

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS
RESIDUALES EN HUMEDALES ARTIFICIALES UTILIZANDO LA *Guadua*
angustifolia Kunth

Estudiantes:

JHOAN PABLO MARÍN MONTOYA

JUAN CARLOS CORREA RAMÍREZ

Director:

DIEGO PAREDES CUERVO. Ing. M.Sc. Ph D.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍA

ESCUELA DE TECNOLOGÍA QUÍMICA

PEREIRA

2010

Tabla de Contenido

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 AGUAS RESIDUALES.....	8
2.1.1 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.....	9
2.2 PARÁMETROS IMPORTANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	9
2.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	9
2.2.2 Demanda química de oxígeno (DQO).....	10
2.2.3 Nitrógeno.....	10
2.2.4 Oxígeno disuelto.....	12
2.2.5 pH.....	13
2.2.6 Potencial Redox.....	13
2.2.7 Grupo coliforme.....	14
2.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO.....	15
2.3.1 Rendimientos.....	15
2.3.2 Lodos activados.....	15
2.4 HUMEDALES.....	17
2.5 HUMEDALES ARTIFICIALES.....	18
2.5.1 Humedales con espejo de agua o de flujo superficial.....	19
2.5.2 Humedales de flujo subsuperficial.....	20
2.6 MECANISMOS DE REMOCIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES.....	21
2.6.1 Remoción de DBO.....	21
2.6.2 Remoción de Nitrógeno.....	21
2.6.3 Remoción de organismos patógenos.....	21
2.7 PROCESOS BIOLÓGICOS.....	22
2.7.1 Remoción biológica de nutrientes.....	22
2.7.2 Remoción biológica de nitrógeno.....	22
2.7.3 Nitrificación biológica.....	23
2.7.4 Denitrificación biológica.....	24
2.8 <i>Guadua angustifolia</i> KUNTH.....	25
2.8.1 Importancia Económica.....	28
2.9 VENTAJAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	29
4.10 LIMITACIONES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	29
3. JUSTIFICACIÓN.....	31
4. OBJETIVOS.....	34

4.1 OBJETIVO GENERAL.....	34
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	34
5. METODOLOGÍA.....	35
5.1 Unidades experimentales.....	37
5.2 Especificaciones de las unidades experimentales.....	40
5.3 Muestreo.....	40
5.4 Parámetros analizados.....	41
5.5 Análisis estadístico.....	42
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
6.1 CONDICIONES DE LOS HUMEDALES.....	43
6.1.1 Tiempos de retención hidráulicos y comportamiento del caudal	43
6.1.2 Temperatura.....	44
6.1.3 pH.....	45
6.1.4 Potencial redox.....	46
6.1.5 Oxígeno disuelto.....	49
6.2 MATERIA ORGÁNICA.....	50
6.2.1 Comportamiento de la materia orgánica.....	50
6.2.2 Eficiencias de remoción de DQO.....	55
6.2.3 Eficiencias de remoción de DBO ₅	55
6.3 NITRÓGENO TOTAL.....	57
6.3.1 Comportamiento de Nitrógeno amoniacal.....	57
6.3.2 Comportamiento de Nitratos.....	58
6.3.3 Comportamiento de Nitritos.....	59
6.3.4 Eficiencias de remoción de Nitrógeno total.....	60
6.4 PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.....	64
6.5 TASAS DE REMOCIONES.....	66
6.6 Efectos de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth en los sistemas evaluados	68
7. CONCLUSIONES.....	69
8. RECOMENDACIONES.....	71
9. BIBLIOGRAFÍA.....	73
10. ANEXOS.....	78
10.1 Anexo 1: Definiciones.....	78
10.2 Anexo 2: Datos del experimento.....	80
10.3 Anexo 3: Registro fotográfico.....	97

Índice de tablas

	Página
[Tabla 1]: Ubicación y datos geográficos de la zona	37
[Tabla 2]: Especificaciones de los humedales.....	40
[Tabla 3]: Criterios para diseño de humedales.....	40
[Tabla 4]: Parámetros de evaluación.....	41
[Tabla 5]: Temperaturas promedios en los humedales.....	44
[Tabla 6]: Promedios de pH.....	45
[Tabla 7]: Electrodo estándar de hidrogeno.....	47
[Tabla 8]: Características de los humedales según el potencial redox.....	49
[Tabla 9]: Tasas de Remoción.....	66

Índice de Figuras

	Página
[Figura 1]: Aguas residuales.....	8
[Figura 2]: Ciclo del Nitrógeno.....	11
[Figura 3]: Esquema del proceso convencional de lodos activados.....	16
[Figura 4]: Humedal Santa Fe, Costa Rica.....	17
[Figura 5]: Humedal Artificial.....	18
[Figura 6]: Humedal de flujo subsuperficial.....	20
[Figura 7]: Mecanismos de remoción biológica de Nitrógeno.....	23
[Figura 8]: Guadua en fuente hídrica.....	32
[Figura 9]: Guadua transportada para ser utilizada.....	34
[Figura 10]: Esquema planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira.....	35
[Figura 11]: Esquema planta de tratamiento y humedales artificiales.....	36
[Figura 12]: Esquema del interior de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.....	38
[Figura 13]: Humedales artificiales con 19 semanas de funcionamiento.....	39
[Figura 14]: Humedales artificiales con 41 semanas de funcionamiento.....	39
[Figura 15]: Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo.....	45
[Figura 16]: Comportamiento del pH con respecto al tiempo.....	46
[Figura 17]: Comportamiento del Potencial redox en los humedales.....	48
[Figura 18]: Promedio del Potencial redox con respecto al tiempo.....	48
[Figura 19]: Comportamiento de OD con respecto al tiempo	49
[Figura 20]: Promedios del oxígeno disuelto en los humedales	50
[Figura 21]: Comportamiento de la DQO con respecto al tiempo en concentración.....	51
[Figura 22]: Comportamiento de la DBO con respecto al tiempo en concentración.....	52
[Figura 23]: Promedios de la materia orgánica para el humedal con lecho de grava.....	53
[Figura 24]: Promedios de la materia orgánica para el humedal con lecho de arena.....	53
[Figura 25]: Promedios de remoción de DQO para los humedales.....	54

[Figura 26]:	Promedios de % de remoción de DQO para los humedales.....	55
[Figura 27]:	Promedios de remoción de DBO para los humedales.....	56
[Figura 28]:	Promedios de % de remoción de DBO para los humedales.....	57
[Figura 29]:	Comportamiento del nitrógeno amoniacal con respecto al tiempo en concentración.....	58
[Figura 30]:	Comportamiento de los nitratos con respecto al tiempo en concentración...	59
[Figura 31]:	Comportamiento de los nitritos con respecto al tiempo en concentración...	60
[Figura 32]:	Promedios de remoción de Nitrógeno para los humedales.....	61
[Figura 33]:	Promedios de % de remoción de Nitrógeno para los humedales.....	61
[Figura 34]:	Promedios de Nitrógeno total para el humedal de grava.....	62
[Figura 35]:	Promedios de Nitrógeno total para el humedal de arena.....	63
[Figura 36]:	Promedios de remoción de Nitrógeno total para los humedales.....	63
[Figura 37]:	Promedios % de remoción de Nitrógeno total para los humedales.....	64
[Figura 38]:	Coliformes totales con respecto al tiempo.....	65
[Figura 39]:	<i>E. coli</i> con respecto al tiempo.....	66
[Figura 40]:	Tamaño de las plantas en los dos humedales.....	68

1. INTRODUCCIÓN

La depuración de aguas residuales es un tema de gran importancia para controlar los riesgos de polución y por lo tanto es necesario buscar alternativas que permitan mejorar las condiciones de los líquidos para poderse verter a fuentes naturales. Existen diferentes tecnologías que presentan ventajas y desventajas dependiendo del contexto entre las opciones tecnológicas se encuentran los humedales artificiales o construidos.

Los humedales artificiales son ecosistemas en los cuales conviven diferentes especies que permiten mantener un equilibrio en el cual se remueven contaminantes de aguas residuales por medio de un conjunto de procesos químicos, físicos y biológicos depurando un agua de una mejor calidad que puede ser reutilizada en otros procesos dependiendo de sus contenidos.

Este proyecto se llevo a cabo en las instalaciones de la planta de tratamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira, en donde se encuentran construidos dos humedales artificiales, uno con medio de grava y otro con medio de arena y ambos sembrados con *Guadua angustifolia* Kunth, la cual es una especie muy abundante en todo el país, de rápido crecimiento y es muy importante por sus diferentes usos en obras civiles, artesanías, muebles y otros, por lo que se hace indispensable su reproducción.

En este documento se presentan los resultados obtenidos y las eficiencias que se pueden alcanzar en cuanto a remoción de materia orgánica y Nitrógeno total (nitrógeno amoniacal más nitritos y nitratos) en la evaluación de las unidades mencionadas en el párrafo anterior a ciertas condiciones de funcionamiento, las cuales se describen la metodología.

2. MARCO TEORICO

2.1 AGUAS RESIDUALES

Son las aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en las cloacas y son transportados mediante el sistema de alcantarillado (Ver figura 1). Estas son generadas inevitablemente de actividades humanas y sus características son muy diversas, dependiendo de sus orígenes, a la vez los alcances de su tratamiento depende del uso específico a los cuales esta destinada. En las aguas residuales para tener un mejor conocimiento y control de estas, es importante conocer sus características, algunas de ellas son las que se definen a continuación(Romero, 2004)..



Figura 1: Aguas residuales. Fuente: <http://jonathanhernandezlopez.wordpress.com/2010/05/19/aguas-residuales/>.

2.1.1 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

En general se consideran *aguas residuales domésticas* a los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales. También se acostumbra denominar *aguas negras* a las aguas residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Y *aguas grises* a las aguas residuales provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras, aportadoras de DBO, sólidos suspendidos, fósforo, grasas y coliformes fecales, esto es aguas residuales domésticas, excluyendo las de los inodoros (Romero, 2004).

2.2 PARÁMETROS IMPORTANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. Cuando se refiere a la DBO necesaria para oxidar todo el material orgánico carbonáceo biodegradable, se denomina demanda bioquímica última del oxígeno carbonáceo (DBO_U). En condiciones normales de laboratorio, esta demanda se cuantifica a 20 °C, el ensayo estándar se realiza a cinco días de incubación y se conoce convencionalmente como DBO, con valores numéricos expresados en mg/L O₂ (Romero, 2004)..

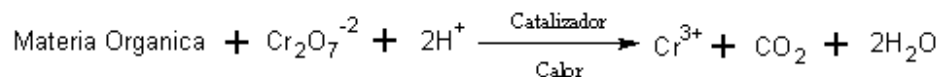
La DBO es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, para diseñar unidades de tratamiento biológico, para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras (Romero, 2004). La mayor parte de las aguas usadas para acueductos contiene DBO estándar menor de 7 mg/L. Es un parámetro necesario en la evaluación de aguas residuales, de los procesos de tratamiento y de los

efectos de contaminación. No se usa como parámetro de control en aguas potables (Romero, 2002).

2.2.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno se usa para medir el oxígeno equivalente para oxidar la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio, en un medio ácido y a alta temperatura. Para la oxidación de ciertos compuestos orgánicos resistentes se requiere la ayuda de un catalizador como el sulfato de plata (Romero, 2002). Compuestos inorgánicos que interfieren con el ensayo, como los cloruros pueden causar resultados erróneos de DQO. La interferencia de mercurio se elimina agregando sulfato mercúrico para formar HgCl_2 (Romero, 2004).

La reacción principal puede representarse de la manera siguiente:



La DQO es útil como parámetro de concentración orgánica en aguas residuales industriales o municipales tóxicas a la vida biológica y se puede realizar en solo tres horas (Romero, 2004).

2.2.3 Nitrógeno

Nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Las formas de interés en aguas residuales son las de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos y nitratos. Todas son formas interconvertibles bioquímicamente y componentes del ciclo del nitrógeno. Se denomina NTK nitrógeno total Kjeldhal, al nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal. Los datos del nitrógeno son necesarios para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales por tratamientos biológicos; un agua residual insuficiente de

nitrógeno puede requerir la adición de nitrógeno para su adecuada descomposición. En otros casos, cuando se exige control de eutrofización de las fuentes receptoras, la remoción de nitrógeno en el agua residual, puede ser una condición del tratamiento (Romero, 2004).

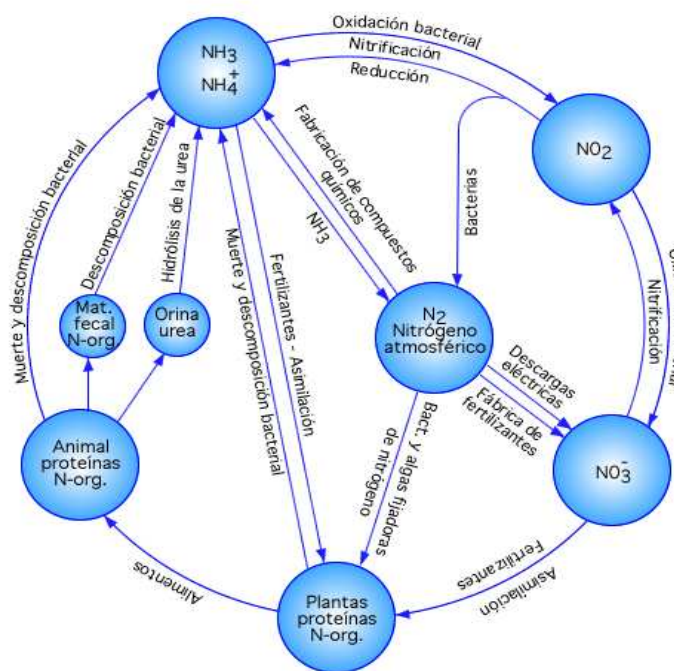
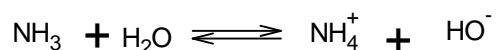


Figura 2: Ciclo del Nitrógeno. Fuente: Romero 2002.

Como se observa en el ciclo del nitrógeno (Figura 2), la forma predominante del nitrógeno en aguas residuales domésticas frescas es el nitrógeno orgánico; las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y, si el medio es aerobio, en nitritos y nitratos. El predominio de nitratos indica que el residuo se ha estabilizado con respecto a su demanda de oxígeno. Los nitratos, sin embargo pueden ser utilizados por las algas y otros organismos acuáticos para formar proteínas y, por ello, puede necesitarse la remoción del nitrógeno para prevenir dichos crecimientos. En los intestinos humanos, el nitrato es reducido a nitrito, adsorbido por el torrente sanguíneo y causante de la meta hemoglobinemia infantil o de la formación de nitrosaminas, las cuales son cancerígenas.

Se considera nitrógeno amoniacal todo el nitrógeno existente en solución como amoníaco o como ion amonio, dependiendo del pH de la solución.



La ecuación anterior indica que el amoníaco produce una solución básica cuando se disuelve en agua: sin embargo, a pH mayor de 9 predomina el ion amonio. La forma tóxica del nitrógeno amoniacal es la no ionizada (NH_3); la forma iónica (NH_4^+) no es tóxica. Por lo tanto, a pH bajo, una concentración relativamente alta de nitrógeno amoniacal total puede ser tóxica, puesto que solo una pequeña porción del total estará presente como NH_3 .

En aguas residuales domésticas la concentración de nitrógeno total puede ser de 30 a 100 mg/L; la de nitrógeno amoniacal, de 5 a 20 mg/L; la de nitritos y nitratos menor de 1 mg/L. En aguas residuales tratadas la concentración de nitratos puede ser del orden de 30 mg/L-N. La presencia de nitrógeno amoniacal en exceso de 1.600 mg/L es considerada inhibitoria para muchos microorganismos existentes en el proceso de lodos activados (Romero, 2004).

2.2.4 Oxígeno disuelto

Gas de baja solubilidad en el agua, requerido para la vida acuática aerobia. La solubilidad del oxígeno atmosférico en el agua dulce oscila entre 7 mg/L a 35 °C y 14,6 mg/L a 0 °C para presión de una atmósfera. La baja disponibilidad de oxígeno disuelto (OD) limita la capacidad autopurificadora de los cuerpos de agua y hace necesario el tratamiento de las aguas residuales para su disposición en ríos y embalses. La concentración de saturación de OD es función de la temperatura, de la presión atmosférica y de la salinidad del agua.

La determinación de OD es el fundamento del cálculo de la DBO y de la valoración de las condiciones de aerobividad de un agua. En general, todo proceso aerobio requiere una

concentración de OD mayor de 0,5 mg/L. El suministro de oxígeno y la concentración de OD en tratamientos biológicos aerobios y aguas receptoras de aguas residuales son aspectos de mayor importancia en el diseño, operación y evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales. La cantidad de oxígeno que se transfiere al agua residual, en un tanque de aireación de un proceso de lodos activados, debe ser suficiente para satisfacer la demanda microbiana existente en el sistema de tratamiento y mantener un residual de OD generalmente del orden de 2 mg/L. En aguas naturales, para evitar efectos perjudiciales sobre la vida acuática se recomienda emplear concentraciones mayores de 4 mg/L (Romero, 2004).

2.2.5 pH

Medida de la concentración de ion hidrógeno en el agua, expresada como el logaritmo negativo de la concentración molar del ion hidrógeno. Aguas residuales en concentraciones adversas del ion hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente, alteran la biota de las fuentes receptoras y eventualmente son fatales para los microorganismos. Aguas con pH menor de seis, en tratamiento biológico favorecen el crecimiento de hongos sobre las bacterias. A pH bajo el poder bactericida del cloro es mayor, porque predomina el HOCl; a pH alto la forma predominante del nitrógeno amoniacal es la forma gaseosa no iónica (NH₃), la cual es toxica, pero también removible mediante arrastre con aire, especialmente a pH de 10,5 a 11,5. El valor de pH adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, pero generalmente es de 6,5 a 8,5.

Para descarga de efluentes de tratamiento secundario se estipula un pH de 6,0 a 9,0; para procesos biológicos de nitrificación se recomiendan valores de pH de 7,2 a 9,0 y para desnitrificación de 6,5 a 7,5 (Romero, 2004).

2.2.6 Potencial Redox

El potencial redox (eh) es un valor relativo medido contra el punto 0 del electrodo normal de hidrógeno u otro electrodo secundario de referencia (ej. Electrodo calomel de HgCl ó

Hg₂Cl₂ ó el electrodo plata/plata cloruro: Ag/AgCl[sat], KCl[sat]). Cualquier sistema o ambiente que acepte electrones de un electrodo normal de hidrógeno es una media celda con un potencial redox positivo. En contraposición, cualquier ambiente o sistema que done electrones al electrodo normal de hidrógeno se define como una media celda con un potencial redox negativo. El potencial redox se mide en milivoltios o voltios. Un valor eh positivo y de alta magnitud es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación. Del otro lado, un valor eh negativo y de baja magnitud es indicativo de un ambiente altamente reductor.

Las reacciones de oxidación y reducción regulan el comportamiento de muchos compuestos químicos presentes en cuerpos de agua naturales. La reactividad, solubilidad y movilidad cíclica de elementos esenciales para los sistemas biológicos (ej. Fe, S, N, C, P, y varios elementos metálicos) son afectados por cambios en el potencial redox. Al mismo tiempo, el potencial redox afecta la distribución y la actividad metabólica de microorganismos (Parámetros físico-químicos, 2010).

2.2.7 Grupo coliforme

El grupo coliforme incluye las bacterias de forma bacilar, aeróbicas y facultativas anaeróbicas, Gram-negativas, no formadoras de esporas, las cuales fermentan la lactosa con formación de gas en un período de 48 horas a 35 °C (o 37 °C).

El número de organismos coliformes en los excrementos humanos es muy grande; la secreción diaria por habitante varía entre 125×10^9 y 400×10^9 . Su presencia en el agua se considera un índice ocurrente de la ocurrencia de polución fecal y por lo tanto, de contaminación con microorganismos patógenos. En aguas residuales la relación de organismos coliformes con organismos entéricos patógenos es muy grande, del orden de $10^6/1$.

La *Escherichia coli* es la bacteria indicadora por excelencia del grupo coliforme fecal, debido a su presencia permanente en la flora intestinal del hombre y de los animales de sangre caliente; es gram negativa, facultativa anaerobia, de forma bacilar, de 0,5 a 2 μm de

tamaño. La mayoría de los miembros de la especie *E. coli* son comensalistas inocuos, pero algunas cepas son patógenas. La *E. Coli* patógena causa diarrea, especialmente en niños y en viajeros (Romero, 2002).

2.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO

Los procesos biológicos, o secundarios, se emplean para convertir la materia orgánica fina coloidal y disuelta en el agua residual en floc biológico sedimentable y sólidos inorgánicos que pueden ser removidos en tanques de sedimentación. Estos procesos se emplean junto con procesos físicos y químicos para el tratamiento preliminar y primario del agua residual.

El objetivo de un tratamiento secundario es remover la DBO soluble que escapa de un tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de sólidos suspendidos. Estas remociones se efectúan fundamentalmente por medio de procesos biológicos; algunos de estos son: Procesos de lodos activados, lagunas aireadas, filtros percoladores, biodiscos, lagunas de estabilización.

2.3.1 Rendimientos

Los procesos biológicos son eficientes en remoción de sustancias orgánicas que presentan tamaño coloidal e inferior. Un tratamiento secundario típico remueve aproximadamente 85% de la DBO y los SS, aunque no remueve cantidades significativas de nitrógeno, fósforo, metales pesados ni organismos patógenos.

2.3.2 Lodos activados

El proceso de lodos activados y sus varias modificaciones pueden ser usados cuando las aguas residuales puedan responder a un tratamiento biológico. Este proceso requiere atención cuidadosa y una operación de supervisión competente, incluido un control rutinario de laboratorio (RAS, 2010).

En los procesos de tratamiento con lodos activados cíclicos se pueden tratar residuos mediante la combinación de etapas aerobias y anaerobias, haciendo posible ahora la remoción biológica tanto de nitrógeno como de fósforo. Actualmente algunos procesos usados cíclicos son: el zanjón de oxidación, el proceso Schreiber de aireación en contracorriente, el proceso BiolacTM, el proceso de aireación extendida y sedimentación intermitente, y los reactores de flujo intermitente en secuencia (Crites, 2000).

El esquema específico de flujo del proceso biológico convencional de lodos activados (tanque de aireación, sedimentador y recirculación de lodos activados) se indica en la Figura 3.

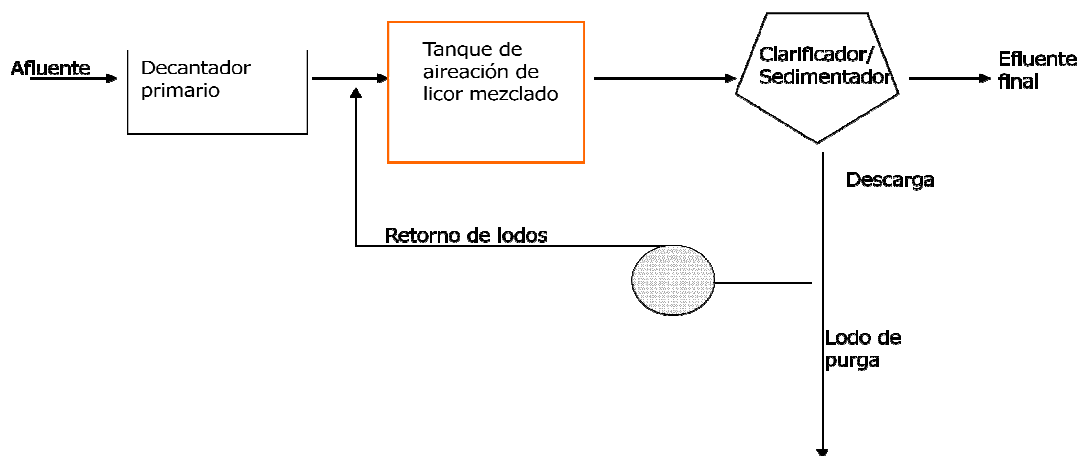


Figura 3: Esquema del proceso convencional de lodos activados. Fuente: Romero 2004.

Los lodos recirculados y el agua residual provenientes del decantador primario, si lo hay, entran en el tanque de aireación, donde son aireados y mezclados, a medida que la mezcla líquida (lodos + agua residual) fluye a lo largo del tanque. Los microorganismos estabilizan aerobiamente la materia orgánica en el tanque de aireación y fluyen al sedimentador secundario donde el floc biológico es separado del agua residual, dejando un efluente claro de bajo contenido orgánico. Una porción de los lodos es recirculada al tanque de aireación como simiente y, el exceso, enviado al sistema de tratamiento y disposición de lodos (Romero, 2004).

2.4 HUMEDALES

Los humedales, naturales o artificiales, son sistemas de tratamiento acuático en los cuales se usan plantas y animales para el tratamiento de aguas residuales (ver figura 4). Los humedales artificiales son de superficie libre de agua, es decir, con espejo de agua o de flujo subsuperficial sin espejo de agua. Los humedales artificiales se han utilizado en el tratamiento de aguas residuales municipales, para el tratamiento secundario y avanzado, en el tratamiento de aguas de irrigación, para tratar lixiviados y rellenos sanitarios, en el tratamiento de residuos de tanques sépticos y para otros propósitos como desarrollar hábitats para el crecimiento de valor ambiental (Romero, 2004).



Figura 4: Humedal Santa Fe, Costa Rica. Fuente: <http://www.ruralcostarica.com/fotos2.html>.

Los humedales figuran entre los medios más productivos del mundo. Son cunas de diversidad biológica y fuentes de agua y productividad primaria de las que innumerables

especies vegetales y animales dependen para subsistir. Dan sustento a altas concentraciones de especies de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados.

Los seres vivos, junto a procesos físicos y químicos, son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y, en algunos casos, productos tóxicos; por esta razón se ha llamado a los humedales “los riñones del mundo” (Lahora, 2001).

La capacidad de los humedales de adaptarse a condiciones dinámicas e índices de cambio cada vez más rápidos, será crucial para las comunidades humanas y las especies silvestres en todas partes, conforme se vaya percibiendo de lleno el impacto del cambio climático en las bases de sustentación de los ecosistemas. Por esta razón llama la atención que los humedales y los servicios que nos prestan estén en mira de todo el mundo (Convenio de RAMSAR, 2010).

2.5 HUMEDALES ARTIFICIALES



Figura 5: Humedal Artificial. Fuente: <http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp?id=25006>.

Un humedal artificial es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo, construido por el hombre, en el que se han sembrado plantas acuáticas, y contado con los procesos naturales para tratar el agua residual como se puede apreciar en la figura 5. Los humedales construidos tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos, debido a que requieren poca o ninguna energía para operar (Lahora, 2001).

La construcción de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales ha evolucionado desde que tuvo su origen en 1946 gracias a Siedel quien propuso el modelo Max Planck Institute System (MPIS) o proceso Krefeld, este método se aplicó por primera vez en Alemania en 1974 para tratar aguas residuales municipales y aguas residuales de la industria textilera, cervecera y de productos lácteos (Guerrero y García, 2002) empleando plantas emergentes, convirtiéndose en una importante tecnología para el tratamiento de efluentes de tanques sépticos, de lagunas de estabilización y, en general, de efluentes de tratamiento biológico secundario (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Entre las plantas comúnmente encontradas en los humedales naturales y que son potencialmente utilizables en humedales artificiales están: Caña común (*Phragmites australis*), Juncos (*Juncus sp.*), la *Scirpus sp.*, iris de los humedales (*Iris pseudacorus*) y la menta de agua (*Mentha aquatica*) (Guerrero y García, 2002).

2.5.1 Humedales con espejo de agua o de flujo superficial

El humedal con espejo de agua es un pantano o ciénaga en el que la vegetación emergente está inundada hasta una profundidad de 10 a 45 cm. La vegetación incluye juncos, cañas, espadañas y anea. Algunos humedales artificiales se construyen con revestimientos en material impermeable para impedir la percolación y evapotranspiración; así como se puede observar en la figura 5.

La vegetación con sus tallos, hojas sumergidas y raíces sirven como medio de soporte de crecimiento bacteriano, reduce el potencial de crecimiento de algas y oxígeno. Para mantener una reacción apropiada se recomiendan cargas de DBO de máximo 112 kg DBO/ha.d. Un

humedal con espejo de agua permite remociones altas de DBO, SST, nitrógeno, metales y patógenos.

La remoción aumenta con el tiempo de retención y la temperatura. La remoción de DBO puede ser de 60 al 80% y de SST del 50 al 90% (Romero, 2004).

2.5.2 Humedales de flujo subsuperficial

En este tipo de humedales el agua fluye por debajo de la superficie de un medio poroso sembrado de plantas emergentes. El medio es comúnmente grava gruesa y arena en espesor de 0,45 a 1 mm y con pendiente de 0 a 1%.

En contraste con los humedales de flujo superficial o con espejo de agua, los humedales artificiales de flujo subsuperficial tienen menores requerimientos de área y carecen de problemas de olores y de mosquitos. Como desventaja, sin embargo, se tiene un costo mayor por el medio de grava y riesgo de taponamiento. La vegetación es semejante a la de los humedales con espejo de agua y no se requiere cosechar las plantas (Romero, 2004).

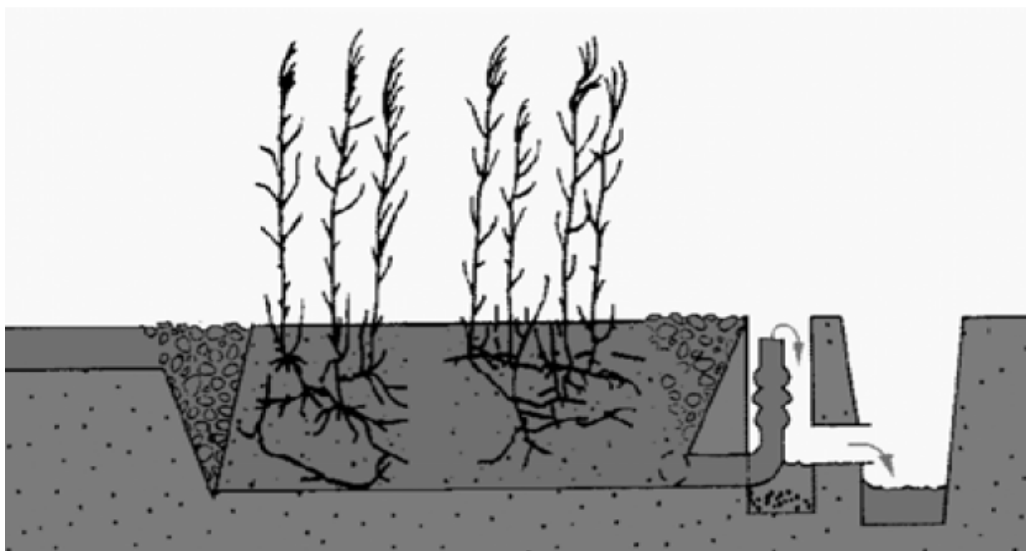


Figura 6: Humedal de flujo subsuperficial. Fuente: Lahora, 2001.

2.6 MECANISMOS DE REMOCIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES

2.6.1 Remoción de DBO

El suelo es un biofiltro que contiene una gran cantidad de bacterias. La remoción de DBO se lleva a cabo por la absorción de compuestos orgánicos en solución y por oxidación bacteriana, ya que las capas superiores del suelo contienen microorganismos en abundancia. Los valores más comunes que se estiman respecto a la cantidad de microorganismos son: 10^7 bacterias, 10^6 actinomicetos y 10^5 hongos por gramo de tierra. Estos microorganismos son los responsables de la remoción de DBO en el agua residual aplicada. Para flujo superficial, el crecimiento bacteriano que se presenta en la capa superior del suelo y en el humus de las plantas son responsables de la remoción.

El crecimiento biológico de organismos es sensible a la temperatura. Los organismos alcanzan un crecimiento óptimo a temperaturas relativamente altas, pero su reproducción continúa inclusive a temperaturas muy bajas (Crites y Tchobanoglous, 2000).

2.6.2 Remoción de Nitrógeno

En los sistemas de tasa baja o flujo subsuperficial, la remoción de nitrógeno ocurre como resultado de la incorporación del nitrógeno a los tejidos vegetales de los cultivos, por nitrificación/denitrificación, y en menor proporción por volatilización de amonio e incorporación de este en el suelo (almacenamiento en suelo). La nitrificación y la denitrificación son dos procesos que ocurren inclusive en suelos aerobios, ya que estas condiciones promueven la nitrificación y las zonas anóxicas del suelo permiten la denitrificación (Crites y Tchobanoglous, 2000).

2.6.3 Remoción de organismos patógenos

La remoción de microorganismos, incluyendo bacterias patógenas, virus y helmintos, se efectúa por filtración en el suelo, adsorción, desecación, radiación, depredación y exposición a otras condiciones ambientales adversas. Debido a su gran tamaño los helmintos y

protozoos se remueven en la superficie del suelo mediante filtración. Las bacterias se remueven del agua residual por filtración y adsorción, alcanzando valores habituales de remoción de 99.9% o más. La remoción de virus se presenta principalmente por adsorción (Crites y Tchobanoglous, 2000).

2.7 PROCESOS BIOLÓGICOS

2.7.1 Remoción biológica de nutrientes

Dado que el nitrógeno puede causar impacto en la calidad del agua que los recibe, la descarga de este debe ser controlada con frecuencia. El nitrógeno puede estar presente en las aguas residuales de varias maneras (por ejemplo, en forma orgánica, amoníaco, nitratos y nitritos). La mayoría del nitrógeno disponible, en efluentes de agua residual doméstica se presenta en su gran mayoría como nitrógeno orgánico o de amoníaco. La concentración total habitual de este es de alrededor de 25 a 35 mg/L de concentración en estas. En el tratamiento de aguas residuales, cerca del 20% del nitrógeno total se decanta durante la sedimentación primaria. Durante el tratamiento biológico, una porción de nitrógeno orgánico se convierte en nitrógeno amoniacal, una parte de la cual se incorpora a las células biológicas que son extraídas del flujo del agua tratada antes de la descarga, retirando así otro 20% del nitrógeno entrante. Normalmente el 60% restante se descarga en aguas receptoras (Crites y Tchobanoglous, 2000).

2.7.2 Remoción biológica de nitrógeno

Con dos mecanismos principales para la remoción biológica del nitrógeno, como se ilustra en la figura 7 se dan por asimilación y por nitrificación-denitrificación. Dado que el nitrógeno es un nutriente, los microorganismos presentes en el proceso de tratamiento asimilan el nitrógeno amoniacal y lo incorporan a su masa celular. El nitrógeno puede retirarse de las aguas residuales sacando las células del sistema. Sin embargo en la mayoría de las aguas residuales hay más nitrógeno del que puede ser asimilado por el tejido celular. En la nitrificación-denitrificación, la remoción de nitrógeno se logra en un proceso de conversión en dos pasos. En el primer paso, el amoníaco se oxida biológicamente a nitratos.

En el segundo paso, el nitrato se reduce a oxígeno gaseoso, el cual se deja escapar del sistema.

2.7.3 Nitrificación biológica

En la nitrificación biológica, el amoníaco se oxida en un proceso de dos pasos: primero a nitritos y luego a nitratos, el mecanismo se ilustra en la figura 7.

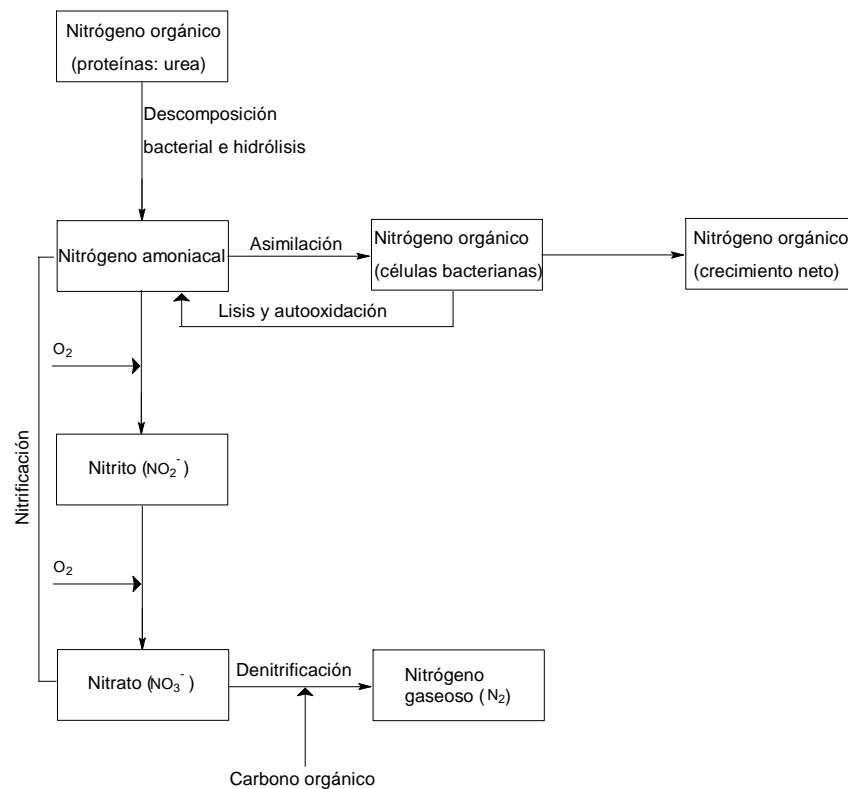


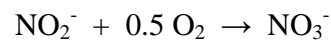
Figura 7: Mecanismos de remoción biológica de Nitrógeno. Fuente: Crites y Tchobanoglous, 2000.

La conversión biológica a nitrato se describe de la siguiente manera:

Conversión de amonio a nitrito (representado por las *Nitrosomas*)



Conversión de nitrito a nitrato por *Nitrobacter*



Conversión global de amonio a nitrato

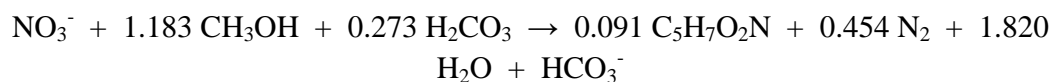


2.7.4 Denitrificación biológica

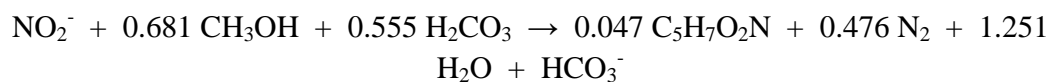
En el pasado, la conversión biológica de nitratos a nitrógeno se identificaba con frecuencia como denitrificación anaerobia. Sin embargo, las vías bioquímicas principales no son anaerobias, sino más bien una modificación de las vías aerobias, en las cuales el nitrógeno sirve como aceptor de electrones; por tanto, se considera apropiado el uso del término anóxico en lugar de anaerobio. Las bacterias denitrificantes obtienen energía para su crecimiento de la conversión de nitratos en nitrógeno gaseoso, pero requieren una fuente de carbono para la síntesis celular. Dado que los efluentes nitrificados tienen, por lo general, un bajo contenido de materia carbonácea, se requiere con frecuencia una fuente externa de carbono. En la mayoría de los sistemas biológicos de denitrificación se utilizan aguas entrantes o de tejido celular como fuentes de carbono necesario. El tratamiento de las aguas residuales agrícolas que son deficientes en carbono, se utiliza metanol u otros compuestos orgánicos como fuentes de carbono. También se emplean los desechos industriales que son deficientes en nutrientes, pero que contienen carbono orgánico.

Con el metanol como fuente de carbono, la denitrificación en etapas separadas se describe de la siguiente manera.

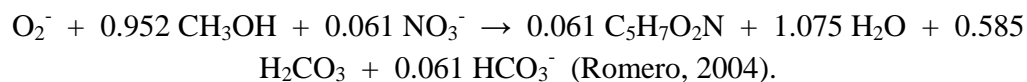
Para la remoción de los nitratos:



Para la remoción de los nitritos:



Para la remoción de oxígeno:



2.8 *Guadua angustifolia* Kunth

La guadua es de la familia de los pastos, es un pasto gigante que más crece en el mundo y puede alcanzar hasta 30 metros de altura y un grosor hasta de 30 cm (Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 1999). Ha sido el Bambú leñoso y nativo más útil para el hombre colombiano. Sin este recurso el desarrollo de nuestra zona cafetera habría sido totalmente diferente. La guadua es una especie forestal representada por esbeltos y modulados tallos que enaltecen el paisaje de los valles interandinos es larga, recta, uniforme en su desarrollo, liviana, hueca, resistente, suave, de rápido crecimiento, de bello color e imperceptiblemente cónica.

Fueron primero los colonizadores y luego nuestros campesinos y maestros de la construcción los encargados de darle a la guadua la importancia que se merece. Su valor depende de la aplicabilidad y del espacio físico donde la misma se utilice.

La guadua en Colombia fue pieza fundamental en el proceso poblacional ocurrido en la región del viejo Caldas, conocido como el período de la colonización antioqueña.



Figura 8: Guadua en fuente hídrica. Fuente: Salas, 2010.

Contribuyó con sus versátiles propiedades a agilizar el proceso de poblamiento de las comunidades emigrantes que finalmente establecieron en la hoya geográfica del cauca ciudades como Medellín, Pereira, Manizales, Armenia y Cali y que hoy constituyen orgullo para Colombia. La guadua es además un vegetal que desempeña un importante papel como

especie protectora en cuencas hidrográficas que a la vez se incorpora al paisaje como lo muestra la figura 8, pero es también un elemento imprescindible para nuestro desarrollo socio cultural (Salas, 2010).

La guadua es una planta que aporta múltiples beneficios para el medio ambiente y el hombre, sus productos cuando son empleados como elementos integrales de la construcción de viviendas funcionan como reguladores térmicos y de acústica, el rápido crecimiento de la guadua permite según el “estudio aportes de biomasa aérea realizado en el centro nacional para el estudio del Bambú-Guadua, producir y aportar al suelo entre 2 y 4 ton/ha/año de biomasa, volumen que varía según el grado de intervención del guadua; esta biomasa constituye entre el 10 y el 14% de la totalidad de material vegetal que se genera en un guadua. La biomasa es importante, ya que contribuye a enriquecer y mejorar la textura y estructura del suelo. El aporte anual de biomasa general de un guadua en pleno desarrollo oscila entre 30 y 35 ton/ha/año (Salas, 2010).

Los guaduales cumplen en la zona cafetera colombiana papel relevante puesto que han propiciado la existencia y sostenibilidad de flora, microflora, entomofauna, mamíferos, aves, reptiles y anfibios. Se resalta que en estos nichos ecológicos o comunidades es la especie dominante y a ella se asocia vegetación muy variada y numerosa que le permite conformar una estructura vertical triestratofítica, característica de las sociedades vegetales altamente desarrolladas y evolucionadas que tolera una amplia interrelación entre los diferentes componentes del sistema (Salas, 2010)

Hoy solamente quedan en Colombia unas 50.000 hectáreas de guaduales cuando hace 500 años eran más de 12 millones.

La guadua debe cultivarse con la clara idea de que es un cultivo de triple propósito: primero como protector de suelo y de aguas, segundo, como embellecedor del ambiente y como refugio de animales y tercero como fuente de ingresos al hacer de la guadua un cultivo comercial permanente en la finca (Salas, 2010).

2.8.1 Importancia Económica

En Colombia la guadua es la especie forestal nativa con mayores posibilidades económicas, ya que su utilización en la construcción y la industria, permiten reducir costos, cuando es empleada como materia prima. Por sus excelentes propiedades físico-mecánicas, por su resistencia al ataque de insectos, por su belleza escénica y tal vez, por lo más importante la diversidad de aplicaciones no igualadas por ninguna especie forestal, representa una alternativa económica que ha coadyuvado a mitigar la problemática social en el campo.

En Colombia aproximadamente 100.000 personas derivan su sustento del aprovechamiento manejo y comercialización de la Guadua, de donde obtienen hasta \$400 dólares mensuales, con un ritmo de trabajo de 4 días laborales en la semana, así como se ilustra en la figura 9 (Salas, 2010).



Figura 9: Guadua transportada para ser utilizada. Fuente: Salas, 2010.

2.9 VENTAJAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

(Lara, 2010, nombra algunas ventajas sobre la utilización de humedales artificiales)

- Son menos costosos que otros sistemas de tratamiento.
- Los gastos de operación y mantenimiento son bajos (energía y suministros).
- Las operaciones y mantenimiento no requieren un trabajo permanente en la instalación.
- Los humedales soportan bien las variaciones de caudal.
- Facilitan el reciclaje y la reutilización del agua.
- Proporcionan un hábitat para muchos organismos.
- Pueden construirse en armonía con el paisaje.
- Proporcionan muchos beneficios adicionales a la mejora de la calidad del agua, como el ser un hábitat para la vida salvaje y un realce de las condiciones estéticas de los espacios abiertos.
- Son una aproximación sensible con el medio ambiente que cuenta con el favor público.

2.10 LIMITACIONES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

(Lara, 2010, por otra parte nombra algunas desventajas sobre la utilización de humedales artificiales).

- Generalmente requieren grandes extensiones de terreno, comparado con los tratamientos convencionales. El tratamiento con humedales puede ser relativamente más barato que otras opciones, solo en el caso de tener terreno disponible y asequible.
- El rendimiento del sistema puede ser menos constante que el de un proceso convencional. El rendimiento del sistema puede ser estacional en respuesta a los cambios en condiciones ambientales, incluyendo lluvias y sequías.
- Los componentes son sensibles a sustancias como el amoníaco y los pesticidas que llegan a ser tóxicos.
- Se requiere una mínima cantidad de agua para que sobrevivan, pero no soportan estar completamente secos.

- Además, el uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales es de reciente desarrollo y no existe aun un consenso sobre el diseño óptimo del sistema y no se cuenta con suficiente información sobre el rendimiento a largo plazo.

3. JUSTIFICACIÓN

El agua es un compuesto con características únicas, de gran significado para la vida, el más abundante en la naturaleza y determinante en los procesos físicos, químicos y biológicos que gobiernan nuestro medio natural (Ideam, 2001).

Las aguas residuales generadas de diferentes fuentes son vertidas a los ríos y otros medios acuáticos, en los cuales existen microorganismos llamados bacterias descomponedoras, que transforman todos los restos orgánicos del agua en materia mineral sencilla, esta se disuelve, o bien precipita en el fondo, devolviendo al agua su claridad y transparencia (autodepuración).

El problema surge cuando los vertidos, como metales pesados, bacterias patógenas y otras sustancias, superan la capacidad de autodepuración de los medios acuáticos. Estos elementos permanecen en el agua y limitan sus usos normales (Kalipedia, 2009), haciéndose necesario el tratamiento de las aguas residuales para contribuir con nuestro medio y aumentar los niveles de saneamiento.

Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales que ha arrojado grandes beneficios es la remoción de contaminantes utilizando humedales artificiales, la cual tiene grandes ventajas, por que con esta se pueden reducir costos y grandes inversiones en plantas de tratamiento. Estos sistemas son de bajos costos, fácilmente operados y mantenidos, y tienen un enorme potencial para la aplicación en países de desarrollo particularmente en pequeñas poblaciones rurales (Arroyabe, 1997).

Desde hace unos años se construyen en toda Europa humedales en los cuales se reproduce estos entornos naturales, si bien de forma más sencilla, para depurar aguas residuales de pequeños núcleos urbanos de no más de 2.000 habitantes. Su uso está especialmente extendido en el norte de Europa, y se ensayan e investigan diferentes estructuras de humedales artificiales por conseguir los mejores resultados (R+D Csci, 2009).

La mayor parte de los países en vía de desarrollo se encuentran ubicados en zonas tropicales y cuentan con condiciones climáticas que son propicias para la alta actividad bacteriana y productividad biológica, mejorando ostensiblemente el desempeño de los sistemas y aprovechando la riqueza biótica de carácter diverso que ofrecen estas regiones (Guerrero y García, 2002).

Gopal (1999) ha identificado limitaciones para la adopción de tecnologías por humedales artificiales, las cuales incluyen grandes requerimientos de tierra, falta o deficiente conocimiento de la ecología de humedales tropicales y especies nativas, existencia de aguas residuales domésticas e industriales en forma combinada y limitado conocimiento y experiencia en el diseño y gestión de los humedales artificiales (Guerrero y García, 2002). Estas limitaciones hacen que sea indispensable el estudio de los humedales artificiales para formar un conjunto de aportes que contribuyan en una futura implementación de estos sistemas, y también conocer la eficiencia empleando plantas nativas como la *Guadua angustifolia* Kunth.

En Colombia se han llevado a cabo diversos estudios sobre humedales artificiales, algunos de ellos son: “Remoción de contaminantes de aguas residuales con humedales artificiales de flujo subsuperficial” (Arroyabe, 1997), realizado en la Universidad de los Andes, Bogotá; utilizando las especies junco (*Scirpus californicus*) y la enea (*Typha angustifolia*). “Adaptación y evaluación de plantas típicas de la zona cafetera como tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales” (Morales, 2003), Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira; en el cual emplearon las especies junco (JUNCACEAE, *Juncus spp.*), Jengibre (ZINGIBERACEAE, *Realnimia alpina*) y Typha (TYPHACEAE, *Typha spp.*). “Remoción de metales pesados (cromo y zinc) en las aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) sembrados con guadua” (Moños y Rincón, 2004), Pereira; en el cual se utilizó la *Guadua angustifolia* Kunth y obtuvieron buenos resultados en la remoción del cromo y zinc.

La *Guadua Angustifolia Kunth* es endémica de América y se considera como nativo de Colombia, Venezuela y Ecuador. En Colombia la guadua se encuentra distribuida a lo largo de la Cordillera Central y la zona céntrica del país en los departamentos de Antioquia, Cauca, Caldas, Cundinamarca, Huila, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca (Bambubrasileiro, 2009). Existe tanto en la región tropical como en la subtropical, pero se encuentra en mayores áreas en los bosques húmedos y muy húmedos concentrándose en las

laderas de montaña y en las riveras de los ríos. La *Guadua Angustifolia Kunth* se desarrolla muy bien entre los 0 y 1.600 metros, pero también crece en buenas condiciones hasta los 1.800 m, por encima de esta altura hasta los 2.000 m, los rendimientos son más bajos (Bambubrasileiro, 2009).

La guadua es una especie de rápido crecimiento, tiene gran importancia en el efecto de la protección de los suelos, también es protectora de las corrientes de agua, de cuencas y microcuencas.

La guadua tiene un efecto purificador y embellecedor del ambiente en la zona cafetera del país, cualquier población de guadua ubicado en las laderas ofrece una imagen digna de apreciar (Ministerio de agricultura y desarrollo, 1999); lo cual hace que esta sea una especie apropiada para pertenecer a un humedal, ya que estos sitios se caracterizan por ofrecer una imagen agradable del paisaje.

La Universidad Tecnológica de Pereira, cuenta con una planta de aguas residuales, en donde se realizan muchos estudios para el mejoramiento de este recurso natural. Una alternativa que se estudia y se aplica en la actualidad en el tratamiento de aguas residuales por los buenos resultados que se han obtenido es la fitorremediación, la cual es una técnica descubierta en los años setenta que consiste en la remoción de contaminantes por medio de humedales con especies vegetales que ayudan a la degradación biológica de efluentes con metales pesados y contaminantes habituales y recalcitrantes.

Este proyecto es un aporte para fortalecer los conocimientos y experiencias acerca de los humedales artificiales en las condiciones ambientales de la zona estudiando una especie tropical nativa; *Guadua angustifolia* Kunth, en dos lechos diferentes que son la grava y la arena, para considerar su uso e implementación en un futuro.

Este trabajo también obedece al cumplimiento de un requisito mínimo exigido para obtener el título de Tecnólogo en química en la Universidad Tecnológica de Pereira.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la remoción de contaminantes de tipo orgánicos y agentes patógenos de aguas residuales en humedales artificiales sembrados con *Guadua angustifolia* Kunth, determinando en que medio de cultivo, grava o arena se obtienen mejores resultados.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la capacidad de remoción de DQO y DBO₅ (Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno), de la *Guadua angustifolia* Kunth, en un Humedal de flujo subsuperficial horizontal (FSSH), con lecho de arena y en un Humedal FSSH, con lecho de grava.
- Establecer las tasas de remoción de nitrógeno (N), de la *Guadua angustifolia* Kunth, en un Humedal de FSSH, con lecho de arena y en un Humedal de FSSH, con lecho de grava.
- Identificar la capacidad de remoción de coliformes totales y *Escherichia coli* de la *Guadua angustifolia* Kunth, en un Humedal de FSSH, con lecho de arena y en un Humedal de FSSH, con lecho de grava.

5. METODOLOGÍA

La universidad Tecnológica de Pereira cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales en la cual se lleva a cabo un tratamiento a el agua contaminada antes de su vertimiento al alcantarillado público; en esta planta se lleva a cabo un tratamiento preliminar de sedimentación de sólidos, y un tratamiento secundario de lodos activados (ver figura 10), con esto la universidad genera vertimientos más limpios para el medio ambiente.

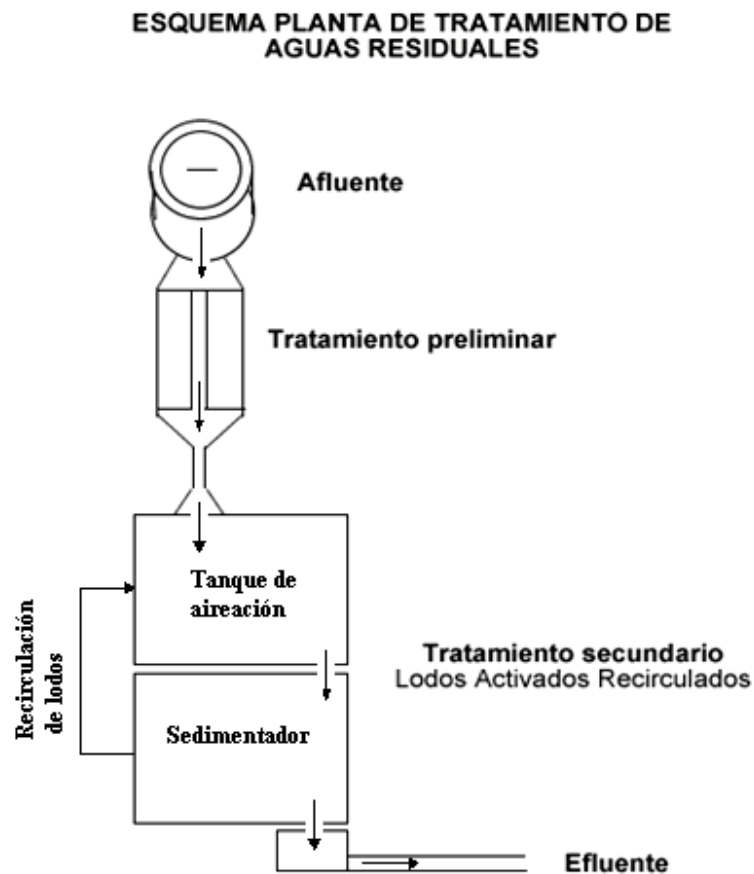


Figura 10: Esquema planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Fuente: Autores

Es allí, en la planta el lugar en donde se encuentran las unidades experimentales utilizadas para este proyecto, las cuales son dos humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con diferentes medios filtrantes (grava y arena), que se utilizan como tratamiento terciario. Estos humedales son alimentados con una pequeña parte del efluente de la planta de tratamiento, y sus efluentes son vertidos junto con el afluente de la planta de tratamiento. (Ver figura 11)

**ESQUEMA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES Y HUMEDALES
ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL
HORIZONTAL**

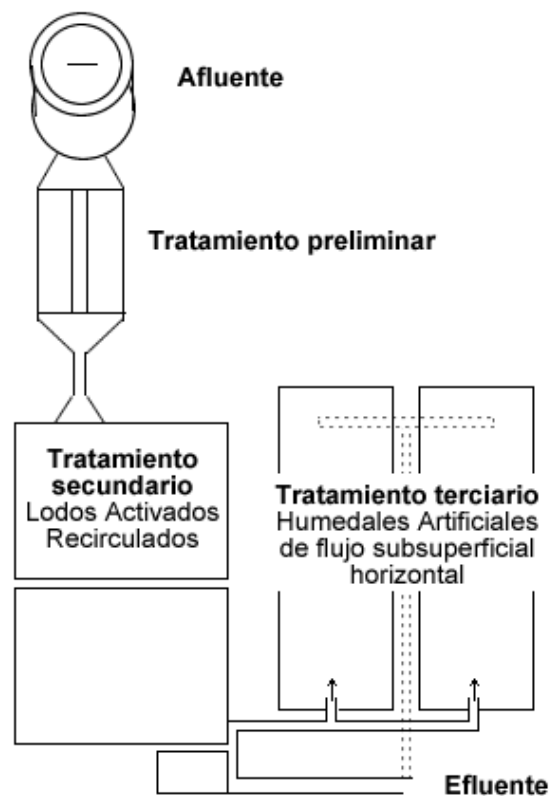


Figura 11: Esquema planta de tratamiento y humedales artificiales. Fuente: Autores

5.1 Unidades experimentales

Este Proyecto se llevo a cabo en la Universidad Tecnológica de la ciudad de Pereira, la cual tiene una ubicación y presenta unos datos geográficos que se ilustran en la tabla 1.

Tabla 1: Ubicación y datos geográficos de la zona

Ubicación y datos geográficos de la zona	
Latitud	4° 48' 51,40'' N
Longitud	75° 41' 40,41'' W
Altitud	1411 msnm
Temperatura	23 °C
Humedad relativa	83 %
Presión atmosférica	102,03 kPa

Las unidades experimentales están conformadas por dos Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal, construidos en concreto (canales rectangulares de 4,48 m de largo, 1,06 m de ancho y 1 m de profundidad) y debidamente impermeabilizados, que se acondicionaron uno con lecho de arena y el otro con lecho de grava, en los cuales se sembraron 20 chusquines de *Guadua angustifolia* Kunth en cada uno.

La estructura de entrada del afluente, consistió en una llave de paso tipo grifo la cual permitía regular manualmente el caudal del afluente de cada humedal, este grifo llevaba el agua hacia uno de los costados del humedal, y allí el agua realizaba su recorrido al interior del humedal ocurriendo allí la fitorremediación. Después del proceso de saneamiento por acción de las plantas esta sale como efluente por el otro costado del humedal por medio de un tubo con múltiples perforaciones (Ver figura12).

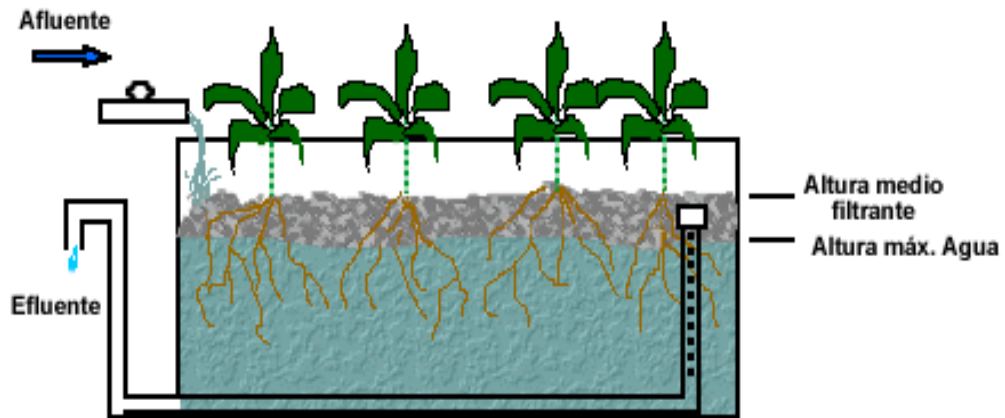


Figura 12: Esquema del interior de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: Autores

Las plantas fueron sembradas en las unidades experimentales el día martes 15 de septiembre de 2010, inicialmente se dio un tiempo de 20 semanas antes de la realización de análisis, para esperar la adaptación y estabilización de las plantas en el humedal; durante este tiempo la únicas labores, fueron las de mantenimiento de los humedales como las de limpieza de los grifos, aforo y ajuste del caudal.

En la figura 13 se pueden apreciar las entradas de agua residual y las salidas del agua después del tratamiento en los humedales, la imagen a), representa el humedal 1, con lecho de arena y su llave que permite la entrada del afluente; la imagen b) al humedal 2, muestra la llave que permite la entrada del afluente en el humedal con lecho de grava y la imagen c) muestra las salidas de los efluentes de ambos humedales, en donde también se hace la toma de muestras.



A. HUMEDAL CON LECHO DE ARENA



B. HUMEDAL CON LECHO DE GRAVA



C. EFLUENTES

Figura 13: Humedales artificiales con 19 semanas de funcionamiento. Fuentes: Autores



Figura 14: Humedales artificiales con 41 semanas de funcionamiento. Fuente: Autores

La figura 14 es una fotografía de el montaje del experimento en donde se puede apreciar en la parte derecha el humedal 2 con lecho de grava, a la izquierda el humedal 1 con lecho de arena, en la parte inferior las salidas de los efluentes y también se puede apreciar que a la izquierda de los humedales esta ubicada la planta de tratamiento de la Universidad, la cual alimenta las unidades con su efluente.

5.2 Especificaciones de las unidades experimentales

Tabla 2: Especificaciones de los humedales.

Especificaciones	Humedal 1	Humedal 2
Medio filtrante	Arena	Grava
Porosidad del medio (n), m	0.31	0.42
Caudal (Q), m ³ /día	0.47	0.52
Pendiente del lecho (%)	1	1

Tabla 3: Criterios para diseño de humedales.

Criterio de diseño	Valor
Tiempo de retención, d	3-5
Carga hidráulica superficial, m ³ /m ² .d	0.05
Carga orgánica, kg DBO/ha.d	30 - 50
Profundidad del agua, m	0.5
Profundidad del medio, m	0.6
Calidad esperada del efluente DBO/N, mg/L	Remoción del 95%

5.3 Muestreo

Los muestreos se tomaron de forma puntual, debido a que estos sistemas son muy estables, y tiene un tiempo de retención hidráulico de aproximadamente 3 días. La muestra se tomaba llenando un envase de capacidad de un galón, y de allí se extraía la muestra para los

ensayos analíticos a realizar. Los muestreos se realizaron con una frecuencia de una vez por semana, generalmente los días martes siempre y cuando no hubieran inconvenientes.

El muestreo se realizó en tres puntos: El efluente de la planta de tratamiento después del recorrido por esta (ver figura 10) y los efluentes de los humedales, los cuales se aprecian en el inferior de la figura 14; durante un periodo de 18 semanas, comenzando el día martes 2 de febrero de 2010 (semana 20 después de sembradas las plantas) y terminando día martes 22 de junio de 2010 (semana 40).

5.4 Parámetros analizados

La ejecución de los análisis de los parámetros a mencionar se realizó en el laboratorio de procesos biológicos perteneciente al laboratorio de Química Ambiental; los cuales se encuentran ubicados en la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira, los datos obtenidos se analizan y se ilustran en la sección 6.

En la tabla 4, se pueden ver los parámetros, las frecuencias y el número de registros tomados durante la parte experimental.

Tabla 4: Parámetros de evaluación

PARÁMETROS	MÉTODO ANALÍTICO	FRECUENCIA	REGISTROS
<i>pH</i>	<i>pH- metro (9045C EPA)</i>	<i>Semanal</i>	<i>18</i>
<i>Temperatura</i>	<i>Termómetro de columna de mercurio</i>	<i>Semanal</i>	<i>18</i>
<i>Caudal</i>	<i>Volumétrico (Aforos)</i>	<i>Diaria</i>	<i>90</i>
<i>Oxígeno disuelto (OD)</i>	<i>Potenciómetro (AWWA-5210)</i>	<i>Semanal</i>	<i>18</i>

<i>DBO₅</i>	<i>Método Winkler</i>	<i>Semanal</i>	<i>18</i>
<i>DQO</i>	<i>Reflujo cerrado, titulación</i>	<i>Semanal</i>	<i>18</i>
<i>Nitrógeno (NO₂ NO₃ y NH₃)</i>	<i>Espectrofotómetro con patrones diferenciados</i>	<i>Semanal</i>	<i>18</i>
<i>Coliformes Totales y E. Coli</i>	<i>NMP/100 ml. (EPA 9215)</i>	<i>Quincenal</i>	<i>9</i>
<i>Potencial Redox</i>	<i>Electrodo</i>	<i>Semanal</i>	<i>18</i>

5.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico que se empleó para llevar a cabo la evaluación de estos dos sistemas fue un análisis estadístico básico, en donde se trabajaron los datos comparando los promedios de las cargas y sus desviaciones estándar, sus valores máximos y mínimos para cada uno de los parámetros.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES

Para el estudio de sistemas de tratamiento de aguas residuales es muy importante conocer las condiciones de operación de estos, ya que estas definen que cambios o transformaciones pueden presentarse; a continuación se da a conocer las condiciones en que se presentaron durante el experimento.

6.1.1 Tiempos de retención hidráulicos y comportamiento del caudal

Adicional a las mediciones de caudal que diariamente se realizaban para el control operativo, en el transcurso de la evaluación experimental de los humedales, se realizaron dos jornadas de aforo de caudal, cada una de 10 horas; esto con el fin de determinar la evapotranspiración y verificar la estabilidad del caudal de los humedales con respecto al tiempo durante uno o dos días; los datos obtenidos se pueden apreciar en el anexo 2. Además de los aforos mencionados, también se trabajo con datos de caudal que se tomaban regularmente, con un frecuencia aproximada de 2 veces por semana, teniendo en cuenta todos los datos se determino unos tiempos de retención hidráulicos de 4,19 días para el humedal 1 (con lecho de arena) y 3,86 para el humedal 2 (con lecho de grava).

Los caudales mantuvieron un comportamiento controlado, ya que se les hacia limpieza a las llaves y se acomodaban aproximadamente a un flujo de 330 L/día dos veces por semana, aunque algunas veces se presentaron inconvenientes debido a que la planta de tratamiento pasaba varios días cerrada, y se iban acumulando sólidos en las llaves reduciéndose el caudal, pero en general se puede decir que no tuvo variaciones demasiado grandes. Los datos de los caudales se encuentran registrados en el anexo 2.

6.1.2 Temperatura

En la tabla 5 se puede observar los valores promedios para la entrada y las salidas de cada humedal en promedios con sus valores máximos y mínimos, la cual se puede decir que la temperatura no mostro ningún cambio apreciable en los sistemas.

Estos valores de temperatura son ideales para que ocurran procesos biológicos tanto aerobios como anaerobios, por lo tanto no es una razón para determinar el tipo de transformaciones ocurridas, pero permite decir que se pueden dar diferentes tipos de procesos.

Tabla 5: Temperaturas promedios en los humedales.

Temperatura	Entradas (°C)	Salida H. 1 (°C)	Salida H. 2 (°C)
Promedio	22,9	22,6	22,8
Max	25,4	24,9	24,3
Min	21,5	21,5	21,1

La figura 15 ilustra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo para el agua en la entrada y las salidas de los humedales, en la cual se aprecia que los valores variaron poco, además hace denotar que mantuvieron un comportamiento similar entre cada uno de los puntos de muestreo, es decir, cuando hubo aumento o decaídas fue para todos los puntos igual.

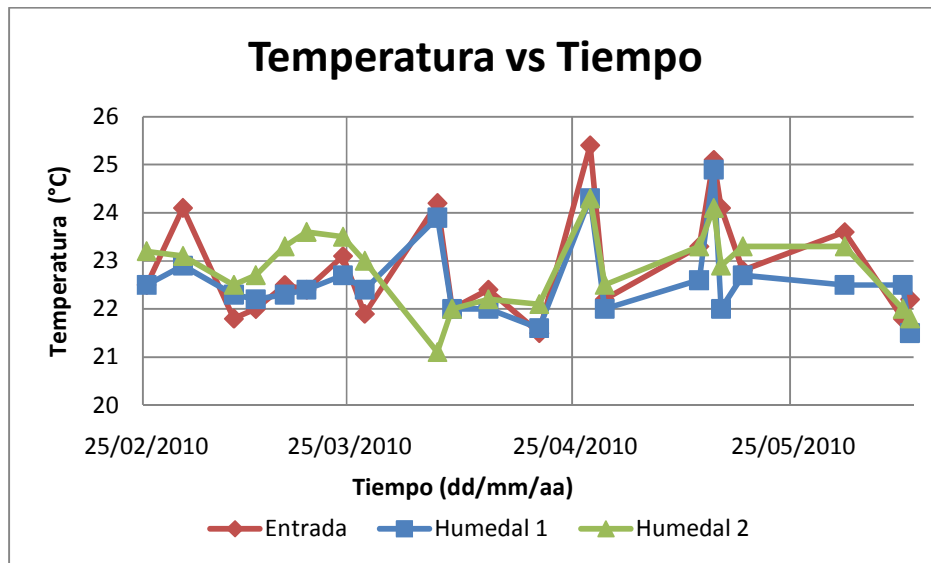


Figura 15: Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo.

6.1.3 pH

La tabla 6 muestra los valores promedios de pH para el agua residual utilizada y de los humedales con sus máximos y mínimos del total de los valores obtenidos en el transcurso de la evaluación del sistema; en esta se destaca que el valor del pH del agua que entra es más ácido que en los humedales. En el humedal 2 (lecho de grava) el pH alcanza un valor más neutro que en el humedal 1 (lecho de arena), aunque no se presenta una diferencia muy destacable entre estos.

Tabla 6: Promedios de pH.

pH	Entrada	Salida H. 1	Salida H. 2
Promedio	6,24	7,10	6,42
Max	6,97	7,27	6,64
Min	5,13	6,81	6,11

El pH es un factor muy importante en los procesos de transformación química y biológica (Romero, 2002), por lo tanto, es muy importante su seguimiento, lo cual se puede observar en la figura 16 que muestra su comportamiento con respecto al tiempo, en esta se aprecia que aunque los valores de la entradas son muy variables, los valores de las salidas de ambos humedales siempre se mantuvieron muy constantes y por lo tanto se puede decir que estos sistemas tienen un comportamiento amortiguador de pH; además también muestra que los valores en el humedal con lecho de grava se mantuvieron más altos que en el humedal con lecho de arena, por lo tanto tiene unas características amortiguadoras de pH más idóneas al devolver el agua muy neutra.

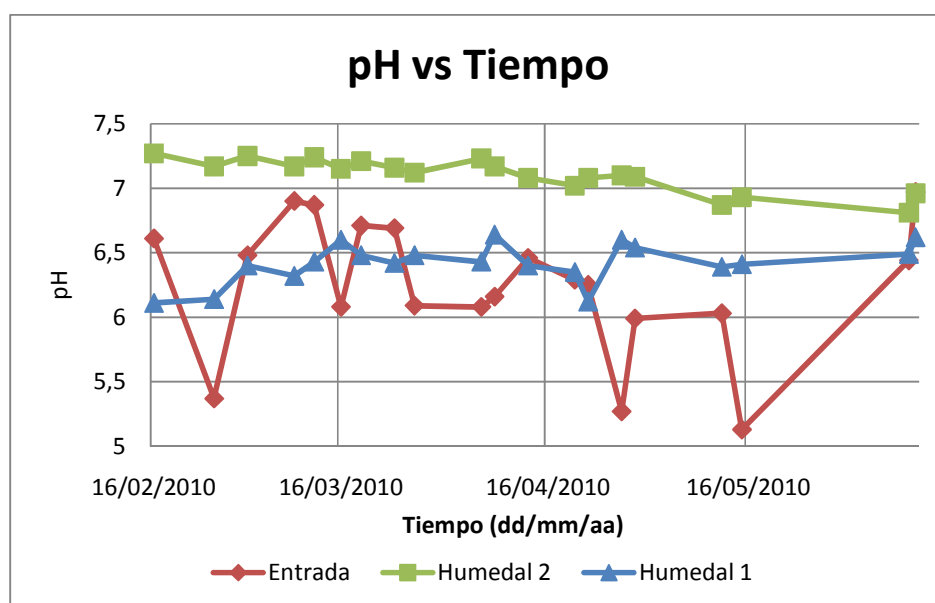


Figura 16: Comportamiento del pH con respecto al tiempo.

6.1.4 Potencial redox

Los potenciales redox son importantes debido a que controlan los procesos químicos naturales e indican los cambios en las propiedades del agua debido a los procesos biológicos aerobios o anaerobios (Parámetros físico-químicos, 2010).

Para tener conocimiento de la naturaleza del humedal con base en el potencial redox se deben interpretar los resultados en la escala que maneja el electrodo estándar de hidrogeno, por lo tanto a los resultados obtenidos por electrodo se deben pasar a esta escala según sea el tipo y la concentración.

El electrodo utilizado para medir el potencial redox en la evaluación fue un electrodo Sintex ORP de una concentración de 3 mol/L KCl, según la tabla 7 se calculo el potencial interpolando con base en las concentraciones para obtener los resultados en la escala del electrodo estándar de hidrogeno. El valor obtenido para llegar a la escala fue de +212 mV.

Tabla 7: Electrodo estándar de hidrógeno. Fuente: Garrels y Christ 1990.

Electrodo de Referencia	Potencial con respecto al electrodo SHE (mV)
Electrodo estándar de Hidrógeno (SHE)	0
Electrodo de Calomel saturado (SCE)	+ 245
Ag/AgCl, 1 M KCl	+ 236
Ag/AgCl, 4 M KCl	+ 200
Ag/AgCl, sat. KCl	+199

La figura 17 muestra el comportamiento del potencial redox con respecto al tiempo, donde se aprecia que se presento un comportamiento variable muy similar para los dos sistemas; además también se ven varios valores ligeramente por debajo de 400 mV, lo cual indica que es probable la ocurrencia de algunos metabolismos microbianos facultativos y procesos de reducción moderada de NO_3^- a N_2 mediante el proceso de denitrificación, la reacción de este proceso se puede ver en la sección 2.7; aunque según la figura 18 en general se presenta mayor tendencia a que sucedan procesos aerobios y de oxidación, ya que como se ve los promedios están por encima de 400 mV, lo que favorece este tipo de mecanismos (Parámetros físico-químicos, 2010).

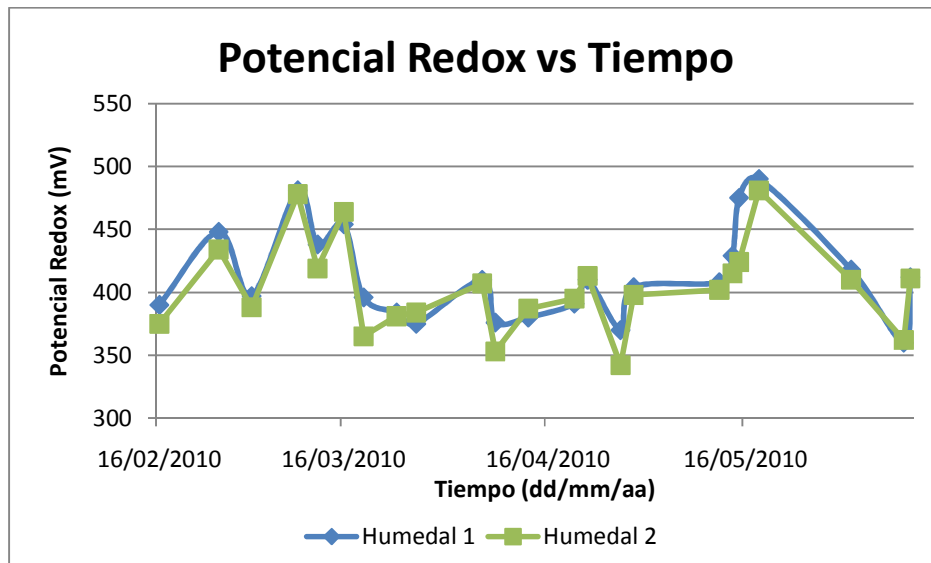


Figura 17: Comportamiento del Potencial redox con respecto al tiempo.

En la figura 18, se ilustran los valores promedios del potencial redox en los dos sistemas de humedales, estos se encuentran en el rango de entre 400 y 500 mV. Según la tabla 8, se puede apreciar que ambos sistemas son aptos para que ocurran en ellos procesos aerobios y procesos de oxidación.

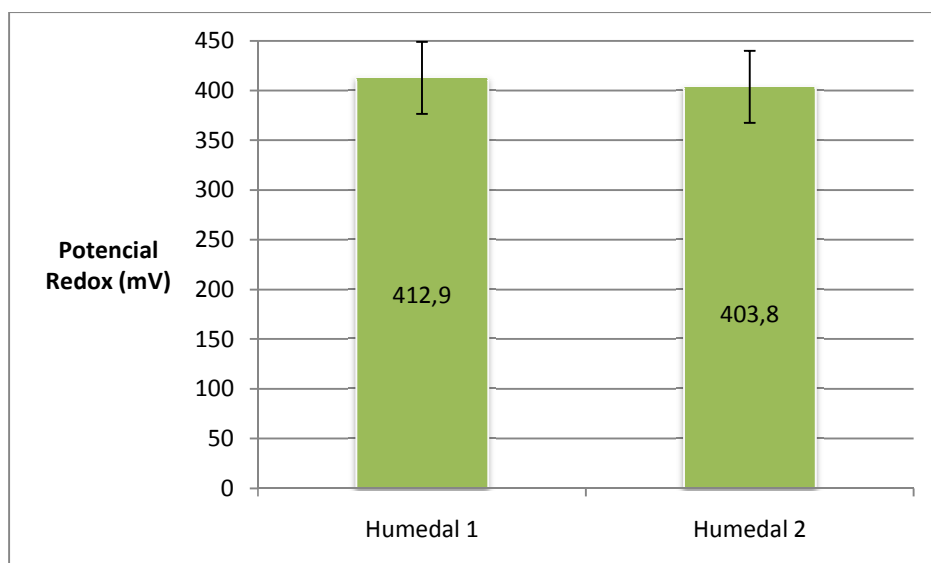


Figura 18: Promedio del Potencial redox en los humedales.

Tabla 8: Características de humedales según el Potencial redox.

Anaeróbico					Aeróbico			Condición del sedimento		
Reducción favorable	Reducción		Reducción moderada		Oxidación			Condición redox		
CO ₂	SO ₄ ²⁻	Fe ³⁺	Mn ⁴⁺	NO ₃ ⁻	O ₂			Aceptación de electrones		
Anaerobio		Facultativo			Aerobio			Metabolismo microbioal		
-300	-200	-100	0	+100	+200	+300	+400	+500	+600	+700

6.1.5 Oxígeno disuelto

En la figura 19 se ilustra el comportamiento del oxígeno disuelto con respecto al tiempo en donde se ve que se presenta un comportamiento variable con tendencia positiva muy similar para ambos humedales, y también se nota que se mantuvo una cantidad de OD mayor a 2

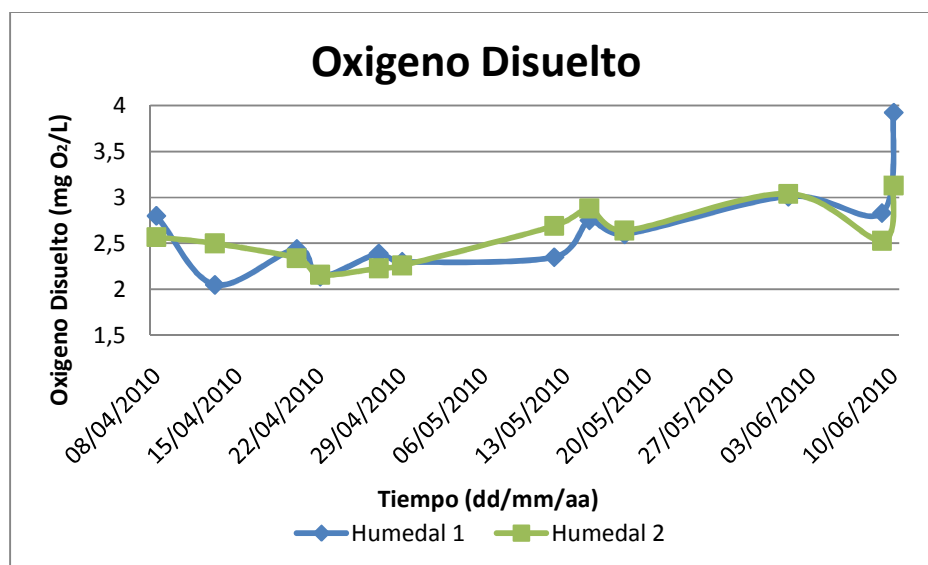


Figura 19: Comportamiento de OD con respecto al tiempo.

mg/L, lo cual permite decir que en ambos sistemas el agua que sale es apta para que se presenten procesos aerobios microbianos (Romero 2004).

La figura 20 ilustra los promedios de los valores para oxígeno disuelto en ambos humedales, los cuales no presentan estadísticas como se aprecia en esta. Además se puede decir que estos sistemas según estos datos están dispuestos para procesos aerobios, en donde se pueden encontrar el oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica (Parámetros físico-químicos, 2010).

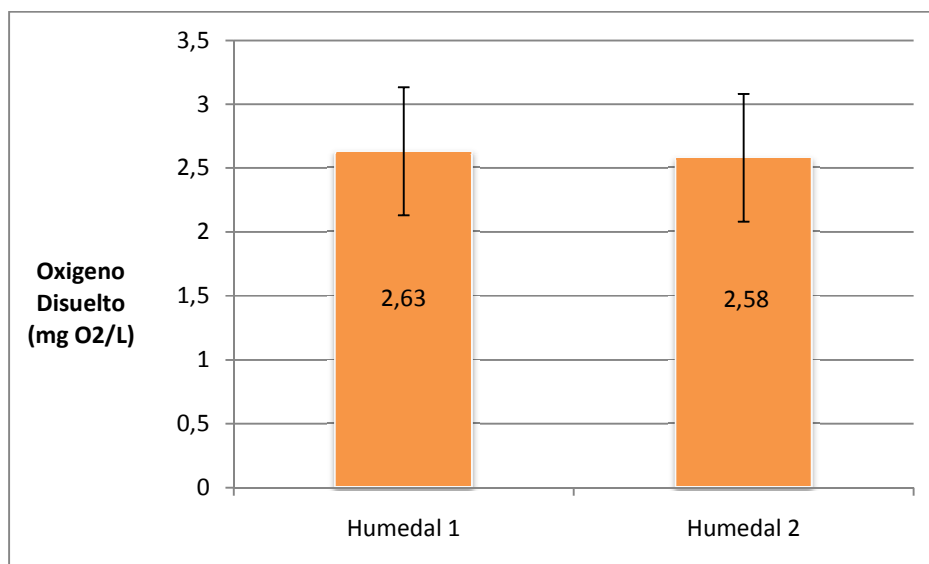


Figura 20: Promedios del oxígeno disuelto en los humedales.

6.2 MATERIA ORGÁNICA

6.2.1 Comportamiento de la materia orgánica

En la figura 21 se puede observar el comportamiento de la DQO con respecto al tiempo para ambos humedales, la cual permiten notar que es un comportamiento variable, con unos resultados muy óptimos, ya que en todo los puntos se aprecia una clara diferencia entre la

concentración de entrada y las salidas, fue más estable para las salidas que en la entrada debido a que estos sistemas con sus tiempos de retención, hacen que sean muy estables en cuanto a sus efluentes, en todos los puntos se presenta remoción de materia orgánica, aunque para el humedal 1 es más notoria esta diferencia entre la entrada y la salida, lo que indica una mayor eficiencia de este último sistema.

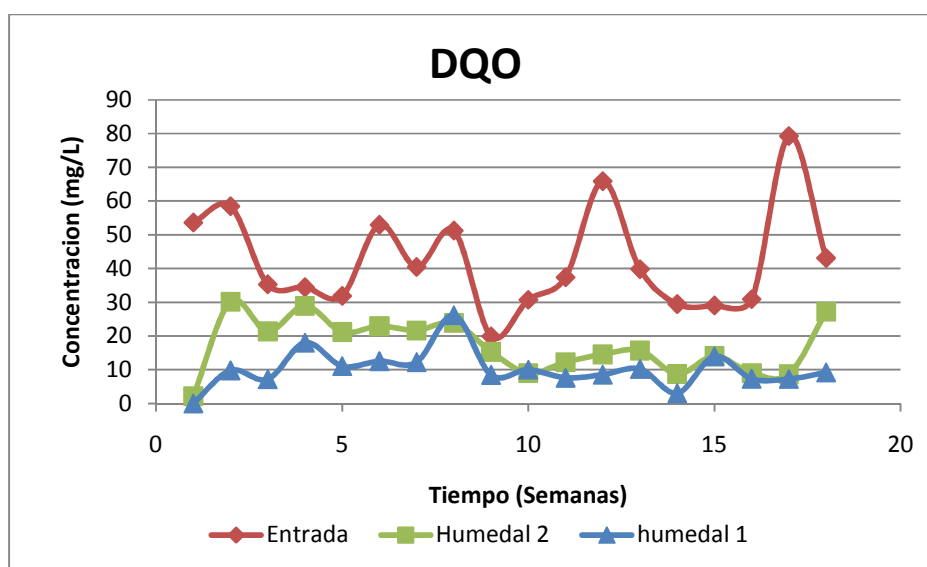


Figura 21: Comportamiento de la DQO con respecto al tiempo en concentración.

En la figura 22 se aprecia el comportamiento de DBO_5 con respecto al tiempo, de esta se puede inferir en que en el humedal 1 presenta un comportamiento más idóneo debido a que el efluente en este presenta concentraciones más bajas, y más constantes, mientras que el humedal 2 presenta solo estabilidad después de la octava semana, aunque el último punto muestra nuevamente inestabilidad, algo así como cierta tendencia a un aumento de la concentración. En general ambos presentan un comportamiento evidente de remoción, a pesar que de en la semana 4 y 5 para el humedal 2 (lecho de grava) se presenta un aporte, lo cual es un comportamiento muy extraño para este parámetro, esto pudo deberse a la variabilidad de las concentraciones del agua residual por la presencia o ausencia de la comunidad en el campus.

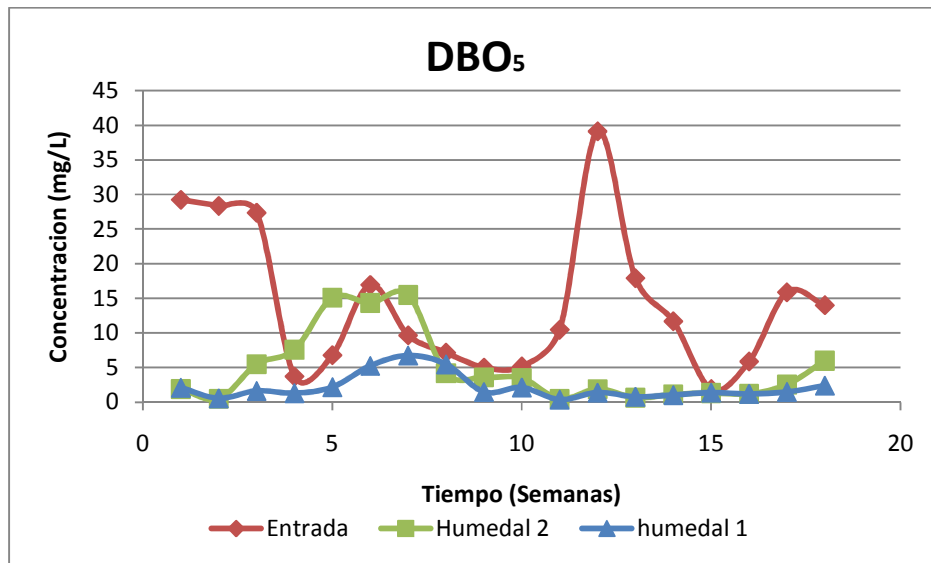


Figura 22: Comportamiento de la DBO con respecto al tiempo en concentración.

En las figura 23 y 24 se ilustra los promedios para la DBO₅ y la DQO en carga másica para cada humedal, en estas se puede apreciar que presentan remociones apreciables, además también se puede destacar que los valores de remoción son un poco cercanos entre cada humedal, aunque el humedal 1 (con lecho de arena) presenta mejores rendimientos para los dos parámetros, ya que la DBO₅ presenta una salida de carga másica cerna de 0,26 g/día, mientras que en el humedal 2 (con lecho de grava) es de 0,95 g/día; y para la DQO también se presentan grandes diferencia en las salidas, las cuales son de 3,71 g/día para el humedal 2 y de 1,52 g/día para el humedal 1, por lo tanto se puede ver que aporta mejores resultados al presentarse salidas de agua con menor concentración de materia orgánica.

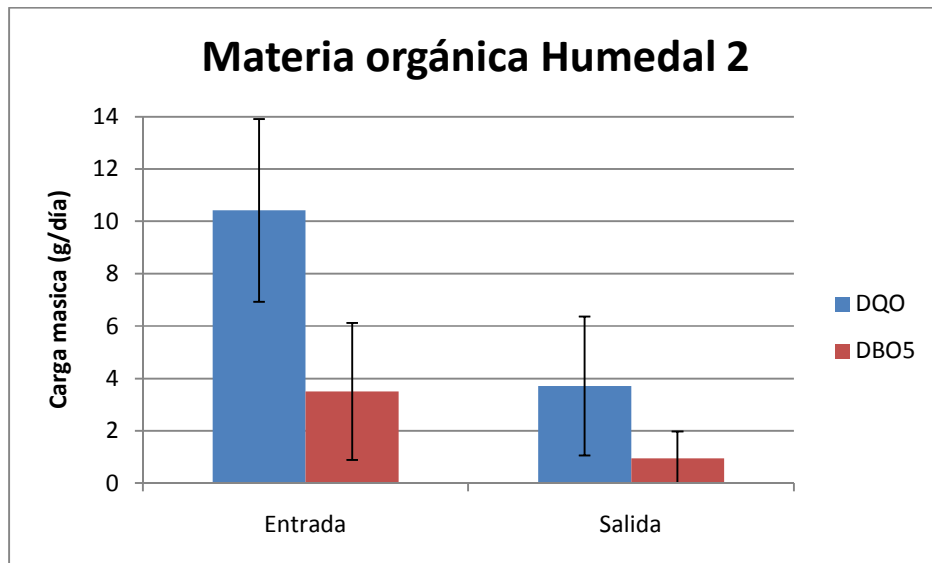


Figura 23: Promedios de la materia orgánica para el humedal 2 (con lecho de grava).

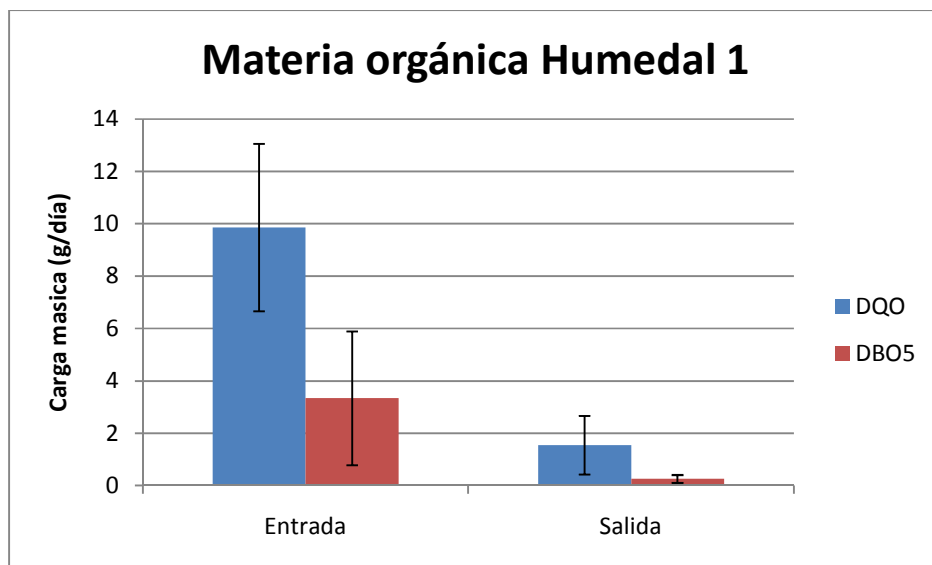


Figura 24: Promedios de la materia orgánica para el humedal 1 (con lecho de arena).

6.2.2 Eficiencias de remoción de DQO

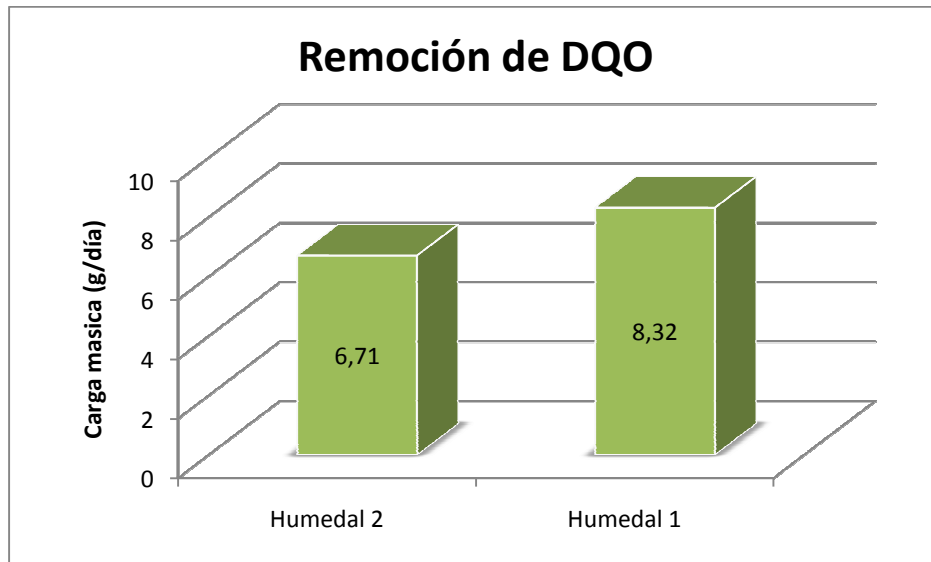


Figura 25: Promedios de remoción de DQO para los humedales.

El figura 25 permite apreciar más claramente la diferencia de remoción de DQO para los humedales, el humedal 2 remueve un promedio de 6,71 g/día y el humedal 1 presenta 8,32, por lo tanto este último remueve más cantidad de materia orgánica.

En la figura 26 se puede apreciar los porcentajes de remoción en los humedales, los cuales son de 64,35 % y de 84,31 %, que son unas eficiencias muy aceptables para estos sistemas sabiéndose que funcionan como tratamientos terciarios, ya que para tratamientos primarios el decreto 1594 de 1984 dice que las remociones de DQO deben de ser superiores al 80 % para ser depuradas, por lo tanto este sistema presenta buenos rendimientos principalmente el humedal con lecho de arena que con una eficiencia en carga por encima de este requisito.

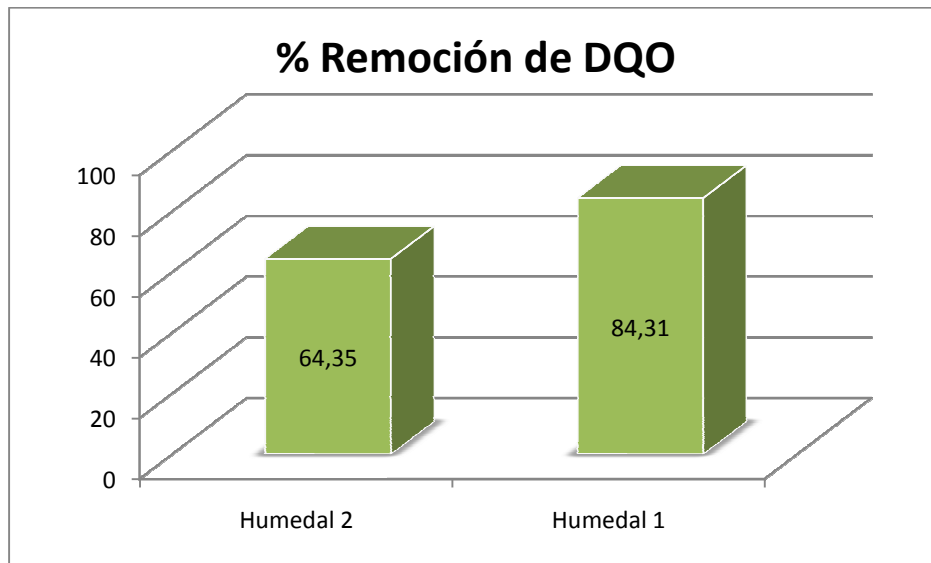


Figura 26: Promedios de % de remoción de DQO para los humedales.

El humedal 2 presenta una remoción de $1,43 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$, y el humedal 1 una remoción de $1,77 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$, estos resultados indican que el humedal 1 (con lecho de arena) remueve más carga másica superficial, aunque no se presenta mucha diferencia entre los dos humedales.

6.2.3 Eficiencias de remoción de DBO₅

En la figura 27 se ilustra la remoción de DBO₅ para los dos humedales, en la cual se observa que presentan una remoción muy similar, destacándose más la que ocurren en el humedal 1 con una remoción de $3,08 \text{ g/día}$ y para el humedal 2 una remoción de $2,56 \text{ g/día}$, las remociones de estos para carga másica superficial, son $0,77 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ y $0,64 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ respectivamente.

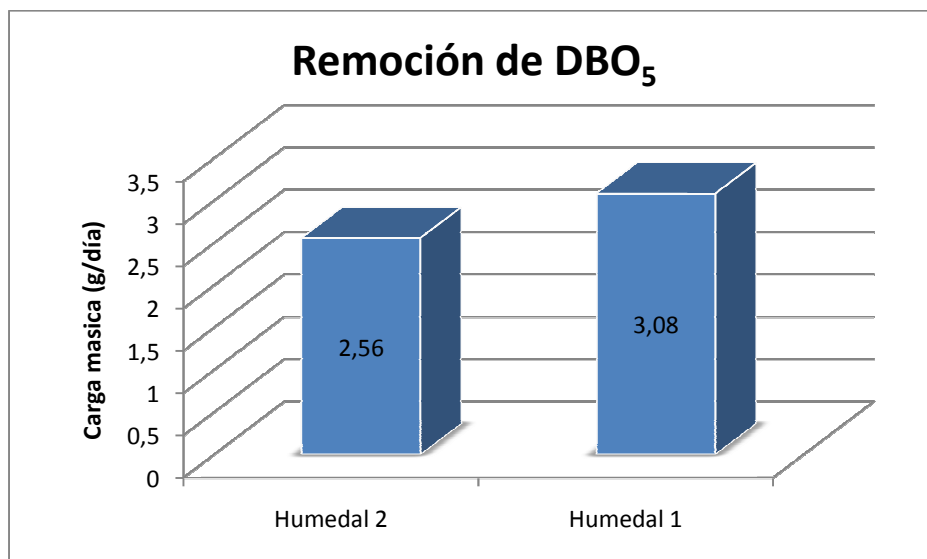


Figura 27: Promedios de remoción de DBO para los humedales.

En la figura 28 se ilustran los porcentajes de remoción para la DBO₅ en ambos humedales, en la que se destaca el valor de 92,2 % para el humedal 1, el cual es muy alto demostrando que es más eficiente este sistema, y un valor de 72,9 % para el humedal 2. Estos son valores de remoción son muy positivos, ya que comparándolos con el decreto 1594 de 1984 que pide una remoción mayor del 80 % para depuraciones de aguas residuales se puede ver que a pesar de ser un tratamiento terciario el humedal 1 (con lecho de arena) cumple con este requisito aunque esta norma aplique solo para el tratamiento completo del agua residual, por lo tanto se obtiene un aguas con unos contenidos muy bajos permitiéndose una reutilización de esta según sus parámetros.

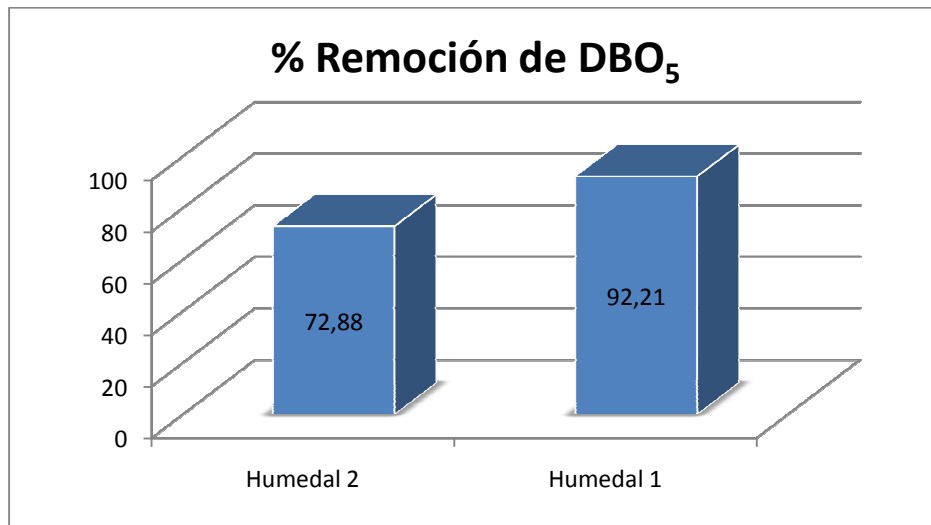


Figura 28: Promedios de % de remoción de DBO para los humedales.

6.3 NITRÓGENO TOTAL

6.3.1 Comportamiento de Nitrógeno amoniacal

En el figura 29 se ilustra el comportamiento del nitrógeno amoniacal con respecto al tiempo, en este se puede apreciar que para ambos humedales se presenta una remoción de nitrógeno amoniacal, aunque para el humedal 1 se mantuvo un comportamiento más óptimo con unas mejores remociones. En general se observa un comportamiento adecuado, aunque en la novena semana se presenta una remoción negativa posiblemente debido a que en estos días fue semana santa, por lo que se disminuyó la cantidad de la población universitaria, bajando los contenidos de contaminantes en el aguas residual, y manteniéndose constantes los contenidos de los efluentes en ambos humedales por su tiempo de retención.

Para el humedal 2 se aprecia que en la cuarta semana también se presenta un fenómeno de remoción negativa, probablemente debido a cambios en el ciclo del nitrógeno por una reducción de nitritos o nitratos.

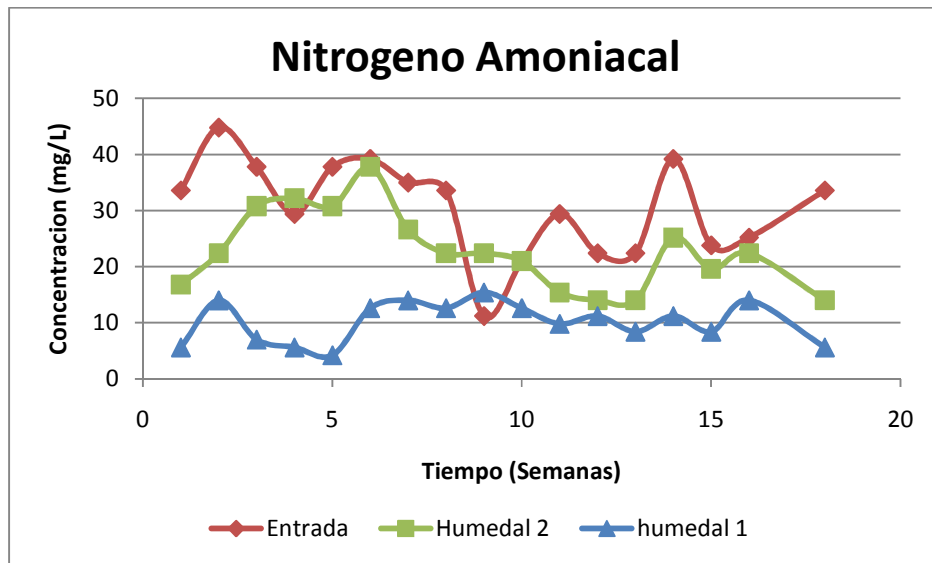


Figura 29: Comportamiento del nitrógeno amoniacal con respecto al tiempo en concentración.

6.3.2 Comportamiento de Nitratos

En el figura 30 se ilustra la concentración de nitratos con respecto al tiempo, donde se puede apreciar que hay algunos valores donde se presenta una remoción negativa, posiblemente a transformaciones de las formas del nitrógeno como es la oxidación de nitrógeno amoniacal, además de que en estos sistemas es posible los procesos aerobios, como se determino en el análisis del potencial redox y también por la disponibilidad de oxígeno disuelto que se dio a conocer en ambos humedales.

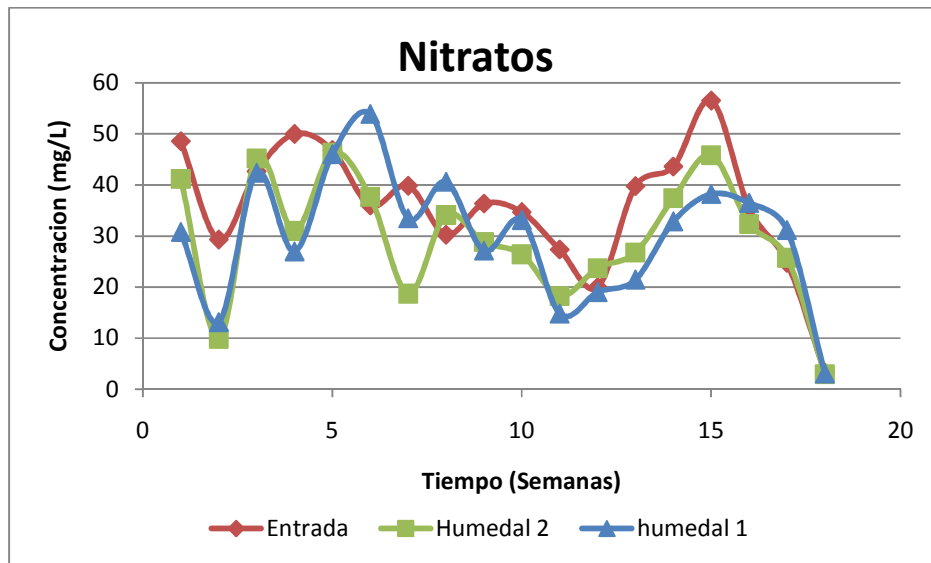


Figura 30: Comportamiento de los nitratos con respecto al tiempo en concentración.

6.3.3 Comportamiento de Nitritos

En la figura 31 se puede observar el comportamiento de los nitritos en concentración con respecto al tiempo en los dos humedales, de allí se puede apreciar que estos presentan un contenido muy bajo, las salidas de los humedales, llegan a casi ser casi igual a cero, lo cual quiere decir que mantiene un nivel de nitritos muy bajo, tanto que esta por debajo de los límites permisibles en agua potable, el cual es de 1mg/L, aunque esto también puede ser debido a que los nitritos son muy inestables en aguas residuales, y más aun en estos sistemas que son aerobios en donde se oxidan fácilmente a nitratos.

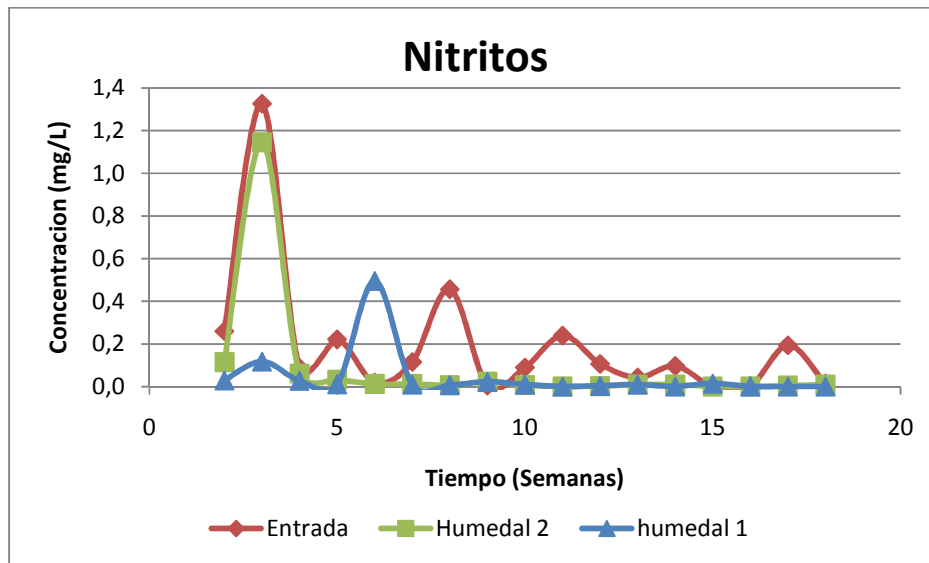


Figura 31: Comportamiento de los nitritos con respecto al tiempo en concentración.

6.3.4 Eficiencias de remoción de Nitrógeno total

En la figura 32, se ilustran las remociones para cada forma del nitrógeno en ambos humedales, seguido de la figura 33 que muestra los porcentajes de remoción para cada uno, en los cuales se puede ver que el humedal 1 (con lecho de arena) presenta porcentajes de remoción muy altos, el mayor es para nitritos, aunque la mayor remoción que se presenta es 5,7 g/día para nitrógeno amoniacal en este mismo humedal, la cual es la más alta en contenido de carga, por lo que es la remoción más significativa al remover más cantidad de materia por día; y la más baja es de 0,03 g/día para nitritos en el humedal 2, por lo tanto no sobra aclarar que aunque los nitritos en el humedal presentan el porcentaje de remoción muy alto, no representa una remoción importante en este sistema, esto es debido a que es muy bajo la cantidad de nitritos, estos se pueden estar transformando en nitratos por el proceso de nitrificación. También en el figura 32 se destaca que en el humedal 1 se presenta mayor remoción de nitrógeno en todos sus diferentes estados.

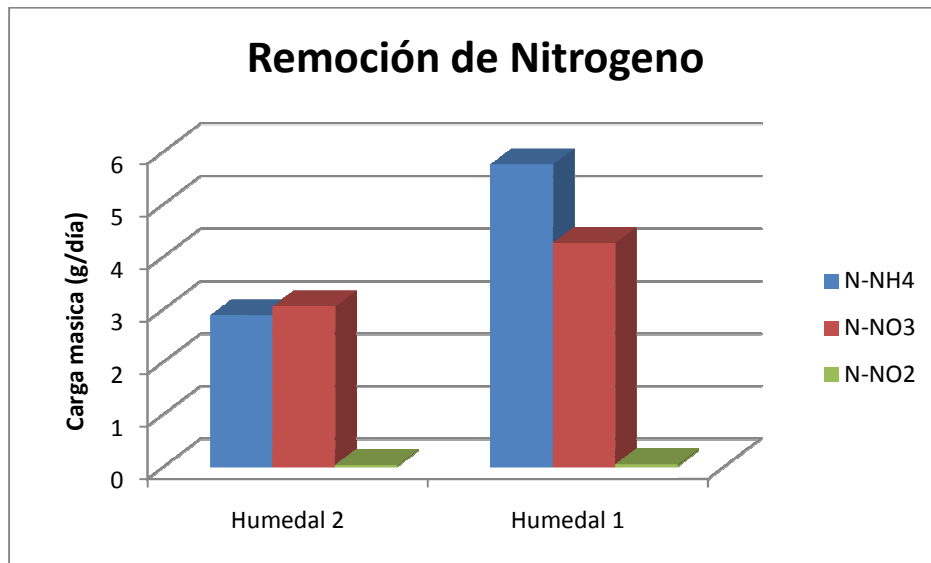


Figura 32: Promedios de remoción de Nitrógeno para los humedales.

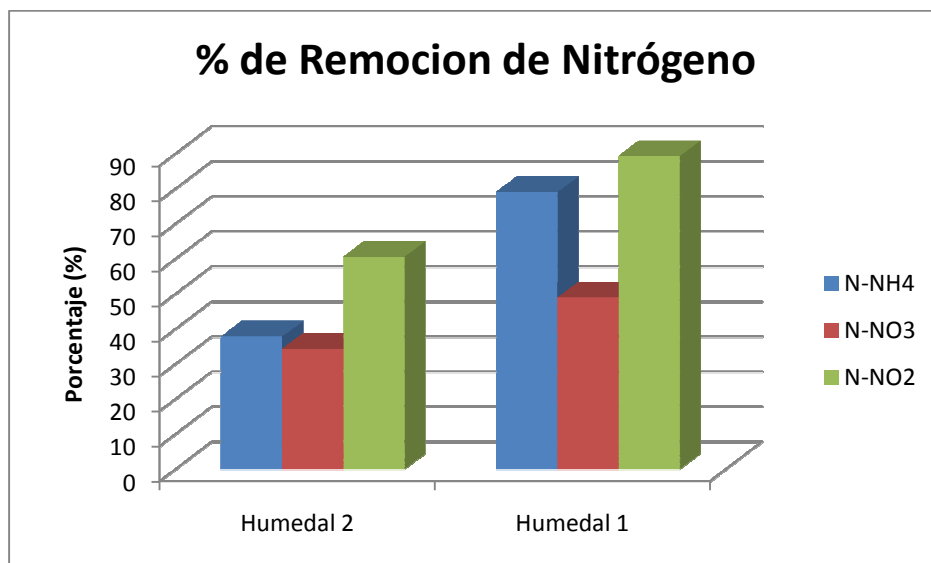


Figura 33: Promedios de % de remoción de Nitrógeno para los humedales.

En las figuras 34 y 35 se pueden ver los valores promedios de nitrógeno en carga másica con que entra y sale el agua residual en los dos sistemas de humedales artificiales y con sus desviaciones estándar respectivas, en estas se puede apreciar claramente que los valores de salida son más pequeños que los valores de las entradas, lo cual permite ver que estos

sistemas están funcionando removiendo una parte de nitrógeno total y en sus diferentes formas como se ilustra en los mismos.

En el humedal 2 se presenta una remoción de carga másica superficial de $1,27 \text{ g/m}^2 \cdot \text{día}$ en cuanto a nitrógeno total y en el humedal 1 (lecho de arena) $2,14 \text{ g/m}^2 \cdot \text{día}$, por lo tanto se puede inferir que este último es más eficiente en cuanto a remoción de nitrógeno total, que se asume como la suma de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos.

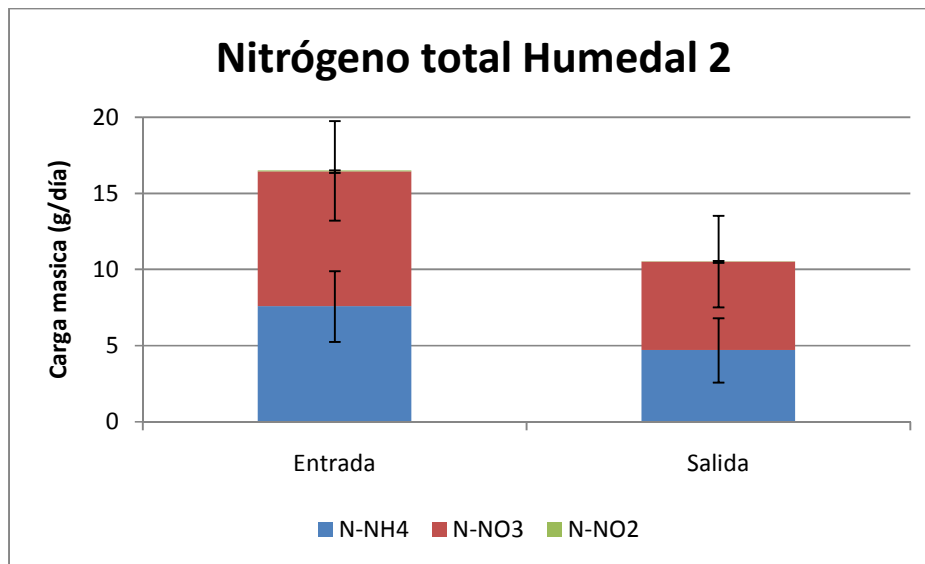


Figura 34: Promedios de Nitrógeno total para el humedal 2 (grava).

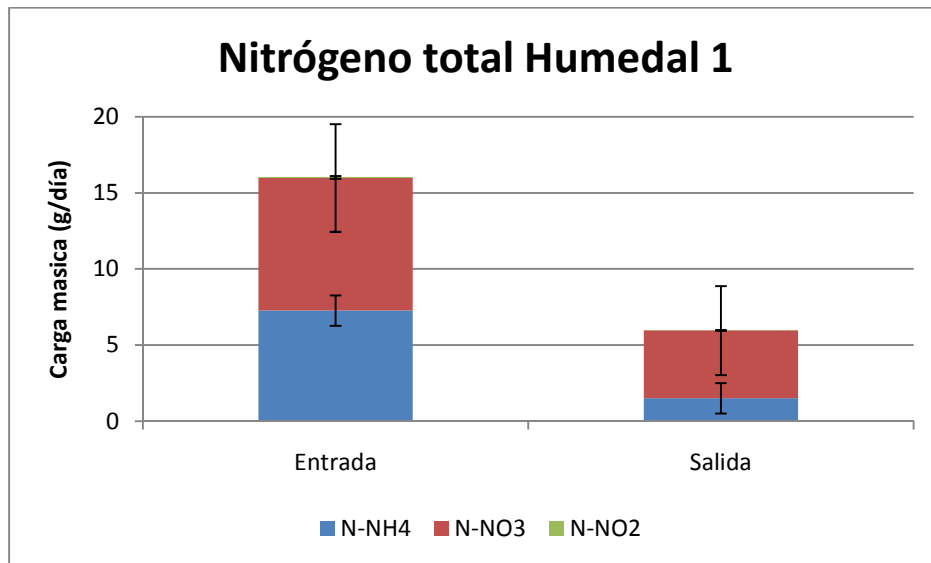


Figura 35: Promedios de Nitrógeno total para el humedal 1 (arena).

En el figura 36 se ilustra la remoción de nitrógeno en los dos humedales, en los cuales se puede apreciar de una forma grafica la diferencia para remoción de nitrógeno total entre ambos sistemas. Aquí se ve que el humedal 1 (con lecho de Arena) remueve una carga de 10,06 g/día, a diferencia del humedal 2 una carga de 5,95 g/día.

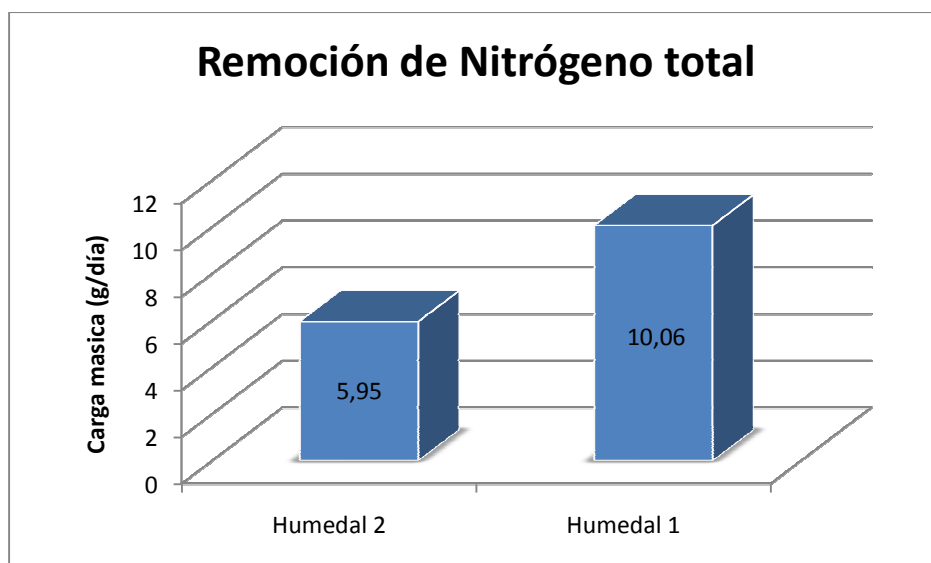


Figura 36: Promedios de remoción de Nitrógeno total para los humedales.

El figura 37 se muestran los porcentajes de remoción en cuanto a nitrógeno total, los cuales son para los humedales 1 y 2 de 62,60 y 36,45 % respectivamente, es importante comentar que estos humedales debido a que funcionan como sistemas de tratamiento terciario, no van a remover tanto porcentaje como un tratamiento primario, aunque el humedal 1 esta removiendo un porcentaje muy grande de la cantidad que entra.

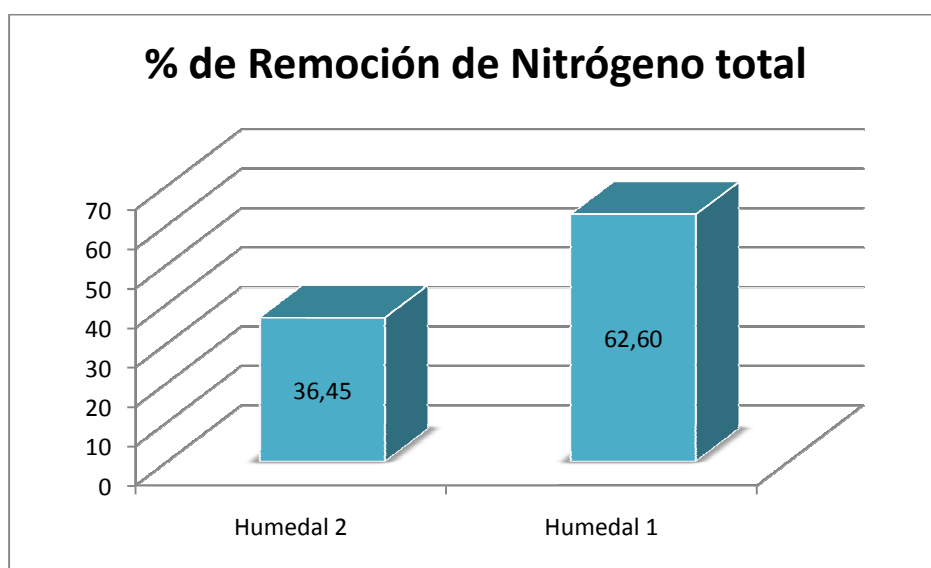


Figura 37: Promedios % de remoción de Nitrógeno total para los humedales.

Las graficas anteriores referentes al nitrógeno total y sus diferentes formas permiten concluir que el humedal 1 (con lecho de arena) es más eficiente en cuanto a remoción de nitrógeno, ya que presenta mayores remociones de cargas por día, al igual que mayores porcentajes.

6.4 PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS

Inicialmente se tenía planeado realizar muestreos quincenalmente durante el experimento, pero se empezó a partir de la semana 3, y para la semana 11 se presentó un inconveniente con la disponibilidad de los reactivos para esta prueba, y no se pudo seguir realizando, por

lo tanto solo se cuenta con datos de cuatro muestreos de todo el experimento para este parámetro.

En la representación grafica de las pruebas microbiológicas se tomaron los valores mas altos obtenidos durante cada análisis de varias diluciones que se prepararon para la filtración por membrana, los datos completos de estos se encuentran en el anexo 3.

Como se observa en la figura 38 en todas las semanas se presento remoción de coliformes totales en ambos humedales, aunque las mejores eficiencias se presentaron en el humedal 1, debido a los pocos datos obtenidos se no se puede ver si la cantidad de remoción tiene alguna tendencia.

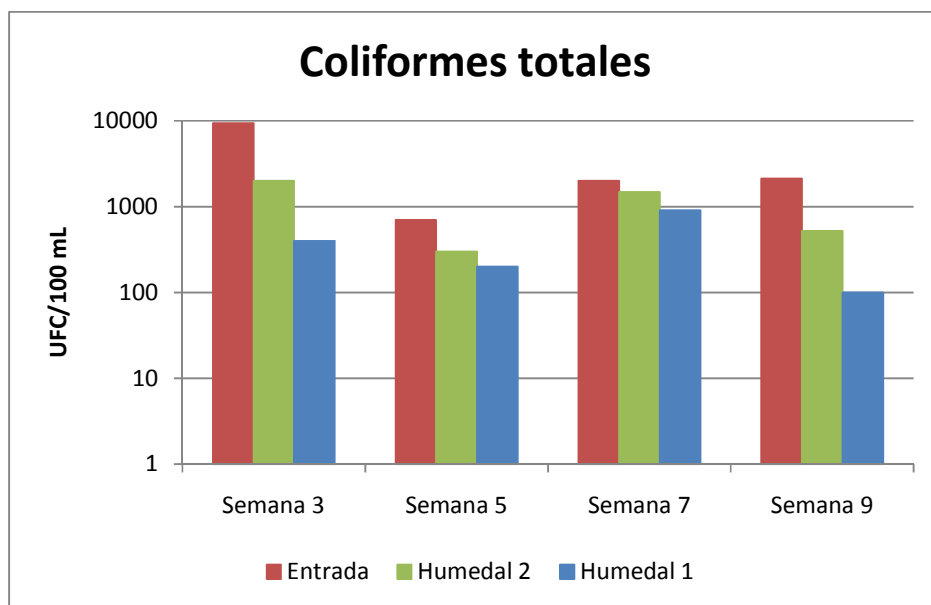


Figura 38: Coliformes totales con respecto al tiempo.

La figura 39 muestra las unidades formadoras de colonias de *E. coli* por cada 100 mL con respecto al tiempo, en la que se puede apreciar que durante todas las semanas se presento una remoción en los dos humedales, excepto en la semana 9 que se presento una remoción negativa para el humedal 2, en algunas semanas se presentaron remociones del 100 %,

también se puede apreciar que el sistema que presentó mayores remociones fue el humedal 1 (con lecho de arena), por lo tanto se puede inferir que este es más eficiente en cuanto a la remoción de microorganismos patógenos.

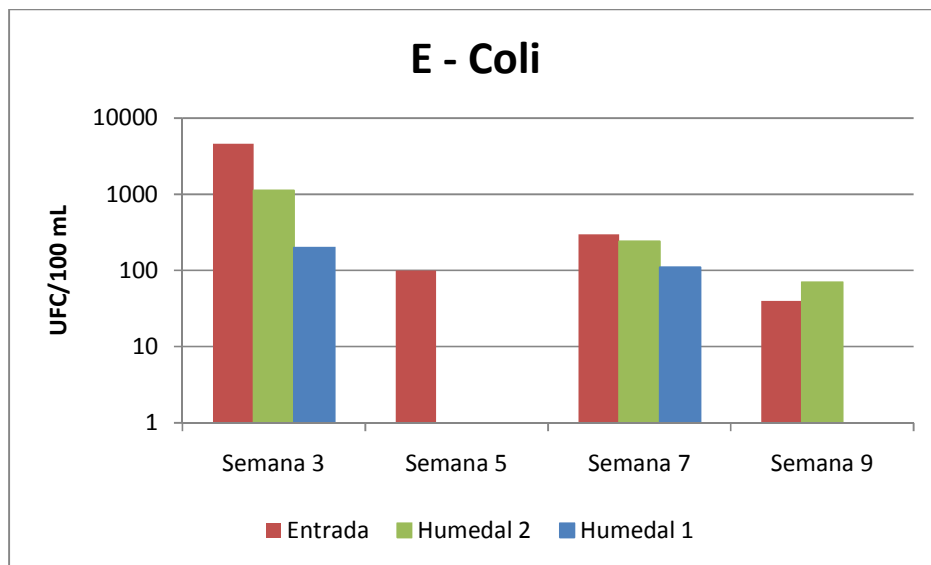


Figura 39: E. coli con respecto al tiempo.

6.5 TASAS DE REMOCIÓN

Tabla 8: Tasas de Remoción

Parámetro	Tasas de remoción (g/m ² .día)	
	H. Grava	H. Arena
DQO	1,43	1,77
DBO	0,54	0,66
N total	1,27	2,14

Según Kadlec y Wallace (2008), una tasa de remoción de DBO_5 , para aguas residuales con una concentración de entre 3 y 30 mg/L y un percentil que para este caso es de 0,9 en el humedal 1 según su % de remoción, debe de ser de $1,45 \text{ g/m}^2\text{d}$, este valor en comparación con el que se obtuvo de $0,66 \text{ g/m}^2\text{d}$, el cual es muy bajo, por lo que se puede inferir en que este humedal es lo remueve la cantidad ideal utilizando esta especie; aunque estos resultados se relacionan mas a humedales de flujo superficial con plantas emergentes. Para el humedal 1 que presenta un percentil de 0,7 debe de manejar una tasa de remoción de $0,93 \text{ g/m}^2\text{d}$ para DBO_5 que comparándola con la que se obtuvo de $0,54 \text{ g/m}^2\text{d}$ es de bajo rendimiento.

Es importante notar que estos datos teóricos que se consultaron son originados de humedales de flujosuperficial con plantas emergentes, además de que las unidades del experimento trabajaron con concentraciones muy bajas de efluente de DBO_5 .

Para nitrógeno total Kadlec y Wallace (2008) reportan que los valores ideales de las tasas de remoción para un percentil de 0,6 el cual presento el humedal con lecho de arena debe de ser de $0,82 \text{ g/m}^2\text{d}$, el cual comparándolo con el experimental obtenido que es de 2,14; se puede decir que es un humedal muy eficiente en cuanto a remoción de este parámetro. Al igual que se presenta para el humedal 2 que con un percentil de 0,4 debe de remover una tasa de $0,36 \text{ g/m}^2\text{d}$, y el cual esta removiendo una tasa de $1,27 \text{ g/m}^2\text{d}$, que se ve que es mas alta que la mencionada por estos autores mencionados.

De lo anterior se puede apreciar que ambos humedales utilizando la especie *Guadua angustifolia* Kunth en comparación con los estudios en humedales de flujo superficial y datos aportados por Kadlec y Wallace que no remueven las tasas ideales de DBO_5 , pero que son muy idóneos en cuanto a remoción de nitrógeno total.

6.6 Efectos de la *Guadua angustifolia* Kunth en los sistemas evaluados

Así como se observa en la figura 40 las plantas crecieron más en el humedal 1 (al lado derecho en la imagen), esto es debido a que en este sistema los tiempos de retención del agua fueron mayores, además por su porosidad que es menor y se le facilita para que haya una mayor absorción de nutrientes, por lo tanto este medio de soporte es más beneficioso en cuanto al crecimiento y desarrollo de la *guadua*; de esta manera se puede aprovechar mejor, ya que este es un producto que se le da muchos usos importantes en la actualidad.



Figura 40: Tamaño de las plantas en los dos humedales.

7. CONCLUSIONES

- Se logró evaluar la remoción de contaminantes de tipo orgánico y nitrógeno de las aguas residuales, por medio de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (FSSH), sembrados con *Guadua angustifolia* Kunth en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira.
- Del trabajo realizado se puede concluir que en cuestión de remoción de contaminantes de tipo orgánico, se obtuvieron mejores resultados con el humedal 1 (con lecho de arena), debido a que su porcentaje de remoción de DBO₅ el cual fue de 92.21% y DQO de 84.31%, con respecto al humedal 2 (con lecho de grava) el cual presentó un porcentaje de remoción de DBO₅ de 72.88% y DQO 64.35%.
- Con respecto a la remoción de nitrógeno total en aguas residuales, es posible apreciar que el humedal artificial 1 presentó un porcentaje de remoción de 62.60% con respecto al respecto al humedal 2 con un porcentaje de 32.35%, lo que permitió evaluar y corroborar que el humedal 1 (con lecho de arena) remueve mas cantidad de nitrógeno total que el humedal 2 (con lecho de grava).
- Aunque se realizaron pocos análisis para las pruebas microbiológicas, se puede ver que ambos humedales remueven coliformes fecales y totales, mostrando mejores resultados el humedal 1, sin embargo se hace necesario un estudio más prolongado, que permita determinar con mayor exactitud las tasas de remoción en cuanto a contaminación microbiológica.
- Los humedales artificiales empleados en el estudio experimental con la *Guadua angustifolia* Kunth demostraron ser ideales para ser empleados como tratamiento terciario de aguas residuales, presentándose mejores rendimientos en el humedal 1 (con lecho de arena).
- Los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial mejoran las cualidades organolépticas de las aguas residuales; ya que pese a las características del agua los

efluentes de los sistemas en estudio no tenían ningún olor desagradable o color característico del afluente. Tampoco se desarrollaron olores fuertes en las instalaciones de los sistemas ni proliferación de roedores o zancudos.

- Los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal son una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas e incluso industriales, ya que no tienen mayores requerimientos, ni personal calificado para su mantenimiento, y los costos de operación e implementación son bajos.

8. RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo se hacen las siguientes recomendaciones para que en futuras investigaciones no tengan este tipo de dificultades.

- Para tener una perspectiva del papel que juegan las plantas en la remoción de los parámetros analizados es importante tener un medio de control sin sembrar.
- Si los humedales artificiales van a ser utilizados para la remoción prioritaria de nitrógeno a la hora del diseño se debe tener en cuenta tiempos de retención más amplios.
- Es importante realizar un estudio de trazadores para comprobar los tiempos de retención teóricos del diseño del humedal y así poder realizar los correctivos necesarios que pueden influir en la eficiencia de los sistemas.
- Se recomienda hacer cosechas cuando se observe que el humedal este en un estado de crecimiento avanzado para optimizar la absorción de nutrientes por parte de las plantas.
- A la hora de realizar los análisis de laboratorio es muy importante la preservación adecuada de las muestras así como la correcta aplicación de los métodos de ensayo.
- En un próximo estudio sobre humedales es muy conveniente dedicar un tiempo ideal para asegurar el funcionamiento correcto de los caudales y la hermeticidad de los lechos.

- En humedales de flujo subsuperficial emplear un tubo de pvc, o un sistema que permita la introducción de electrodos, con el fin poder medir diferentes parámetros (como pH, temperatura, oxígeno disuelto, etc.) en el agua que se encuentra en los humedales.
- Continuar el estudio de la evaluación de este tipo de humedales con diferentes concentraciones de materia orgánica y nitrógeno utilizadas como contaminantes.

9. BIBLIOGRAFÍA

ARROYABE, F. Remoción de contaminantes de aguas residuales con humedales artificiales de flujo subsuperficial, Memos de investigación. Santafé de Bogotá, Septiembre 1997. 12 p.

CRITES, R. y TCHOBANOGLIOUS, G. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN PEQUEÑAS POBLACIONES. Derechos reservados. Copyright © 2000, por Mc Graw-Hill Interamericana. S. A. Santa fe de Bogotá, Colombia. 776 p.

GARAY, J., PANIZZO, L., LESMES, L., RAMIREZ, G., SANCHEZ, J. Manual de Técnicas Analíticas de Parámetros Físico-químicos y Contaminantes Marinos. Tercera edición. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Cartagena, 1993. 56 p.

GOPAL, B. 1999. Natural consturcted westland wastewater treatment potential problems. Water science and tecnology. 40 p.

GUERRERO, J. y GARCÍA, J. Manejo de aguas residuales orientado hacia procesos de tratamiento por humedales artificiales. En revista Scientia ET Technica No. 18. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, Abril de 2002. pp. 97-104.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. El medio ambiente en Colombia (documento en línea). Bogotá, Colombia. Agosto, 2001. (Citado el 15 de septiembre, 2009). <http://www.ideam.gov.co/publica/medioamb/cap4.pdf>

KALIPEDIA 2. La contaminación de aguas continentales (documento en línea). (Citado el 9 de noviembre, 2009). http://co.kalipedia.com/fisica-quimica/tema/autodepuracion-natural.html?x=20070418klpcnaecl_174.Kes&ap=0

Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, 1983. 72 p.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, Centro internacional de la agricultura orgánica. Tarea ambiental 31, Maravillas vegetales. El Bambú - Guadua (*Guadua Angustifolia*). 1999. 16 p.

MORALES PEÑA, Jackeline. Adaptación y evaluación de las plantas típicas de la zona cafetera como tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Pereira, 2003, 127 p. Trabajo de grado (Tecnólogo en química). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Tecnología Química.

MUÑOZ OROZCO, Catalina. RINCÓN RAMÍREZ, Vilma. Remoción de metales pesados (cromo y zinc) en las aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) sembrados con guadua. Pereira, 2004, 66 p. Trabajo de grado (Tecnólogo en química). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Tecnología Química.

ROBERT H. KADLEC y SCOTT D. WALLACE. TREATMENT WETLANDS. CRC Press Taylor & Francis Group SECOND EDITION. 2009. 1048 p.

RODIER, J. Análisis de Aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Omega, Barcelona, 1981. 45 p.

ROMERO, J. Calidad del agua. Bogotá. Editorial Escuela Colombiana de ingeniería. Primera Edición. 2002. 410 p.

ROMERO, J. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEORÍA Y PRINCIPIOS DE DISEÑO. Bogotá. Editorial Escuela Colombiana de ingeniería. Cuarta Edición. 2004. 1248p.

R+D CSIC. Humedales artificiales, una opción para tratar aguas residuales de pequeñas poblaciones (documento en línea). Bogotá, Colombia. Septiembre, 2001. (citado el 9 de noviembre, 2009). <http://www.ott.csic.es/rdcsic/rdcsicesp/rdqu19esp.htm>

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 20 ed., New York, 2001. 1368 p.

SAWYER, C.; McCARTY, P. Chemistry for Environmental Engineering. McGraw Hill, New York, 1996. 489 p.

Documentos Tomados de Paginas Web.

Acuerdos multilaterales ambientales. Convención de RAMSAR sobre humedales 20 p. Consultado en página web: http://www.culturaoasis.com/data/biblio/medio_ambiente/convenio_ramsar.pdf. 10/06/2010.

Aguas residuales Ecología y territorio. Consultado en página web: <http://jonathanhernandezlopez.wordpress.com/2010/05/19/aguas-residuales/>. 26/06/2010.

BAMBUBRASILEIRO. *Guadua angustifolia* Kunth (documento en línea). Río de Janeiro, Brazil. (Citado el 30 de octubre, 2009) <http://www.bambubrasileiro.com/arquivos/Guadua%20angustifolia%20-%20por%20Guznay.pdf>

Costa Rica rural. Humedales de Santa Fe. Consultado en página web: <http://www.ruralcostarica.com/fotos2.html>. 26/06/2010.

DECRETO 1594 DE 1984. Usos del agua y residuos líquidos. Consultado en página web: <http://www.fenavi.org/fenavi/admin/uploaded/file/Decreto-1594-1984.pdf>. 24/11/2010.

Garrels, R.M. y Christ, C.L. Minerals, Solutions, and Equilibria. London: Jones and Bartlett. 1990. Consultado en página web: http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/en/Reduction_potential#Standard_hydrogen_electrode. 03/08/2010.

GONZALES, J. La fitorremediación mediante humedales artificiales. Consultando en página web: <http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp?id=25006>. 26/06/2010.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Estudio nacional del agua (documento en línea). Bogota, Colombia. (Citado el 6 de noviembre, 2009). <http://www.ideam.gov.co/publica/ena/enatexto.pdf>

LAHORA, A. DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES: LA EDAR DE LOS GALLARDOS (ALMERÍA). Gestión de aguas del levante almeriense. 2001. 14 p. Consultado en la página web: http://www.google.com.co/#hl=es&source=hp&q=humedales+artificiales+lahora&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs_rfai=&fp=8f4b06ee508a7892. 15/062010.

LARA, J. DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES CON HUMEDALES ARTIFICIALES. Universidad politécnica del Cataluña. 1999. 122 p. Consultado en la página web: <http://www.aprchile.cl/pdfs/Humedales.pdf>. 15/06/2010.

REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS – 2000. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Ministerio de desarrollo económico. Bogota D.C. 2000. 198 p. Consultado en página web: <http://www.sciencepool.com.mx/PDFs/DATOS%20TEORICOS/sistema%20de%20potabilizacion.pdf>. 25/04/2010.

Parámetros físico-químicos: potencial oxi-reducción. Consultado en página web: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-redox.pdf>. 07/08/2010.

SALAS, E. ACTUALIDAD Y FUTURO DE LA ARQUITECTURA DE BAMBÚ EN COLOMBIA. Barcelona. Noviembre 2006. 410 p. trabajo de grado (Doctorado en construcción-restauración arquitectónica). Consultado de página web: http://www.tesisenxarxa.net/TDX-0205108-154624/index_cs.html#documents. 29/06/2010.

10. ANEXOS

10.1 Anexo 1: Definiciones

Afluente: Agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio, o algún proceso de tratamiento.

Aguas residuales municipales Agua residual de origen doméstico, comercial e institucional que contiene desechos humanos.

Ambiente aerobio Proceso que requiere o no es destruido por la presencia de oxígeno.

Ambiente anaerobio Proceso desarrollado en ausencia de oxígeno molecular.

Análisis Examen del agua, agua residual o lodos, efectuado por un laboratorio.

Bacteria Grupo de organismos microscópicos unicelulares, rígidos carentes de clorofila, que desempeñan una serie de procesos de tratamiento que incluyen oxidación biológica, fermentaciones, digestión, nitrificación y desnitrificación.

Biodegradación Degradación de la materia orgánica por acción de microorganismos sobre el suelo, aire, cuerpos de agua receptores o procesos de tratamiento de aguas residuales.

Carga orgánica Producto de la concentración media de DBO por el caudal medio determinado en el mismo sitio; se expresa en kilogramos por día (kg/d).

Carga superficial Caudal o masa de un parámetro por unidad de área y por unidad de tiempo, que se emplea para dimensionar un proceso de tratamiento ($m^3/(m^2 \text{ día})$, kg DBO/(ha día).

Coliformes Bacterias gram negativas de forma alargada capaces de fermentar lactosa con producción de gas a la temperatura de 35 o 37°C (coliformes totales). Aquellas que tienen las mismas propiedades a la temperatura de 44 o 44.5°C se denominan coliformes fecales. Se utilizan como indicadores de contaminación biológica.

Concentración Denomínase concentración de una sustancia, elemento o compuesto en un líquido, la relación existente entre su peso y el volumen del líquido que lo contiene.

Eficiencia de tratamiento Relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración en el afluente, para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico; normalmente se expresa en porcentaje.

Efluente Líquido que sale de un proceso de tratamiento.

10.2 Anexo 2: Datos del experimento

Datos de los caudales durante todas las semanas de muestreo

CAUDALES (L/día)					
		Humedal de Grava		Humedal de Arena	
Fecha	Hora	Entrada	Salida	Entrada	Salida
02/02/2010		149,8 305,3	144,0	97,9 311,0	51,8
09/02/2010		224,6 311,0	305,3	51,8 316,8	195,8
16/02/2010		265,0 299,5	276,5	311,0 305,3	247,7
18/02/2010	7:50	276,5 288,0	172,8	265,0 311,0	230,4
23/02/2010		247,7 293,8	253,4	253,4 305,3	247,7
02/03/2010		247,7 299,5	253,4	207,4 305,3	172,8
04/03/2010		230,4 311,0	224,6	247,7 322,6	218,9
09/03/2010		97,9 316,8	97,9	97,9 322,6	97,9
12/03/2010	7:30 8:00 9:00 10:00 10:20	282,2 282,2 178,6 178,6	282,2 282,2 178,6 172,8	311,0 334,1 345,6 339,8	0,0 46,1 80,6 103,7
15/03/2010	9:30	23,0 293,8	20,2	41,8 322,6	0,0
16/03/2010	7:30 7:40 7:50 7:51 8:00 8:17	115,2 316,8 172,8 293,8 293,8 276,5	103,7	77,8 288,0 288,0 0,0 270,7 276,5	28,8
19/03/2010	10:00	92,2	86,4	247,7	103,7

	10:05	299,5		305,3	
	11:23	253,4		270,7	
CAUDALES (L/día)					
		Humedal de Grava		Humedal de Arena	
Fecha	Hora	Entrada	Salida	Entrada	Salida
20/03/2010	9:30	316,8 74,9 380,2	74,9	316,8 167,0 380,2	97,9
23/03/2010		0,0 293,8		0,0 305,3	
24/03/2010	7:30	265,0 293,8	253,4	178,6 305,3	149,8
25/03/2010	10:20	195,8 305,3	190,1	149,8 299,5	126,7
27/03/2010	10:20	132,5 305,3	126,7	69,1 322,6	40,3
30/03/2010	8:00	282,2 322,6	270,7	311,0 328,3	288,0
05/04/2010	11:00	178,6 299,5	155,5	178,6 305,3	57,6
06/04/2010	7:30	172,8 311,0	195,8	155,5 293,8	161,3
08/04/2010	11:00	149,8	259,2	69,1	316,8
12/04/2010	10:30	63,4 311,0	69,1	51,8 305,3	23,0
	14:12	288,0	276,5	299,5	155,5
	15:05	276,5	253,4	282,2	172,8
13/04/2010	7:40	167,0	161,3	155,5	138,2
	7:50	299,5		311,0	
15/04/2010	15:30	259,2	241,9	230,4	207,4
	15:35	316,8		316,8	
20/04/2010	7:30	218,9 299,5	195,8	195,8 311,0	184,3
21/04/2010	12:30	155,5 311,0	80,6	155,5 305,3	40,3
22/04/2010	11:20	121,0 316,8	109,4	218,9 316,8	149,8
24/04/2010	11:00	132,5 316,8	115,2	144,0 316,8	115,2
27/04/2010	7:40	144,0 316,8	178,6	86,4 322,6	86,4

29/04/2010	11:20	126,7 316,8	149,8	172,8 322,6	184,3
CAUDALES (L/día)					
		Humedal de Grava		Humedal de Arena	
Fecha	Hora	Entrada	Salida	Entrada	Salida
11/05/2010	7:40	161,3 299,5	144,0	201,6 311,0	155,5
13/05/2010	8:20	0,0 305,3	40,3	40,3 305,3	109,4
14/05/2010	15:00	161,3 299,5	161,3	259,2 316,8	236,2
15/05/2010	10:00	201,6 305,3	201,6	230,4 305,3	195,8
18/05/2010	8:30	172,8 288,0	259,2	138,2 299,5	305,3
21/05/2010	9:00	207,4 305,3	207,4	167,0 293,8	126,7
28/05/2010	9:00	161,3 299,5	161,3	132,5 305,3	80,6
31/05/2010	11:00	195,8 311,0	184,3	57,6 311,0	0,0
01/06/2010	8:00	236,2 305,3	253,4	149,8 305,3	103,7
03/06/2010	11:20	213,1 311,0	201,6	190,1 305,3	149,8
05/06/2010	10:30	201,6 334,1	190,1	109,4 328,3	40,3
09/06/2010	9:05	121,0 316,8	92,2	80,6 334,1	34,6
10/06/2010	7:40	155,5 316,8	149,8	63,4 288,0	40,3
11/06/2010	8:25	184,3 322,6	184,3	149,8 311,0	132,5
15/06/2010	7:30	265,0 316,8	334,1	57,6 316,8	103,7

Datos del Aforo del caudal # 1

Aforo del caudal (L/día)					
		Humedal de Grava		Humedal de Arena	
Fecha	Hora	Entrada	Salida	Entrada	Salida
18/02/2010	7:50	276,5	172,8	265,0	230,4
	8:20	288,0	357,1	311,0	218,9
	8:30	276,5	299,5	265,0	218,9
	8:40	276,5	288,0	265,0	230,4
	8:50	288,0	265,0	265,0	230,4
	9:00	276,5	265,0	265,0	241,9
	9:10	288,0	265,0	265,0	288,0
	9:20	276,5	265,0	265,0	265,0
	9:30	288,0	265,0	265,0	265,0
	9:40	276,5	265,0	265,0	265,0
	9:50	276,5	276,5	265,0	265,0
	10:00	276,5	276,5	311,0	265,0
	10:10	276,5	276,5	184,3	265,0
	10:20	276,5	288,0	115,2	265,0
	10:30	276,5	276,5	115,2	265,0
	10:40	276,5	276,5	115,2	253,4
	10:50	276,5	265,0	97,9	230,4
	11:00	276,5	276,5	103,7	282,2
	11:10	270,7	276,5	97,9	270,7
	11:20	276,5	276,5	92,2	195,8
	11:30	270,7	270,7	92,2	184,3
	11:40	276,5	247,7	167,0	172,8
	11:50	270,7	276,5	57,6	178,6
	12:00	276,5	265,0	86,4	172,8
	12:10	276,5	259,2	92,2	149,8
	12:20	276,5	253,4	103,7	161,3
	12:40	270,7	218,9	305,3	178,6
	12:50	276,5	230,4	311,0	190,1
	13:00	265,0	230,4	299,5	184,3
	13:10	259,2	230,4	282,2	172,8
13:20	259,2	259,2	299,5	167,0	

	13:30	270,7	241,9	288,0	190,1
	13:40	259,2	253,4	270,7	201,6
	14:15	282,2	259,2	282,2	218,9
Aforo del caudal (L/día)					
Fecha	Hora	Humedal de Grava		Humedal de Arena	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
19/02/2010	14:20	270,7	265,0	276,5	224,6
	14:25	270,7	259,2	276,5	224,6
	14:30	270,7	253,4	276,5	230,4
	14:55	265,0	276,5	259,2	247,7
	15:00	265,0	270,7	259,2	247,7
	15:05	247,7	253,4	259,2	241,9
	15:10	253,4	253,4	259,2	230,4
	15:15	247,7	253,4	253,4	241,9
	8:30	201,6	172,8	34,6	46,1
	8:40	293,8	316,8	282,2	57,6
	8:45	293,8	299,5	276,5	51,8
	8:50	293,8	293,8	276,5	46,1
	8:55	293,8	293,8	282,2	57,6
	9:00	293,8	293,8	276,5	63,4
	9:10	293,8	293,8	276,5	69,1
	9:20	293,8	288,0	276,5	74,9
	9:30	299,5	293,8	282,2	86,4
	9:40	293,8	282,2	276,5	92,2
	9:50	299,5	288,0	276,5	103,7
	10:00	299,5	288,0	276,5	103,7

Datos del Aforo del caudal # 2

Aforo del caudal (L/día)					
		Humedal de Grava		Humedal de Arena	
Fecha	Hora	Entrada	Salida	Entrada	Salida
11/06/2010	8:25	184,3	184,3	149,8	132,5
	8:50	322,6	576,0	311,0	161,3
	9:00	322,6	460,8	316,8	218,9
	9:10	322,6	368,6	328,3	236,2
	9:20	316,8	339,8	311,0	265,0
	9:30	322,6	334,1	299,5	270,7
	9:40	322,6	334,1	305,3	265,0
	9:50	322,6	334,1	311,0	265,0
	10:00	316,8	316,8	305,3	259,2
	10:10	316,8	305,3	305,3	259,2
	10:20	316,8	305,3	311,0	259,2
	10:30	311,0	311,0	305,3	259,2
	10:40	311,0	311,0	305,3	253,4
	10:50	316,8	311,0	299,5	247,7
	11:00	316,8	311,0	299,5	241,9
	11:10	316,8	305,3	299,5	230,4
	11:20	311,0	299,5	299,5	230,4
	11:30	311,0	299,5	293,8	230,4
	11:40	311,0	293,8	299,5	230,4
	11:50	311,0	299,5	299,5	230,4
	12:00	311,0	305,3	293,8	224,6
	12:10	311,0	288,0	288,0	207,4
	12:20	316,8	276,5	288,0	207,4
	12:30	305,3	276,5	293,8	207,4
	12:40	311,0	293,8	293,8	207,4
	12:50	311,0	311,0	288,0	207,4
	13:00	305,3	299,5	282,2	207,4
	13:10	311,0	305,3	282,2	201,6
	13:20	311,0	293,8	282,2	207,4
	13:30	311,0	293,8	282,2	207,4
	13:40	305,3	311,0	259,2	207,4

	13:50	305,3	305,3	265,0	207,4
	14:00	311,0	305,3	259,2	207,4
	14:10	311,0	305,3	253,4	207,4
Aforo del caudal (L/día)					
		Humedal de Grava		Humedal de Arena	
Fecha	Hora	Entrada	Salida	Entrada	Salida
11/06/2010	14:20	299,5	305,3	253,4	207,4
	14:50	305,3	316,8	218,9	218,9
	15:00	311,0	311,0	218,9	218,9
	15:10	311,0	311,0	218,9	218,9
	15:20	299,5	305,3	207,4	213,1
	15:30	293,8	305,3	230,4	213,1
	15:40	299,5	293,8	230,4	207,4
	15:50	288,0	293,8	230,4	207,4
	16:00	288,0	288,0	230,4	201,6
	16:10	282,2	288,0	195,8	195,8
	16:20	288,0	288,0	207,4	195,8
	16:30	288,0	282,2	213,1	195,8
	16:40	288,0	288,0	213,1	195,8
	16:50	288,0	282,2	218,9	190,1
	17:00	288,0	288,0	213,1	195,8

- Datos tomados en la planta

pH

Fecha	Entrada	H. Grava	H. Arena
16/02/2010	6,61	7,27	6,11
25/02/2010	5,37	7,17	6,14
02/03/2010	6,48	7,25	6,4
09/03/2010	6,9	7,17	6,32
12/03/2010	6,87	7,24	6,43
16/03/2010	6,08	7,15	6,6
19/03/2010	6,71	7,21	6,48
24/03/2010	6,69	7,16	6,42
27/03/2010	6,09	7,12	6,48
06/04/2010	6,08	7,23	6,43
08/04/2010	6,16	7,17	6,64
13/04/2010	6,46	7,08	6,4
20/04/2010	6,29	7,02	6,35
22/04/2010	6,25	7,08	6,12
27/04/2010	5,27	7,1	6,6
29/04/2010	5,99	7,09	6,54
12/05/2010	6,03	6,87	6,39
15/05/2010	5,13	6,93	6,41
09/06/2010	6,44	6,81	6,49
10/06/2010	6,97	6,96	6,62

Temperatura

Fecha	Entrada (°C)	H. Arena (°C)	H. Grava (°C)
25/02/2010	22,5	22,5	23,2
02/03/2010	24,1	22,9	23,1
09/03/2010	21,8	22,3	22,5
12/03/2010	22	22,2	22,7
16/03/2010	22,5	22,3	23,3
19/03/2010	22,4	22,4	23,6
24/03/2010	23,1	22,7	23,5
27/03/2010	21,9	22,4	23
06/04/2010	24,2	23,9	21,1
08/04/2010	22	22	22
13/04/2010	22,4	22	22,2
20/04/2010	21,5	21,6	22,1
27/04/2010	25,4	24,3	24,3
29/04/2010	22,2	22	22,5
12/05/2010	23,3	22,6	23,3
14/05/2010	25,1	24,9	24,1
15/05/2010	24,1	22	22,9
18/05/2010	22,8	22,7	23,3
01/06/2010	23,6	22,5	23,3
09/06/2010	21,8	22,5	22
10/06/2010	22,2	21,5	21,8

Oxigeno disuelto

Fecha	H. Arena (mg O₂/L)	H. Grava (mg O₂/L)
08/04/2010	2,8	2,57
13/04/2010	2,05	2,5
20/04/2010	2,44	2,34
22/04/2010	2,14	2,16
27/04/2010	2,39	2,23
29/04/2010	2,3	2,26
12/05/2010	2,35	2,69
15/05/2010	2,75	2,88
18/05/2010	2,6	2,64
01/06/2010	3,01	3,04
09/06/2010	2,83	2,53
10/06/2010	3,92	3,13

Potencial Redox

Fecha	H. Arena (mV)	H. Grava (mV)
16/02/2010	178	163
25/02/2010	236	222
02/03/2010	185	176
09/03/2010	269	266
12/03/2010	226	207
16/03/2010	242	252
19/03/2010	184	153
24/03/2010	172	169
27/03/2010	163	172
06/04/2010	198	195
08/04/2010	164	141
13/04/2010	168	175
20/04/2010	179	183
22/04/2010	198	201
27/04/2010	158	130
29/04/2010	192	186
12/05/2010	196	190
14/05/2010	217	203
15/05/2010	263	212
18/05/2010	278	269
01/06/2010	206	198
09/06/2010	148	150
10/06/2010	200	199

- Datos de Laboratorio

Nitrógeno amoniacal

Fecha	Entrada (mg/L)	H. Grava (mg/L)	H. Arena (mg/L)
02/02/2010	33,6	16,8	5,6
09/02/2010	44,8	22,4	14,0
16/02/2010	37,8	30,8	7,0
23/02/2010	29,4	32,2	5,6
02/03/2010	37,8	30,8	4,2
09/03/2010	39,2	37,8	12,6
16/03/2010	35,0	26,6	14,0
24/03/2010	33,6	22,4	12,6
30/03/2010	11,2	22,4	15,4
06/04/2010	21,0	21,0	12,6
13/04/2010	29,4	15,4	9,8
20/04/2010	22,4	14,0	11,2
27/04/2010	22,4	14,0	8,4
11/05/2010	39,2	25,2	11,2
18/05/2010	23,8	19,6	8,4
01/06/2010	25,2	22,4	14,0
10/06/2010	33,6	14,0	5,6
15/06/2010			

Nitratos

Fecha	Entrada (mg/L)	H. Grava (mg/L)	H. Arena (mg/L)
02/02/2010	48,6	41,2	30,8
09/02/2010	29,3	9,9	13,1
16/02/2010	42,7	45,2	42,4
23/02/2010	50,0	31,0	27,0
02/03/2010	46,8	46,3	46,0
09/03/2010	36,0	37,6	53,9
16/03/2010	39,9	18,7	33,5
24/03/2010	30,3	34,1	40,6
30/03/2010	36,4	28,8	27,1
06/04/2010	34,7	26,4	33,1
13/04/2010	27,4	18,2	14,8
20/04/2010	20,0	23,7	19,0
27/04/2010	39,8	26,8	21,4
11/05/2010	43,6	37,4	32,9
18/05/2010	56,5	45,8	38,2
01/06/2010	35,4	32,3	36,5
10/06/2010	24,7	25,7	31,2
15/06/2010	3,2	2,9	3,0

Nitritos

Fecha	Entrada (mg/L)	H. Grava (mg/L)	H. Arena (mg/L)
02/02/2010			
09/02/2010	0,2600	0,1140	0,0286
16/02/2010	1,3270	1,1455	0,1173
23/02/2010	0,0865	0,0609	0,0269
02/03/2010	0,2216	0,0327	0,0108
09/03/2010	0,0194	0,0121	0,4956
16/03/2010	0,1155	0,0116	0,0090
24/03/2010	0,4566	0,0065	0,0066
30/03/2010	0,0051	0,0225	0,0219
06/04/2010	0,0894	0,0071	0,0093
13/04/2010	0,2389	0,0000	0,0002
20/04/2010	0,1063	0,0014	0,0038
27/04/2010	0,0422	0,0094	0,0088
11/05/2010	0,0967	0,0091	0,0002
18/05/2010	0,0000	0,0000	0,0145
01/06/2010	0,0036	0,0000	0,0004
10/06/2010	0,1936	0,0044	0,0000
15/06/2010	0,0	0,0	0,0

DQO

Fecha	Entrada (mg/L)	H. Grava (mg/L)	H. Arena (mg/L)
02/02/2010	53,6	2,2	0,0
09/02/2010	58,5	30,1	9,8
16/02/2010	35,3	21,4	7,2
23/02/2010	34,5	29,0	18,0
02/03/2010	31,9	21,2	11,1
09/03/2010	53,0	22,9	12,5
16/03/2010	40,5	21,7	12,3
24/03/2010	51,3	23,9	26,2
30/03/2010	19,9	15,3	8,5
06/04/2010	30,7	9,0	10,0
13/04/2010	37,4	12,3	7,6
20/04/2010	65,9	14,5	8,5
27/04/2010	39,8	15,7	10,2
11/05/2010	29,5	8,7	3,0
18/05/2010	29,1	14,0	14,0
01/06/2010	30,9	9,0	7,3
10/06/2010	79,3	8,7	7,3
15/06/2010	43,1	27,2	9,2

DBO₅

Fecha	Entrada (mg/L)	H. Grava (mg/L)	H. Arena (mg/L)
02/02/2010	29,2	1,9	2,1
09/02/2010	28,4	0,5	0,5
16/02/2010	27,4	5,5	1,6
23/02/2010	3,7	7,6	1,3
02/03/2010	6,8	15,1	2,2
09/03/2010	16,9	14,3	5,2
16/03/2010	9,7	15,5	6,7
24/03/2010	7,1	4,2	5,5
30/03/2010	5,0	3,6	1,5
06/04/2010	5,2	3,5	2,1
13/04/2010	10,5	0,5	0,4
20/04/2010	39,1	1,9	1,4
27/04/2010	17,9	0,6	0,8
11/05/2010	11,7	1,1	1,0
18/05/2010	1,9	1,3	1,4
01/06/2010	5,9	1,2	1,2
10/06/2010	15,9	2,5	1,5
15/06/2010	14,0	6,0	2,4

Pruebas microbiológicas

Pruebas microbiológicas					
Cuantificación de coliformes totales y <i>E. Coli</i> (UFC)					
Frecuencia: Cada 15 días.					
	Fecha	3ª Semana	5ª Semana	7ª Semana	9ª Semana
		16/02/2010	02/03/2010	16/03/2010	30/03/2010
Resultado de Coli total UFC/100 mL	Entrada (Pura)	Incontable	-----	-----	
	Entrada (Dil 10-1)	Incontable	-----	Incontable	2120
	Entrada (Dil 10-2)	9300	700	1500	300
	Entrada (Dil 10-3)	-----	0	2000	0
	S. Grava (Pura)	Incontable	-----	-----	
	S. Grava (Dil 10-1)	2000	-----	1480	520
	S. Grava (Dil 10-2)	100	300	800	0
	S. Grava (Dil 10-3)	-----	0	0	0
	S. Arena (Pura)	Incontable	-----	-----	
	S. Arena (Dil 10-1)	310	-----	900	100
	S. Arena (Dil 10-2)	400	200	100	0
	S. Arena (Dil 10-3)	-----		0	0
Resultado de E-Coli total UFC/100 mL	Entrada (Pura)	Incontable	-----	-----	
	Entrada (Dil 10-1)	Incontable	-----	Incontable	40
	Entrada (Dil 10-2)	4600	100	300	0
	Entrada (Dil 10-3)	-----	0	0	0
	S. Grava (Pura)	Incontable	-----	-----	
	S. Grava (Dil 10-1)	1120	-----	240	70
	S. Grava (Dil 10-2)	0	0	0	0
	S. Grava (Dil 10-3)	-----	0	0	0
	S. Arena (Pura)	Incontable	-----	-----	
	S. Arena (Dil 10-1)	40	-----	110	0
	S. Arena (Dil 10-2)	200	0	0	0
	S. Arena (Dil 10-3)	-----	0	0	0

10.3 Anexo 3: Registro fotográfico



Desarenador (Pretratamiento del agua residual)

Planta de tratamiento de aguas residuales, Universidad Tecnológica de Pereira.



Planta de tratamiento Universidad Tecnológica de Pereira.



Planta de tratamiento y unidades experimentales



Equipo para medir pH, OD, P. Redox, Temperatura.



Lugar de toma de muestras de los efluentes



Unidades experimentales, Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Planta de tratamiento de aguas residuales. Universidad Tecnológica de Pereira.