

## Determinación del potencial depurador del cultivo hidropónico de *Phalaris spp* y *Pennisetum clandestinum* Hochst, mediante la técnica de la película nutriente

---

El presente estudio corresponde a la segunda etapa de la evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas conocido como la Técnica de la Película Nutriente (TPN), utilizando dos especies de gramíneas: *Pennisetum clandestinum* Hochst (pasto kikuyo) y *Phalaris spp* (pasto brasileiro). Los resultados permitieron establecer que las raíces actúan como un filtro biológico de los sólidos y materia orgánica, y además absorben los nutrientes contenidos en este tipo de aguas residuales. Por otra parte, el establecimiento de una cadena trófica o "cadena depuradora" de organismos (plancton y fauna asociada) contribuye en gran medida en la remoción de polutantes. Bajo las condiciones de operación, el sistema de tratamiento (TPN) removió eficientemente bacterias coliformes de origen fecal, seguido por sólidos suspendidos, materia orgánica y en menor grado los nutrientes.

---

**LUIS EDUARDO CRUZ TORRES**  
Químico, M. Sc.  
Profesor Asistente, U.N.

**FLOR MARIELA CUERVO**  
**DORIS YOLANDA SANABRIA**

### INTRODUCCION

Un reciente desarrollo en el área de tratamiento de aguas residuales es la Acuicultura, dentro de la cual se encuentra la Técnica de la Película Nutriente (TPN), desarrollada en 1965 por Allen Cooper en Inglaterra.

El presente estudio es el complemento de una experimentación preliminar ya realizada (Arjona, 1987), y en él se utilizó además de Pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst), el pasto brasileiro (*Phalaris spp*), dos especies de gramíneas que fueron sometidas a tres cargas diferentes de agua residual, aplicadas durante un período de seis semanas cada una (tres etapas experimentales). El objetivo fue estudiar para cuál de estas cargas se lograba una mejor respuesta de la capacidad depuradora de las plantas, respecto a la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos totales, nutrientes y bacterias coliformes fecales.

Se evaluó comparativamente la remoción, lograda por las dos especies a lo largo de cada hidrocanal, y se observó el efecto de la poda de las plantas sobre la remoción de materia orgánica y, se cuantificó la presencia de macro y microorganismos asociados que pudieran favorecer la eficiencia del sistema.

### REVISION BIBLIOGRAFICA

La Técnica de la Película Nutriente (TPN) utiliza plantas que remuevan los nutrientes de una delgada película de agua residual que fluye a través de los canales, por medio de sus raíces.

La densa masa de raíces que se forma, actúa como filtro físico reteniendo gran cantidad de sólidos en suspensión y ofrece un medio de soporte para el crecimiento de organismos aeróbicos que utilizan como alimento buena parte de los contaminantes presentes en el agua residual. (Cooper, 1983).

Este sistema de tratamiento implica bajos costos, eficiencia en el uso de la energía (solo dispone de la energía solar), sencillez mecánica, fácil operación y mantenimiento.

La figura 1, muestra las variables que afectan el sistema de tratamiento TPN.

La TPN fue evaluada en los Estados Unidos como sistema de tratamiento de aguas negras. Winfield y Bone en 1981, determinaron la efectividad de esta técnica, con cultivos de remolacha y tomate, mostrando que las plantas son capaces de tolerar cambios extremos de la concentración de los nutrientes presentes en el agua residual. Además, demostraron que el sistema radical de las plantas provee un bloqueo efectivo en la transmisión de virus, bacterias y otros organismos patógenos a las partes aéreas de las plantas.

Bouzoun y Palazzo en 1982, establecieron la factibilidad económica de la TPN para tratar el efluente primario de una planta de tratamiento de aguas residuales y al mismo tiempo producir un cultivo de pasto reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.). Como resultado de esta evaluación se mostró que la remoción de materia orgánica,

sólidos suspendidos totales, nutrientes y bacterias coliformes fecales, son significativas. Además, se encontró que la producción de frutos y pastos fue alta y de buena calidad nutritiva.

La TPN también se ha empleado con macrófitas acuáticas, las cuales desarrollan una densa masa radical que filtra efectivamente materia orgánica y sólidos suspendidos (Jewell *et al.*, 1981; Dierberg *et al.*, 1987); Reddy y Debusk, 1987).

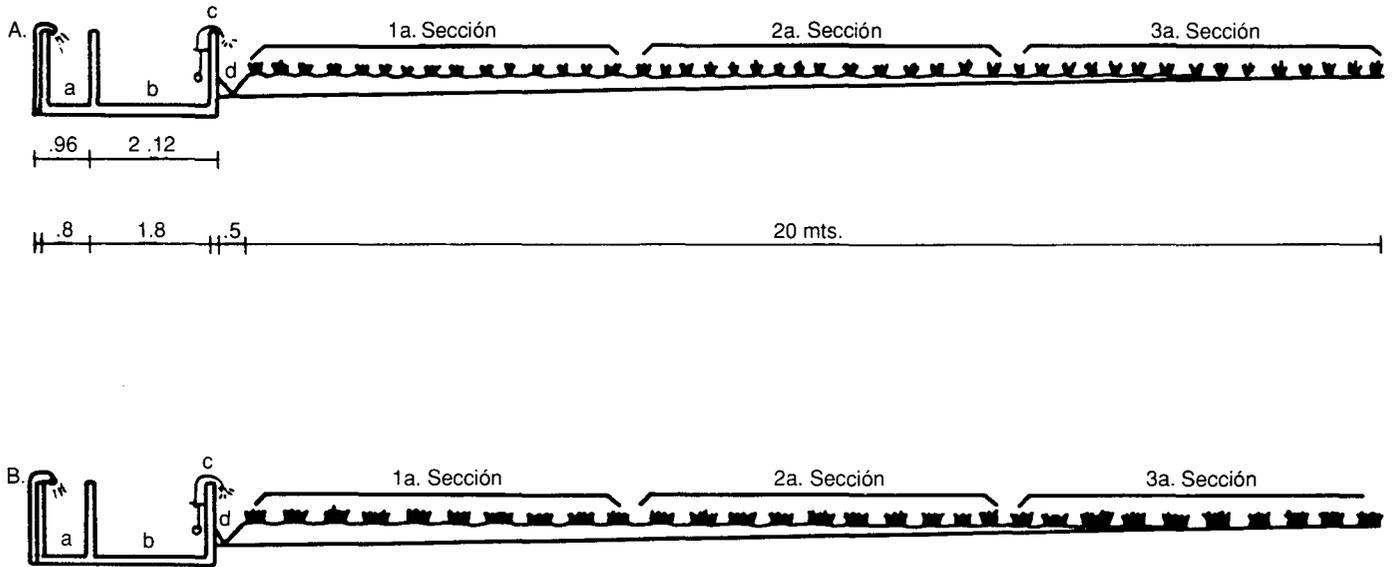
Recientemente (Arjona en 1987), en la Universidad Nacional, se realizó una evaluación experimental preliminar del tratamiento de aguas residuales domésticas, alicando la TPN a un cultivo de pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*). Del análisis de los resultados obtenidos se concluyó que el cultivo de pasto kikuyo bajo las condiciones estudiadas es un sistema eficiente para el tratamiento de aguas residuales domésticas crudas. Se obtuvo además, una biomasa foliar mucho mayor que la lograda por la especie cuando crece en suelos, aún con fertilización. Así mismo, en el material vegetal analizado no se detectó la presencia de metales pesados que pudieran causar toxicidad.

Sólidos suspendidos y disueltos	$\frac{d \text{ SS}, d \text{ Sd}}{dt, 1}$	F(PDO, FB, FC, CM, AR)	SS
DBO	$\frac{d \text{ DBO}}{dt, 1}$	F(PDO, FB, FC, CM, AR)	DBO
Nutrientes	$\frac{d \text{ Nut.}}{dt, 1}$	F(PDO, FB, FC, CM, AR)	Nutrientes
Patógenos	$\frac{d \text{ Pat.}}{dt, 1}$	F(PDO, FB, FC, CM, AR)	Patógenos

<b>PDO</b> Parámetros de diseño y operación	<b>FB</b> Factores de film-bioquímico	<b>CM</b> Caract. de las macrófitas
- Pendiente	- Tipo de microorganismos	- Tipo de planta
- Longitud	- Comportamiento de micr.	- Comportamiento de la planta
- Carga hidráulica	- Relación planta-microorganismo -	- Rata de crecimiento
- Período		- Producción de biomasa
- Frecuencia		- Comportamiento de matriz de raíces
- Rata de aplicación		
	<b>FC</b> Factores climáticos	<b>AR</b> Caract. del agua residual
	- Radiación solar	- Industrial doméstico
	- Temperatura - humedad	- Caracte. fisicoquímicas
	- Precipitación	- Variación en caudal
		- Característica biológica

FIGURA 1. Identificación de las variables que afectan el sistema de tratamiento TPN (tomado de Cooper *et al.*, 1983 y Fonseca, 1983).



- A. Canal sembrado con *Phalaris* spp (Pasto Brasileiro)
- B. Canal sembrado con *Pennisetum Clandestinum* Hochst (Pasto Kikuyo)
- a. Tanque desarenador
- b. Tanque de almacenamiento
- c. Manguera de alimentación
- d. Cámara de aquietamiento
- e. Hidroconal

- Puntos de muestreo
- 1 Afluente
  - 2 1er. 1/3
  - 3 2o 1/3
  - 4 Efluente

FIGURA 2. Vista de perfil del montaje hidropónico TPN.

**MATERIALES Y METODOS**

El presente trabajo fue realizado en la planta piloto localizada en la Estación de Bombas de "El Salitre", perteneciente a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).

Se utilizaron dos canales de la planta piloto para la siembra de los pastos y uno adyacente como canal referencia; estos canales tienen 20 m de longitud, 0.5 m de ancho y 0.2 m de profundidad.

Los cespedones de pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y pasto brasileiro (*Phalaris* spp) se colocaron en los canales respectivos, siendo sometidos previamente a una limpieza total del suelo adherido a sus raíces. Cada cespedón tenía un área de 50 x 50 cm. (pasto kikuyo) y de 40 x 40 (pasto brasileiro).

Cada canal fue dividido en tres secciones de 6.6 m de longitud, con un total de 10 cespedones por sección para el pasto kikuyo, y de 15 cespedones por sección para el pasto brasileiro, la distancia de separación entre los cespedones fue de 15 cm, y al final de cada una de las secciones se establece un sitio de muestreo (Fig. 2).

El estudio se realizó en 3 etapas:

Etapas	Período	Caudal	Frecuencia	Volumen de agua tratada
I	X-29-XII-11/87	2 L/min	24 h/día	2880 L/día
II	II-24-IV-6/88	2 L/min	8 h/día	960 L/día
III	IV-20-V-1/88	3 L/min	8 h/día	1440 L/día

Para la etapa I se aplicó agua residual durante las 24 h. del día y en las etapas II y III solamente durante el período de 8 a.m. a 4 p.m.

Los análisis físicos, químicos y biológicos realizados a las muestras correspondientes a cada uno de los sitios de muestreo de los canales se muestran en la Tabla 1.

Al iniciar y finalizar cada una de las etapas experimentales se realizó la poda del follaje producido, para determinar el rendimiento de forraje verde y la productividad en términos de materia seca de cada una de las especies.

**RESULTADOS Y DISCUSION**

**Parámetros de operación**

Las condiciones operacionales mantenidas en cada una de las etapas experimentales se consignan en la tabla 2.

**Tabla 1**  
**Programación de muestreos y análisis del agua residual**

Variable	Unidades	Método (Standard Methods 1985)	Frecuencia	Sitios de Muestreo de Hidrocanal			
				Agua cruda (afuente)	1er. 1/3	2do. 1/3	3er. 1/3 tratada efluente
pH		Potenciómetro	1/semana	x	x	x	x
Alcalinidad	mg/L	Método de titulación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.02 N	1/semana	x	x	x	x
Conductividad	Micromhos	Conductímetro Beckman	1/semana	x	x	x	x
Sólidos Totales	mg/L	Método de evaporación en cápsula de porcelana	1/semana	x	x	x	x
Sólidos suspendidos	mg/L	Método de crisol Gooch	1/semana	x	x	x	x
BDO Total	mg/L	Método de diluciones	1/mes	x	x	x	x
DBO filtrada	mg/L	Método de diluciones	1/mes	x	x	x	x
DQO filtrada	mg/L	Método de reflujo abierto	1/semana	x	x	x	x
Amoñio	mg/L	Método de Nesslerización	1/semana	x	x	x	x
Ortofosfatos	mg/L	Métodos de cloruro estañoso	1/semana	x	x	x	x
Potasio	mg/L	Espectrofotómetro de absorción atómica	1/semana	x	x	x	x
Coliformes Fecales	colif/ 100 ml	Filtración en membrana	1/Semana	x	x	x	x
Plancton	organ/100ml	Microscopio estereoscopio. Observación cualitativa y cuantitativa Identificación taxonómica	1/mes	x	x	x	x
Fauna Asociada		Identificación toxonómica, con claves y bibliografía específica	1/mes	x	x	x	x
Tiempo de Retención	Minutos	Método de Mohr	2/Etapa Experimental				x
Hidráulico (TRH)							

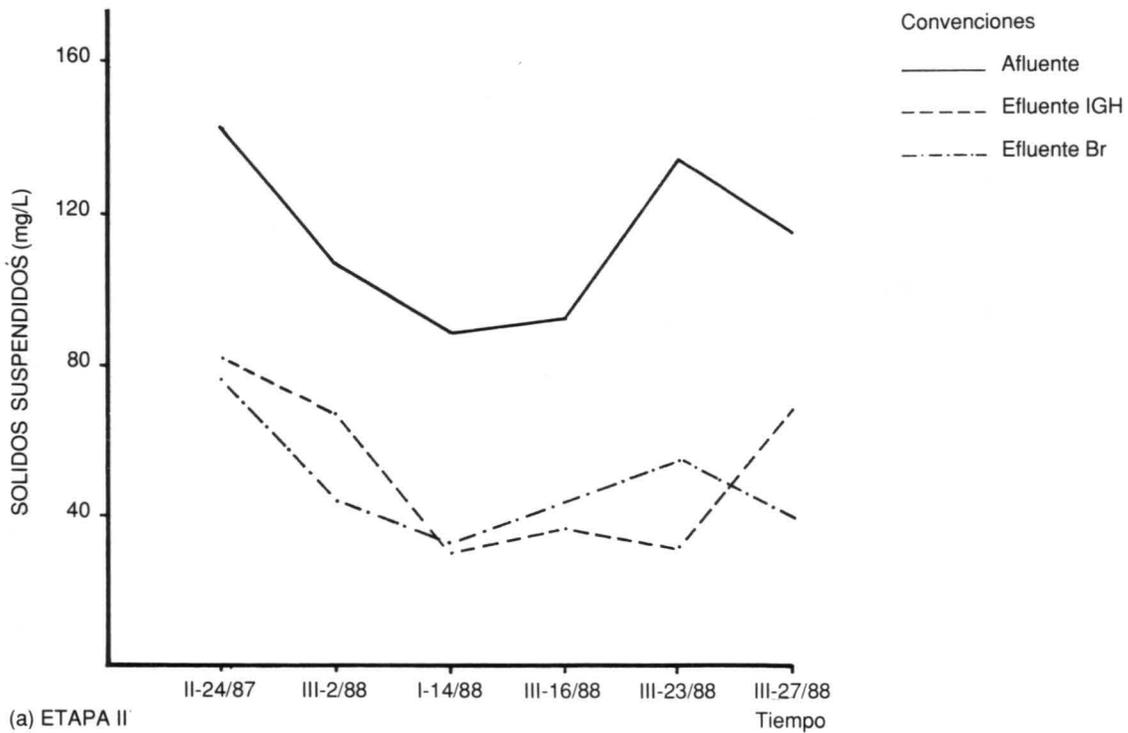
La frecuencia de aplicación del agua residual ocasionó una respuesta diferente en las plantas, y en la remoción ejercida por el sistema. No se registraron valores de remoción significativos y producción alta (Tabla 3) durante las 24 horas del día; en la etapa II la disminución de la frecuencia a 8 horas/día permitió una mayor remoción para todas las variables, y una mayor productividad de pasto Kikuyo, no así de pasto brasilero. En la etapa III se obtiene el mayor grado de remoción y de producción de

forraje, pues los cespedones de las plantas se han adaptado a la frecuencia de aplicación 8 horas /día, y al aumentar el caudal a 3 L/min. mejora la efectividad del sistema.

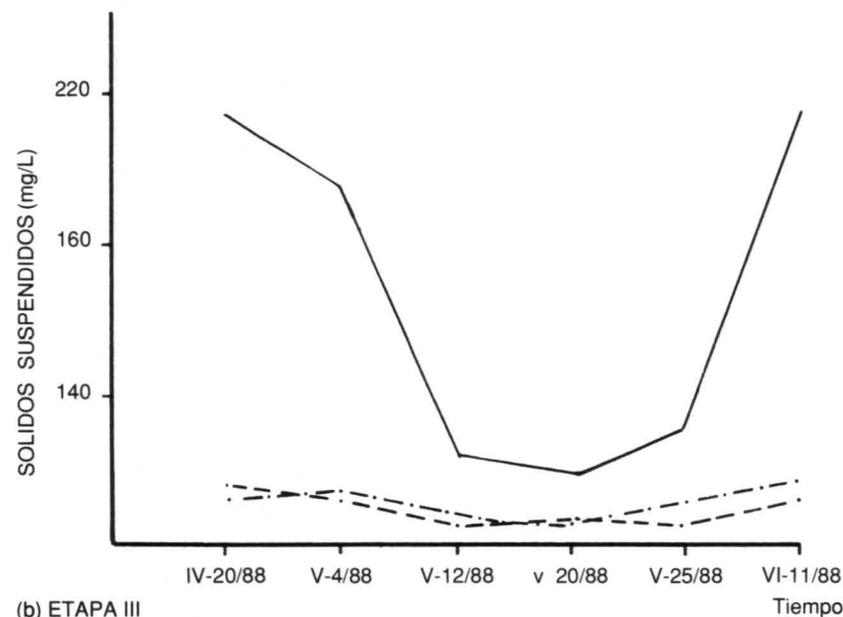
La poca variabilidad de los valores de TRH indica que el aumento de la masa radical y la acumulación de biopelícula se dieron en la misma proporción en las dos especies. Aunque se registraron variaciones notorias en los TRH durante las etapas I y II, en la etapa III son mínimas,

**Tabla 2**  
**Datos de algunos parámetros de operación, del sistema TPN**

Etapa	Fecha	Período (días)	Caudal	Frecuencia	Carga Hidráulica m <sup>3</sup> /día por canal	Carga Superficial m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día por canal	Carga Org. en términos de ODQ filtrada kg/m <sup>2</sup> día	TRH (tiempo de retención hidráulica)			
								Pasto kikuyo		Pasto Braslero	
i	X-29 a XII-II/87	44	2 L/min.	24 h/día	2.880	0.288	0.0551	INICIO	FINAL	INICIO	FINAL
II	II-24 a IV-6/88	43	2 L/min	8h/día	0.960	0.0960	0.0236	7 min	30 min	5 min	27min
III I	V-20 a VI-1/88	43	3 L/min	8h/día (8AM-4PM)	1.440	0.1440	0.0269	38 min	68 min	34 min	66min
								68 min	62 min	66 min	61 min



(a) ETAPA II



(b) ETAPA III

**FIGURA 3.** Variación en el tiempo de la concentración de sólidos suspendidos mg/L en el agua residual afluente y efluente para las dos especies de Pasto

**TABLA 3**  
**Remociones ejercidas por el sistema de tratamiento TPN, para algunas variables utilizando pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst)**  
**y pasto brasilero (*Phalaris* spp)**

VARIABLE	Kikuyo						Brasilero								
	% de remoción por secciones			% de remoción total			% de remoción por secciones			% de remoción total					
	Independiente		Dependiente	Independiente		Dependiente	Independiente		Dependiente	Independiente		Dependiente			
1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	
ETAPA I															
DBO <sub>5</sub> total	20.17	23.26	15.77	11.24	11.75		10.60	23.18	31.05	15.36	23.67		15.36	23.67	49.63
DBO <sub>5</sub> soluble	12.76	22.87	13.20	20.00	9.06		7.51	13.42	29.57	12.04	25.26		12.04	25.26	44.83
DQO filtrada	22.90	16.10	9.63	12.57	6.05		23.03	18.98	13.91	14.26	8.61		14.26	8.61	40.55
Amonio	7.59	8.05	8.12	7.34	6.94		6.54	10.53	9.47	9.86	7.91		9.86	7.91	24.31
Ortofosfatos	3.49	2.72	2.43	2.62	1.37		3.66	1.44	1.41	2.47	3.74		2.47	3.74	6.40
Potasio	4.95	4.46	4.05	4.23	3.61		6.37	4.05	7.29	4.32	4.00		4.32	4.00	16.56
Coliformes fecales/100 ml	35.72	53.20		34.60			37.45	51.46		29.92			29.92		72.38
ETAPA II															
Sólidos suspendidos	45.75	27.28	4.34	14.88	2.10		32.41	25.52	14.68	17.69	7.30		17.69	7.30	57.45
DBO <sub>5</sub> Total	37.34	16.17	30.77	10.75	16.92		30.78	28.90	24.30	17.36	14.31		17.36	14.31	61.74
DBO <sub>5</sub> soluble	19.13	12.13	24.75	9.72	18.32		16.85	24.44	14.08	20.40	8.37		20.40	8.37	45.63
DQO filtrada	21.06	14.04	16.97	11.05	11.73		19.13	15.07	10.80	12.25	10.41		12.25	10.41	41.80
Amonio	8.54	9.39	7.56	8.46	5.92		8.61	10.14	11.35	9.08	8.93		9.08	8.93	26.49
Ortofosfatos	13.73	5.27	9.71	4.51	7.98		8.95	8.32	8.63	7.69	7.21		7.69	7.21	23.87
Potasio	9.52	3.31	8.03	2.96	7.05		10.07	6.55	3.35	5.77	2.91		5.77	2.91	18.76
Coliformes fecales/100 ml	48.96	50.25		27.71			50.70	42.40		20.65			20.65		71.34
ETAPA III															
Sólidos suspendidos	22.11	36.39	28.57	31.46	12.29		20.22	30.20	30.93	24.08	18.06		24.08	18.06	62.31
DBO <sub>5</sub> total	29.58	34.11	28.54	25.33	13.43		23.38	54.20	11.90	41.30	4.10		41.30	4.10	68.83
DBO <sub>5</sub> soluble	33.95	30.84	6.08	23.27	2.67		30.60	49.92	5.15	34.02	1.79		34.02	1.79	66.42
DQO filtrada	23.93	23.38	21.14	17.53	12.23		20.68	27.53	26.62	21.67	15.93		21.67	15.93	58.29
Amonio	8.92	15.83	19.64	14.49	14.98		11.94	24.13	23.70	21.32	15.52		21.32	15.52	47.77
Ortofosfatos	8.35	11.78	12.47	10.84	10.24		8.72	14.49	12.95	13.32	11.22		13.32	11.22	32.27
Potasio	7.21	9.07	5.19	8.40	4.45		11.91	12.42	11.67	11.50	9.46		11.50	9.46	28.93
Coliformes fecales/100 ml	64.62	52.44		19.32			53.14	68.72		33.13			33.13		85.27

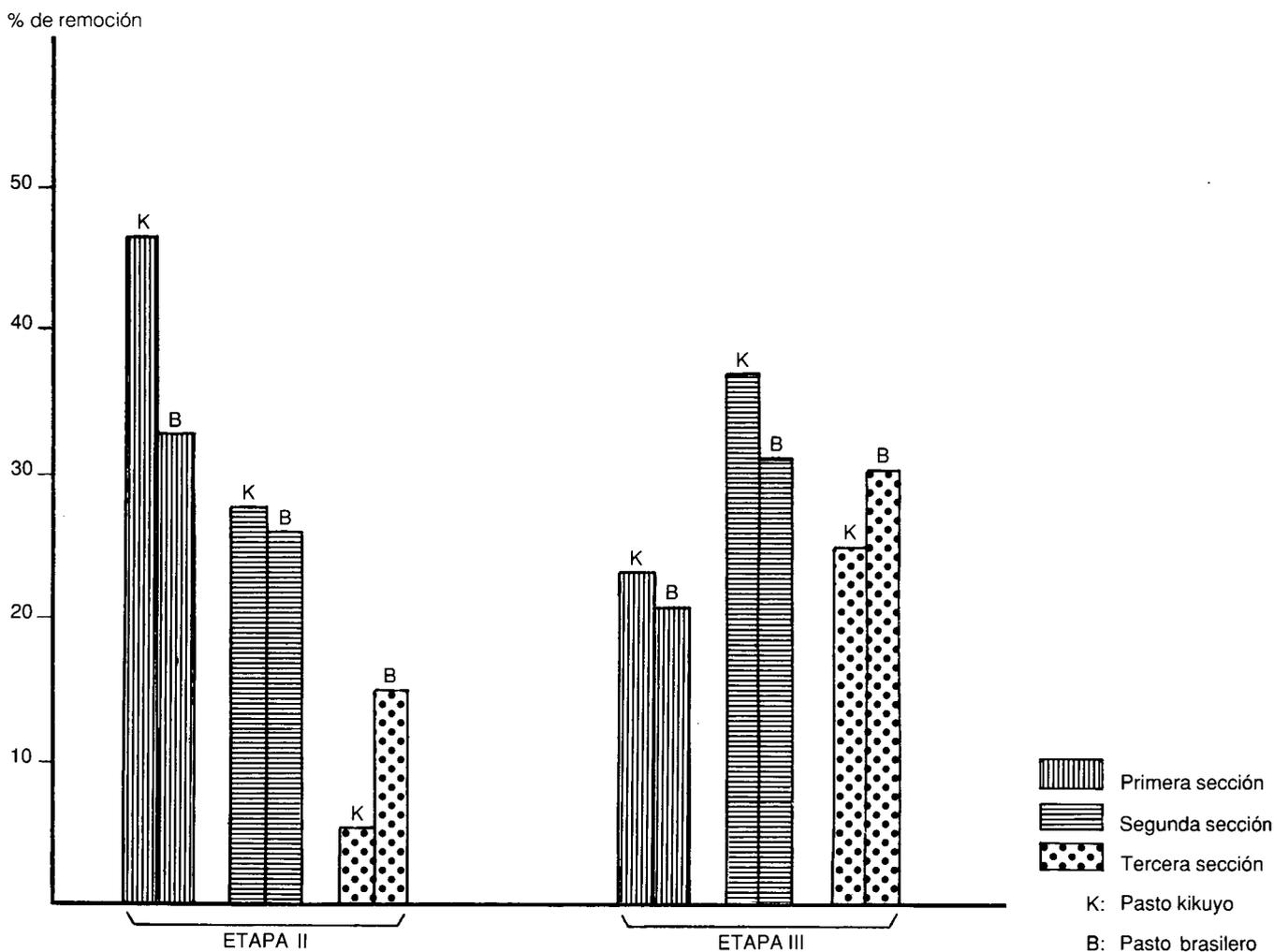


FIGURA 4. Variación del % de remoción de sólidos suspendidos ejercido por cada especie vegetal en cada sección del canal

indicando que el sistema ha alcanzado una condición estable.

**Eficiencia de remoción del sistema TPN con pasto kikuyo y brasilero**

**Sólidos suspendidos totales**

Las variaciones de concentración de SST durante las etapas II y III se ilustran en la figura 3. Como puede observarse se presentan altas oscilaciones en la retención de sólidos en la segunda etapa. Sin embargo, la retención durante la etapa III no presentó variaciones significativas a través del tiempo, indicando una condición estable que permite una remoción más o menos constante independiente de las variaciones del efluente.

La remoción de los sólidos suspendidos (Figura 4) se realiza en mayor proporción en la primera sección de

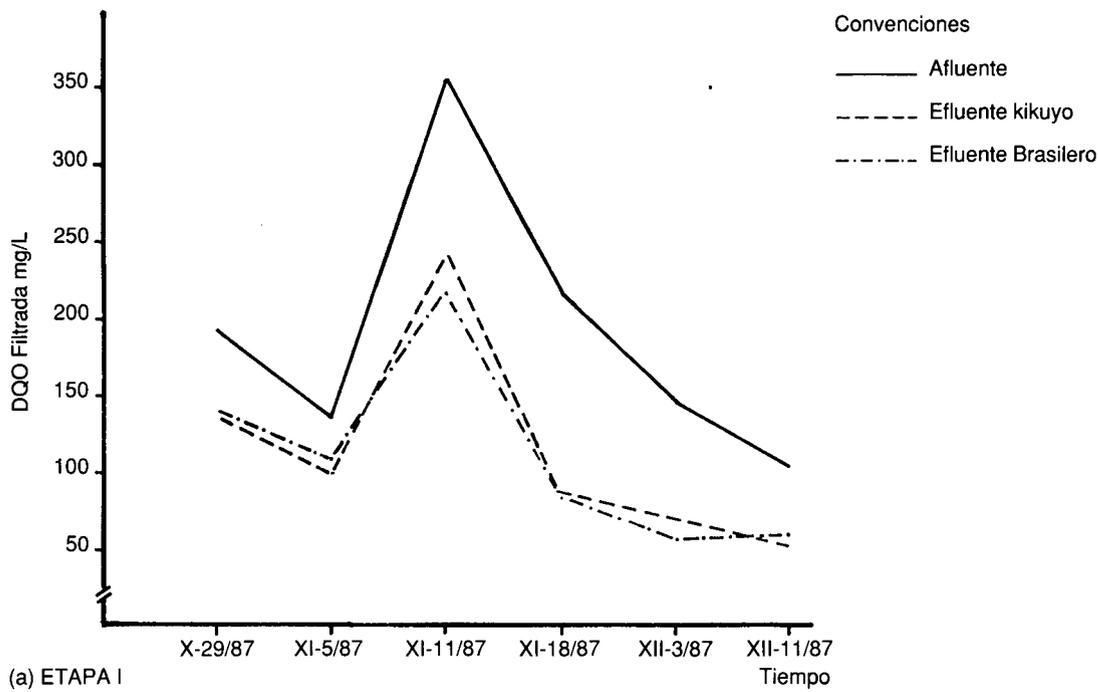
cada canal aunque en la etapa III disminuye debido posiblemente, a la gran colmatación que presentaban las raíces de las plantas en este punto de la experimentación.

La remoción total alcanzada fue de 62.73 y 67.09 % para el pasto Kikuyo, y 57.45 y 62.31% para el pasto brasilero. Estos resultados muestran que el sistema reduce la concentración de sólidos básicamente por filtración de las raíces, el fraccionamiento de partículas de mayor tamaño, y el consumo de bacterias y detritus por el zooplankton y la fauna asociada al sistema radical.

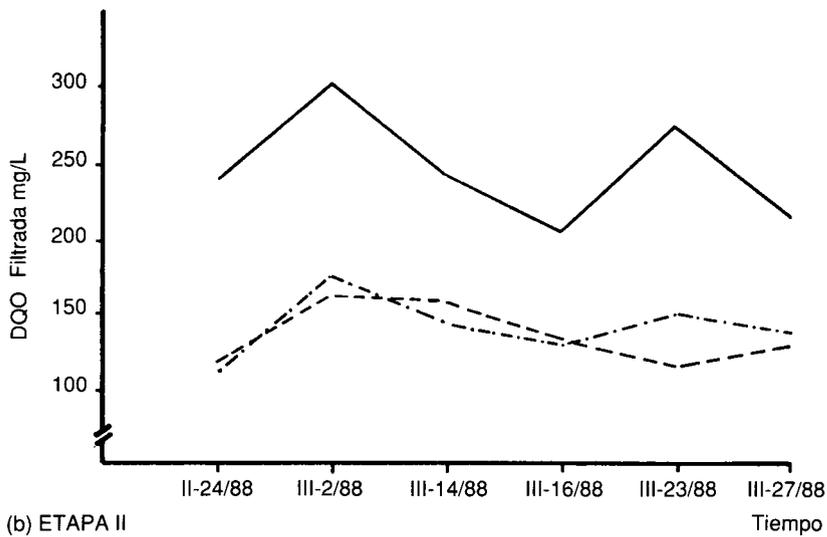
**Materia orgánica**

**Demanda bioquímica de oxígeno total y soluble (DBO<sub>5</sub>)**

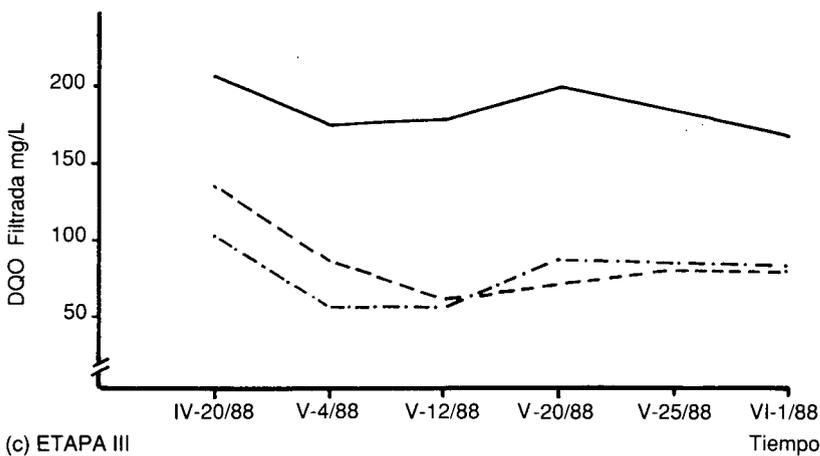
Los valores de DBO total oscilaron entre 88.18 y 117.92 mg/L en el afluente. Los porcentajes de remoción de DBO total estuvieron entre 48.56 y 68.35% para el pasto



(a) ETAPA I



(b) ETAPA II



(c) ETAPA III

FIGURA 5. Variación en el tiempo de la concentración de la DBO filtrada mg/L en el agua residual afluente y efluente para las dos especies de pasto.

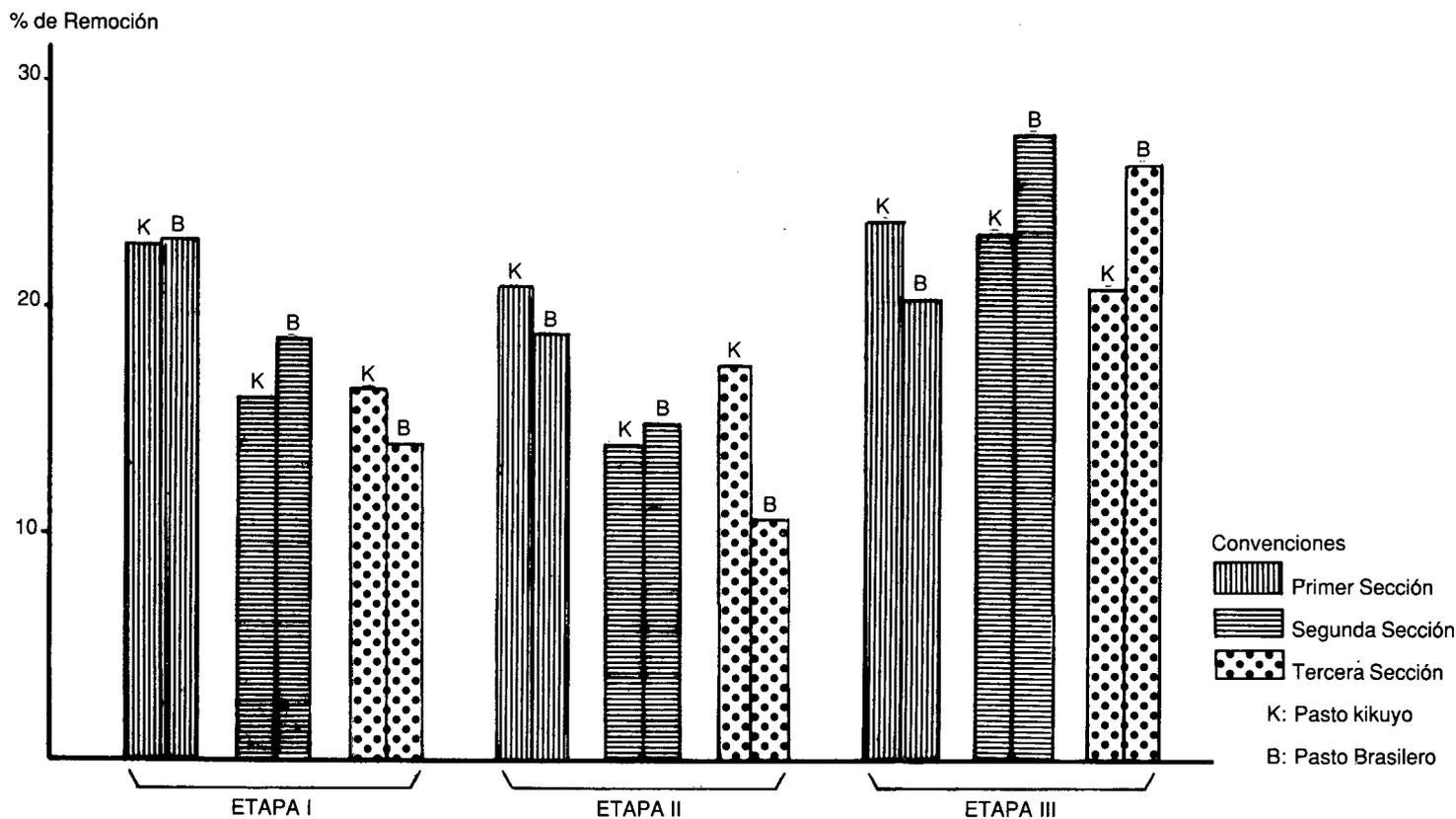


FIGURA 6. Variación del % de remoción de DQO filtrada, ejercido por cada especie vegetal en cada sección del canal.

kikuyo y 49.63 y 68.83% para el pasto brasileiro. La remoción aumentó progresivamente a través del tiempo, lo cual indica que los procesos de filtración y degradación ocurren cuando la película biológica tiene un determinado grosor y la masa radical es suficientemente densa, para crear un medio favorable al establecimiento de un mayor número de bacterias y demás organismos asociados.

La concentración de la DBO soluble afluente no presenta variaciones significativas y se encuentran en un intervalo de 59.65 y 67.75 mg/L.

Los porcentajes de remoción total logrados por cada especie vegetal aumentaron a través de la experimentación, presentando valores muy parecidos a los registrados para la DBO total, entre 41.82 y 60.10% para el pasto kikuyo y 44.83 y 66.42% para el pasto brasileiro.

Los altos valores de remoción en la última etapa experimental para los dos pastos, indican que la disminución de su concentración fue favorecida por el incremento progresivo de microorganismos, a medida que ocurría la estabilización de la materia orgánica.

**Demanda química de oxígeno (DQO filtrada)**

La DQO en el agua residual afluente, presenta una variabilidad de su concentración, entre 186.72 y 246.16 mg/L, a través del tiempo (Figura 5). La remoción se realiza en forma similar por las dos especies de pastos en las tres etapas experimentales, siendo mayor en la etapa III (Figura 6); además se aprecia que no hay una tendencia definida en cuanto a una mayor o menor remoción en cada una de las secciones de cada canal.

Aunque se trataron volúmenes diferentes de agua en las etapas I y II, los porcentajes de remoción de DQO para las dos especies, son del mismo orden de magnitud (entre 40.56 y 43.83%). Esto es debido a la aplicación de flujo continuo, escasa densidad radical y poca formación de biopelícula en la etapa I y a la disminución de la frecuencia de aplicación del agua en la etapa II.

**Nutrientes: amonio, ortofosfatos, potasio**

Se registraron variaciones marcadas de amonio en el agua residual afluente, no así para los ortofosfatos y el

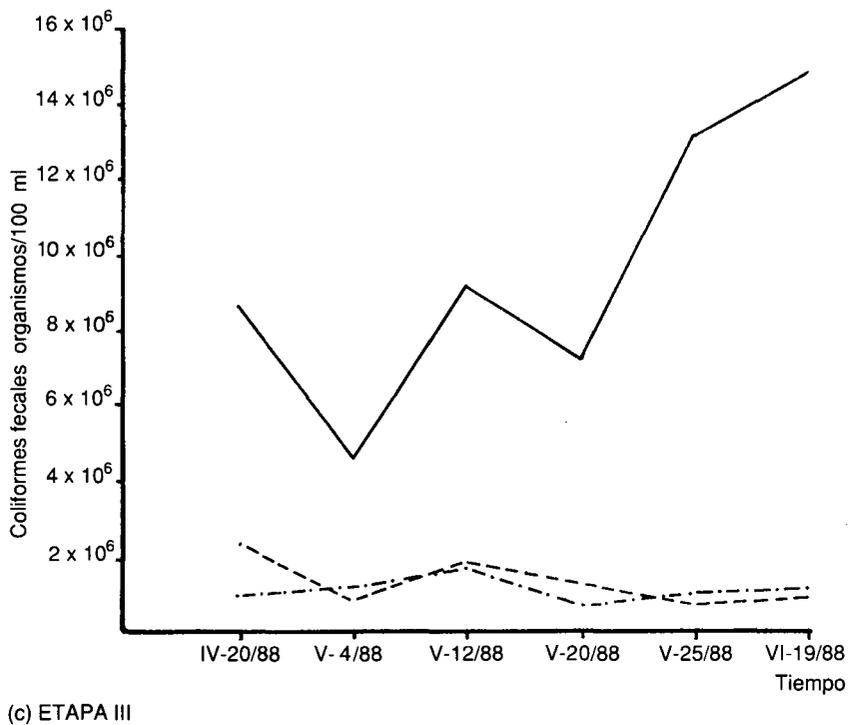
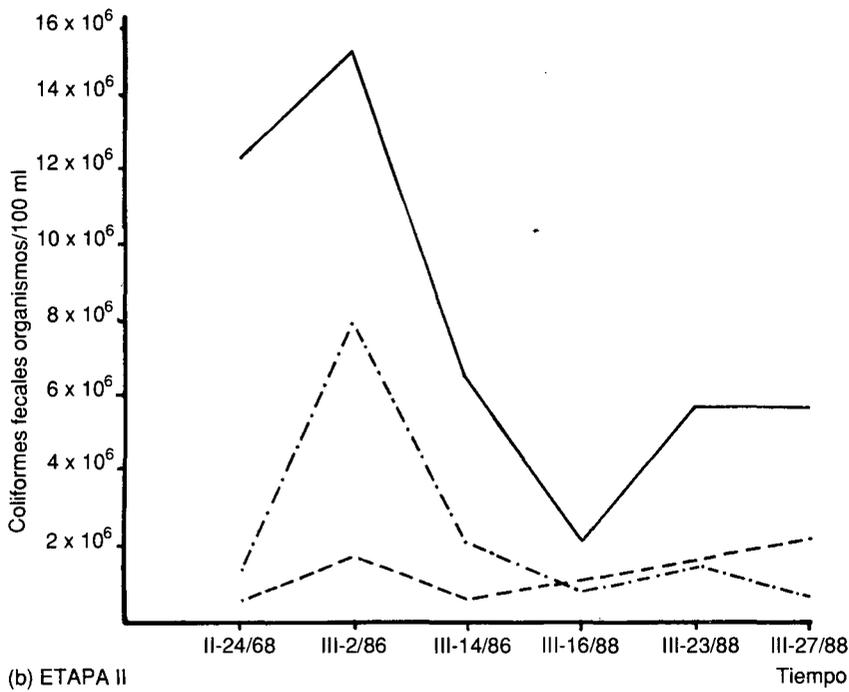
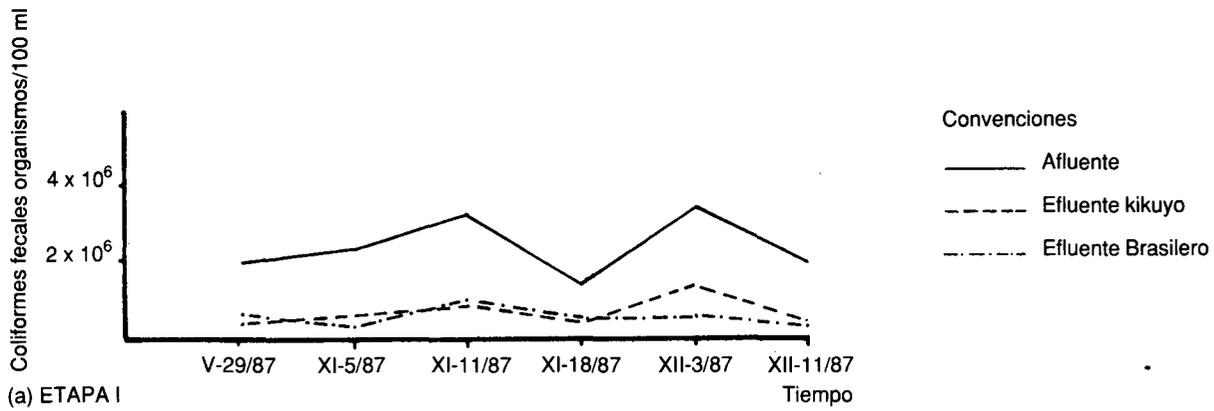


FIGURA 7. Variación en el tiempo de la población de bacterias coliformes fecales org/100 ml en el agua residual afluyente y efluente para las dos especies de pastos

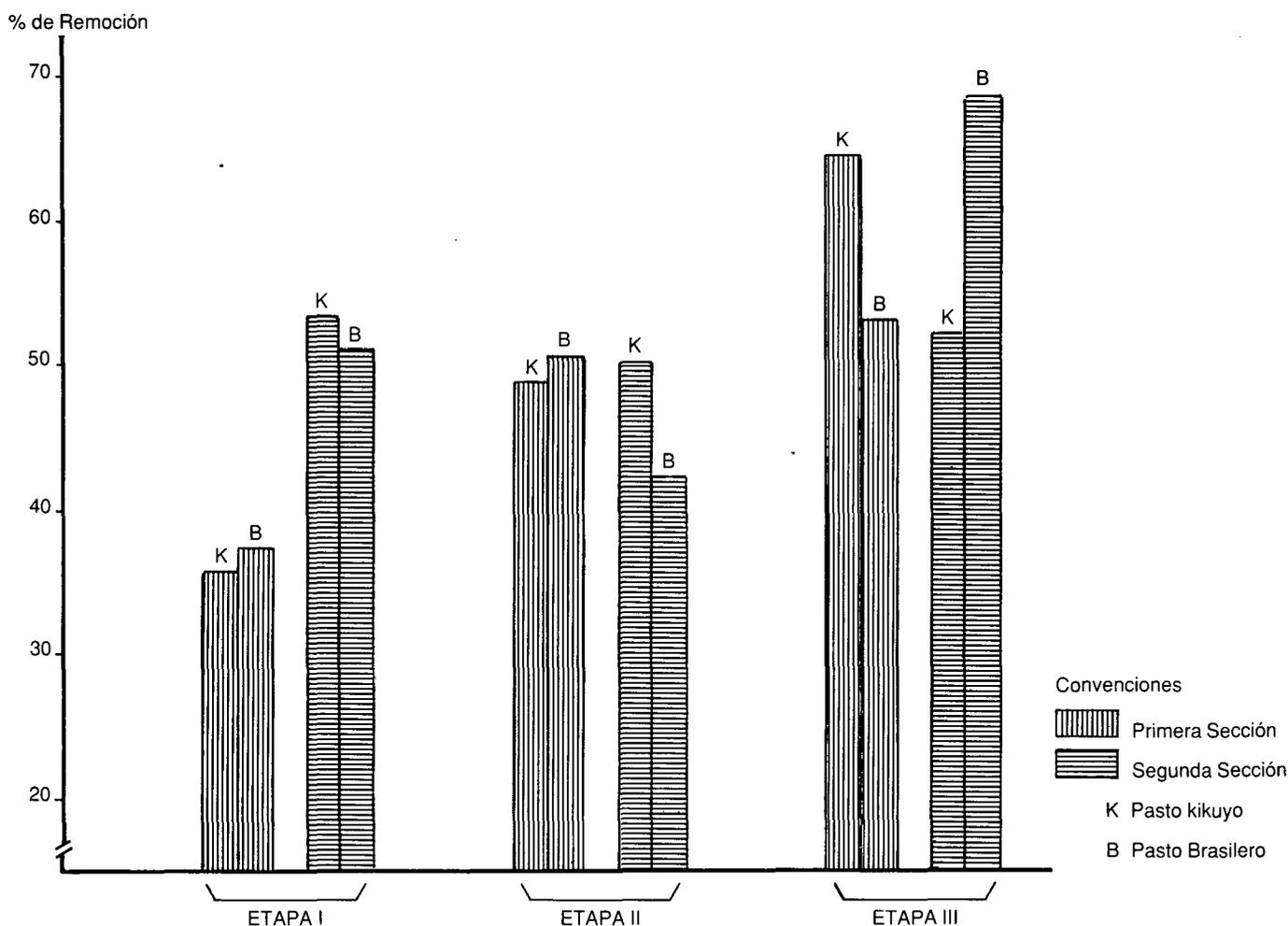


FIGURA 8. Variación del % remoción de coliformes fecales ejercido por cada especie vegetal en cada sección del canal(b)

potasio. Las dos especies presentaron un comportamiento similar en la disminución de éstos tres nutrientes.

Los valores de remoción total más bajos se obtuvieron en la etapa I y los más altos en la III, donde el sistema logra su estabilización. Las disminuciones en la concentración de los tres nutrientes en el agua residual tratada se deben a la absorción radical y a la asimilación realizada por microorganismos (Algas, bacterias, hongos) presentes.

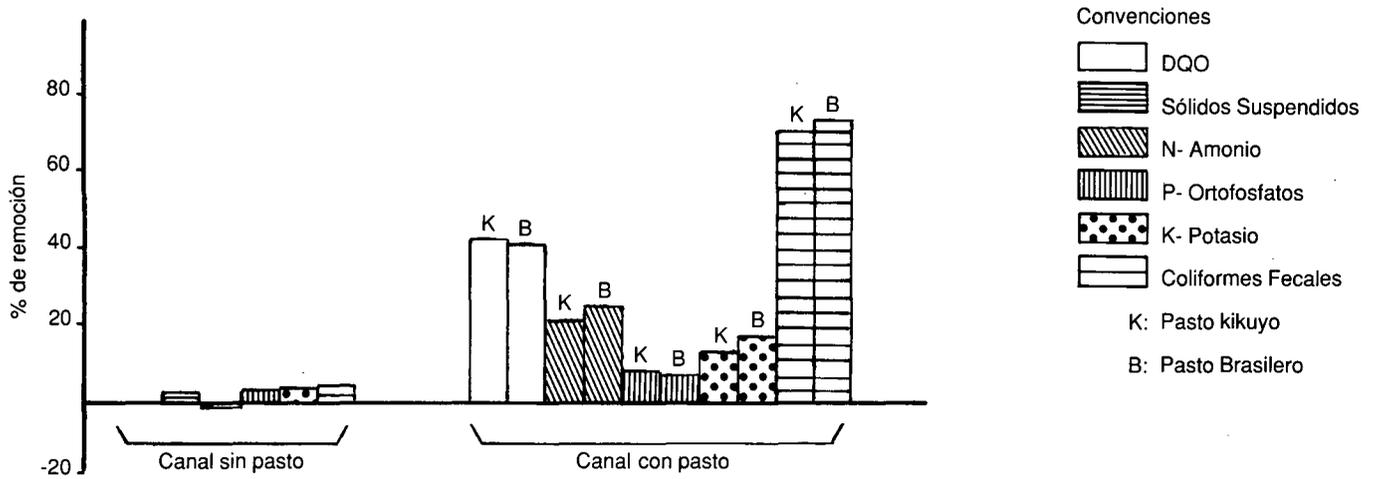
#### Coliformes fecales, plancton y fauna asociada

Para el análisis de coliformes fecales, se tomaron muestras de agua en los sitios 1, 2 y 4 de cada canal (quedando así dividido cada uno en dos secciones, una de 6.6 m y la otra de 13.2 m); de esta manera para la evaluación del grado de remoción sólo se consideran dos

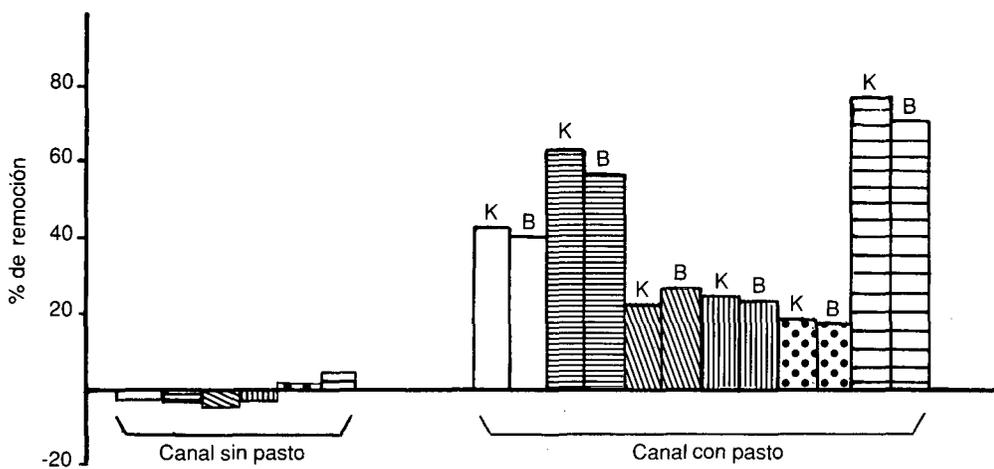
secciones en cada hidrocanal, y la remoción ejercida en todo el canal para cada especie vegetal.

La población de coliformes fecales presentó las mayores concentraciones en las etapas II y III (entre  $2.1 \times 10^6$  y  $15.2 \times 10^6$  en la II, y  $4.5 \times 10^6$  y  $14.7 \times 10^6$  en la III). Figura 7. En la etapa I fueron menores (entre  $1.44 \times 10^6$  y  $3.44 \times 10^6$ ), por la dilución del agua residual por efecto de las lluvias durante el transcurso de esta etapa.

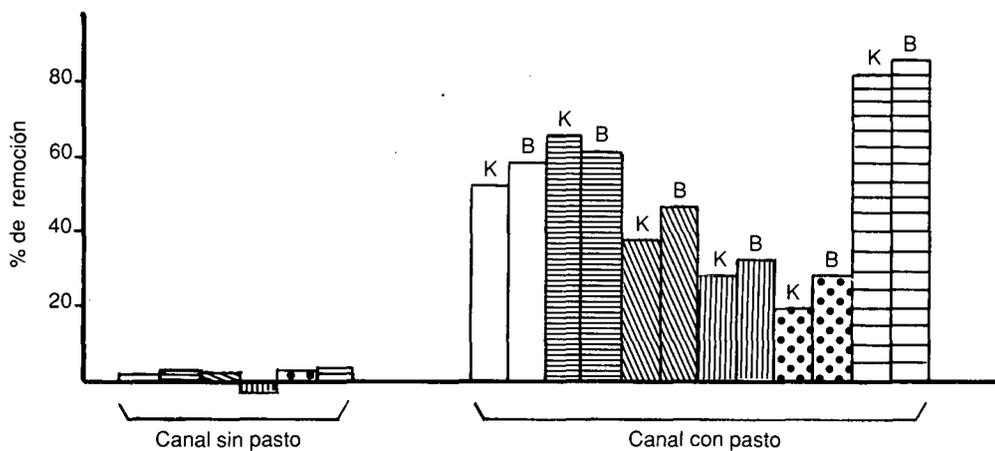
En la figura 8 se aprecia que en la etapa I, la remoción ejercida en la segunda sección de los dos canales fue casi el doble del valor registrado en la primera sección de los mismos; teniendo en cuenta que esta segunda sección tiene el doble de la longitud de la primera, se considera que la remoción fue la misma para las dos secciones, posiblemente debido a la aplicación continua del agua residual y a la poca biopelícula formada en la masa radical.



(a) ETAPA I



(b) ETAPA II



(c) ETAPA III

FIGURA 9. Variación en cada etapa del % de remoción total (DQO, NH<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, K, coliformes fecales) en el canal patrón y en el canal de cada S.P. vegetal

**Tabla 4**  
**Porcentajes promedios de remoción total de las tres etapas evaluadas en este sistema TPN y Porcentajes promedios de remoción total obtenidos en investigaciones anteriores**

Variable	Bouzoun y Palazzo 1982	Arjona 1987	Presente estudio Kikuyo	Brasileño
<b>Caudal (L/d)</b>	<b>883</b>	<b>1253</b>	<b>1760</b>	
SST	75	73.44	64.91	59.88
DBO total	81	72.42	60.63	60.03
DBO soluble	87	60.60	49.70	52.29
Amonio	34	72.66	27.36	32.85
Ortofosfatos	10.9	60.46	20.53	20.83
Potasio			17.48	21.41
Coli fecal	90	7.04	76.98	76.36

+ Frecuencia intermitente de aplicación/interrupción en minutos de 5/50, 10/50 y 20/40.

En la etapa II se observan remociones muy similares en las dos secciones del canal, para cada especie de pasto; dado que la primera sección es menor se presenta una mayor remoción en esta sección, debido a la mayor acumulación de película biológica.

El canal sembrado con pasto brasileño alcanzó en la etapa III menores remociones en la primera sección en relación con la presentada por el kikuyo.

En el sistema de tratamiento TPN se dieron condiciones favorables para el desarrollo y proliferación de algas (Chlorophytas, Chrysophytas y Euglenophytas) las cuales favorecieron la eficiencia del sistema al contribuir en la disminución del CO<sub>2</sub> y nutrientes e incrementar el oxígeno del agua residual por fotosíntesis.

La presencia de oxígeno y la disponibilidad de alimento permitieron el desarrollo de protozoarios, zooplancton (Rotíferos, Crustáceos), los cuales al actuar como organismos filtradores de bacterias, partículas de detritus y fitoplancton favorecieron la depuración del agua residual aplicada al sistema TPN.

Los hábitos alimenticios de los demás organismos observados (Plantelmintos, Anélidos, Moluscos y Artrópodos), son importantes al formar parte de una cadena trófica o "cadena depuradora".

#### **Eficiencia lograda por el sistema**

La Figura 9 muestra la remoción ejercida en el canal de referencia, y la remoción ejercida por los canales sembrados con pasto kikuyo y brasileño, para las variables de mayor significancia en la evaluación de la calidad del agua residual tratada por medio de la TPN.

Se observa además, que no hay diferencias significativas en la capacidad de remoción presentada por las dos especies vegetales. Puede observarse también que se lograron las mayores remociones para todas las variables evaluadas en la etapa III, en donde el sistema alcanza su estabilización, pues no se registran variaciones del TRH.

Todos los estudios realizados utilizando esta técnica evidencian la eficiencia y beneficios que tiene como tratamiento biológico de aguas residuales; sin embargo, es claro que en la mayor o menor eficiencia del sistema TPN influye el caudal, frecuencia y tipo de agua residual aplicadas.

En cuanto a la producción de forraje, se pudo observar que mientras las raíces tenían una buena acumulación de biopelícula ocurrió una adecuada asimilación de nutrientes y se obtuvieron los valores más altos de rendimiento de forraje verde, 117.5 y 223.03 t/Ha para el pasto kikuyo y brasileño respectivamente, en un periodo de corte de 45 días (etapa III).

Los valores altos de producción forrajera y el buen desarrollo presentado por las plantas, muestra una vez más la efectividad del agua residual doméstica como fuente de nutrientes; así como la TPN constituye un medio adecuado para que las plantas realicen eficazmente el proceso de la fotosíntesis.

#### **CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos en el desarrollo del presente estudio permiten concluir que:

1. El pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst) y

- el pasto brasilero (*Phalaris* spp), mostraron una respuesta satisfactoria de adaptación, resistencia y buen desarrollo a las condiciones de hidroponía, utilizando la TPN con aguas residuales domésticas, durante el transcurso de toda la fase experimental.
2. La TPN, puede emplearse con cualquiera de las dos especies vegetales estudiadas, toda vez que los porcentajes de remoción de materia orgánica, nutrientes, sólidos y coliformes fecales, obtenidos son del mismo orden de magnitud para los dos pastos.
  3. Bajo las condiciones en las cuales operó el sistema, éste permitió tratar volúmenes altos de agua residual, del orden de 2880 L/día en la etapa I y L/día en la etapa III.
  4. El sistema TPN experimentado, empleando pasto kikuyo y brasilero, permitió obtener los siguientes porcentajes de remoción respectivamente para cada pasto: DBO total 59 y 60%, sólidos suspendidos totales 65 y 60% y coliformes fecales 77 y 76%.
  5. La mejor condición de remoción, se obtiene cuando el sistema opera con una tasa de aplicación de agua residual de 3 L/min, durante 8 horas/día.
  6. Los procesos de sedimentación, filtración y por ende de acumulación de película biológica se dieron con mayor intensidad en la matriz radical de las plantas de la primera sección de cada canal.
  7. La realización de la poda a las plantas utilizadas, no tuvo ningún efecto sobre la remoción de las variables analizadas, en ninguna de las tres etapas experimentales.
  8. Este sistema TPN permitió obtener una mayor producción forrajera de cada especie, en períodos de tiempo más cortos, que las logradas en cultivos de suelo tradicionales.
  9. La presencia de macroorganismos y microorganismos evidencian que la película biológica formada en la matriz radical es un medio adecuado para su hábitat y desarrollo, contribuyendo de esta forma en la depuración.
  10. No hubo incidencia marcada de las condiciones climáticas sobre la efectividad del sistema.
  11. La TPN constituye un sistema ecológico en el que interactúan un sinnúmero de factores bióticos y abióticos, cuya dinámica involucra diferentes niveles tróficos por los cuales fluye la energía.

## BIBLIOGRAFIA

- ALI, R.R., y O. M. TORO, 1985. Evaluación técnico-económica del tratamiento, hidropónico de aguas residuales para Colombia. Fase I: Construcción y puesta en marcha de la planta piloto. Tesis Ing. Civil. Bogotá. Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. 214p.
- ARJONA, B., 1987. Evaluación de un cultivo hidropónico de *Penisetum clandestinum* Hochst (kikuyo) como tratamiento biológico para aguas residuales domésticas. Tesis Biología. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. 152p.
- BERRY, W. L., A. WALLACE y O. R. LUNT, 1977. Recycling municipal wastewater for hydroponic culture. *Hortscience* 112 (3): 186.
- , A. WALLACE, P. M. PATEL Y C. R. LUNT, 1979. Further development of the use of wastewater for hydroponic crop-cultures. *Alex. J. Agric. Res.* 27(1): 187-198.
- BOUZZCUN, J. R., y A. J. PALAZZO, 1982. Preliminary assessment of the nutrient film technique for wastewater treatment. Special Report of Cold Regions Research and engineering Laboratories of the U. S. Army. 13 p.
- , 1982. Thin film hydroponic for wastewater renovation and reuse. ASCE Spring Convention. Las Vegas. Nevada.
- , 1982b, Nutrient film technology for the treatment and reuse of municipal wastewater. V Simposio de Tratamiento de Aguas Residuales. Montreal. Canadá. 9p.
- BONE, D. A. y P. A. STEAD., 1978. The nutrient film technique its connection with sewage treatment and plant growth. Portsmouth Polytechnic. Department of Civil Engineering. 6p.
- , y B. A. WINFIELD, 1981. The sewage farm reborn. *Journal of the Institution of Public Health Engineering* 9 (4): 185-186 y 198.
- BOUTIN, C., 1987. Domestic wastewater treatment in tanks planted with rooted macrophytes: case study; description of the system; desing criteria; and efficiency. *Wat. Sci. Tech.* 19 (10): 29-40.
- BRIX, H., 1987. The applicability of the wastewater treatment plant in othfresen as scientific documentation of the root-zone method. *Wat. Sci. TEch.* 19 (10): 19-24

- BUCKTEEG, K., 1987. Sewage treatment in helophyte bed first experiences with a new treatment procedure. *Wat. Sci. Tech.* 19 (10): 1-10.
- CALDERON, F., 1986. El cultivo de tomate hidropónico bajo el sistema TPN. I Seminario de la Asociación Colombiana de Hidroponía. Cali. Colombia. 21p.
- COOPER, W. J., L. HANDLEY, L. S. CASY, J. L. LOPEZ, C. H. FONSECA, S. H. RIZVI, J. RICHARDS y A. VANZELLA, 1983. Development of the nutrient film technique for renovation of wastewater for non-potable reuse. Report to U.S. Bureau of reclamation Drinking Water Research Center Florida International University. 70 p.
- FONSECA, C. H. 1983. The nutrient film technique for wastewater treatment -An engineering evaluation-. Proyecto de Post-grado. Florida International University. 28p.
- METCALF y EDDY, Inc, 1985. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, evaluación y reutilización de aguas residuales. Segunda Edición. Editorial Labor. Barcelona. España 969p.
- REDDY, K. R. y T. A. DEBUSK, 1987. State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control. *Wat. Sci. Tech.* 19 (10): 61-80.
- SIAS, D. R. y T. A. NEVIN, 1973. Experimental hydroponic gardening with municipal wastewater. *Bulletin of environmental contamination and toxicology.* 10 (5): 272-278.
- SUTCLIFE, J. F., 1962. Mineral salts absorption in plants. Pergamon Press. Gran Bretaña.
- WALLACE, A., P. M. PATEL, W. L. BERRY y O., R. LUNT, 1978. Reclaimed sewage water: A hydroponic grow medium for plants. *Resource Recovery and Conversation* 3: 191-199.
- , S. M. SOUFI y A. M. EL GAZZAR, 1979. Wastewater as a source of nutrients and water for hydroponic crop production in arid regions. En: BISHAY, A. y W. G. MCGINNIES (Ed). *Advances in desert and arid land technology and development.* Vol. I. Harwood Academic Publishers.
- WOLVERTON, B. O., R. M. BARLOW y R. C. McDONALD, 1975. Application of vascular aquatic plants for pollution removal, energy and food production in a Biological System. NASA Memorando Técnico. 14 p.
- , y R. C. McDONALD, 1976. Water hyacinths for upgrading sewage lagoons to meet advanced wastewater treatment standards: Part II. NASA. Memorando Técnico. 21p.
- , y R. C. McDONALD, 1980. Comparative study of wastewater lagoons with and without water hyacinth. *Economic Botany.* 34 (2): 101-110.