federation*. 49, (5): 789 - 799.
- Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN) No. 255 (1977). *Método de ensayo para determinar la composición granulométrica de agregados finos y gruesos*. Publicaciones de Fondo Norma. Caracas, Venezuela.
- Gersberg, R.; B. Elkins; C. Goldman (1986). "Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands". *Water Research*. 20, (3): 363 - 368.
- _____ (1984). "Use artificial wetlands to remove nitrogen from wastewater". *Journal Water Pollution Control Federation*. 56, (2): 152 - 156.
- _____ (1983). "Nitrogen removal in artificial wetlands". *Water Research*. 17, (9): 1009 - 1014.
- Leopoldo, P.; M. Conte (1996). *Proceso fito-pedológico aplicado no tratamiento de efluentes doméstico*. XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. México. Tomo I: 335-342.
- Metcalf - Eddy. (1985). *Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Editorial Labor, S.A. Segunda Edición. Barcelona, España.

RECOMENDACIONES

- a.- De acuerdo a la eficiencia comprobada en este sistema en cuanto a la remoción de nitrógeno y carbono, se sugiere una mayor proporción de los componentes químicos en el agua de alimentación o aumentar el volumen tratado para determinar la capacidad máxima.
- b.- La aplicación práctica de estos sistemas debe ir acompañada de un tratamiento previo de separación de sólidos para evitar interferir con el tratamiento biológico.