

DEPURACIÓN DE AGUA CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS EN EL RÍO RUMIYACU, MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES EN LA PROVINCIA DE FRANCISCO DE ORELLANA.

Purification of water contaminated with hydrocarbons in the Rumiyaçu River, using artificial wetlands in the province of Francisco de Orellana.

Sandra Fabiola Heredia Moyano*, Alex Gavilanes Montoya, María Fernanda Heredia Moyano

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

*sandra.heredia@esPOCH.edu.ec

R esumen

La construcción de humedales artificiales para el tratamiento de aguas provenientes de cuerpos hídricos como el Río Rumiyaçu, tiene como propósito disminuir la cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de ecosistemas lóticos mediante procesos primarios, tales como la sedimentación, degradación enzimática, absorción y volatilización de compuestos. En este proceso de biorremediación se emplearon especies vegetales (gramíneas) de la zona como: *Echinochloa polystachya*, *Pennisetum purpureum*, *Panicum máximum*, y *Arvenses* sp. Se determinó el caudal hídrico (0,58 m³/s) por el método del flotador, y mediante un muestreo compuesto (alícuotas) se diseñaron los humedales. Se aplicó la prueba estadística de análisis de varianzas (ANOVA) para determinar las especies de mayor remoción de contaminantes como: níquel, hierro, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales e hidrocarburos totales de petróleo. En su conjunto, la remoción de cargas contaminantes representa el 44,53%, en dependencia de las diferentes eficiencias de cada especie en cada parámetro, por lo que, se recomienda monitorear y evaluar ambientalmente a los tributarios del río.

Palabras clave: Contaminación por hidrocarburos, Biorremediación, Humedales artificiales, pasto alemán (*Echinochloa polystachya*), pasto elefante (*Pennisetum purpureum*), pasto chileno (*Panicum máximum*).

A bstract

The construction of artificial wetlands for the water treatment from water bodies such as the “Rumiyaçu” River, has the purpose of reducing organic and inorganic pollutants from lotic ecosystems through primary processes, such as sedimentation, enzymatic degradation, absorption and volatilization of compounds. For this, in this bioremediation process, plant species (grasses) of the area were used, such as: *Echinochloa polystachya*, *Pennisetum purpureum*, *Panicum máximum*, and *Arvenses* sp. The water flow (0.58 m³/s) was determined by the float method, and using composite sampling (aliquots) the wetlands were designed. The statistical test of analysis of variances was applied to determine the species with the highest removal of pollutants such as: nickel, iron, chemical oxygen demand, biochemical oxygen demand, total coliforms and total oil hydrocarbons. As a whole, the removal of contaminating loads represents 44.53%, depending on the different efficiencies of each species in each parameter. Therefore, the tributaries of the river should be monitored and environmentally evaluated.

Keywords: Hydrocarbon pollution, Bioremediation, artificial wetlands, German grass (*Echinochloa polystachya*), elephant grass (*Pennisetum purpureum*), Chilean grass (*Panicum máximum*).

Fecha de recepción: 10-02-2020

Fecha de aceptación: 20-04-2020

Fecha de publicación: 30-07-2020

I. INTRODUCCIÓN

La descarga de aguas contaminadas en cuerpos hídricos es una práctica tradicional derivada de la necesidad de evacuar dichas aguas fuera de los núcleos urbanos (1), produciéndose así la contaminación sistemática y permanente del suelo (2).

En Ecuador, las actividades extractivas de crudo han degradado los ecosistemas de la región Amazónica causando impactos negativos a nivel ambiental y social; es así que entre los años 1964 y 1992, se estimó que los derrames de la compañía petrolera Texaco (Chevron) superaron en un 50% a los 10,8 millones de galones del derrame del Exxon Valdez en Alaska (3).

Estudios acerca del destino ambiental del petróleo indican que aunque su toxicidad disminuye con la degradación biológica o física, éste sigue siendo una fuente de contaminación y toxicidad para los organismos presentes en un ecosistema por un largo tiempo (4), en tal virtud, es necesario implementar tratamientos complementarios durante el proceso de eliminación del crudo (5).

La implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales es una alternativa viable y de bajo costo, debido a que reduce los contaminantes mediante procesos que tienen lugar en los humedales naturales o pantanos (6); este tratamiento generalmente se ve favorecido por factores climáticos (zonas tropicales y subtropicales) (7).

La construcción de un humedal comprende el diseño correcto de una cubeta que contiene agua residual, sustrato y plantas emergentes; la selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de las mismas al clima local (8), su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad asimiladora de los mismos (9), su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades y su facilidad de manejo (10).

En conjunto estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual, y bio-

degradan la materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos (11).

Desde el punto de vista ambiental, los humedales artificiales generan impactos positivos (12) puesto que mejoran la calidad ambiental de la zona y por ende de la población (13), además una ventaja de este tratamiento radica en que el agua saliente del proceso puede ser vertida al río o reutilizada como agua gris para riego y limpieza (14).

Existen varios casos aplicativos en torno a la utilización de humedales artificiales, es así que en la Universidad Nacional de San Marcos (Perú), el agua tratada por este proceso cumplía los estándares de la normativa ambiental aplicable y fue utilizada para el riego y servicios de limpieza (15).

Por otra parte, en el ámbito nacional, estudios destacan que el diseño del sistema basado en la caracterización físico-química y microbiológica, conlleva a la disminución de los contaminantes para cumplir los límites de descarga a un cuerpo de agua dulce (16,17).

Conforme a la Constitución de la República del Ecuador que garantiza los derechos de la naturaleza y la población (18), y la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, uso y aprovechamiento del agua que asigna al GADM de Francisco de Orellana las competencias de saneamiento ambiental del recurso hídrico, y señala que los usuarios son paralelamente responsables del manejo y cuidado de las fuentes y zonas de recarga hídricas (19).

El área de influencia del presente estudio corresponde tanto a Taracoa, como a las demás parroquias por las cuales atraviesa el curso de agua objeto de estudio; es así que los principales beneficiarios son el GADM de Francisco de Orellana y los pobladores de las áreas aledañas al cauce.

El objetivo de la presente investigación fue diseñar y construir un prototipo de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas del río Rumiyacu, las cuales se encuentran contaminadas con hidrocarburos. Para ello, se monitoreó la calidad del cuerpo hídrico (caracterización física, química y microbiológica) a través del méto-

do estándar APHA (20), se tomaron muestras en relación al caudal del cuerpo hídrico y se analizaron éstas tanto in situ como ex situ respectivamente (21), posteriormente se diseñó y construyó el prototipo de humedal artificial y se evaluó la capacidad del material vegetativo para retener contaminantes.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación del caudal y caracterización físico-química y microbiológica de las aguas del río Rumiyacu.

Se seleccionaron los puntos de muestreo en función de su ubicación, accesibilidad y representatividad (tramo regular). En cada uno de estos puntos se midió el caudal y se procedió a la toma de muestras (Figura 1).

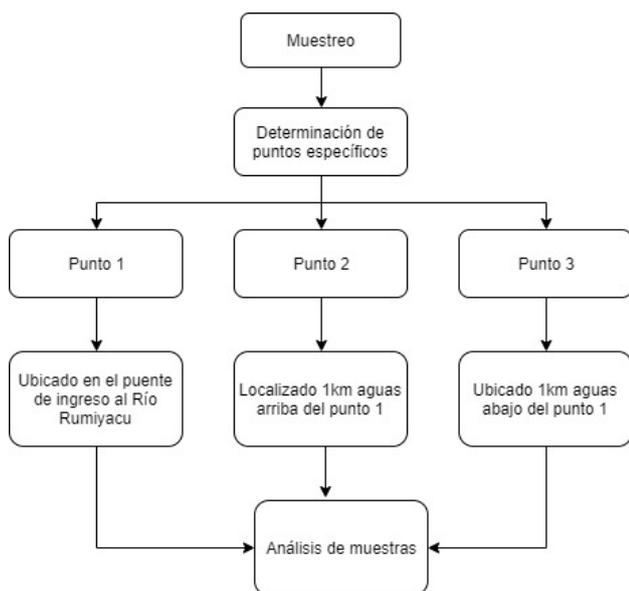


Figura 1. Proceso de muestreo.

Para la determinación del caudal se empleó el método del flotador, obteniéndose in situ las siguientes variables: velocidad promedio y área transversal del cauce (22,23).

Para el cálculo de la velocidad se seleccionó un tramo de aproximadamente 12 metros, mismo que fue delimitado con estacas; se soltó el flotador en el inicio del tramo (Punto A) y se cronometró el tiempo que tardaba en llegar al final del tramo (Punto B).

El área transversal fue calculada a partir del an-

cho del río y la profundidad promedio, para obtener esta última variable se dividió el ancho del río en 3 secciones y se midió la profundidad en cada uno de los espacios.

Para la caracterización físico-química y microbiológica se consideraron los protocolos de muestreo compuesto de aguas residuales, y se recolectaron las alícuotas en los puntos establecidos previamente en función del caudal. Las muestras obtenidas fueron debidamente rotuladas y transportadas al laboratorio para su respectivo análisis.

Los parámetros biológicos, orgánicos y físico-químicos analizados se encuentran descritos en la siguiente figura:

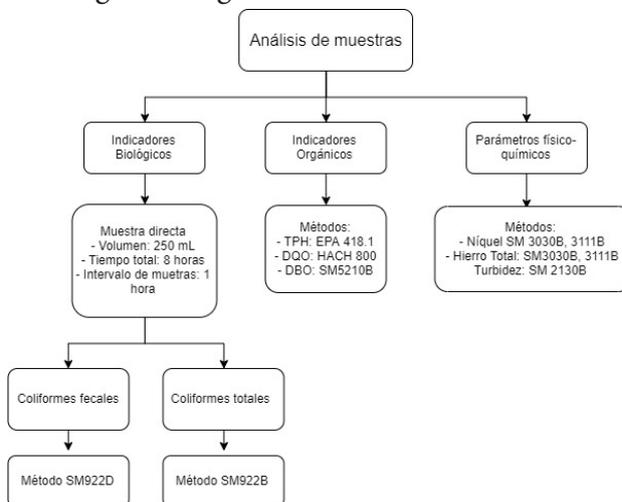


Figura 2. Métodos para el análisis de parámetros biológicos, orgánicos y físico químicos.

Finalmente, a partir de los datos obtenidos a nivel de laboratorio (concentraciones), se determinó la carga contaminante mediante la siguiente ecuación:

$$L=Q*C \quad (1)$$

Donde:

L: carga contaminante, Q: caudal y C: concentración.

Diseño y construcción del prototipo de humedal artificial.

Se dimensionó el humedal artificial, en función de los caudales de entrada, salida; y, el material vegetativo adaptado a la zona y que es empleado como forraje (24).

Las variables calculadas y las respectivas fórmulas se detallan en la Tabla 1.

Caudal del Humedal	Área superficial de humedal artificial	Tiempo de retención hidráulica	Ancho del humedal	Largo del humedal
$Q = \frac{Q_e + Q_0}{2}$	$As = \frac{Q(\ln(DBO_5)_e - \ln(DBO_5)_s)}{Kt(y)(n)}$	$TRH = \frac{(As)(y)(n)}{Q}$	$W = \frac{\frac{1}{y} * Q * As}{(m * K_s)^{0.5}}$ # de humedales	$L = \frac{As}{W}$
Variables: Q = caudal medio del humedal (m³/día) Q _e = Caudal de entrada. Q ₀ = Caudal de salida	Variables: As = Área superficial Q = Caudal Ln (DBO ₅) _e = Concentración del contaminante de ingreso Ln (DBO ₅) _s = Concentración del contaminante de salida Kt = Constante de temperatura del humedal y = Profundidad del humedal n = Porosidad promedio de las capas filtrantes del humedal.	Variables: TRH = Tiempo de retención hidráulica en (días); As = Área superficial; y = Profundidad del humedal; n = Porosidad del medio.	Variables: W = Ancho del humedal; Q = Caudal / # de unidades; m = Pendiente del lecho; K _s = Conductividad hidráulica; As = área superficial / # unidades; y = Profundidad del humedal;	Variables. L = Largo; As = área superficial / # de unidades; W = Ancho del humedal.

Tabla 1. Fórmulas empleadas para el dimensionamiento de un humedal artificial
Fuente: Adaptado de Lara, 1999 (24); Cueva y Rivadeneira, 2013 (25)

Evaluación del material vegetativo en la remoción de contaminantes.

Las especies vegetales utilizadas para la remoción de contaminantes fueron: *Echinochloa polystachya* (pasto alemán), *Pennisetum purpureum* (pasto elefante), *Panicum máximum* (pasto chileno), y *Arvenses sp* (arvense). Se monitoreó el crecimiento del pasto (medición en cm) y se determinó el porcentaje de mortalidad de las especies empleadas.

Las variables dependientes analizadas fueron las concentraciones de DBO, DQO y TPH, niveles de turbidez y número de coliformes totales y fecales. Mientras que la variable independiente correspondió al grado de crecimiento de hojas de las especies vegetales.

Se determinó el porcentaje de remoción en función a las concentraciones de entrada y salida de los contaminantes.

III. RESULTADOS

Determinación del caudal y Caracterización físico-química y microbiológica de las aguas del río Rumiayacu.

Las características del río en lo que respecta al ancho, profundidad, pendiente y velocidad de recorrido son variables, aspecto que se debe a aportaciones externas del río como es el caso de los afluentes y precipitaciones fluviales, las cuales inciden en el caudal y en los parámetros físicos químicos.

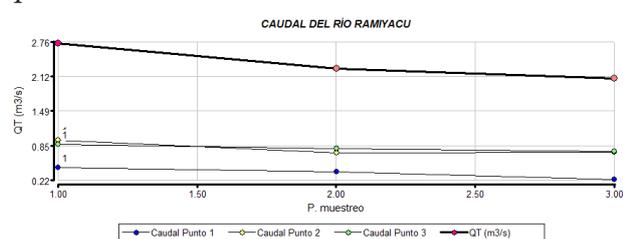


Figura 3. Comportamiento del caudal del río Ramiyacu.

Conforme a la figura 3 se identifica que el punto 1 el caudal mayor con relación al resto de puntos. Los puntos 2 y 3 tienen una distancia de un kilómetro aguas arriba y aguas abajo respectivamente, tomando como punto de referencia la zona poblada de la parroquia de Taracoa.

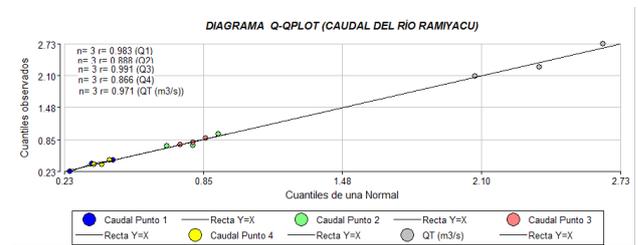


Figura 4. Comportamiento del caudal del río Ramiyacu (Diagrama Q-Q plot)

La figura 4 indica que la correlación del caudal del río Ramiyacu oscila entre excelente a buena en los puntos 3 (-1,00); 2 (-0,99), y 3 (-0,68), a partir de estos valores se deduce que el comportamiento tiende a ser equilibrado en los tres puntos.

Los parámetros físico-químicos medidos in situ se encuentran detallados en la siguiente tabla:

P. Muestreo	Hora	Temperatura (°C)	pH	OD (mg/L)	TDS (mg/L)	Conductividad (µS/cm)
1	8:00	25,10	6,08	5,59	234,00	94,64
	11:00	19,83	5,07	5,27	225,71	96,34
	14:00	20,13	4,24	4,82	222,2	90,26
	17:00	22,03	4,17	5,05	231,79	97,16
2	09h00	25	5,84	5,78	214	105,62
	12h00	20,33	6,65	4,42	229,71	100,81
	15h00	20,3	7,32	5,09	235,08	93,13
3	18h00	21,54	4,77	5,27	220,98	96,72
	10h00	25,10	6,08	5,64	210,1	95,59
	13h00	22,4	6,65	5,28	225,01	96,94
	16h00	16,68	7,32	5,36	234,19	98,66
	19h00	19,45	6,05	4,42	228,33	99,62
PROMEDIO		21,5	5,9	5,2	225,9	97,1

Tabla 2. Parámetros físico-químicos medidos in situ.

En función a los resultados de la tabla 2 se identifica que la temperatura oscila entre 16,68°C (P3-16h00) y 25,10°C (P1-08h00 y P3-10h00); siendo su valor promedio 21,5°C. Se presume que el incremento de la temperatura en el horario matutino (08h00 a 10h00) se debe a la presencia de descargas con temperaturas elevadas durante esas horas. Con relación al pH, éste varía entre 4,17 (P1-17H00) y 7,32 (P2-15h00 y P3-16h00), con una media de 5,9 equivalente a ligeramente ácido.

La concentración de oxígeno disuelto varía entre 4,42 mg/L (P2-12h00 y P3 19h00) a 5,78 mg/L (P2-09h00), identificándose que los valores más

altos fueron registrados en la mañana. En lo que respecta al valor promedio de la conductividad y los sólidos totales disueltos (TDS), ésta fue de 225,9 mg/L y 97,1 µS/cm respectivamente. Los parámetros medidos in situ no fueron comparados con la normativa ambiental vigente (AM 097 A- Anexos del Libro VI del TULSMA), ya que en la tabla 1 del Anexo 1: Criterios de calidad de efluentes de agua para consumo humano y doméstico no se exponen los límites permisibles de dichos parámetros.

A continuación, se detallan el resto de parámetros físico-químicos y microbiológicos que fueron determinados a nivel de laboratorio (Tabla 3).

Punto muestreo	Parámetro	Método/Norma de referencia	Unidad	Resultado	Criterio de calidad (AM 097 A)
1	DQO	HACH 8000	mg/L	4,10	< 4
	DBO	SM 5210 B	mg/L	< 1,00	< 2
	Níquel	SM 3030 B, 3111B	mg/L	<0,10	**
	Hierro total	SM 3030 B, 3111B	mg/L	0,93	1,0
	TPH	EPA 418.1	mg/L	<0,05	0,2
	Turbidez	SM 2130 B	UNT	9,36	100,0
	Coliformes totales	SM 9222 B	Col/100 ml	2900	**
	Coliformes fecales	SM 9222 D	Col/100 ml	1100	1000
2	DQO	HACH 8000	mg/L	4,82	< 4
	DBO	SM 5210 B	mg/L	< 1,00	< 2
	Níquel	SM 3030 B, 3111B	mg/L	<0,10	**
	Hierro total	SM 3030 B, 3111B	mg/L	0,91	1,0
	TPH	EPA 418.1	mg/L	<0,05	0,2
	Turbidez	SM 2130 B	UFT	10,2	100,0
	Coliformes totales	SM 9222 B	Col/100 ml	2400	**
	Coliformes fecales	SM 9222 D	Col/100 ml	600	1000
3	DQO	HACH 8000	mg/L	7,21	< 4
	DBO	SM 5210 B	mg/L	< 1,00	< 2
	Níquel	SM 3030 B, 3111B	mg/L	< 0,10	**
	Hierro total	SM 3030 B, 3111B	mg/L	0,89	1,0
	TPH	EPA 418.1	mg/L	< 0,05	0,2
	Turbidez	SM 2130 B	UFT	11.1	100,0
	Coliformes totales	SM 9222 B	Col/100 ml	1300	**
	Coliformes fecales	SM 9222 D	Col/100 ml	600	1000

Tabla 3. Resultados del laboratorio de calidad de agua

Al comparar los resultados del laboratorio con los límites permisibles de la Tabla 1 del Anexo I del Libro VI del TULSMA (Acuerdo Ministerial 097 A) se identifica que la mayor parte de los parámetros no exceden la norma, a excepción de la demanda química de oxígeno (DQO) (P1-3) y los coliformes fecales (P1). Para el caso de los coliformes totales, no existe un valor de referencia en

la norma antes mencionada.

Otro de los usos potenciales del Río Rumiayacu es la recreación; considerando la tabla 6 del Anexo 1: “Criterios de calidad de aguas destinadas para fines recreativos mediante contacto primario”, se aprecia que la cantidad de coliformes totales y fecales excede a los límites permisibles (2000

col/100mL y 200 col/100mL respectivamente), y el valor del pH promedio no se encuentra dentro del rango permitido (6,5 a 8,3). La norma además sugiere que no existan grasas, aceites ni ningún tipo de película visible, por lo tanto, se deduce

que las fuentes hídricas deben estar libres de derrames de crudo.

En función de los resultados de laboratorio y el caudal determinado en cada punto se estableció la carga contaminante (Tabla 4).

P. Muestreo	Parámetro	Unidad	Concentración	Caudal (L/s)	C. Contaminante (mg/s)
1	DQO	mg/L.	4,10	91	373,1
	DBO	mg/L.	1	91	91
	Níquel	mg/L.	0,1	91	9,1
	Hierro total	mg/L.	0,93	91	84,63
	TPH	mg/L.	0,05	91	4,55
	Coliformes totales	Col/100 ml	2900	91	2,64 x 10 ⁶ col/s
	Coliformes fecales	Col/100 ml	1100	91	1,00 x 10 ⁶ col/s
2	DQO	mg/L.	4,82	127	612,14
	DBO	mg/L.	1	127	127
	Níquel	mg/L.	0,1	127	12,7
	Hierro total	mg/L.	0,91	127	115,57
	TPH	mg/L.	0,05	127	6,35
	Coliformes totales	Col/100 ml	2400	127	3,05 x 10 ⁶ col/s
	Coliformes fecales	Col/100 ml	600	127	7,62 x 10 ⁵ col/s
3	DQO	mg/L.	7,21	322	2321,62
	DBO	mg/L.	1	322	322
	Níquel	mg/L.	0,1	322	32,2
	Hierro total	mg/L.	0,89	322	286,58
	TPH	mg/L.	0,05	322	16,1
	Coliformes totales	Col/100 ml	1300	322	4,19 x 10 ⁶ col/s
	Coliformes fecales	Col/100 ml	600	322	1,93 x 10 ⁶ col/s

Tabla 4. Carga contaminante por parámetro químico y microbiológico.

Con respecto a los parámetros químicos, la mayor carga contaminante corresponde a la DQO, en contraposición la menor carga contaminante fue de los TPH. En lo que respecta a los parámetros biológicos, tanto los coliformes fecales y totales registraron una carga elevada.

Diseño y construcción del prototipo de humedal artificial.

El sector donde fue monitoreado el río Rumiyacu tiene una profundidad promedio de 0,64m, ancho de río de 3 m y caudal promedio de 0,58m³/s. Para la remoción de contaminantes se diseñaron 3 humedales artificiales con las siguientes características, caudal a tratar de 131,9 m³/día, tiempo de retención hidráulico de 6,7 h y dimensiones de cada celda: ancho de 1,37 m, profundidad de 0,25 m, y largo de 8,3 m (Figura 5).

El material filtrante se compuso de grava, con

una porosidad del 30% y una conductividad eléctrica de 2100 m³/m²*d.

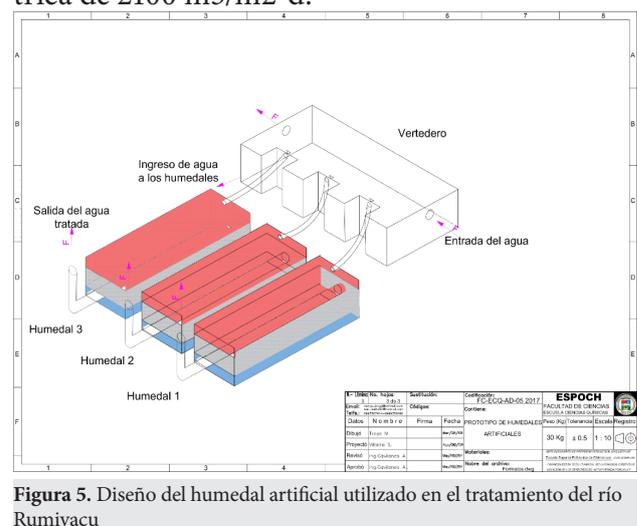


Figura 5. Diseño del humedal artificial utilizado en el tratamiento del río Rumiyacu

Evaluación del material vegetativo en la remoción de contaminantes.

Las concentraciones de entrada y salida de los

contaminantes se encuentran detalladas en la Tabla 5.

Gramínea	Parámetro	Unidad	Concentración de ingreso	Concentración de salida	Remoción (%)
Pasto alemán	DQO	mg/L	7,01	2,1	70,04
	DBO	mg/L	1,68	0,5	70,24
	Níquel	mg/L	0,02	0,02	0,00
	Hierro total	mg/L	0,185	0,06	67,57
	TPH	mg/L	0,1	0,05	50,00
	Turbidez	UNT	5	2	60,00
	C. Totales	Col/100 mL	1400	1000	28,57
	C. Fecales	Col/100 mL	1100	800	27,27
Pasto elefante	DQO	mg/L	4,51	1,01	77,61
	DBO	mg/L	1,63	0,02	98,77
	Níquel	mg/L	0,02	0,02	0,00
	Hierro total	mg/L	0,218	0,05	77,06
	TPH	mg/L	0,06	0,06	0,00
	Turbidez	UNT	22,5	7	68,89
	C. Totales	Col/100 mL	1600	1300	18,75
	C. Fecales	Col/100 mL	1100	700	36,36
Pasto chileno	DQO	mg/L	6,83	1,08	84,19
	DBO	mg/L	1	0,36	64,00
	Níquel	mg/L	0,02	0,02	0,00
	Hierro total	mg/L	0,221	0,02	90,95
	TPH	mg/L	0,07	0,05	28,57
	Turbidez	UNT	5,06	2,32	54,15
	C. Totales	Col/100 mL	1500	1000	33,33
	C. Fecales	Col/100 mL	600	300	50,00
Arvense	DQO	mg/L	9,66	4	58,59
	DBO	mg/L	1	0,95	5,00
	Níquel	mg/L	0,02	0,02	0,00
	Hierro total	mg/L	0,211	0,02	90,52
	TPH	mg/L	0,1	0,05	50,00
	Turbidez	UNT	5	4,05	19,00
	C. Totales	Col/100 mL	1600	1400	12,50
	C. Fecales	Col/100 mL	600	400	33,33

Tabla 5. Porcentaje de remoción de contaminantes físico-químico del agua del río Ramiyacu.

El mayor porcentaje de remoción de DQO correspondió al pasto chileno (84,19%), seguido del pasto elefante con el 77,61% y el pasto alemán con el 70,04%, en contraposición el pasto arvense registró el porcentaje más bajo de remoción. En lo que respecta a la remoción de DBO, el pasto alemán tuvo el mayor porcentaje de remoción (98,77%).

En el caso del níquel, ninguna de las especies vegetales disminuyó su concentración en el agua. El pasto chileno removió en un mayor porcentaje el hierro total (90,95%), mientras que el pasto alemán y arvense redujo en un 50% la cantidad

de TPHs. Finalmente, el pasto chileno removió mayor cantidad de coliformes totales y fecales (33,33% y 50% respectivamente).

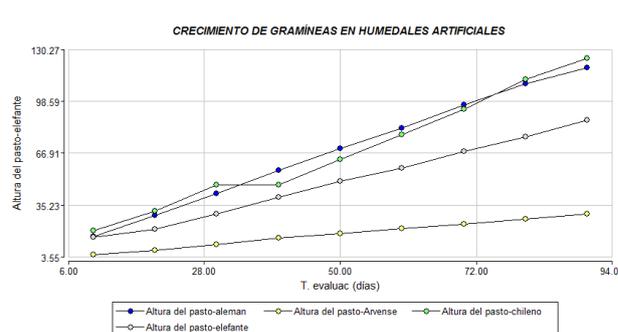


Figura 6. Crecimiento de gramíneas en el humedal artificial

En cuanto al crecimiento de las gramíneas en los humedales durante el período de evaluación (3 meses), el pasto chileno alcanzó una mayor altura promedio (1,25 m), seguido por el pasto alemán (1,19 m), pasto elefante (0,87 m) y el pasto arvense (0,29 m). Además, se identifica que la curva de crecimiento del pasto alemán, arvense y elefante presenta una tendencia de crecimiento regular, en contraposición el pasto chileno tiene un período en el cual no se desarrolla apropiadamente.

IV. DISCUSIÓN

Los principales usos del río Rumiyacu son para consumo humano y fines recreativos, y conforme al Anexo I del Libro VI del TULSMA- AM 097 A (26), para el primer uso los parámetros que exceden la norma son DQO y coliformes totales y fecales, mientras que para el segundo uso los parámetros que exceden los límites permisibles son pH, coliformes totales y fecales. La existencia de TPH en las muestras analizadas (concentración 0,2 mg/L) indica que el río Rumiyacu recibe afluentes contaminados con hidrocarburos o probablemente en zonas aledañas se ha producido un derrame de crudo, y según lo expuesto en la tabla 9 del Anexo I para que un afluente sea descargado en un cuerpo de agua dulce debe evidenciarse la ausencia de TPH. Ciertas características físico-químicas del agua son modificadas debido a la presencia de TPH, esto se debe a que los hidrocarburos consumen oxígeno y además forman películas sobre el agua, las cuales reducen la transferencia de oxígeno entre la atmósfera y el cuerpo hídrico, disminuyendo así el oxígeno disuelto y aumentando la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (27).

Los humedales artificiales al combinar una variedad de medios filtrantes y especies vegetales logran porcentajes de remoción elevados en DBO, sólidos suspendidos totales (SST) (7), nitrógeno total, fósforo (28), hidrocarburos (27), metales pesados (29), entre otros. En el presente estudio se determinó que los pastos arvense y alemán en un medio filtrante de grava removieron la mayor cantidad de TPH (50%), el pasto elefante disminuyó significativamente la DQO (98,77%) y el pasto chileno redujo la cantidad de coliformes

totales (33,33%) y fecales (50%). Ninguna especie vegetal redujo la concentración de níquel.

Luna y Aburto (2014) (30) señalan que el sistema de tratamiento de humedales artificiales ubicado en el lago del Bosque San Juan de Aragón permitirá remover entre un 80% a 90% los contaminantes presentes, sin embargo al encontrarse en una fase de estabilización, sólo reduce de forma significativa la concentración de carbono y coliformes. Conforme a lo indicado, el porcentaje de remoción puede variar en función del desarrollo y adaptabilidad de las especies utilizadas, es así que se obtuvieron porcentajes de remoción variables para los diferentes contaminantes.

No existen investigaciones similares que permitan comparar de manera simultánea los pastos empleados. No obstante el estudio de Palta y Morales (2013) (31) evalúa la eficiencia de remoción de contaminantes de *Brachiaria mutica* (pasto pará), *Pennisetum purpureum* (pasto elefante) y *Panicum maximum* (pasto guinea o chileno); obteniéndose que el mayor porcentaje de remoción de la DQO, DBO y coliformes fue del pasto pará (20,34%; 46,90% y 74,36% respectivamente), seguido por el pasto elefante en todos los parámetros indicados (19,73%; 46,86% y 74,35% respectivamente), por su parte el pasto alemán obtuvo porcentajes relativamente inferiores a las otras especies analizadas (16,84%; 45,22% y 72,27% respectivamente).

La recopilación bibliográfica de Estrada (2010) (32) refiere que el junco (*Juncus* spp.) tiene una buena adaptación y remueve la DBO en un 69%, DQO en un 70% y el nitrógeno en un 18%; además refiere que en el caso de los metales pesados, el junco y el barbasco son capaces de concentrar níquel en su sistema radicular, mientras que el botoncillo almacena níquel tanto en su estructura radicular como en las hojas y tallos.

Laverde y Salazar (2017) (33) mencionan que el tratamiento de aguas residuales provenientes de estaciones de servicio mediante humedales artificiales puede reducir en 94,4% la concentración de TPH siempre y cuando se suministre nutrientes a las plantas, mientras que si no se suministra nutrientes, este porcentaje desciende a 83,7% aproximadamente. Con base a lo expuesto an-

teriormente se identifica que los porcentajes de remoción obtenidos en esta investigación oscilan entre los valores de estudios realizados previamente con otras especies vegetales.

V. CONCLUSIONES

Conforme a la caracterización de las aguas del río Rumiayacu se determinó que la mayor parte de los parámetros se encuentran dentro de la normativa ambiental vigente (Anexo I del Libro VI del TULSMA- AM 097A), exceptuando la demanda química de oxígeno (DQO), hidrocarburos totales de petróleo (TPH), coliformes totales y fecales. La tabla 9 del Anexo 1 indica que el límite permisivo de TPH para la descarga en un cuerpo de agua dulce debe ser nulo, y al no cumplirse este requisito (0,2 mg/L de TPH en los

3 puntos de muestreo) es necesario implementar tratamientos complementarios como es el caso de humedales artificiales.

Para la remoción de contaminantes se diseñaron 3 humedales artificiales, con las siguientes dimensiones ancho de 1,37 m, profundidad de 0,25 m, y largo de 8,3 m, los cuales permiten tratar un caudal de 131,9 m³/día. Y una vez que las especies vegetales se adaptaron al medio, se verificó que los pastos arvense y alemán removieron la mayor cantidad de TPH (50%), el pasto elefante disminuyó significativamente la DQO (98,77%) y el pasto chileno redujo la cantidad de coliformes totales (33,33%) y fecales (50%). Por lo tanto, es conveniente ensayar humedales con estas especies vegetales en serie a fin de determinar la eficiencia de remoción.

Referencias

1. Fernández J. Humedales artificiales para la depuración. 2014.
2. Odum EP. Ecología. México: Interamericana; 1972.
3. Becerra S, Paichard E, Sturma A, Maurice L. VIVIR CON LA CONTAMINACIÓN PETROLERA EN EL ECUADOR: PERCEPCIONES SOCIALES DEL RIESGO SANITARIO Y CAPACIDAD DE RESPUESTA. *Rev Líder*. 2013;23:102-20.
4. Di Toro D. Predicting the toxicity of the neat and weathered crude oil: Toxic potential and the toxicity of saturated mixtures. 2007.
5. Natural Resources Conservation Service, Environmental Protection Agency. A handbook of constructed wetlands. Washington: USDA; 2005.
6. Nuevo D. Humedales artificiales en depuración de agua residual [Internet]. 2016. Disponible en: <https://www.tecpa.es/humedales-artificiales-en-depuracion-de-agua-residual/>
7. Arias I. CA, Brix H. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Cienc E Ing Neogranadina*. 1 de julio de 2003;13(1):17-24.
8. Brix H, Schierup H. The use of aquatic macrophytes in water - pollution control. *Ambio*; 2011.
9. Hammer D. Constructed wetlands for wastewater treatment. 2009.
10. Leonard K, Swanson G. Comparison of operational design criteria for subsurface constructed wetlands for wastewater treatment. *Water Science Technology*; 2001.
11. Delgadillo O, Camacho A, Pérez L, Andrade M. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. 2010.
12. Rodríguez E. PLAN DE MANEJO DE LOS HUMEDALES EXISTENTES EN LA COMUNIDAD: PICHAN - SAN ISIDRO – CHIMBORAZO. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2011.
13. Lalangui D. REDISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL, APLICANDO UN SISTEMA DE HUMEDAL ARTIFICIAL CON FLUJO SUPERFICIAL EN LA EXTRACTORA TEOBROMA. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2015.
14. AQUANEA. Sistema de depuración natural con humedales artificiales. 2010.
15. Llagas WAL, Gómez EG. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Rev Inst Investig FIGMMG*. 2006;15(17):12.
16. Delgado S. DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA PARROQUIA SAN MATEO DEL CANTÓN ESMERALDAS. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2015.
17. Pilco M. DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN EL SECTOR “CHAQUISHCA”, PARROQUIA GUANUJO, CANTÓN GUARANDA. Escue-

la Superior Politécnica de Chimborazo; 2018.

18. Asamblea Nacional de la República del Ecuador. Constitución de la República del Ecuador. 2008.
19. Asamblea Nacional de la República del Ecuador. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, usos y aprovechamiento del agua. Ediciones Legales; 2015.
20. Water Environment Federation. Standard Methods for the examination and wastewater 23rd Edition. 2017.
21. Milcu A, Hanspach J, Abson D, Fischer J. Cultural Ecosystem Services: A Literature Review and Prospects for Future Research. *Ecol Soc* [Internet]. 30 de septiembre de 2013 [citado 1 de marzo de 2019];18(3). Disponible en: <https://www.ecologyandsociety.org/vol18/iss3/art44/>
22. Díaz V, León W, Ramos E. Medidas de Caudal por medio de flotadores [Internet]. 2015. Disponible en: https://www.academia.edu/15163378/MEDIDAS_DE_CAUDAL_POR_MEDIO_DE_FLOTADORES
23. FAO. Estimaciones del caudal del agua [Internet]. 2017. Disponible en: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s03.htm
24. Lara J. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. 1999.
25. Cueva E, Rivadeneira F. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL CON VEGETACIÓN HERBÁCEA. Escuela Politécnica del Ejército; 2013.
26. República del Ecuador. Anexo I del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes al Recurso Agua. Acuerdo Ministerial 097A; 2015.
27. Velásquez Arias J. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Rev Investig Agrar Ambient*. 13 de enero de 2017;8(1):151-67.
28. Romero-Aguilar M, Colín-Cruz A, Sánchez-Salinas E, Ortiz-Hernández ML. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR UN SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES: EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA. 2009;12.
29. Navarro-Aviñó JP, Alonso IA, López-Moya JR. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Rev Ecosistemas* [Internet]. 2007 [citado 17 de enero de 2020];16(2). Disponible en: <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125>
30. Luna-Pabello VM, Aburto-Castañeda S. Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP*. 1 de junio de 2014;17(1):32-55.
31. Palta-Prado GH, Morales-Velasco S. PHYTODEPURATION ÁGUAS RESIDUAIS. 2013;11(2):9.
32. Estrada I. MONOGRAFÍA SOBRE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (HAFSS) PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS RESIDUALES. Universidad Tecnológica de Pereira; 2010.
33. Laverde J, Salazar Y. UTILIZACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS BARRAS GENERADAS EN ESTACIONES DE SERVICIO EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOVA. Universidad de Córdoba; 2017.